

学号： 222040156

学校代码： 10336

密级：

杭州电子科技大学

硕士学位论文

(专业学位)



论文题目： 面向工商业储能的边缘侧能量管理
系统架构与老化感知优化调度研究

作者姓名： 陈以诺

指导教师： 陈科明 教授

专业学位类别： 电子信息

专业领域： 新一代电子信息技术
(含量子技术等)

所在学院： 电子信息学院

完成时间： 2026 年 5 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

面向工商业储能的边缘侧能量管理系统架构与
老化感知优化调度研究

研 究 生： 陈以诺

指导教师： 陈科明 教授

2026 年 5 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

**Research on Edge-Side Energy Management
System Architecture and Aging-Aware
Optimal Dispatch for Commercial and
Industrial Energy Storage**

Candidate: Yinuo Chen

Supervisor: Prof. Keming Chen

May, 2026

杭州电子科技大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：陈以诺 日期：2026年5月30日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署单位名称仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：陈以诺 日期：2026年5月30日

指导教师签名：陈科明 日期：2026年5月30日

摘要

针对工商业储能边缘侧能量管理系统在异构设备接入、策略灵活配置和边缘算力受限条件下寿命约束经济调度方面存在的问题，本文围绕系统架构、低代码组态机制和老化感知优化调度方法开展研究，设计并实现了一套面向工商业储能场景的边缘侧能量管理系统。

针对传统系统中底层驱动与上层业务逻辑耦合严重、扩展性不足的问题，构建了基于 RK3568 异构计算平台的软硬件解耦架构，通过主控-从控逻辑隔离、全局共享内存和标准化数据总线，实现了设备通信、数据服务与业务决策的分层解耦。针对现场异构设备接入重复开发量大和策略切换依赖固件修改的问题，提出了基于 JavaScript 对象表示法的异构设备低代码组态接入机制，构建了异构设备描述模型和数据上报通用模型，并结合边活动网图谱理论实现策略逻辑的图谱化表达与静态映射执行。实验结果表明，对于系统已注册过协议的新异构设备，该架构可将接入适配时间缩短 90%以上，策略在 1s 内实现低代码热切换，且无需增加固件核心代码。

针对锂离子电池全生命周期衰退建模复杂和边缘侧优化效率受限的问题，构建了融合工况动作编码的 Transformer-TCN 双流混合预测模型 HybridSOHModel，并提出了一种基于自适应分段线性迭代的单步边际软硬件协同优化策略。实验结果表明，部署于边缘 NPU 的模型平均绝对误差为 0.0262，均方根误差为 0.0479，单次推理平均时延仅为 4.38ms；所提优化方法在平均耗时约 82ms 的低算力开销下，达到无算力约束下参考上界收益的 99.56%。经 3000 组随机工况与典型离网场景仿真，该优化方法保持了 99.96%的极值逼近成功率，且在单步净利润较传统固定 1.0C 倍率策略平均提升 14.11 元的基础上，电池健康状态衰减量平均减缓 46%。

研究表明，本文提出的方法能够在不依赖云端算力的条件下，实现异构设备接入、策略动态重构与寿命约束经济调度的协同优化，为资源受限边缘场景下工商业储能系统的工程应用提供了可行方案。

关键词：工商业储能，边缘侧能量管理系统，低代码组态，电池健康状态，优化调度

ABSTRACT

To address the existing problems of edge-side Energy Management Systems for commercial and industrial energy storage regarding heterogeneous device access, flexible strategy configuration, and life-constrained economic dispatch under limited edge computing power, this thesis conducts research centered on system architecture, low-code configuration mechanisms, and aging-aware optimal dispatch methods. Ultimately, this thesis designs and implements an edge-side EMS oriented towards C&I energy storage scenarios.

Aiming at the severe coupling between underlying drivers and upper-level business logic as well as the insufficient scalability in traditional systems, a hardware-software decoupled architecture based on the RK3568 heterogeneous computing platform is constructed. Through master-slave logical isolation, global shared memory, and a standardized data bus, the layered decoupling of device communication, data services, and business decision-making is realized. To address the issues of extensive repetitive development required for integrating on-site heterogeneous devices and the reliance of strategy switching on firmware modifications, a low-code configuration access mechanism for heterogeneous devices based on JavaScript Object Notation is proposed. A heterogeneous device description model and a universal data reporting model are constructed. Combined with the Activity On Edge network theory, the graph-based expression and static mapping execution of strategy logic are realized. Experimental results show that for new heterogeneous devices whose protocols have already been registered in the system, this architecture can reduce the adaptation time for integration by more than 90%, and strategies can achieve low-code hot-swapping within 1 second without adding core firmware code.

Targeting the complexity of full-lifecycle degradation modeling for lithium-ion batteries and the limited optimization efficiency on the edge side, a Transformer-TCN dual-stream hybrid prediction model (HybridSOHModel) integrating operating-condition action encoding is constructed, and a single-step marginal hardware-software collaborative optimization strategy based on adaptive piecewise linear iteration is proposed. Experimental results indicate that the model deployed on the edge Neural Processing Unit achieves a Mean Absolute Error of 0.0262 and a Root Mean Square Error of 0.0479, with an average single-inference latency of only 4.38 ms. The proposed optimization method reaches 99.56% of the reference upper-bound revenue without computing power constraints, under a low computational overhead with an average time consumption of approximately 82 ms. Simulated through 3,000 sets of random operating conditions and typical off-grid scenarios, the optimization method maintains a 99.96% success rate in extreme value approximation. Furthermore, while

achieving an average increase of 14.11 RMB in single-step net profit compared to the traditional fixed 1.0C-rate strategy, it delays battery State of Health degradation by an average of 46%.

The research demonstrates that the proposed methods can achieve the collaborative optimization of heterogeneous device access, dynamic strategy reconfiguration, and life-constrained economic dispatch without relying on cloud computing power. This provides a feasible solution for the engineering application of commercial and industrial energy storage systems in resource-constrained edge scenarios.

Keywords: Commercial and Industrial Energy Storage, Edge-side Energy Management System, Low-code Configuration, State of Health, Optimal Dispatch

目录

摘要.....	I
ABSTRACT	II
目录.....	IV
1 绪论.....	1
1.1 课题的研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状分析.....	3
1.2.1 边缘侧 EMS 研究现状.....	3
1.2.2 异构设备低代码接入研究现状.....	4
1.2.3 边缘侧电池老化感知优化调度研究现状.....	6
1.3 课题研究内容与章节安排.....	7
2 面向工商业储能的边缘侧 EMS 的架构设计.....	10
2.1 工商业储能边缘侧 EMS 总体设计.....	10
2.1.1 需求分析.....	10
2.1.2 总体框架.....	11
2.2 边缘侧硬件平台选型与设计.....	13
2.2.1 核心计算单元选型与性能评估.....	13
2.2.2 异构通信接口与外设电路设计.....	14
2.3 边缘侧软件架构设计.....	16
2.4 工商业储能边缘侧 EMS 上位机设计.....	21
2.4.1 Web 端上位机设计.....	21
2.4.2 本地端上位机设计.....	22
2.5 系统展示.....	23
2.5.1 工商业储能边缘侧 EMS 展示.....	23
2.5.2 上位机展示.....	25
2.6 本章小结.....	28
3 基于 JSON 与 AOE 图谱的低代码组态机制实现.....	29
3.1 异构设备接入与策略定义所存在的问题分析.....	29

3.1.1	设备驱动开发的“烟囱式”耦合问题	29
3.1.2	控制逻辑的僵化与非标准化	30
3.2	异构设备组态化接入技术	31
3.2.1	基于 JSON 协同定义的设备接入与数据上报架构	31
3.2.2	异构设备通用描述模型的 JSON 规范定义	33
3.2.3	异构设备数据上报通用模型的 JSON 规范定义	36
3.2.4	动态协议栈的解析与运行时实例化机制	38
3.3	基于 AOE 有向图的策略组态与静态映射机制	42
3.3.1	AOE 网的数学模型定义	42
3.3.2	策略控制通用描述模型的 JSON 规范定义	44
3.3.3	基于拓扑排序的静态映射与算子库构建	45
3.4	系统实现案例与功能验证	48
3.4.1	实验平台构建与测试环境配置	48
3.4.2	异构设备低代码接入功能验证	49
3.4.3	AOE 策略引擎的动态组态与执行验证	55
3.5	本章小结	57
4	面向边缘侧嵌入式环境的工商业储能电池老化感知优化调度策略	59
4.1	边缘侧能量管理的矛盾与约束分析	59
4.1.1	复杂电化学老化机理与边缘侧有限算力的模型鸿沟	59
4.1.2	脱网约束下的沉没成本陷阱与单步边际损耗博弈	60
4.2	基于 RK3568 异构计算架构的储能电池 SOH 在线预测模型	61
4.2.1	数据集选取与特征工程	61
4.2.2	融合工况特征的双流混合模型构建	63
4.2.3	面向 RK3568 NPU 的模型部署实现	65
4.3	基于自适应分段线性迭代寻优的边缘侧单步边际寻优策略	66
4.3.1	物理净利润目标函数的构建与老化成本量化	66
4.3.2	功率可行域界定与自适应分段线性迭代寻优	67
4.3.3	基于 AOE 网的储能电池老化感知优化调度策略编排	70
4.4	算例分析与边缘端部署验证	71
4.4.1	实验平台与数据说明	71

4.4.2	SOH 预测模型推理性能评估	72
4.4.3	功率寻优策略的对比分析	77
4.5	本章小结	81
5	总结与展望	83
5.1	全文总结	83
5.2	未来的工作展望	84
	致谢	86
	参考文献	87
	附录	94

1 绪论

1.1 课题的研究背景和意义

随着全球气候变化问题不断严峻，当今全球社会普遍达成实现“双碳”目标的共识，从以化石能源为主的能源体系，正朝向以风电、光伏等可再生能源为主的新型清洁能源体系，朝向低碳化能源结构演变是本轮能源系统变革的关键^[1]。但由于可再生能源具有明显的随机性、波动性与间歇性等一系列特征，这将会给电力系统在源网荷储各个环节的实时供需平衡带来极大的压力，传统的“源随荷动”调度模式已经不适合市场上新型清洁能源接入的需求^[2]。为提升电网对可再生能源的承载能力，储能技术凭借其能量具有独特的时空平移特性，成为新型电力系统构建不可或缺的一部分，其不仅能够有效减少新型清洁能源不稳定的问题，还能在电网需要的时候，辅助调节供电量并保持电网频率稳定，使得整个电力系统更加的灵活可靠^[3,4]。

受上述因素的影响，近年来全球的储能市场需求激增。由于各地区所处的发展阶段与基础条件不尽相同，当前全球储能市场在技术路线选择及应用场景部署上日益多样化。根据中关村储能产业技术联盟（China Energy Storage Alliance, CNESA）统计，截至 2025 年初，在全球已投运的电力储能项目中，新型储能的占比持续提升，其中锂离子电池以约 97.5% 的市场份额，在新型储能中占据绝对的主导地位，如图 1.1，各项产业数据均表明新型储能已实质性跨越前期的试验验证期，全面步入规模化商业应用的阶段^[5]。

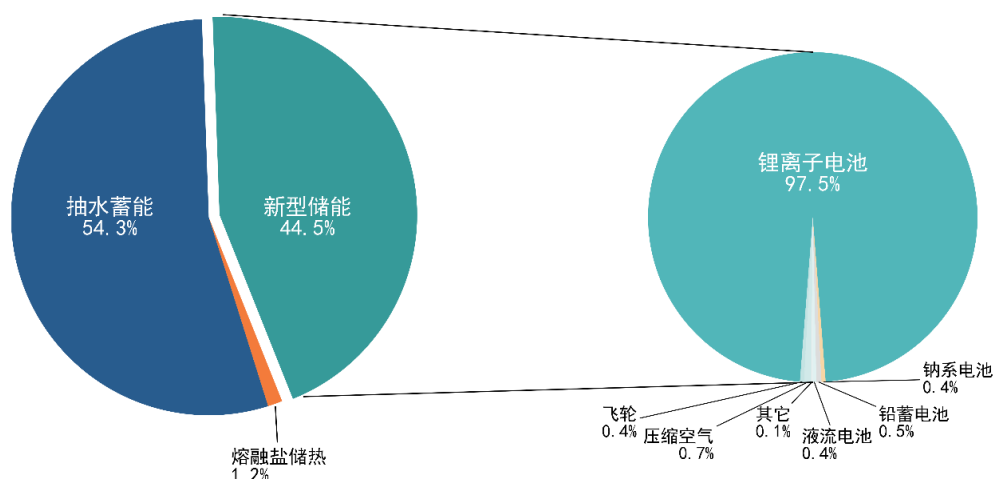


图 1.1 全球电力储能市场累计装机规模

根据 2025 年 CNESA 储能产业研究白皮书中新增装机规模占比的数据显示，全球储能市场新增投运的电力储能项目装机规模已经超过 80GW，相较之前增长约 60%，在这些新增的储能项目中，新型储能占比达到 90%，并且增长主要集中在中国、美国以及欧洲这三个主要国家和地区，其增长量之和占全球的 90%。具体来看，美国因其成熟的电力市场规则与政府

提供的减税优惠，使得大型储能和工商业储能的建设快速增长；欧洲则是因其对能源安全感不足，导致户用储能与工商业储能的需求快速增长，呈现出分散化的特点，如图 1.2 所示。

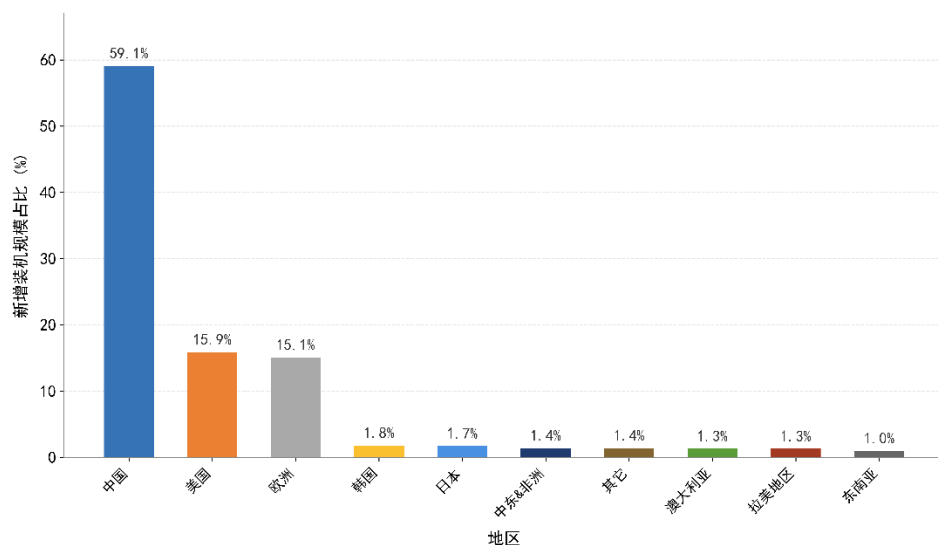


图 1.2 全球新增投运新型储能项目的地区分布图

从国内市场来看，我国新型储能产业在“十四五”期间实现高速发展，现在已经成为全球最大的单一市场。早在 2024 年底，我国可再生能源的装机的比重便越过 50%的关口，历史性地超越传统火电。这种能源结构的实质性逆转，大幅拉升电力系统对灵活性调节资源的需求，直接带动新型储能装机规模持续攀高^[6]，与此同时，行业的发展逻辑也日趋成熟，正从初期的单侧政策扶持，过渡到由“技术创新”与“市场机制”共同主导的双轨并行阶段^[7]。最新统计表明，截至 2025 年末，全国储能总装机量已达 213.3GW，较上年增长 54%，其中新型储能的表现尤为突出，累计装机量冲高至 144.7GW，同比增幅高达 85%，至此中国新增新型储能累计装机规模首次突破 100GW，累计装机规模已经是“十三五”时期末的 45 倍，如图 1.3 所示。

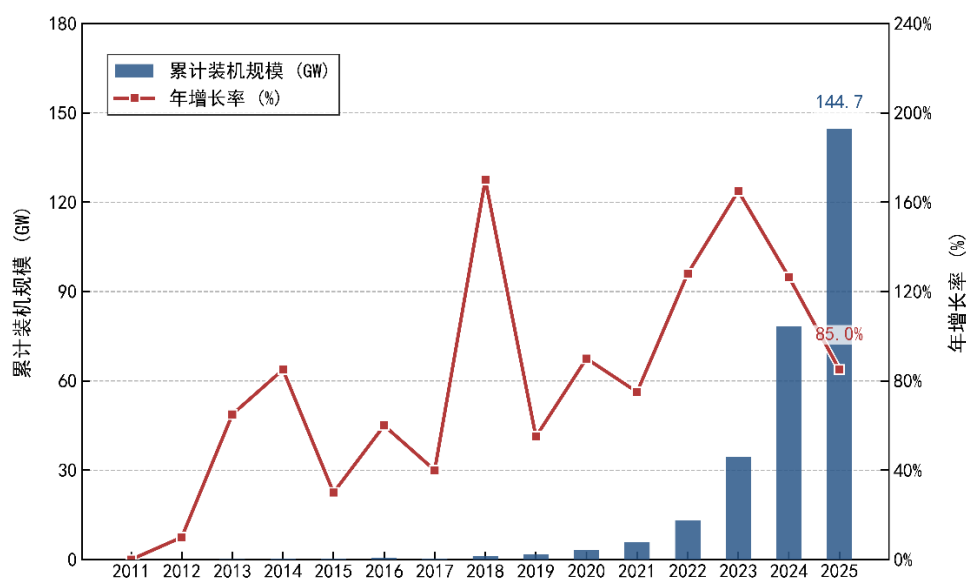


图 1.3 中国新型储能市场累计装机规模图

从技术路线来看,虽然像压缩空气、液流电池这类能长时间存储电量的技术不断进步,然而当前市场上,超过 95%的储能设备仍主要采用锂离子电池,其不仅在电源侧和电网侧占据主导,在工商业等用户侧场景中的占比亦呈现稳步上升趋势。

我国储能行业快速发展离不开国家的政策与市场的推动^[8],近年来,国家陆续发布诸如《关于加快推动新型储能发展的指导意见》《“十四五”新型储能发展实施方案》等规划文件,承认储能可以作为独立的市场主体来运营,并对储能行业设定在 2030 年能够全面依靠市场推动的发展目标。面对到来的“十五五”阶段,我国储能市场将会进入一个追求更高质量的发展阶段,在工商业储能领域的政策导向将会从原本的规模扩张到价值创造方向转变,这种转变会带来以下几种明显的趋势^[9]。

峰谷价差拉大与分时电价的机制完善,国家发展和改革委员会及各地政府持续优化分时电价政策,要求峰谷价差要在一定比值以上,这一机制直接造就当前工商业储能最主要的盈利模式,即工商业储能的峰谷套利空间;从“建设期”转向“全生命周期”的管理,行业竞争的加剧促使关注点从初始投资成本(Capital Expenditure, CAPEX)转向全生命周期度电成本(Levelized Cost of Energy, LCOE),这对工商业储能边缘侧能量管理系统(Energy Management System, EMS)的实时策略提出更高要求,即如何在保证电池寿命与安全的前提下,通过智能算法实现收益最大化;需要定义一个规范的标准储能系统,由于储能系统涉及电池管理系统(Battery Management System, BMS)、储能变流器(Power Conversion System, PCS)、温控及消防等多个子系统,不同厂商的通信协议与寄存器定义缺乏统一标准,并且储能系统所在的环境也十分复杂,即如何实现工商业储能边缘侧 EMS 快速适配不同场景。

总而言之,工商业储能系统正处在一个关键转折点,传统边缘侧 EMS 已经无法适应现有电费计价方式与设备种类的复杂化,因此需要研发一款具有高实时性、高适应性、高可靠性及智能优化能力的工商业储能边缘侧 EMS。这一背景为本课题关于工商业储能边缘侧 EMS 架构设计与优化调度策略的研究提供坚实的依据。

1.2 国内外研究现状分析

1.2.1 边缘侧 EMS 研究现状

边缘侧 EMS 是工商业储能系统的控制核心,主要功能包括设备数据的采集、系统状态的感知、设备的实时控制以及和云端的协同,通过对储能电池这类分布式能源(Distributed Energy Resources, DER)的高效管理,来保证供电的稳定性,同时让电网更加可靠^[10]。国外在分布式储能 EMS 领域起步较早,技术发展主要形成下述两种不同风格:

(1) 以西门子(Siemens)、ABB、施耐德(Schneider)为代表的工业巨头,其拥有一套专业并且可靠的硬件架构,例如可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、高性能工控机,以及专门的软件系统,例如 EcoStruxure、Microgrid Management System。搭建一套功能强大、稳定能够处理复杂任务的系统,能够精确管理发电、储能和用电,保证电网平稳运行^[11,12]。但这类系统过于封闭,并且搭建成本过高,需要配置一套的硬件设备,

例如数据采集装置、控制器、网关都需要单独购买，对于中小规模的工商业储能用户而言，其投资回报率（Return on Investment, ROI）充满不确定性，并且难以通过单一系统去适配不同异构设备，灵活性不足^[13,14]。

（2）以特斯拉（Powerwall Gateway）为代表的新兴技术工业，其使用嵌入式 Linux 平台，通过空中下载（Over-the-Air, OTA）技术实现功能升级，但系统内部的核心规则和操作方式是完全封闭的，无法去连接或控制其他品牌的设备，缺乏兼容能力^[15]。

国内边缘侧 EMS 的早期研究多基于微控制单元（Microcontroller Unit, MCU），例如 STM32 系列开发板级控制器，其主要功能就是数据透传与根据简单条件进行控制。而近些年随着国产芯片技术的发展，基于 ARM 架构，例如瑞芯微 RK 系列、NXP i.MX 系列的边缘侧 EMS 逐渐成为主流。以国电南瑞、国电南自为代表的企业，主要实现一种符合 IEC 61850 标准的专用控制设备，其核心目标是让微电网能在并网和离网之间安全稳定运行。

在学术界，则更多关注算法与策略的优化，例如利用粒子群算法、模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）等解决多目标优化问题^[16]。

但现有国内的边缘侧 EMS 在开发过程中普遍存在“烟囱式”的问题，即系统的底层驱动和上层业务逻辑紧紧地绑定在一起，一旦因为某个新项目更换不同的设备，往往需要进行大量底层的代码重构，工程量巨大。

随着现在国内电网复杂度、设备种类复杂度与工程部署快捷部署需求的不断提升，传统的边缘侧 EMS 已无法满足目前的系统环境，传统边缘侧 EMS 将削峰填谷、需量控制等策略硬编码为嵌套的条件判断语句，导致系统在面对电价政策变更或扩容需求时，缺乏灵活性与适应性^[17,18]。如表 1.1 所示，其总结当前国内外主流 EMS 产品的技术特征与局限性^[19]。

表 1.1 国内外主流微电网 EMS 产品技术特征对比表

厂商/类型	硬件平台	软件架构	策略开发方式	工程应用局限性
西门子/ABB	PLC/工控机	专有组态软件	图形化/脚本定制	成本高，依赖专用协议，硬件集成度低
国电南瑞/南自	专用控制器	嵌入式 Linux/VxWorks	C/C++硬编码	需针对场景定制开发，灵活性不足
传统边缘侧 EMS	MCU/低端 ARM	裸机/RTOS	过程导向编程	驱动与策略耦合严重，难以热切换

1.2.2 异构设备低代码接入研究现状

尽管市场需求激增，但工商业储能系统的规模化落地仍受制于设备层的“数据异质性”难题。储能系统涉及电池管理系统、储能变流器、温控及消防等多个子系统，不同厂商的通信协议与寄存器定义缺乏统一标准，导致边缘侧 EMS 在工程实施中面临严重的“孤岛效应”^[20,21]。设备一旦发生变化，点位出现变更，所对应的控制逻辑就需要进行调整，对应的工商业储能策略就需要重新部署，大大地增加开发成本与调试周期^[22]。

针对上述问题，国内外学者与工程界在标准化协议、软件设计模式以及新型组态技术等方面进行广泛探索。为解决设备异构性问题，电力行业提出 IEC 61850 标准。该标准通过定义变电站配置语言（Substation Configuration Language, SCL）和自我描述的对象数据模型，

实现不同厂商智能电子设备（Intelligent Electronic Device, IED）之间的互操作性^[23]。IEC 61850 利用面向通用对象的变电站事件（Generic Object Oriented Substation Event, GOOSE）和采样值（Sampled Value, SV）报文实现信息的快速交互，并通过 SCL 文件配置系统功能，在一定程度上实现配置与实现的分离^[24]。但 IEC 61850 通信协议过于复杂，需要高性能硬件，所以主要适用于大型变电站中，并不适合工商业储能需要快速、低成本接入的场景。

清华大学团队提出的即插即用软件框架，采用 Bridge（桥接）模式将核心计算模块与接口模块分离，来降低边缘侧 EMS 软件的耦合度，核心模块只需调用定义好的统一接口（如 CEMSImp1），而具体的协议实现（如 API 或标准化文件）则由子类完成。这种方法在编译层面实现模块解耦，使得核心算法可以适配不同的 EMS 系统^[20]。但是，它仍然依赖于 C++ 类的继承与多态，针对新的设备或协议仍需编写新的子类代码并重新编译链接，并且只针对边缘侧 EMS 与上位机的数据交换适配，没有真正实现异构设备接入运行时的低代码配置。

近年来，低代码开发平台（Low-Code Development Platform, LCDP）在 IT 领域兴起，其核心理念是通过图形化界面和声明式模型来替代传统编码。文献指出，低代码平台通常利用领域特定语言（Domain-Specific Modeling Language, DSML）和模型驱动工程（Model-Driven Engineering, MDE）技术，将业务逻辑抽象为可视化的模型^[25]。在工业控制领域，部分研究开始尝试将这种思想引入 EMS。例如，有研究设计基于混成控制理论的控制组态技术，利用边活动网（Activity On Edge, AOE）对控制策略进行建模。AOE 将控制过程抽象为节点（事件）和有向边（动作）的组合，用户可以通过配置 AOE 图谱来实现策略的自定义。浙江大学团队提出的嵌入式能量管理系统（Embedded Energy Management System, EEMS）是一个典型的代表，该系统采用基于 AOE 的控制组态技术，实现策略的通用开发，并结合自动微分技术构建边缘优化求解器，解决边缘侧环境下复杂数学计算的难题^[21,47]，但其对于下挂异构设备并没有实现低代码的接入，并且依赖于上位机部分的处理，在具体的边缘侧实现机制上，如何将复杂的图谱模型高效映射为资源受限芯片上的 C 语言原子操作，并对应控制到各个设备的具体点位上，以及如何构建轻量级的异构设备描述模型以配合策略图谱，仍需深入研究。此外，针对特定领域（如大型电站）的复杂性，还有研究提出基于 D-SPADES 的方法，这是一种专门针对 EMS 应用程序开发的模型驱动工程方法。它定义特定领域的建模语言，允许工程师使用熟悉的方块图符号来描述控制逻辑，并通过转换模板自动生成 C++ 或 Fortran 源代码，从而弥合高层设计模型与底层实现代码之间的鸿沟^[22]，但是对于工商业储能电站这一类微电网型架构，该方法在计算开销上存在冗余，并不适合轻量化的部署。

异构设备低代码接入研究现状总体分析情况如下表 1.2 所示

表 1.2 现有异构设备接入与能量管理开发技术方案对比分析表

技术方案	优势	局限性
标准化协议 (如 IEC61850)	实现不同厂商智能电子设备间的互操作性，在一定程度上实现配置与实现的分离。	协议栈庞大且复杂，硬件资源要求高，配置门槛高，不适合成本敏感且资源受限的工商业轻量化网关。

续表 1.2 现有异构设备接入与能量管理开发技术方案对比分析表

技术方案	优势	局限性
软件设计模式 (如桥接模式)	在编译层面实现模块解耦, 使得核心算法可以在不同的 EMS 平台之间进行移植。	仍依赖于 C++ 类的继承与多态, 针对新设备或协议需编写新子类并重新编译, 未真正实现运行时的低代码配置。
控制组态技术 (如基于 AOE 网)	实现策略的通用开发, 并可结合自动微分技术构建边缘优化求解器。	未完全实现下挂异构设备的低代码接入, 依赖上位机处理, 复杂图谱在受限芯片上的底层 C 语言映射机制仍需深入研究。
模型驱动工程 (如 D-SPADES)	有效弥合高层设计模型与底层实现代码之间的鸿沟。	针对工商业储能微电网型架构显得过于冗余, 不适合现场的轻量化部署需求。

1.2.3 边缘侧电池老化感知优化调度研究现状

现有的工商业储能边缘侧 EMS 过于依赖云端, 需要云端提供强大的计算能力和精准的用电预测来对应根据指令来执行策略。但在一些网络环境不稳定的工商业场景中, 一旦脱离云端的指令, 对应的控制策略就无法有效执行^[26]。并且目前的边缘侧 EMS 控制策略多为阈值触发或执行一次或两次的充放电循环, 并没有考虑电池寿命衰退。因为锂离子电池的健康状态 (State of Health, SOH) 呈现出非线性衰减特征, 使用高倍率的放电, 虽然能在短期内获得更大的利益, 但是同样也会损害电池寿命, 加速活性锂损耗与内阻增长, 从而导致电池折旧成本的显著上升^[27]。因此对于工商业储能边缘侧 EMS 进行锂离子电池的健康状态预测以及对应的策略调优就显得格外重要。

早期的电池健康状态研究主要依赖电化学机理模型 (Electrochemical Models, EM) 与等效电路模型 (Equivalent Circuit Models, ECM) 这两类。

以伪二维 (Pseudo-Two-Dimensional Model, P2D) 模型为代表的 EM, 其用一套复杂的数学公式来模拟电池内部锂离子的流动和化学反应^[28,29], 非常精确的描绘电池内部的锂离子传输与电化学反应动力学机制, 但问题在于其包含大量相互耦合的非线性偏微分代数方程, 如果部署在边缘侧设备上, 还可能因为计算开销过大从而阻塞 EMS 底层的高频实时保护线程, 所以并不适合在边缘侧 EMS 上部署^[30]。相比之下, ECM 通过电阻、电容等电路元件模拟电池, 仅关注电池外部的电压电流表现, 具有模型简单、计算效率高、参数易于辨识与获取等优势^[31], 在工程上被广泛使用。但其主要缺点是过度依赖安时积分法 (Coulomb Counting) 进行初值迭代, 这种方式不仅容易受到传感器漂移所产生的累积误差影响, 而且还更难以适应电池老化后期出现的非线性衰退现象, 导致管理精度越来越差。

随着近年来人工智能的快速发展, 诸如卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN)、时间卷积网络 (Temporal Convolutional Network, TCN)、长短期记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM) 及 Transformer 的数据驱动电池状态评估方法正在不断涌现。部分学者通过改进 LSTM 的输入输出结构, 并结合多通道充电曲线, 成功实现对容量回升等复杂现象中长期依赖关系的有效捕捉^[32]。并且大量基于长周期循环数据的实验证明, 相较于传统的支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 等浅层机器学习算法, 深度递归网络 (如

LSTM-RNN) 会具备更好的时序学习与预测能力^[33]。为进一步处理长序列的电池老化数据并发现其中隐藏的全局特征, 研究者引入 Transformer 架构, 其自注意力机制 (Self-Attention), 能够让模型在退化序列中并行提取深层语义信息, 从而大幅提升电池剩余使用寿命 (Remaining Useful Life, RUL) 的预测精度与鲁棒性^[34,35]。

但现有的研究多依赖云端的高算力环境, 忽略复杂的网络对硬件算力的要求, 难以直接进行边缘侧部署, 需引入模型压缩或轻量化网络来适应算力需求。此外, 现有边缘侧模型只能根据已有的电压、电流数据, 得出当前的电池健康状况^[36], 无法回答未来不同的功率调度指令所带来的电池老化程度这一类问题, 因此这种模型无法直接应用于需要主动、实时优化调度的工商业储能边缘侧 EMS 中。

目前 EMS 架构正在由云端集中决策向边缘侧智能自治转型。在边缘侧部署高精度求解算法将会面临着算力受限的挑战。尽管目前嵌入式 AI 芯片 (如 RK3568 等) 已内置 NPU, 但无法支持目前主流算子, 尤其是广泛使用的循环神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN)/LSTM 类模型, 因其串行计算特性将会导致模型无法利用边缘侧 NPU 的并行矩阵计算能力, 从而退回至 CPU 运行, 导致内存长时间占用^[37]。

早期的储能调度策略多为基于静态规则 (Rule-based) 或仅考虑峰谷价差的经济模型^[38], 往往忽视了不同放电倍率对电池寿命的非线性损耗程度。随着对储能资产全生命周期价值认识的加深, 现有研究逐渐将老化成本纳入目标函数, 常采用雨流计数法量化循环寿命损耗, 并结合混合整数线性规划 (Mixed-Integer Linear Programming, MILP)、动态规划 (Dynamic Programming, DP) 或元启发式算法, 如粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO)、遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 开展多时段的全局联合寻优策略^[39-41]。然而, 将上述面向云端充沛算力设计的经典方法直接下沉至边缘侧嵌入式平台时, 面临着预测视界缺失导致全局优化模型失效的问题, 传统的多时段全局寻优高度依赖对未来长周期电价与负荷的精准预测, 在工商业边缘侧弱网或脱网自治环境下, 边缘侧 EMS 往往无法稳定获取未来的高精度预测序列, 致使全局优化模型失去数据支撑, 系统调度被迫降维为仅基于当前状态的单步实时决策与边际损耗博弈。

综上所述, 当前工商业储能边缘侧 EMS 的关键问题是如何在缺乏长周期预测的约束下, 构建融合实时边际老化成本的单步评价机制, 并在较低的异构算力开销下, 稳健实现短期套利与设备寿命的动态平衡。

1.3 课题研究内容与章节安排

在工商业储能产业快速发展的背景下, 边缘侧 EMS 面临的异构设备碎片化、控制策略组态僵化以及边缘侧算力受限等一系列核心痛点。本课题并不仅仅是简单的系统集成, 而是在资源受限的边缘侧设备上通过软硬件解耦架构、低代码组态机制以及基于老化感知的优化调度策略, 构建一套能够适应复杂现场环境, 且具备自治能力的工商业储能边缘侧 EMS。

第二章详细介绍本课题设计的一套基于 RK3568 平台的软硬件深度解耦边缘侧 EMS 架构与其内部的各个模块工作分配。硬件上,充分利用 RK3568 的计算特性与外设资源,设计具备掉电保护与多路隔离通信接口等功能的工业级网关,为边缘计算提供结实的硬件基础。软件上,创新性地设计主控-从控逻辑隔离的分布式架构,利用全局共享内存与标准化数据总线,将底层的设备驱动与上层的业务决策分离开来。并配套开发基于浏览器/服务器 (Browser/Server, B/S) 架构的可视化上位机,形成一个完整的边缘侧能量管理系统。这种设计不仅保证毫秒级控制的实时性,更为后续复杂策略的容器化部署奠定基础。

第三章为解决储能设备品牌繁杂、协议不统一所导致的工程开发“烟囱式”问题,本课题设计的一类通用的异构设备描述模型、异构设备数据上报通用模型与策略控制通用描述模型,将物理端口参数、通信规约解析及寄存器映射关系通过标准化的 JavaScript 对象表示法 (JavaScript Object Notation, JSON) 配置文件抽象为可配置文本,以此实现设备低代码接入。并在此基础上,引入 AOE 理论将复杂的储能策略分解为由“事件节点”与“动作边”组成的图谱,使用静态映射与拓扑排序算法将其转化为内存中高效执行的函数指针序列。这一机制不仅打破传统硬编码的约束,并且使得现场运维人员无需重新编译固件,仅通过图形化配置即可实现储能策略的低代码重组与热切换。

第四章为解决传统策略忽视电池边际寿命损耗,且高精度预测模型在边缘侧因算力受限而难以部署的难题,本课题构建了一套适配 RK3568 NPU 硬件加速的 HybridSOHModel 混合神经网络。该模型融合 Transformer 的全局注意力机制与 TCN 的因果推演能力,实现在边缘侧对电池非线性老化规律的精准捕捉。进一步地,针对预测视界缺失的脱网约束,本课题将调度维度严谨收敛为单步决策,建立耦合实时边际老化成本的单步物理净利润目标函数,并提出一种基于自适应迭代分段线性逼近 (Adaptive Piece-Wise Linear, Adaptive PWL) 的软硬件协同寻优策略,采用极值锚定与中点插值的启发式局部加密逻辑,并通过粗网格起步-局部自适应细化与 NPU 推理缓存机制,以较低的计算资源得出高品质局部最优放电倍率指令。实现不阻塞主控制线程与不依赖云端算力下的经济套利收益与设备寿命的单步高质量工程近似最优平衡求解。

第五章为总结与展望,回顾并概括整个工商业储能边缘 EMS 架构与优化调度策略的设计,并分析当前方案所存在的不足以及展望。

本文各章节关系如图 1.4 所示,第一章绪论奠定研究背景与意义。第二章搭建工商业储能边缘侧 EMS,包含硬件、软件与上位机设计,为第三章与第四章提供软硬件支持。第三章聚焦于低代码组态接入的设计,为第四章提供调优策略实施的底层执行容器。第四章聚焦于边缘侧 EMS 的边缘自治与调优计算,其作为大脑层调度第三章的执行容器,实现经济收益与设备寿命的平衡。最终由第五章进行全篇的总结与展望。

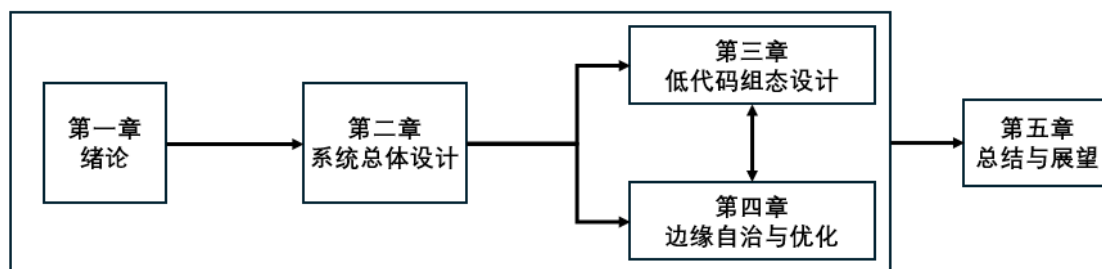


图 1.4 章节关系图

2 面向工商业储能的边缘侧 EMS 的架构设计

本章将会构建一套基于 RK3568 平台的软硬件深度解耦边缘侧 EMS 架构，利用 RK3568 的四核 ARM Cortex-A55 架构与内置 NPU 单元，并通过主机模块与从机模块的逻辑划分，在此基础上配套设计基于 B/S 架构的 Web 端与本地端上位机系统，解决工商业储能边缘侧 EMS 所面临的异构设备碎片化、控制策略组态僵化以及边缘侧算力受限等一系列工程痛点，实现底层驱动配置到上层策略监控的工程闭环。

2.1 工商业储能边缘侧 EMS 总体设计

2.1.1 需求分析

为构建一套能够适应复杂现场环境，且具备自治能力的工商业储能边缘侧 EMS，需重点解决以下几个核心需求。

(1) 工商业储能系统中有很多不同厂商、不同类型的设备，例如 BMS、PCS、多功能电表等设备，每个设备都具有不同的通信协议，例如 Modbus RTU/TCP、CANopen 等，其在寄存器、数据格式、字节序上存在明显的差异，但传统的边缘侧 EMS 硬编码开发逻辑并没有对这些差异进行消除，这就导致一旦系统更换设备，整个系统就需要重新开发，灵活性与可扩展性差^[42-44]。所以新一代工商业储能边缘侧 EMS 需要构建一套能够将软硬件分离开来的体系，其需要具备设备低代码即插即用的能力，使用标准化的描述语言去定义物理接口与逻辑变量的映射关系，隐藏底层通信的细节，来缓解因设备选型变化而引发的系统重构问题，保证所有设备的数据在系统里都能被统一理解和使用。

(2) 面对峰谷套利、需量控制及防逆流等复杂多样的用户储能控制需求，传统边缘侧 EMS 基于过程导向的固化逻辑已经跟不上需求的变化速度，并且系统需要减少对云端指令的依赖，实现在离网或者弱网的环境下自主决策实行控制逻辑^[45-47]。所以新一代工商业储能边缘侧 EMS 需要具备控制逻辑的组态化编排能力，实现储能策略的灵活配置。并且工商业储能边缘侧 EMS 须保证控制指令下发的实时性与可靠性，确保 EMS 底层高频实时保护线程不被阻塞。

