

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题 目： 智能电梯运维系统的设计与实现

研 究 生 邢豪蔚

专 业 电子与通信工程

指导教师 陈科明 副教授

企业教师 曾佳

完成日期 2022 年 5 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

智能电梯运维系统的设计与实现

研 究 生： 邢豪蔚

指导教师： 陈科明 副教授

2022 年 5 月

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

Design and implementation of intelligent elevator operation and maintenance system

Candidate: Xing Hao Wei

Supervisor: Associate Prof. Chen Keming

May, 2022

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：邢豪蔚 日期：2022 年 5 月 31 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：邢豪蔚 日期：2022 年 5 月 31 日

指导教师签名：陈明 日期：2022 年 5 月 31 日

摘 要

近年来，国家持续倡导使用基于物联网技术的电梯管理系统，电梯物联网建设发展迅速。但目前电梯物联网系统存在：维保流程不够完善，维保速度不够快；在电梯故障诊断中，对于电梯历史数据的分析不足导致相应故障的诊断不够快速、准确；电梯群控系统（Elevator Group Control System, EGCS）对于客户的响应速度与系统能耗都有待改进。

本文针对上述问题，设计了一套基于物联网技术的电梯运维系统。通过 4G 将电梯各种运行数据上报至云平台进行储存与分析。设计 Web 端实现电梯总体概况的可视化、运行状态的实时监控、故障云诊断、故障报警的推送、定期或突发维保信息的留档、各级各类人员的管理等功能。设计移动端联动微信为维保员定制专属维保任务和故障报警一对一推送，保证全面、迅速、准确、负责的电梯维保流程。

为了提高电梯故障诊断的准确度与速度，使用结合粒子群（Particle Swarm Optimization, PSO）算法和 BP 神经网络的混合算法，设计一种电梯故障诊断的优化方案。针对 PSO-BP 算法易陷入局部最优解和收敛速度不够快的问题，提出对 PSO 运用三种优化策略：调整非线性惯性权重与学习因子模式、加入动态步长因子、结合烟花算法（Fireworks Algorithm, FWA），来提高算法全局寻优能力，并加快收敛速度。通过大量电梯故障及健康数据样本对改进 PSO-BP 算法进行测试，结果表明改进 PSO-BP 算法在均方误差上相比于改进前降低了 34.6%，收敛速度提升了 21.3%，验证了优化后的电梯故障诊断方法的优越性。

针对目前电梯群控系统中客户候梯时间长、系统能耗高等问题，建立候梯时间、系统能耗等多目标关联的电梯群控系统评价模型，根据不同交通模式调整模型内部关系，在人工蜂群（Artificial Bee Colony, ABC）算法的基础上提出一种电梯群控调度优化方案。所提优化方案对 ABC 算法从两方面进行优化以此增加电梯运行效率：调整采蜜蜂的搜寻模式以强化种群间的联系、加入模拟退火（Simulated Annealing, SA）机制来增加算法前期搜索的随机性。通过 MATLAB 进行仿真，仿真结果表明不同交通模式下的电梯群控系统评价模型在应用改进后 ABC 算法的电梯群控调度方案后，客户候梯时间和系统能耗等系统评价指标均有一定的提升，验证了所提方法的有效性。

关键词：电梯运维系统、故障诊断、神经网络、电梯调度、群体智能算法

ABSTRACT

In recent years, China has continuously advocated the use of elevator management system based on Internet of Things technology, and the construction of elevator Internet of Things has developed rapidly. However, the current elevator Internet of things system exists: the maintenance process is not perfect, the maintenance speed is not fast enough; In the elevator fault diagnosis, the lack of analysis of elevator historical data leads to the fault diagnosis is not fast and accurate. Elevator Group Control System (EGCS) needs to improve its customer response speed and System energy consumption.

Aiming at the above problems, this thesis designs a set of elevator operation and maintenance system based on Internet of Things technology. All kinds of elevator operation data will be reported to the cloud platform for storage and analysis through 4G. The Web terminal is designed to realize the visualization of the general situation of the elevator, the real-time monitoring of the running status, the push of the fault alarm, the retention of regular or sudden maintenance information, and the management of all levels and types of personnel. Mobile terminal linkage WeChat is designed to customize exclusive maintenance tasks and one-to-one push of fault alarms for maintenance personnel to ensure a comprehensive, rapid, accurate and responsible elevator maintenance process.

In order to improve the accuracy and speed of elevator fault diagnosis, a hybrid algorithm combining Particle Swarm Optimization (PSO) and BP neural network was used to design an Optimization scheme for elevator fault diagnosis. Aiming at the problem that PSO-BP Algorithm is easy to fall into local optimal solution, three optimization strategies are proposed for PSO: adjusting nonlinear inertia weight and learning factor mode, adding dynamic step factor, and combining Fireworks Algorithm (FWA) to improve the global optimization ability of PSO-BP Algorithm and speed up the convergence speed. A large number of elevator fault and health data samples were used to test the improved PSO-BP algorithm. The results show that the mean square error of the improved PSO-BP algorithm is reduced by 34.6% and the convergence speed is increased by 21.3%, which verifies the superiority of the improved elevator fault diagnosis method.

In view of the problems of insufficient elevator service quality and high system energy consumption in the current elevator group control system, an evaluation model of elevator group control system associated with multiple objectives, such as elevator ride time and system energy consumption, was established. The internal relationship of the model was adjusted according to different traffic modes. Based on the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, an optimization

scheme of elevator group control scheduling is proposed. The proposed optimization scheme optimizes the ABC algorithm from two aspects to increase the elevator operation efficiency: adjusting the search mode of the bees to strengthen the connection between the populations, and adding Simulated Annealing (SA) mechanism to increase the randomness of the initial search of the algorithm. The simulation results show that the elevator group control system evaluation model under different traffic modes can improve the system evaluation indexes such as customer waiting time and system energy consumption after applying the improved ABC algorithm to the elevator group control scheduling scheme, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Elevator operation and maintenance system, Fault diagnosis, Neural network, Elevator scheduling, Swarm intelligence algorithm

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	IV
第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 电梯运维系统相关研究	5
1.2.2 故障诊断技术研究	7
1.2.3 电梯群控调度技术研究	8
1.3 未来发展趋势	9
1.4 论文结构安排	9
第二章 基于物联网的电梯运维系统设计	10
2.1 系统设计	10
2.1.1 需求分析	10
2.1.2 整体框架	11
2.2 智能网关设计	12
2.3 云平台设计	13
2.3.1 设备云设计	14
2.3.2 业务云设计	14
2.4 客户端设计	15
2.4.1 Web 端设计	16
2.4.1.1 技术架构	16
2.4.1.2 业务功能设计	19
2.4.1.2 大屏展示	19
2.4.1.3 数据监控	20
2.4.1.4 故障维保	21
2.4.1.5 综合管理	24
2.4.2 移动端设计	25
2.4.2.1 业务功能设计	25
2.4.2.2 保养列表	26
2.4.2.3 维修列表	27
2.4.2.4 个人中心	28
2.5 本章小结	29
第三章 基于改进 PSO-BP 神经网络的电梯故障诊断方法	30
3.1 故障诊断方案相关理论分析	30
3.1.1 BP 神经网络	30

3.1.1.1 BP 神经网络优缺点	32
3.1.1.2 优化方向	33
3.1.2 粒子群优化算法	33
3.1.2.1 经典粒子群算法优缺点	34
3.1.2.2 粒子群算法的优化方向	35
3.1.3 烟花算法	35
3.2 基于改进 PSO-BP 神经网络的故障诊断方案	37
3.2.1 改进神经网络总体流程设计	37
3.1.2 电梯数据预处理	38
3.1.3 确定 BP 神经网络结构	38
3.2.4 PSO-BP 的改进策略	39
3.2.5 改进后的算法性能测试与分析	41
3.3 测试与分析	43
3.3.1 初始参数设置	43
3.3.2 测试结果与分析	45
3.4 本章小结	46
第四章 电梯群控调度优化方案	47
4.1 电梯调度方案相关理论	47
4.1.1 传统电梯调度算法	47
4.1.2 人工蜂群 (ABC) 算法介绍	48
4.1.3 人工蜂群 (ABC) 算法原理	48
4.2 基于改进 ABC 的电梯群控调度方案	49
4.2.1 模拟退火 (SA) 算法	49
4.2.2 ABC 算法的优化方案	51
4.3 电梯群控系统模型	53
4.3.1 系统评价指标	53
4.3.2 群控电梯调度优化模型	55
4.4 测试分析	55
4.4.1 模拟参数设置	55
4.4.2 电梯当前状态矩阵	56
4.4.3 仿真分析	56
4.4.3.1 上行高峰模式	57
4.4.3.2 下行高峰模式	59
4.4.3.3 随机层间模式	61
4.4.3.4 整体方案总结	63
4.5 本章小结	63
第五章 总结与展望	64
5.1 本文工作总结	64
5.2 展望	65
参考文献	66
致 谢	70

附 录	71
-----------	----

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

电梯是一种以电力作为驱动力运输人员或货物的电气设备^[1]。十九世纪，在工业革命的影响下，机器逐渐取代人力，为各行业提供革命性的便利，电梯也随之诞生，并在短时间内就得到了人们的广泛认可和使用，迎来高速发展的时代。电梯从最初的蒸汽动力电梯、液压升降机，直到今天的电力驱动电梯，已经进入成熟发展期，走向智能化、节能化^[2]。图 1.1 为电梯行业发展历程。电梯系统涉及的领域众多，目前在通信、控制等领域的技术仍在创新，随着系统功能逐渐强大，乘客的使用体验也越来越好，机电装置和智能控制系统的复杂程度也是越来越高，对于整个电梯系统的维护也是当下最为关注的热点^[3]。

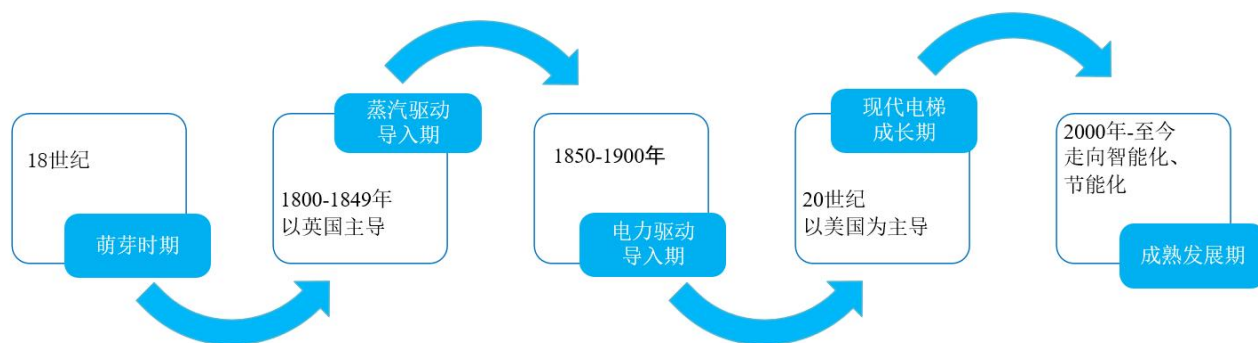


图 1.1 电梯行业发展历程

虽然我国的电梯行业起步较晚，但改革开放多年，中国经济水平突飞猛进，城镇化进程发展迅速稳健推进，同时造成了住宅及商业楼盘市场的膨胀式发展，电梯保有量也随之迅速增长^[4]。日新月异的城市更新以及基建工程的建设助推中国电梯行业步入高速发展阶段，根据中国电梯协会信息委员会最新统计数据，如图 1.2 所示，2010~2021 年中国电梯保有量持续增长。数据显示，2021 年，电梯保有量已达 844.7 万台，接近世界电梯总保有量的 50%。未来，在中国建筑当前数量和增长速度的驱动力下，电梯数量还会剧增，经预测，中国电梯保有量将在 2023 年突破一千万台，电梯行业的发展前景值得持续期待^[5]。

近年来，各大国际品牌与国内合作，在我国多个经济发达城市陆续建立起一批电梯制造公司，使得国内电梯的控制与驱动技术有了较大突破，整体性能水涨船高，甚至接近世界顶尖水平，凭借能耗小、运行速度快、平层舒适度好、效率高等优点在市场上推广开来^[6]。电梯作为广大人民频繁使用的便捷垂直运输工具，理论上要求负责人时刻保证电梯使用期间的健康与稳定，但是这些年，企业和工厂等在大力发展控制和驱动技术的同时，对于电梯安全领域却不够重视，导致电梯故障发生的频率较高，维修不及时或不彻底的情况也不在少数。

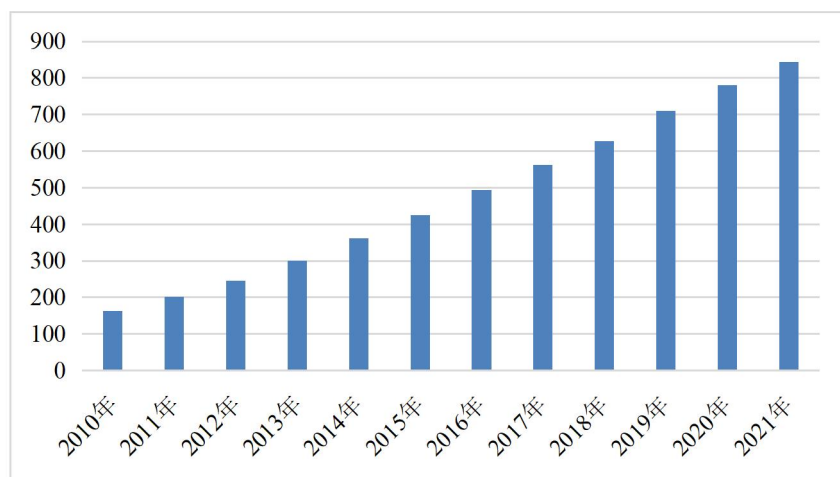


图 1.2 中国电梯保有量

据统计, 2020 年全国共发生特种设备事故和相关事故 107 起, 106 人丧命, 其中电梯事故占 25 起、19 人丧命, 事故数和死亡人数分别占 23.36%和 17.92%, 在统计的所有类型的事故起数和死亡人数中均排名第三。其中包括违规操作 5 起, 设备硬件质量问题或安全装置失效 6 起, 安全管理、维护保养疏漏 1 起, 紧急救助不规范 1 起, 事故包括坠落、撞击、挤压等意外类型^[7]。由以上数据可以看出, 大部分事故都是因为电梯本身故障或安全维护管理问题所导致。虽然较 2019 年的事故起数与死亡人数都有所下降, 电梯死亡率在庞大的使用基数下也不算高, 但是故障率居高不下, 生活中也时而遇见骇人的案件: 轿厢突然振动或无法平层、关门等^[8]。有些细小的故障若不够重视或排查不够仔细, 维修不及时彻底, 可能会逐渐演变为严重的故障甚至是安全事故, 其中某些电梯事故一旦发生, 就会严重威胁到人民群众生命财产安全^[9]。

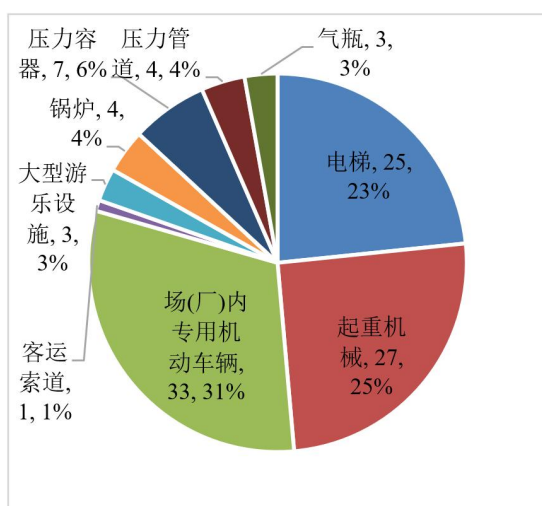


图 1.3 2020 年特种设备事故起数情况

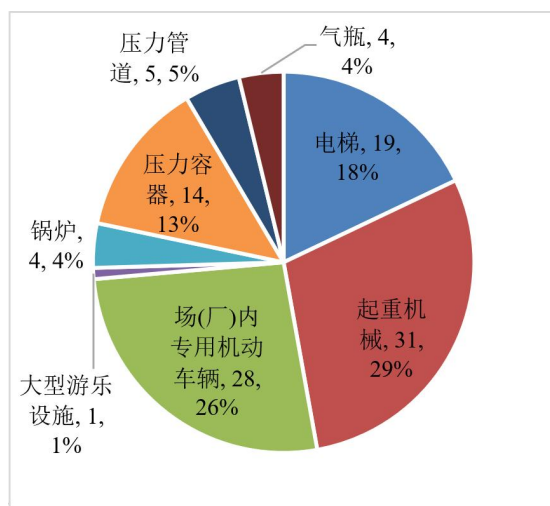


图 1.4 2020 年特种设备事故死亡人数情况

电梯故障的原因主要在于日常损耗和人为损坏。减少人为损坏行为需要有关部门和企业重视并推广相关安全知识, 提高人们的安全意识与道德水平, 督促乘客遵守规则、安全乘梯。而日常损耗方面则需要依靠合理高效的维保模式来维护^[10]。由于我国电梯数量增长迅速, 设

备更新换代速度赶不上人们日常需求所导致设备老化的速度，此时需要加强定时对电梯的检查与维护从而减少故障的发生概率，同样在发生故障后，需要及时问题进行排查与处理，而对于新安装的电梯系统应该结合符合现代安全要求、功能齐全的运维模式，充分确保电梯设备本身质量与人员安全^[11]。传统的电梯运维模式，属于“被动式维保”，这也是最基础的维保模式，往往是依靠电梯保障单位派出专业人员定期检修，或者是真正出现了安全问题才去维修：电梯发生故障——乘客或工作人员手动报警——通知维护人员——开展维修或救援^[12]。这种传统的运维模式存在以下问题：1、由于传统维保需要耗费大量人力物力，许多第三方维保公司恶性竞争，大大降低了维保人员待遇，提高了维保人员所负责的电梯数量，这就增加了电梯故障风险；2、维保市场经验丰富的维保人员处于稀缺状态，维保流程不统一，而且可能导致检修不及时或者工人经验不足而遗漏潜在的安全问题；3、数据依然采用纸质方式记录，较为老旧，数据流通缓慢、储存方式不安全，易丢失，无法共享。种种弊端将严重影响电梯的业务运行并极大增加了安全风险。综合上述情况，如何准确快速地对电梯故障进行诊断甚至能够挖掘潜在的危险因素并尽快开展电梯维修保养，已经成为目前电梯行业亟需解决的重大课题，而物联网为此提供了优秀的解决方向^[13]。

物联网属于互联网的延伸，它能够将射频信号微波传感器、射频传感器、红外传感器、激光测距传感器等信号传感设备与互联网结合起来而形成的一个庞大的网络，实现智能化信息交流与管理，开启万物互联的新篇章^[14]。物联网如今作为世界信息产业的第三次浪潮，将感知与标识技术、信息传输技术、信息处理技术和信息安全技术融合，应用在人们的衣食住行、各个行业之中。例如智能家居、无人驾驶、智慧工业、智慧医疗、各类监控等^[15]，不光极大程度方便了人们的生活，提高生活质量，还代替人们完成一些危险困难或简单费时的任务，减少劳动力的浪费，增强工作的安全性。于是，管理者们便可以通过互联网，对物联网中的设备进行实时监控，了解其运行状况，能够对其进行远程操控，实现人与物的信息共享与交流。在社会经济发展到一个新的阶段后，物联网则必然会诞生，这既是社会的需求，也对推动社会持续进步与经济的发展起到极为重要的作用。在万物互联的大背景下，物联网提供给工业设备、企业等数字化转型一份完美的解决方案，推动制造和通信等行业走向网络化、数字化、智能化^[16]。

电梯物联网便是电梯系统与物联网结合的产物，通过物联网为传统电梯维保模式进行升级换代，加强对电梯的监控，拓展电梯管理系统的功能，将项目下的所有电梯都加入互联网，并且共享电梯运行数据及维保记录等关键信息，可供电梯厂家、维保企业、物业、使用者、国家质检相关部门自由查看，方便多部门信息交换与分析，增强电梯从安装到退休各阶段的监管能力，从而实现对电梯的智能化监管，有效解决解决日益突出的电梯维保问题，减少电梯事故频发的状况，以提升电梯使用的安全性，提高电梯健康程度与使用寿命，保障企业财产安全和乘客生命安全。根据电梯物联网概念指导而形成的基于物联网技术的电梯运维系统就是一套以物联网为核心，以大数据、信息安全、人工智能等为支撑点的电梯设备管理系统，

该系统集在线维保、远程监控、动态监测、故障诊断或预测等功能于一体^[17]。针对运维成本高，检修时间长，无法及时探知故障的传统运维方式，提出了更便捷，更人性化的新型运维方案。相比于传统电梯维保方式，电梯物联网下的维保模式有以下优势：