(3) 工商业储能电池在全生命周期运行中呈现出高度的非线性衰退特征，特别是在电池寿命后期，非线性老化现象更加的明显，这将会对系统的安全运行与经济收益造成威胁，但传统基于安时积分法的线性估算无法满足精确性要求，依赖云端大模型的方案又难以保证离线环境下的可靠性^[48-50]。所以工商业储能边缘侧 EMS 必须具备合适的计算能力，去实现边缘侧高精度的电池健康状态预测以及在有限算力与低开销下寻优得出最佳的放电倍率指令，去获得逼近经济与寿命的高质量工程近似最优解。这就要求系统需支持神经网络模型的轻量化部署，利用 NPU 去加速矩阵运算，从而缓解 CPU 的计算负载。

需求分析汇总表如表 2.1 所示。

表 2.1 需求分析汇总表

需求维度	现有痛点	工程挑战	系统核心功能需求	关键技术
异构设备接入与数据标准化	现场多源异构设备接口碎片化严重。	传统硬编码导致驱动与业务严重耦合。	构建软硬件解耦的设备抽象层，实现异构设备即插即用。具备“设备即插件”的低代码接入能力。	需兼容 Modbus RTU/TCP、CANopen 等多类通信规约。构建包含物理端口与逻辑设备的通用描述模型以保证数据流转一致性。
控制策略组态与边缘自治	传统固化逻辑难以适应峰谷套利、需量控制等动态工况。	依赖云端指令导致在弱网/离线环境下系统可靠性差。	实现控制策略的低代码组态与灵活编排。具备离线环境下的边缘深度自治能力。	需支持将调度算法解构为 AOE 有向图谱与原子算子。需保证指令下发的硬实时性与确定性。
全生命周期管理与算力适配	电池老化后期呈非线性衰退，传统线性估算精度不足。	复杂大模型对边缘侧有限的 CPU 算力构成巨大挑战。	实现高精度的电池健康状态预测。在低系统开销下寻优放电倍率，逼近高质量工程近似最优解。	硬件需具备高效异构计算能力，利用 NPU 加速矩阵运算。需支持 Transformer/TCN 等神经网络模型的轻量化部署。

综上所述，本系统的根本目的就是构建一套能够有效缓解“数据异质性”与“策略僵化”矛盾的边缘侧深度自治架构。

2.1.2 总体框架

工商业储能电站通常部署于配电网用户侧，其物理拓扑结构是边缘侧 EMS 感知与控制的基础物理对象，如图 2.1 所示。

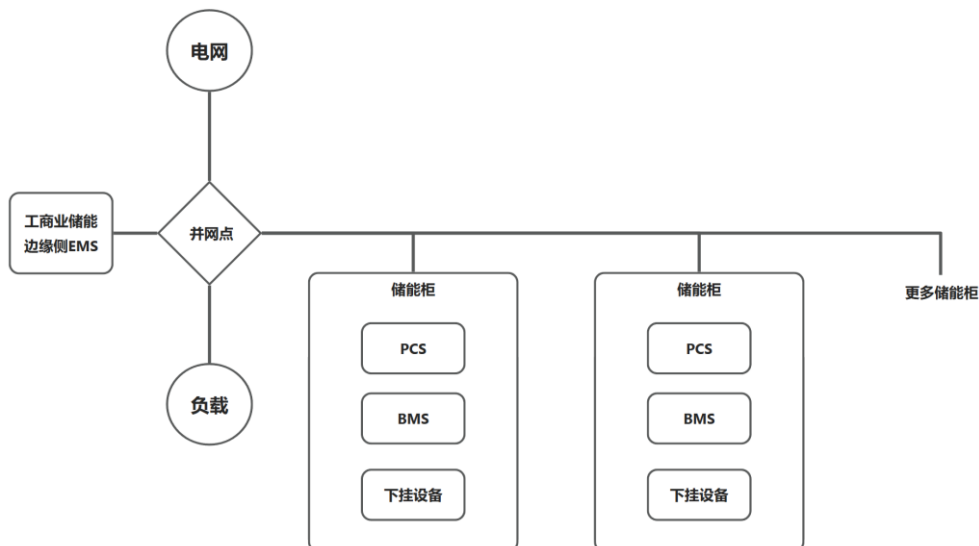


图 2.1 储能电站拓扑结构图

工商业储能边缘侧 EMS 与储能柜之间的拓扑结构呈现多样化的特点，其主要配置模式可归纳为以下三种：其一为分层分布式控制，各储能柜虽配备本地边缘侧 EMS，但仅负责数据采集，由上一级主控 EMS 进行统一的协调与策略执行；其二为集中式控制，即单一边

缘侧 EMS 对接并管理多台储能柜；其三为完全分布式控制，每台储能柜均配有独立的边缘侧 EMS，实现对本柜的自主闭环控制^[51]，如图 2.2 所示。

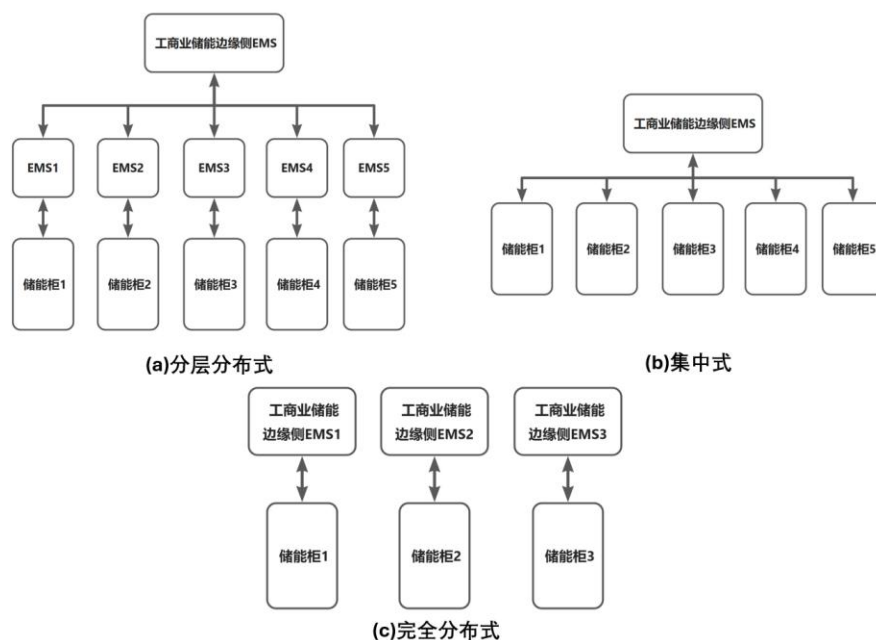


图 2.2 工商业储能边缘侧 EMS 对接储能拓扑结构图

在如此复杂的工商业储能电网结构中，工商业储能边缘侧 EMS 作为边缘侧的核心控制中枢，向下通过多样的通信总线，来连接 BMS、PCS、电表等各种复杂多样的设备，向上通过 4G/5G 或有线网络来接入云端上位机平台，或者是通过本地连接接入本地上位机平台。这样的网络结构就要求边缘侧 EMS 在架构设计上必须具备高度的协议适配能力与数据标准化能力。

本系统采用模块化分层设计思想，将边缘侧软件架构划分为硬件适配层、数据服务层、业务逻辑层与应用交互层，通过标准化的接口进行各层级之间的数据传输，保证系统的稳定性与可扩展性，系统逻辑架构如图 2.3 所示。

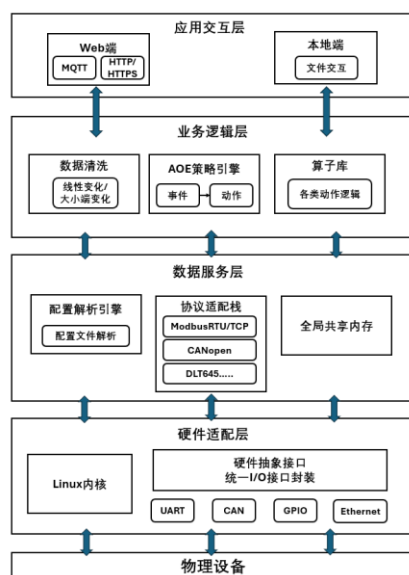


图 2.3 工商业储能边缘侧 EMS 软件逻辑架构图

硬件适配层主要负责屏蔽底层硬件差异,通过 Linux 内核驱动模块管理 RS485、CAN、以太网等物理接口^[52],并封装统一的 I/O 操作原语,这层并不处理具体的业务数据,仅负责字节流的透传与校验,来缓解底层硬件变更对上层软件的适配所带来的影响。

数据服务层是实现软硬件解耦的关键中间件,通过引入标准化的 JSON 描述文件作为数据交换的契约。在系统启动阶段,解析引擎会读取对应的配置文件,建立起物理寄存器地址与系统内部标准化逻辑地址的静态映射表,将设备的实时数据存入全局共享内存当中,方便业务逻辑层的直接调用。

业务逻辑层是边缘侧 EMS 的决策核心,通过解析 JSON 格式定义的策略配置文件,利用 AOE 策略引擎将削峰填谷、需量控制等业务逻辑转化为由“事件节点”与“动作边”构成的有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG),实现业务逻辑的低代码加载与热切换;并集成 SOH 衰退模型与非线性功率寻优算法,利用 RK3568 的 NPU 算力,在边缘侧实时推演电池的寿命轨迹,并以较低开销逼近经济性与寿命的高质量工程近似最优解,以此捕捉储能系统在不同工况下的高质量运行点。

应用交互层负责与上位机进行数据交互,一方面通过消息队列遥测传输(Message Queuing Telemetry Transport, MQTT)协议云端平台进行数据交互,来支持远程运维与大屏展示^[53];另一方面提供本地 Web 服务,供运维人员进行现场离线参数配置与状态监视。

综上所述,该总体框架有效地隔离设备侧的多样性与控制侧的复杂性,在保证边缘侧系统轻量化的同时,实现对工商业储能电站的高效管理与优化控制。

2.2 边缘侧硬件平台选型与设计

工商业储能边缘侧 EMS 作为连接物理设备层与决策控制层的核心枢纽,其硬件架构不仅需满足多源异构数据的实时吞吐需求,更需承载使用 SOH 衰退模型的边缘计算任务与 AOE 策略引擎的调度。本课题并没有选用传统低性能 MCU(如 Cortex-M4)的微控制器方案,而是构建一套使用 RK3568 的工业级边缘侧的硬件平台。

2.2.1 核心计算单元选型与性能评估

在核心计算单元的选型过程中,主要考量多任务并发处理能力、神经网络加速支持以及工业环境下的能效比这些性能。经过与目前主流的边缘侧处理器方案(如 STM32 系列、NXP i.MX 系列及瑞芯微 RK 系列)的对比,本课题最终选用 RK3568 作为主控芯片。该芯片采用四核 64 位 ARM Cortex-A55 的架构,主频最高可达 2.0GHz,与传统的单核或双核 MCU 相比,它的多核异构架构能够有效支撑 Linux 操作系统下的多进程并发,确保数据采集、协议解析与策略执行等任务的并行运行^[54,55],同时考虑到成本方面,RK3568 核心板在项目要求最低算力的约束下性价比最高,因而成为本项目硬件平台中最合适的选择。

RK3568 内置的独立 NPU 提供 1 TOPS 的算力支持,这一硬件特性使得系统能够将轻量化电池寿命预测模型从通用 CPU 端迁移至 NPU 端进行硬件加速推理,以此缓解复杂算法对 CPU 时间片的占用,保障运行结果的稳定性^[56]。并且芯片集成的错误检查与纠正(Error

Checking and Correcting, ECC) 内存校验机制, 进一步提升系统在长期无人值守工况下数据处理的可靠性, 不同核心计算单元性能对比如表 2.2 所示。

表 2.2 不同核心计算单元

芯片型号	Rockchip RK3588	NXP i.MX 8M Plus	Rockchip RK3568	STM32H7 (H743/H750)	NXP i.MX6ULL	Espressif ESP32-S3
核心架构	8 核 4*A76、 4*A55	4 核 A53、 Cortex-M7	4 核 Cortex-A55	单核 Cortex-A7	单/双核 Cortex-M7	双核 Xtensa LX7
最高主频	2.4GHz	1.8GHz	2.0GHz	480MHz	528/900MHz	240MHz
NPU 算力	6 TOPS	2.3 TOPS	1 TOPS	无	无	向量指令 加速
典型功耗	5-8W+	2-4W	2-4W	200-500mW	<200mW	~100- 240mA
外设资源	PCIe 3.0 HDMI 2.1 双千兆/2.5G SATA	TSN 以太网 CAN-FD 双 ISP PCIe 3.0	PCIe 3.0 SATA 3.0 双千兆 USB 3.0	USB 2.0 CAN ETH LCD	Ethernet USB HS CAN-FD FMC	Wi-Fi BLE 5.0 USB OTG SPI/I2C
操作系统	Android 12/13 Linux	Linux Android 11+	Android 11/12 Linux	RTOS Bare Metal	Linux RT-Thread	FreeRTOS ESP-IDF
成本预估 (CNY)	高 核心板 700~1100	中高 核心板 500~600	中 核心板 250~400	中 芯片 40~105	低 芯片<50	低 芯片<35

2.2.2 异构通信接口与外设电路设计

本课题参照模块化设计思想, 构建包含通信处理、数据存储及电源管理在内的外设电路系统, 使得硬件平台获得高度的物理接口兼容能力。

为实现对 BMS、PCS 等工商业储能复杂设备的接入, 硬件集成多路隔离型通信接口, 设计多路 RS485/232 接口, 特意在每个 UART 的信号与收发器 (如 MAX13487E 和 SP232) 之间使用数字隔离芯片 (如 NSI8221N0) 进行隔离, 并配置气体放电管与 TVS 瞬态抑制二极管组成多级防护电路, 以抵御工业现场的浪涌与静电干扰, 保证数据传输的稳定性, 并设计符合 CAN 2.0B 规范的总线接口, 采用高速 CAN 收发器, 在差分信号线上并联终端电阻以消除信号反射, 也同样进行隔离处理, 确保其在强电磁干扰环境下指令收发的准确性; 利用 RK3568 内部集成的 MAC 控制器, 配合外置 PHY 芯片 (如 RTL8211F) 扩展出千兆以太网口, 并利用交换机芯片 (如 IP175G) 额外扩展出 LAN 口, 确保系统能够适配多样的拓扑环境, 来减少交换机的使用率; 设计多路 DI/DO 口, DI 端用光耦 (如 EL3H7) 进行隔离, DO

端则配置继电器（如 HF49FD），确保各类单点输入输出接口能够有效的接入，通信拓扑结构图如图 2.4 所示。

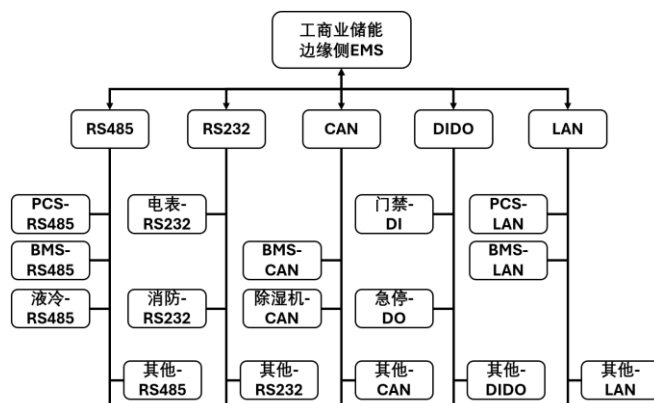


图 2.4 工商业储能边缘侧 EMS 各类设备的通信的拓扑结构图

系统板载 16GB eMMC 闪存作为系统盘，并预留 TF 卡接口用于海量日志数据的持久化存储，来支撑 SOH 模型的边缘训练；电源输入端设计基于超级电容的掉电保护电路，确保系统在断电瞬间也能够完成关键数据的刷盘操作，并且使用 RT8279GSP 这颗 DC-DC 芯片，将工业现场常见的 12V 或 24V 直流电高效且稳定地转换为系统所需的 5V 和 3.3V；并且本课题还额外加上外部硬件看门狗（如 TPL5010），该电路作为一个独立的监控单元，一旦系统长时间没反应，将触发硬件复位，使系统自动恢复运行，提升系统长期运行的可靠性，配合上实时时钟芯片（如 HYM8563T），保证断网断电后时间的准确性；无线侧网络连接则选用经典的 EC20 4G 模块搭配 RTL8821CS 的 Wi-Fi/蓝牙二合一模块，确保远程运维的数据交互，整体硬件框架如图 2.5 所示。

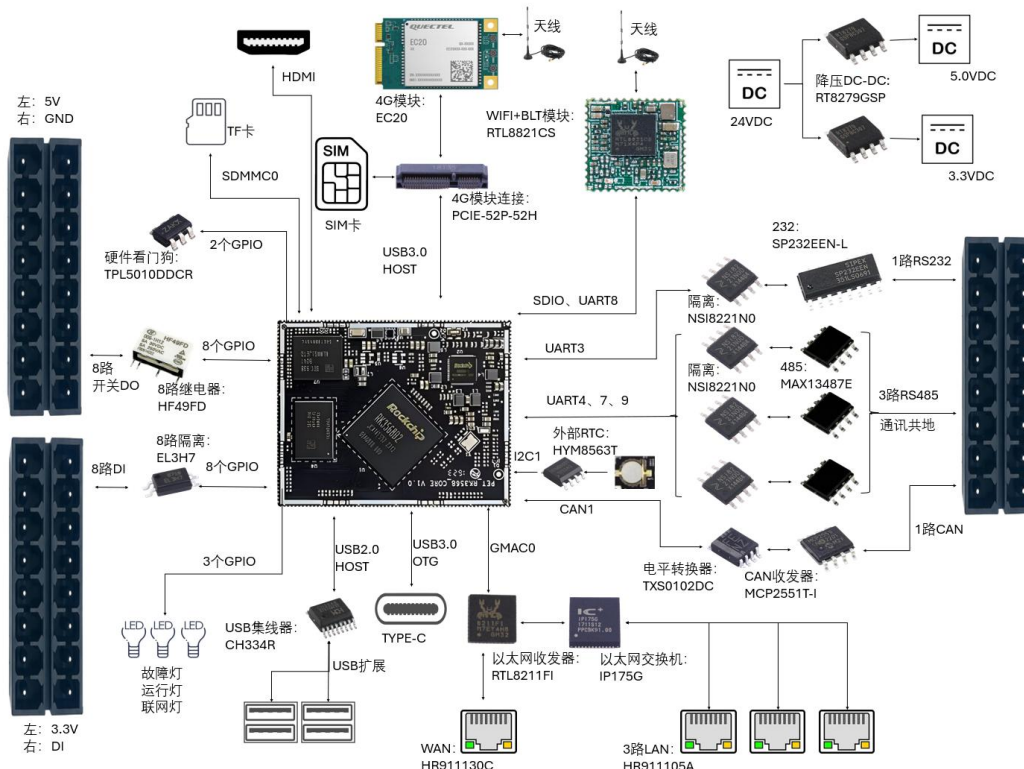


图 2.5 工商业储能边缘侧 EMS 整体外设硬件电路框架图

通过上述硬件选型与电路设计，本系统构建出一个算力充沛、接口丰富且稳定可靠的物理底座，为后续章节中软件架构的解耦与复杂策略的实现提供坚实的硬件支撑。

2.3 边缘侧软件架构设计

本课题构建一套主机模块与从机模块逻辑隔离的分布式软件架构。该架构运行于 RK3568 平台的 Linux 操作系统之上，通过全局共享内存的标准化地址与内部 TCP/IP 通信机制进行数据传输，来缓解因底层设备频繁更换所带来的问题，保证系统的稳定性与可扩展性 [57]。

在该架构中，从机模块是作为服务器端负责将数据写入全局共享内存的标准化地址，而主机模块则作为客户端负责将数据从全局共享内存的标准化地址中读出，主机模块也可向对应从机发送针对特定全局共享内存的标准化地址的写操作请求，从机接收后将其反向解析为相应设备的控制报文并执行，实现对应设备的控制。通过 TCP/IP 的 IPC 通信机制，有效降低多任务并发下的资源竞争风险，并且无论是分层分布式控制、或是集中式控制、还是完全分布式控制的储能复杂拓扑架构能有效适用。

主从模块的 TCP/IP 通信流程图如图 2.6 所示，在系统运行初始，主机模块会向从机模块发送对应的连接请求，进入三次握手阶段，当成功建立主机与从机模块连接后，系统将会进行数据的轮询，当系统需要重启或重置连接时，会遵循 TCP/IP 的四次挥手原则，有效避免连接非正常中断而导致的 socket 资源残留或内存泄漏这一类问题，提高系统的稳定性。

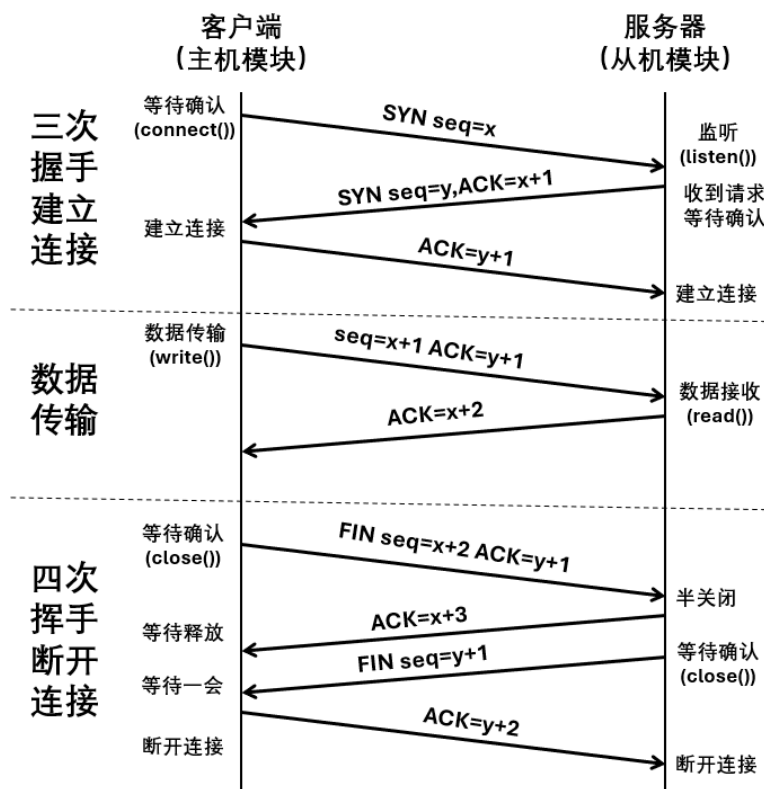


图 2.6 主从模块 TCP/IP 通信过程图

主从模块的通信协议采用标准 Modbus TCP 协议，该协议详细读写格式如下表 2.3 与表 2.4 所示，利用其标准化的报文结构，确保数据在系统内部的高效流转，主机向从机发起查询时，事务处理标识符确保主机发出的请求能与从机返回的响应一一对应，防止在多线程并发访问时出现数据混淆的情况，通过功能码指定操作类型，并利用起始地址和寄存器个数精准圈定需要读取的数据范围，这种结构虽然简单，却能十分高效地完成批量数据的搬运^[58,59]。

表 2.3 标准 Modbus TCP 协议读取格式

格式	事务处理标识符	协议标识符	报文长度	单元标识符	功能码	起始地址	寄存器个数
字节占用	2	2	2	1	1	2	2

表 2.4 标准 Modbus TCP 协议写入格式

格式	事务处理标识符	协议标识符	报文长度	单元标识符	功能码	起始地址	寄存器个数	写入数据字节数	写入数据
字节占用	2	2	2	1	1	2	2	1	2

软件整体架构如图 2.7 所示：

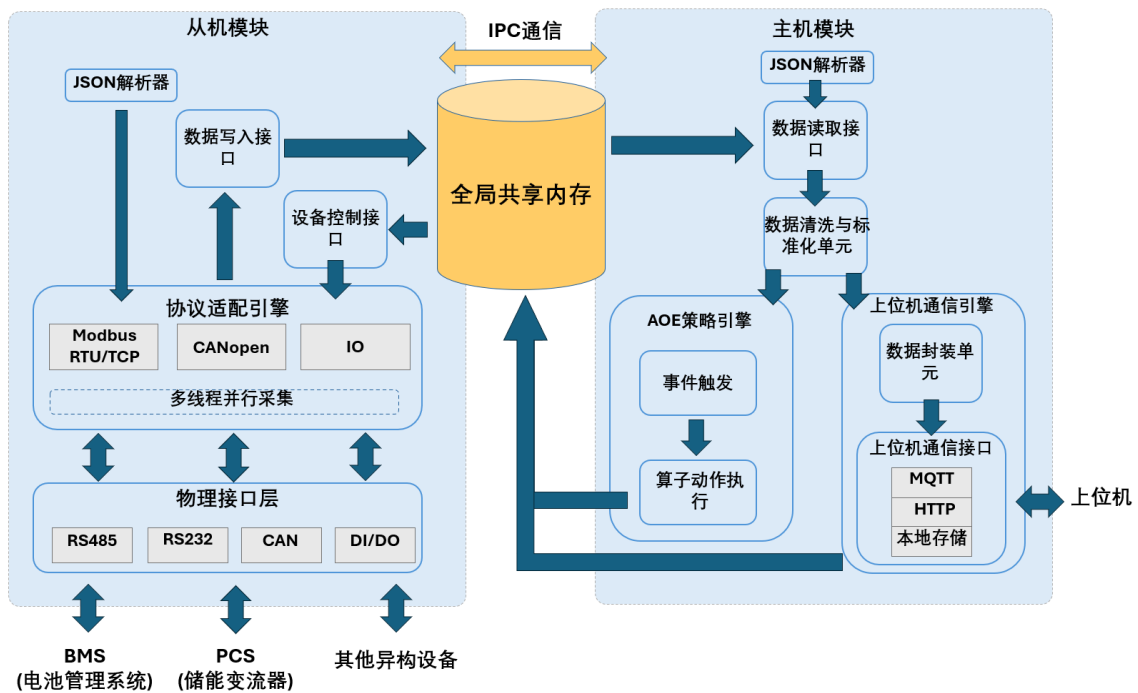


图 2.7 边缘侧 EMS 软件整体架构图

从机模块作为系统的“感知触角”，主要承担底层物理设备的接入适配与数据标准化工作。该模块不包含任何具体的业务控制逻辑，仅负责执行异构设备的数据采集，模块内置 Modbus RTU/TCP、CANopen 等标准协议栈，系统启动时，解析引擎会对应读取配置文件，根据其中定义的物理端口参数（如波特率、从机地址）和寄存器点位信息，动态实例化通信链路，从而实现对 BMS、PCS 等异构设备的低代码接入，并且从机模块会将采集到的原始报文写入全局共享内存中预分配的标准化逻辑地址，为上层的主机模块提供统一的数据视图，从机模块流程图如图 2.8 所示。

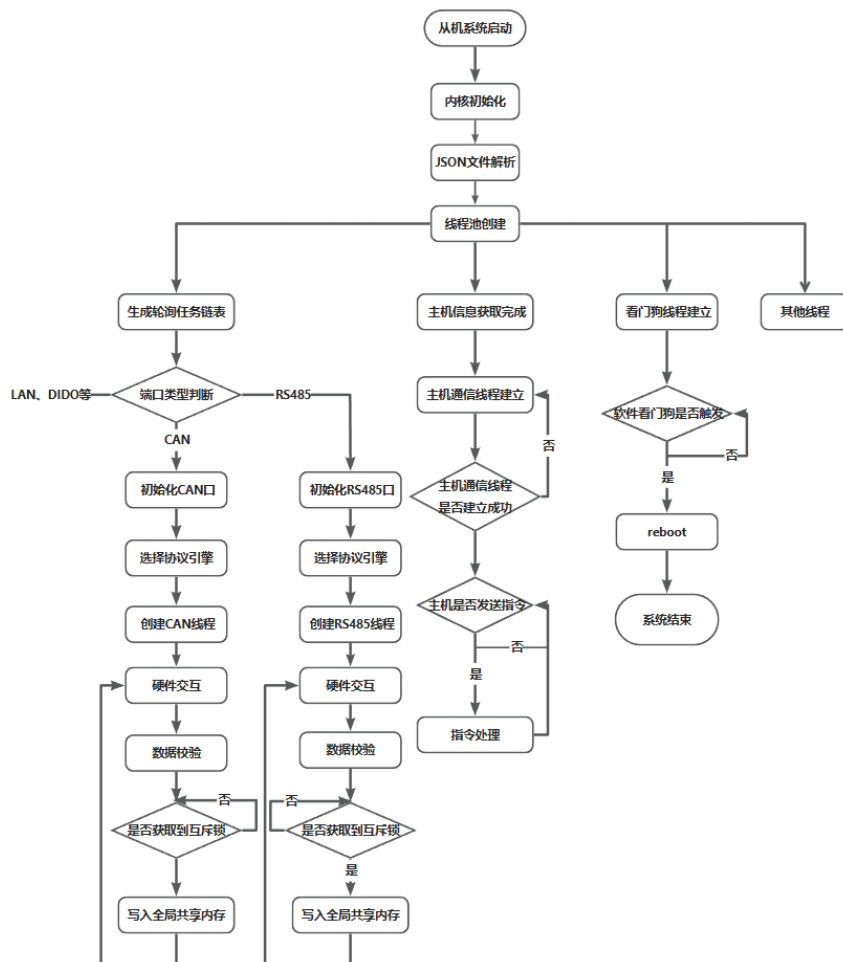


图 2.8 从机模块流程图

与此同时，现场底层异构设备常因总线冲突或硬件瞬态故障等问题出现通信超时与校验错误的情况，因此从机模块加入了设备状态判断与异常重连机制，来保障边缘侧 EMS 的通信可靠性。当从机模块向底层设备发起数据读写请求时，若发生响应超时或数据链路层校验失败时，系统将针对该设备的故障计数器执行自增操作，若单次通信成功返回且校验通过，则将该计数器进行清零，但若是该计数值超过系统预设的阈值，从机模块将会判定该异构设备处于离线状态，对应的全局共享内存中的设备在线状态标志也相应的改变，有效阻断脏数据向上传递。进入离线状态后，为避免无效通信持续占用系统资源并阻塞正常设备的采集线程，从机模块对该设备启动低频的重连探测机制。系统进入离线等待周期，待倒计时结束后，系统会向该离线设备发送一次轻量级的状态探测报文。若探测报文成功返回且校验无误，系统则判定设备通信链路已恢复，随即清零故障计数器，恢复该设备在主轮询队列中的常规轮询频率，并同步更新全局共享内存中的在线状态标识，若探测报文再次超时或校验失败，设备将维持离线状态，并重新进入下一个等待周期，循环往复直至通信物理层恢复或人工介入检修。对应异常状态机转化如图 2.9 所示。主从模块的 TCP/IP 通讯机制的异常处理逻辑也与其相似，当主机向从机发起读取或写入全局共享内存的数据请求时，若出现 Socket 响应超时

或 TCP 报文丢失，对应的也会进入故障判定，进而进入离线等待周期，时间一到，则进行探测报文的下发，提高主从进程间通信的可靠性与稳定性。

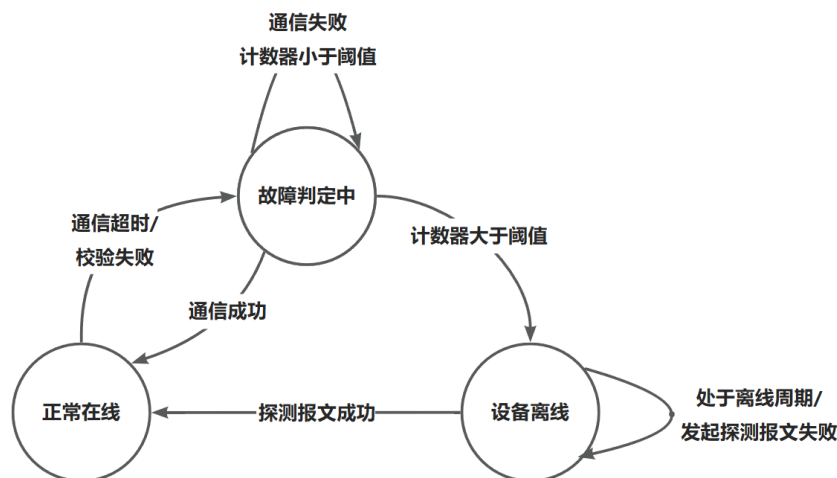


图 2.9 从机模块通信异常状态机转换图

主机模块作为系统的“决策大脑”完全与底层硬件分离，通过访问全局共享内存的标准化地址空间来获取各类数据，并解析配置文件，构建基于 AOE 有向图的控制逻辑。该模块实现削峰填谷、防逆流等控制策略的低代码动态加载与热切换，并且集成轻量化的算法内核，利用 RK3568 的 NPU 算力，运行 HybridSOHModel 进行电池健康状态的预测，在较低开销下获得逼近经济收益与电池寿命的高质量工程近似最优解。最后主机模块会从全局共享内存中提取需上传的关键数据，封装为 MQTT 报文推流至云端平台，其因开销小、可靠性高、跨平台兼容性好的特性，十分符合工商业储能边缘侧 EMS 的上传需求^[60]，协议格式如图 2.10 所示。



图 2.10 MQTT 消息格式图

针对本地上位机，本课题也设计 Modbus TCP 通讯方式和 tthttpd 轻量化边缘侧服务器两类作为连接方式，实现数据的按需上报与可视化展示，tthttpd 在保持较高性能的同时，内存占用仅为 150kb 左右^[61]，主机模块流程图如图 2.11 所示。



图 2.11 主机模块流程图

为保证边缘侧 EMS 与 Web 端上位机的通信可靠性，主机模块中会使用 MQTT 心跳包来判断边缘侧 EMS 的在线状态，在系统运行期间，主机模块按预设周期定时向 Web 端的 MQTT Broker 发送 PINGREQ 报文，并监听 PINGRESP 响应包，若在连续多个心跳周期内未收到服务端响应，或底层 TCP 链路直接抛出断开事件，主机模块将触发网络离线判断，随即将原定推流至 MQTT 主题的序列化 JSON 报文重定向写入边缘侧本地持久化存储，并在文件系统中构建基于先进先出（First-In-First-Out, FIFO）原则的环形数据缓冲区。当系统监测到网络物理层恢复且 MQTT 心跳包重新成功握手后，主机模块的状态机将切入断点续传模式，将 FIFO 缓冲区中积压的历史数据包按时间先后顺序依次提取，在补传过程中，系统动态调配网络传输带宽，确保历史数据的集中上传不会阻塞当前实时数据的低延迟交互。待本地 FIFO 缓冲区清空后，系统自动退出断点续传模式，全面恢复常态化的实时遥测传输，从而保障了储能数据的时序完整性与边缘深度自治能力。如图 2.12 所示。

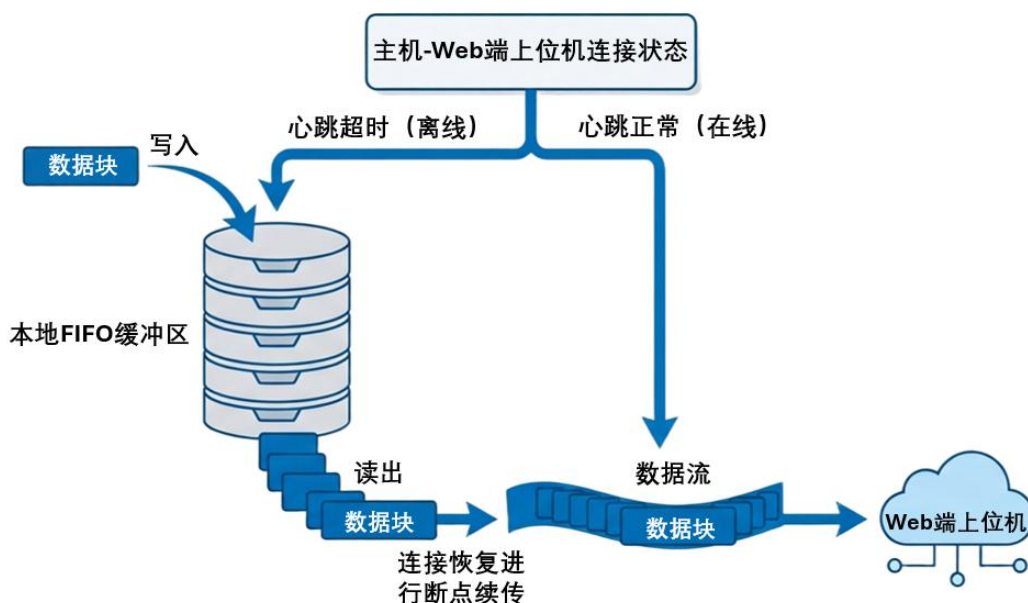


图 2.12 主机模块与 Web 端连接状态图

2.4 工商业储能边缘侧 EMS 上位机设计

2.4.1 Web 端上位机设计

本课题设计出一套基于 B/S 架构的 Web 端上位机管理系统，该系统作为用户与边缘侧 EMS 交互的“可视窗口”，具备多站管理、异构设备低代码接入、策略图形化组态以及实时监控运维的功能，来适配对应的云端环境。

Web 端采用前后端分离的开发模式，前端基于 Vue.js 渐进式框架构建，利用其组件化与响应式特性，确保个人计算机（Personal Computer, PC）端与移动端的交互一致性^[62]，UI 组件库选用 Element Plus，实现系统总览、设备配置、策略编排等功能界面的快速搭建^[63]，通过 HTTP 协议进行上位机与边缘侧主机模块之间静态配置文件的下发与同步，并通过 MQTT 协议实现实时运行数据与控制指令的双向低延迟传输，确保数据展示的实时性与控制指令的触达率。

Web 端上位机可划分为 EMS 多站管理、储能电站设备配置、分布式低代码组态平台以及设备控制与数据分析四大功能域，如图 2.13 所示。

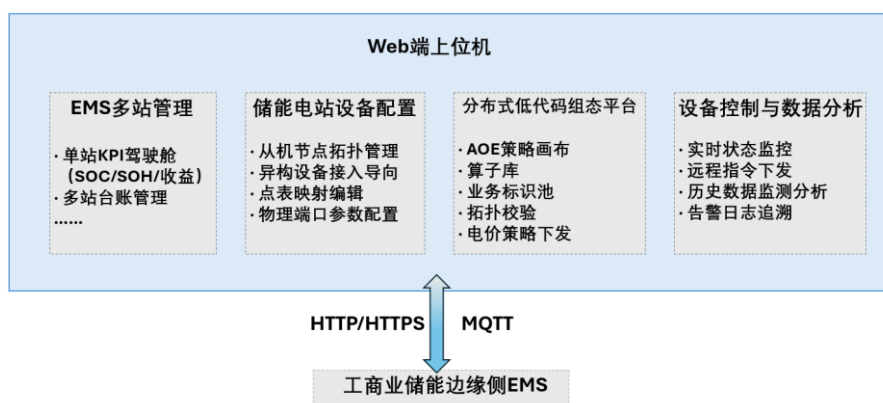


图 2.13 Web 端上位机软件模块化设计框图

EMS多站管理与全景监控模块作为系统的“驾驶舱”，在界面顶部设计全局站点切换下拉框，支持全网储能电站台账的管理，当用户切换站点时，系统也会自动隔离不同站点的上下文环境，并同步加载对应的设备与策略数据，保障数据的安全性与操作的独立性。在单站监控大屏部分则集成 PCS 有功功率、系统荷电状态（State of Charge, SOC）、系统 SOH、今日充放电量及累计收益等关键指标的实时看板，其通过 ECharts 可视化库来直观呈现电网、负载与储能系统的功率流动情况，各类界面设计都遵循人机交互的原则，对于关键状态的参数（如并网状态、通信状态）采用高亮色块标识，辅助运维人员快速捕捉系统异常。

异构设备可视化组态配置模块提供一套可视化的异构设备接入工具，从机节点配置管理部分可以通过配置对应的 IP 地址、端口号与使能状态来管理当前站点下所有实际的边缘从机节点。在异构设备接入导向部分，用户仅需通过界面点击新增设备控件，填充基本的通信参数与设备的数据点表，系统就会自动将对应信息转化为标准的配置文件，并通过点击下载配置至边缘网关按钮，即可完成工商业储能边缘侧 EMS 异构设备的低代码接入

分布式低代码组态平台模块提供一个基于 AOE 图谱的交互式画布，用户可以通过拖拽“事件节点”与“动作算子”来编排控制逻辑，通过连线定义策略的流转路径，双击节点或连接线，可配置具体节点的原子操作，如“读取系统时间”、“需量控制运算”、“设定目标功率”等，在策略保存时系统会对图谱进行拓扑排序与闭环检测，确保逻辑无死循环与孤立节点，校验通过后即可生成对应的策略配置文件并下发至边缘侧 EMS，实现策略的低代码重构与热加载。并且提供 24 小时全天电价分布预览图（包含尖、峰、平、谷时段），用户定义的时段与电价明细（如“08:00-12:00 峰 1.2 元/kWh”）也会生成对应的配置文件下发至边缘侧 EMS，来作为经济性寻优算法的边界条件。

运维管理模块提供对设备的控制功能，用户可选择特定的从机与设备中所具备“上报与持久化规则”的业务标识进行列表展示。且系统设备实时下发控制部分仅能操作读写属性为“RW”的业务标识，以此降低误操作风险。并提供历史数据查询功能，支持按日期、设备维度生成对应数据的可视化界面，协助运维人员进行分析。

本课题将复杂的边缘侧底层配置与策略算法封装为图形化操作，极大地降低工商业储能边缘侧 EMS 的工程部署门槛与维护成本，实现从底层硬件接入到上层策略定义的软硬件分离的闭环。

2.4.2 本地端上位机设计

考虑到边缘侧 RK3568 平台的硬件资源约束，该系统摒弃 Tomcat、Nginx 等重型 Web 服务器方案，转而采用边缘侧 httpd 服务器作为轻量级 HTTP 守护进程^[61]，本地上位机软件不依赖云端服务，通过与边缘侧文件系统的直接交互，实现异构设备接入配置、控制策略可视化组态及本地运行数据的实时监视，其人机交互逻辑旨在降低现场运维人员的技术门槛，确保系统在弱网或无网环境下的可操作性与运行结果的稳定性。

各模块与上 2.4.1 节中的 Web 端大致相同，只在本地增加站点限制的处理，并且取消设备的单点控制部分，在本地端上位机中目前只做配置的编排与设备数据的监视。

本地端上位机与边缘侧核心程序之间的数据交互遵循“文件驱动”的异步通信机制，以此降低进程间的耦合度并提升系统稳定性。交互架构如图 2.14 所示。

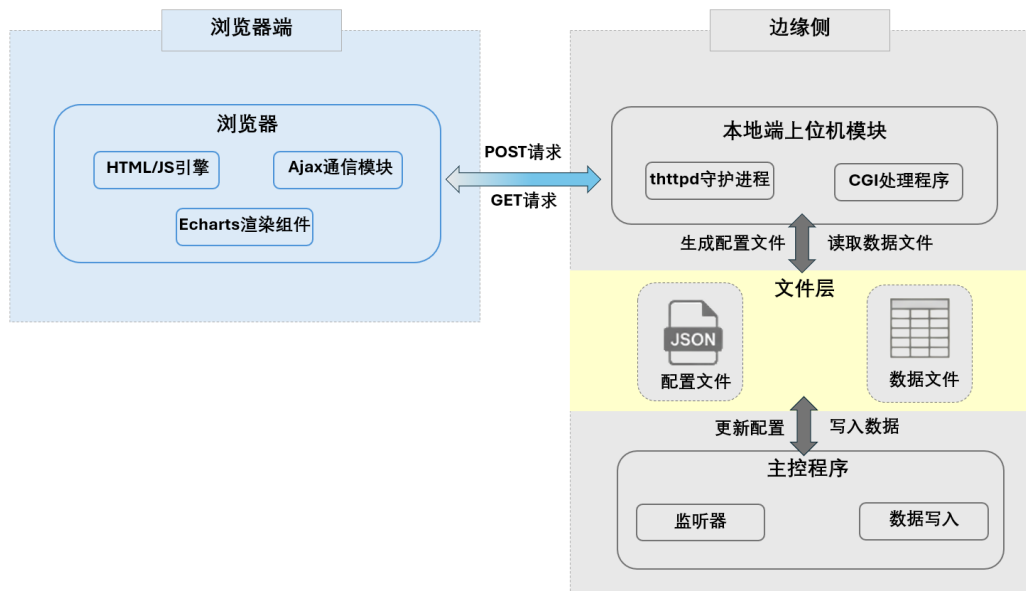


图 2.14 本地上位机与边缘侧数据交互原理图

当用户在前端界面完成设备添加或策略组态并点击保存时，前端的 JavaScript 脚本会将配置的数据封装为对应的 JSON 文件，并通过 HTTPPOST 请求发送至 thttpd 的服务器，在服务器端的 CGI 处理程序接收请求后，会将对应文件写入边缘侧文件系统的指定更新路径，边缘侧 EMS 主控程序则通过对更新路径的文件的定时监视来捕捉对应的更新事件，触发配置的热加载^[64]。实时数据并不直接写入数据库，而是由通过对应数据点所设置持久化策略对应刷新至固定地址的逗号分隔值（Comma-Separated Values, CSV）文件中，本地上位机前端则通过 Ajax 技术定时向 thttpd 服务器发起 GET 请求，来读取该 CSV 文件内容，读取完成后则利用 ECharts 等可视化库渲染实时对应的曲线与状态仪表盘，有效避免频繁数据库操作所带来的 I/O 瓶颈。

2.5 系统展示

2.5.1 工商业储能边缘侧 EMS 展示

图 2.15 展示目前工商业储能边缘侧 EMS 所对接的储能柜出厂图；图 2.16 展示目前工商业储能边缘侧 EMS 所对接一台的储能柜内部装机图；图 2.17 展示目前工商业储能边缘侧 EMS 图；图 2.18 展示工商业储能边缘侧 EMS 封盒实物图。



图 2.15 储能柜出厂图



图 2.16 工商业储能边缘侧 EMS 装机图

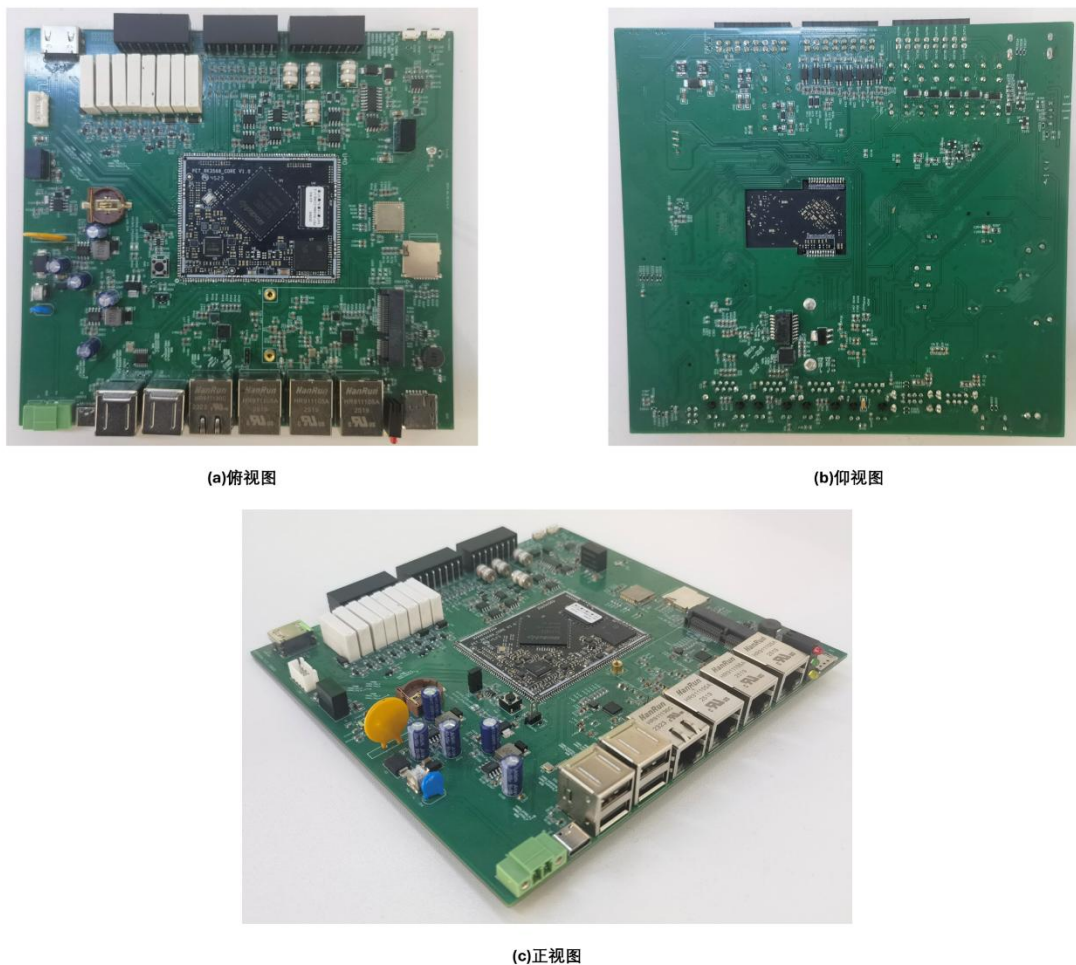


图 2.17 工商业储能边缘侧 EMS 图



图 2.18 工商业储能边缘侧 EMS 封盒图

2.5.2 上位机展示

上位机系统的部分模块展示如图 2.19、图 2.20、图 2.21、图 2.22、图 2.23、图 2.24、图 2.25、图 2.26 所示，分别包含 Web 端与本地端的储能站点信息模块、Web 端的储能单站数据大屏模块、储能站点从机配置模块、储能站点异构设备配置模块、储能站点异构设备配置模块、储能站点电价配置模块、储能站点数据监测模块。

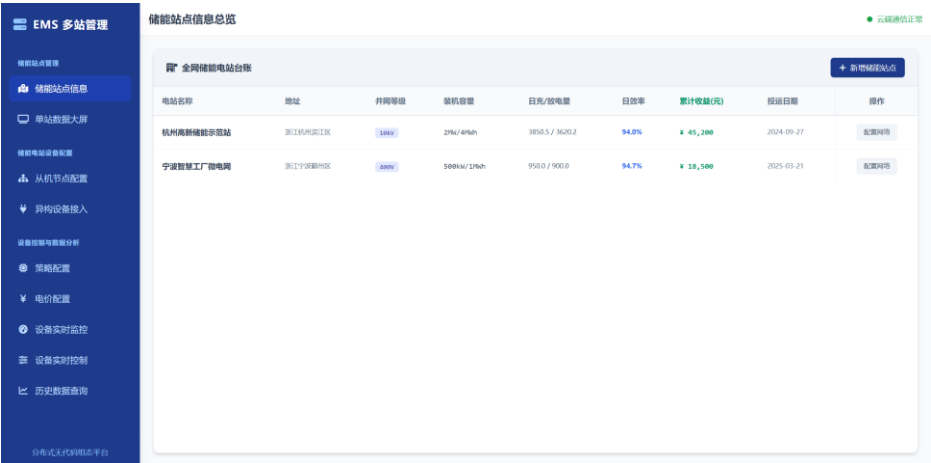


图 2.19 Web 端储能站点信息监控模块图

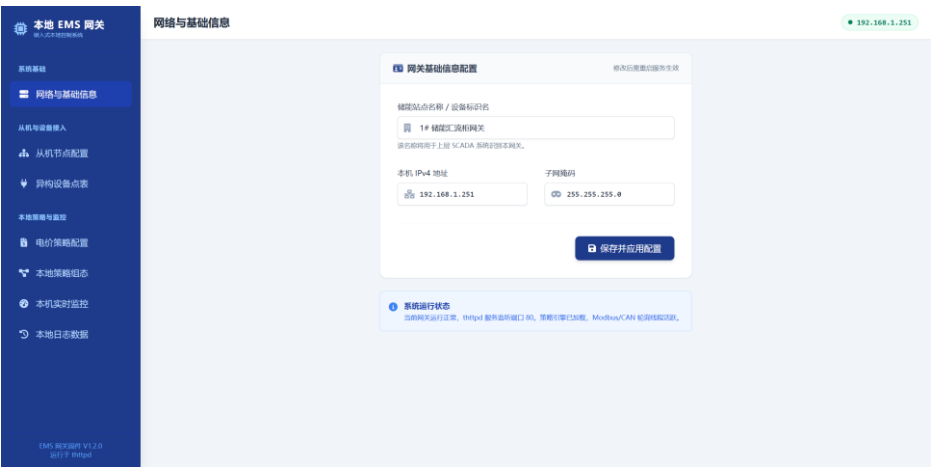


图 2.20 本地端储能站点信息模块图



图 2.21 Web 端储能单站数据大屏模块图

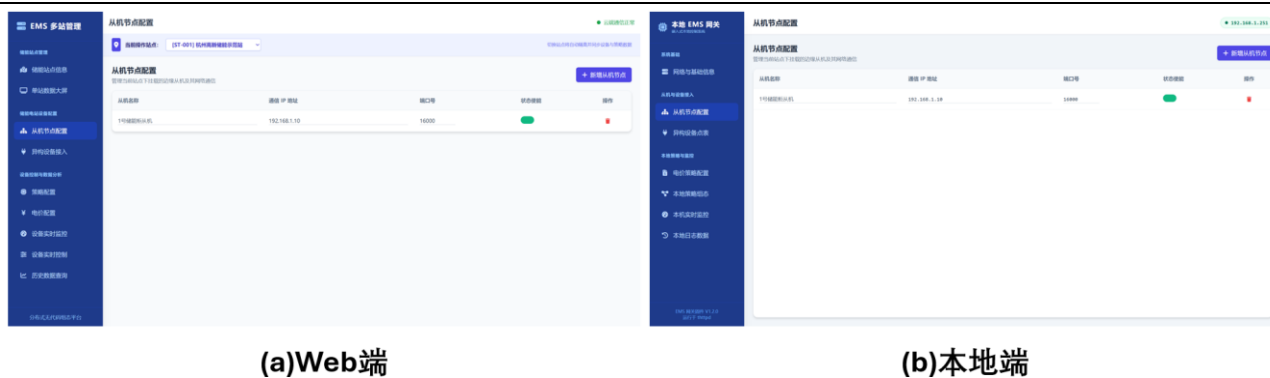


图 2.22 储能站点从机配置模块图



图 2.23 储能站点异构设备配置模块图



图 2.24 储能站点策略配置模块图

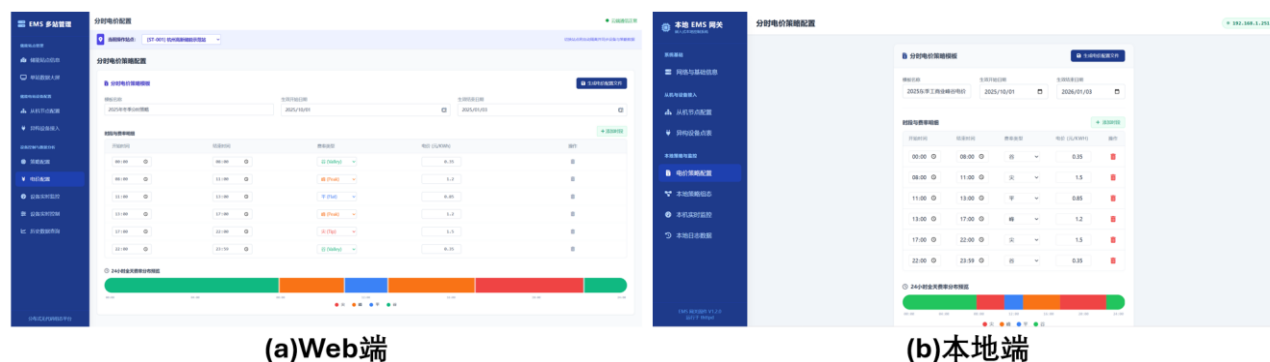


图 2.25 储能站点电价配置模块图

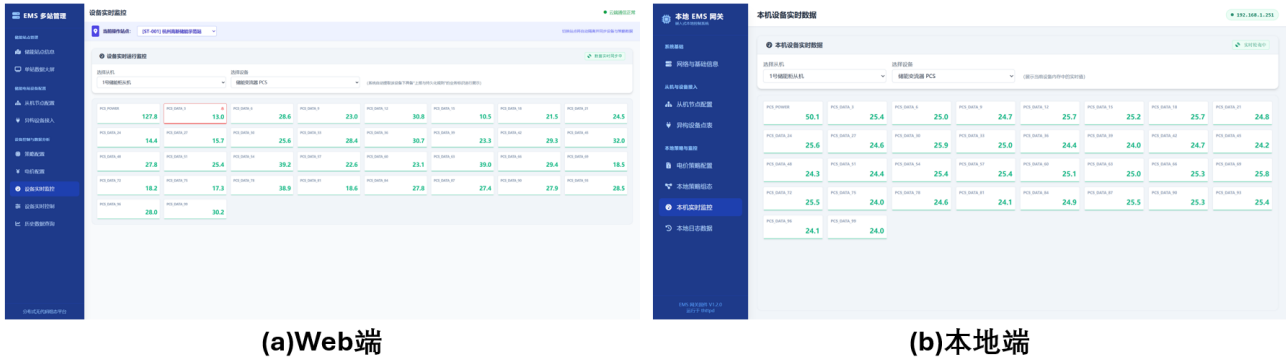


图 2.26 储能站点数据监测模块图

2.6 本章小结

本章构建一套基于国产化 RK3568 平台的软硬件深度解耦边缘侧 EMS 架构，确立以四核 ARM Cortex-A55 以及内置 NPU 为核心的计算平台选型，设计包含多路隔离通信接口与掉电保护机制的外设电路，并创新性地提出主控-从控逻辑隔离的分布式架构，通过全局共享内存的标准化地址与内部 TCP/IP 通信机制进行数据传输，配套设计基于 B/S 架构的可视化 Web/本地端上位机，解决工商业储能边缘侧资源受限与多源异构设备接入的矛盾，实现底层驱动配置到上层策略监控的工程闭环，保证系统的可靠性与稳定性，并为后续低代码组态实现以及 SOH 衰退模型与功率寻优算法的边缘侧推理提供坚实的架构基础。

3 基于 JSON 与 AOE 图谱的低代码组态机制实现

在第二章详细介绍工商业储能边缘侧 EMS 的软硬件架构，本章将依托上一章所设计的架构，构建一种异构设备通用描述模型与异构设备数据上报通用模型，并引入基于 AOE 网理论的策略控制通用描述模型，解决传统硬编码开发模式下底层驱动耦合与上层控制逻辑僵化的问题。

3.1 异构设备接入与策略定义所存在的问题分析

传统边缘侧 EMS 在工商业储能系统的工程实践开发中，逐渐显露出无法适应硬件碎片化与用户需求多样化的局限性。本节将从设备驱动开发的耦合机理以及控制逻辑的非标准化特征这两个维度，来剖析现有工商业储能边缘侧 EMS 在应用开发中对接异构设备时面临的问题与障碍。

3.1.1 设备驱动开发的“烟囱式”耦合问题

在传统的边缘侧 EMS 软件架构中，底层设备驱动程序往往与上层业务逻辑紧密缠绕，形成一种封闭的“烟囱式”开发模式。如图 3.1 所示，一套用于 PCS-A 设备的 EMS 项目架构，无法直接适配到 PCS-B 设备上，只能重新开发一套对应的 PCS-B 设备的 EMS 项目架构。

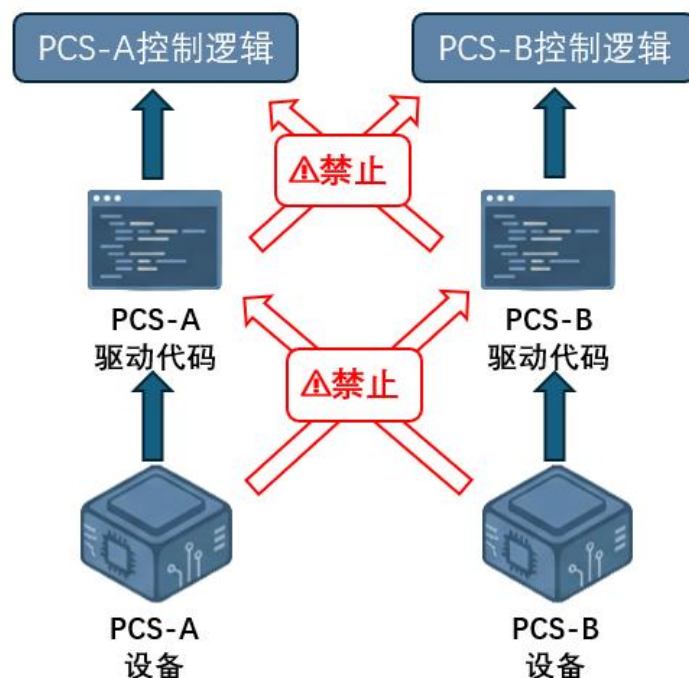


图 3.1 “烟囱式”开发模式的局限性示意图

工商业储能场景涉及的设备品牌繁杂，虽然大多数 BMS、PCS 及多功能电表等关键部件的通信协议都遵循 Modbus 或 CAN 标准，但它们之间的寄存器地址定义、数据格式以及比例系数等应用表示层参数存在明显的不同。传统的边缘侧 EMS 通常采用硬编码的方式实现设

备接入，这就导致每当项目现场需要更换不同品牌的储能柜设备、新增传感器或引入新设备时，开发人员就必须深入到底层 C/C++ 源代码中修改通信逻辑，并重新进行全量的编译、链接与固件烧录，如图 3.2 与表 3.1 所示。

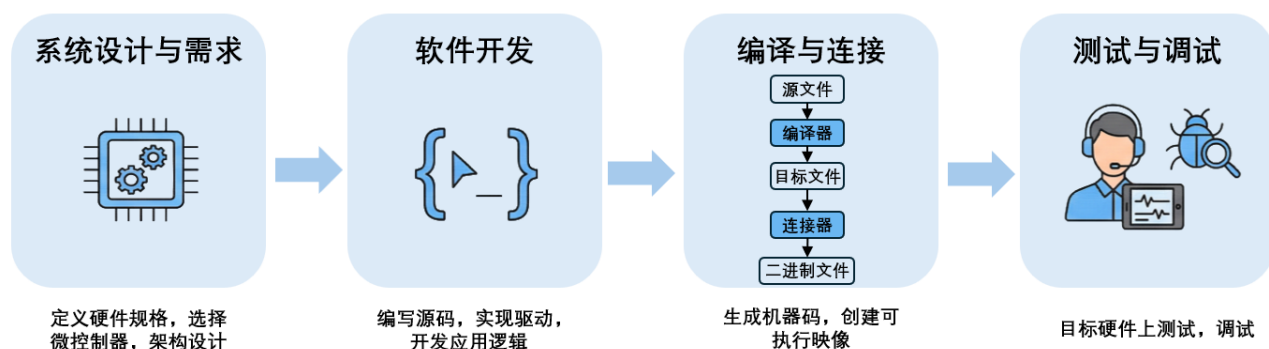


图 3.2 传统硬编码开发模式工程示意图

表 3.1 传统硬编码开发模式工程表

传统硬编码开发模式	
适配对象	单一特定设备 (需针对特定品牌型号定制)
适配方式	修改 C/C++ 底层源码
部署流程	编码→编译→烧录→重启
人员要求	需具备边缘侧 C 语言开发能力的研发人员
维护风险	易引入内存越界、指针错误等系统级 Bug

这类一套项目环境对应一个崭新边缘侧 EMS 源码的开发模式带来以下几种弊端：

(1) 系统可维护性与工程复用性严重受损。外部设备的频繁变换十分容易在开发过程中造成内存越界或时序竞争的问题，影响系统的整体稳定性，并且对于特定项目定制的代码难以在不同项目间无缝迁移，这会造成大量的重复性开发工作。

(2) 现场部署对专业技术人员的依赖度过高。储能系统现场部署时必须与具备边缘侧软件开发能力的研发人员一起进行调试工作，才能完成设备适配工作，这使得工商业储能项目在面对海量分散场景时，无法通过标准化流程实现低成本且短时间的交付。

(3) 对于储能系统架构变化特性适应存在极大的滞后性。目前工商业储能的拓扑结构也十分复杂，在对应项目中的单一拓扑结构中，无法适配其他项目中的拓扑结构，例如原先的分层分布式控制架构无法适配当前的集中式控制架构，需重新定制开发系统，大大增加研发周期与开发成本。

3.1.2 控制逻辑的僵化与非标准化

除了上述小结所述的设备驱动开发的“烟囱式”耦合问题，上层架构控制策略的实现方式也一样面临着僵化与非标准化的问题与挑战。现有的工商业储能边缘侧 EMS 多采用过程导向的编程思想，将削峰填谷、防逆流保护、需量控制等复杂的能量调度策略逻辑转化为嵌套的 if-else 或 switch-case 条件判断语句，写死在主控程序中，策略实现所需的数据来源也一样在边缘侧内部固定其所属的内存地址。

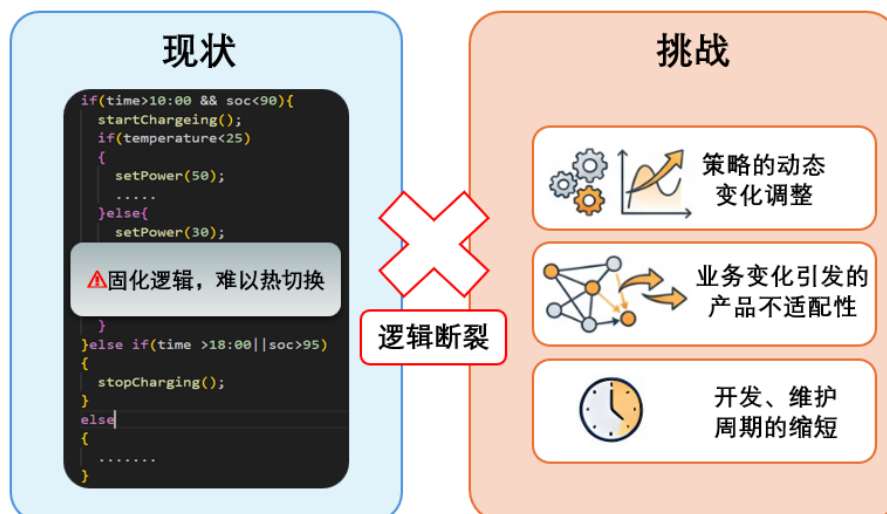


图 3.3 传统过程导向控制逻辑的局限性示意图

如图 3.3 所示。传统的实现方式在逻辑简单的单一场景下能够适应，但无法适应工商业用户多变的需求。工商业用户的储能设备一旦发生变换，就会导致原先固定策略所引入的数据源点位以及指令下发点位全部发生变动，使得原先的控制逻辑无法适配当前的系统，并且工商业用户的电价政策、负荷特性及需量申报值往往随季节或生产计划波动，当用户需求从单一的时间表控制转变为其他策略时，如需量边界下的动态削峰混合策略，硬编码的逻辑结构往往需要进行大调整^[65]，这种模式不仅周期长，更无法满足系统在线运行时的策略热切换需求。并由于目前缺乏标准化的策略抽象模型，不同开发者所编写的控制逻辑难以被形式化验证或移植，这会导致边缘侧 EMS 陷入低效的研发周期，无法支撑例如基于 SOH 衰退模型等复杂算法的工程化引入，边缘侧 EMS 策略只能局限于当前用户的策略需求。

3.2 异构设备组态化接入技术

鉴于前文 3.1 节所述，工商业储能场景中设备接口的异质性与现场部署的复杂性已成为制约边缘侧 EMS 快速交付的主要瓶颈，传统硬编码开发模式的底层驱动与业务逻辑的严重耦合，导致其面对工商业储能场景中品牌繁杂的 PCS、BMS 及多功能电表等设备时，系统的可维护性与工程复用性严重受损。针对该问题本课题将提出一种基于轻量级数据交换格式的异构设备组态化接入技术，旨在通过标准化的设备描述模型来重构边缘侧嵌入式系统的底层驱动架构。

3.2.1 基于 JSON 协同定义的设备接入与数据上报架构

为解决工商业储能场景中异构设备接入繁杂及控制策略现场定制化难度大的问题，本小节将结合第二章工商业储能边缘侧 EMS 的软件架构设计提出一种基于两类标准化 JSON 配置文件协同工作的边缘侧 EMS 数据闭环处理架构。该架构适用于任何以逻辑划分为上位机模块、主机模块与从机模块三个核心层次的工商业储能边缘侧 EMS，通过定义异构设备接入

配置文件与数据上报内容配置文件的协同机制，实现从底层物理信号采集、数据标准化映射到上层多协议转发的全链路软硬件解耦。

相较于具有复杂层级标签的 XML 格式或可读性较差的二进制文件，JSON 以其轻量级和自描述性在两者之间找到一个绝佳的平衡点^[66,67]，其键值对结构能够将底层的十六进制寄存器地址、波特率配置及通信规约转化为具备清晰层级的结构化文本，不仅能够灵活地映射出工商业储能系统现场设备之间的那种树状或网状的复杂拓扑关系，更能够让原本固化在 Flash 里的固化逻辑变得灵活并且可配置，在工程实施阶段，运维人员可直接通过基础文本编辑器修改配置，从而显著提升现场调试效率与系统的可维护性。

系统架构设计遵循配置驱动运行的原则，选择上位机模块（可为云端或本地端）负责响应用户需求，生成并下发下述两类核心 JSON 描述文件。

一类为异构设备接入配置文件，下述段落中统称为 $Config_{access}$ 文件，其定义物理端口参数、通信规约及原始点位到标准化地址的映射关系等。

一类为数据上报内容配置文件，下述段落中统称为 $Config_{report}$ 文件，其定义需上传的标准化数据子集、采样频率及触发死区等。

如图 3.4 所示。

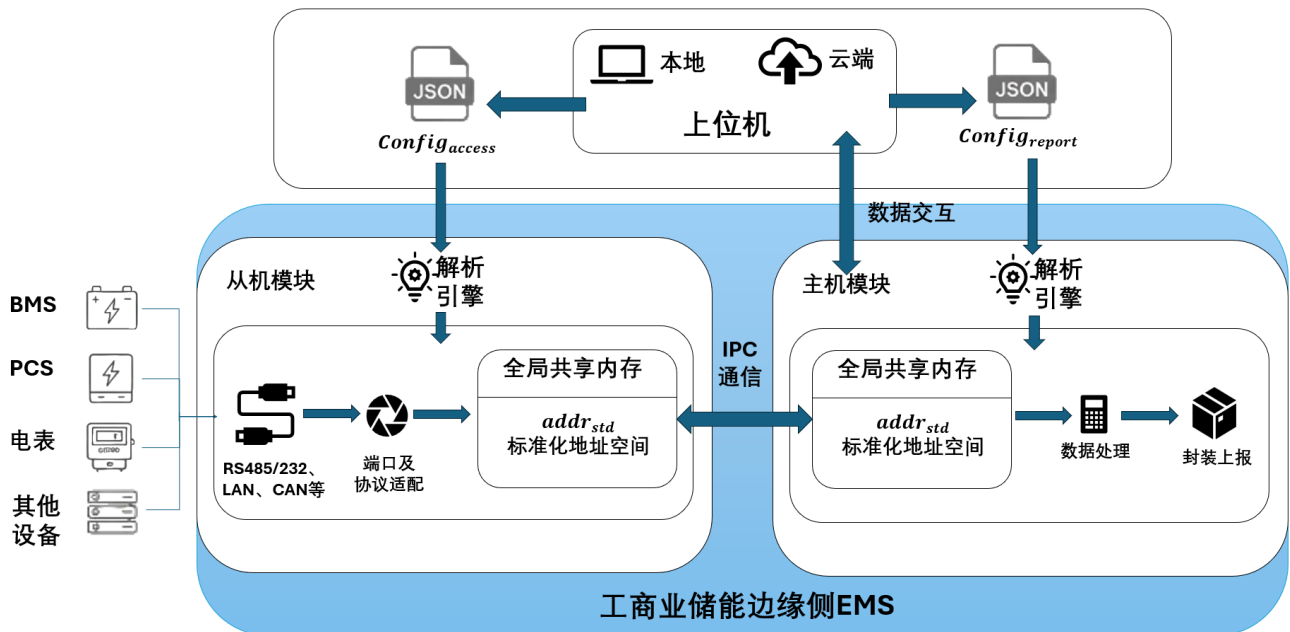


图 3.4 基于 JSON 配置的边缘侧 EMS 数据采集与上报流转架构图

$Config_{access}$ 文件通过上位机根据用户定义的设备类型（如 BMS、PCS、液冷机组等）、所采用的通信规约（例如 ModbusRTU/TCP、CAN、DIDO 等）、物理端口绑定（如 RS485、CAN、DIDO、LAN 等）以及核心的数据点位映射规则（如 Modbus 的寄存器地址及其长度、CAN 的报文 ID 与数据段偏移、DIDO 点位定义）等信息动态生成。储能边缘侧 EMS 内的从机模块在初始化或设备变更时，主动解析 $Config_{access}$ 文件，基于解析结果，从机模块动态构建内部的多协议、多端口轮询数组或类似的数据结构，并建立从物理设备数据点到边缘侧 EMS 内部标准化逻辑地址空间的精确映射，也就是考虑到数据异质性，从机模块在采集到原

始报文后 $Data_{raw}$ ，在获得对应的互斥锁后，将其写入全局共享内存中的标准化地址空间 $addr_{std}$ 。该映射过程确保系统内部数据的一致性，使得后续模块无需关注底层设备的具体协议差异，这种设计使得从机模块能够自动适应不同厂商、不同协议的设备，无需修改固件或进行硬编码。当新的异构设备物理连接后，从机模块通过 $Config_{access}$ 文件即可识别并开始轮询，实现即插即用。同时， $Config_{access}$ 文件也定义指令下发时，从标准化逻辑地址到具体设备物理点位的反向映射，确保控制指令的准确透传。

$Config_{report}$ 文件赋予用户高度自定义数据上报逻辑的能力。 $Config_{report}$ 文件也是由上位机生成，详细定义哪些采集到的标准化数据需要被上报、上报的目标（云平台、本地保存）、上报的触发条件以及上报的周期等。具体而言，用户可以配置需要上报的数据点列表、数据上报的频率、数据在上传前的预处理规则（单位转换、偏移量校正运算等），主机模块解析 $Config_{report}$ 文件后，并获取到对应的互斥锁后，会根据定义的规则从相应的标准化逻辑地址中提取数据，并按照设定的周期进行数据上报。这种设计使得数据上报的内容和时机完全由用户需求驱动，极大地增强系统的灵活性和对不同监控需求的适应性。

从机模块首先解析 $Config_{access}$ 文件。该文件定义下挂异构设备的通信参数和数据点位到边缘侧 EMS 内部的标准化地址的映射关系。从机模块根据此配置，对连接的异构设备数据进行周期性轮询采集，并将采集到的实时数据写入到相应的标准化地址中，实现数据的实时更新。主机模块通过内部通信机制（连接协议：TCP/IP 等；通信协议：Modbus TCP 等）与从机模块的标准化地址进行数据交互，这样既可以满足在同一个边缘侧 EMS 上的数据通信，也可以满足在不同边缘侧 EMS 之间，也就是一主多从之间的有效数据传递。主机模块解析 $Config_{report}$ 文件，确定需要上报哪些数据（从标准化地址中获取）以及上报的频率。并且根据解析出的上报数据的推算规则，主机模块会根据这些规则对获取到的原始数据进行转化，形成数据上报内容。主机模块将准备好的数据上报内容进行封装，形成对应的数据上报格式上报至平台。通过这两个 JSON 配置文件协同定义和解析执行的数据流和控制流设计，本课题实现从异构设备数据采集、标准化处理到用户自定义的数据内容的完整闭环，同时确保系统在离网和并网场景下的高效、灵活和自主运行能力。

3.2.2 异构设备通用描述模型的 JSON 规范定义

考虑到工商业储能场景下源、网、荷、储各类设备通信接口与规约的显著差异，即数据异质性问题，本课题摒弃传统边缘侧嵌入式开发中针对特定设备编写特定 struct 结构体的硬编码模式，提出一种通用的异构设备描述模型。该模型基于轻量级数据交换格式 JSON 实现，通过标准化的 Schema 定义，将设备的物理连接属性、链路层协议特征及应用层数据点位抽象为可序列化的文本对象。

为实现软硬件的深度解耦，本课题将 $Config_{access}$ 文件所描述的异构设备描述模型解构为物理端口层（Physical Port Layer）、逻辑设备层（Logical Device Layer）与数据原子层（Data Atom Layer）三个嵌套维度，如图 3.5 所示。

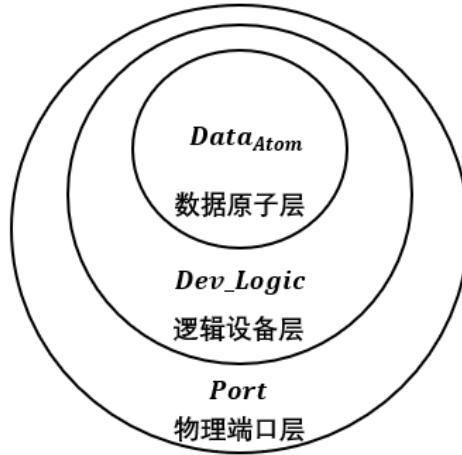


图 3.5 异构设备描述模型示意图

该模型可形式化表示为式 (3.1)：

$$Model_{device} = \{Port, Dev_Logic, Data_{Atom}\} \quad (3.1)$$

式 (3.1) 中， $Port$ 为物理端口参数集合， Dev_Logic 为挂载于端口的设备节点集合， $Data_{Atom}$ 为设备内的数据点位映射集合。

物理端口层主要描述工商业储能边缘侧 EMS 与外部硬件的电气连接特征，每个端口对象 $p_i \in Port$ 定义如式 (3.2)：

$$p_i = \{id_{port}, \Omega_{param}\} \quad (3.2)$$

式 (3.2) 中， id_{port} 为硬件端口标识符，为系统内核中物理接口的唯一索引，一般在一套系统中其物理接口数量以及种类近乎已经确定，可直接使用端口名来进行物理接口的调用，如 RS485_1, CAN_1 等，其与硬件上的物理接口均一一对应。系统启动时，解析引擎依据 id_{port} 直接调用对应的硬件抽象层 (Hardware Abstract Layer, HAL) 接口与协议栈驱动，无需额外配置协议类型，以此来缓解运行时动态匹配驱动所带来的不确定性。

式 (3.2) 中， Ω_{param} 为该 id_{port} 端口所对应的电气属性，其会根据不同的 id_{port} 来选用不同的适配数据集。

在针对 RS485/232 这一类串行端口时， Ω_{param} 就会等效于 Ω_{serial} ， Ω_{serial} 的定义如式 (3.3)：

$$\Omega_{serial} = \{baud, dataBit, stopBit, parity\} \quad (3.3)$$

式 (3.3) 中， $baud$ 对应波特率， $dataBit$ 对应数据位， $stopBit$ 对应停止位， $parity$ 对应校验位，如 $\{9600, 8, 1, Even\}$ 。

在针对 CAN 这一类端口时， Ω_{param} 就会等效于 Ω_{can} ， Ω_{can} 的定义如式 (3.4)：

$$\Omega_{can} = \{baud, slaveMASK, slaveFilter\} \quad (3.4)$$

式 (3.4) 中，同 RS485 的配置类似，对应的 CAN 总线端口的电气特性。

逻辑设备层嵌套在物理端口层中，主要用于描述挂载在物理总线上的具体从机节点，每个设备对象 $d_j \in Dev_Logic$ 需要包含协议适配参数，如式 (3.5)：

$$d_j = \{name, proto, addr_{phy}, addr_{base}, enable\} \quad (3.5)$$

式 (3.5) 中， $name$ 为下挂设备标识，例如 PCS、BMS 等这类设备名称。 $proto$ 为设备协议类型，显式的指定解析引擎需加载的驱动库，如 Modbus RTU、Modbus TCP 或 CAN2.0B 等等。 $addr_{phy}$ 为物理地址，对应的是 Modbus 的 Slave ID 或 CAN 节点的基准 ID。 $addr_{base}$ 为映射基地址，即该设备数据在系统内部数据标准化地址空间中的起始偏移量，该地址由上位机通过静态堆叠生成，并确保每个数据的地址是独一无二的。此设计以此缓解不同设备寄存器地址冲突的问题，确保每个设备在全局内存中拥有独立的映射区，并且能够将设备运行情况这一类由边缘侧 EMS 来判断的参数留有一定的预备空间。 $enable$ 为设备使能情况，可以根据用户自定义需求来判断当前是否要进行对应设备的数据采集。

数据原子层也是实现低代码接入的一个核心层次，其嵌套在逻辑设备层中，将异构的原始报文精确映射为系统对应地址当中，并且为支撑后续 AOE 策略引擎的闭环控制，数据原子层不仅承担物理信号的数字化映射，还需承载控制指令的逆向解析功能。考虑到一些工业现场中读写寄存器存在一定的非对称性特征（如某些 Modbus 设备读取用 0x03 功能码，但写入需 0x06 功能码），在 $Config_{access}$ 文件中每个数据点 $a_k \in Data_{Atom}$ 的映射关系定义为式 (3.6)：

$$a_k = \{reg_{phy}, len, \Lambda_{rw}, addr_{std}\} \quad (3.6)$$

其中， Λ_{rw} 为读写行为控制算子，其内部结构进一步形式化为式 (3.7)：

$$\Lambda_{rw} = \{(F_r, T_{cycle}), (F_w, T_{timeout})\} \quad (3.7)$$

式 (3.6) 中， reg_{phy} 为原始寄存器，即设备说明书定义的 Hex 地址（如 Modbus 中的 0x0064）或 CAN 报文内的数据偏移量。 len 定义原始数据的字节长度以及存放到系统内部的长度， Λ_{rw} 是 ModbusRTU 等特定协议中出现的功能码内容，式 (3.7) 中的 F_r 对应数据采集功能码， T_{cycle} 为轮询周期， F_w 为控制写入功能码，该码只在该点被标记为可控时生效， $T_{timeout}$ 为控制指令下发的超时阈值， $addr_{std}$ 则为上位机模块对于系统内部数据特定位置所分配的映射地址，这是一个关键参数，它指明该数据点写入全局共享内存的一个绝对索引位置，该地址是连接从机采集与主机上报以及策略的唯一纽带。