1、所有数据储存备份在服务器，而且能够在企业本身及监管部门等单位之间共享，打破数据储存壁垒，摒弃传统电梯使用管理和维保模式，贯彻落实“低碳环保”办公理念，加强可持续发展战略。运维平台支持线上为用户提供服务的模式，包括针对所有注册的电梯，可提供具体位置到某小区某一层的电梯实时查询功能。平台人员可以随时查看多部电梯运行状态，提供电梯的检验、维保计划、维保记录等信息。最重要的数据留存分为日常运行数据与维保记录，维保记录主要以电子维保单的形式保存。电梯运维系统规范的维保流程将纸质文档转换为数字文档，保证了维保全面留痕，客户及管理员都可以随时在 Web 端查询某一部电梯的维保单记录，维修人员也可以查到自己所负责的电梯维修记录。不仅提高了工作效率和生产力，而且大大减少了工作环境中使用的纸张，节省了资金，响应了政府推广的“低碳环保”办公理念；

2、电梯管理系统融合物联网后，电梯的各种运行数据包括故障报警信息能够通过智能网关上传至监测系统，结合平台的应用程序，电梯相关单位都能实现对电梯进行实时监管，便于后续高效的维护处理。宏观上可查看项目下所有电梯的运行情况与故障维修记录并显示是否完成，数据可视化使得电梯系统整体信息一览无余，细节方面也可深入探索单部电梯的健康状况；

3、基于物联网技术的电梯运维系统可以提高维保工作速度与质量。老旧楼房的电梯故障从事发到维修需要一两个小时或更久，但在给电梯加上了物联网模块之后，根据运维平台的人员管理功能，可通过微信公众号推送和短信的方式下发维保任务给维保人员，具体到某地某层的某部电梯，减少了消息传递的时间，同时多种信息传递渠道保证故障信息第一时间通知到维保人员，这样便有利于维修人员对故障进行提前分析，有针对性地排查故障源头，大大缩短了维修总时间，平均四十分钟左右便可以完成，而且维保人员能够获取电梯历史运行记录与故障记录，能够个性化定制维保任务或排查隐患的工作，使维保在针对性、科学性的维护手段下保障工作质量。当维保任务完成后，维保人员可将是否维保完成和具体维修任务的单线上填写、对维修位置的处置情况进行拍照或录像并上传平台，并留下相关责任人的电子签名，整个流程均留存维修记录与相关人员信息，多端可查，确保安全、迅速、负责的维修方案；

4、对于电梯生产厂家和安装电梯的公司来说，物联网可以为他们的运营加入多元化、持久化等因素，将他们的产业加快数字化进度，借此机会降低业务的成本，又能够提升产品的质量。电梯公司作为制造商，在过去一般是与客户分隔不互通的，且还有销售商和服务商等处在中间环节，而万物互联的模式为多方提供一种紧密的联系方式，加强与客户体验的沟通，为客户带来快速的差异化价值，为电梯行业带来更多新的商业机会。

电梯故障诊断在电梯运维系统中属于数据驱动的开端部分，在电梯的实际运行中，要想有效、科学落实电气控制系统相关故障诊断工作，必须要充分了解并掌握电梯自身特征，为后续故障诊断工作的有序、科学开展奠定基础^[22]。近年来，我国电梯制造领域中的厂家持续增多，电梯型号与规格各不相同，所以，有关人员在落实相关故障诊断工作时，一定要基于电梯类型组织元件功能剖析与研究活动，总结并归纳该类型电梯同其余类型电梯间的差异，并以此为基础，综合电梯设计图纸展开分析，还要以剖析所得结果为引导与依据，科学落实系统故障剖析与诊断工作^[23]。只有足够精确快速的故障诊断方法才能支持后续维保人员细致迅速的维修方案与故障数据的分析与处理。目前已经应用或正在研究探索的电梯故障诊断方法众多，例如基于系统解析模型、基于系统输入输出信号处理和基于知识的诊断方法，其中基于知识的故障诊断方法应用最为广泛，包括故障树法、模糊推理法、粗糙集法、专家系统法和人工智能等^[2]。对于电梯这类复杂机电设备，一般广泛安装精密化传感器以支持大量的信号检测，正是这类多维输入输出场景下，支持向量机和机器学习等智能学习类算法的应用效果都不错^[24]。在人工智能蓬勃发展的今天，不少传统故障诊断算法、群体智能搜索算法被用于优化对抗网络、神经网络结构的学习模型中，对电梯故障诊断的原因与位置奠定依据与方向^[31]。

随着电梯管理系统功能的拓展与完善，电梯调度也成为优化电梯系统和改善乘客体验的一个方向。现在的高层楼宇基本必备多部电梯，甚至会细分普通电梯与货梯，90%以上的人员和大件物品均需要通过电梯进行运输，显然电梯运行效率与人们出行效率息息相关^[26]。电梯群控调度领域的深入研究和发 展，对于电梯系统而言，有助于充分利用电梯载客能力，提高其运行效率，节省电梯系统的日常能耗，有助于响应当代提倡的智慧电梯、绿色楼宇的建设；对于乘客而言，有利于减少乘客的平均等待时间，提高乘客的平均电梯使用体验感，缓解上下班高峰期间的拥塞困扰^[18]。电梯调度算法的发展共经历四个时期：①初级时期（1971 年以前），主要方式包括轿厢区间指派、继电器顺序控制等；②集成电路时期（1971 至 1975 年），在这个时期中，电梯的调度普遍采用集成电路技术，可以进行复杂的逻辑运算，控制方式为候梯时间预测控制；③计算机时期（1975 至 1988 年），这个时期中计算机开始应用于电梯调度，控制方式主要有候梯时间控制和综合评价函数控制；④人工智能时期（1988 年至今），人工智能技术的应用是这个时期的标志，神经网络技术、模糊神经网络技术、进化算法等先进技术普遍应用于电梯调度算法的研究中^[3]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电梯运维系统相关研究

电梯物联网的出现已经有许多年，国外企业也为数字智慧的美丽愿景努力多年，电梯行业的重点慢慢从制造转向服务，电梯运维系统便是其核心。日本的日立（HITACHI）电梯公司在自身制造实力强劲和产品安全要求高的背景下，逐渐成为研发、生产、销售、售后的全

产业链电梯公司，致力打造智慧楼宇，建设的 ELECLOUD 云服务中心在全国已经接入 30 万台左右的电梯，为每一部电梯提供管家式服务，根据电梯型号和企业需求定制个性化方案，无论是全程由日立公司完成制造到安装的电梯还是与物业合作的电梯，都能够打通电梯数据壁垒，联动各种智能化管理设备，满足消防、管理者、使用者的需求。为电梯配置标准的遥监终端，将电梯的运行数据实时传输到 ELECLOUD 大数据中心，自动进行诊断与分析，打到远程监控服务。这两年疫情原因，日立的智慧楼宇通过语音和人脸识别、手机或小程序、手势感应等方式来实现无接触乘梯，保障人们的安全，同时也为乘客便携式出行方式提供了很好的选择方案^[19]。全球闻名的奥的斯（OTIS）电梯公司，通过和通信类公司、软件开发类公司合作，在电梯数据监控领域精益求精，为旗下的几十万台电梯内部加装众多的精密传感器，可以随时收集到电梯运转情况、电梯高度和运动方向、多维度方向上的振动信号等数据，结合边缘小型服务器，通过通信模块上传到全球知名软件公司开发的云端服务平台，适用范围遍布欧洲、北美和东亚，为电梯故障进行危险等级分类，能够智能识别故障等级，自动发出电梯故障所蕴含的详细信息与可能出现部位、乘客的实时状态等资料^[20]。蒂森克虏伯（THYSSEN）公司作为领域革命性的先行者，与 Azure 云平台合作，建设物联网监控平台，具备远程监控和故障报警等常用功能，且能够检测到是否有人为滥用紧急联系的功能，还为技术人员提供先进的共享全息图像，技术人员能够自由操作电梯三位立体图像并多级放大查看，快速准确地找到故障问题之关键，减少时间成本的同时提高产能，管理人员还能够远程呼梯或锁梯，远程控制轿厢内的灯光与风扇^[26]。芬兰的通力（KONE）电梯公司与 IBM 成为生态系统合作伙伴，利用 IBM 的技术服务，借助物联网优化全球通力的运营能力，提高信息搜集与储存能力，目前云平台已经存储 100 万台左右电梯数据，在相互联系的世界中积极开展与各行业合作，减少电梯的停运时间和维修效率，并为客户提供更为优质的服务，甚至能够联动自动清洁机器人实现多楼层的清扫，相关产业数字化升级的步伐清晰可见^[27]。富士达电梯系统中的可视化通讯设备可以让井道平面图和楼层平面图在云端的检测系统中清晰显示，此外的指令控制模块还能远程控制电梯^[28]。

国内近年来也在不断地在推动电梯行业和物联网深入结合，二十世纪 10 年代左右开始，随着互联网、数据通信技术、尤其是物联网技术的发展，国家不断强调加快电子、机械等行业的智能化改造，加上全国各省发布多项规划及意见，智慧电梯等数字化升级项目在国内陆续出现^[29]，2017 年底，中国电信率先建设了蜂窝式窄带物联网通讯网络（NB-IoT），随后中国移动和中国联通也在全国范围内纷纷效仿，这在一定程度上解决了部分电梯的网络覆盖的问题，这大大助力了电梯行业与物联网的接入与融合。由于电梯的使用寿命在不同维保模式与质量的维护下差距巨大^[33]，优良的维保模式甚至能延长数年的电梯寿命，这促使电梯行业也迅速主动地将电梯维保模式从单纯固定的周期和检查条目向着按需维保模式发展，优化日常维护策略的同时加入针对性的现场维修，形成双管齐下的局面。目前各大城市已经有许多政府领导的电梯安全监管平台^[34]，通过对接通信商运营的物联网平台，利用 4G 等技术上传

信息，在智能网关处加入边缘计算功能，在设备端即可对日常重复无用的数据进行筛选，既保证了监控频率又避免了关键信息漏报的情况。根据厂家或企业要求，电梯远程运维系统实时采集电梯运行状况、轿厢系统状况、门系统状况、乘客监控状况等，当已经或可能出现电梯故障时，远程运维中心都会收到故障报警，及时发现隐患，迅速安排维保人员进行维保作业^[35]。

1.2.2 故障诊断技术研究

随着各行业的科学技术日新月异，电梯作为综合了各类电气装置与控制装置的运输设备，集成了控制、电机、传感器等领域的先进技术，一直朝着现代化与智能化前进，为人民的通勤效率和生活品质做出了巨大的贡献。但是电梯极高的使用频率，特别是人为不确定因素，使得其故障出现的概率一直不低，电梯故障严重时还会危及人们的生命，所以定期对电梯进行维护、将故障彻底修复是十分必要的，而复杂的系统结构意味着产生故障的原因与部位多变繁琐，故电梯故障诊断相关技术便举足轻重，对电梯日常维护、故障维修效率与质量的意义颇为重大。

在电梯制造领域较为领先的国家如日本、美国等，对于电梯故障诊断技术的研究也较为长久、深刻。德国西门子研究出一种基于多类最小二乘支持向量机的故障分类器来提高变压器故障诊断的精度，对比三种广泛使用的变压器诊断方法如 IEC 标准、反向传播神经网络和标准支持向量机来验证所提方法在真实变压器数据的实验中具有更好的性能^[33]。Niu 等人融合了贝叶斯信念网络、多智能体算法、波达计数法和多数投票算法，针对电子电流信号开发出一种电梯曳引电机故障的分析决策系统，有助于实际应用中进行高效的故障诊断并节约一定成本^[34]。电梯的三相异步电动机系统十分复杂，传统的故障诊断方法有不少缺陷，Ding 等人对于其中定子短路故障首先总结了其故障特征提取方法，然后将其应用在概率神经网络的诊断方法中，在仿真中展现高精度、迅速等优势^[35]。

国内电梯故障诊断的研究和电梯制造领域一样还有许多待赶超的目标，相关研究也在高速发展，取得了一定的成效，虽然有些还不足以应用于实际场景，但是也成功在望。电梯门系统在实际使用中属于电梯故障的多发部位，李俊芳等人针对门系统的三种故障特征搭建了三层神经网络训练模型，并加入动量因子用于加快神经网络收敛，仿真结果与实际数值之间误差非常小，说明该模型的存在实际应用价值^[47]。邱春玲等人以电梯曳引机为研究对象，分析曳引机相关硬件如蜗轮蜗杆减速器振动故障原因及现象之间的关系，使用 RBF 网络与传统 BP 网络训练对比，表明所建 RBF 网络模型能够提前准确的完成任务^[37]。神经网络在多参数的复杂系统中应用越来越广泛，效果之非凡也肉眼可见。李屹等人为了有效检测电梯运行中出现的正常和急停故障的状态，采集了电梯运行速度、多位置噪声、垂直和水平振动加速度、温度等等相关性较高的参数，利用最优小波包算法和时域分析提取信号的特征，采用多隐含层的 BP 神经网络对现有样本进行训练与测试，以此方法为核心的智能诊断系统对电梯运行中的故障急停检测具有突出的表现^[38, 39]。冯鑫等人利用遗传神经网络，从电梯的机械、

电力、速度控制、安全四个系统,优化专家电梯检测系统的缺陷,对电梯中易发生的曳引摩擦、调速控制等状况具有迅速、准确的诊断^[40]。黄放等人利用神经网络实现了电梯故障诊断系统,正确率能够达到 93%以上^[41]。王赛男等人融合了粒子群和 BF 网络来对乘客易见的电梯故障进行分析诊断,如冲顶、停电、运行过程中开门、超速等,提高电梯运行的可靠程度,避免伤害乘客的人身财产和心理健康^[42]。

1.2.3 电梯群控调度技术研究

随着电梯使用的载客量和高楼客流量的增加,人们越来越关注电梯调度的效率问题,特别是多部电梯联合使用的情况,在对电梯群控调度方案的探索中发现存在较大的优化空间。

国外发达国家对于电梯群控调度技术的研究起步较早,特别是全球知名的那些电梯公司,如美国的奥的斯电梯、日本的三菱电机等等。1949 年联合国大厦内部便使用上了较为简单的电梯群控调度系统,当代比较有代表性且被众多楼宇使用的电梯群控调度算法有两端往返运行的 LOOK 算法、分区调度法、最小等待时间法等。也有一部分融合了传统专家经验和智能算法的电梯群控调度系统,为人们的出行效率提供了更优的解决方案。Daniel 等人模拟人类思考问题的特点,采用模糊控制来精确确定一些不完全或不精确的信息,因为电梯实际运行中呼梯的信号是会随时发生变化的,这要求电梯调度需要视实际情况进行灵活变通^[42]。Berna 和 Emre Oner Tartan 等人利用遗传算法构建电梯群控调度系统,并使用粒子群算法优化遗传算法在电梯调度应用中的缺陷,使得调度方案在离散随机分布条件下更稳定合适^[43]。三菱电气研究实验室公司分离系统多个子模块来优化群电梯调度系统,缩短乘客平均时间^[44]。Nagatani 对楼宇内客流高峰时期的电梯使用情况进行分析,总结了电梯调度系统性能评判模型中乘客乘梯时间、电梯能耗等多个指标之间的耦合关系,为电梯智能群控调度系统在多目标条件下的优化方向提供较为清晰的思路^[45]。Van 提出一种节能电梯调度算法,通过物联网联合多个调度相关子系统,在上高峰、下高峰、全天请求、楼层间等模式下均在系统能耗上做出较大的优化^[46]。

国内的电梯调度研究主要由企业核心技术人员和各大高校的专业研究员负责,总体取得了良好的成绩。宗群等人研究电梯群控调度算法的基础问题即交通模式的识别,利用可自调节鲁棒优化方法和 Poisson 分布确立不确定优化模型,改善了电梯群控调度方法性能^[47]。李中华等人首先将聚类方法处理交通流数据,然后采用不同动态分区调度的方法优化电梯群控高峰状态下的调度性能^[48]。张景龙着重关注电梯能耗方面,提出一种基于双重节能调度方案,全方位解决群控系统的节能问题^[49]。于德亮和唐海燕等人采用粒子群和模糊核聚类算法的混合方法,增强算法的广度和细节搜索的能力,将样本映射到高维度特征空间,更好地将不同交通模式进行聚类识别,以此选择合适的调度算法,为提高电梯群控系统性能提供充分的依据^[50]。张健等人在研究电梯群控系统时想到通过保存最好个体策略和引入自适应算法的方式来优化遗传算法应用下的电梯调度系统多目标优化的目的^[51]。代玉凤等人细分了电梯系统性能评价指标,利用蚁群算法不依赖初始路线选择和概率性寻找优化路径的特点,实现了电

梯群控的优化调度^[52]。许玉格等人在使用粒子群算法的基础上通过模拟退火非线性降低粒子跳跃概率的方式，优化每一个粒子搜寻所需最优解的能力，在乘客候梯时间和电梯轿厢停靠时长上有一定的改善，从而提高了电梯群的利用效率^[53]。

1.3 未来发展趋势

从当前电梯安全监管物联网平台建设现状上看，电梯物联网运维系统及相关技术研究是未来的发展趋势，在以下几方面中都有很大的发展潜力。

云平台及前端的架构建设目前种类繁多，电梯厂家的需求也层次不齐，在数据安全、系统整体性能等方面还没有一个高端的标准，此外因为该系统是需要长久使用的，就如那电梯一用就是好多年，它还需要一定的可迭代扩展能力，在需求的个性化定制上有一定的弹性。

物联网内连接的设备越多，数据的体量也越来越大，5G（5th Generation Mobile Communication Technology）高速稳定的通信为大数据和人工智能等技术的落地提供了稳定的驱动力以及更多的可能性，例如实时的三维实景建模技术^[54]。

电梯故障诊断确实十分重要，但是若能进行一定时间的提前预测，防患于未然，给予管理者与使用者足够的反应时间，无论是提前维护还是紧急停用都将大大提高使用人员的安全性。由于电梯故障存在大量的不确定性，特别是人为干扰因素，目前电梯故障预测方向的研究工作还在实验阶段，但是应用前景与市场潜力不容小觑^[55]。

电梯群控调度系统的服务对象是乘客交通流，如何实时识别乘客交通流模式并调整调度策略也是一个关键。电梯群控调度算法上能够考虑的因素可以更多，算法模型还有提升空间，且实际中的乘梯情况更为复杂多变，为了达到最优的效果可以在移动端进行配合创新^[56]。

1.4 论文结构安排

本文通过基于物联网技术的电梯运维系统设计，针对电梯维保存在的检修质量和速度欠佳、人力物力消耗过大、故障诊断易误差，电梯群控调度效率低等问题，对传统电梯维保结合物联网、大数据和深度学习等技术进行改革。本文主要通过整体系统搭建设计、电梯故障诊断和电梯群控调度方案三方面进行介绍。具体章节安排如下：

第一章：绪论。本章主要介绍了电梯运维系统和物联网的发展、基于物联网技术的电梯运维系统的优势，同时分析了国内外电梯运维系统、电梯故障诊断技术与电梯群控调度研究的现状，对未来电梯运维系统及相关技术的发展趋势做出了展望，为本文的设计提供了方向。

第二章：基于物联网技术的电梯运维系统设计。本章首先从整体介绍了需求以及框架。然后通过智能网关、云平台和客户端三个部分的设计，详细地展示了该系统的主要功能。

第三章：基于粒子群算法和 BP 神经网络的电梯故障诊断优化方案。

第四章：基于模拟退火算法和人工蜂群算法的电梯群控调度优化方案。

第五章：总结与展望。总结本文所设计的系统与相应的优化点，并且针对这个系统的一些可优化点提出简单的改进方案，对系统后续优化指出方向。

第二章 基于物联网的电梯运维系统设计

2.1 系统设计

本系统综合应用物联网、机器学习和互联网等技术，针对目前电梯定期维保存在的检修不及时、易发生漏检、维护疏忽等问题，构建一套集智能网关+智能运维平台+故障诊断于一体的电梯远程运维系统，可以跟踪电梯的日常运行、故障处理和维保信息并进行故障诊断分析，对电梯运行状态进行监控，将整个工作流程公开于电梯制造厂商、安装电梯的单位与电梯维保公司^[57]。智能网关实时获取电梯运行状态数据对大量数据进行初步过滤和筛选，并将处理后的数据通过网络传输模块实时传输至云端监控平台，云端平台实现电梯的信息管理、维管理、故障报警和指挥调度等，从而保证全面高效的电梯管理、维护、救援等工作^[58]。

目前大多中小企业所建设的电梯维保系统存在以下问题：1、一般的电梯运维系统功能不完善、实际维护成本较高，有些只是对电梯进行简单的故障报警，有些对于日常运行的数据没有充分储存和利用；2、维保过程缺乏透明度和时效性，当电梯故障情况或者定时维保单派发给维修人员后，无法准确追踪维保人员出工状态，无法保证维保的质量和及时程度；3、故障报警在实际的电梯维保中需要综合考量工程师的知识经验和电梯故障报警相关设备检测情况，才能更准确全面地进行维保或应急维修，而对于电梯自动报警这一方面存在诊断准确度的要求^[59]。

2.1.1 需求分析

根据当前市场分析，电梯远程运维系统存在电梯实时运行数据的无法追踪查看、维保档案易丢失、对于电梯历史数据的分析不充分、电梯故障诊断不准确和难以预测等问题，本文为了解决这些困难而设计的基于物联网的电梯远程运维系统，此系统的需求可总结为以下几点：

（1）实时监控。对于电梯远程运维系统，最重要的是数据，以数据驱动整个系统。通过电梯传感器所获取的上行、下行、关键零部件状态等数据通过网关上传至云平台，保证后续的数据处理和前端显示和操作的功能完整性。

（2）智能网关。网关是作为沟通电梯传感器和云平台的桥梁。电梯日常运行数据是十分庞大的，在网关端即可进行一定量的过滤，保证数据上报方式的合理性，既要避免重复上报产生的网络带宽压力，也要防止少报漏报所带来的风险，总之要求网关传输的数据合理、稳定、安全、快捷。

(3) 电梯故障的诊断。在电梯的实际运行中，为了减少电梯故障对使用者造成的伤害和隐患，除了要保证产品质量和定期维修以外，还需要制定准确的电梯故障诊断方案，尽量提高多层次、复杂的电梯故障诊断准确度。

2.1.2 整体框架

本文将采用物联网技术，设计了一套基于物联网的电梯远程运维系统，在设计模块上，该系统设计分为智能网关设计、客户端设计、云平台设计，以此完成对电梯维保及故障诊断的改革。系统整体架构如图所示。

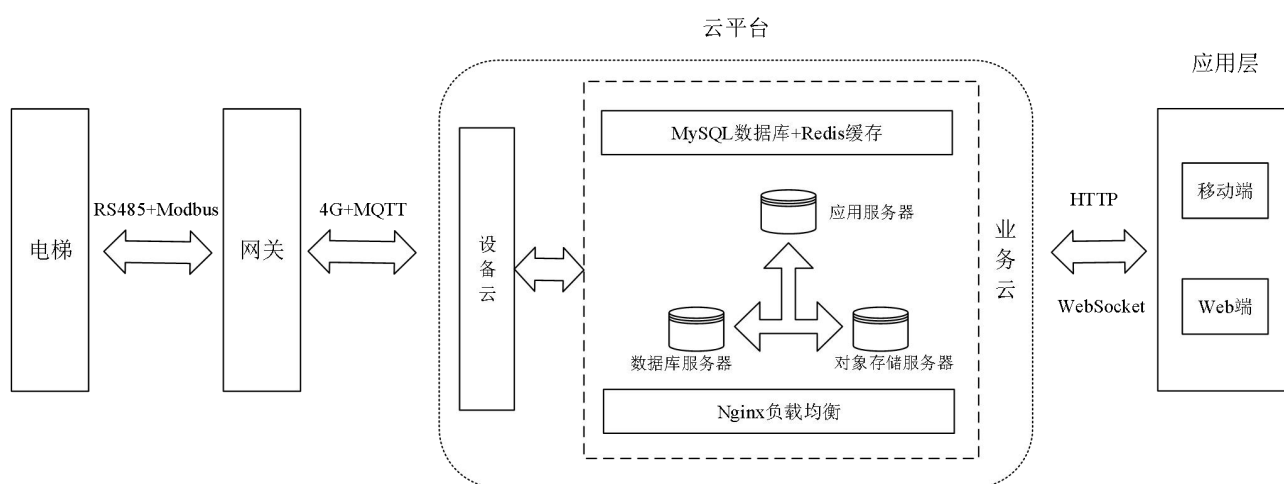


图 2.1 系统整体架构图

智能网关设计：智能网关安装于电梯机房，实现多部电梯数据和状态的获取；通过 RS485 和 Modbus 通信协议将实时获取到的电梯运行状态数据传输给网关。智能网关内部搭载数据处理模型在网关内对数据进行过滤、筛选；最后通过 4G 和 MQTT 网络传输方式，实时传输至云端监控平台，这能够缓解大数据量给云端和网络带来的巨大计算负担。

云平台设计：云平台包括两部分服务模块：设备云和业务云。设备云的职责主要和网关以 4G 和 MQTT 的方式进行连接，MQTT 在满足通讯服务质量的条件下有着低开销、低带宽占有的优点，随时通知订阅者。与 HTTP 之类的协议相比，MQTT 在通过网络有着性价比极高的传输数据能力，设计简单、开放、规范统一且易于实现，在物联网中备受青睐。电梯数据会在云平台进行永久储存，便于统计与展示设备上报的数据流。业务云则将数据个性化地存储并管理，通过合理的机器学习算法对数据进行训练并建立高效的电梯故障诊断模型，与客户端进行数据的双向通信，既能够为企业客户提供 API 调用功能，还能够主动推送电梯故障信息等关键消息，将数据分析的结果展示在客户端，使用户能够清晰直观地把握电梯各类数据的整体和细节。

应用层设计：客户端所在层，主要包括 Web 端和移动端。Web 端主要包括电梯数据的大屏展示，实时数据监控、维保记录、综合管理、故障报警等模块。移动端用于维修人员实时查看自己负责电梯的故障状态、保养单或维修历史记录。在维修前便基本了解电梯故障发

生位置与内容。在实际保养或维修后能够进行拍照及维修单记录上传，并存在维保人员及客户进行确认签字环节，做到责任分配到个人，整个维保流程的记录都可以在移动端和 Web 端留存查看，假如电梯出现维修不及时或维修不彻底，均可以追责精确到个人。电梯物联网系统从事前与事后多方面保障员工的工作态度、速度与质量，提高用户与乘客的体验舒适度与安全性。

2.2 智能网关设计

电梯远程运维系统的远程监测、维保维修、故障预警机制都要建立在精确的数据采集和传输以及信息储存上，否则任何措施、风险评估都只是“水中月、镜中花”。

智能网关作为承载数据传输的桥梁，主要包括通信电路、电源管理电路、主控制器、超级电容、OLED 屏和 4G 模块等。智能网关结构图如图 2-2 所示。

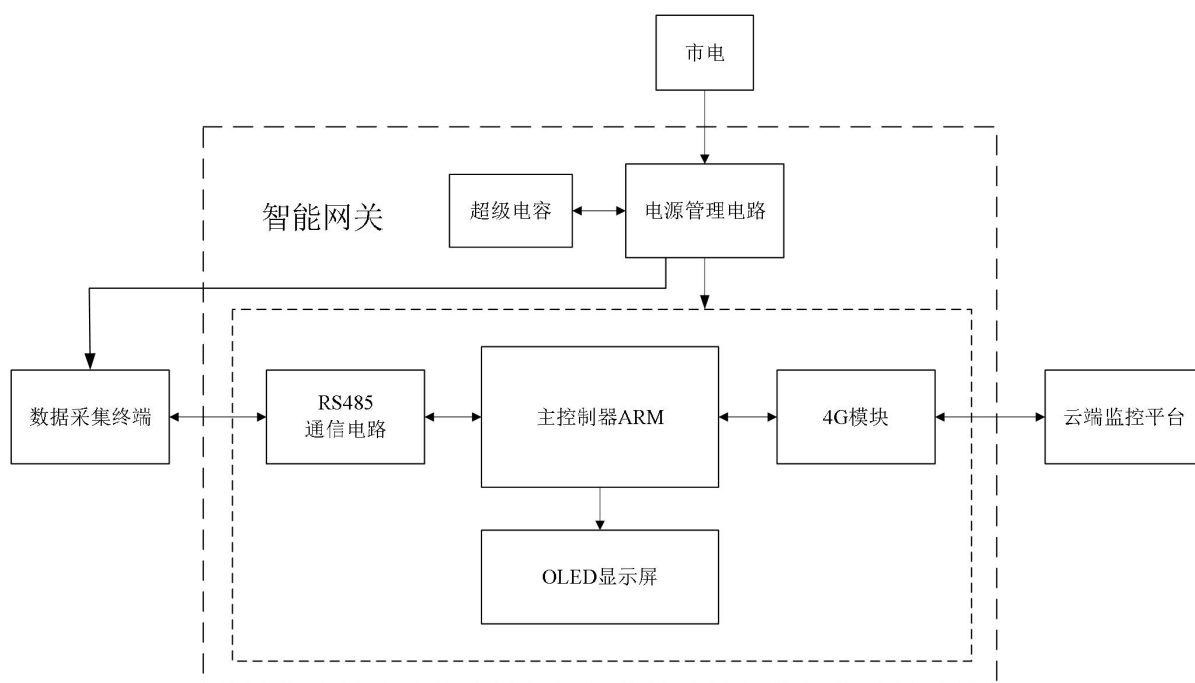


图 2-2 智能网关结构图

系统的硬件部分是具有数据采集功能和数据传输功能的智能网关，群控电梯对应一个独立的智能网关进行数据的采集与传输。通过 485 的通信电路与主控制器 ARM 连接，主控制器 ARM 将各路电梯信息整合汇总后，通过 4G 模块将数据传输到云端监控平台，通信协议采用 MODBUS。以下为各硬件模块的详细介绍：

(1) RS485 通信电路：主要作用是实现数据的稳定通信，通过该芯片将外部供电部分电路和系统数字部分的电路隔离开来，使电梯端传递过来的干扰不会影响本系统；

(2) RS485 保护电路：通过气体放电管将 485 连接线引入的静电和雷击疏导至大地，避免系统出现烧坏等情况；

(3) 电源管理电路：优秀的电源管理电路为网关的持久运行提供保障，主要作用是处理电子设备系统中电能的检测、隔离与转换等需求，例如 5V 电源和 3.3V 电源之间的隔离通

信方案。外部电源首先并联瞬态抑制二极管 SMBJ5.0CA，抑制信号发生瞬间高能量变化，保护后续电路免受浪涌脉冲的损坏；

(4) 4G 模块：在电子设备系统中承担数据传输的功能，它能够实时收集数据，并迅速将大量实时数据传输到云端监控平台，并提供 24 小时不间断的实时稳定传输；

(5) 超级电容：添加了超级电容能够应对突发恶劣情况，相对于普通电容，超级电容在充电速度、使用寿命、场景适应性均有提升，可在临时断电时延长稳定工作时间，或是应对突发高功率情况；

(6) OLED 显示屏：厚度小，重量轻，能耗低，抗震性也好，能够清晰稳定的显示电梯运行状态和当前故障代码。图 2.3 为网关实物图，图 2.4 为网关电路板，图 2.5 为网关现场测试图，图 2.6 为网关现场安装图。



图 2.3 数据采集终端



图 2.4 网关实物图



图 2.5 网关现场安装图



图 2.6 网关现场测试图

2.3 云平台设计

本云平台主要连接物联网应用和真实设备，主要分为设备云和业务云两大部分，将设备管理层与业务服务层解耦。设备云支持接入各种工业设备，提供高性能通信，适配多种网络

环境和传输协议，降低企业的研发、运维成本。业务云主要为 Web 端、移动端等客户端应用提供数据交互功能。

2.3.1 设备云设计

本文设备云采用中国移动开发的 OneNET 云平台进行 PasS 服务的开发，为物联网应用和物理设备提供一种稳定连接的中间平台，能够为企业应用提供丰富的接口以便获取设备数据并提供高效的设备管理服务，减少物联网企业开发中繁琐重复的环节，更专注于应用层面的开发。图 2.7 为 OneNet 设备云平台架构图。

设备云的优势在于：1、提供全面实时的设备管理功能，支持用户进行设备注册、查询、删除、更新等远程操控功能；2、支持多种信息加密的方式保障数据储存和传输的安全性；3、提供消息队列 MQ，解耦主动推送服务，快速响应用户应用；4、能够通过简单的操作生成各种适应场景下的图表。

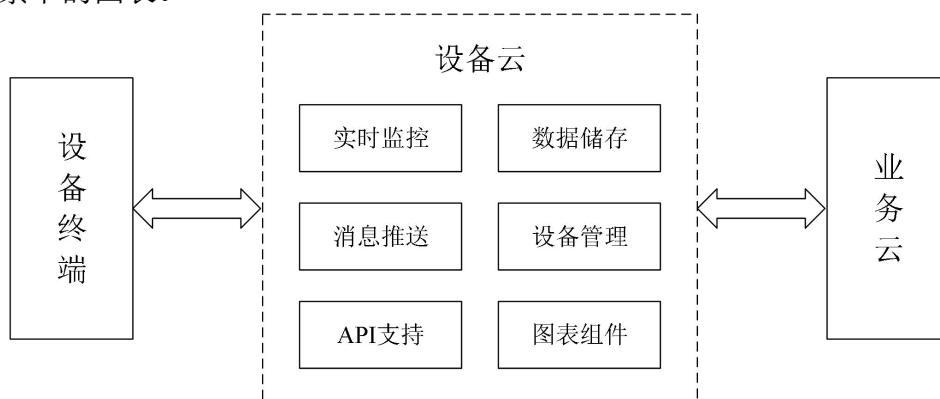


图 2.7 OneNet 设备云平台架构

2.3.2 业务云设计

本文的业务云主要包括负载均衡服务器、云计算服务器、云存储服务器，云存储服务器包括数据库服务器和对象存储服务器，业务云整体架构如图 2.8。在本文设计的电梯物联网系统中，选择使用阿里 ECS 云服务器、RDS 云存储服务器、OSS 对象存储服务器搭建业务云平台。

本文使用 Nginx 作为负载均衡服务器，建立在云计算服务器当外部 Web 应用请求服务端接口时，会通过负载均衡服务器进行分发请求。Nginx 能够长久运行并维持稳定，在不影响功能的情况下进行更新或调整。Nginx 的分阶段资源分配策略使得其备受开发者青睐，能够消耗少量 CPU 资源的同时维持最高可达 5 万的并发访问数量，保证接受高并发请求的同时保持系统稳定不易瘫痪。

业务端主要在 ECS 云计算服务器上运行 Tomcat 服务，采用包含 Spring、Spring Boot、JDBC 的技术栈进行开发，Spring Boot 是一种轻量级的后端开发框架，具有很多开发模块。在开发过程中，可以自由选择、组合不同应用模块来提高开发效率。只需要进行简单的配置以后，就可以轻松创建一个 Spring 应用。业务模块通过 JDBC 驱动的方式与数据库进行通信，

当数据库突发访问量过大，MySQL 压力过大时，需要采用缓存的形式解决数据库访问速度的问题，本服务采用 Redis 这种非关系型数据库进行缓存，可以储存一些不容易变化高频的信息或必要的复杂业务共享数据，既能缓解数据库压力，也能提供业务解决方案。

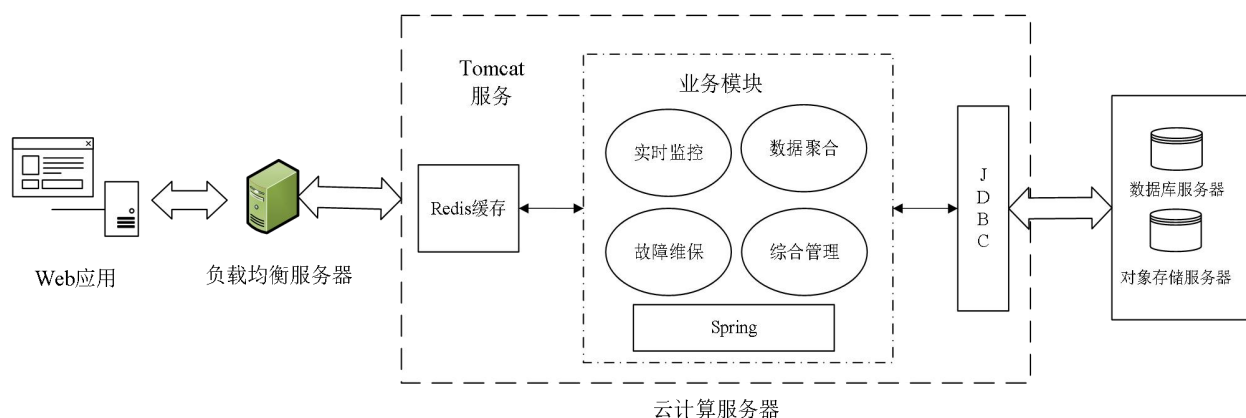


图 2.8 业务云整体架构图

云存储服务器选择 RDS 数据库服务器与对象存储服务器。RDS 数据库服务器能够极大降低企业部署数据库的成本与运维耗费时间，将业务模块服务与存储服务解耦，提供安全、可靠、稳定的数据库储存与读写服务，可根据需求灵活调整容量，优化整体业务云的性能。对象存储服务器（OSS）主要用于储存一些非结构化的静态资源，例如图片、媒体文件等，支持任意数据类型的上传、下载服务，加快 Web 应用对于静态资源的访问速度，且能够升级 CDN 服务，确保全国各地的流畅访问。

2.4 客户端设计

电梯物联网系统最终是要服务企业和用户的，企业和用户通过前端（客户端）与后端（业务云平台）进行数据交互，前后端整体采用 BS 架构，硬件环境要求低，通过浏览器可以在任何地方访问网页并进行操作而不用安装专门的软件。本系统的前后端服务主要通过前后端分离的模式进行开发，优势在于：1、明确前端与后端的工作分配，保持前端与后端技术和代码的独立；2、实现高内聚低耦合，提高项目复用能力，便于前后端调式，降低维护成本；3、后端更集中追求数据调度的高并发、高可用、高性能等特性，前端更好地专注页面渲染效果、流畅性、兼容性与用户体验等。

电梯物联网系统客户端设计主要分为 Web 端设计和移动端设计，Web 端主要为企业用户提供电梯及维保相关数据的查询与分析、人员的管理，移动端主要用于维保人员对电梯的定时保养与维修。图 2.9 为客户端所实现的业务流程图。

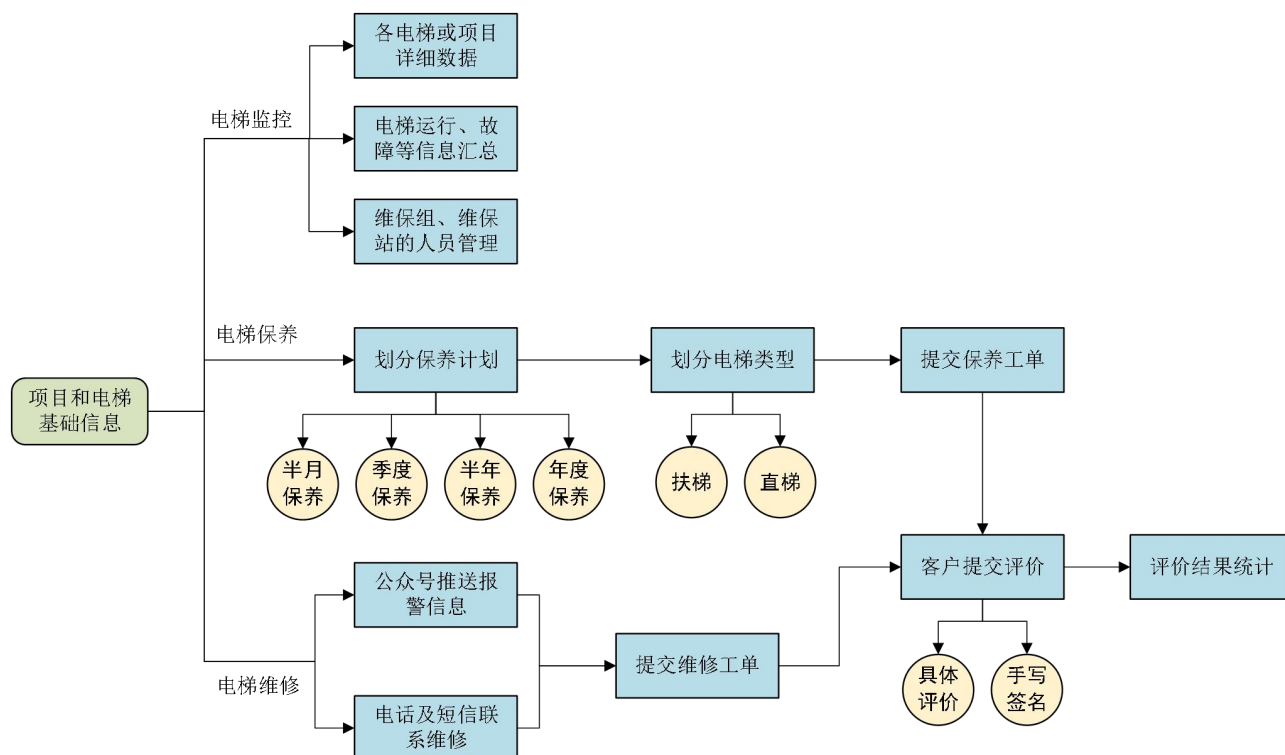


图 2.9 业务流程图

2.4.1 Web 端设计

2.4.1.1 技术架构

Web 端的页面采用 Vue.js 框架进行开发，该框架属于一套用于构建用户界面的渐进式框架，轻量又功能强大，且拓展性强，上手速度快，易于开发。Vue.js 中文社区十分活跃，还有许多第三方库可以使用，且大部分开发者都会持续更新，轻松拓展开源轻量级组件，帮助开发者节省开发成本，项目后续的维护也很方便。Vue.js 框架使数据实现数据层与视图层的双向绑定，使开发者不再像从前那样花大量时间拘泥于重复操作复杂的 DOM 对象，能够专注于业务代码，即数据的逻辑处理，而 Vue 不光替开发者承担了 DOM 对象的操作，还能通过虚拟 DOM 和 Diff 算法提高浏览器的渲染效率。Vue 的第二大特点在于实现数据的双向绑定，简化了对数据的处理复杂度，提升了系统的开发效率。