综上所述，通过构建包含物理端口、逻辑设备及数据原子的三层嵌套模型，本节提出的异构设备通用描述方法有效地将工业现场复杂的物理连接特征与寄存器拓扑结构抽象为标准化的内存映射表。特别是数据原子层中读写控制算子的形式化定义，不仅消除多源异构数据的解析差异，更为后续基于 AOE 有向图的策略引擎提供确定的底层控制原语。这种将硬件驱动逻辑静态化至配置文件的设计范式，从根源上缓解传统边缘侧嵌入式开发中底层驱动与上层策略紧密耦合的问题。当面临工商业储能场景中设备选型变更或通信规约迭代时，系统

仅需更新 JSON 描述文件即可维持上层控制逻辑的有效性，从而确保边缘侧 EMS 在动态环境下的控制一致性与运行结果的稳定性。

3.2.3 异构设备数据上报通用模型的 JSON 规范定义

通过对上一小节中异构设备通用描述模型的 JSON 规范定义描述，但在一套完整的工商业储能控制流程中，其对于异构设备的低代码接入，肯定是远远不够的。因此，为解决工商业储能系统中多源异构数据向业务应用层流转时的语义鸿沟问题，本课题提出一种异构设备数据上报通用模型。其模型基于 $Config_{report}$ 文件进行实例化，旨在将底层非结构化的物理寄存器数据重构为面向业务的标准化信息流。通过定义数据源索引、时序触发规则及本地持久化策略，实现数据应用逻辑与底层采集的完全解耦。

本课题将 $Config_{report}$ 文件所描述的异构设备数据上报通用模型抽象为从机源索引层（Slave Source Layer）、触发规则层（Trigger Rule Layer）与数据映射层（Data Mapping Layer）的集合。该模型可形式化为式（3.8）：

$$Model_{report} = \{Slave_{source}, Report_{rule}, Data_{map}\} \quad (3.8)$$

式（3.8）中， $Slave_{source}$ 定义数据来源的逻辑通道， $Report_{rule}$ 定义数据提取的时机与条件， $Data_{map}$ 定义从标准化地址空间到业务变量的映射关系。

在 $Config_{report}$ 文件中，首先定义数据获取的逻辑源与采样行为。通过相对应字段建立主机与从机模块的 IPC 通信链路，构建从机源索引层。定义 $s_i \in Slave_{source}$ 如式（3.9）：

$$s_i = \{id_{slave}, addr_{ip}, port\} \quad (3.9)$$

式（3.9）中， id_{slave} 为从机标识唯一表示名，同一个 IP、PORT 下不同从机 id_{slave} 具有特异性。 $addr_{ip}$ 为从机 IP，地址 $port$ 为从机端口号。主机据此定位特定的从机模块，以此缓解多进程并发下的数据路由寻址问题。并且无论是一台边缘侧 EMS 的工商业储能系统，还是一拖多储能系统环境，多进程的板间 socket 通信都能够有效的适应。

此外，在触发规则层中，为平衡数据的实时性与传输带宽开销，模型引入“死区-周期”混合触发算法。在 $Config_{report}$ 文件对应字段中，定义 $r_j \in Report_{rule}$ 如式（3.10）：

$$r_j = \{\delta_{deadband}, T_{cycle}\} \quad (3.10)$$

例如在 $Config_{report}$ 文件中的对应字段配置“DC60”，表示：当数据变化 $|\Delta t_{change}| > \delta_{deadband}$ 或上次上报时间间隔 $|\Delta t_{gap}| \geq 60$ 时，触发数据上报，分别对应式（3.10）中的 $\delta_{deadband}$ 与 T_{cycle} 。这种机制确保在稳态运行时降低冗余数据量，而在暂态过程（如 PCS 功率突变）中能够捕捉关键特征。

对于数据映射层，这是实现按需上报的核心逻辑。每个上报项 $u_k \in Data_{map}$ 建立一个从内存地址到业务语义的映射通道，其结构定义如式（3.11）：

$$u_k = \{addr_{start}, len, T_{type}, E_{endian}, T_{linear}, S_{persist}, id_{stream}\} \quad (3.11)$$

式 (3.11) 中, $addr_{start}$ 与 len 作为地址索引, $addr_{start}$ 作为读取起始地址, len 作为所需读取长度。并且这是连接 3.2.2 节所述数据标准化地址空间 $addr_{std}$ 的关键指针。主机模块依据式 (3.12) :

$$addr_{read} = \{addr_{start}, \dots, addr_{start} + len - 1\} \quad (3.12)$$

只需获得来源、地址以及长度, 即可从对应寄存器空间内批量读取数据, 完全无需知晓该数据源自 Modbus 或者是 CAN 总线还是其他等设备, 从而实现物理层协议的屏蔽。

式 (3.11) 中, T_{type} 与 E_{endian} 分别对应数据类型与字节序, 与对应的 T_{linear} 线性变换算子相结合, 定义数据在流转过程中的量纲标准化处理。 T_{linear} 内部的值分别对应倍率 α 与偏移量 β , 因此可执行变换式 (3.13) 与式 (3.14) 所示:

$$x_{raw} = \Gamma(T_{type}, E_{endian}, value_{read}) \quad (3.13)$$

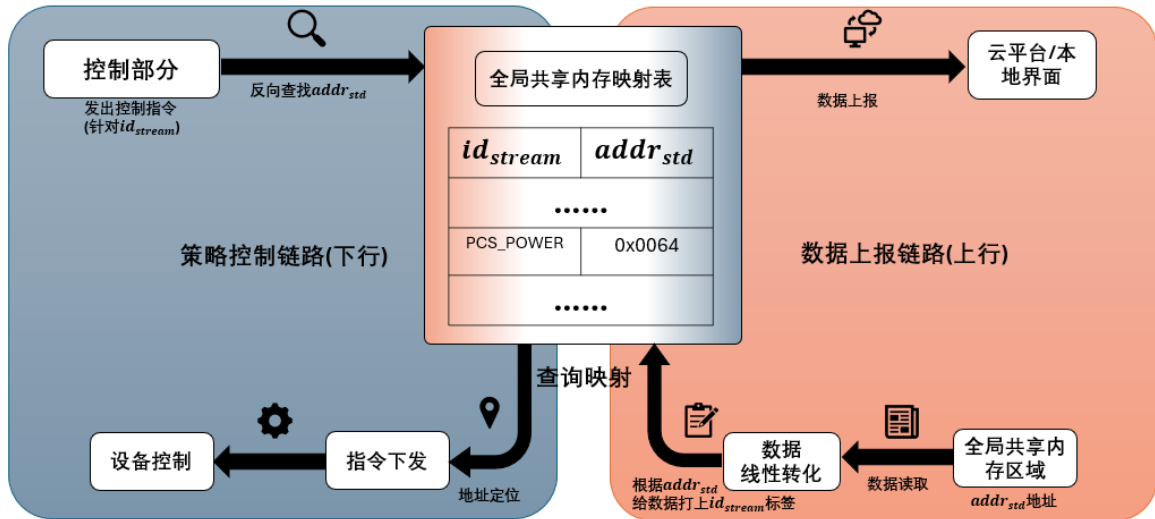
$$y_{std} = \alpha \cdot x_{raw} + \beta \quad (3.14)$$

例如, 将底层传输的整型电压值转换为浮点型伏特值。

式 (3.11) 中, $S_{persist}$ 为持久化策略, 定义数据的本地存储生命周期。例如, 对应字段配置为 “S300” 表示该数据点需以 300 秒为周期写入本地非易失性存储器, 这一设计对于工商业储能的离网自治至关重要, 确保在无网络环境下, 关键运行数据 (如 SOH 趋势、故障日志) 仍能完整保留, 待网络恢复后也可以支持断点续传。为后续 SOH 衰退预测模型的搭建提供宝贵的数据来源。

式 (3.11) 中, id_{stream} 为业务流标识, 即上层业务系统识别该数据的唯一键值。此外, 为解决异构设备物理地址与业务逻辑变量之间的语义鸿沟, id_{stream} 也将会是用户选用进行索引的一个关键数据指标, 无论是在下述 AOE 控制模块中需要对于数据来源获取的定位, 还是对于指定点位的控制, 在与 3.2.2 中的数据原子层配合, 即可实现控制逻辑自定义化。

如图 3.6 所示。在数据上报链 (上行) 中, 主机模块通过索引映射表捕捉存储于 $addr_{std}$ 处的原始位流, 经由线性算子转换后, 赋予其具有业务语义的 id_{stream} 标签, 以此实现面向云端或本地人机界面的结构化上报。在策略控制链 (下行) 中, 仅需下达指向 id_{stream} 的控制指令, 系统通过反向查找机制找到对应的全局共享内存中的标准化逻辑地址 $addr_{std}$, 进而触发相对应的点位控制。这种设计通过维护一张全局动态映射表, 在逻辑上构建一个虚实结合的数据交换矩阵, 以此缓解业务逻辑变更导致的软件重构压力, 确保系统在处理复杂控制逻辑时具有高度的稳定性。

图 3.6 基于 id_{stream} 的双向数据流转原理图

通过上述标准化的 JSON Schema 定义，主机模块的上报引擎被抽象为一个通用的数据管道：输入端对接对应标准化寄存器地址，输出端对接业务标识，中间过程由配置文件驱动。这种架构使得新增上报数据仅需修改文本文件，无需重编译二进制代码，极大地提升系统的工程适应性与维护效率。并且，这种分层映射设计不仅消除异构设备接入过程中因协议碎片化而引发的障碍，更为后续章节基于 AOE 有向图的策略组态提供标准化的原子操作集。在此架构支撑下，策略节点的搭建仅需聚焦于业务逻辑的拓扑编排，而无需处理底层复杂的通信时序与寄存器寻址，从而确保工商业储能边缘侧 EMS 在资源受限环境下运行结果的稳定性。

3.2.4 动态协议栈的解析与运行时实例化机制

基于前序章节对异构设备描述模型与数据上报通用模型的规范化定义，本小节将阐述边缘侧 EMS 如何在嵌入式 Linux 环境下，将静态的文本配置文件转化为运行时的动态对象与数据轮询任务。

考虑到 RK3568 平台虽具备四核 ARM Cortex-A55 架构的算力基础，但在处理多进程并发与实时控制任务时，仍需严格控制内存碎片与 CPU 时间片开销，所以本课题将选用轻量级 C 语言 JSON 解析库 cJSON 作为核心解析引擎，利用其基于链表结构的内存管理机制与标准 C 库的兼容性，实现配置文件的快速反序列化^[68]。与 C++ 的 JsonCpp 或 RapidJSON 相比，cJSON 是基于 ANSI C 标准编写的，仅包含 cJSON.h 与 cJSON.c 两个文件，编译后的二进制体积小，且不需要依赖第三方库，能够极大地降低系统的冗余度^[69,70]。三种主流 JSON 解析库在嵌入式平台下的资源开销对比如下表 3.2 所示。

表 3.2 不同 JSON 解析库在嵌入式平台下的编译开销与特性对比表

	cJSON	JsonCpp	RapidJSON
编程语言标准	ANSI C	C++11	C++
编译后二进制体积	≈24 KB.so 动态库	≈280 KB.so 动态库	增加主程序体积>150KB

续表 3.2 不同 JSON 解析库在嵌入式平台下的编译开销与特性对比表

	cJSON	JsonCpp	RapidJSON
运行时内存开销	低，基于简单链表	高，基于 STL 容器	中，基于 DOM 内存池
外部依赖	无 仅需标准 C 库	C++ Standard Library, RTTI	C++ STL, Boost
移植复杂度	低 仅需复制 2 个源文件	中 需配置 CMake/Make	中 需处理编译器版本兼容性
适用场景	资源受限的嵌入式底层驱动	云端服务器或 PC 端应用	高吞吐量数据处理应用

cJSON 在编译后的体积仅为 JsonCpp 的约 1/10，并且 JsonCpp 的内存使用效率是三组工具中最差的^[71]，虽然 RapidJSON 采用仅头文件编译的模式，但其模板展开的机制会导致主程序二进制体积发生显著的膨胀，这对于存储空间有限的边缘侧设备而言并非最优解^[72]。

本架构仅在系统初始化阶段或者接收到配置变更指令时才会调用 cJSON 库将存储于 Flash 中的对应配置文件一次性的加载至内存堆区，并反序列化为内存对象树，在此阶段完成所有字段的校验与内存映射后，立即释放内存对象树所占用的临时内存，仅保留核心配置的链表，因其短暂的 CPU 峰值负载不会对后续的实时控制周期产生时序抖动，避免在实时控制周期内进行频繁的字符串解析与内存分配，从而导致内存碎片化所引发的系统运行崩溃或实时性抖动，确保系统运行结果具有稳定性。

考虑到工商业储能边缘侧 EMS 在运行过程中，底层电气特性（如波特率、校验位）具有运行时刚性，即不随业务逻辑变化而随意更改^[73]，若对电气特性进行随意的更改会加重数据通信的不稳定性，以及极大增加程序处理的复杂度，是完全得不偿失的，因此解析引擎会首先对 3.2.2 节定义的物理端口层进行遍历。

解析引擎遍历 $Config_{access}$ 文件中的“portInfor”数组进行物理层电气特征的原子化配置。对于每一个端口对象 p_i 见式（3.2），系统提取其电气参数集合 Ω_{param} ，为隔离底层硬件差异，系统不直接操作寄存器，而是通过回调函数机制调用板级支持包中预编译的串口初始化函数 f_{init} 。该过程可表示为式（3.15）：

$$H_{port} = f_{init}(id_{port}, \Omega_{param}) \quad (3.15)$$

式（3.15）中， H_{port} 为操作系统返回的文件描述符或硬件句柄。通过这个步骤确保系统在加载任何上层协议之前，物理链路的电气参数已通过原子操作被正确锁定，为后续的数据交互奠定硬件基础。

在完成物理端口初始化后，解析引擎会进入协议处理句柄的各种查找与映射阶段，从而进入逻辑设备层。系统读取设备配置中的“proto”字段（如 ModbusRTU），系统将其字段作为索引键，在系统内部的协议函数库哈希表 T_{proto} 中进行查找，表示为式（3.16）：

$$F_{handler} = T_{proto} \cdot get("proto") \quad (3.16)$$

考虑到不同的通信协议（如 Modbus、DL/T645、CAN）在帧结构与校验方式上存在明显的差异，本系统将会预先封装标准化的协议处理函数集，并通过函数指针的形式注册在 T_{proto} 中，当解析引擎匹配到对应的协议标识时，将立即执行回调绑定，将物理层句柄 H_{port} 与协议处理函数 $F_{handler}$ 进行关联，生成运行时协议实例对象 Obj_{proto} ，表示为式（3.17）：

$$Obj_{proto} = \{H_{port}, F_{handler}\} \quad (3.17)$$

通过这种“配置-查表-回调”的端口先行，协议后绑机制，无论物理层是 RS485 串口还是 CAN 总线，上层协议栈仅需通过统一的读写接口操作对应的文件描述符，无需关注硬件细节。当需要支持新的通信协议时，仅需在 T_{proto} 中注册新的处理函数，而无需修改主程序的遍历逻辑，从而保证系统架构的开放性与结果的稳定性，如下图 3.7 所示。本系统已预先内置/适配了市面主流的通信协议（如 ModbusRTU/TCP、CAN、IEC104 等），覆盖了工商业储能场景下的绝大多数设备，若是后续接入系统未注册过协议的新异构设备，开发人员仅需在对应协议栈进行协议的补充与对应参数的适配，即可完成同一类协议的异构设备接入。

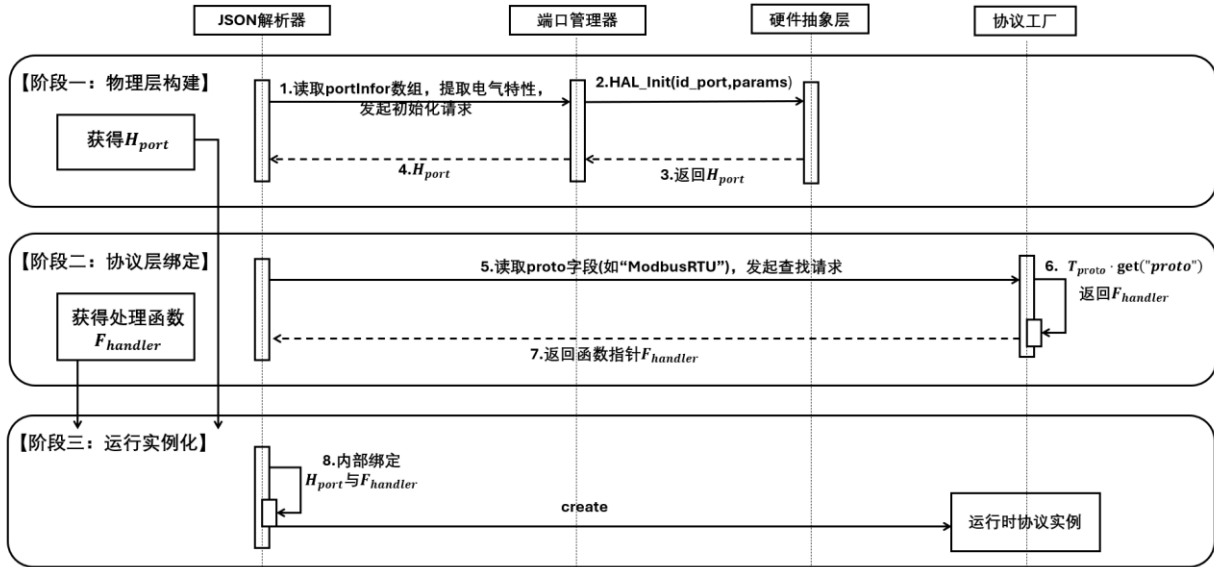


图 3.7 从机模块系统启动与协议栈实例化时序图

在完成协议实例化的基础上，进行数据轮询任务链的构建，解析引擎会遍历 $Data_{Atom}$ 集合，进入数据原子层，依据式（3.6）建立的映射关系，将离散的寄存器点位 a_k 组装为连续的批量读取任务，依据物理地址连续性原则，将属于同一设备且地址相邻的原子点合并为一个数据块请求，来减少总线通信次数，构建出优化后的结构体数组，每个节点不仅包含起始地址与长度，还通过指针直接指向全局共享内存中的标准化地址 $addr_{std}$ 。在从机模块系统运行时，数据采集线程仅需循环遍历优化的结构体数组，通过节点内的协议实例指针调用底层驱动函数，获取数据后直接通过 $addr_{std}$ 写入全局共享内存中，这一过程完全避开复杂的 JSON 树查找，其时间复杂度为 $O(n)$ ，保证在毫秒级控制周期内对全量异构设备数据的实时捕捉与更新。

在从机模块完成物理层至链路层的数据管道构建后，主机模块的解析与实例化流程将会依据 3.2.3 节所述的 $Config_{report}$ 文件展开，遵循通信链路构建先行，数据映射逻辑后置的工程原则。

主机模块启动解析引擎后，首先聚焦于 $Slave_{source}$ 节点集合的遍历，进入从机源索引层。针对每一个从机源对象 s_i ，解析引擎提取其网络属性三元组，动态实例化通信连接对象。并调用 Linux 系统的 Socket API 原语初始化 TCP 客户端。考虑到工商业储能系统内部各模块间通信的高可靠性要求，本课题采用 Modbus TCP 作为 IPC 层的标准应用协议，此时，无论每个从机底层实际挂载的是 CAN 总线设备、RS485 设备还是其他类型的设备，主机都将每一个从机视为一个标准的 Modbus Server，与之进行通信。

系统依据 id_{slave} 的唯一性标识，为每个连接实例动态分配 Socket 文件描述符，并构建线程池，该过程建立一个逻辑上的“一主多从”通信拓扑，以此缓解多进程并发环境下数据路由寻址的复杂性问题。若连接建立成功，系统将该上下文注册至全局轮询列表，若连接失败，则启动重连机制，确保进程间通信的稳定性。

随后解析引擎将进一步处理 $Data_{map}$ 层的数据映射定义。不同于从机侧关注物理寄存器的原始读写，主机模块侧的实例化过程聚焦于将底层标准化地址 $addr_{std}$ 转化为面向业务的 id_{stream} 标识系统遍历每一个上报项 u_k 见式 (3.11)，依据其 $addr_{start}$ 和 len 属性，构建针对特定从机源的 Modbus TCP 读取请求帧，系统将同一从机源下、物理地址连续且采样周期一致的多个映射项合并为一个批量读取请求，来提高 Modbus TCP 的通信效率，与此同时解析引擎依据数据推算参数，调用数据处理回调函数，将从 IPC 链路获取的字节流进行大端/小端序转换与线性变换即式 (3.13) 与式 (3.14)，从而还原出具有物理意义的浮点数值，放入自身的内存当中，后续的 AOE 策略引擎仅需操作 id_{stream} 业务标识，系统底层即可自动路由至对应的 Socket 连接并解析数据。这种设计屏蔽底层数据异质性，实现业务逻辑与物理链路的完全解耦，如下图 3.8 所示。

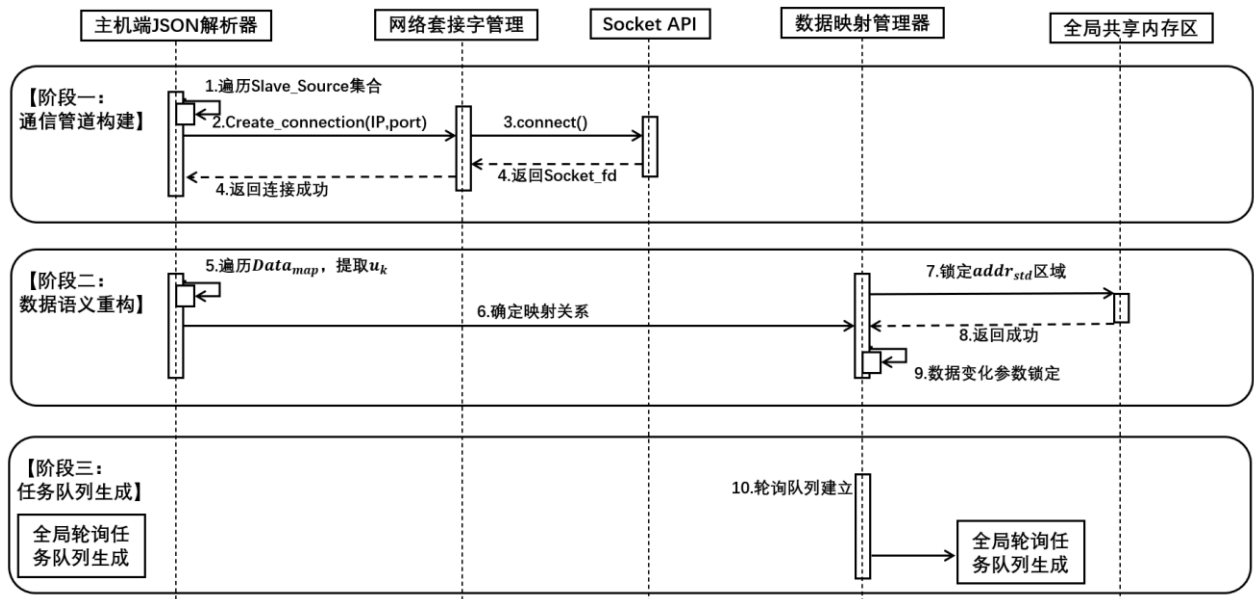


图 3.8 主机模块 IPC 链路构建与数据映射实例化时序图

综上所述，通过物理端口的静态初始化与协议处理函数的动态回调，本课题构建一个高度灵活的运行时环境。边缘侧 EMS 在启动时，从机模块依据 $Config_{access}$ 文件无需人工干预自动完成从硬件驱动加载到业务数据映射的全过程，这种设计不仅通过函数指针的注册回调机制消除传统硬编码方式下的逻辑耦合，更确保系统在面对异构设备接入时，能够以最小的资源开销实现驱动程序的即时加载与实例化。并且无论底层异构设备如何变更，主机模块仅需依据 $Config_{report}$ 生成的映射表，通过标准的 Modbus TCP 协议与从机模块交互，从而获取对应所需的标准化数据。这种设计有效地将数据采集的物理细节隔离在从机侧，将数据的提取与处理逻辑集中于主机侧，确保边缘侧 EMS 在处理复杂工商业储能策略时的数据一致性与架构弹性。

3.3 基于 AOE 有向图的策略组态与静态映射机制

经由前文 3.2 节所述，通过构建异构设备通用描述模型与数据上报通用模型这两类模型，本课题已有效地在物理设备层与系统内存空间之间搭建一条标准化的数据通路，利用 $Config_{access}$ 与 $Config_{report}$ 两类 JSON 配置文件的协同工作，底层各类 BMS、PCS 及电表等设备的寄存器状态已被实时映射为全局共享内存中具有统一寻址格式的标准化数据 $addr_{std}$ 。然而上述的内容仅实现数据的透明化获取与标准化映射，若上层控制逻辑仍沿用传统的过程导向编程范式，将削峰填谷、需量控制等复杂策略硬编码为嵌套的条件判断语句，则系统在面对工商业场景中多变的用户需求与拓扑结构时，仍然无法摆脱牵一发而动全身的问题，边缘侧 EMS 在边缘侧依旧难以实现真正的自主化与智能化。因此本节引入 AOE 网理论提出一种面向边缘侧嵌入式环境的策略组态与静态映射机制，实现控制策略的低代码重构与热切换。下文将详细论述 AOE 网的数学模型定义、静态映射机制以及基于拓扑排序的运行时推理引擎设计。

3.3.1 AOE 网的数学模型定义

为缓解传统控制逻辑中因过程导向编程引发的策略僵化及耦合的一系列的问题^[74]，本课题将引入 AOE 理论，将工商业储能边缘侧 EMS 的控制策略抽象为一种基于事件驱动的有向无环图^[75]，不同于传统的项目管理领域仅将 AOE 用于工期评估，本课题将其重构为描述“状态-动作”转换逻辑的一种事件驱动的控制流模型。

工商业储能系统的控制策略拓扑 G_{EMS} 可定义为一个三元组，如式 (3.18) 所示：

$$G_{EMS} = (V, E, \Phi) \quad (3.18)$$

式 (3.18) 中， $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为事件的节点集合，代表系统运行过程中的逻辑状态检查点或控制流程的汇聚点； $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 为有向边的集合，代表具体的计算任务、逻辑判断或控制指令的下发，也就是活动； Φ 为全网拓扑约束的集合，定义节点之间所存在的偏序关系与数据流转规则。

对于任意节点 $v_k \in V$ 表示系统一个特定的“状态”或“事件”，其不仅仅是图中的连接点，更是边缘侧 EMS 控制逻辑中的不同状态，它的定义 v_k 的数学结构为式 (3.19)：

$$v_k = \{ID_k, L_{trigger}, \mathcal{S}_{in}, \mathcal{S}_{out}\} \quad (3.19)$$

式 (3.19) 中， ID_k 为节点的唯一标识符； $\mathcal{S}_{in}$ 与 $\mathcal{S}_{out}$ 分别表示入度与出度边的集合。 $L_{trigger}$ 为节点的触发逻辑函数，用于判定当前系统状态是否满足进入下一阶段的条件^[19,21,75]。考虑到数据的异质性， $L_{trigger}$ 的输入变量直接映射为 3.2 节中定义的标准数据地址空间 $addr_{std}$ ，只在所有前驱的活动 $e_{i,k} \in \mathcal{S}_{in}$ 处于完成状态并且 $L_{trigger}$ 的计算结果为真的时候，节点 v_k 作为起点的有向边才会被激活，此时系统的状态将会发生跃迁。

集合 $E = \{e_{ij} | v_i, v_j \in V\}$ 中的有向边 e_{ij} 为具体的控制行为，边不再仅仅是一条连接线，而是会被赋予一个指向底层 C 语言原子函数的对应关系，边的执行输出 u_t 定义为式 (3.20)：

$$A(e_{ij}): u_t = \begin{cases} \Phi_{ptr}(D_{in}, \theta_{cfg}), S(v_i) = True \\ \emptyset, S(v_i) = False \end{cases} \quad (3.20)$$

式 (3.20) 中， $S(v_i)$ 为源节点 v_i 在当前控制周期内的逻辑状态，分为激活与未激活的两个状态，这种设计在保证时间确定性的同时也实现逻辑分支的互斥控制。 Φ_{ptr} 为系统初始化阶段就完成绑定的函数指针，涵盖从简单的 I/O 读写到复杂的非线性功率寻优，确保复杂的控制策略被分解为离散的、可复用的计算单元。 D_{in} 为输入状态向量，对应一些参数所原子算法所需要的数据输入部分， θ_{cfg} 指在系统初始化阶段通过解析 JSON 配置文件加载到内存中的、在单次控制周期内保持不变的静态参数集合。

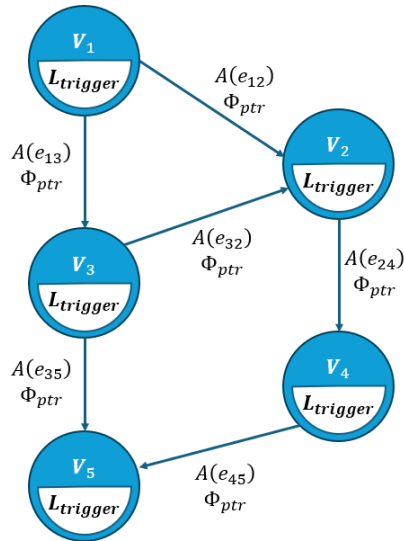


图 3.9 AOE 网数学模型结构图

如图 3.9 所示，该拓扑结构直观呈现式 (3.18) 所定义的工商业储能边缘侧 EMS 控制策略图谱 G_{EMS} 的逻辑形态。图中圆形节点 V_1 至 V_5 对应式 (3.19) 中的状态检查点，其内部封装的 $L_{trigger}$ 构成逻辑状态哨兵，负责对标准数据地址 $addr_{std}$ 中的实时采样值进行布尔运算，以此决定控制流在当前时序下的阻断或延续。连接各节点的有向边 e_{ij} 则具体实例化式 (3.20) 中的动作映射关系。边上的标识 $A(e_{ij})$ 不仅表征系统从源状态 V_i 向目标状态 V_j 的逻

辑跃迁，更关键的是通过 Φ_{ptr} 字段实现抽象逻辑与底层物理执行单元的静态绑定。每一条边对应一个指向 C 语言原子函数的指针，当且仅当源节点 $L_{trigger}$ 判定为真时，该函数指针被调度执行。将业务策略分解为“状态节点-动作边”的离散化建模方式，有效实现控制逻辑与底层代码实现分离。

现有的 AOE 研究多致力于解决大型微电网系统的通用性建模问题，其解释执行的模式对控制器的 CPU 算力与内存带宽提出较高要求，而本课题针对 RK3568 平台的资源限制，富有创造性地提出“离线组态-启动解析-静态执行”的轻量化机制。本系统在初始化阶段利用 JSON 解析器完成图谱的拓扑排序，将逻辑上的“节点”与“边”直接映射为内存中连续存储的函数指针数组，在系统的实时运行周期内，无需反复遍历图结构，仅需依序调用指针指向的原子函数，这一改进既保留组态技术的灵活性，又通过静态映射机制确保工业级控制的硬实时性，并有效缓解边缘侧嵌入式系统因内存过度碎片化而导致的崩溃风险，确保边缘侧 EMS 的稳定性。

3.3.2 策略控制通用描述模型的 JSON 规范定义

承接前文 3.3.1 节对于 AOE 网数学模型的抽象定义，为将理论层面的有向无环图 G_{EMS} 转化为边缘侧嵌入式系统可识别、可存储且易于配置的工程实体，本节提出一种策略控制通用描述模型，该模型通过定义标准化的策略配置文件，下述段落统称为 $Config_{strategy}$ 文件，通过标准化的 JSON Schema 定义，将复杂的工商业储能管理逻辑分解成可序列化的节点属性集合与边活动集合，不仅承载策略的拓扑结构，更是连接上层业务逻辑与底层 C 语言原子函数的桥梁。

本课题将 $Config_{strategy}$ 文件所描述的策略控制通用描述模型形式化定义为节点集合、边集合与全局约束参数的元组，如式 (3.21) 所示：

$$Model_{strategy} = \{N_{set}, E_{set}, \Omega_{global}\} \quad (3.21)$$

其中， N_{set} 为策略图谱中的事件节点描述集合， E_{set} 为连接节点的动作边描述集合， Ω_{global} 为全局策略约束（如策略周期 $T_{strategy}$ ）。

在 $Config_{strategy}$ 文件中，策略节点层定义控制流的决策锚点，集合中的任意节点对象 $n_i \in N_{set}$ 定义系统状态的判定逻辑，由式 (3.22) 表示：

$$n_i = \{id_{node}, T_{type}, L_{expr}, \Gamma_{jump}\} \quad (3.22)$$

式 (3.22) 中， id_{node} 为节点在图谱中的唯一索引，系统的解析引擎根据该信息来构建拓扑邻接表， T_{type} 为节点类型的枚举，包括起始节点、条件分支节点与汇聚节点。

$$\Gamma_{jump} = \{(cond_{true}, idx_{next_true}), (cond_{false}, idx_{next_false})\} \quad (3.23)$$

式 (3.23) 为条件跳转集合。 L_{expr} 为基于逆波兰表达式构建的逻辑判据，其计算结果决定控制流在执行序列中的下一跳索引 idx_{next} 。

活动边层是策略执行的核心载体，描述工商业储能边缘侧 EMS 在状态发生变化的过程中，所需要执行的具体任务，拥有具体的控制算法与参数注入部分，该集合中的任意边对象 $e_j \in E_{set}$ 结构定义如式 (3.24)：

$$e_j = \{id_{edge}, n_{src}, n_{dst}, \Psi_{action}, \Theta_{cfg}\} \quad (3.24)$$

式 (3.24) 中， n_{src} 与 n_{dst} 分别指定边的源节点与目标节点 ID，确立控制流的指向性； Ψ_{action} 为动作标识符，这是实现低代码策略配置的关键，它作为查找键值，在系统启动时通过哈希表映射到底层已编译好的 C 语言函数指针 Φ_{ptr} ； Θ_{cfg} 则对应 3.3.1 节提及的静态参数集合。

基于上述定义，工商业储能边缘侧 EMS 在运行时的策略执行流程不再依赖于对文本文件的反复读取，而是基于内存中构建的“事件-动作”有向图进行指针跳转。当 n_i 状态节点中的 L_{expr} 判定为真时，系统调度器直接通过指针调用 e_j 中绑定的 Ψ_{action} 函数，并将 Θ_{cfg} 解析后的结构体作为参数传入，如图 3.10 所示。

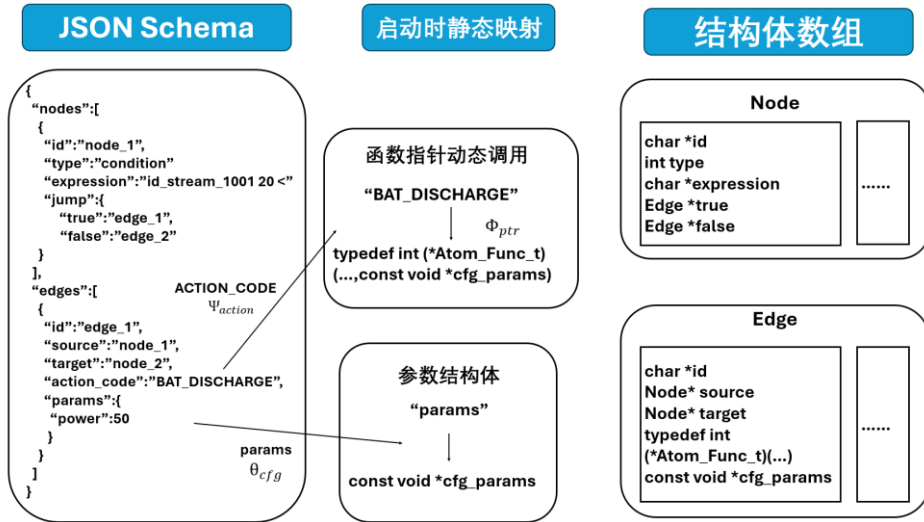


图 3.10 策略控制通用描述模型的 JSON 规范与运行时内存映射示意图

3.3.3 基于拓扑排序的静态映射与算子库构建

本课题依旧采用启动时静态映射到运行时指针调用的执行机制，利用拓扑排序算法将 3.3.1 节定义的 AOE 有向无环图 G_{EMS} 转化为内存中线性排列的执行序列，并通过哈希映射建立 Function ID 与底层 C 语言原子函数的直接关联，确保系统在资源有限的条件下运行还能具有一定的稳定性。

在 $Config_{strategy}$ 文件被加载至内存后，策略图谱以邻接表的形式存于内存中，由于 AOE 网本质上是一个有向无环图，其节点之间的关系决定控制逻辑的先后顺序。

本课题选择基于静态指令表的映射机制，其中的每个元素被定义为一个控制字结构体 I_k ，其物理内存布局如式 (3.25) 所示：

$$I_k = \{\Phi_{ptr}, \Theta_{args}, \mathcal{J}_{true}, \mathcal{J}_{false}\} \quad (3.25)$$

式 (3.25) 中, Φ_{ptr} 是指向底层 C 语言原子算子 (如 “CALC_LOAD_REAL”) 的函数入口地址; Θ_{args} 是指向参数结构体的指针, 参数源于 JSON 解析后的配置数据; $\mathcal{J}_{true} / \mathcal{J}_{false}$ 为静态跳转索引, 当该节点为条件分支节点时, 若算子返回值为真, 将跳转至索引 $\mathcal{J}_{true}$ 指向的指令行; 否则跳转至 $\mathcal{J}_{false}$ 。对于普通顺序节点, 两者均指向拓扑序中的下一条指令。

在系统初始化阶段, 解析引擎首先对遍历事件集合与边集合构建对应结构体数组, 随后, 解析器执行 “回填” 操作: 遍历两个数组, 将边节点数组中节点的指针对应回填至事件节点的 $\mathcal{J}_{true}$ 或 $\mathcal{J}_{false}$ 字段中, 来避免运行时动态图遍历带来的不确定性延迟。

在 3.3.2 节定义的策略控制通用描述模型的 JSON 规范中, 边对象的动作标识符 Ψ_{action} (如 “CALC_LOAD_REAL”) 为文本字符串, 而边缘侧嵌入式系统的底层执行单元为二进制函数地址, 为解决这一部分的语义转化问题, 本课题采用基于哈希表的静态映射机制, 系统预先在内部定义一个全局算子表 T_{reg} , 其结构为 Key-Value 对, 其中 Key 为算子的唯一字符串标识, Value 为指向对应 C 语言函数的指针。在解析阶段, 解析引擎遍历 S_{exec} 序列中的每一条边 e_k , 读取其 Ψ_{action} 字段, 利用字符串哈希算法 (如 MurmurHash3) 计算键值, 并在 T_{reg} 中进行 $O(1)$ 复杂度的查找, 获取对应的 C 语言函数指针 ptr_{func} 。在哈希值计算过程中, 系统会对已有的算子进行哈希值的校验, 来避免出现哈希碰撞的问题。随后, 系统将该指针直接写入内存中预分配的边结构体实例中。这一映射过程可形式化表示为式 (3.26):

$$\Gamma: String(\Psi_{action}) \xrightarrow{[Hash]} Key \xrightarrow{[Lookup]} ptr_{func} \in \mathbb{R}_c \quad (3.26)$$

其中, $\mathbb{R}_c$ 为系统全局空间的函数指针集合, JSON 描述文件在内存中转化为一条由函数指针构成的指令数组, 后续的策略执行仅需进行指针跳转, 完全规避字符串比对操作。

算子库是策略执行的最小功能单元, 是策略执行的基础构件, 因此所有算子均采用统一的标准接口定义, 供后续节点调用。

工商业储能边缘侧 EMS 的运行时数据流转机制呈现为严谨的指令驱动-全局共享内存交互的三层式架构, 以典型的 “防逆流控制” 策略为例: 首先进入前序节点负载计算算子, 算子 “CALC_LOAD_REAL” 被触发, 从全局共享内存中读取电表实时功率, 执行 P_{load} 负载功率的运算, 将计算结果回写至全局共享内存中的标准化地址 $addr_{std}$: 随后根据用户所配置的中间节点限值计算算子, 从 $addr_{std}$ 中读取负载值, 结合 JSON 配置中设定的静态参数即防逆流限制值, 计算当前情况下储能系统所允许的最大放电功率, 并更新到全局共享内存中; 最后用户配置的后续节点功率下发算子, 决策算子 “EXEC_PCS_CMD” 读取用户设定的削峰目标值与上述边界值, 得到最终控制指令, 如图 3.11 所示。

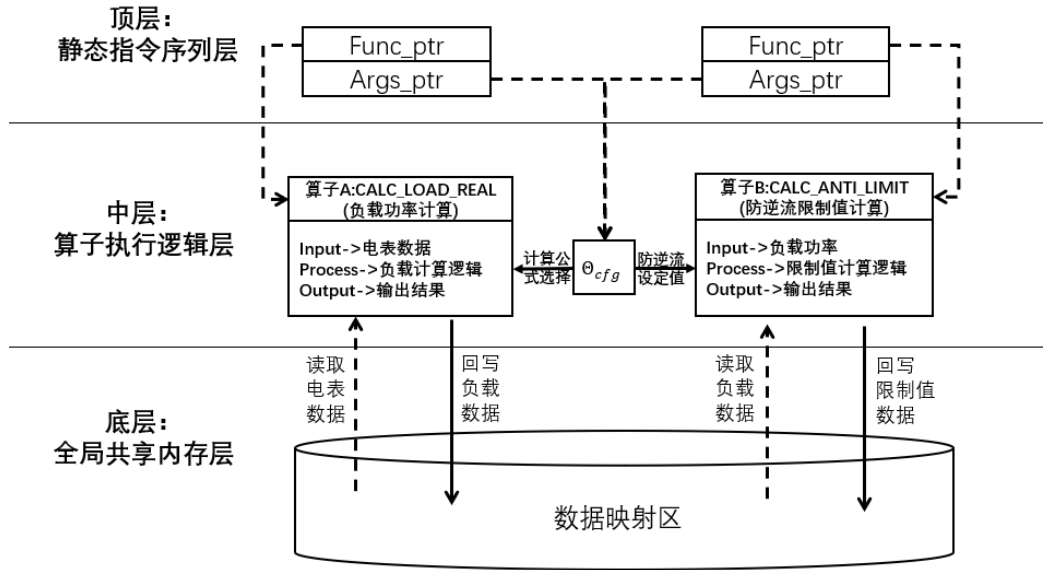


图 3.11 基于全局共享内存的算子数据流转架构图

目前部分边缘侧 EMS 核心算子库的分类与映射定义如表 3.3 所示。

表 3.3 边缘侧 EMS 核心算子库的分类与映射表

算子标识	功能描述	输入数据源	输出数据	静态配置参数 Θ_{cfg}
READ_BMS_STATE	采集电池状态	BMS 通信协议 栈映射区	$SOC_{now}, V_{cell},$ T_{max}, SOH_{est}	采样周期、滤波 系数
CHECK_TIME_TOU	分时电价时段判断	系统时钟 T_{sys}	$Flag_{peak},$ $Flag_{valley}$	峰平谷 时间表
CHECK_SOC_LIMIT	SOC 越限保护检查	SOC_{now}	$Status_{alarm},$ En_{chg}, En_{dischg}	$SOC_{min},$ SOC_{max}
CALC_LOAD_REAL	实时负载计算	$P_{anti},$ $P_{storage}$	P_{load} 当前负载	计算公式类型
CALC_ANTI_LIMIT	防逆流限额计算	$P_{load},$ P_{grid_cap}	P_{limit_max} 允许放电上限	安全裕度 δ
SOLVER_ADAPTIVE_PWL	经济性实时寻优	$Price_t,$ $Cost_{deg}, P_{limit}$	P_{ref} PCS 高质量局 部最优指令	/
EXEC_PCS_CMD	下发功率指令	$P_{ref},$ $Status_{sys}$	Modbus/CAN 发送缓冲区	指令超时阈值
.....				