Vue 具有复杂单页面应用的技术支持。在单页面应用出现以前，网站一般都是多页面应用，结构如图 2.10(a)，每一次路由的跳转会渲染不同的页面文件，绝大部分资源也重新获取与渲染，这就导致加载速度较慢，用户体验一般；单页面应用指路由的跳转并不会切换页面文件，仅会重新获取和渲染局部资源，结构如图 2.10(b)，这使得部分公共资源（CSS 文件、JS 文件等）只需要加载一次，减少了浏览器对服务器的请求数量，大幅度减轻了服务器压力。

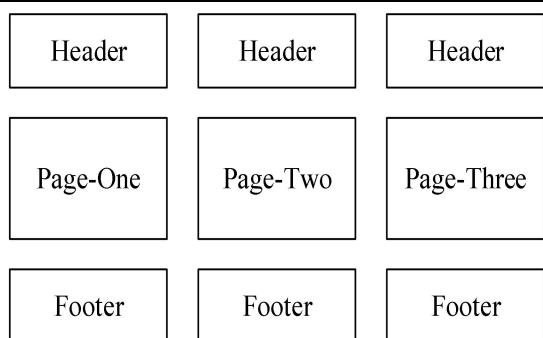


图 2.10(a) 多页面应用

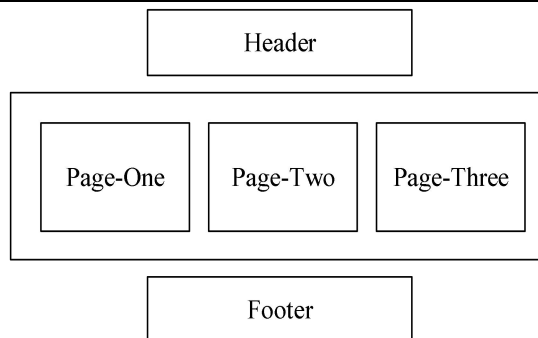


图 2.1(b) 单页面应用

前端整体技术架构将以 Vue.js 框架为核心，通过以下几部分组件库或技术共同组成，整体框架如图 2.11 所示：

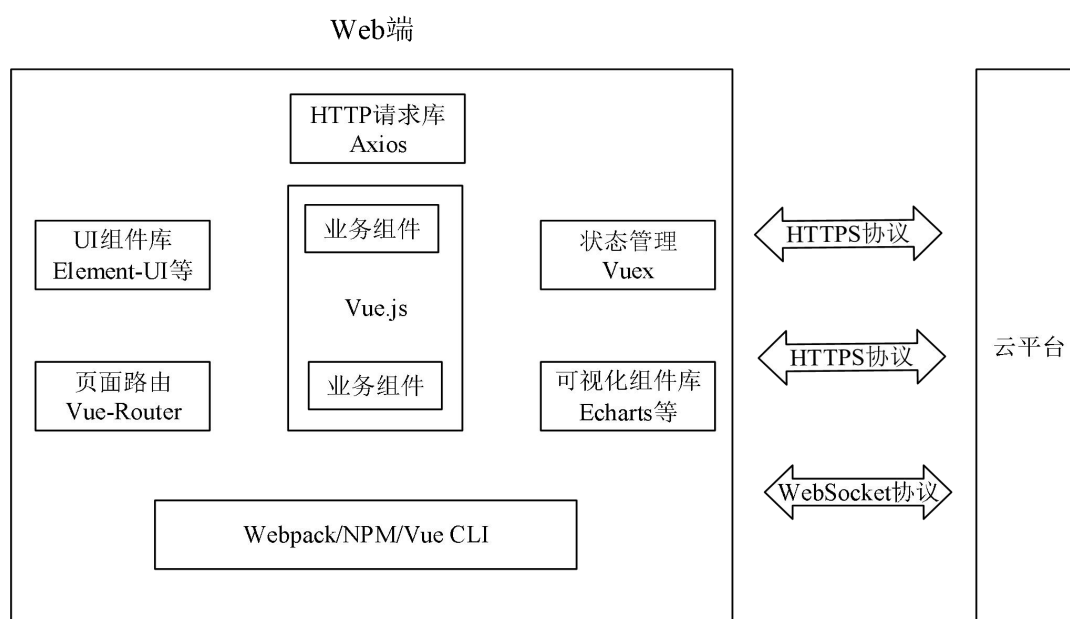


图 2.11 Web 端技术架构图

1、**Vue-Router** 页面路由管理：Vue.js 自带的核心功能，便于开发者构建 Vue 单页面应用，管理路由跳转、路由状态；

2、**Vuex** 状态管理：当 Vue 遇到多个视图依赖同一个状态或不同视图的行为影响同一个状态的问题时，组件间的通信显得繁琐复杂，Vuex 提供一个能够将多个组件共享的状态信息集中储存和管理的空间，在更新共享状态或视图的同时保持清晰简明的单向数据流模式。

Vuex 状态管理示意图如图 2.12。

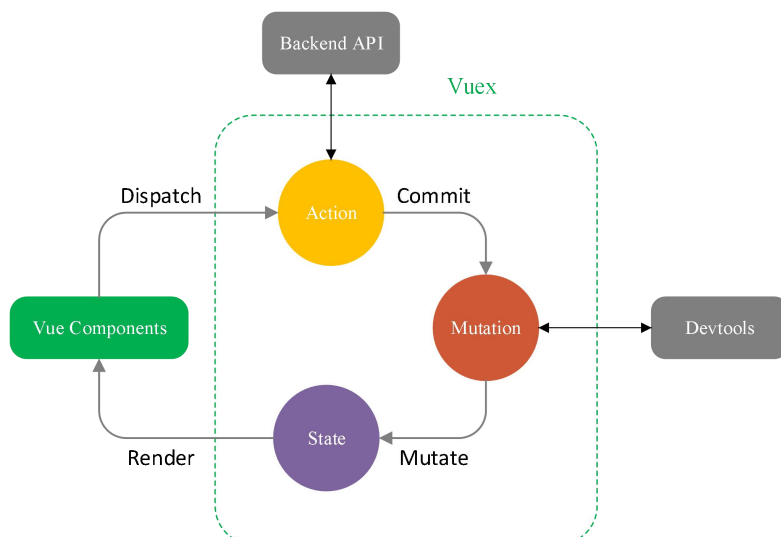


图 2.12 Vuex 状态管理示意图

3、UI 组件库：Element-UI、Vant 等，主要为开发者、设计师和产品经理提供一套优美的交互界面，且在开发时能够自由调整样式，在提高开发效率的同时定制个性化的优美网页。

4、数据可视化组件库：Echarts、Highcharts、BMap 等。将一切复杂晦涩的数据流转化为清晰易懂的图表，大大提高开发的效率，使用户快速理解数据想要表达的内容，有助于后续的分析与交流。

5、与后端通信方式：Axios 对 XHR 对象进行包装，向后端发送 HTTP 或 HTTPS 请求，能够以异步的方式获取返回的数据，便于后续数据的处理或应用。在遇到需要长链接的场景，如报警主动推送，则需要与后端建立 WebSocket 链接，WebSocket 是一种全双工协议，客户端和服务端之间的连接能够将保持互动状态持续到任何一方主动终止。下图 2.13 为 HTTP 与 WebSocket 协议的示意图。

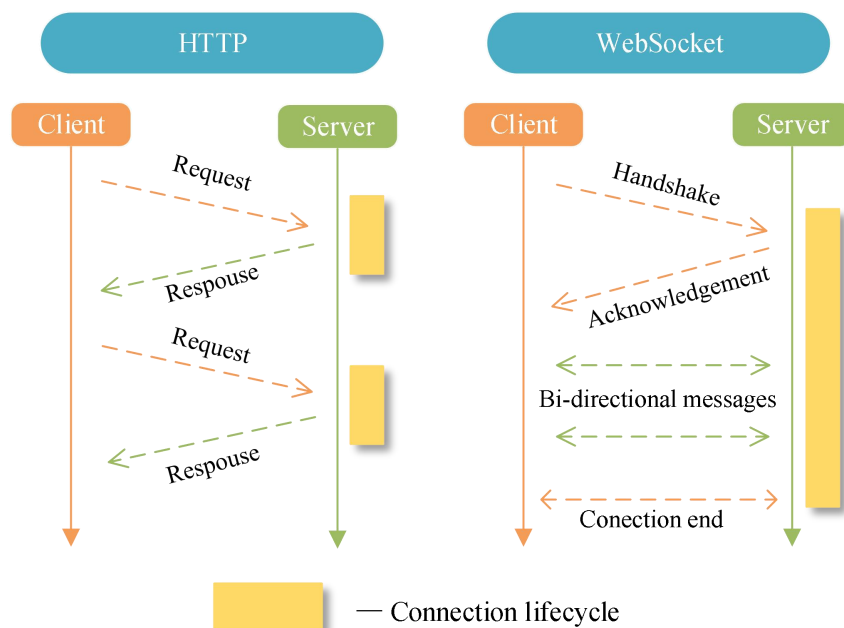


图 2.13 HTTP 与 WebSocket 协议示意图

最后将所有模块通过 Webpack、NPM、Vue CLI 工具实现工程的搭建。

2.4.1.2 业务功能设计

根据项目的业务需求, 电梯物联网系统的 Web 端实现了项目概况、数据监控、故障维保、综合管理功能, 图 2.14 为网站功能结构图。

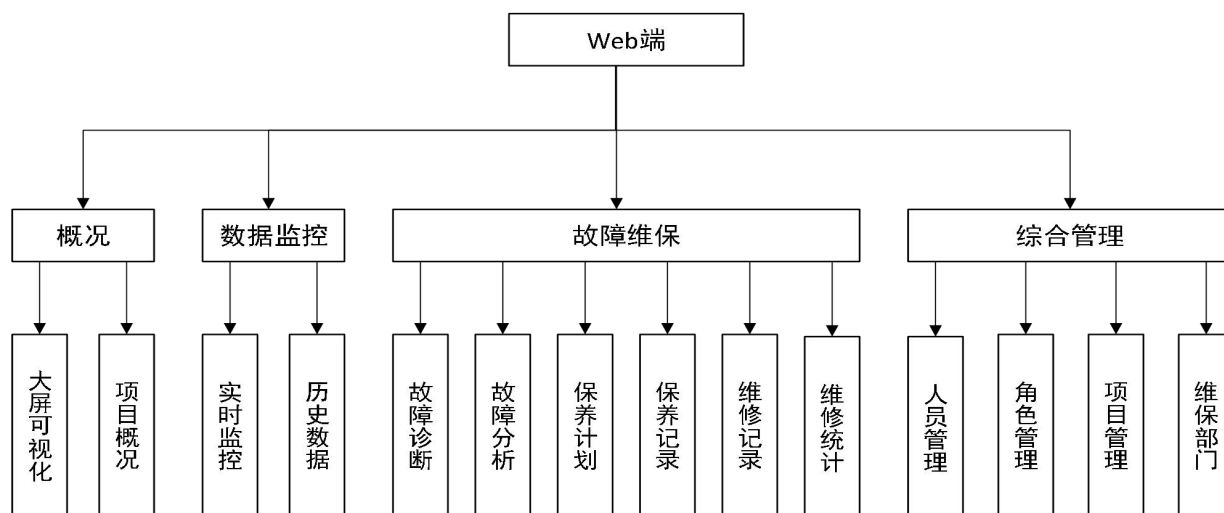


图 2.14 Web 端功能结构图

接下来详细介绍 Web 端各个模块的详细功能。

2.4.1.2 大屏展示

Web 网站的第一个模块功能是大屏展示。用户可以在登陆后进入大屏展示页面, 以数据聚合的形式, 展示当前用户的电梯运行环境、全国电梯占比、电梯状态统计、报警记录、电梯分布地图等情况。可以实时展示当前报警信息, 在中国地图上一览所有的电梯分布情况。图 2.15 为 Web 端大屏展示页面, 图 2.16 为该页面的现场照片。



图 2.15 大屏展示页面



图 2.16 大屏展示页面现场图

项目概况页面展示了项目总数、电梯总数、离线率、故障率等基本信息。并能够根据时间直观地观察到故障排行统计。

2.4.1.3 数据监控

实时监控页面能够随时随地查看每部电梯的详细运行参数。如图 2.17 所示。

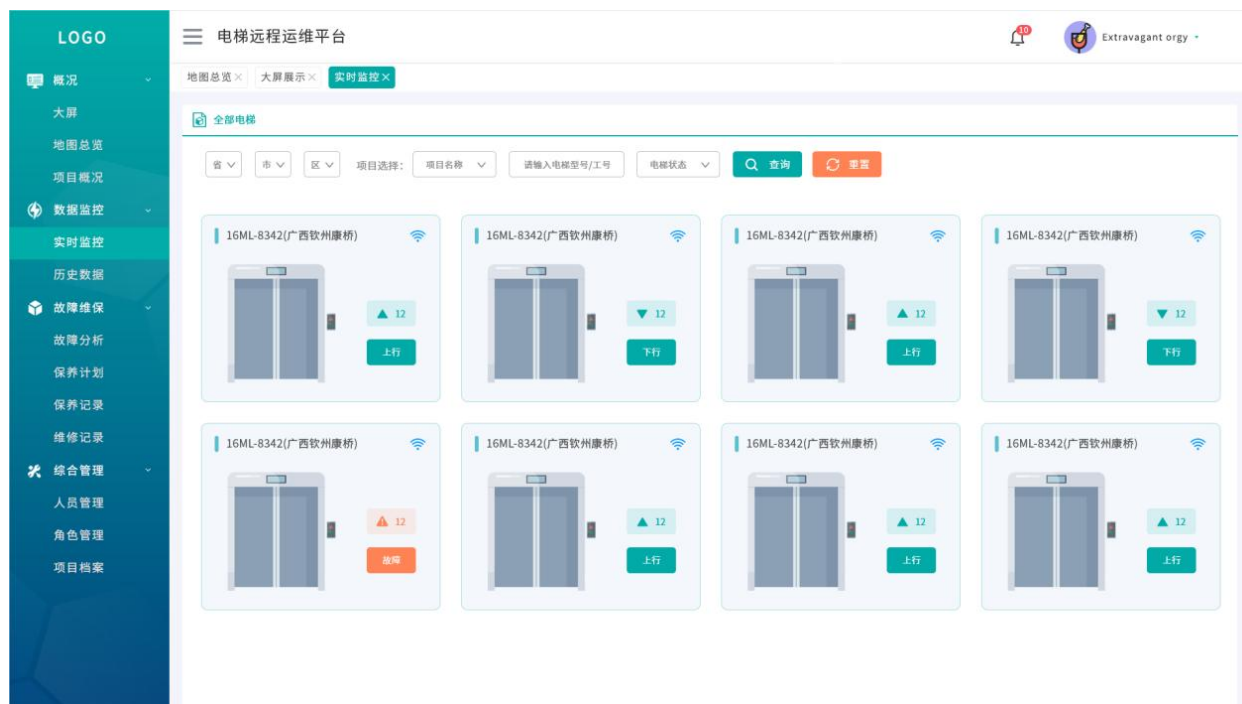


图 2.17 实时监控页面

历史数据页面能够自由根据项目、时间、监控点查看相关折线图以及表格，以多种方式直观地展现设备的历史数据，还可以将数据导出成 Excel 表格，供后续的个性化分析或总结。如图 2.18 所示。



图 2.18 历史数据页面

2.4.1.4 故障维保

故障维保模块有以下功能：

1、故障诊断：显示云端服务器基于电梯实时数据和历史数据通过算法分析得到的故障诊断。故障诊断页面如图 2.19 所示。

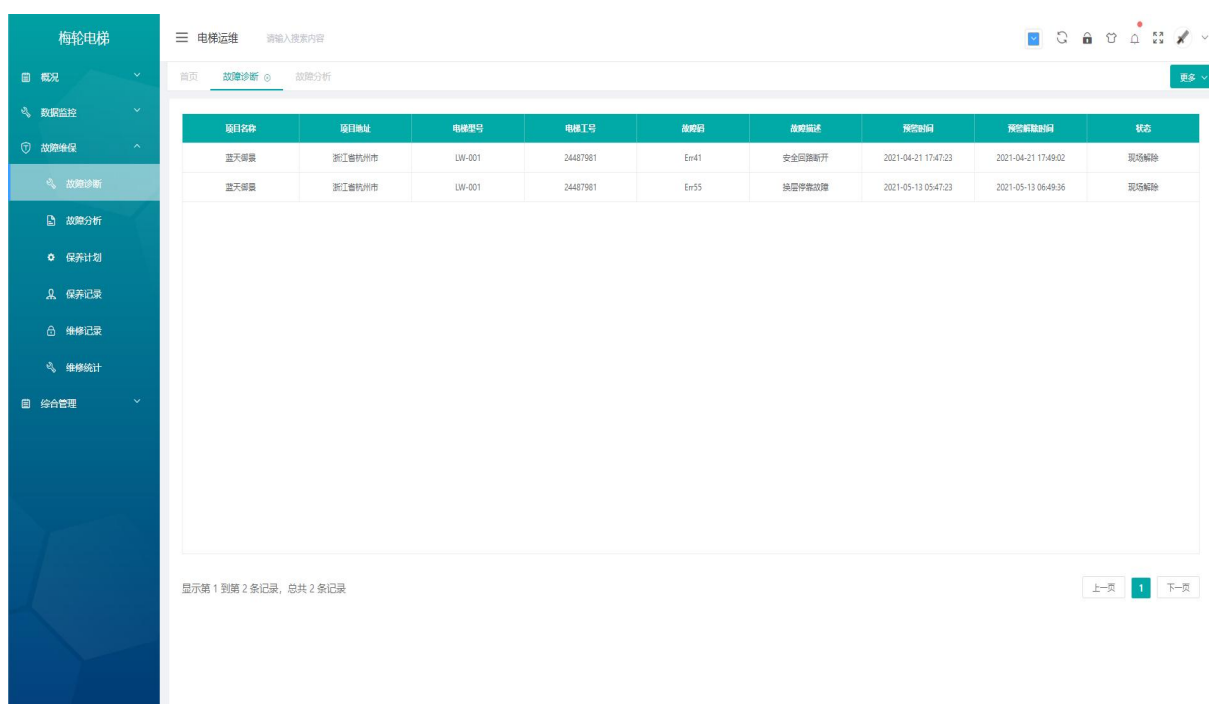


图 2.19 故障诊断页面

在应用本文的智能电梯运维系统后，可对某项目下其中一栋大楼内的电梯系统统计算法相关的故障诊断情况，选择某电梯系统，包含 6 部电梯，统计时间以月为单位，实际电梯故障诊断统计结果如下表 2.1 所示。

表 2.1 故障诊断统计情况

统计信息	数量/起
实际故障发生数	64
算法故障诊断数	67
算法故障诊断正确数	61
故障漏检数	3
故障误检数	3

由上表可得，经过智能云平台分析后给出的故障诊断的准确率为 95.31%，能够为维修人员提供高效的参考。

2、故障分析：查看实际出现的故障情况，例如故障描述、上报时间、解除状态等等。故障分析页面如图 2.20 所示。

浙江省

柯桥区测试

18ML-04374

开始日期

结束日期

查询

重置

项目名称	项目地址	电梯型号	电梯工号	故障码	故障描述	上报时间	解除时间	解除状态	历史数据
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err55	换层停靠故障	2022-04-13 07:41:00	2022-04-13 07:41:22	已解除	查看
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err42	运行中门锁断开	2022-02-28 17:00:30	2022-02-28 17:00:48	已解除	查看
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err42	运行中门锁断开	2022-02-28 16:47:00	2022-02-28 16:47:43	已解除	查看
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err42	运行中门锁断开	2022-02-28 16:42:32	2022-02-28 16:45:18	已解除	查看
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err42	运行中门锁断开	2022-02-28 16:40:58	2022-02-28 16:42:26	已解除	查看
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err42	运行中门锁断开	2022-02-28 16:38:26	2022-02-28 16:38:38	已解除	查看
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err42	运行中门锁断开	2022-02-28 16:36:09	2022-02-28 16:36:31	已解除	查看
柯桥区测试	绍兴市柯桥区	直梯	18ML-04374	Err42	运行中门锁断开	2022-02-28 16:27:07	2022-02-28 16:27:09	已解除	查看

显示第 1 到第 9 条记录，总共 9 条记录

上一页

1

下一页

图 2.20 故障分析页面

3、保养计划和保养记录：显示定期保养计划和已经保养过的历史记录。保养计划页面如图 2.21 所示。

省

选择项目名称

请输入设备号

查询

重置

设备号	项目名称	电梯类型	维保组	维保员	维保开始时间	维保结束时间	上次维保时间	下次维保预计时间	保养类型	维保合同
16MLYF002	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826002
18ML-04379	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826002
20ML-14425	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-19	2022-06-03	半月	wb20210826002
18ML-04374	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826002
17ML-3634	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826002
18ML-04380	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826002
20ML-14430	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826002
20ML-14428	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-19	2022-06-03	半月	wb20210826002
18ML-04377	柯桥区测试	直梯	维保组D	吴耿豪,姚绍奇	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826002
18ML-0428	轻纺城西市场	直梯	维保组A	王佳琪,韩苗	2021-08-26	2023-08-26	2022-05-18	2022-06-18	半月	wb20210826001

共 46 条12345>

图 2.21 保养计划页面

4、维修记录：显示报修后的维修记录，可点击查看单个记录详情，包括分数、签名等信息。维修记录页面如图 2.22 所示，查看详情页面如图 2.23 所示。

省

选择项目名称

请输入设备号

选择状态

开始日期 — 结束日期

查询

重置

项目名称	项目地址	设备编号	维保合同	维保人员	召修时间	到达时间	修复时间	维修状态	操作
轻纺城西市场	绍兴市柯桥区轻纺城大道	18ML-0434	wb20210826001	test	2022-05-11 14:31:07	2022-05-11 17:26:00	2022-05-11 17:26:00	已完成	查看
轻纺城西市场	绍兴市柯桥区轻纺城大道	18ML-0434	wb20210826001	test	2022-05-11 14:31:01	2022-05-11 17:56:00	2022-05-11 17:56:00	未评价	查看
轻纺城西市场	绍兴市柯桥区轻纺城大道	18ML-0434	wb20210826001	0223ml007	2022-05-11 14:29:35	2022-05-17 18:22:00	2022-05-17 18:22:00	已完成	查看

共 3 条1>

图 2.22 维修记录页面

查看

处理结果: 已完成

客户评价: 满意

到达时间: 2022-0

完成时间: 2022-0

故障现象: 调谐时编码器干扰

故障原因: 某某某

更换配件: 螺丝

客户意见: fast

维保人员签名: 王

客户签名: 刘

取消 确定

图 2.23 查看详情页面

5、维修统计：统计各维保组维修人员的维修平均分，能够直观地体现客户满意度。维修统计页面如图 2.24 所示。

梅轮电梯

概览 数据监控 故障维保 故障预测 故障分析 保养计划 保养记录 维修记录 维修统计 综合管理

维修平均分: 87.25

维保人员	维保组	维修平均分	不合格次数
test李小明	梅轮电梯	87.25	1

共 1 条

图 2.24 维修统计页面

2.4.1.5 综合管理

综合管理模块主要方便对于人员、账号角色、项目、维保部门进行细致科学地管理。图 2.25 为根据菜单查看并管理各维保部门。

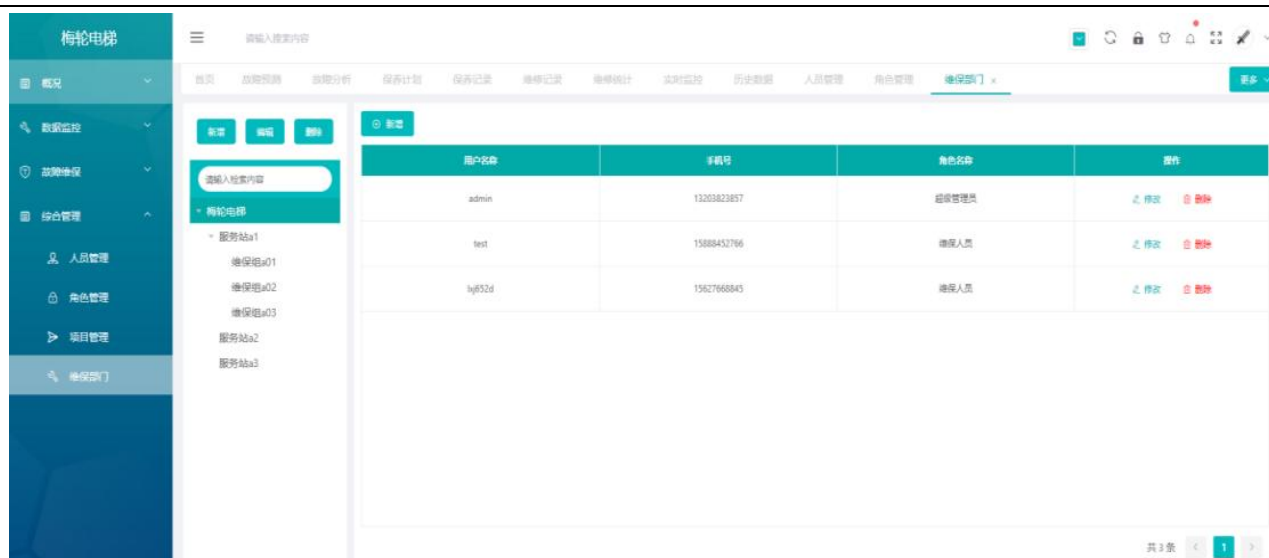


图 2.25 维保部门管理

2.4.2 移动端设计

移动端一般包括 H5、APP、小程序，根据项目需求可能要同时开发多种移动端产品，故移动端考虑使用 uni-app 框架，实现开发一次代码，进行部分代码的修改便能同时发布多端应用，开发效率高。目前主要发布为小程序，同时兼顾性能与低手机内存占用率，还能够与微信账号、公众号等进行联动，可通过订阅的模式轻松获取想要的信息。

2.4.2.1 业务功能设计

根据项目需求，移动端的实现功能包括：保养列表、维修列表与个人中心。移动端功能设计图如下图 2.26。

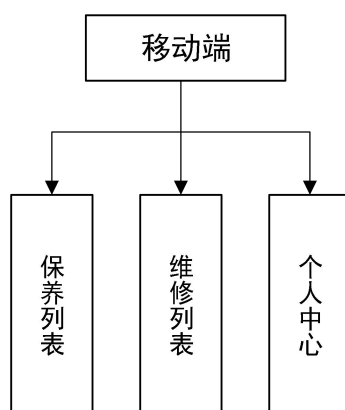


图 2.26 移动端功能设计

移动端的权限系统主要分为管理员和维保人员，且每一个维保员对应一个账号，登录后能且仅能查看自己负责电梯的定期保养计划和历史记录、紧急电梯故障的维修任务和维修记录、个人中心。

每位维保人员在个人中心绑定微信、关注电梯公众号后，便能够收到云平台推送的电梯故障维修任务。电梯故障推送流程图如图 2.27。

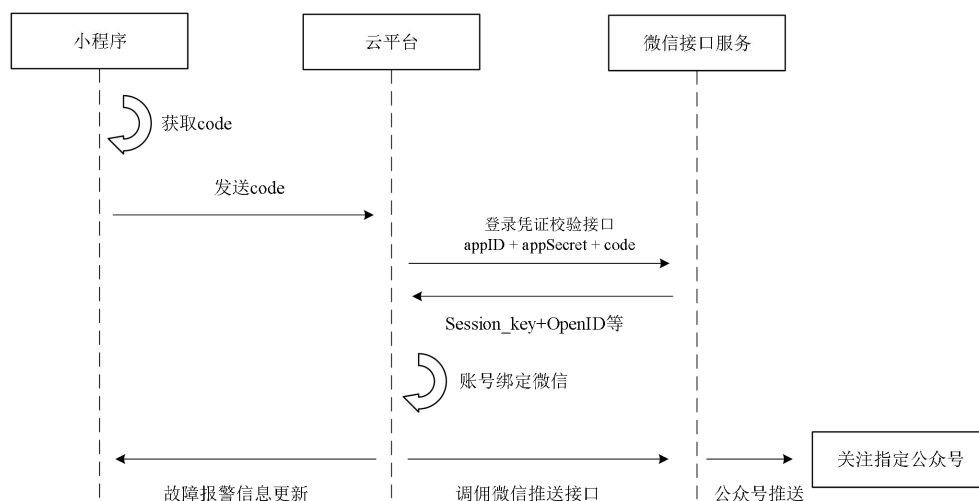


图 2.27 电梯故障推送流程

电梯故障报警推送流程如下：

- 1、小程序段获取微信账号临时 code，发送至云平台。
- 2、云平台发送小程序相关信息与临时 code，发送至微信接口服务，返回 Session_key 以及微信账号的唯一识别信息 OpenID。
- 3、根据微信账号的唯一识别信息 OpenID，将维保员账号与其微信账号绑定。
- 4、维保员关注指定公众号。
- 5、当电梯发生紧急故障时，上报至云平台，由云平台更新小程序维修任务列表，并公众号推送的形式向电梯对应负责的维保员推送故障报警信息。

2.4.2.2 保养列表

保养列表页面能够查看维保人员定期维保的未来计划和已经维保过的历史记录，保养列表页面如图 2.28。

日期	电梯编号	执行时间	维保组	维保员	保养开始时间	保养截止时间	保养类型
2022-02-17	18ML-0430	undefined	维保组a01	李小军	2021-08-26 00:00:00	2023-08-26 00:00:00	半月
2022-02-17	18ML-0431						

图 2.28 保养列表

电梯编号	项目名称	单位名称	联系人及电话	维保日期	维保人员
18ML-0430	开发部0826	电子科技	梅轮	2022-02-25	李小军

序号	维保项目	维保基本要求	保养结果
1	机泉、薄轮间环境	清洁，门窗完好，照明正常	☐ 符合 ☐ 不符合 ☐ 无此项
2	手动紧急操作装置	齐全，在指定位置	☐ 符合 ☐ 不符合 ☐ 无此项

图 2.29 保养单填报

对于未完成的保养计划，维保人员在对电梯实施保养后可以填写电子保养单，保养单分为半个月、一个月、三个月等等类型，不同类型的保养单所包含保养项目不同，图 2.29 为某类型保养单。

维保人员在保养后还需要让客户验收评价，维保人员与客户都要进行签字确认，做到责任到人，在日后随时可以查看记录。图 2.30 为维保人员与客户的签字确认图。



图 2.30 签字确认图

2.4.2.3 维修列表

当维保人员所负责的电梯发生电梯故障是，会推送给维保人员，在维修列表可显示当前所需要完成的维修任务与已经完成的维修历史记录。图 2.31 为维修单列表页面。



图 2.31 维修单列表



图 2.32 维修单填报

对于未完成的维修单，在维保人员维修完电梯故障后可以填报维修单，图 2.32 为维修单填报图。

2.4.2.4 个人中心

个人中心主要用于维保人员微信与账号进行绑定，个人中心页面如图 2.33



图 2.33 个人中心

维保人员在关注电梯公众号后，便可以接收公众号主动推送负责电梯的突发维修任务。图 2.34 即电梯故障推送消息图。图 2.35 为电梯故障推送内容图。



图 2.34 电梯故障推送消息



图 2.35 电梯故障推送内容

2.5 本章小结

本章结合电梯物联网的当前痛点和项目的具体需求，设计并实现基于电梯物联网的电梯远程运维系统。首先对系统需求进行分析，确定系统整体框架与采用的技术，介绍了所用技术的原理与优势。通过自顶向下的方式介绍智能网关、云平台、Web 端和移动端的技术架构设计、业务功能设计与成果展示。本系统能够实时监控电梯数据，将众多电梯数据反映到图表和地图上，使用户快速理解数据的含义，利于后续分析与交流。本系统能够将 Web 端与移动端联动起来，从定期保养、故障诊断、及时维修、故障分析四个方面对电梯进行细致全面的维保，有效增加电梯的安全性、稳定性与使用寿命。

第三章 基于改进 PSO-BP 神经网络的电梯故障诊断方法

近年来,随着城市建筑的现代化发展,人们的生活水平的逐步提高,生活节奏也越来越快,电梯作为广泛应用于医院、商场、商务大厦等人流密集地区的电机设备,使用数量和使用时长也只增不减。电梯行业在专注提高核心竞争力的同时,忽略了电梯维保对于电梯运行持久安全的重要性,维保工作的科学性来源于准确的故障诊断,由于电梯机械设备复杂,任何故障都可能对应数个原因,企业或厂家将维修技术也视为机密不允许外传,使得许多经验不足的技术人员要浪费许多时间在电梯故障诊断上,如何将电梯维修的技术经验供所有从业人员提供参考与辅助,便是研究电梯故障诊断方法的目的。

现代的电梯故障诊断研究已经有一定的实用性,部分电梯检测系统中也通过引进一些智能诊断算法来提升故障检测水平,例如随机森林、多层感知器、群体智能搜索等等,提高电梯发现当前隐患的能力,对可能发生的故障有一定的预见性。其中神经网络的研究目前十分火热,具有以下优势:1、可多线程处理数据,计算速度快;2、易与其他类型的算法结合,取长补短,增强实际应用能力。3、不需要电梯故障诊断的经验和知识,能够自行学习,部分模型能够纯粹地从数据中挖掘信息,有助于拓展当前的经验和知识。在当前电梯故障诊断中比较常用的神经网络有反向传播神经网络、对抗网络、径向基网络、记忆神经网络、循环神经网络等等。其中反向传播(BP)神经网络原理简单、高效,良好的容错能力决定其建立模型的泛用性不错,但同时在处理某些高维非线性问题时,可能会遇到计算速度或准确度欠佳的难点。目前已有电梯故障诊断算法针对 BP 神经网络的全局搜索精准确度欠佳、迭代周期过长等问题,将 BP 神经网络和群体智能算法 PSO 结合,利用粒子群(PSO)算法收敛速度快的优势提前对 BP 神经网络的初始随机参数进行优化,加快收敛至最优解的进度,进一步提高初始参数在最优解附近的概率。

在对 PSO-BP 神经网络分析后可知,这种算法依然容易把局部最优解误判为全局最优解,故本章还对 PSO 算法的迭代模式进行优化,调整搜索过程参数,改造为动态步长的移动模式且加入了烟花算法^[60, 61],提高 PSO 算法的全局搜索能力与收敛速度,最终实现对部分常见电梯故障更为准确的诊断。

3.1 故障诊断方案相关理论分析

3.1.1 BP 神经网络

传统 BP 神经网络是一种多层前馈神经网络,主要由输入层、单个或多个隐含层和输出层组成。迭代训练过程主要分为前馈传播阶段和误差反向传播阶段组成。前馈传播阶段主要为训练样本输入数据根据输入层、中间层、输出层的连接权值进行加权求和并经过函数计算

后，达到输出层；误差反向传播阶段指经过各层级计算后的输出值和预期输出值进行对比，通过误差修正各个层的神经元之间的权值和神经元阈值的过程，最终当误差满足要求或超出预先设定的学习次数时，输出最终结果。传统 BP 神经网络模型如图 3.1 所示。

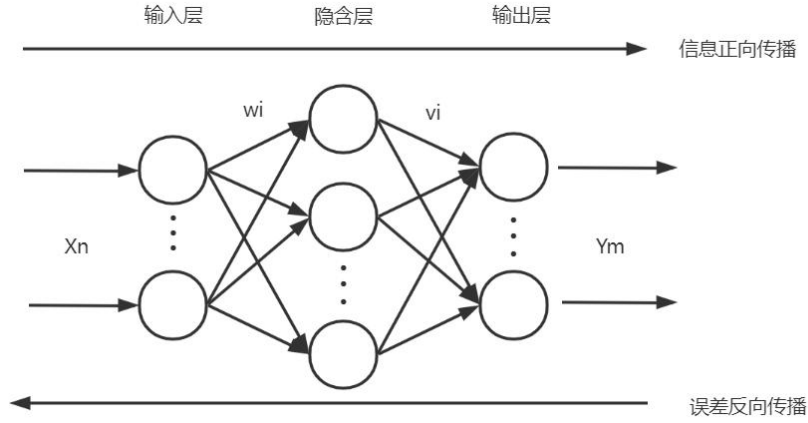


图 3.1 BP 神经网络模型

传统 BP 神经网络的流程如图 3.2 所示。

根据其原理，BP 神经网络的算法基本步骤如下：

(1) 初始化权值 w 和阈值 θ ，输入层至隐含层的各节点权重 w_{ij} ，隐含层至输出层的各节点权重 v_{jk} ，隐含层各节点阈值为 θ_j ，输出层各节点阈值 θ_k 。记激活函数 $f(x)$ ，学习速率 η 。

(2) 设训练样本数量为 N ，样本向量为 x_i ，预期输出向量为 $\bar{y}_i$ ，则隐含层节点激活后的输出值 $\bar{x}_j$ 和输出层节点激活后的输出值 y_k 为：

$$\bar{x}_j = f\left(\sum_{i=0}^n w_{ij} x_i - \theta_j\right) \quad (3.1)$$

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^n v_{jk} \bar{x}_j - \theta_k\right) \quad (3.2)$$

(3) 输出层的实际输出值和预期值之间的误差 ∂_k 为：

$$\partial_k = y_k(1 - y_k)(\bar{y}_i - y_k) \quad (3.3)$$

(4) 输出层向隐含层反向传播误差，则隐含层的残差 ∂_j 为：

$$\partial_j = y_j(1 - x_j) \sum_{k=1}^n v_{jk} \partial_k \quad (3.4)$$

(5) 根据残差调节隐含层到输出层的权值 V_{ji} 和阈值 θ_j ：

$$V_{ji}(t+1) = V_{ji}(t) + \eta x_j \partial_k \quad (3.5)$$

$$\theta_j(t+1) = \theta_j(t) + \eta \partial_j \quad (3.6)$$

(6) 将所有样本都进行 BP 神经网络训练，每次反向传播误差以此调整每一个节点权值和阈值，至此完成一次学习，迭代次数加 1，计算全局误差 E ：

$$E = \frac{1}{2N} \sum_{q=1}^N \sum_{i=1}^k (y_i(q) - \bar{y}_i(q))^2 \quad (3.7)$$

(7) 判断全局误差 E 是否小于预设精度或迭代次数达到最大限制次数，若满足，则结束算法，否则继续迭代。

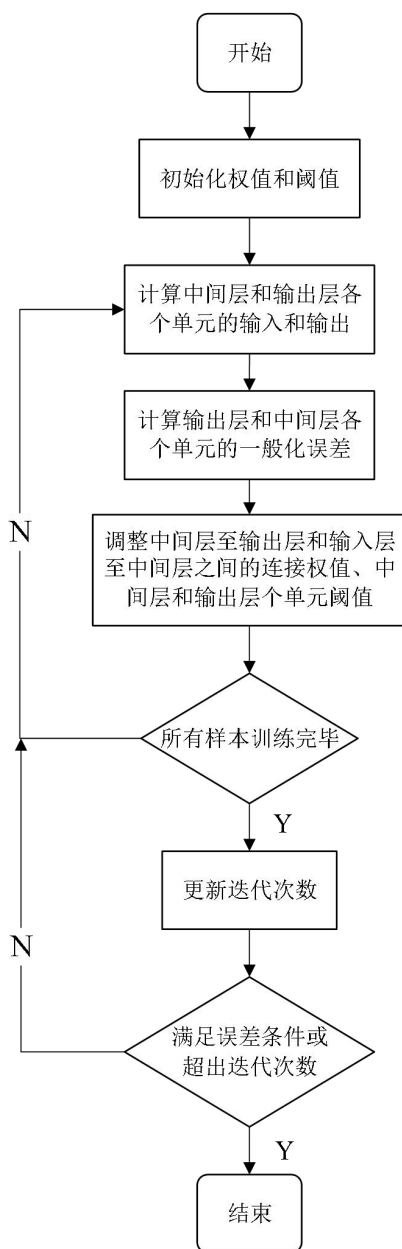


图 3.2 传统 BP 神经网络流程图

3.1.1.1 BP 神经网络优缺点

BP 神经网络应用在电梯故障诊断技术中有以下优点：

(1) 网络结构和参数较为简单且对于任意内部映射复杂的问题都能够逼近得到较好的精度;

(2) 具有很强的自学习能力和适应能力, 意味着神经网络容许网络中的个别节点失效后依然能够继续逼近所求的非线性映射关系, 保证训练结果的参考价值;

(3) 具有一定的泛化能力, 根据合适的学习速率可以调整误差调整的精度, 使得逼近得到的非线性映射较少出现过拟合现象, 能够高概率地将训练成果应用在电梯故障诊断这样易受干扰的场景。

同时也会存在一定的局限性:

(1) 通过分析 BP 神经网络误差补正的数学原理可知这是一种局部优化的方法, 总是朝着局部误差减小的方向调整的, 在解决某些存在多个局部极值干扰的问题时, 易限制其训练的效果, 这时初始网络权重的设定便显得尤为重要;

(2) 在搜索的解空间较为平坦时, 权值的改善步长是固定的, 导致收敛速度较低;