综上所述，本课题成功通过拓扑排序实现的逻辑线性化与函数指针的静态映射构建一个确定性较高的轻量化策略引擎，不仅消除运行时动态解析脚本语言带来的解释器开销，更通

过标准化的原子算子库实现业务逻辑的积木式搭建，特别是将 SOH 衰退模型等复杂算法封装为标准算子，为后续的边缘侧低算力寻优提供宝贵的执行容器。

3.4 系统实现案例与功能验证

为验证本章所提出的基于软硬件解耦架构的异构设备接入机制与 AOE 策略组态引擎的有效性，本节构建一套包含模拟异构设备源、边缘侧 EMS 及上位机配置软件的半实物仿真验证环境。实验旨在评估系统在面对异构设备接入时的配置灵活性、数据上报的实时性以及控制策略在边缘侧执行的稳定性，以此验证本课题所提方法在缓解传统边缘侧嵌入式开发中耦合问题方面的实际效能。

3.4.1 实验平台构建与测试环境配置

实验硬件采用基于四核 ARM Cortex-A55 架构的 RK3568 工业级核心板，主频 2.0GHz，配备 4GB DDR4 内存与 16GB eMMC 存储空间，操作系统选用定制裁剪的 Linux 5.10 内核的工商业储能边缘侧 EMS。为模拟工商业储能现场复杂的异构设备环境，测试平台通过 USB 转多路串口模块分别构建 RS485 与 CAN 通信链路，利用 PC 端仿真软件模拟真实设备的通信行为。

HslCommunicationDemo 软件使用的是电气特性可调的 Modbus 协议，作为下述验证设备通信协议为 Modbus 的模拟，并使用 USB-RS485 转化器与实验硬件进行连接；CAN_TOOL 软件用于模拟通信协议以 CAN 总线通信协议为准的设备，其配置可调，使用 CAN 分析仪与实验硬件进行连接，在对接云端平台时使用 MQTTX 进行抓包，并且通过该抓包软件，也可以模拟上位机的配置文件下发，以此来进行数据包准确性校验和对应异构设备接入、策略调整的指令下发，如图 3.12 所示。

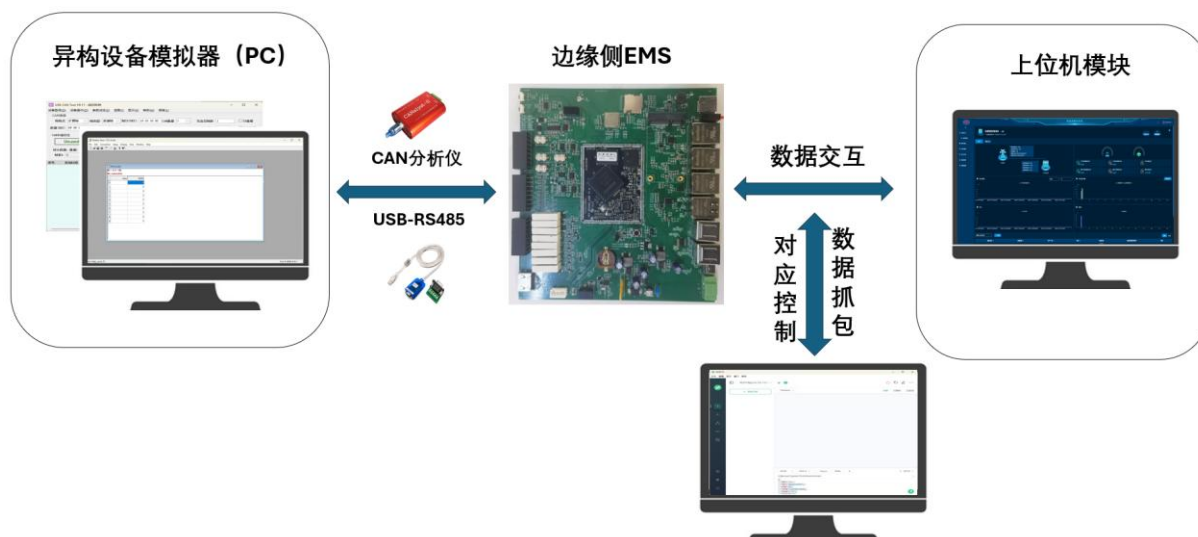


图 3.12 硬件在环实验平台拓扑结构图

其在本课题中实际搭建情况如图 3.13 所示。

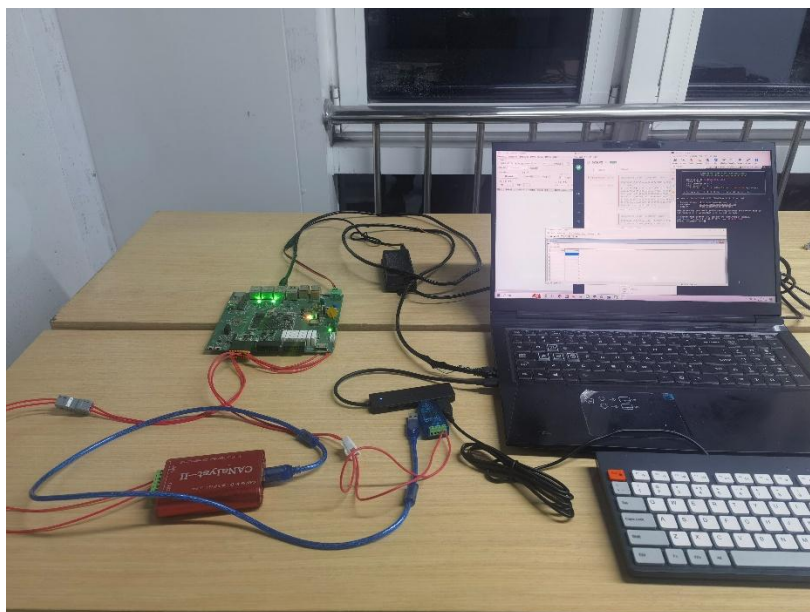


图 3.13 硬件在环实验搭建展示

3.4.2 异构设备低代码接入功能验证

针对 3.1.1 节所述的“烟囱式”开发模式，本实验设计设备替换场景，来验证系统在面对异构设备时的适应能力。实验预设一个核心业务需求：主机模块需实时获取“储能变流器有功功率” id_{stream} 为“PCS_POWER”这一关键指标。

本实验选取两款具有显著数据异质性的储能变流器（模拟 PCS-A 与 PCS-B）进行接入测试。

系统首先接入模拟 PCS-A，其采用 Modbus RTU 协议，电气特性为波特率为 9600bps、数据位为 8、停止位为 1、校验位为无校验，该设备，通信从机地址为 0x011，功率数据的物理寄存器地址为 0x0D57，读取功能码为 0x03，读取长度为 0x01。根据以上信息，对应的 HslCommunicationDemo 软件将配置为下图 3.14 所示

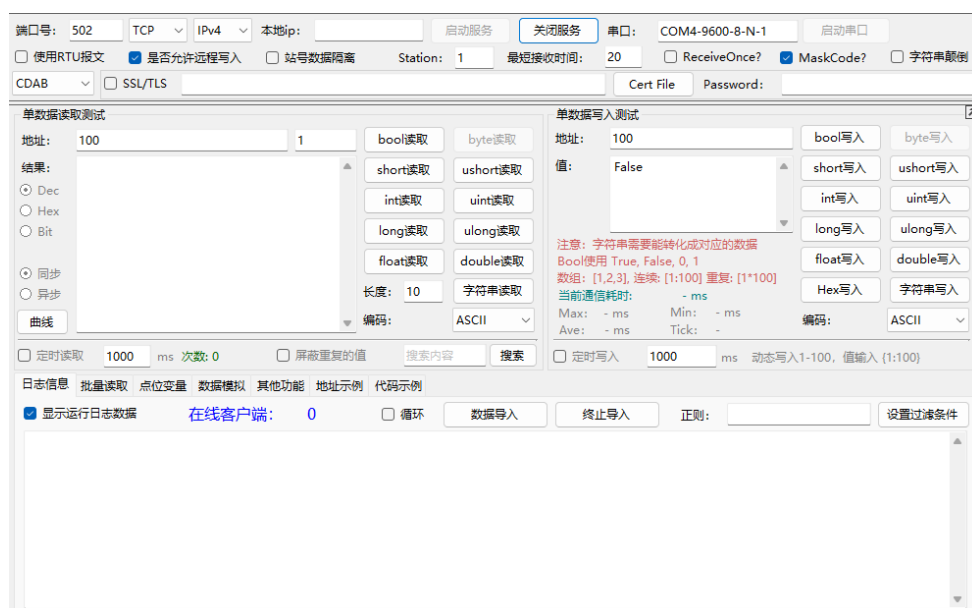


图 3.14 PCS-A 设备模拟构建

并且, 根据上述信息, 上位机生成包含 PCS-A 信息的 $Config_{access}$ 文件与 $Config_{report}$ 文件, 如表 3.4 与表 3.5 所示。

表 3.4 PCS-A 设备 $Config_{access}$ 文件的关键节点配置内容

隶属层级	字段	解释	数值/字符串
物理端口层	port	物理端口号	RS485_1
	baud	端口波特率	9600
	dataBit	数据位	8
	stopBit	停止位	1
	parity	校验位	None
.....			
逻辑设备层	deviceName	设备名称	PCS
	comProtocol	通信协议	modbusRTU
	slaveID	从机通信地址	1
.....			
数据原子层	uploadLocal	全局共享内存映射地址	100
		读取功能码	3
	funcCode	写入功能码 (仅在该点标记为可写时使用)	6
	regData	读取寄存器地址	3415 (十进制)
	readLength	读取长度	1
.....			

表 3.5 PCS-A 设备 $Config_{report}$ 文件的关键节点配置内容

隶属层级	字段	解释	数值/字符串
从机源索引层	slave_ip	从机模块 IP	192.168.1.251
	slave_port	从机模块端口号	16000
			
数据映射层	slaveStartLocal	全局共享内存映射地址	100
	slaveGetNum	获取长度	1
	slaveID	从机通信地址	1
	valueOffset	数据偏移	0
	valueUnit	数据单位	0.1
	streamId	全局业务标识符	PCS_POWER
.....			
触发规则层	ReportRules	数据更新规则	DC60
.....			

主从机解析引擎进行解析并建立映射关系, 最终从机模块成功采集其物理值, 主机模块通过全局共享内存映射地址也顺利采集到该值, 并成功进行上报, 如图 3.15 与图 3.16 所示。

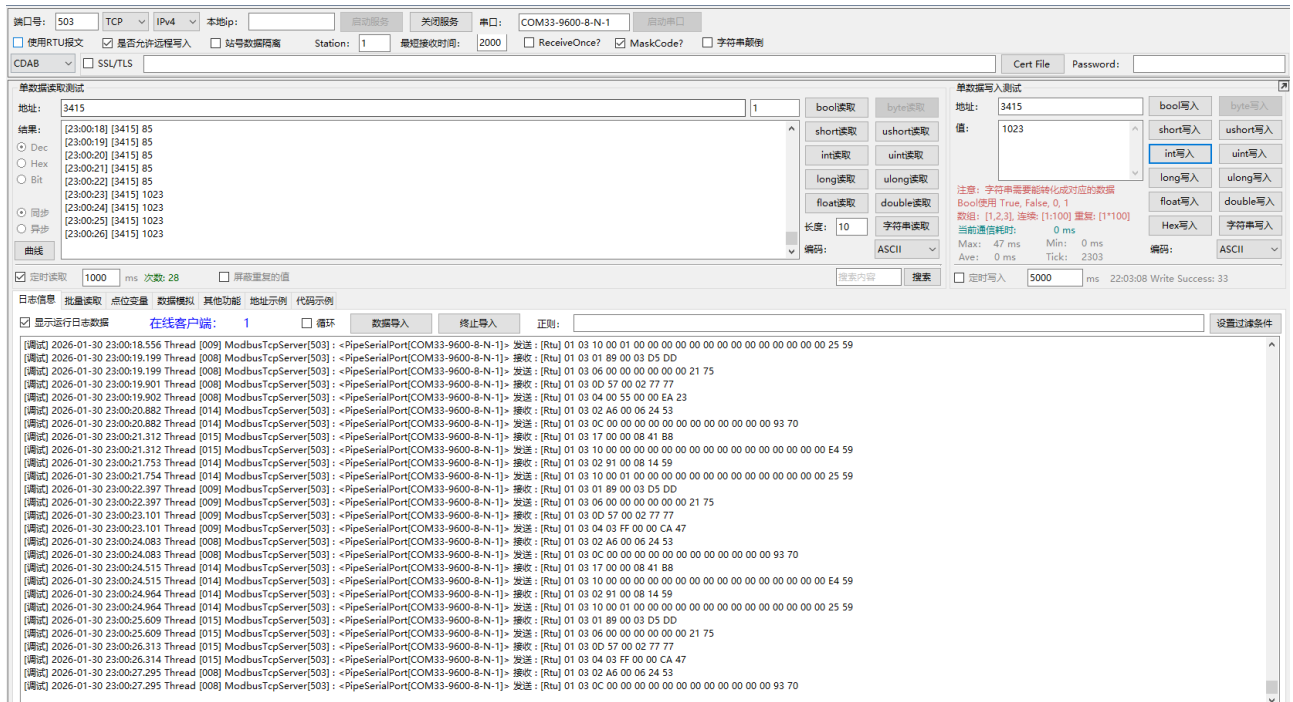


图 3.15 PCS-A 通信数据流

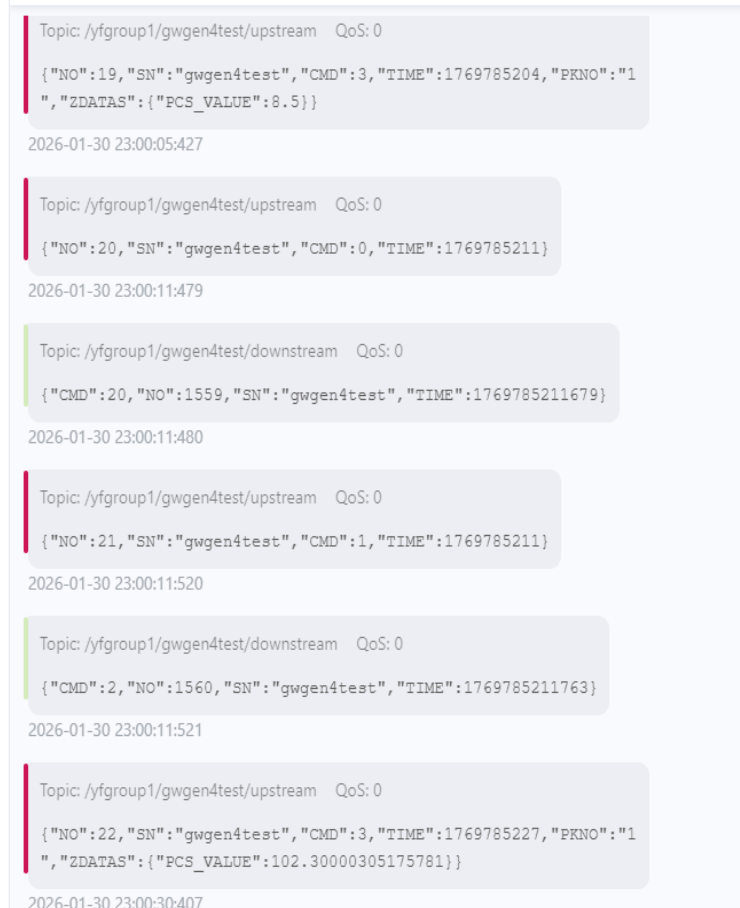


图 3.16 PCS-A 数据上报流

图 3.15 中 PCS-A 在 23:00:23 时刻修改对应的 0x0D57 的值，从 85 变化到 1023，工商业储能边缘侧 EMS 在 23:00:23 时刻成功通信并获取到对应的数据内容为 0x03FF（转化为十进

制为 1023)，因异构设备数据上报通用模型配置该 id_{stream} 的上报格式为差异化加周期上报，配置单位为 0.1，可以看到图 3.16 在 23:00:30 时刻成功上报“PCS_VALUE”的内容为 102.3。

随后，将接入设备更换为模拟 PCS-B 采用通过 CAN 总线通信协议，其波特率为 250kbps，功率数据位于报文 ID 为 0x180A30D0 的第 5-6 字节，对应的 CAN_TOOL 软件配置为下图 3.17 所示。

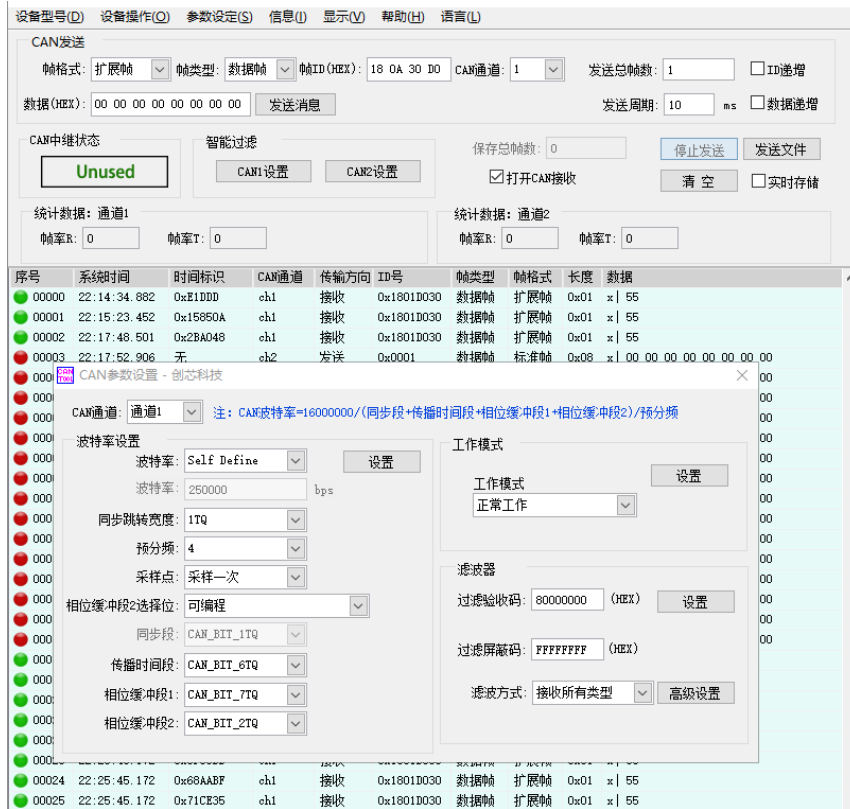


图 3.17 PCS-B 设备模拟构建

在此过程中，主机模块的控制逻辑未做任何修改，仍旧锁定 id_{stream} 为“PCS_POWER”，数据修正格式依旧，根据对应的信息，上位机生成更新后的 $Config_{access}$ 文件与 $Config_{report}$ 文件，如表 3.6 所示。

表 3.6 PCS-B 设备 $Config_{access}$ 文件的关键节点配置更新内容

隶属层级	字段	解释	数值/字符串
物理端口层	port	物理端口号	CAN1
	baud	端口波特率	250000
逻辑设备层	deviceName	设备名称	PCS
	comProtocol	通讯协议	CAN
	slaveID	从机通讯地址	1
	uploadLocal	全局共享内存映射地址	100
数据原子层	regData	读取报文地址	0x180A30D0 (转化十进制)
	dataLocal	起始字节	5
	readLength	读取长度	2

由于 $Config_{access}$ 文件中对应的全局共享内存映射地址没有发生变化还是与 PCS-A 设备的 $Config_{access}$ 文件中的一致, 因此 $Config_{report}$ 文件对于该点位的配置完全不需要调整。若是发生变化, 也仅需更改成对应的全局共享内存映射地址即可。

主从机解析引擎进行解析并建立映射关系, 最终从机模块成功采集其物理值, 主机模块也顺利采集到该值, 并成功进行上报, 如图 3.18 与图 3.19 所示。

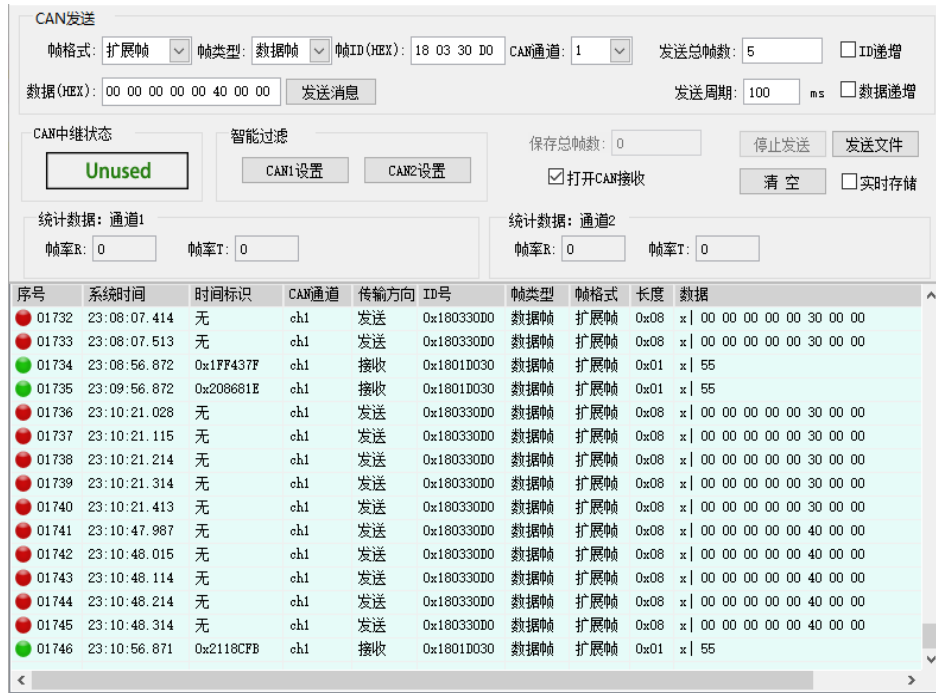


图 3.18 PCS-B 通信数据流

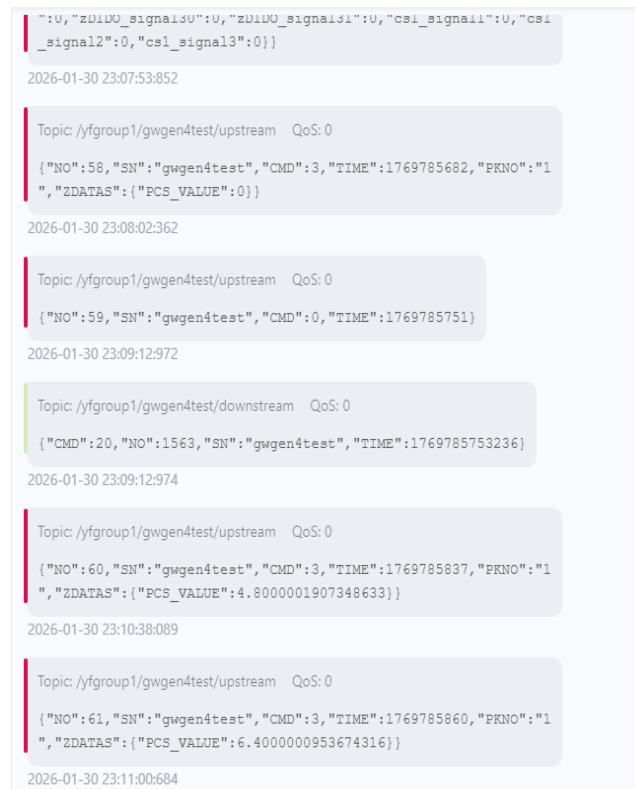


图 3.19 PCS-B 数据上报流

图 3.18 中 PCS-B 在 23:10:47 时刻修改对应的 0x180A30D0 的第 5-6 字节，从 48 变化到 64，可以看到图 3.19 在 23:10:38 与 23:11:00 时刻分别成功上报“PCS_VALUE”的内容为 4.8 与 6.4。

在传统开发模式下，更换此类设备需修改 C 语言源码中的驱动接口并重新编译。而在本系统架构下，仅需通过上位机生成差异化的 $Config_{access}$ 文件与 $Config_{report}$ 文件，并下发至对应的边缘侧 EMS 主从机模块，主从机模块解析引擎分别进行对应的解析，动态重构从机内存中的设备对象 Dev_Logic 与数据原子 $Data_{Atom}$ 与主机内存中的数据映射层 $Data_{map}$ 。

实验结果表明，尽管底层物理传输介质、报文格式及原始地址发生根本性改变，但经过配置文件的动态重映射，主机模块在 $addr_{std}$ 处获取的数据还是与从机模块在 $addr_{std}$ 处写入的数据还是保持物理意义与逻辑定义的一致性，证实异构设备通用描述模型与异构设备数据上报通用模型通过锚定逻辑地址、适配物理配置的机制，成功屏蔽底层数据异质性，实现真正的低代码接入。

此外还设置单台含 122 个寄存器的使用 ModbusRTU 协议的设备接入的情况的对比实验，如表 3.7 所示，结果表明，与传统高度耦合的硬编码模式相比，本文组态化接入机制不仅将新设备的工程适配与现场调试耗时缩减 90% 以上，更在软件工程维度上实现因设备规模扩展而导致的底层固件代码零增量，尽管该机制引入结构化 JSON 文件存储开销的增加（较传统点表文件增加约 18KB），但消除了底层可执行文件体积的线性膨胀，规避频繁重编译带来的系统崩溃风险与时序不确定性。这一对比结果验证本课题所提出的组态化模式的有效性。

表 3.7 传统开发模式与本文组态化模式接入效率对比表

测试指标	传统硬编码模式	本文组态化模式	对比效益分析
新设备接入开发时间	≈6.5h	≈0.6h	效率提升 90.8%
配置调试时间	≈3.0h	≈0.2h	效率提升 93.3%
固件重编译次数	>1 次	0 次	消除重编译导致的系统中断风险
新增设备的 C 代码行数	1320~1500 行	0 行	代码耦合度归零
可执行固件体积增量	增加约 21.8KB	0KB	完全消除因新增设备导致的固件线性膨胀
组态配置文件存储开销	约 6.6KB	约 24.6KB	文本存储开销有所增加，但换取系统架构的高弹性

实验还额外对比本课题方案与传统方案在包含 2897 个寄存器信息运行时的 CPU 与内存占用率，编写对应脚本每隔 1s 使用 ps 指令来抓取可执行程序 CPU 与内存的占用率，并使用 gnuplot 来对应记录在日志文件中，结果如图 3.20、图 3.21 与表 3.8 所示。在 CPU 占用率方面，本课题方案由于在启动时需要解析 JSON，相较于传统方案 CPU 多占用 24%，但在解析完成后的稳定运行阶段，与传统方案无异，并且内存占用与传统方案也无太大差异。这验

证 3.2.4 节初始化预加载所带来的功能，确保在赋予工商业储能系统极大灵活性的同时，也保证工商业储能边缘侧 EMS 对低资源消耗与高实时性的要求。

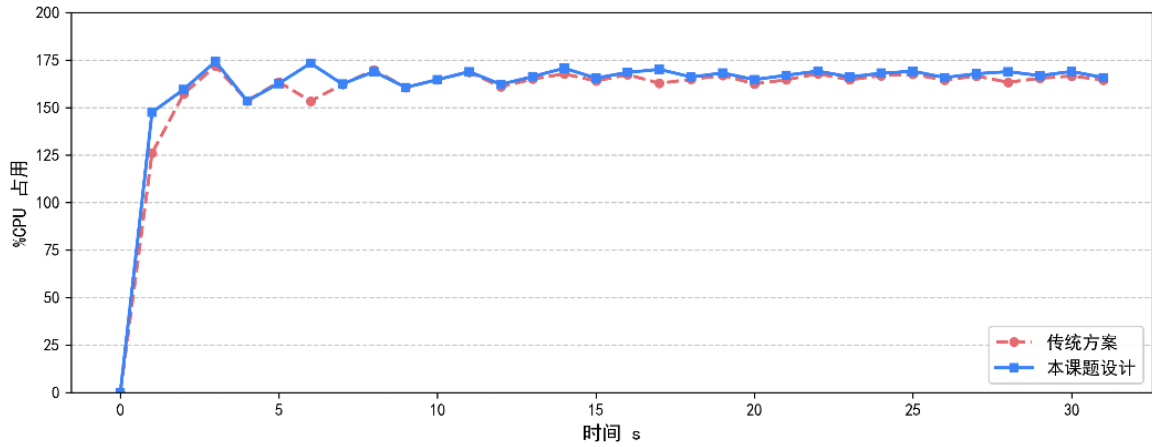


图 3.20 CPU 占用率前 30s 对比图

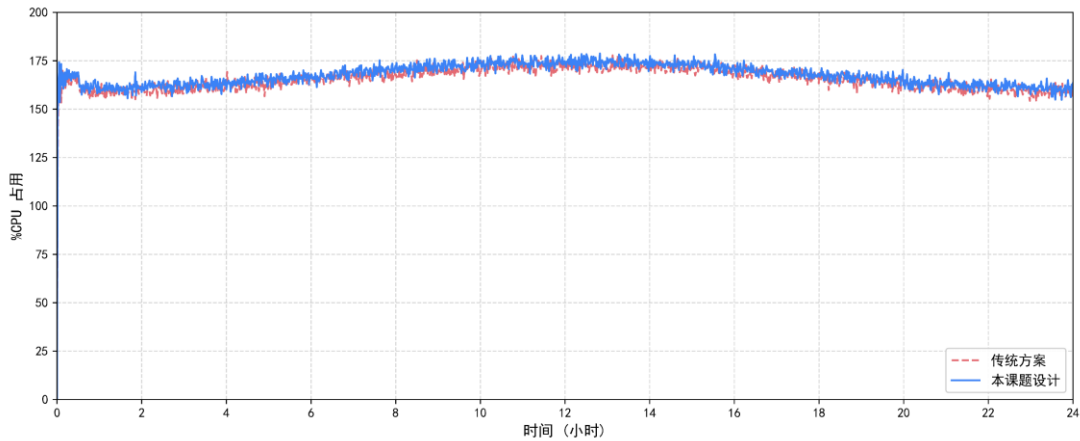


图 3.21 CPU 占用率 24 小时对比图

表 3.8 内存占用对比表

	传统方案	本课题方案
内存占用	4732kb	4748kb

3.4.3 AOE 策略引擎的动态组态与执行验证

为验证 3.3 节提出的 AOE 静态映射机制对控制逻辑僵化问题（3.1.2 节）的解决能力，本实验设计“削峰填谷”与“需量控制”两种典型工商业储能策略的动态切换场景。

首先通过 $Config_{strategy}$ 文件定义一个基于分时电价的削峰填谷 AOE 图谱，图谱中包含“时间段判断”节点与“功率下发”边，解析引擎将其映射为内存中的指令数组。系统运行时，当模拟时钟进入峰时段，AOE 引擎准确触发放电动作，PCS 功率输出响应时间为毫秒级别。

随后在 t_1 时刻，上位机下发包含需量控制逻辑的新版 $Config_{strategy}$ 文件，该策略引入“实时负载监测节点”与“需量越限判断”分支，并在一定时刻模拟工厂变压器负载突增场景，实验数据显示，边缘侧 EMS 在接收到新配置文件的 1s 内完成策略的热切换，当模拟负载超

过需量阈值（如 120kW）时，AOE 网络自动跳转至“强制放电”分支，且并未中断底层的设备轮询任务。

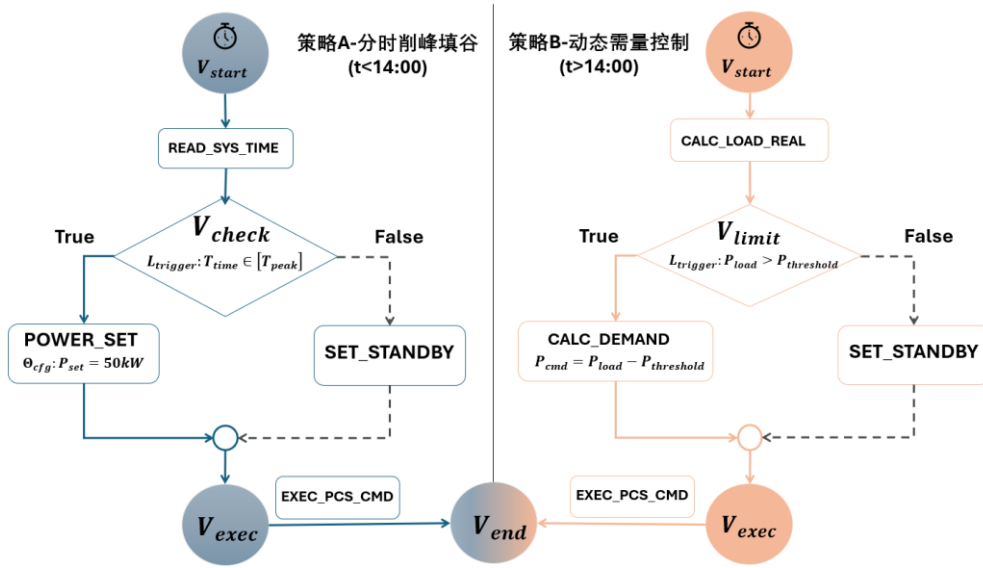


图 3.22 策略切换热实验策略图

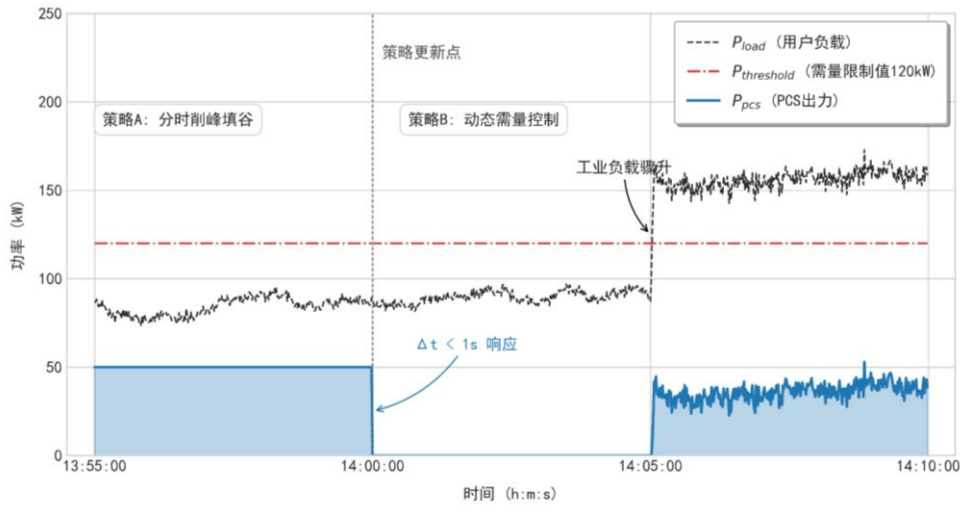


图 3.23 策略切换热实验功率负载曲线图

图 3.22 为切换前后的 AOE 控制逻辑拓扑对比。左图展示基于时序约束的刚性削峰策略，右图展示配置更新后生成的基于负载反馈的需量控制策略，高亮路径标示当前的执行流。图 3.23 为策略切换过程中的功率响应曲线。实验表明，在 t_1 即 14:00:00 时刻下发新 $Config_{strategy}$ 文件后，系统实现从开环恒功率控制到闭环需量控制的无缝迁移。当 t_2 即 14:05:00 秒时时刻模拟负载 P_{load} 突破需量红线 $P_{threshold}$ 时，AOE 引擎准确触发放电动作，以此缓解用户侧的需量超标风险，且全过程无固件重编译介入。

图 3.24 与图 3.25，为某合作公司一天的储能策略配置与运行的情况，PCS 充放电功率为 125kW，采用一充一放的策略，防逆流限制值为 30kW，防超容限制值为 900kW，SOC 上下限分别为 95%与 5%，AOE 引擎准确稳定执行策略节点。