(3) 对于神经网络中间层的节点数需要经过多次测试才能够对比出训练效果最好的数目。

3.1.1.2 优化方向

BP 神经网络虽然很实用, 但其收敛速度与全局搜索能力渐渐无法满足研究人员的要求, 为了达到相应效果, 加入了群体智能搜索的算法。群体智能算法指的是研究群居生物的群体行为而获得启发创造的算法, 例如遗传算法、萤火虫算法、人工鱼群算法、粒子群算法等等, 它们的搜索基本能够多方向同时进行, 具有自监督、自学习的优点, 能够优化 BP 神经网络训练中收敛速度较慢或无法摆脱局部极值困境的情况, 以达到更好的训练结果。以下介绍本章所使用的粒子群优化算法和烟花算法的基本概念和具体步骤。

3.1.2 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (PSO) 是一种模仿鸟群觅食时个体和群体之间的联动行为而创造的算法, 将解空间内所有可能的算法比作鸟群所需的食物, 每一只鸟 (也称为粒子) 比作问题的当前解, 最终目的是希望所有的鸟飞往最优质的食物, 该算法在搜索过程中富有随机性, 但能够通过个体的记忆以及群体之间的协作来增强搜索的效率。以下为算法的基本步骤。

根据所求解的问题, 设定搜索空间维度 D , 将 M 个粒子完全随机放置在不同空间位置, 作为初始粒子群, 其中第 i 个粒子的空间位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) (i=1, 2, \dots, M)$ 视为可能解, 设定优化问题的评价函数与相应精度要求, 计算当前粒子的适应值, 记录第 i 个粒子飞行的历史最佳位置 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$, 当前飞行速度 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, 所有粒子的历史最佳位置记为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ 。

(1) 计算每个粒子的适应值 F_i 。

(2) 将上一步的粒子当前适应值与该粒子的历史最佳适应值作对比, 选择两者间适应值更高的解, 更新历史最佳位置。

同理将粒子当前适应值与该群体的全局最佳适应值对比，选择两者间适应值更高的解，更新全局最佳位置。

(3) 判断粒子群全局最佳适应值是否满足条件，若是则输出最佳粒子，反之继续迭代更新每个粒子的速度和位置，更新公式如下：

$$\begin{aligned} V_i(t+1) &= \omega V_i(t) + c_1 r_1 [p_i - x_i(t)] + c_2 r_2 [p_g - x_i(t)] \\ X_i(t+1) &= X_i(t) + V_i(t+1) \end{aligned} \quad (3.8)$$

对于上式中参数的解释如下：

ω 为惯性权重参数，数值非负。当 ω 较大时，粒子跳跃距离越大，倾向于全局寻找目标最优解；反之粒子更倾向于局部寻找目标最优解。

r_1 和 r_2 为两个在 $[0,1]$ 范围内变化的随机数；

c_1 和 c_2 称为学习因子或加速系数， c_1 关系到粒子历史最佳对下一代粒子的影响，因此称为认知学习因子， c_2 关系到群体中全局最优位置对下一代粒子的影响，共享了群体中的有益信息，因此称为社会学习因子，两者一般都为 2。

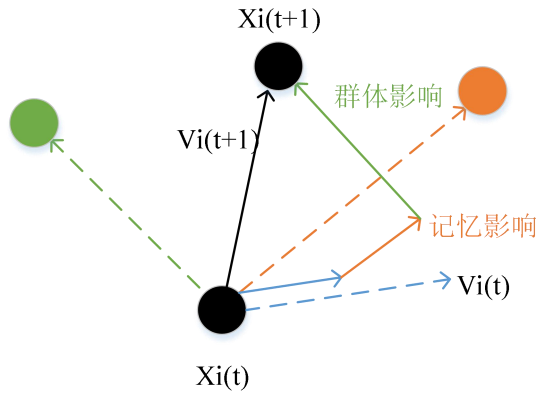


图 3.3 粒子迭代示意图

粒子每一次迭代都与上一代、历史最佳和全局最佳的速度位置相关，迭代示意图如图 3.3 所示。

(4) 将迭代后的粒子重新回到步骤 (1) 进行适应值计算，直到超出设定的迭代次数。

粒子群优化算法整体流程图如图 3.4 所示

3.1.2.1 经典粒子群算法优缺点

经典粒子群算法的优势明显：1、算法简单易实现，自由参数较少，易实现，方案成熟易应用于实际场景。2、不要求优化函数具有可微、可导、连续等性质。3、所有粒子并行搜索且有记忆功能，最优解搜索速度快，效率高。

缺点在于：1、与 BP 神经网络类似，对于多局部极值的抗干扰能力较弱；2、每一次迭代缺少了对所有掌握的信息的利用，仅考虑了群体历史最优记录和个体历史最优记录。

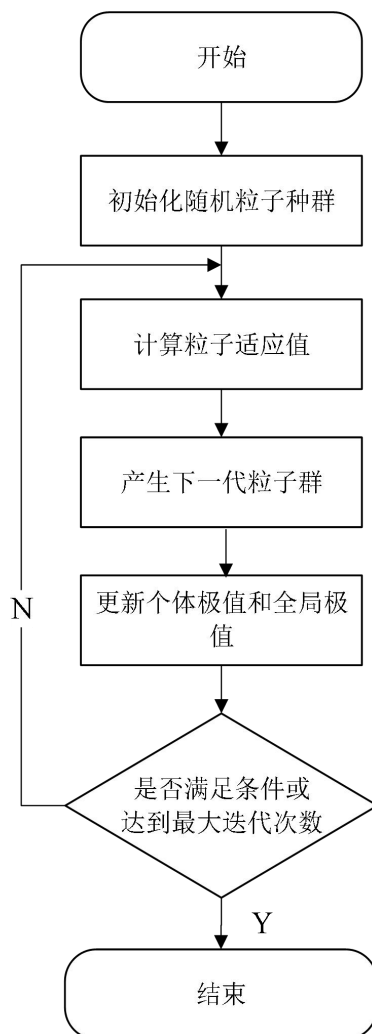


图 3.4 粒子群优化算法流程图

3.1.2.2 粒子群算法的优化方向

PSO 算法作为一种经典算法，研究人员对其的改进做出了许多努力，例如：1、对 PSO 算法搜索模式进行改良；2、调整各参数以优化 PSO 算法的效果；3、调节 PSO 算法的网络拓扑结构；4、研究其他算法与 PSO 算法的并行效果等等。

本章主要对 PSO 参数进行调优，根据粒子的适应度优劣程度和迭代时间调整粒子的步长，加强了全局搜索能力的同时避免收敛速度过快，并对部分适应度较低的粒子加入了烟花算法，尽量利用粒子群迭代过程中获取的所有信息，提高逃离局部最小的能力。

3.1.3 烟花算法

燃放烟花爆竹属于中国春节期间的一项重要节日庆祝活动，甚至在烟花节人们还能看到壮观持久的烟花，绚丽的图案照亮了星空，烟花图案的效果和其爆炸后的火花数量、类型、范围息息相关，火花分布大部分比较均匀，当然目前为了保护环境已经比较少见了。2010 年，Tan 和 Zhu 根据烟花绽放的现象发表了烟花算法（FWA）。

烟花绽放的过程可理解为求解优化问题的过程，每一个火花可看作为目标优化问题的其中一个可行解，火花扩散的同时搜索全局最优解。为了增加烟花算法的随机性，为一定数量火花加入可变异性的，为了调节全局搜索能力和局部搜索能力，根据火花适应度值而调节扩散半径。

烟花算法的整体执行流程如图 3.5 所示。

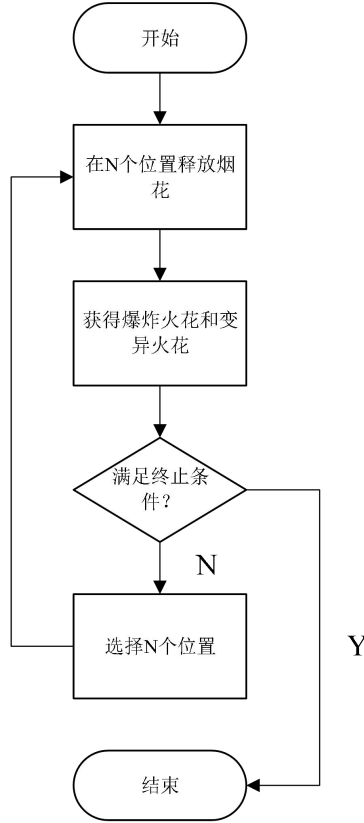


图 3.5 烟花算法流程图

烟花算法的具体步骤如下：

- (1) 初始化烟花规模，随机分布在可行解领域，一个烟花对应一个可行解。
- (2) 根据各个烟花的适应值进行排序，各个烟花的爆炸相关参数根据排名而异，部分烟花爆炸产生高斯火花。

烟花 x_i 的爆炸半径 A_i 公式和爆炸火花数目 S_i 的计算公式如下：

$$A_i = \hat{A} \frac{f(x_i) - Y_{\min} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(x_i) - Y_{\min}) + \varepsilon} \quad (3.9)$$

$$S_i = m \frac{Y_{\max} - f(x_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (Y_{\max} - f(x_i)) + \varepsilon} \quad (3.10)$$

式 (3.9) 和式 (3.10) 中： $f(x_i)$ 为该烟花 x_i 的适应度； $Y_{\min} = \min(f(x_i)) (i=1, 2, \dots, N)$ 为所有烟花适应度的最小值， $Y_{\max} = \max(f(x_i)) (i=1, 2, \dots, N)$ 为所有烟花适应度的最大值。 $\hat{A}$

为烟花爆炸的最大范围，默认是常数； m 代表火花总数； ε 为一个极小的常数，保证公式的合法性。

为了平衡式 (3.10) 中烟花产生的火花数量的分布情况，对各烟花所含火花数量进行限制：

$$S_i = \begin{cases} \text{round}(am), S < am \\ \text{round}(am), S > bm, a < b < 1 \\ \text{round}(S_i), \text{else} \end{cases} \quad (3.11)$$

式中： $\text{round}()$ 为取整函数； a 、 b 为火花数量分布情况系数。

为了增加烟花算法的自由随机性，随机选择烟花 x_i ，通过模拟遗传变异的方式对其中部分维度 k 执行如下操作：

$$x_{ik} = x_{ik} \times e \quad (3.12)$$

式中： $e \sim N(1, 1)$ ， $N(1, 1)$ 为高斯分布函数，均值和方差同为 1。

所有烟花产生的火花，都有超出可行解空间 Ω 的可能，若火花 x_i 在部分维度 k 上超出可行解空间，将通过式 (3.13) 映射至可行解空间内。

$$x_{ik} = x_{LB,k} + |x_{ik}| \% (x_{UB,k} - x_{LB,k}) \quad (3.13)$$

式中： $x_{UB,k}$ 和 $x_{LB,k}$ 分别限制了火花在维度 k 上可行解空间的上边界和下边界。

(3) 判断算法是否满足终止条件。如果满足则输出当前最优火花，否则在所有类型的火花和烟花中根据策略选择为下一代烟花。首先保留烟花种群中的最优个体，记种群规模为 N ，所有备选者的集合为 K ，在剩下 $N-1$ 的备选者中适用轮盘赌策略筛选下一代烟花。对于备选者 x_i ，其被选择概率为：

$$p(x_i) = \frac{R(x_i)}{\sum_{x_j \in K} R(x_j)} \quad (3.14)$$

$$R(x_i) = \sum_{x_j \in K} d(x_i - x_j) = \sum_{x_j \in K} \|x_i - x_j\|$$

式中： $R(x_i)$ 为当前火花与备选者集合 K 中其余火花之间的距离之和。如果火花所处领域内有较多其他备选者时，被选择的概率较低。

3.2 基于改进 PSO-BP 神经网络的故障诊断方案

3.2.1 改进神经网络总体流程设计

对智能网关上报的电梯数据样本进行预处理。建立 PSO-BP 神经网络模型。通过改进后的 PSO 算法为 BP 神经网络选用足够合适的初始权值和阈值，增强整体算法的广度搜索能力和后期收敛速度，优化算法性能。将 70% 的电梯数据作为训练集，搭建 PSO-BP 神经网络模型，将 30% 的电梯数据作为验证集，验证改进后的 PSO-BP 神经网络模型的泛用性。

3.1.2 电梯数据预处理

在神经网络的学习中，为了更好的训练效果，需要假定数据的所有特征值都是零均值并且具有同一阶方差，这样在计算梯度下降是才能具有更快的速度，同时也更有可能提高输出的精度。故我们需要将采集到的电梯数据进行预处理，本章采用归一法使得所有数据按比例缩放至[0,1]之间，计算公式如下：

$$x_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3.15)$$

上式中： $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ 分别为电梯数据样本的最小值和最大值， x_i 为采集的数据实际值。

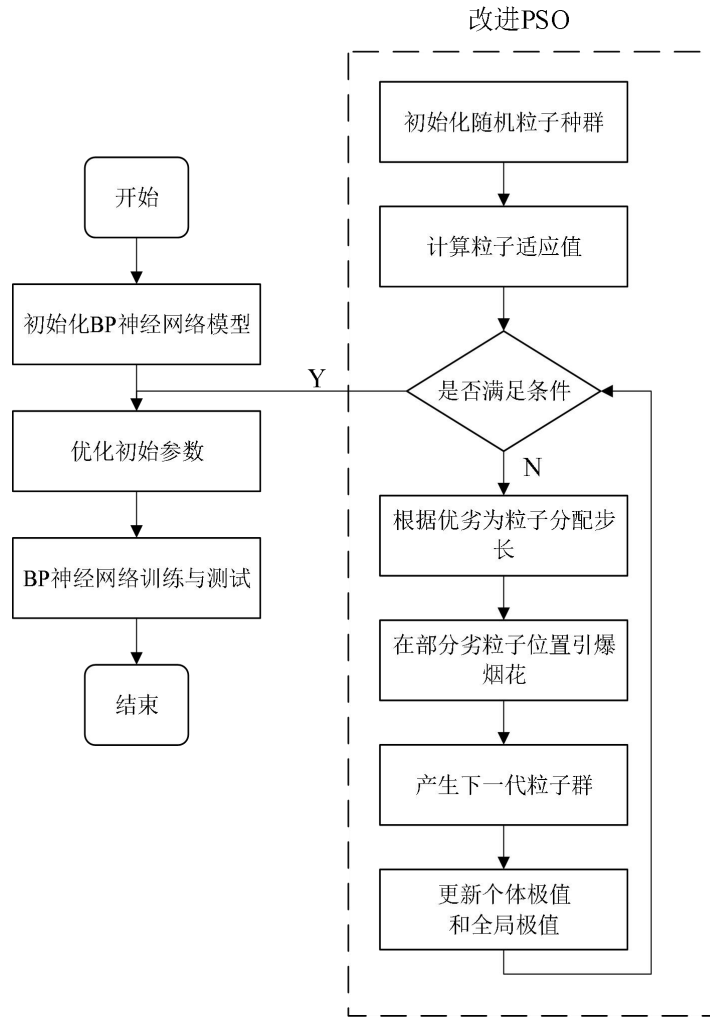


图 3.6 改进 PSO-BP 流程图

3.1.3 确定 BP 神经网络结构

首先建立 BP 神经网络模型，所需检测故障的数量与输出层神经元个数对应，相关特征数量与输入层神经元个数对应。在实际算法训练的中，BP 神经网络的关键参量选取如下：

(1) 隐含层节点数量的选取。

通常，隐含层的节点数量过低会导致训练容错率较低，而节点数目冗余则会降低神经网络的泛用性，易产生“过拟合”问题（对于训练模型要求过于严格而导致无法推广至未知场景）。设定隐含层节点数的核心规则：在满足精度要求下尽量简化网络结构。选择隐节点数目 n_1 的参考公式有：

$$\begin{aligned} n_1 &= 2 \times n \\ n_1 &= (n + m)^{1/2} + a, a \in [1, 10] \\ n_1 &= \log_2 n \\ n_2 &= (nm)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

（2）激励函数的选取。

激励函数表示神经网络向前传递的速度，关系到 BP 算法的收敛速度，一般选择 S 型激活函数，考虑加入因子 a 对其进行优化：

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x/a}} \quad (3.17)$$

激活函数可以自由调整，计算渐变。考虑使激活函数更为平坦，在输出接近于边界值的时候拥有更快的搜索速度。

（3）初始权值和阈值的选取。

设定合适的初始权值和阈值能够极大避免 BP 神经网络陷入局部极值的困境，初始权值通常用函数 $\text{round}(-1, 1)$ 获取 -1 到 1 之间的随机数，本章节通过改进后的粒子群优化（PSO）算法来选定合适的权值和阈值。

3.2.4 PSO-BP 的改进策略

为了选定 BP 神经网络合适的初始参数，将 BP 神经网络的目标误差函数作为 PSO 算法的适应度函数，即公式（3.8）。接下来对于传统 PSO 算法从参数、算法理论和混合算法多方面进行改进：

（1）惯性权重

惯性权重 ω 能够调节不同时期粒子群优化算法中粒子在全局方向和局部方向的侧重情况。在算法运行的初始阶段，较大的 ω 使得粒子尽可能扩散分布，提高后续选择全局最优路径的概率，在算法运行的后期，较小的 ω 可以帮助其快速沿着最优路径找到全局最优解。

常用的惯性权重一般是线性的，公式如下：

$$\omega(t) = \omega_{\max} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times t}{T_{\max}} \quad (3.18)$$

上式中： t 为算法当前运行周期数， T_{max} 为限制算法运行的最大周期数， ω_{max} 代表惯性权重的最大限度， ω_{min} 代表惯性权重的最小限度， ω 整体由大变小。

由于线性变化的 ω 下，算法初期搜索最优途径的随机性不够，后期收敛速度不够快，故设计非线性变化的惯性权重因子，增加算法初期搜寻到最优区域的可能，算法后期主要对存在最优解的区域进行开发以期尽快找到全局最优解。非线性变化惯性权重 ω 的公式如下：

$$\omega(t) = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \times [1 + \cos\left(\frac{(t-1)\pi}{T_{max}-1}\right)] \quad (3.19)$$

(2) 学习因子

学习因子 c_1 、 c_2 分别代表个体记忆与群体记忆的权重。当 c_1 、 c_2 均为0时，粒子的探索空间甚少。当 c_1 为0时，只能凭借群体记忆飞行，当 c_2 为0时，粒子只能凭借记忆飞行，两者均易陷入局部极值的困境。

选择变化合适的学习因子能够加强算法全局搜索能力和后期收敛速度，本文所设计的非线性学习因子公式如式（3.20），其中 t 是当前运行周期数， T_{max} 是最大运行周期数。

$$\begin{aligned} c_1 &= 2 - \sin \frac{t\pi}{T_{max}} \\ c_2 &= 1 + \sin \frac{t\pi}{T_{max}} \end{aligned} \quad (3.20)$$

(3) 迭代公式

改进后 PSO 同样容易发生早熟问题，本章引入动态步长的概念进行优化。对于标准 PSO 算法寻优过程分析后发现粒子无论是早熟于 p_i （粒子局部最优）还是找到 F_g （函数全局最优），种群中的运动模式决定了粒子在社会因素影响下会趋向某一点，全局开发能力不足，不易收敛到 p_g （粒子群全局最优），在这种情况下，若是能够赋予粒子跳出聚集点的能力，便能减少所有粒子过早收敛现象。本章优化 PSO 算法中粒子的飞行模式，加入适应度相关的因素来调整飞行速度，适应度靠前的粒子分配较小的步长，适应度靠后的粒子分配较大的步长，且不同粒子的步长必然不同，帮助聚集在一起的粒子分散开来，有效克服所有粒子过早收敛的现象，提高算法的准确率和速度。故修改公式（3.9），动态步长 PSO 的迭代公式如下：

$$\begin{aligned} V_i(t+1) &= \omega V_i(t) + step_i \left(c_1 r_1 [p_i - x_i(k)] + c_2 r_2 [p_g - x_i(k)] \right) \\ step_i &= step_0 \cdot a^{top(f(x_i))} \\ top(f(x_i)) &= a^k \end{aligned} \quad (3.21)$$

其中： $step_i$ 步长系数； $step_0$ 是给定常数，决定了粒子寻优的精度； a 决定了步长的宽度，测试范围在 1.0-1.6 之间； K 代表粒子号， $top(f(x_i))$ 为粒子按函数值从小到大的排序。

(4) 混合烟花算法

为了进一步增强 PSO 的广度搜索能力, 充分利用劣粒子的信息, 将 PSO 与烟花算法相结合, 在劣粒子位置进行引爆, 加强了劣粒子们随机扩散能力, 这样更利于找到全局最优解。

将新粒子群中的劣粒子 (适应值最差的 30% 粒子) 引爆烟花, 爆炸半径 A_i 和爆炸火花数目 S_i 见公式 (3.9) 和公式 (3.10), 同时利用公式 3.12 进行变异操作。对于每个烟花设定如下产生火花数量的限制公式见公式 3.11。然后根据粒子的爆炸范围和数目对粒子进行位移:

$$X_i(k) = X_i(k) + rand(0, A_i) \quad (3.22)$$

其中 $rand(0, A_i)$ 表示在 0 到 A_i 内的完全随机数。

生成随机粒子后首先将候选者集合中适应度最好的个体选择作为下一代, 然后根据轮盘赌公式 (3.16) 对剩下的随机粒子进行筛选。

改进后的 PSO 算法流程图见图 3.6, 具体执行步骤如下。

- (1) 初始化种群, 设置最大运行周期数等参数, 随机生成 N 个粒子分布在解空间内;
- (2) 根据每个粒子优劣评价按顺序排列;
- (3) 根据粒子排列顺序为粒子分配步长系数;
- (4) 根据烟花算法原理, 在排名靠后的粒子所在位置扩散出爆炸火花和变异火花;
- (5) 通过轮盘赌的策略选择一部分火花作为下一代粒子;
- (6) 其余粒子更新迭代新的速度和位置;
- (7) 根据算法条件判断是否结束, 若不结束则回到步骤 2, 否则退出运行, 输出结果, 作为后续连接的 BP 神经网络的初始参数。

3.2.5 改进后的算法性能测试与分析

为了验证改进后的 PSO-BP 算法性能, 本章采用 Griewank 经典测试函数来测试本章所提的算法的效果, Griewank 函数三维图如图 3.7 所示。

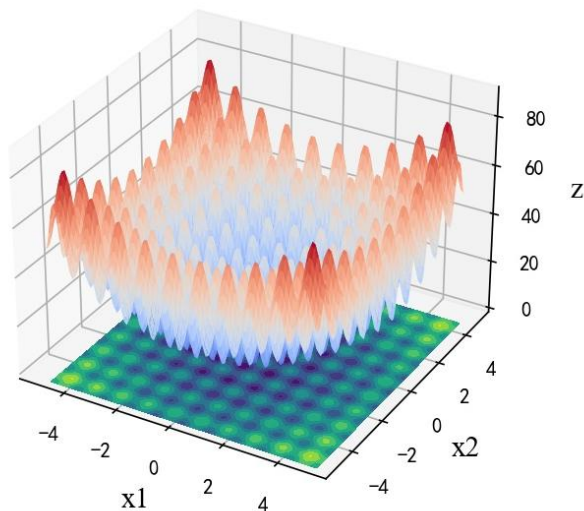


图 3.7 Griewank 函数三维图

Griewank 函数的基本信息如下表 3.1 所示。

表 3.1 Griewank 函数的基本信息

函数	函数表达式	自变量范围	期望值
Griewank	$f(x_i) = \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^N \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	$x \in [-600, 600]$	0

可以看到 Griewank 函数存在许多不同的低谷和山峰，全局极小值处于 $x=(0,\dots,0)$ 位置，是典型的非线性多模态函数，比较适合检验算法的性能。

标准 PSO-BP 和改进后的 PSO-BP 算法的初始参数如表 3.2。

表 3.2 标准 PSO-BP 和改进 PSO-BP 算法相关参数

参数	PSO	改进后的 PSO
维度	30	30
种群规模	30	30
最大迭代次数	100	100
最大速度范围	$[-1, 1]$	$[-1, 1]$
惯性权重	$\omega_{max} = 0.9$ $\omega_{min} = 0.4$	$\omega(t) = \omega_{max} - \frac{(\omega_{max} - \omega_{min}) \times t}{T_{max}}$
学习因子	$c_1 = c_2 = 2$	$c_1 = 2 - \sin \frac{t\pi}{T_{max}}$ $c_2 = 1 + \sin \frac{t\pi}{T_{max}}$

将 Griewank 函数随机生成 2000 个样本，其中 1950 次样本用来同时训练改进前后的 PSO-BP 算法，50 次样本包括全局极值用于测试两种算法拟合性，最终将两种算法的结果进行对比分析。图 3.8 为两种算法的误差变化曲线图。

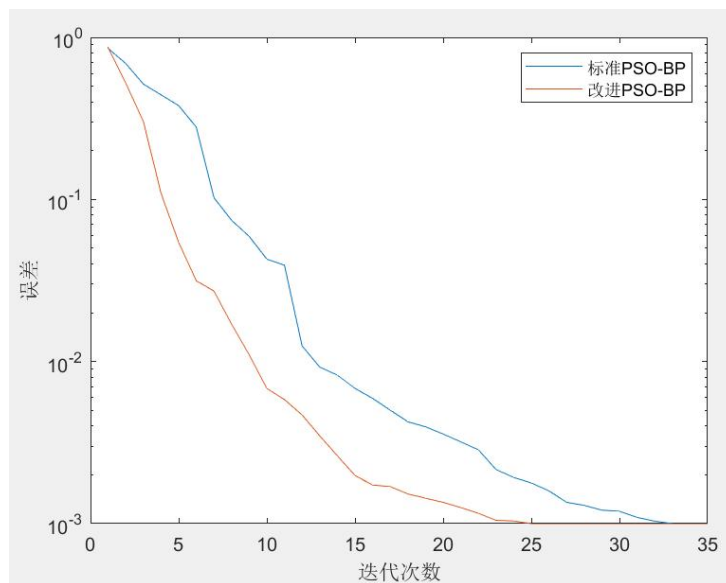


图 3.8 两种算法误差曲线

图 3.8 表明改进后的 PSO-BP 算法比标准 PSO-BP 算法在收敛速度上更胜一筹。

为了进一步直观反映算法测试性能，将改进前后 PSO-BP 的 50 组测试结果一起进行比较。下图 3.9 为两种算法测试的平均方差折线图。

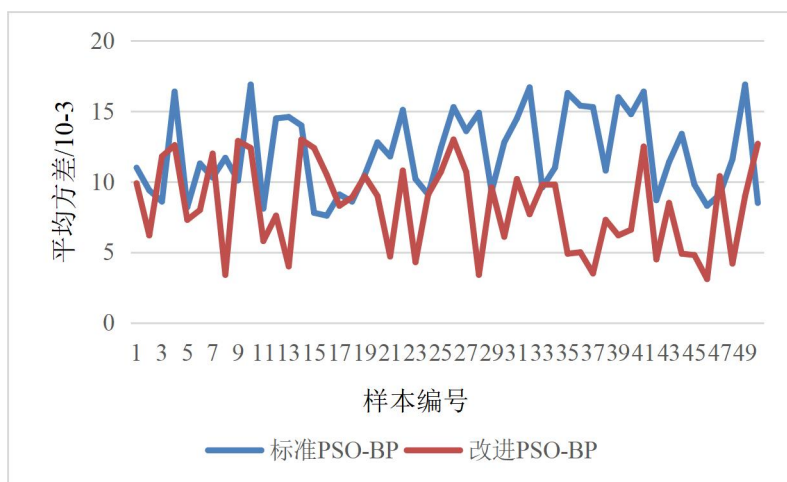


图 3.9 改进前后 PSO-BP 测试方差折线图

从上图 3.9 的测试结果可以看出，改进 PSO-BP 算法的平均方差大都小于标准 PSO-BP 算法的平均方差。

分别计算改进前后算法对电梯故障诊断测试的均方误差（MSE），结果如下表。

表 3.3 改进前后 PSO-BP 算法的 MSE

期望输出	标准 PSO-BP	改进 PSO-BP
测试样本均方误差	12.01e3	8.29e3

从表中可以看出改进后的 PSO-BP 在 Griewank 测试函数中表现更好，均方误差减少了 30.9%。

3.3 测试与分析

3.3.1 初始参数设置

为了检验改进后的 PSO-BP 算法对电梯故障检测的优化效果，选择电梯曳引系统中常见的两种故障作为测试对象，并作为输出层。根据资料与经验把以下几项电梯采集信号类型作为输入层，最终样本输入层的电梯信号类型如下表 3.4。

表 3.4 输入层电梯信号类型

特征编号	信号类型
X1	曳引机三相供电电压（V）
X2	曳引机三相供电电流（A）
X3	电梯运动加速度（ m/s^2 ）
X4	电梯垂直振动加速度（ cm/s^2 ）

表 3.4 (续)

特征编号	信号类型
X5	电梯水平振动加速度 (cm/s^2)
X6	机房噪声 (dB(A))
X7	轿厢噪声 (dB(A))
X8	制动器线圈温度 ($^{\circ}C$)

输出层的电梯故障类型如下表 3.5。

表 3.5 输出层电梯故障类型

特征编号	Y1	Y2	Y3
信号类型	正常情况	电动机异常	制动器异常

BP 神经网络的最大训练次数 500，收敛精度 10^{-3} ，梯度下降法的学习速率为 0.01。

由于输入参数数量为 8，故确定 BP 神经网络输入层节点数量为 9，输出参数数量为 3，故确定 BP 神经网络输入层节点数量为 3，隐含层节点数量根据经验公式 3.17 (2) 进行估算，故隐含层的节点数量大致在 5-15 之间。图 3.7 为不同隐含层节点数下的 BP 神经网络的训练精度值。由图可知当隐含层节点数选取 12 时，网络的训练精度最高，故设置隐含层节点数为 12。

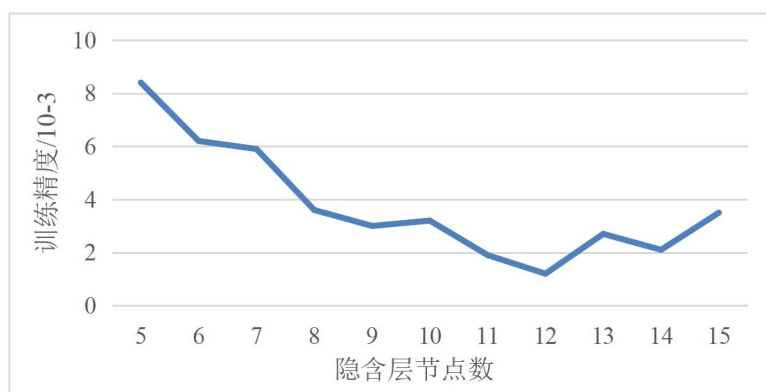


图 3.10 不同隐含层神经网络训练精度

根据 BP 神经的结构，利用公式 (3.9) 计算出 PSO 算法中的粒子群维度 M 为 147。

$$M = (m+1) \times l + (l+1) \times n \quad (3.24)$$

上式中， m 表示为输入层的节点数； l 表示为隐含层的节点数； n 表示输出层的节点数。

应用改进后的 PSO 算法使得 BP 神经网络的初始权值和阈值更接近于全局最优解，改进后的 PSO 算法的测试参数设置如表 3.6 所示。

表 3.6 改进的 PSO-BP 算法参数值

参数	改进后的 PSO 算法
种群规模	100
种群维度	147

参数	改进后的 PSO 算法
最大迭代次数	100
最大速度范围	[0,5]
惯性权重	$\omega(t) = \omega_{max} - (\omega_{max} - \omega_{min}) \times [1 + \cos\left(\frac{(t-1)\pi}{T_{max}-1}\right)]$
学习因子	$c_1 = 2 - \sin \frac{t\pi}{T_{max}}$ $c_2 = 1 + \sin \frac{t\pi}{T_{max}}$

3.3.2 测试结果与分析

样本数量为 200，不同类型故障分部均匀，70%作为训练集合，30%作为测试集合。分别使用标准 PSO-BP 算法和改进后的 PSO-BP 算法对其进行测试，最终均方误差的迭代图如图 3.11 所示。

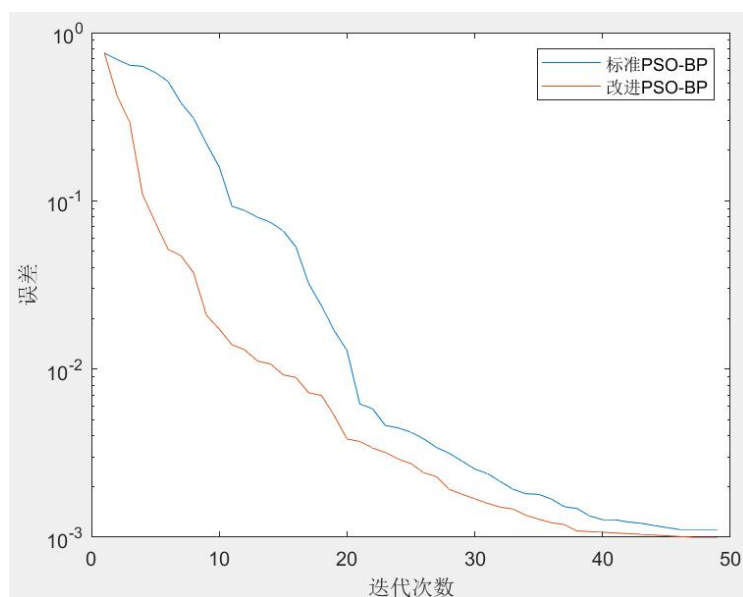


图 3.11 改进前后 PSO-BP 算法的误差迭代图

可以看出改进 PSO-BP 在到达 37 次后基本达到 10^{-3} 收敛精度预期，迭代次数降低了 21.3%，较标准 PSO-BP 算法收敛速度与精确度都有提升。

为了进一步体现改进 PSO-BP 算法对电梯故障诊断准确度的优化，图 3.12 为 60 组测试样本使用两种算法测试后的方差折线图。

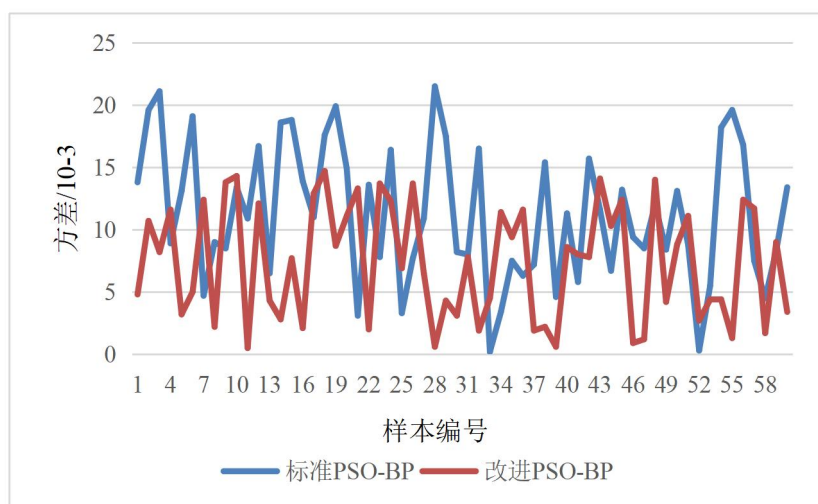


图 3.12 改进前后 PSO-BP 算法测试组方差折线图

从上图直观地反映了测试集合中两种算法的均方差情况，改进后 PSO-BP 算法的误差曲线要更稳定，误差值普遍更小。

分别计算改进前后算法对电梯故障诊断测试的均方误差（MSE），结果如下表 3.7。

表 3.7 改进前后 PSO-BP 算法的 MSE

期望输出	标准 PSO-BP	改进 PSO-BP
总测试样本均方误差	11.295e3	7.397e3

从表中可以看出改进后的 PSO-BP 在部分常见电梯故障诊断中表现更好，均方误差相对减少了 34.6%。

3.4 本章小结

本章针对电梯故障诊断准确性与速度不足的问题，在原有的电梯故障诊断算法基础上进行优化。首先对 BP 神经网络算法的原理进行的分析，在指出其局限性的同时提出使用粒子群算法进行优化，并通过加入烟花算法和动态步长系数的方式加强算法的全局搜索能力、加快了收敛速度。将电梯传感器采集到的数据通过优化后的 PSO-BP 算法进行训练，验证了优化 PSO-BP 算法对电梯故障检测的准确度和速度相比于标准 PSO-BP 算法有一定的提升。

第四章 电梯群控调度优化方案

科技随着城市现代化建设的高速发展，高层及超高层建筑的数量和占地面积不断增加，这就需要在—幢楼中部署多部电梯，这样才能满足众多用户或商户的需求^[62]。由于楼层高度逐渐增加，用户在使用电梯时的等候时间和乘梯时间也逐渐增加，容易获得不好的体验，故电梯群控调度方案越来越受到重视与研究^[63]。有调查显示，大楼中公共能耗主要分布于公共区域照明、中央空调系统以及电梯系统三大方面，可见电梯系统的能耗占比靠前，故提高电梯调度的效率既有助于整栋大楼贯彻节能环保理念，也使得人们的出行更为便捷化，这种差异在拥有多部电梯的楼宇内更为显著^[64]。在装有三部及以上电梯的大楼中采用电梯群控系统（Elevator Group Control System, EGCS）便可以根据应用场景动态变化，如上班高峰、下班高峰或楼层间随机运输等情况，选择合适匹配的调度方案、根据科学全面的考核指标，在基于用户良好舒适的乘梯体验基础之上节省大楼能源消耗。在大力推行智能化楼宇的城市，自动化概念已经从制造行业传播到人们的日常出行中，如何应用高效且智能的算法便是当下研究的重点^[65]。本章主要提出一种智能算法对电梯群控调度方案进行优化，提高用户的使用体验，降低电梯群控系统的能耗。

4.1 电梯调度方案相关理论

4.1.1 传统电梯调度算法

电梯调度在实际应用中是十分复杂，具有许多动态特性。简单的电梯调度有这几种模式：

- 1) 先到先服务。单纯地根据乘客按下电梯请求按钮的顺序来排列接送顺序，看起来很公平，却不实用。
- 2) 最短优先。电梯离谁最近先接谁。对比模式 1 减少了空跑，但是很容易导致楼层偏僻的同学永远使用不上电梯。
- 3) SCAN 算法。电梯在最低与最高楼层之间进行往返，只有到达最底层或最高层后才会变换方向，有较大优化空间。
- 4) LOOK 算法。对 SCAN 算法进行优化，电梯在最低呼梯请求的楼层与最高呼梯请求的楼层之间往返，优先响应当前方向上的服务请求。优点在于简单，效率不错，但还有优化空间。

目前许多高楼的电梯调度算法使用的是 LOOK 算法，之所以说这类方案的乘客总耗时仍然有进步空间，可以通过一个简单的例子说明：一部电梯在 10 楼，目前在 5 楼和 25 楼同时发出向上呼梯请求，这时按照 LOOK 算法就会优先服务 25 楼的用户，但是耗时最短的方案是优先服务 5 楼的用户。

大多数群控电梯调度方案与单部电梯的调度方案相同，没有充分利用多部电梯的优势，同样还有许多优化空间。

随着人工智能技术的兴起，众多专家学者对电梯群控调度方案做出了重大贡献，相较于传统电梯调度方式，人工智能技术具有较强的自学能力。且人工智能技术对于处理复杂系统下的多目标性能指标的优化问题有良好的表现，最典型的应用莫过于数学领域中的著名问题——旅行推销员问题，而电梯调度问题由于存在承载上限的原因更类似于车辆路线问题。目前电梯群控调度方法主要包括经验知识系统、机器学习、深度学习和群体智能搜索算法等等。

4.1.2 人工蜂群（ABC）算法介绍

人工蜂群算法为电梯群控调度算法常用算法之一，其搜寻模式是模拟人工蜂群的团队协作能力进行觅食的过程，算法初期所需设定的参数较少，在迭代中所展现的鲁棒性较强。ABC 算法中的蜂群有三种成员：受雇的蜜蜂、旁观的蜜蜂与侦察兵，求解多目标优化问题的所有答案对应为蜂群寻找的花蜜，也叫食物源，蜂群的最终目标是寻找含蜜量最高的花蜜。ABC 算法中的概念具体意义如下：

（1）食物源：食物源位置代表优化问题的可行解，所包含花蜜的信息等价于评价相关解的质量（适应性）；

（2）受雇的蜜蜂：可称为引领蜂、雇佣蜂、采蜜蜂等，雇佣蜂的数量与蜂巢周围食物来源的数量相等，每一只受雇的蜜蜂都会通过它记忆中的食物来源确定最接近的食物源位置，身负搜索新食物源的任务，评估食物源所蕴含的花蜜量，即可能解的适应性，采集完花蜜后返回蜂巢，通过跳摇摆舞与蜂巢内其余蜜蜂分享讯息，进入招募阶段。

（3）旁观的蜜蜂：可称为跟随蜂或观察蜂等，在招募阶段可以根据特定选择概率来跟随其中一只采蜜蜂，并在该采蜜蜂所采集的食物源周围搜寻是否存在更优质的食物源；

（4）侦察兵：可称为侦查蜂，从不与其他蜜蜂结伴或合作，独自寻找蜜源，在找到蜜源后可转变成采蜜蜂，同样具有招募阶段。

4.1.3 人工蜂群（ABC）算法原理

应用人工蜂群算法求解多目标组合优化问题时，食物源($i=1,2,\dots,N$)的位置便是优化问题的潜在可行解，根据评价函数可量化食物源的适应性， SN 为食物源的最大数量。基本人工蜂群算法在算法运行的初始阶段确定种群的数量、优化问题的维度、最大迭代次数、食物源的更新最大周期数。

采蜜蜂根据式（4-1）在记忆中的最佳食物源处附近搜索新食物源：

$$v'_{id} = x_{id} + \phi_{id} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (4.1)$$

其中， $i=1,2,\dots,SN$ ， SN 表示食物源的最大数目； $j=1,2,\dots,D$ ， D 表示所需优化的组合问题的解空间维度； ϕ_{id} 是属于 $[-1,1]$ 之间的随机数； $k \neq i$ ， v'_{id} 为新食物源。