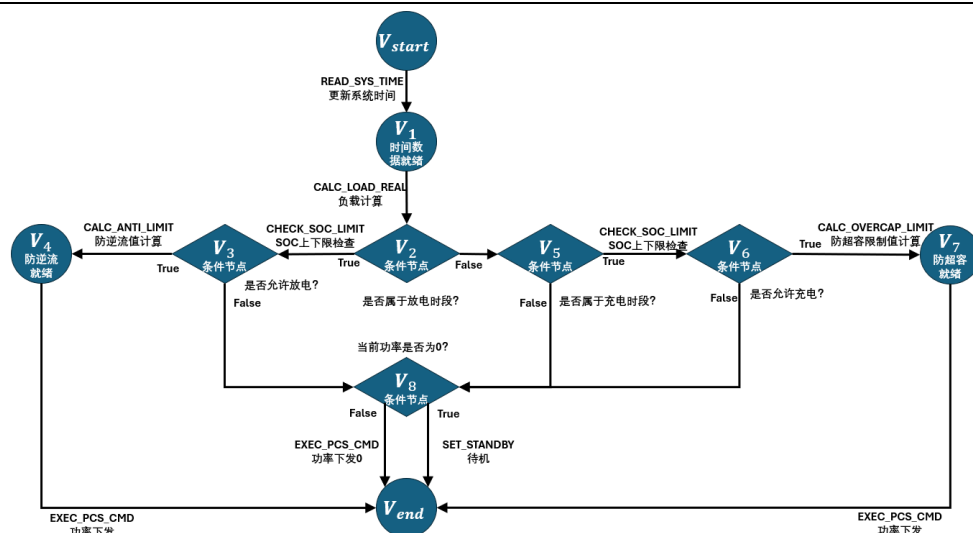


图 3.24 某公司策略详情配置

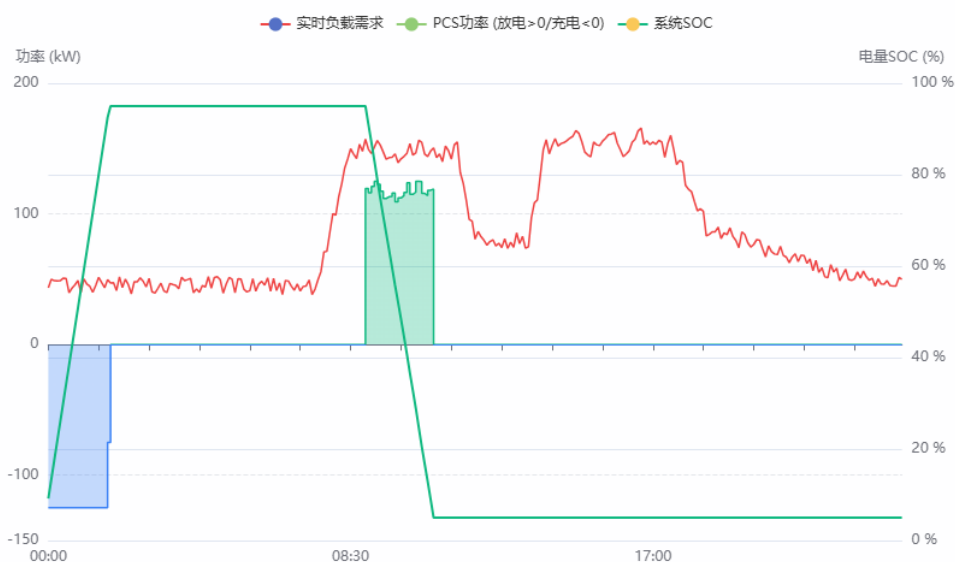


图 3.25 功率/负载/SOC 关系图

实验结果证明策略控制通用描述模型通过将控制逻辑从二进制代码中剥离，能够以低代码的方式适应工商业用户多变的需求，并保证策略执行的确定性与稳定性。

3.5 本章小结

本章着重于解决传统硬编码开发模式下底层驱动耦合与上层控制逻辑僵化的问题。

首先建立一种异构设备通用描述模型与异构设备数据上报通用模型，通过定义标准化的JSON描述文件，实现从物理端口参数配置、通信规约解析到寄存器点位映射的全链路静态化描述，在系统启动时或者更新时才进行实例化以及运行时通过查表回调的方法，将非结构化的多源物理信号映射为系统全局共享内存中统一寻址的标准化数据，解决因设备接口碎片化导致单一边缘侧EMS适配不同工商业储能系统的问题，实现异构硬件的低代码接入。

并且引入基于AOE网理论的策略控制通用描述模型，将复杂的能量管理逻辑分解为由“事件节点”与“动作边”构成的有向无环图，并设计基于拓扑排序的静态映射机制与标准

化算子库，将 JSON 定义的逻辑图谱转化为内存中连续存储的函数指针序列。解决边缘侧 EMS 控制策略的僵化问题，实现控制逻辑的可视化编排与热切换，并保证运行的稳定性

通过半实物仿真实验结果表明，本课题所设计的边缘侧 EMS，在面对异构设备替换与控制策略的变更时，具有优异的灵活性与可靠性，不仅实现低代码组态机制，更为后续章节引入面向边缘侧嵌入式环境的工商业储能电池老化感知优化调度策略提供可观测、可控制且高实时的底层执行容器。

4 面向边缘侧嵌入式环境的工商业储能电池老化感知优化调度策略

在第三章详细介绍异构设备组态化接入技术以及基于 AOE 有向图的策略组态与静态映射机制后，本章将依托上一章所定义的标准化算子库与数据映射机制，构建面向边缘异构计算的 SOH 预测模型，并在此基础上提出一种基于自适应分段线性迭代寻优的边缘侧自适应单步功率寻优策略，实现在边缘侧实现对工商业储能电池的老化轨迹精准捕捉的同时，在不依赖云端的环境下达成运行收益与设备寿命损失的平衡的单步高质量工程近似最优解。

4.1 边缘侧能量管理的矛盾与约束分析

工商业储能能量管理系统正在经历由“云端集中式决策”向“边缘侧智能自治”的形式转变。在第三章构建的软硬件解耦架构及 AOE 有向图机制的基础上，系统已具备异构设备低代码接入与控制逻辑低代码组态的基础能力。

但在目前的工商业储能系统的实际运行中，面临着电化学反应机理复杂性与边缘计算资源受限性之间不匹配的矛盾，目前储能策略调整主流依托云端大模型，其虽能够处理高维的数据以此去实现高精度的预测，但在通信中断或者弱网环境这类脱离云端的状态下，依托云端的策略往往会丧失实时性与可靠性^[76]，因此在工商业储能边缘侧构建“数据感知-状态预测-控制决策”的本地闭环成为必然趋势。

工商业储能多采用锂离子电池，而其在全生命周期运行过程中寿命呈现出高度的非线性衰退特征，这对预测模型的复杂度提出较高的要求^[77]，但现有的工商业储能边缘侧 EMS 设计往往出于成本考量，其算力资源远逊于云端服务器，如何在边缘侧实现对工商业储能电池的老化轨迹精准捕捉的同时，还能不依赖云端实现运行收益与设备寿命的稳健平衡就成为边缘侧 EMS 开发的核心问题。

4.1.1 复杂电化学反应机理与边缘侧有限算力的模型鸿沟

现有研究与锂电池老化衰退的实际情况表明，锂离子电池的 SOH 衰退是一个受温度、倍率、放电深度及平均荷电状态等多重耦合影响的高度非线性电化学过程，涉及到固体电解质界面（Solid Electrolyte Interphase, SEI）膜增厚、析锂反应及活性材料损失等因素^[78,79]，其老化过程呈现出线性衰退与非线性加速衰退两个阶段。

学术界通常采用 P2D 模型来高精度率的捕捉非线性特征^[80]，但涉及大量偏微分方程的求解长时间的计算极易阻塞 EMS 底层的高频实时保护线程，无法在算力受限的边缘侧嵌入式环境中安全部署。

当前工业界常使用安时积分法或简单的 ECM 进行 SOH 估算^[81]，来适应低成本的边缘侧 EMS 硬件限制，但在工商业储能系统实际运行过程中，为响应电网调频等指令，电流与功率经常发生波动，并不能使这些简单的 ECM 高精度率的捕捉储能电池容量的非线性衰退轨迹，

造成热失控的风险。并且现有的边缘侧模型多为根据历史电压电流估算当前 SOH，无法适配边缘侧预测未来不同放电策略对于电池寿命损耗程度的影响^[82]，缺乏对未来控制动作的响应能力。

随着数据驱动方法在电池健康状态估算领域的广泛应用，目前云端对于储能电池寿命的衰退预测多数采用基于 CNN、LSTM 以及 Transformer 这类的模型^[83]，虽然在捕捉储能电池老化特征方面表现出优异的非线性拟合能力，但其庞大的参数量与计算复杂度与边缘侧微弱算力之间存在显著的部署鸿沟，并且不同的模型对于电池寿命预测的精度也有一定的优劣。

即使目前 RK3568 等国产化工业芯片已内置 NPU，但其对于循环神经网络（RNN/LSTM）中所涉及的时序依赖算子支持度较差，对卷积运算支持良好，在 NPU 上运行与在 CPU 上运行相比总延迟降低 73%，能效比提升 20.4 倍^[56]。若直接移植云端模型，会导致模型回退至 CPU 上运行^[84]，CPU 的占用率也大幅提高，严重抢占并发底层电气保护线程的时间片，破坏边缘网关的系统级稳定性。如何在国产化 AI 芯片算子支持碎片化的现状下，构建既能捕捉长程依赖又能利用 NPU 加速的异构混合模型从而有效部署到对应的边缘侧 EMS 上也是一个核心问题，边缘侧算力与模型精度矛盾如图 4.1 所示。

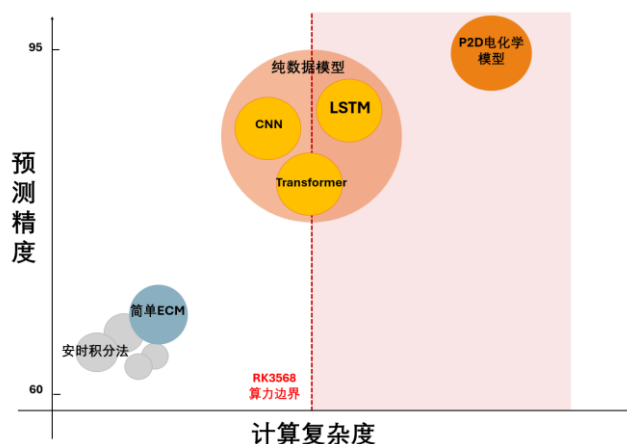


图 4.1 边缘侧算力约束与模型精度矛盾示意图

硬件算力的快速升级与软件算法适配的相对滞后之间存在显著的不匹配，导致高精度 SOH 模型在边缘侧部署时，同时面临计算性能不足与模型精度下降的双重挑战。

4.1.2 脱网约束下的沉没成本陷阱与单步边际损耗博弈

在理想的工商业储能经济性调优体系中，最优调度往往依赖于云端下发的未来 24 小时精确电价与负载预测数据，进而通过 DP 或 MILP 等全局算法，实现全生命周期净现值的最大化。然而，在边缘侧工程实践中，由于通信中断、弱网环境或云端预测接口失效，边缘侧 EMS 常常面临预测视界缺失的脱网自治困境。

在这种缺乏未来长周期预测信息的前提下，传统的边缘侧后备策略往往退化为简单的短视贪心规则，即仅以单次充放电循环的峰谷价差套利最大化为目标。这种做法将工商业储能柜的购置成本视为静态的“沉没成本”，严重忽视了电池在不同放电倍率下的电化学边际损耗差异^[85,86]。事实上，锂离子电池在跨越容量跳水拐点后，活性材料的损失将呈指数级加速。

若 EMS 在脱网决策时缺乏对当前 SOH 的实时感知，盲目在峰值时段频繁下发高倍率放电指令，将导致储能电池过早触及跳水点，造成全生命周期总吞吐电量的骤降，出现典型的经济倒挂现象。

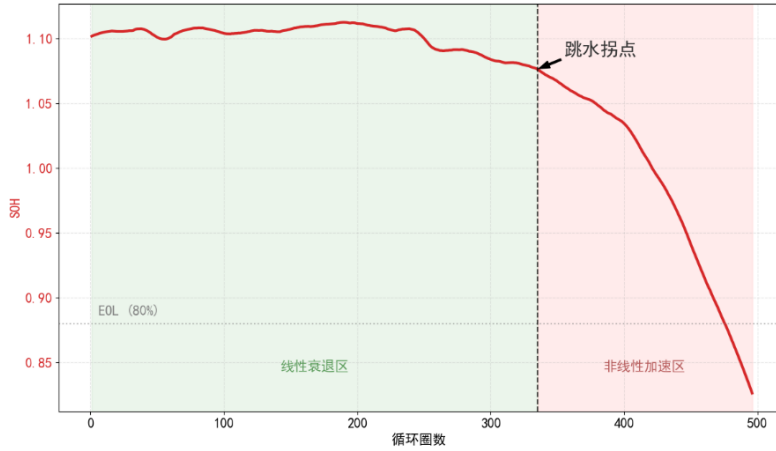


图 4.2 电池非线性老化示意图

因此，在边缘侧缺乏长周期全局规划能力的客观约束下，如何构建一种以单步代全局的轻量化评价机制，成为打破“沉没成本”陷阱的务实之选。

4.2 基于 RK3568 异构计算架构的储能电池 SOH 在线预测模型

本节的研究内容聚焦于混合神经网络模型的构建及其在国产化边缘侧嵌入式硬件上的轻量化部署，通过设计融合工况特征的动作编码器，建立放电倍率、持续时间控制指令与寿命衰退之间的非线性映射关系，选择与 RK3568 的 NPU 矩阵计算兼容性高、计算效率优异的预测模型，解决储能电池老化机理复杂性与边缘侧算力受限性之间的矛盾，实现边缘侧 EMS 对储能电池全生命周期老化轨迹的精准捕捉，为后续实现在边缘侧的功率优化提供可靠的状态感知基础。

4.2.1 数据集选取与特征工程

由于传统电池老化数据集（如 MIT、NASA、CALCE）多基于恒流恒压（Constant Current Constant Voltage, CCCV）的标准实验室工况采集，难以复现工商业储能实际运行场景下的倍率波动对电池内部电化学反应的非线性影响，因此本课题选用 WZU 随机电池退化数据集^[87]作为本课题的数据集，其涵盖 145 组 1000mAh 规格的锂离子电池在不同随机负载谱下的全生命周期老化数据，包含高频次的倍率切换与不规则的充放电深度，能够有效的反映实际场景中不同放电倍率对于电池寿命衰退的影响

本课题在数据集处理部分中对于电池容量的获取，选择最大有效容量择优算法，仅保留物理上经历完整电化学反应行程的放电片段，即最后一次放电起始电压大于 3.9V 到放电结束电压小于 2.71V 窗口内的放电量作为容量标签，来解决随机工况数据所带来的数据清洗问题，缓解因部分放电导致的伪衰退噪声干扰，确保监督信号的物理真实性，如图 4.3 与图 4.4 所示，MIT 这一类工况较为稳定的实验室电池衰退数据曲线相较于 WZU 随机工况电池衰退曲线更加的平滑稳定，对于现场随机工况的反应程度并不直接。

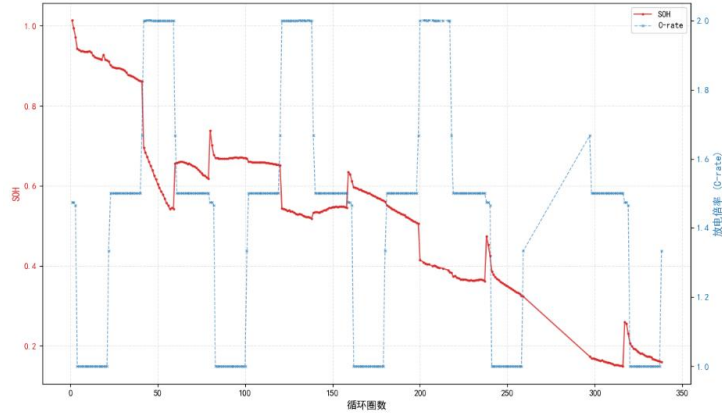


图 4.3 WZU 随机工况电池衰退数据示例图

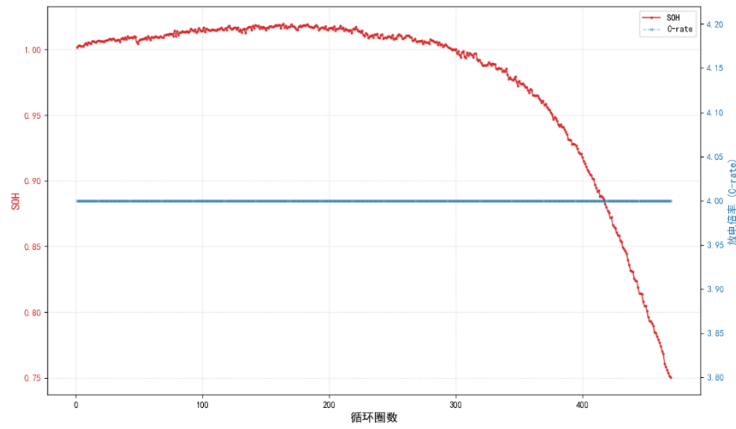


图 4.4 MIT 实验室电池衰退数据示例图

本课题构建包含累计老化状态与瞬时工况动作的双流特征体系，来实现边缘侧预测未来控制策略对电池寿命的影响，使用累计吞吐量与健康度等统计量，用于表征电池从全生命周期开始截止到当前时刻的累积电化学损耗，并输入至模型的 **History Encoder** 模块，使用边缘侧 EMS 下发的调度指令输入至模型的工况动作模块，来使得模型能够反应不同指令对于电池造成的衰退影响，特征的定义与物理含义如表 4.1 所示。

表 4.1 特征定义与物理含义表

输入流	特征名称	物理含义与作用
历史状态流 (History Stream)	累计吞吐量 (Cum_Ah)	累计传输或转移的总电量，反映电池老化程度
	累计能量 (Total_Wh)	相比 Ah 更能反映电压衰退对能量保持率的影响
	累计放电次数 (Discharge_Num)	当前循环之前所有循环的电池累计放电次数
	累计充电次数 (Charge_Num)	当前循环之前所有循环的电池累计充电次数
	历史倍率 (Hist_Crate)	反映历史工况压力。
工况动作流 (Action Stream)	SOH	历史健康状态观测值。
	目标倍率 (Target_Crate)	控制变量。该工况指令的放电倍率。
	持续时间 (Duration)	控制变量。该工况指令的执行时长。

在 RK3568 边缘侧嵌入式平台上，为适配 NPU 对定长张量输入的计算要求，本课题采用基于线性插值与边界填充的修复策略，来保证 **Transformer** 模型对于位置编码的连续感知能力，并且利用全局极值统计量对物理特征进行 **Min-Max** 归一化处理，将特征分布映射至[0,1]区间，如式 (4.1) 所示：

$$x'_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4.1)$$

本课题在上述的特征过程中，不但保留随机工况下的电化学老化细节，并且满足边缘侧计算模型对输入数据的稳定性要求，将原始传感器数据转化为标准化的张量流，为后续的 HybridSOHModel 构建与 NPU 加速部署奠定数据基础。

4.2.2 融合工况特征的双流混合模型构建

为解决 4.1 节中所提出的一系列问题，本课题设计出一种专为 RK3568 部署优化的 Transformer-TCN 双流混合架构 HybridSOHModel，该架构核心使用 Transformer 的全局注意力机制与 TCN 的因果推演能力，通过“历史状态流”捕捉电池的衰退轨迹，通过“工况动作流”响应未来的调度指令，彻底摒弃传统模型中对硬件加速不友好的循环算子，并且能够有效适配 RK3568 NPU，最终实现高精度的 SOH 推演，模型的整体拓扑结构如图 4.5 所示。

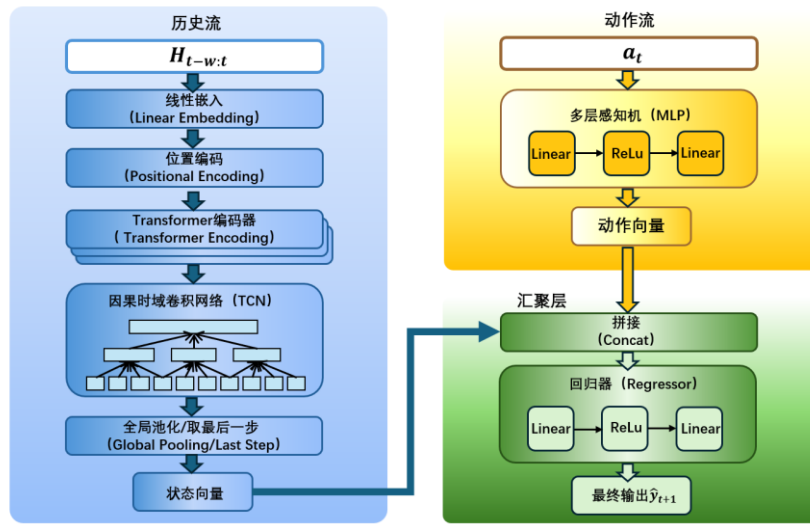


图 4.5 HybridSOHModel 模型整体拓扑结构图

该模型可化为如式（4.2）所示的数学公式。

$$\hat{y}_{t+1} = F_{\theta} \left(\Phi_{\text{Trans-TCN}} (H_{t-w:t}), \Psi_{\text{MLP}} (a_t) \right) \quad (4.2)$$

式（4.2）中， $H_{t-w:t}$ 为历史状态序列，包含滑动窗口内的累计吞吐量、SOH 等统计特征； a_t 为当前调度动作向量，包含边缘侧 EMS 下发的倍率指令与持续时间； $\Phi_{\text{Trans-TCN}}$ 为负责时序特征提取的历史编码器， Ψ_{MLP} 为动作编码器， F_{θ} 为融合回归网络。该架构主要涉及矩阵乘法与卷积运算，高度契合 RK3568 平台的硬件特性，其计算密度高且数据流向固定，能够完全映射至 NPU 的张量处理单元，实现 FP16 精度的硬件加速^[88]。

本课题使用全局注意力与局部因果推演的串联式特征提取模块，来捕捉电池老化数据的高维特征与非线性衰退规律，输入序列 $H \in R^{B \times L \times D_m}$ 首先经过线性层映射至高维潜在空间 d_{model} ，并叠加可学习的位置编码（Learnable Positional Encoding）。因为电池的老化是一个长期累积过程，当期的循环状态（如某次深度过充）往往对后期的容量跳水点会产生隐性的

影响，所以本课题在位置编码之后引入 Transformer 编码器，利用多头自注意力机制直接计算序列中任意两个时间步的相关性^[89]，如式（4.3）所示：

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{d_k}}\right)V \quad (4.3)$$

如图 4.6 所示，该机制使得模型在当前时刻 t 能够跨越时间步长，直接“关注”到全生命周期序列中的关键退化事件，结果具有稳定性。

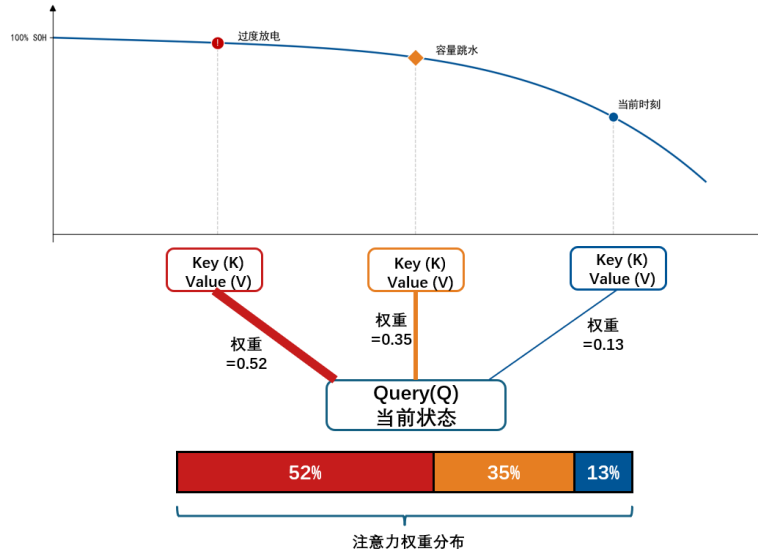


图 4.6 基于多头自注意力机制的电池老化特征聚合过程图

为捕捉局部的时间演变趋势并替代 LSTM 进行时序建模，本课题在 Transformer 之后级联 TCN。为确保预测的物理因果性，即 t 时刻的输出严禁利用 $t+1$ 时刻的未来信息，采用因果空洞卷积，如图 4.7 所示

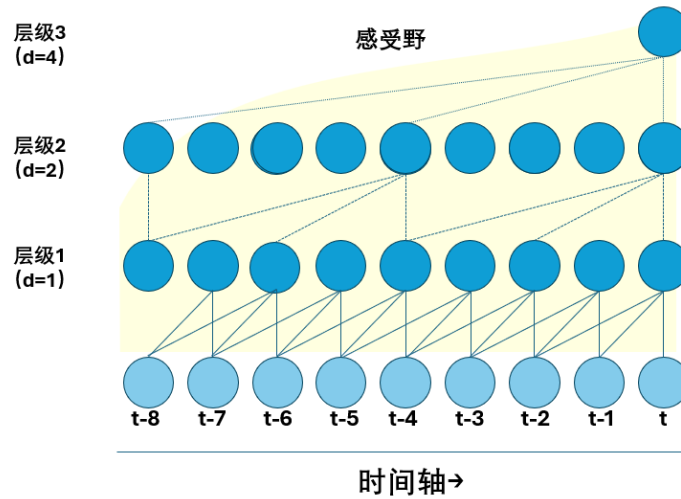


图 4.7 因果空洞卷积与感受野扩展示意图

TCN 模块由多个堆叠的残差卷积块组成，每一层的膨胀系数按 2^i 指数增长。第 l 层的输出计算如式（4.4）所示：

$$x^{(l)} = Dropout\left(ReLU\left(Conv1d_{d=2^l}\left(x^{(l-1)}\right)\right)\right) + x^{(l-1)} \quad (4.4)$$

TCN 通过堆叠残差卷积块能够在不增加参数数量的前提下指数级扩大感受野。更重要的是，TCN 算子在 RK3568 NPU 上的执行效率远高于 LSTM 算子，从而消除推理过程中的性能瓶颈。

本课题构建独立的动作编码器，来量化工商业储能系统中不同调度指令对电池寿命所带来的损耗程度，根据工况分析模块提取的特征，动作向量定义为如式（4.5）所示：

$$a_t = [C_{rate}, T_{duration}]^T \quad (4.5)$$

式（4.5）中， C_{rate} 为目标放电倍率， $T_{duration}$ 为工况持续时间。动作编码器采用多层感知机（Multilayer Perceptron, MLP）结构，将低维的物理控制指令映射至高维潜在空间，如式（4.6）所示：

$$v_{action} = Dropout(\sigma(W_2 \cdot \sigma(W_1 a_t + b_1) + b_2)) \quad (4.6)$$

式（4.6）中，引入工况特征的核心优势在实际部署中，边缘侧 EMS 可构建多种虚拟的调度策略向量输入模型，从而预测不同策略对储能电池 SOH 的损耗程度（例如：策略 A 为 0.5C 放电 2 小时，策略 B 为 1C 放电 1 小时），从而为后续优化调度提供量化依据。

在模型的最终阶段，通过特征拼接策略来实现状态流与动作流的融合，如式（4.7）所示：

$$v_{fused} = Concat(v_{state}, v_{action}) \quad (4.7)$$

式（4.7）中，融合向量 v_{fused} 包含储能电池的历史退化记忆与当前的工况压力。该向量随后输入至回归层输出最终的 SOH 预测值。

4.2.3 面向 RK3568 NPU 的模型部署实现

考虑到云端训练环境与边缘侧推理环境在指令集架构与内存管理机制上的显著差异，直接将 PyTorch 训练生成权重文件部署至边缘侧嵌入式平台面临着严重的部署使用问题，为解决该问题，并充分挖掘 RK3568 中 NPU 的矩阵加速潜力，需要将生成的权重文件有效的移植到板端上。HybridSOHModel 在 PyTorch 框架下通过动态图机制构建，其灵活性虽利于训练调试，但难以满足边缘侧推理对确定性内存分配的严苛要求。所以本课题采用 ONNX 作为软硬件解耦的中间载体，并采用静态形状导出策略，来避免推理过程中的内存重分配抖动。

本课题选用 Opset 14 标准，并开启常量折叠优化选项，来对 Transformer 中 Multi-Head Attention 算子的解析进行兼容，将模型参数中的预计算常量提前融合，以此精简计算图的拓扑结构。

本课题采用半精度浮点混合推理模式，来实现推理效率与预测精度之间的平衡，通过在 RKNN-Toolkit2 编译配置中强制设定 NPU 算术逻辑单元以 16 位浮点精度执行矩阵乘法与卷积运算，并保留 LayerNorm 层与 Sigmoid 激活函数的数值动态范围，有效避免因数据分布截断导致的精度崩塌，确保边缘侧推理结果具有稳定性，模型最终的异构代码生成通过 RKNN-Toolkit2 工具链完成，如图 4.8 所示。

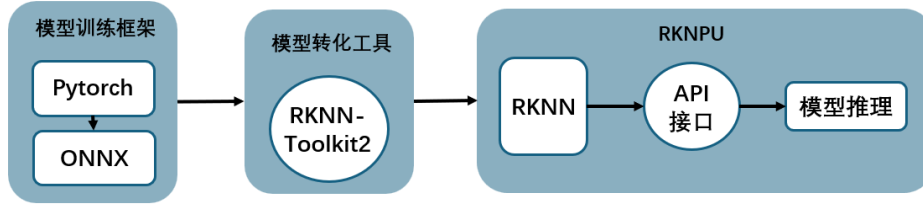


图 4.8 转化部署路径图

4.3 基于自适应分段线性迭代寻优的边缘侧单步边际寻优策略

本节基于 4.2 节 HybridSOHModel 生成的动态健康状态推算值，提出一种基于单步边际损耗的轻量化寻优策略。该策略将优化视界严格收敛于当前单一调度窗口，通过建立融合非线性衰退惩罚的物理净利润目标函数，在当前时刻实现套利与寿命的单步边际平衡，采用一种基于自适应迭代分段线性逼近的优化策略，采用极值锚定与中点插值的启发式局部加密逻辑，构建粗网格起始-局部自调节细化的范围缩减机制，融合存储级的 NPU 推理共享缓存技术，以极小的硬件消耗与循环轮次下可靠趋近经济效益与设备寿命的高精度单步工程逼近最优平衡点。为工商业储能系统提供了兼顾经济性与计算实时性的边缘自治方案。

4.3.1 物理净利润目标函数的构建与老化成本量化

在边缘侧有限算力与预测视界缺失的双重约束下，本课题将储能能量管理的多时段序贯决策问题，严谨地降维剥离为针对当前单一控制步的极值搜索问题。鉴于工商业储能谷时段时间充裕，本课题设定系统在谷时持续以微幅的恒稳安全倍率进行充电，以避免充电侧的非线性老化加速。故而，全生命周期与单日的边际老化损耗分野主要由峰时段的动态放电倍率 x 主导。放电过程的直接经济收益 $R(x)$ 源自于峰值电价与谷时购电成本的价差。顾及系统整合的物理限制及能效系数，收益函数列写如式（4.8）所示：

$$R(x) = E_{sold}(x) \cdot (p_{peak} - p_{valley}) \quad (4.8)$$

式（4.8）中， p_{peak} 为当前放电时刻的峰值电价； p_{valley} 为谷时充电电价，即购电沉没成本， $p_{peak} - p_{valley}$ 构成单位能量的套利价差空间。 $E_{sold}(x)$ 为经过系统效率修正后的实际上网电量，其计算需考虑额定功率与调度窗口的限制如式（4.9）所示：

$$E_{sold}(x) = \min(x \cdot P_{rated} \cdot T, E_{rem}) \cdot \eta_{sys} \quad (4.9)$$

式（4.9）中， P_{rated} 系储能系统额定功率， T 为当前调度窗口时长， η_{sys} 指 PCS 与变压器的综合转换效率， E_{rem} 即电池当前可用剩余容量。该式揭示，在未达及容量边界前，收益随放电倍率展现线性增长特性。

但是，电池老化成本 $C_{loss}(x)$ 的实时测算呈现极强非线性，常规的安时积分法难以刻画高倍率下的非线性衰减特性，而繁复的电化学机制模型又掣肘于边缘侧算力。据此本课题借助搭载于 RK3568 NPU 上的 HybridSOHModel 来析取老化特征，首先核算参照工况（近似静

置状态)下的固有衰退量 ΔSOH_{base} ，对于任一决策倍率 x ，其造成的边界物理损耗 $\Delta SOH_{margin}(x)$ 界定为全预测衰减量扣减固有衰退量如式 (4.10) 所示：

$$\Delta SOH_{margin}(x) = \max(0, F_{DT}(H_t, x) - \Delta SOH_{base}) \quad (4.10)$$

式 (4.10) 中， F_{DT} 指 NPU 侧的前向推演流程， H_t 即当前电池历史状态张量。该机制借助差分计算规避模型系统误差，保障小倍率工况下调度成本近乎为零，契合电化学物理直觉。

据此，把校正后的有效 SOH 衰减量价值化，折算为电池全生命周期价值的损耗，如式 (4.11) 所示：

$$C_{loss}(x) = \frac{\Delta SOH_{margin}(x)}{1 - SOH_{EOL}} \cdot (E_{rated} \cdot Price_{batt}) \quad (4.11)$$

式 (4.11) 中， $Price_{batt}$ 指储能电池系统的置换成本。该计量手段有效地将电池的持久性资产折耗映射至当前控制周期的即时成本，从而规避收益倒挂隐患； SOH_{EOL} 为电池服役终点，通常工商业储能电池 SOH 衰减至 80% 以下即认定为寿命终结^[48]。整合前述收益与成本模型，确立最终的单目标寻优函数 $J(x)$ ，如式 (4.12) 所示：

$$Maximize J(x) = R(x) - C_{loss}(x) \quad (4.12)$$

式 (4.12) 中， $J(x)$ 深刻描述售电收入与资产折旧之间的博弈关系，售电收入 $R(x)$ 随倍率 x 近似线性增长，而老化成本 $C_{loss}(x)$ 随倍率 x 呈现非线性上升。为避免目标函数因其黑盒属性导致其陷入局部极值的风险，如图 4.9 所示，为在资源紧张的边缘侧嵌入式平台下快速求解并趋近该优化问题的单步高质量工程近似最优解，需引入分段线性化手段，具体寻优方案将于 4.3.2 节中详细阐述。

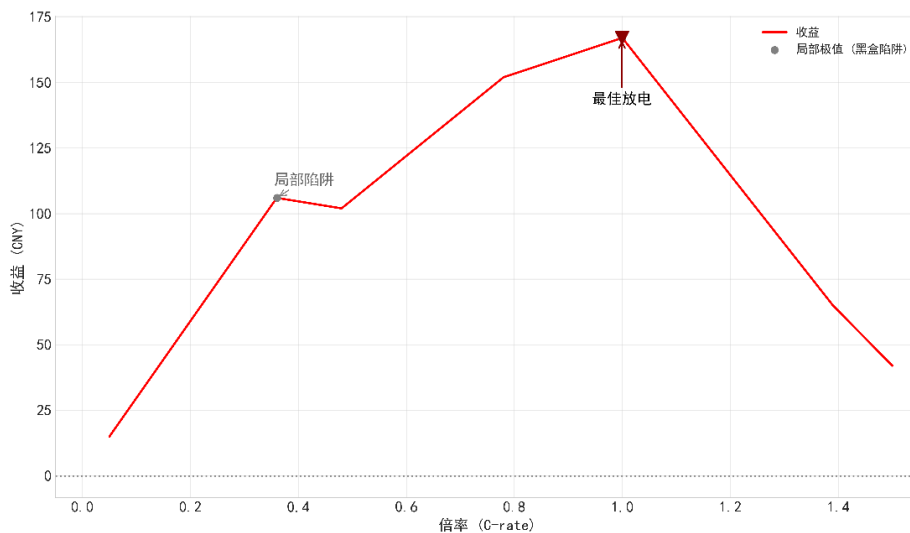


图 4.9 相同吞吐量不同放电倍率下的收益曲线图

4.3.2 功率可行域界定与自适应分段线性迭代寻优

在构建了融合实时边际老化成本的单步物理净利润目标函数后，边缘侧 EMS 面临的核心挑战在于如何在 RK3568 嵌入式平台的有限算力约束下，快速求解该目标函数的单步高品

质工程逼近最优值。考虑到传统一维密集搜索算法（如网格遍历）在边缘端部署时引发的异构通信开销与实时性之间的矛盾，以及神经网络模型作为黑盒函数无法直接获取解析梯度的特性，本课题提出一种分层求解策略：首先基于 AOE 有向图机制将无约束的数学优化问题转化为有界的工程控制问题，构建动态功率可行域，继而引入自适应迭代分段线性逼近算法执行寻优。

为保障控制策略的安全性及物理可执行性，工商业储能边缘侧 EMS 无需开展复杂的全域搜索，而是通过遍历 AOE 有向图的拓扑结构，将各类离散的物理限制与逻辑规约解析为统一的功率上下限约束。此流程借助第三章界定的标准化 JSON 描述文件与静态映射机制，在系统运行时动态生成当前时刻 t 的功率可行域 Ω_t 为所有满足安全与运行约束的功率集合，如式（4.13）所示：

$$\Omega_t = \{P_{bat} \mid P_{min}(t) \leq P_{bat} \leq P_{max}(t)\} \quad (4.13)$$

当储能系统处于放电工况时，工商业储能用户一般会设置对应的防逆流与需量控制，AOE 根据用户所设定的对应策略值进行计算，需同时满足用户设定值、电网防逆流限制、电池物理放电能力以及对应需量控制的约束。因此对于放电情况下所得到的约束条件如式（4.14）与式（4.15）所示：

$$P_{max}^{dis}(t) = \min(P_{user}^{set}(t), P_{load}(t) - P_{anti_reflux}^{set}, P_{pcs}^{rated}) \quad (4.14)$$

$$P_{min}^{dis}(t) = \max(0, P_{load}(t) - P_{demand}^{set}) \quad (4.15)$$

式（4.14）与式（4.15）中， $P_{max}^{dis}(t)$ 与 $P_{min}^{dis}(t)$ 分别代表 t 时刻所允许的最大以及最小放电功率， $P_{user}^{set}(t)$ 为该时刻用户所设定的最大放电功率； $P_{load}(t)$ 为该时刻前序节点所计算出的负载值； $P_{anti_reflux}^{set}$ 与 P_{demand}^{set} 分别对应用户所设定的防逆流设定值与需量设定值； P_{pcs}^{rated} 则是对应系统的额定功率。并且此外在放电时刻一般也遵守 SOC 上下限规定，即式（4.16）所示，所对应的 SOC_{min} 为用户设定的 SOC 下限值。

$$P^{dis}(t) = \begin{cases} 0, & SOC \leq SOC_{min} \\ P_{bat}, & SOC > SOC_{min} \end{cases} \quad (4.16)$$

在既定可行域 Ω_t 内，目标函数 $J(x)$ 刻画售电收益与资产折耗之间的此消彼长关系。HybridSOHModel 所生成的老化成本 $C_{loss}(x)$ 呈现出非线性的电化学老化特性，传统的解析求导法难以适用；而若针对一维问题单次使用极密的全域断点进行网格扫描，势必引发海量的 NPU 前向推理请求。此种高负荷调用不仅会拉高边缘侧 RK3568 的总线占用率，极易阻碍 EMS 底层高频实时保护线程的连续运转。鉴于此，本节摒弃依赖重型数学求解器与特殊排序集合（Special Ordered Set of Type 2, SOS2）的传统白箱转化思路，设计并提出了一种基于动态区间收缩的自适应 PWL 迭代寻优策略。

在每个调度周期的寻优之初，算法率先对放电倍率可行域实施稀疏的离散化采样。令初始分段数为 N ，将可行域均匀划分为具有 $N+1$ 个离散倍率节点的基础网格集合

$X^{(0)} = \{c_1, c_2, \dots, c_{N+1}\}$ 。随后，算法调用驻留于 NPU 的预测模型实施批量推理，获取各节点的非线性目标函数值 $J(c_i)$ 。

区别于构建复杂混合整数规划模型，本课题的自适应策略采用极值锚定与局部加密的轻量化启发式逻辑。在第 k 次迭代中，算法首先遍历当前网格集合，锁定产生最大净利润的最优倍率节点 c_k^* ，如式 (4.17) 所示：

$$c_k^* = \arg \max_{c_i \in X^{(k)}} J(c_i) \quad (4.17)$$

锁定极值锚点后，算法在其相邻的局部解空间内动态生成新的试探断点。假设 c_k^* 对应当前排序集合中的第 i 个节点，则通过中点插值法生成新节点集合 $X_{new}^{(k)}$ ，如式 (4.18) 所示：

$$X_{new}^{(k)} = \left\{ \frac{c_{i-1} + c_k^*}{2}, \frac{c_k^* + c_{i+1}}{2} \right\} \quad (4.18)$$

生成的新节点将并入原网格集合，形成更为致密的下一代搜索空间 $X^{(k)} = X^{(k)} \cup X_{new}^{(k)}$ 。上述迭代不断循环，使得模型算力能够随着区间收缩，精准聚焦于高潜力收益区间。该策略在仅需极少 NPU 推理次数的前提下，实现了对非线性老化边界的快速逼近，如图 4.10 所示。

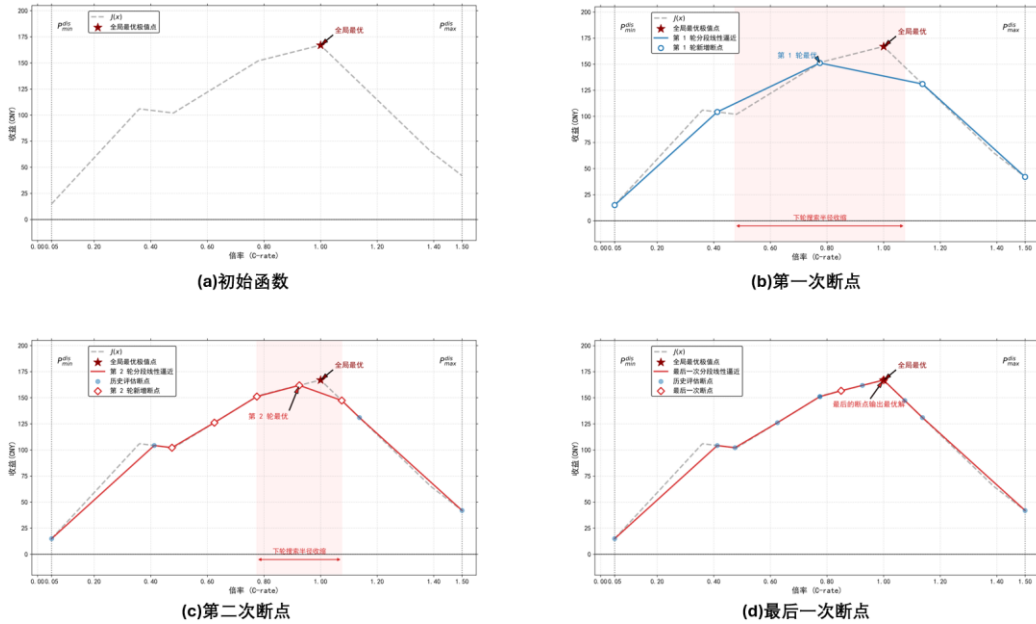


图 4.10 自适应网格细化与区间收缩过程可视化图

为确保工商业储能边缘侧 EMS 的刚性实时调度约束，系统在软硬件解耦层构建推理缓存复用机制，在网格自适应细化过程中，会出现与历史迭代轮次空间位置重合或极度趋近的倍率探针。边缘侧 EMS 借助全局哈希字典，将已评估的放电倍率及其老化成本映射关系常驻于内存中，每次启动 NPU 推理请求前，优先执行查表寻址，若命中即直接返回缓存结果，主体流程如图 4.11 所示。

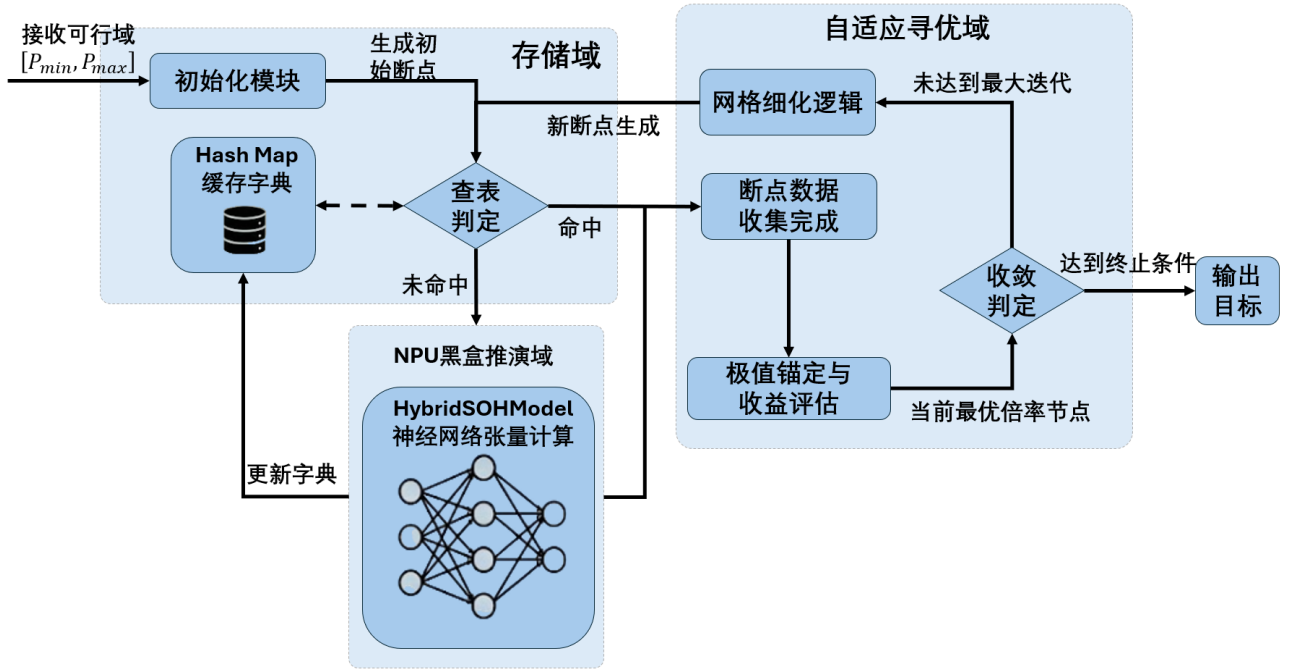


图 4.11 自适应迭代分段线性逼近算法与边缘侧异构协同工作流程图

虽然电池的非线性老化成本 $C_{loss}(x)$ 是黑箱函数，但鉴于电化学反应的物理惯性，其关于放电倍率的演化在连续域上整体平滑且连续，没有高频振荡或不连续的阶跃突变^[90-92]。显著降低自适应网格细化时遗漏突变极值的概率，确保算法能够以较低迭代次数稳定收敛。在契合边缘侧嵌入式平台较低算力消耗的前提下，本算法能够可靠地趋近高质量的工程近似最优解。

该策略通过 AOE 图谱划定安全边界，利用自适应分段线性迭代算法在边界内寻找经济与寿命的平衡点，在并未引入云端高算力依赖的前提下，有效解决边缘侧能量管理中计算效率与寻优效果的矛盾，实现工商业储能系统的自治化与收益最大化。

4.3.3 基于 AOE 网的储能电池老化感知优化调度策略编排

本课题依托第三章提出的 AOE 有向图组态机制，将复杂的非线性寻优算法解构为离散化的原子算子与拓扑约束，通过“策略编排-静态映射-事件驱动”的执行范式，在离线环境下实现经济性与寿命的最优平衡。本策略主要适用于边缘侧 EMS 进入信息孤岛状态的场景，即系统无法获取未来 24 小时的负荷预测数据或动态电价表，缺乏未来信息作为支撑的情况。

策略图谱的拓扑结构被设计为串行流与分支判断相结合的形式，以确保控制逻辑的确定性，如图 4.12 所示。

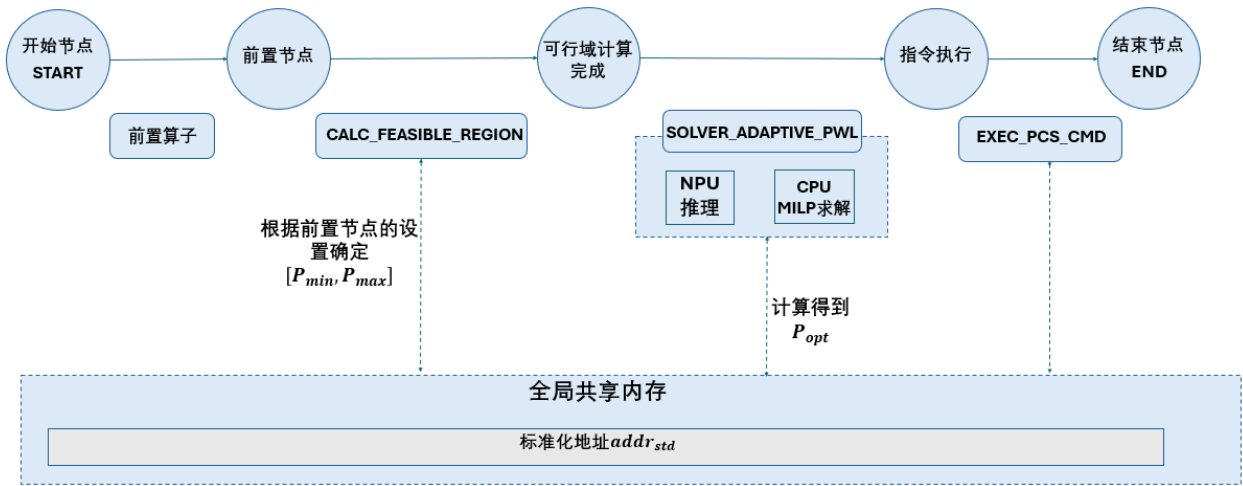


图 4.12 基于 AOE 图谱的自适应分段线性功率寻优编排示意图

当实时控制时钟事件触发之际，AOE 引擎率先激活前置算子节点。该节点从系统全局共享内存的标准化地址 $addr_{std}$ 处提取用户设定的防逆流阈值、需量控制目标及当前微电网的实时负载数据，依据式 (4.14) 与式 (4.15)，系统完成基础算术逻辑运算，生成当前调度周期内物理合规且安全的功率可行域区间 $[P_{min}^{dis}(t), P_{max}^{dis}(t)]$ ，作为后续寻优算法的硬性边界限制。待前置节点传递的可行域边界就绪后，AOE 引擎随即触发“SOLVER_ADAPTIVE_PWL”算子，该算子在底层自动启动 4.3.2 节所述的求解流程，同时调度 NPU 执行 HybridSOHModel 神经网络的并行推理以获取实际老化成本，在不中断主控制线程的前提下，短时间内输出兼顾寿命折损与套利收益的单步近似最优放电倍率 P_{cmd}^* ，此模块封装极大降低系统配置复杂度，实现业务逻辑与底层 AI 算力的解耦。在获取最优解指令后，策略图谱流转至执行算子节点，引擎依据第三章配置驱动模板，将计算所得逻辑控制变量 P_{cmd}^* 静态映射为底层 PCS 可识别的相应报文，并下发给寄存器。

经由上述基于 AOE 网的原子化策略编排，本课题成功将深度学习寻优任务，平滑融入工商业储能边缘侧 EMS 的标准化业务流中。此举既保障寻优过程的高效性与闭环可靠性，又为后续在缺乏云端网络环境下的深度自治运行提供极具示范价值的软件工程范式。

4.4 算例分析与边缘端部署验证

4.4.1 实验平台与数据说明

实验硬件平台采用基于瑞芯微 RK3568 芯片的边缘侧 EMS 主板，该芯片搭载四核 ARM Cortex-A55 CPU 与最高 1 TOPS 算力的 NPU，适配边缘侧轻量级计算需求。软件环境依托 Linux 5.19 内核，NPU 驱动版本 0.9.8，布设本文构建的软硬件解耦架构。实验 PC 端环境选用 NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU。

实验数据源自 WZU 随机工况数据集，在训练阶段，选取前 125 组电池作为训练集，剩余 20 组作为验证集，采用验证集的电池数据进行实验。

边缘计算拓扑结构如图 4.13 所示。

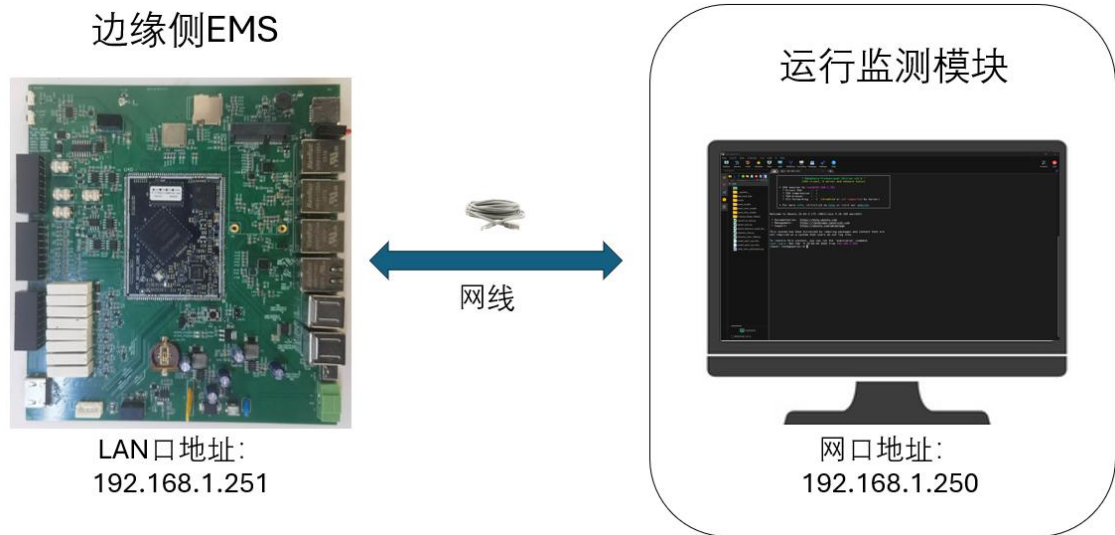


图 4.13 边缘计算拓扑结构图

其在本课题中实际搭建情况如图 4.14 所示。

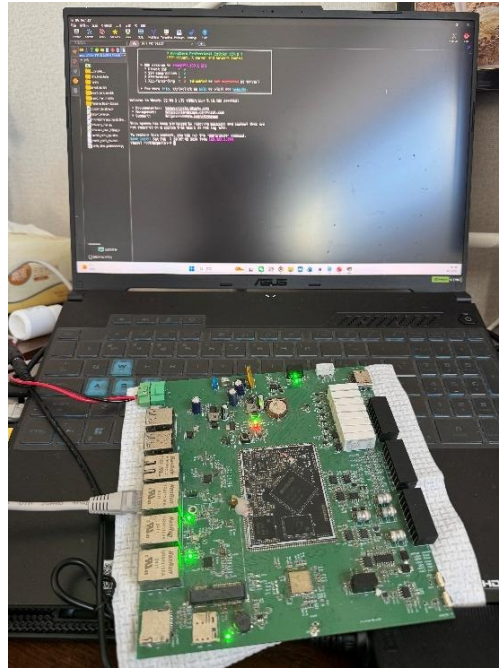


图 4.14 边缘计算场景图

其中，工商业储能边缘侧 EMS 的 LAN 口 IP 地址设置为 192.168.1.251，掩码为 255.255.255.0，PC 端将网口 IP 地址改为 192.168.1.250，掩码为 255.255.255.0，确保两个设备处于同一局域网下，PC 端使用 MobaXterm，与工商业储能边缘侧 EMS 进行连接，进入 EMS 的 Linux 系统，即可监视各个任务运行情况以及运行效果。

4.4.2 SOH 预测模型推理性能评估

为验证本文提出的 HybridSOHModel 训练策略的有效性，将其与传统的 CNN 模型、LSTM 模型、TCN 模型、Transformer 模型在 PC 端进行对比，选取全部验证集进行验证，并

取验证集前 10 组电池进行可视化展示，评估指标涵盖预测精度（RMSE，MAE， R^2 ）预测结果分析如图 4.15、图 4.16、图 4.17、图 4.18 与图 4.19 所示。模型关键参数如表 4.2 所示。

表 4.2 模型关键参数

参数	对应值
单次训练传递的样本批次大小	256
最大训练轮数	1000
学习率	$1e-4$
权重衰减	$1e-3$
损失函数阈值	0.5
梯度裁剪阈值	1.0
随机失活率	0.1
CNN 网络层数	3
CNN 卷积的核大小	3
TCN 网络层数	2
TCN 卷积核大小	3
LSTM 网络层数	2
Transformer 编码器层	2
隐藏层特征维度	64
多头注意力的头数	4
窗口大小	32

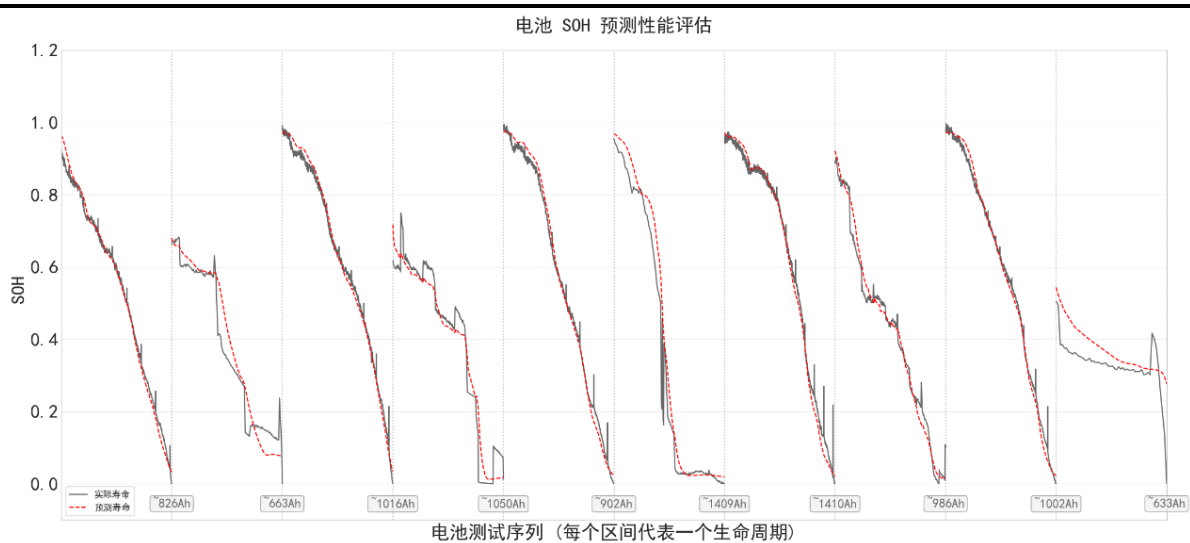


图 4.15 CNN 模型储能电池 SOH 衰退预测曲线

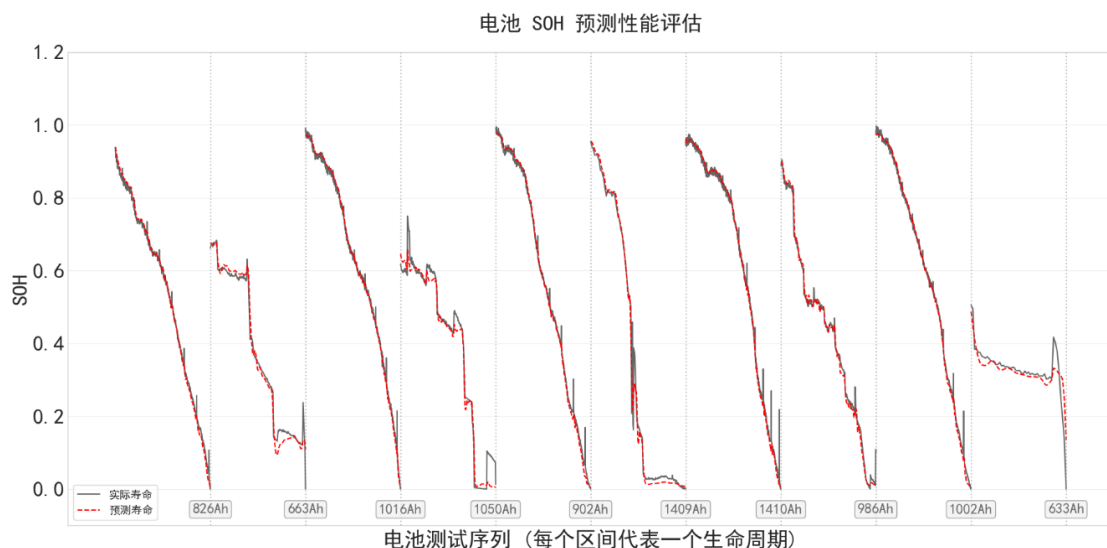


图 4.16 LSTM 模型储能电池 SOH 衰退预测曲线

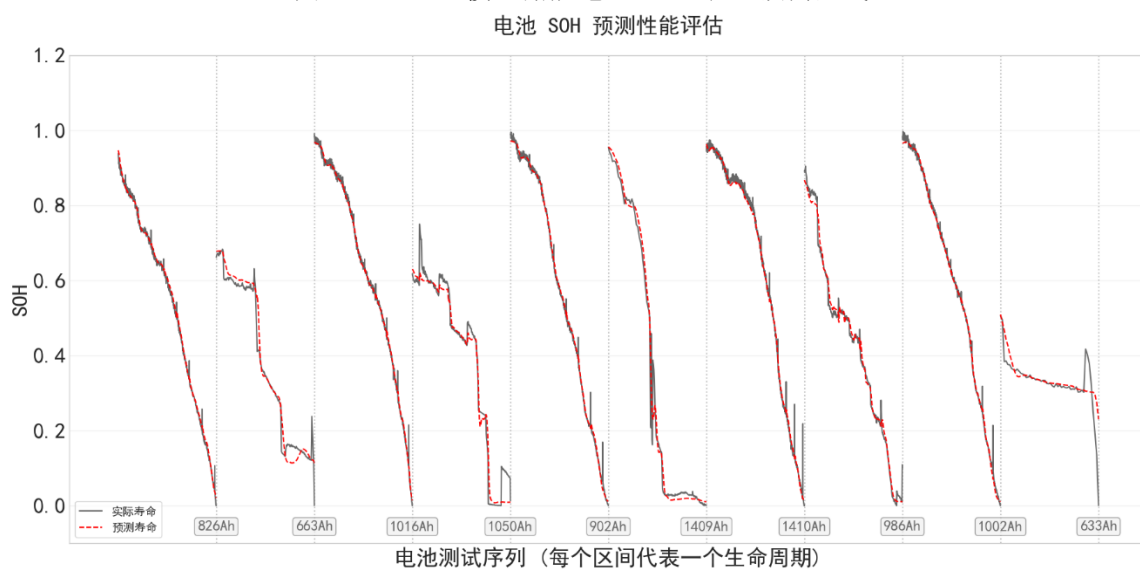


图 4.17 TCN 模型储能电池 SOH 衰退预测曲线

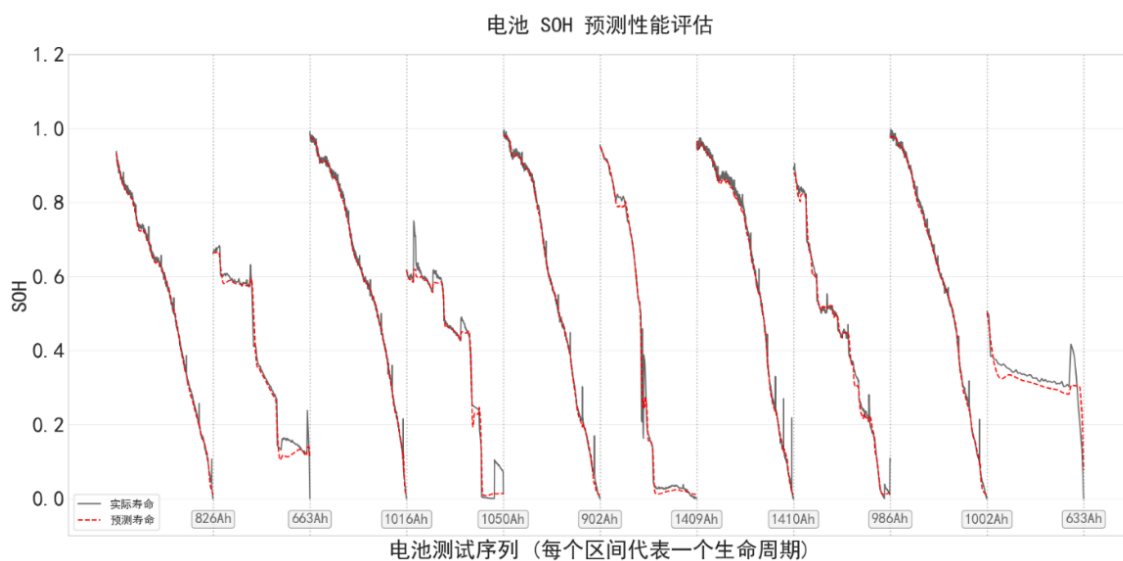


图 4.18 Transformer 模型储能电池 SOH 衰退预测曲线

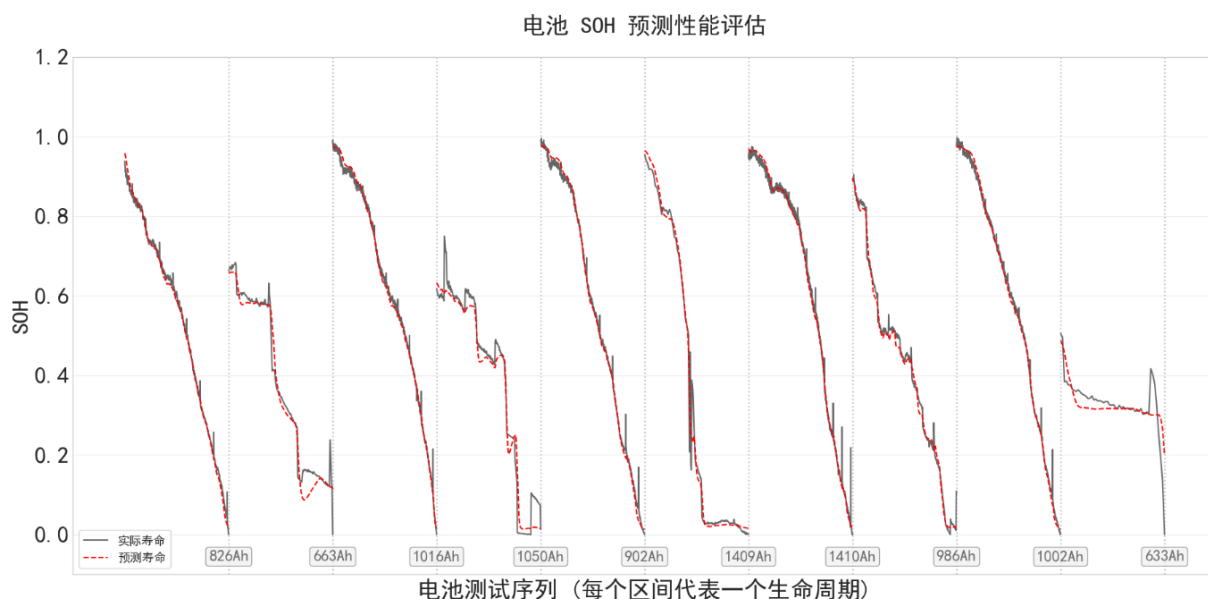


图 4.19 HybridSOHModel 模型储能电池 SOH 衰退预测曲线

对应的推理结果性能平均参数如表 4.3 所示。

表 4.3 不同模型储能电池 SOH 衰退预测指标

评价标准	CNN	LSTM	TCN	Transformer	HybridSOHModel
MAE	0.055008	0.054138	0.033401	0.043947	0.026153
RMSE	0.094935	0.071255	0.064570	0.056521	0.047847
R ²	0.8966	0.9418	0.9522	0.9634	0.9737

HybridSOHModel 与传统的 CNN 和 LSTM 模型相比, HybridSOHModel 的 MAE (0.026153) 分别大幅降低了 52.59%和 51.69%, RMSE (0.047847) 分别降低了 49.60%和 32.85%。即使与同样具备优秀时序特征提取能力的 TCN 和 Transformer 模型相比, 本课题提出的 HybridSOHModel 在 MAE 上也分别下降了 21.70%和 40.49%, 且决定系数达到了最高的 0.9737。这一显著的误差下降与拟合度提升, 充分证明了融合 Transformer 全局注意力机制与 TCN 因果推演能力的双流架构, 能够更精准、稳定地捕捉电池复杂的非线性衰退特征。

在 RK3568 平台上, 也进行模型推理性能测试, 测试结果如图 4.20 与图 4.21 所示。

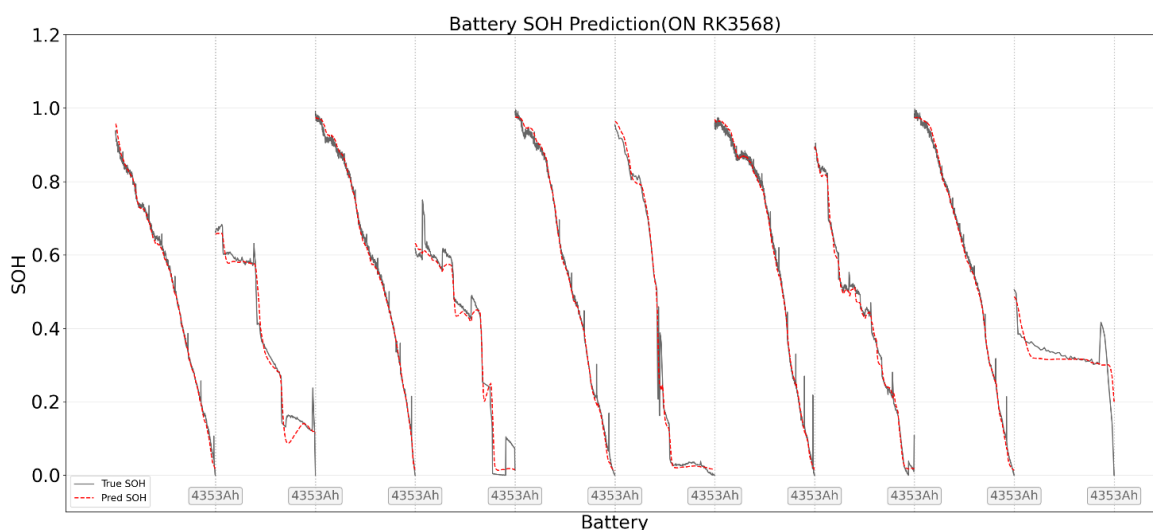


图 4.20 HybridSOHModel 模型储能电池 SOH 衰退边缘端预测曲线

Battery	Samples	MAE	RMSE	Latency
126	573	0.009175	0.012746	4.40 ms
127	159	0.022057	0.033171	4.34 ms
128	663	0.008775	0.011943	4.41 ms
129	330	0.027957	0.039218	4.38 ms
130	599	0.009741	0.013973	4.39 ms
131	264	0.017214	0.030116	4.37 ms
132	877	0.009499	0.014354	4.37 ms
133	365	0.013315	0.017832	4.36 ms
134	692	0.009249	0.012461	4.35 ms
135	54	0.028376	0.047594	4.40 ms
136	399	0.011182	0.016045	4.36 ms
137	414	0.012406	0.020623	4.40 ms
138	115	0.013552	0.017816	4.37 ms
139	318	0.034994	0.051378	4.41 ms
140	81	0.029766	0.040450	4.40 ms
141	261	0.067815	0.083323	4.41 ms
142	209	0.070200	0.086549	4.43 ms
143	135	0.018155	0.030836	4.41 ms
144	77	0.022716	0.034905	4.31 ms
145	1179	0.073562	0.097312	4.39 ms

图 4.21 HybridSOHModel 模型储能电池 SOH 衰退边缘端每个电池预测详细数据图
对应的推理结果性能平均参数如表 4.4 所示。

表 4.4 HybridSOHModel 模型储能电池 SOH 衰退边缘端预测指标

评价标准	HybridSOHModel
MAE	0.026186
RMSE	0.047888
R^2	0.9732
预测平均耗时	4.38ms

为深入检验 HybridSOHModel 对调度指令的推演解释力，本课题从随机验证集中抽取电池样本，在维持单次调度能量吞吐恒定为 1Ah 的条件下，输入 0.3C 至 2.0C 的放电动作，步长为 0.0001C，如图 4.22 所呈现，纵轴表征边际物理磨损，即相对于基准静置状态的额外衰退量，在施加不同放电倍率与时长的情形下，电池于寿命初期、中期、末期，即 SOH 分别为 98%、91%与 84%节点处的 SOH 衰减轨迹。在相同能量吞吐前提下，模型推算的 SOH 衰退量随倍率递增呈现显著非线性攀升态势，成功捕获高倍率放电对活性锂离子的加速耗损机制，验证动作编码器对物理因果关联的有效提取。模型对不同老化阶段亦表现出迥异的响应灵敏度，处于寿命终点附近（SOH=84%）的电池对倍率波动的响应轨迹最为陡峭。

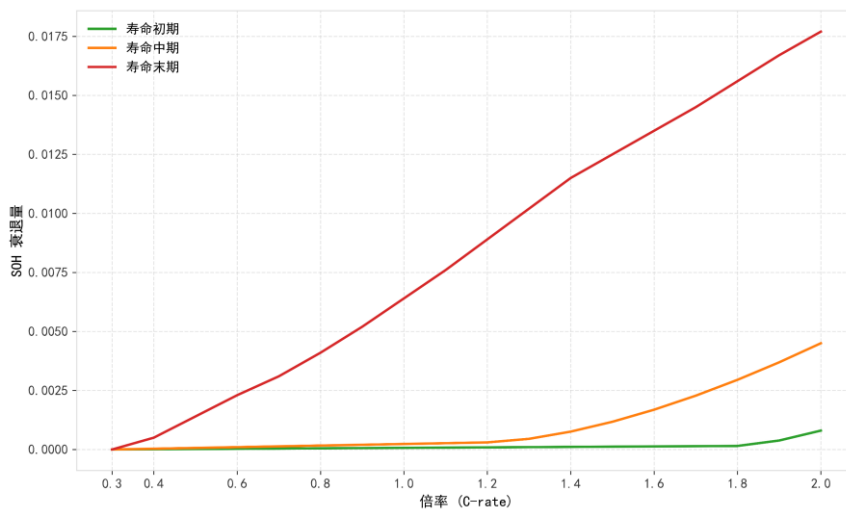


图 4.22 HybridSOHModel 面向等效吞吐量的调度敏感性推演验证

数据表明,使用 HybridSOHModel 进行电池寿命预测在预测结果上比传统的方式更加的精确,也更能够减少噪声对其的影响,通过模型量化并使用 NPU 执行,推理平均耗时仅用 4.38ms,保持高质量的 SOH 衰退预测,并且在电池寿命进入末期时对于放电倍率具有高敏感性。这验证本文算法在资源受限的边缘侧嵌入式设备上部署的可行性,有效缓解边缘侧算力瓶颈与高精度模型计算需求之间的矛盾。

4.4.3 功率寻优策略的对比分析

为聚焦验证所提自适应 PWL 算法在边缘侧环境下的单步实时寻优性能,暂不考虑跨时段 SOC 动态演化,仅在满足当前调度周期能量充足条件下,对单步放电倍率进行局部最优求解。面向工商业储能场景中的峰谷套利问题,设定峰谷电价差为 0.9 元/kWh、初始 SOH 为 84%作为基准条件。对比剖析四种寻优算法,鉴于工商业储能边缘侧算力瓶颈,本实验设立 5 个方案,每种策略均独立执行 20 轮,来比较边缘侧 EMS 对于单维目标函数的求解能力,收敛曲线如图 4.23、图 4.24、图 4.25,同时将各组平均优化耗时与平均推理次数汇总于表 4.5 所示,下文对各优化算法进行说明。

粒子群算法 PSO: 算法于可行域内初始化种群,为抑制粒子群搜索发散,将最大移动速度限定为总范围的 20%,在迭代进化阶段,通过评价全部粒子来刷新个体与最优解,融入边界吸收机制,并开启推理缓存复用,种群规模设置为 20,迭代次数为 15。

遗传算法 GA: 采用锦标赛选择机制从当前群体中优选下一代的父代;在父代池中,个体通过算术交叉组合生成子代,并开启推理缓存复用。种群个体数设为 20,迭代次数为 15。

贝叶斯优化算法 BO: 采用 Matérn 核和期望改进(Expected Improvement, EI)采集函数,初始探测点数设置为 3,查表级数为 146,迭代次数为 15。

等步长搜索法: 采用常规的全域网格剖分,将可行域均匀划分为 55 个区间。

自适应 PWL 算法: 本课题所设计的寻优算法,初始网格划分为 4 段,最大迭代次数设为 6 次。

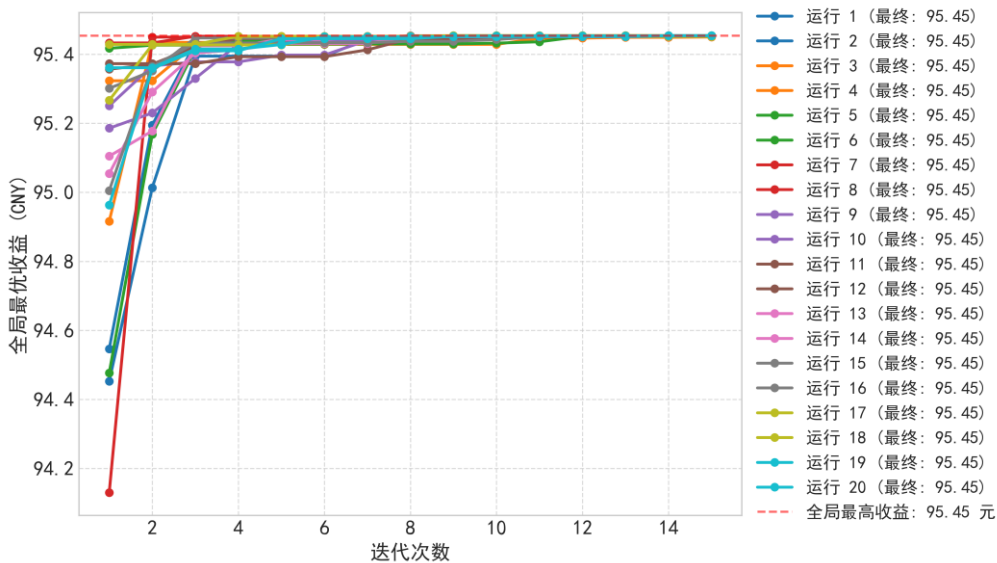


图 4.23 PSO 收敛曲线图

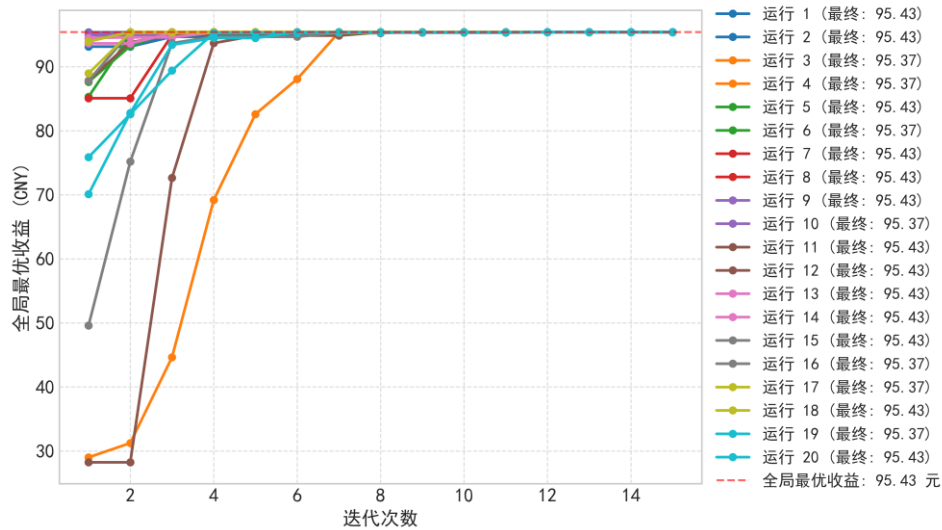
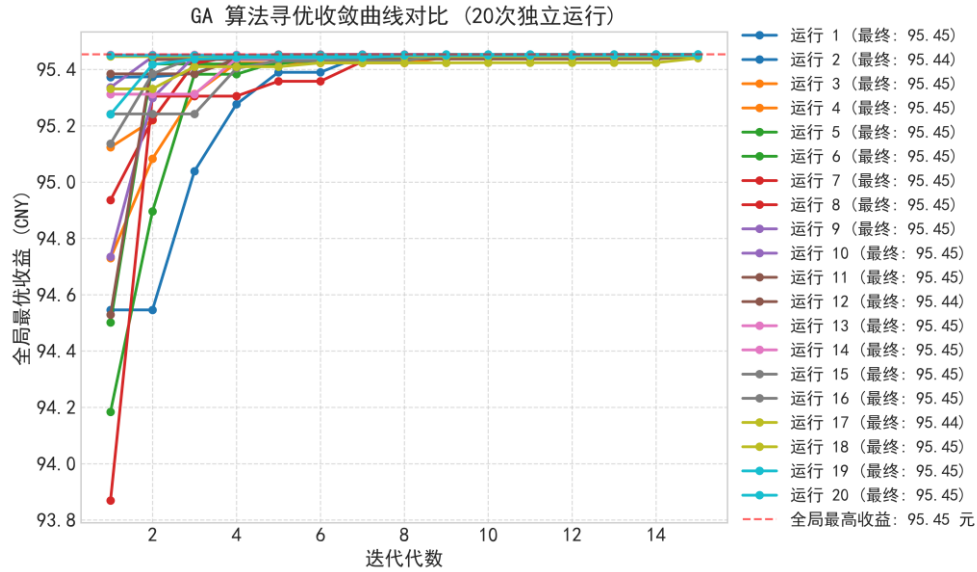


图 4.25 BO 收敛曲线图
表 4.5 寻优算法对比表

评价标准	PSO	GA	BO	等步长搜索法	自适应 PWL 算法
迭代次数	15	15	15	1	6
推理次数	283±10	234±19	12±2	56	15
总耗时	1742.78±13ms	1459.35±32ms	8257.32±87ms	323.55±7ms	82.38±10ms
最优倍率	0.7653C	0.7654C	0.7700C	0.7618C	0.7750C
最大净利	95.45 元	95.45 元	95.43 元	94.82 元	95.03 元

如表 4.5 所列, 从寻优精度来看, PSO 与 GA 在本测试工况下获取了 95.45 元的单步最大净利润。在放宽边缘侧算力约束的理想情况下, 该数值可视为当前时刻经济收益的理论上界。然而, 获取该理论上界的代价是极其高昂的计算开销。由于启发式算法内置的庞大种群规模与多代进化机制, PSO 与 GA 分别产生了高达 283 次与 234 次的 NPU 前向推理请求, 导致总耗时飙升至 1742.78ms 与 1459.35ms, 且其收敛精度随迭代次数影响, 可以看到图 4.23 与图 4.24 对应的最差迭代次数均为 10 次以上。将面向高维复杂解空间的启发式算法强行应用于

一维单峰寻优问题，属于严重的算力浪费与维度错配，在真实的边缘实时控制场景中不具备部署可行性。

此外，BO 算法虽然将 NPU 推理次数大幅降至 12 次，但由于其高斯过程在每一次迭代更新中均涉及高复杂度的矩阵求逆运算，导致 CPU 的算力开销与消耗率急剧增加，使得算法总耗时暴涨至 8257.32ms，完全无法满足边缘控制的实时性需求；而作为静态全局扫描策略的等步长搜索法，虽然单次执行不涉及复杂的逻辑判断，且耗时缩减至 323.55ms，但受限于固定的网格颗粒度，其截断误差导致最终净利仅为 94.82 元，经济性表现最差。

相比之下，本文所提出的自适应 PWL 算法在该数据集下展现出了较为优秀的综合性能与场景适用性。在经济性指标上，该算法获取的最大净利为 95.03 元，达到了 GA 算法理论极限的 99.56%，成功锁定了当前单步调度的较优放电倍率（0.7750C）。更重要的是，得益于其动态自适应的寻优机制，该算法在当前情况下仅需 6 次迭代与 15 次前向推理即可满足收敛条件，将总耗时极限压缩至 82.38ms。自适应 PWL 算法在实现近乎最优经济收益的同时，将计算开销与延迟降至最低，契合边缘侧设备算力受限与严格实时性的双重需求。

为充分验证所提自适应 PWL 寻优算法的可靠性与鲁棒性，本研究在 RK3568 上设计并执行了 3000 组随机实验。实验通过在 WZU 电池数据集中随机抽取不同的电池单体特征与循环轮次，构建了包含海量随机初始 SOH 的测试场景。在算法评估机制上，本节引入具有较强全局搜索能力的 PSO 算法，将其求解的最大净利作为该工况下的理论最优基准。通过计算自适应 PWL 算法求得的净利润与理论最优值之间的绝对收益损失，并将其与全局收益极差进行对比，得到极差归一化误差率。若该相对误差率超过 5% 的阈值，则判定算法在该随机工况下寻优失败。实验结果如表 4.6 所示。

表 4.6 自适应 PWL 算法随机工况测试统计表

	成功次数	失败次数	成功率	平均逼近精度	平均求解时间
初始 4 段 迭代 6 次	2999	1	99.96%	99.89%	84.76ms
初始 12 段 迭代 6 次	3000	0	100%	99.93%	154.65ms

针对表 4.6 中初始 4 段所出现的寻优失败案例（极差归一化误差超 5%），本课题提取了其寻优轨迹进行了深度的失效机理分析。结果表明，在极少数特定的电池老化阶段，其单步经济收益目标函数曲线会在最优解附近呈现出极度狭窄且陡峭的非线性突变峰值。由于当前自适应 PWL 算法设定的初始逼近分段数较少，导致初始采样网格的颗粒度大于该突变峰的跨度。算法在初始化阶段未能有效捕获最优所在的狭窄子区间，进而引导后续的动态细化过程收敛于次优区间，产生了截断误差。

如表 4.6 的对比实验所示，通过增加初始分段数可有效消除此类跨越峰值的漏检现象，当初始分段数提升至 12 段时，对应的寻优成功率提升至 100%，平均逼近精度也进一步提升至 99.93%。然而，初始网格的加密不可避免地导致了 NPU 前向推理次数的线性增长，使得单次调度的平均求解总耗时从 84.76ms 激增至 154.65ms（计算开销增加了约 82.5%）。考虑到本课题面向的是算力严格受限且对控制延迟极其敏感的边缘实时场景，单纯追求理论上的

绝对极值并不具备最佳的工程实用性。当前初始 4 段配合 6 次迭代的参数配置是在海量实验中论证得出的该 WZU 电池数据集下的最优工程折中。该策略主动舍弃了对极小概率极端工况的绝对精度追求，以此规避了一定的算力开销惩罚，在保障全局高达 99.96%成功率的同时，维持了仅平均 84.76ms 的低求解延迟，充分满足了边缘端 EMS 高效、高频的部署需求。

进一步的，本课题比较离网下的传统的固定倍率盲目调度策略（固定 0.5C 与固定 1.0C）与本课题推荐的单步最优倍率在初始 SOH 为 84% 的不同峰谷价差工况下的表现。图 4.26 与图 4.27 分别呈现三种策略在不同价差下的单步放电净利润及物理 SOH 损耗量的动态演化轨迹。

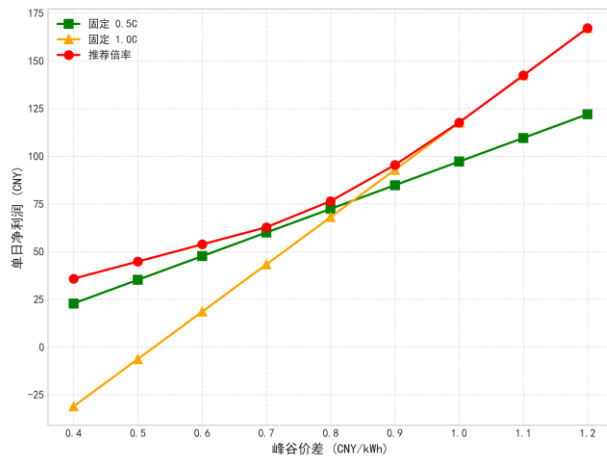


图 4.26 不同峰谷电价差下的单步放电收益图

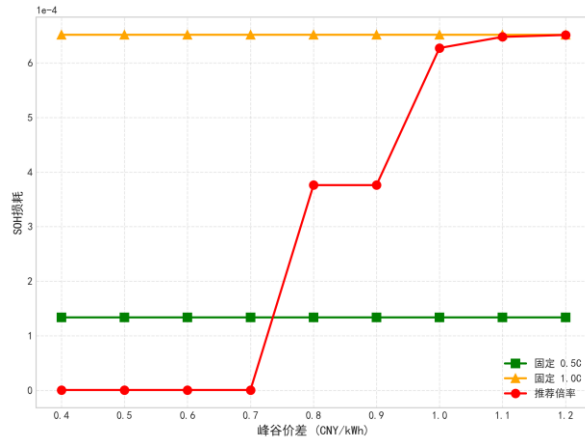


图 4.27 不同峰谷电价差下的最大放电利润下的 SOH 损耗量

表 4.7 不同峰谷电价差下的经济对比表

价差 (元)	策略	单步放电营收 (元)	单步放电折损 (元)	单步放电净利 (元)
0.4	固定 0.5C	49.6	26.8	22.8
	固定 1.0C	99.2	130.3	-31.1
	推荐倍率	36.0	0.1	35.9
0.8	固定 0.5C	99.2	26.8	72.4
	固定 1.0C	198.4	130.3	68.1
	推荐倍率	151.7	75.2	76.5
1.0	固定 0.5C	124.0	26.8	97.2
	固定 1.0C	248.0	130.3	117.7
	推荐倍率	243.2	125.5	117.7

实验揭示，本方案通过应用非线性功率寻优，能够在特定峰谷价差下锁定单步最优放电倍率，进而完成单步放电净收益的最大化，在常规 0.8 元峰谷价差与初始 SOH 为 84% 条件下，单步放电净利率较之固定 1.0C 放电模式平均提升 12.3%。

为充分验证所提自适应 PWL 寻优算法在边缘脱网工况下的综合寻优价值，本研究在 RK3568 上再次设计并执行了 3000 组随机实验，实验通过在 WZU 电池数据集中随机抽取不同的电池单体特征与循环轮次，构建了包含海量随机初始 SOH 的测试场景，与离网下的传统的固定倍率盲目调度策略进行对比，实验结果如表 4.8 所示：

表 4.8 自适应 PWL 算法随机工况寻优对比表

	对比 1.0C 固定倍率	对比 0.5C 固定倍率
平均单步净利提升	+14.11 元/步	+86.09 元/步
SOH 衰减减缓比例	+45.89%	-4.11%

表 4.8 中，与 1.0C 固定倍率策略相比，自适应 PWL 算法不仅实现了平均单步净利润 14.11 元的提升，更具工程意义的是，由于算法在边缘侧实时引入了非线性老化成本的量化惩罚，使得 SOH 衰减量平均减缓了 45.89%。当与 0.5C 固定倍率策略对比时，自适应 PWL 算法的平均单步净利润实现了高达 86.09 元的提升，虽然这种高收益是以 SOH 衰减量平均微增 4.11% 为代价换取的，但在系统设定的峰谷价差市场环境中，算法有效地捕捉到了增加微小电化学损耗以换取巨额电费差价的有利时机。这清晰印证，即便在缺乏云端算力支撑的脱网边缘环境中，本文构建的异构协同框架依然能使储能系统具备的自治决策能力，达成资产运行收益的最大化与稳定性。

4.5 本章小结

本章将着眼于工商业储能边缘侧算力资源受限与电池老化机理复杂性之间的矛盾，构建一套面向 RK3568 异构计算平台的实时能量管理与优化调度体系，通过从感知层到决策层的系统性重构，解决传统边缘侧 EMS 在模型部署与策略寻优方面的多重约束。

针对电池健康状态预测中存在的“高精度模型部署难”与“低精度模型拟合差”的鸿沟，本章提出一种融合工况动作编码的 HybridSOHModel 混合神经网络架构，并将计算密集型的卷积与注意力机制算子迁移至 NPU 加速域，充分利用 RK3568 中的 NPU，有效释放 CPU 的计算资源。该方法在保障对电池非线性老化特征精准捕捉的同时，将边缘侧推理时延控制在毫秒级，以此缓解算法精度与硬件算力之间的资源错配问题。

进一步地，针对传统调度策略忽视电池全生命周期边际损耗的沉没成本陷阱，以及高维全局寻优算法在边缘侧嵌入式平台落地的算力瓶颈，本章建立一种耦合实时 SOH 衰退成本的物理净利润目标函数。面对深度学习模型输出的黑盒特性，本课题提出一种基于自适应迭代分段线性逼近的软硬件协同寻优策略，采用极值锚定与中点插值的启发式局部加密逻辑，协同粗网格起步-局部自适应细化机制与基于全局哈希字典的 NPU 推理缓存复用技术，在避免复杂分支定界运算的前提下，以较少的推理次数与较低的计算开销，可靠且高效地逼近了兼顾经济套利收益与设备寿命损耗的单步高质量工程近似最优解。

最后，依托 WZU 随机工况数据集与 RK3568 硬件平台边缘部署的算例分析证实所提架构的有效性。实验数据揭示，本方案在离线边缘环境中达成寻优总耗时向毫秒的突破，且在动态放电功率寻优中展现出优异的经济稳健性与即时性。这充分证实在缺少云端算力支撑的弱网或无网环境下，达成工商业储能系统深度的自主化与轻量级能量管理具备完全可行性，为后续工业现场部署树立极具借鉴意义的工程范例。

5 总结与展望

5.1 全文总结

回顾本课题的研究历程，始终着眼于工商业储能产业爆发的背景下，边缘侧 EMS 在工程落地时所面临的问题，一方面是日益复杂的电价政策和对电池寿命管理的精细化需求，另一方面是现场设备接口的碎片化、由于成本控制导致的边缘算力瓶颈，以及传统开发模式的灵活性不足。为打破这些束缚，本课题并未止步于传统的系统集成，而是基于国产化 RK3568 平台，从底层架构到上层算法进行一次彻底的重构与创新。本文的主要研究成果及创新点总结如下：

其一，打破传统开发“烟囱式”的各种壁垒，构建一套软硬件深度解耦的边缘计算底座，针对工商业储能场景中多源异构设备接入难、代码复用率低的问题，本课题摒弃过去那种硬编码、驱动与业务逻辑紧密缠绕的单体式架构。通过引入“主机-从机”逻辑隔离的分布式软件设计，利用全局共享内存与标准化数据总线，我们成功将底层的物理设备驱动与上层的业务决策逻辑剥离开来。该设计构建一个统一的数据抽象层，无论底层连接何种品牌的 PCS 或 BMS，经过从机模块后，对于主机而言均呈现为标准化、一致的数据流。配合专门设计的具备掉电保护和多路隔离通信接口的工业级网关硬件，这套架构不仅保证毫秒级控制的硬实时性，更为后续复杂策略的容器化部署提供一个稳健的物理载体。

其二，实现从硬编码到低代码组态的开发范式转变，解决现场部署与策略迭代的效率瓶颈，为解决控制策略僵化、难以适应现场多变需求的问题，本文提出一套基于 JSON 描述文件与 AOE 图谱的通用组态机制，本课题建立两套标准模型，一个是用于解决异构设备接入与数据上报的异构设备通用描述模型与异构设备数据上报通用模型，另一个则是用于策略控制的策略控制通用描述模型，这使得现场工程师无需重新编译底层的二进制代码，仅通过修改配置文件即可配置化方式完成设备接入与策略编排。更关键的是，针对边缘侧资源受限的痛点，设计出一个启动时静态映射与运行时指针调用的轻量化引擎，避免脚本语言在运行时解释带来的性能开销。这种设计既保留组态技术的灵活性，又通过拓扑排序和静态哈希映射，严格确保工业控制场景所必需的确定性执行与系统稳定性。

其三，优化边缘侧 EMS 算力限制与模型预测精度的矛盾问题，提出一套融合寿命感知的单步边际优化调度策略，针对传统策略忽视电池“沉没成本”以及高精度模型在边缘端因计算资源受限而难以部署的难题，本课题并没有盲目依赖云端大模型，而是定制化适配，构建适配 RK3568 NPU 加速的 HybridSOHModel。通过将 Transformer 的全局注意力机制与 TCN 的因果推演能力相结合，并将计算密集的矩阵运算迁移至 NPU 执行，成功在毫秒级的推理时延下捕捉到电池老化后期的非线性特征。在此状态感知基础上，针对预测视界缺失的脱网环境调度约束，本课题构建了耦合实时边际老化成本的单步物理净利润目标函数，并提出了

一种基于自适应 PWL 的软硬件协同寻优策略，采用极值锚定与中点插值的启发式局部加密逻辑，协同粗网格起步-局部自适应细化机制与基于全局哈希字典的 NPU 推理缓存复用技术，这一轻量化机制避免大规模寻优计算对边缘侧 EMS 底层高频实时保护线程的阻塞隐患，在较低的系统算力开销下，稳健锁定了当前时刻的单步高质量工程近似最优解，赋予了工商业储能系统在离线环境下的智能自治能力。

总的来说，本课题的研究并非停留在理论层面的算法推演，而是致力于打通从底层驱动、中间件组态到上层优化调度的全链路工程实现，提供一套可落地的、低成本且高可靠的工商业储能边缘侧解决方案，为工商业储能行业解决“异构接入难”与“精细化管理难”的问题提供切实可行的工程范式。

5.2 未来的工作展望

随着工商业储能系统建设的深入推进和对应储能技术的迅猛发展，工商业储能边缘侧 EMS 的研究仍面临诸多挑战与机遇。本课题虽然在基于 RK3568 平台的边缘侧 EMS 软硬件架构解耦、异构设备低代码接入以及边缘侧电池老化感知优化调度方面取得一定的成果，但受限于研究周期与客观验证条件，目前系统仍存在算法局限于单步瞬时寻优以及实验测试工况与数据集覆盖不够全面等不足，仍有许多值得深挖和打磨的空间，结合当前储能技术的发展趋势与工程实践中的感悟，未来可以在以下几个方向进行更深层次的探索：

探索底层通信协议的动态解析引擎与大模型辅助驱动生成：目前基于 JSON 和 AOE 图谱的设备组态接入机制，虽然有效解决了已知标准协议下异构设备重复硬编码开发的痛点，但对于系统尚未注册的全新私有非标准通信协议，仍不可避免地依赖专业研发人员手动编写底层 C/C++ 驱动代码并重新编译固件，存在一定的技术壁垒与适配延迟。但随着生成式人工智能和大语言模型（Large Language Model, LLM）在代码生成与长文本理解能力的爆发，以及 RK3568 等带有 NPU 算力的边缘计算平台性能的提升，未来的底层设备接入可以向全链路零代码演进。当现场新增一款采用全新私有协议的设备时，运维人员不再需要等待原厂排期开发固件，而是直接将该设备的通信协议说明文档输入给上位机或边缘侧 EMS。系统内部或云边协同的微型 LLM 能够自动阅读并解析协议文档，精准提取报文头尾格式、校验规则和读写指令集，并自动生成对应的轻量级动态解析脚本。随后系统在运行时动态加载该脚本完成新协议的注册与适配。这将彻底打破底层私有通信协议多样性带来的系统封闭性，补齐异构设备低代码接入的全协议适配，真正实现从底层未知协议解析到上层数据模型映射的全链路即插即用。

从“瞬时贪婪寻优”向“多时间尺度模型预测控制”演进：目前的功率寻优策略，虽然能够有效降低边缘侧 CPU 的分支定界算力负担，并在有限算力与低开销下获得当前单步调度的高质量放电倍率，但从本质上讲，其依然属于一种单步的“瞬时贪婪算法”。这会导致系统过于关注当前调度周期的物理净利润最大化，而缺乏对未来 24 小时全局状态的统筹规划。未来的研究可以尝试在 RK3568 平台上部署轻量级的非线性模型预测控制（Nonlinear

Model Predictive Control, NMPC) 算法, 通过引入对未来 SOC 变化和负载的短时预测, 将单点分段线性优化扩展为时间域上的滚动优化, 从而在有限的算力下实现从“战术上的最优”向“战略上的最优”跨越。

增强 SOH 预测模型的泛化能力与“端云协同”进化: 目前的 HybridSOHModel 虽然在 WZU 随机工况电池衰退数据集上表现优异, 但受限客观研究条件, 当前模型验证所覆盖的实验测试工况与数据集仍不够全面。在实际工程中, 不同电池厂商的电芯化学体系差异巨大, 且运行环境对电池老化的影响更为复杂, 仅靠预训练模型很难做到适应其他的电池。为了解决模型适配的问题, 未来可以引入迁移学习技术, 即在云端利用海量数据训练一个通用的基础大模型, 然后将其部署到边缘侧, 利用本地产生的小样本数据对模型微调, 使 EMS 具备自适应能力, 并且后续研究应摆脱对公开数据集的单一依赖, 开展基于真实储能电芯的长周期循环老化实验, 通过搭建实物测试平台进行硬件在环验证, 将算法逻辑置于真实的物理衰退过程中进行校准。同时, 继续优化双流混合模型的工况特征, 融入温度、湿度等更多的现场储能柜的工况特征, 使边缘侧 EMS 真正具备自适应的进化能力, 从而对复杂多变的真实工况做出更敏锐、更精准的衰退感知与响应。

优化求解理论界限的严密性论证与确定性兜底机制构建: 本课题虽在当前的实验环境与 WZU 随机工况电池衰退数据集下构建的寻优空间呈现出较好的连续性与平稳性, 自适应 PWL 算法能够稳定地经济收益与寿命损耗的高效逼近。然而, 受限深度学习黑盒模型的高度非线性, 当前算法仍缺乏严密的运筹学数学证明。在未来研究中, 需从理论上探求 HybridSOHModel 在特定工况下的 Lipschitz 常数或函数平滑性假设条件, 严格推导出分段线性化引入的截断误差上界, 并论证迭代序列在有限轮次内的收敛性间隙。此外, 面对极端运行工况下可能出现的局部多峰陷阱, 不应盲目引入计算开销庞大的概率型元启发式算法, 而应探索基于严格数学边界的凸松弛技术, 或者设计一套完全确定性的、基于安全规则的降级调度逻辑, 以确保在优化算法求解发散时, 边缘侧 EMS 仍能输出安全、确定、收敛的控制指令, 真正提升系统的工业级鲁棒性。

面向“光储充”协同的随机性策略升级: 本课题提出的寻优策略, 其核心假设是“负荷可控”, 默认储能是唯一的调节手段。但在真实的工商业场景中, 随着屋顶光伏和电动汽车充电桩的普及, EMS 面对的将是一个充满随机性的“多变量博弈”, 未来的研究可以将视角从单一的储能电池管理扩展到源网荷储的微电网协同, 在现有的 AOE 框架中引入随机规划或强化学习算子, 利用 RK3568 的异构算力部署轻量级的短期光伏预测模型, 并配合大规模混合整数规划求解器进行多目标的动态权衡, 使 EMS 真正蜕变为能够应对复杂微电网环境的智能指挥官。

综上所述, 工商业储能边缘侧 EMS 的研究是一个涉及电化学、控制理论、计算机软件与人工智能的交叉学科。本课题的研究仅是这一宏大图景中的一块拼图, 未来仍需在算法的深度、架构的广度以及应用的温度上持续探索, 以期为双碳目标的实现贡献微薄之力。

致谢

岁月不居，时节如流。当这篇论文最终定稿时，长达四年的硕士求学生涯也即将画上句号。回首这段漫长而又充实的时光，除了对学术探索的坚持，更多的是对一路上给予我无私帮助与陪伴的师长、同门及家人的深深感恩。

首先，我要向我的导师陈科明教授表达最诚挚的敬意和感谢。在学术上，本论文的选题、构思、研究及撰写，无一不是在导师的悉心指导下完成的。导师渊博的学识、严谨的治学态度和精益求精的科研精神，是我求学路上的灯塔。更让我铭记于心且感激不尽的是，在我因病住院半年、不得不休学一年的那段人生低谷期，导师给予了我极大的理解、包容与关怀。是您在我最焦虑无助时，一次次给予我安慰与鼓励，让我能够放下学业的重担安心养病，并在我重返校园后，耐心指导我重新接轨科研工作。导师的知遇之恩与人文关怀，学生定当铭记一生。

其次，感谢实验室的同门郑泽轩、洪文军、钱逸飞、周柏楠及课题组全体人员。感谢你们在科研道路上与我并肩作战，那些共同推敲算法、调试系统、探讨难题的日日夜夜，是我研究生阶段最宝贵的记忆。更要特别感谢在我生病住院以及休学恢复期间，大家给予我的莫大支持。无论是病床前的探望、屏幕另一端的问候，还是复学后在学业上对我的无私帮助，都让我深深感受到了我们这个团队的温暖。是你们的陪伴与鼓励，给了我战胜疾病、重返校园以及完成学业的勇气与力量。

此外，还要感谢各位专家与教授在百忙之中对本文进行审阅和指导，您的专业指导为论文质量提供了重要保障，使研究内容的完整性与学术视野得到显著拓展。

最后，我要将最深沉的感谢献给我的家人。你们是我生命中永远的避风港，也是我不断前行的最大动力。特别是在我患病休学的这一年里，是你们日夜不辞辛劳的奔波与照料，是你们在病床前的守候与宽慰，支撑我走过了那段最艰难的日子。你们的爱与包容，是我面对一切困难的底气。养育之恩，无以言表，唯有在未来的日子里以更加优异的成绩和健康的体魄来报答。

凡是过往，皆为序章。这段因病休学又重返校园的特殊经历，让我更加敬畏生命，也更懂得感恩。带着师长的殷切期盼和亲友的温暖祝福，我将收拾行囊，心怀感恩地迈向人生的下一个征程。

参考文献

- [1] 陈海生,张华良,岳芬.CNESA首次定义长时储能! 储能产业下一个风口[J].电器工业,2025,(01):1-3.
- [2] 林伯强.“双碳”目标下储能产业发展新趋势[J].人民论坛,2024,(03):78-83.
- [3] 李默涵,张璐璐,邱剑洪.新型储能技术市场规模及发展趋势分析[J].大众用电,2026,41(01):32-33.
- [4] 刘河霞.“十五五”时期我国电力系统储能发展趋势研判及政策建议[J].中国工程咨询,2026,(02):101-107.
- [5] 储能行业2022年发展情况及2023—2027年发展预测——《储能产业研究白皮书2023》(摘选)[J].电气时代,2023,(05):31-34.
- [6] 苏南.新型储能“十五五”发展迈向市场驱动主导[N].中国能源报,2026-02-02(007).
- [7] 周倜然,邵杨,郑旭东.“六大趋势”重塑新型储能发展格局[N].中国电力报,2026-01-30(001).
- [8] 本刊编辑部.国家能源局印发《能源技术创新“十三五”规划》[J].农村电气化,2017,(03):1.
- [9] 张徐东,李晖,郭国栋,等.新型电力系统构建的接力与破局:“十五五”规划挑战、应对与新理念[J/OL].中国电机工程学报,1-19[2026-02-19]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.251694>.
- [10] Ahmad S, Shafiullah M, Ahmed C B, et al. A review of microgrid energy management and control strategies[J]. IEEE Access, 2023, 11: 21729-21757.
- [11] Niculescu-Faida O C, Minea A I, Niculescu-Faida A. A way to develop a micro-grid using a Siemens S7-1500 PLC[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2023, 1136(1): 012062.
- [12] Correia A F M, Cavaleiro M, Neves M, et al. Architecture and operational control for resilient microgrids[C]//2024 IEEE/IAS 60th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). IEEE, 2024: 1-12.
- [13] Sanchez O F A, Reina G, Mauleoux M. Modeling a microgrid that integrates renewable energies in IEC 61850-7-420 and IEC 61400-25-3[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2018, 11(4): 174-179.
- [14] Pérez R, Rivera M, Salgueiro Y, et al. Moving microgrid hierarchical control to an SDN-based kubernetes cluster: A framework for reliable and flexible energy distribution[J]. Sensors, 2023, 23(7): 3395.

- [15] Galkin I A, Blinov A, Vorobyov M, et al. Interface converters for residential battery energy storage systems: Practices, difficulties and prospects[J]. *Energies*, 2021, 14(12): 3365.
- [16] 钱熙阳.微电网能量管理系统设计与实现[D].扬州大学,2024.
- [17] 熊丽.我国电网调度专利技术首次走出国门[N].经济日报,2010-08-11(014).
- [18] 邓旭平.AI技术与自动化测试融合的智慧园区综合能源管理系统质量提升实践[J].*智能建筑与智慧城市*,2025,(S1):115-117.
- [19] 董树锋,李栋梁,葛明阳.微网嵌入式能量管理系统的工程实践[J].*电力系统自动化*,2025,49(24):171-182.
- [20] 王彬,郭庆来,孙宏斌,等.基于能量管理系统平台的嵌入式软件系统[J].*电力系统自动化*, 2010, 34(12): 7-11.
- [21] 董树锋,郑欣怡,吴振冲,等.嵌入式能量管理系统研制与工程实践[J].*电力系统自动化*, 2024, 48(19): 129-138.
- [22] Neis P, Wehrmeister M A, Mendes M F, et al. Applying a model-driven approach to the development of power plant SCADA/EMS software[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 153: 109336.
- [23] Hou D, Dolezilek D. IEC 61850—what it can and cannot offer to traditional protection schemes [J]. *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc*, 2008, 20080912.
- [24] Memon A A, Kauhaniemi K. Real-time hardware-in-the-loop testing of IEC 61850 GOOSE-based logically selective adaptive protection of AC microgrid[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 154612-154639.
- [25] Bock A C, Frank U. In search of the essence of low-code: an exploratory study of seven development platforms[C]//2021 ACM/IEEE international conference on model driven engineering languages and systems companion (MODELS-C). *IEEE*, 2021: 57-66.
- [26] 赖毓峰.交直流混合微电网监控与能量管理系统的设计与应用[D].南昌大学,2023.
- [27] 熊庆,邸振国,汲胜昌.锂离子电池健康状态估计及寿命预测研究进展综述[J].*高电压技术*,2024,50(03):1182-1195.
- [28] Lu J, Gokhale N, Nikiforakis N. An immersed interface adaptive mesh refinement algorithm for Li-ion battery simulations. I. Development of a fast P2D solver[J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, 138(4).
- [29] 徐乐.电动车辆锂离子电池高精度机理重建建模、参数辨识及寿命预测研究[D].重庆大学, 2022.
- [30] Xiong R, Cao J, Yu Q, et al. Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles[J]. *IEEE Access*, 2017, 6: 1832-1843.

- [31] Xu Z, Li H, Yazdi M, et al. Aging characteristics and state-of-health estimation of retired batteries: an electrochemical impedance spectroscopy perspective[J]. *Electronics*, 2022, 11(23): 3863.
- [32] Park K, Choi Y, Choi W J, et al. LSTM-based battery remaining useful life prediction with multi-channel charging profiles[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 20786-20798.
- [33] Zhang Y, Xiong R, He H, et al. Long short-term memory recurrent neural network for remaining useful life prediction of lithium-ion batteries[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 5695-5705.
- [34] Hu W, Zhang C, Luo L, et al. Integrated Method of Future Capacity and RUL Prediction for Lithium - Ion Batteries Based on CEEMD - Transformer - LSTM Model[J]. *Energy Science & Engineering*, 2024, 12(11): 5272-5286.
- [35] Chen D, Hong W, Zhou X. Transformer network for remaining useful life prediction of lithium-ion batteries[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 19621-19628.
- [36] Liu Y, Li J, Zhang G, et al. State of charge estimation of lithium-ion batteries based on temporal convolutional network and transfer learning[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 34177-34187.
- [37] 甘芷莹,许达文.面向AIoT芯片的OCR模型压缩方案研究[J].*微电子学与计算机*,2022,39(11): 110-117.
- [38] 陈满,陆志刚,刘怡,等.电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J].*电网技术*,2012,36(09):232-237.
- [39] 杨杰,汤赐,李秋良.考虑电池寿命的微电网系统日前优化调度[J].*电池*,2025,55(05):1113-1119.
- [40] Khezri R, Steen D, Wikner E, et al. Optimal V2G scheduling of an EV with calendar and cycle aging of battery: An MILP approach[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(4): 10497-10507.
- [41] Faisal M, Hannan M A, Ker P J, et al. Particle swarm optimised fuzzy controller for charging–discharging and scheduling of battery energy storage system in MG applications[J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 215-228.
- [42] Saleem M U, Shakir M, Usman M R, et al. Integrating smart energy management system with internet of things and cloud computing for efficient demand side management in smart grids[J]. *Energies*, 2023, 16(12): 4835.
- [43] Nouredine A, Rouvoy R, Seinturier L. A review of middleware approaches for energy management in distributed environments[J]. *Software: Practice and Experience*, 2013, 43(9): 1071-1100.
- [44] Miadowicz I, Quinto D M, Pitz-Paal R, et al. An action research study on the digital transformation of concentrated solar thermal plants[J]. *Solar Energy Advances*, 2025, 5: 100102.

- [45] 蔡含虎,孙建伟,谢彦祥,等.考虑储能峰谷价差套利的综合能源系统策略性经济配置[J].四川电力技术,2023,46(05):35-42.
- [46] 张继元,孙建旻,王卫宏.基于储能云架构的能源工业互联网平台研究与应用[J].电气技术,2022,23(08):68-74.
- [47] 郭宁,嵇托,陆晓星,等.基于混成控制的配电网边缘计算服务架构与控制组态技术[J].电力建设,2025,46(02):49-60.
- [48] 朱昱豪,汪腾,顾鑫,等.锂离子电池全寿命周期个性化退役与评价方法[J].电气工程学报,2024,19(01):79-86.
- [49] Schubert C, Hassen W F, Poisl B, et al. Hybrid energy storage systems based on redox-flow batteries: recent developments, challenges, and future perspectives[J]. Batteries, 2023, 9(4): 211.
- [50] 修晓青,李建林,李文启,等.储能系统商业模式及其优化规划方法[J].电力建设,2019,40(06):41-48.
- [51] Zhan H. Reliability analysis method of energy storage stations considering the correlation of battery clusters[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2024, 2771(1): 012013.
- [52] 黄晓颖,李楚琳.基于RK 3568处理器的车载感知系统内核驱动关键技术[J].汽车与新动力,2025,8(03):20-24.
- [53] Jiang J, Sun D. Research on intelligent distribution cabinet solution based on Internet of Things access cloud platform[C]//2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). IEEE, 2020, 1: 2241-2245.
- [54] Li Y, Li J, Pei J, et al. Application of non-contact video quantitative measurement method in reservoir bank landslide monitoring[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1378046.
- [55] Iqbal U, Davies T, Perez P. A review of recent hardware and software advances in GPU-accelerated edge-computing single-board computers (SBCs) for computer vision[J]. Sensors, 2024, 24(15): 4830.
- [56] Zhao X, Shen Y, Wang L. Implementation and Performance Optimization of a Multimodal EEG Monitoring System on the RK3568 Platform[C]//2025 6th International Conference on Electrical, Electronic Information and Communication Engineering (EEICE). IEEE, 2025: 1336-1341.
- [57] Hasan A E, Rashed M Z, Sharaf A I. Lightweight TCP/IP architecture model for embedded systems using sysML[J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, 2(7): 3093-3100.
- [58] Popescu V F, Gânsac V, Comsa O, et al. Supervisory Control and data acquisition (SCADA) traffic simulation for controlling industrial processes and infrastructures[J]. Land Forces Academy Review, 2022, 27(4): 423-440.

- [59] Casteleyn L. Using Matlab and Modbus TCP/IP connection for real-time monitoring of a demonstration microgrid[D]. Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2016.
- [60] Quincozes S, Emilio T, Kazienko J. MQTT protocol: fundamentals, tools and future directions [J]. IEEE Latin America Transactions, 2019, 17(09): 1439-1448.
- [61] Tao R, Yang S, Tan W, et al. Secure gateway of internet of things based on AppWeb and secure sockets layer for intelligent granary management system[C]//International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 78-89.
- [62] 陈岩.轻量级响应式框架Vue.js应用分析[J].中国管理信息化,2018,21(03):181-183.
- [63] Liu Y. Campus Second-Hand Textbook Trading Platform based on Vue 3 and Spring Boot [J]. International Core Journal of Engineering, 2024, 10(6): 50-56.
- [64] 孟伟君,周利华.嵌入式Linux下基于CGI的文件上传下载的实现[J].计算机技术与发展,2006,(05):226-228.
- [65] 李睿聪,汪隆君,尹亮,等.兼顾参与调频辅助服务的工商业储能电站充放电策略[J].电网技术,2025,49(11):4680-4691.
- [66] 于治楼,张云涛,张化祥.基于JSON规范的服务器动态管理数据获取与分析框架[J].信息技术与信息化,2011,(03):67-70.
- [67] Palkar S, Abuzaid F, Bailis P, et al. Filter before you parse: Faster analytics on raw data with sparser[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2018, 11(11).
- [68] 任宝军,高志勇.一种基于边缘计算的分散式站所终端方案的设计与实现[J].综合智慧能源, 2022,44(06):59-69.
- [69] Yang Y, Huang W, Kaoudis K, et al. Whole-program privilege and compartmentalization analysis with the object-encapsulation model[C]//2023 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW). IEEE, 2023: 1-12.
- [70] Toffalini F, Badoux N, Tsinaidze Z, et al. Liberating Libraries through Automated Fuzz Driver Generation: Striking a Balance without Consumer Code[J]. Proceedings of the ACM on Software Engineering, 2025, 2(FSE): 2123-2145.
- [71] dos Anjos E P. Experimental Evaluation of Succinct Representations of JSON Documents[D]. 서울대학교 대학원, 2016.
- [72] Jiang L, Zhao Z. JSONski: Streaming semi-structured data with bit-parallel fast-forwarding[C]//Proceedings of the 27th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. 2022: 200-211.
- [73] 陈海峰,苏永辉,朱克佳.CAN总线波特率的自适应算法设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2023,23(12):35-39.

- [74] Taji H, Miranda J, Peón-Quirós M, et al. Dynamic scheduling for event-driven embedded industrial applications[C]//2023 IFIP/IEEE 31st International Conference on Very Large Scale Integration (VLSI-SoC). IEEE, 2023: 1-6.
- [75] Zhao H, Zhu Y, Lu K, et al. Edge computing and hybrid control technology for microgrids based on activity on edge networks[J]. Energy Conversion and Economics, 2023, 4(6): 387-400.
- [76] Madani S S, Shabeer Y, Fowler M, et al. Artificial intelligence and digital twin technologies for intelligent lithium-ion battery management systems: A comprehensive review of state estimation, lifecycle optimization, and cloud-edge integration[J]. Batteries, 2025, 11(8): 298.
- [77] 王绥军,胡晨,孙召琴,等.电流过载工况下三元锂离子电池性能衰退机制[J].中国电机工程学报,2023,43(20):7940-7948.
- [78] Ruiz P L, Damianakis N, Mouli G R C. Physics-based and data-driven modeling of degradation mechanisms for lithium-ion batteries—A review[J]. IEEE Access, 2025, 13: 21164-21189.
- [79] Guo W, Sun Z, Vilsen S B, et al. Review of “grey box” lifetime modeling for lithium-ion battery: Combining physics and data-driven methods[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 56: 105992.
- [80] Chen Z, Danilov D L, Eichel R A, et al. Porous electrode modeling and its applications to Li-ion batteries[J]. Advanced Energy Materials, 2022, 12(32): 2201506.
- [81] 郭向伟,康龙云,李文彪,等.基于SOH及离线数据分段矫正的锂电池SOC估计[J].电源技术,2017,41(11):1530-1532+1544.
- [82] 陈子标,章忌,方卫东.基于改进型区间电池容量计算与GRU结合的SOH预测[J].福建理工大学学报,2025,23(01):86-94.
- [83] 王英楷,张红,王星辉.基于1DCNN-LSTM的锂离子电池SOH预测[J].储能科学与技术,2022, 11(01):240-245.
- [84] Xu D, Zhang H, Yang L, et al. Fast on-device llm inference with npus[C]//Proceedings of the 30th ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, Volume 1. 2025: 445-462.
- [85] 马会萌,李蓓,李建林,等.面向经济评估的电池储能系统工况特征量嵌入性研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(22):70-77.
- [86] Zhang L, Yu Y, Li B, et al. Improved cycle aging cost model for battery energy storage systems considering more accurate battery life degradation[J]. IEEE Access, 2021, 10: 297-307.
- [87] Lyu D, Zhang B, Zio E, et al. Battery cumulative lifetime prognostics to bridge laboratory and real-life scenarios[J]. Cell Reports Physical Science, 2024, 5(9).
- [88] Fedorov V A. Railway infrastructure detection based on YOLOv8 with npu acceleration[C]//Doklady Mathematics. Moscow: Pleiades Publishing, 2024, 110(Suppl 1): S42-S48.

- [89] Ding T, von Jouanne A, Dong L, et al. A Review of AI Applications in Lithium-Ion Batteries: From State-of-Health Estimations to Prognostics[J]. *Energies*, 2026, 19(2): 562.
- [90] Kim D H, Lee J, Shin K, et al. Empirical capacity degradation model for a lithium-ion battery based on various c-rate charging conditions[J]. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 2024, 15(3): 414-420.
- [91] Mohamed A A S, Zhu L, Meintz A, et al. Planning optimization for inductively charged on-demand and automated electric shuttles project at Greenville, South Carolina[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 56(2): 1010-1020.
- [92] Pozzato G, Takahashi A, Li X, et al. Core-shell enhanced single particle model for lithium iron phosphate batteries: model formulation and analysis of numerical solutions[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2022, 169(6): 063510.

附录

作者在读期间发表的学术论文及参加的科研项目与奖项

已公开受理的发明专利：

[1] 一种基于 JSON 文件的储能 EMS 工控器数据处理方法及系统，导师后一作，专利公开号：CN120762774A。

参加的科研项目：

- [1] 工商业储能 EMS 管理机开发，横向课题，2024-2025。
- [2] 高压断路器机械特性在线监测系统开发，横向课题，2023-2024。
- [3] 供暖热源端智能联网系统开发，横向课题，2023-2024。
- [4] 直流无刷电机控制系统开发，横向课题，2022-2023。