采蜜蜂和观察蜂分享有关食物源的信息，观察蜂的作用是增加食物源更新的随机性，观察蜂选择采蜜蜂和食物源概率与食物源的适应度呈正相关，适应度越好。基本的 ABC 算法中，采蜜蜂在摇摆舞沟通后的雇佣阶段，会吸引观察蜂选择跟随。观察蜂计算选择可能性的方式一般采用经典轮盘赌的策略，如下式（4.2）。

$$p_i = \frac{fit(x_i)}{\sum_{j=1}^{SN} fit(x_j)} \quad (4.2)$$

其中， $fit(x_i)$ 为第 i 个蜜源的适应度值，代表着第 i 个食物源的花蜜量。若经过设定最高限制的周期数后，蜜源仍旧没有更新，为避免陷入局部最优，采蜜蜂与观察蜂将转变为侦查蜂，侦查蜂根据公式（4-3）独立搜索新食物源， $X_{max}(j)$ 和 $X_{min}(j)$ 为参数变化范围的上限和下限。

$$X_i(j) = X_{min}(j) + rand[0,1] \times (X_{max}(j) - X_{min}(j)) \quad (4.3)$$

ABC 算法的迭代搜索步骤如下：

- （1）初始化算法控制参数：合适的种群数量 SN ，食物源更新限制周期数、最大迭代次数，种群内采蜜蜂的最大占比；
- （2）搜索阶段：在解空间内随机生成食物源，计算每个食物源适应值，对其进行排序，按照设定比例分类采蜜蜂、观察蜂和侦查蜂；
- （3）开采阶段：采蜜蜂在解空间邻域内通过式（4-1）搜索一处新食物源，将其与记忆中的最佳食物源对比，贪心选择适应度更好的食物源，并将其替换记录；
- （4）雇佣阶段：观察蜂依照公式（4.2）计算可能性并择是否跟随采蜜蜂；
- （5）侦查蜂阶段：根据开采情况判断是否需要废弃原有蜜源，废弃后采蜜蜂和观察蜂均转化为侦查蜂，同时按照式（4.3）随机产生新蜜源进行替换，记住新的蜜源位置；
- （6）判断是否满足跳出迭代的条件，若满足，则输出最优蜜源，否则循环执行 Step2 到 Step5 阶段直至满足迭代结束条件。

4.2 基于改进 ABC 的电梯群控调度方案

4.2.1 模拟退火（SA）算法

模拟退火算法的含义为固体从高温状态自然冷却过程，固体内粒子的活跃程度在高温阶段杂乱无序，在渐渐降温的过程中，粒子也趋于有序状态，粒子在算法中一般代表随机跳跃的能力。SA 算法在求解部分复杂问题如 NP（Non-deterministic Polynomial）完全类问题时，效果优异，只是参数的调优过程较难。SA 算法主要分为随机产生新解并根据一定规则接受新解和渐渐降低新解的随机扰动范围，即 Metropolis 接受准则和退火过程。Metropolis 接受准则能够保证算法在搜索过程中避免得到局部最优，在高温度或低迭代次数时有较强的随机

跳出能力，即使是较差的解也有可能被接受，扩大了解的范围，增加了 SA 算法的多样性，并随着时间的推移趋于稳定，依然能保证后期的快速收敛能力。

以图 4.1 爬山搜索为例，假如有袋鼠的目的是跳到最高的山峰，普通算法容易从 A 点或 B 点固执地朝着局部最大值跳去，但如果结合模拟退火的机制，袋鼠会以一定概率朝着 B 点的右侧跳去，这样变有机会到达 C 点，有机会跳出局部最高的山峰而收敛至全局最高的山峰。

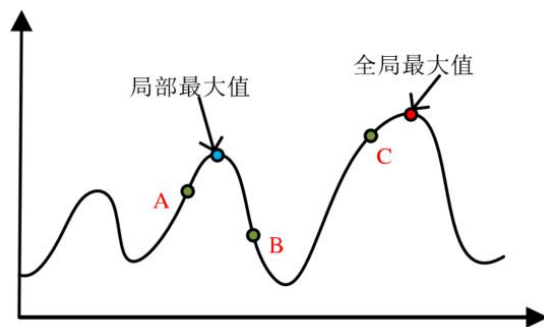


图 4.1 爬山搜索

模拟退火算法的流程图如图 4.2。

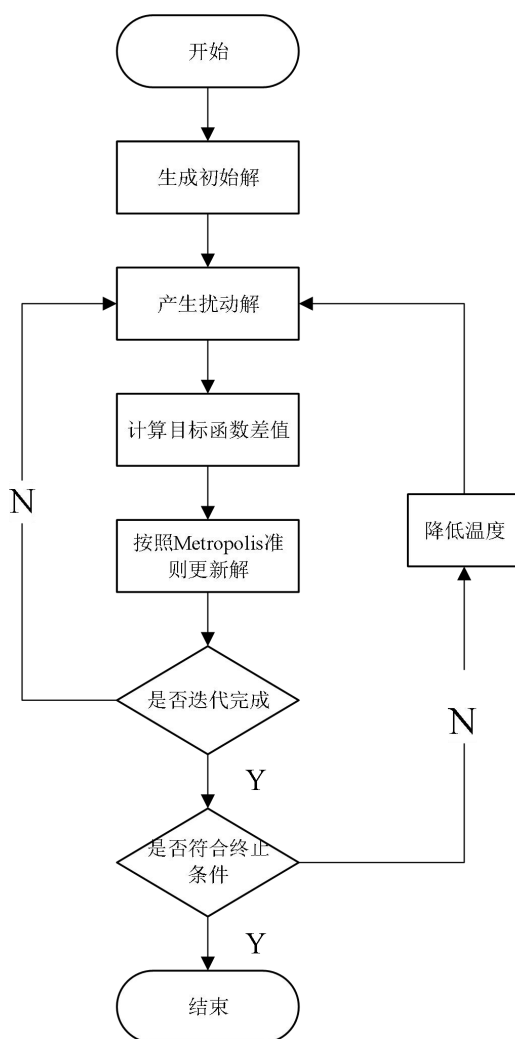


图 4.2 模拟退火算法流程图

模拟退火算法的一般求解流程如下：

- (1) 初始化退火算法的初始温度 T_0 。
- (2) 随机产生多个初始解，计算评价函数值，得到最优解。
- (3) 旧解随机跳跃至新解 s_1 ，计算新旧解之间的距离 Δf ：

$$\Delta f = f(s_1) - f(s_0) \quad (4.4)$$

(4) 根据 Δf 判断是否接受当前新解，若 $\Delta f < 0$ ，则接受当前新解并取代旧解，反之依据概率公式 (4.5) 来决定是否接收新解 s_1 ：

$$p = \exp\left(-\frac{f(s_1) - f(s_0)}{T}\right) \quad (4.5)$$

(5) 判断是否达到最大迭代次数，若否，返回重复步骤 (2) 至步骤 (4) 的扰动和接受过程。

(6) 判断当前温度 T 是否小于终止温度 T_{end} ，若是则终止算法，跳出循环，否则根据公式 (4.6) 降低温度，转到步骤 (2) 继续迭代搜索。

$$T = \alpha \times T, \alpha \in (0,1) \quad (4.6)$$

4.2.2 ABC 算法的优化方案

(1) 新蜜源选择策略优化

虽然基本 ABC 算法中利用侦查蜂的随机搜寻能力以增加收敛到全局最优的概率，但在处理某些复杂情况时收敛至最优解的难度依然较大。观察蜂和侦查蜂每当搜索到新蜜源时一般根据贪心策略更新当前蜜源，在抛弃适应度较差蜜源的同时，可能会忽略了通往全局最优解蜜源位置的路线，为了增强 ABC 算法的全局最优解搜索能力，加入了模拟退火的机制，以从高到低的概率替代原先单一的贪心选择策略，在算法初期拓展全局最优解的可能路线，整个过程缓慢降低温度 T ，在算法后期渐渐减少对低适应值的可行解的接受概率，提高整体算法求解电梯群控调度优化问题的性能。

加入模拟退火思想后的 SA-ABC 算法，在得到旧蜜源和新蜜源后，分别计算他们的适应度值 $fit(x_i)$ 和 $fit(x_j)$ ，根据概率 p_{ij} 选择接受保留其中一个蜜源并更新记录，计算公式如下式 (4.7)：

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, fit(x_i) < fit(x_j) \\ \exp\left(-\frac{fit(x_j) - fit(x_i)}{T}\right), fit(x_i) \geq fit(x_j) \end{cases} \quad (4.7)$$

(2) 采蜜蜂优化

分析采蜜蜂的搜索方式可得，采蜜蜂在搜索过程中所考虑的信息不够全面，仅仅在第 i 个蜜源附近等概率搜寻新蜜源，因此将个体当前最优值加入雇佣蜂的搜索模式中，提高算法

后期的局部搜索能力，加快整体收敛速度。将 x_{ijg} 记为第 i 个蜜蜂目前 d 维找到的蜜源最优位置。根据时间将调整权重的大小，故将公式 (4.1) 改进为公式 (4.8)。

$$v'_{id} = x_{ij} + c_1 \phi_{ijg} (x_{ijg} - x_{kj}) + c_2 \phi_{ij} (x_{ij} - x_{kj})$$

$$c_1 + c_2 = 1$$
(4.8)

其中 ϕ_{ijg} 为全局搜索因子，为 $[-1,1]$ 之间的随机数； c_1 和 c_2 为动态因子， c_2 的初值为 1，后续逐渐减少，最低为 0.5。

在电梯群控调度中，根据电梯群控优化模型的适应度评价函数 F 作为 SA-ABC 算法的适应度函数，SA-ABC 算法的流程图如图 4.3。

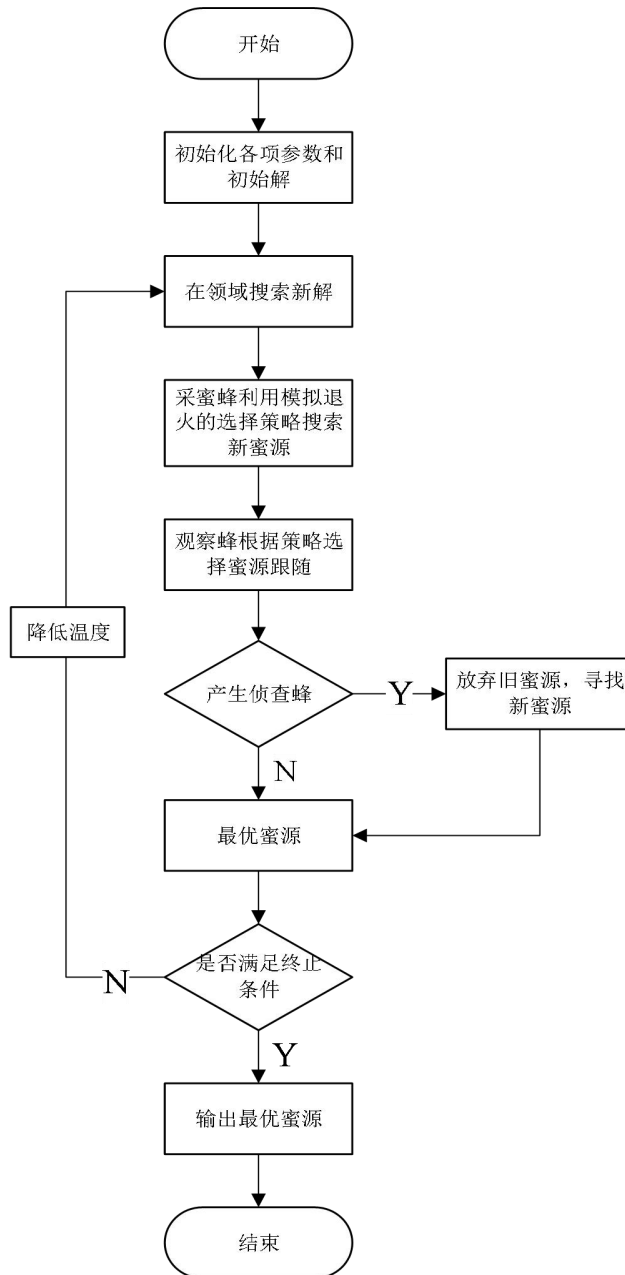


图 4.3 SA-ABC 算法的流程图

执行步骤如下：

步骤 1：设定算法中的初始参数，如种群规模 SN 、蜜源更新限制周期数 $limt$ ，算法最大迭代次数、初始温度 T_0 以及结束温度 T_{end} 等；

步骤 2：蜜源初始化并计算适应度值；

步骤 3：雇佣蜂阶段，根据公式（4.8）搜索新蜜源；

步骤 4：利用模拟退火思想，通过公式（4.7）的概率选择是否接受新蜜源；

步骤 5：跟随蜂阶段，根据轮盘赌的公式（4.3）来选择该蜜源；

步骤 6：判断当前采蜜蜂对应蜜源距离上次更新的时间是否超出最大限制周期数，若否，选择更优的蜜源并更新记录，否则采蜜蜂和跟随的观察蜂将抛弃当前蜜源，全部替换成侦查蜂，按照公式（4.5）来寻找新蜜源；

步骤 7：判断搜索是否跳出循环，若是，输出最优蜜源，否则根据公式（4.6）降低温度 T ，返回步骤 3 继续搜索。

4.3 电梯群控系统模型

对于乘客来说，电梯群控系统应当缩短乘客的候梯和乘梯时间、降低轿厢内的拥挤程度，对于高层建筑的管理者来说，希望多轿厢电梯群控系统科学合理地调节能耗与舒适间的关系，这便属于典型的多目标优化问题。本章根据电梯使用者与管理对于 EGCS 的朴素要求，结合性能评价相关函数的量化难度，提出新型电梯群控系统评价模型，囊括使用者的等候时间和乘坐时间、电梯系统的耗电程度等指标，并根据实际应用场景中的不同客流模式自由调整多个指标之间的权重。

4.3.1 系统评价指标

群控电梯系统的调度优化方案属于的组合优化问题，而群控电梯系统在实际应用场景下较为复杂，针对系统的优劣评价也比较难以量化。乘客的相关指标有：乘梯时间、候梯时间、过长时间等待放弃乘梯概率、乘梯体验舒适程度等等，电梯群控系统的指标主要在于系统整体能耗上。故方案根据系统和乘客的核心需求简化系统评价指标，将使用者的候梯时间和乘梯时间、电梯系统的能耗按照一定的权值加入到群控电梯调度总评价函数中。尽量在满足乘客乘梯体验的同时降低电梯的能耗。接下来介绍群控电梯调度系统的子目标评价函数。

（1）候梯时间评价函数

使用者的候梯时间主要指向电梯发出电梯使用请求到电梯平层并开门的时间，由电梯运行接近时间和停止时间构成，总体时间记为 $WT(i, j)$ ，表示第 i 部电梯运行到第 j 层所需等候时间。系统主要评价指标为每位乘客的平均候梯时间 $AWT(i, j)$ ，计算方式如下：

$$AWT(i, j) = \frac{\sum_{j=1}^{s_c} \sum_{i=1}^{s_i} WT(i, j)}{\sum_{i=1}^N N_i} \quad (4.9)$$

上式中 s_c 为电梯群的可联控总数, s_l 为楼层总数, N 为电梯实际载客人数。

一般候梯时间在一定时间以内, 乘客评价都较高, 反之在超过一分钟或两分钟后评价就都比较低, 故评价函数应为 S 型, 总体随时间的增加而减少。候梯评价函数表示为 $f_w(i, j)$, 约束条件如下:

$$f_w(i, j) = \begin{cases} 1, WT(i, j) = 0 \\ e^{aWT^2(i, j)}, 0 < WT(i, j) \leq wt_{max} \end{cases} \quad (4.10)$$

其中 a 为常数, wt_{max} 为等候时间最大值, 在候梯时间大于等于 wt_{max} 时 $f_w(i, j)$ 的值无限接近于 0, 可以设为一个极小值, 可以得到评价函数 $f_w(i, j)$ 为:

$$f_w(i, j) = e^{-0.0008WT^2(i, j)} \quad (4.11)$$

(2) 乘梯时间评价函数

乘梯时间主要指使用者乘坐电梯到达目标楼层所需时间, 记为 $RT(i, j)$, 则平均乘梯时间 $ART(i, j)$ 计算公式如下:

$$ART(i, j) = \frac{\sum_{j=1}^{s_c} \sum_{i=1}^{s_l} WT(i, j)}{\sum_{i=1}^N N_i} \quad (4.12)$$

其中 s_c 为电梯群可联控数, s_l 为最大楼层数, N 为电梯实际载客人数。

一般候梯时间在一定时间以内, 乘客评价都较高, 反之在超过一分钟或两分钟后评价就都比较低, 故评价函数应为 S 型, 总体随时间的增加而减少。候梯评价函数表示为 $f_w(i, j)$, 约束条件如下:

$$f_w(i, j) = \begin{cases} 1, WT(i, j) = 0 \\ e^{bWT^2(i, j)}, 0 < WT(i, j) \leq rt_{max} \end{cases} \quad (4.13)$$

其中 b 为常数, rt_{max} 为乘梯时间最大值, 在候梯时间大于等于 wt_{max} 时 $f_w(i, j)$ 的值无限接近于 0, 可以设为一个极小值, 可以得到评价函数 $f_w(i, j)$ 为:

$$f_w(i, j) = e^{-0.0006WT^2(i, j)} \quad (4.14)$$

(3) 系统能耗评价函数

与其他电器设备在开关机时耗能较大的情况类似, 电梯群控系统在运行过程中, 相比于运行过程所消耗的能量, 大部分能耗分布在电梯的平层及启动阶段。缘由在于电梯启停的加速度较大, 相同距离下匀速运动与减速再加速运行下的能耗差距当然也较大, 为了简化能耗量化指标, 方便数据采集和评价指标的计算, 本章利用所有电梯行驶过程中的停靠次数来表示系统的能耗。将第 i 部电梯的停靠次数记为 $n(i)$, 本高层建筑设为 h_{max} 层, 即单人使用电梯所经历的最高平层数为 h_{max} , 电梯系统能耗评价函数 $f_n(i)$ 公式为:

$$f_n(i, j) = \begin{cases} 1, n(i) = 0 \\ e^{cn^2(i)}, 0 < n(i) \leq h_{max} \end{cases} \quad (4.15)$$

其中 c 为常数，最后可以得到系统能耗评价函数 $f_n(i, j)$ 公式为：

$$f_w(i, j) = e^{-0.015n^2(i, j)} \quad (4.16)$$

4.3.2 群控电梯调度优化模型

在电梯群控系统中，需要考虑多个目标进行综合优化，一般为多个子目标值赋予不同的权重。本章根据 4.1.1 节中的乘客候梯时间、乘客乘梯时间、系统能耗建立系统调度优化模型。

群控系统调度综合评价函数首要关注的对象应该是使用者们的乘梯体验，而电梯系统的绿色节能程度次之，使用者的候梯时间与乘梯时间、电梯系统能耗与系统综合评价函数优劣程度应呈负相关。算法在根据系统评价函数选择函数值最大的哪一种派梯方案，系统调度优化函数 F 如下：

$$F = \omega_1 f_w + \omega_2 f_r + \omega_3 f_n \quad (4.17)$$

本模型充分考虑乘客在不同时间的不同需求，平衡乘梯时间评价函数与系统能耗评价函数的权重，在电梯使用高峰时降低系统能耗评价函数权重，使用频率较低时适当增加系统能耗评价函数权重。表 4.1 为本模型不同交通模式下子目标评价函数的权重值。

表 4.1 不同交通模式下的权重

交通模式	ω_1	ω_2	ω_3
上行高峰模式	0.45	0.45	0.1
下行高峰模式	0.4	0.45	0.15
随机层间模式	0.4	0.4	0.2

4.4 测试分析

4.4.1 模拟参数设置

针对基于改进 ABC 算法的电梯群控调度方案的仿真测试，系统仿真对象参数如下表。

表 4.2 电梯群控系统参数

参数项目	参数值
楼层数（层）	25
平均楼层高度（m）	4
电梯数量（台）	6

表 4.2 (续)

参数项目表	参数值
最大载重人数 (人)	18
开关门时间 (s)	6
乘客进出时间 (s)	5
电梯平均运行速度 (m/s)	2.5

4.4.2 电梯当前状态矩阵

(1) 电梯当前状态矩阵

当电梯存在外呼信号时, 需要知晓电梯当前状态, 包含电梯所在楼层, 当前承载人数以及电梯运行方向的信息, 电梯当前的运行方向分为静止、上行和下行三类。设置总共 M 台电梯, 电梯当前状态矩阵如下。

$$E = \begin{pmatrix} e_{1j} & e_{1s} & e_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{ij} & e_{is} & e_{ip} \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

式中: i 表示第 i 台电梯, $i=\{1,2,\dots,M\}$; j 表示第 j 层, $j=\{1,2,\dots,N\}$; s 为当前电梯运行状态, $s=0$ 表示静止, $s=+1$ 表示上行方向, $s=-1$ 表示下行方向; e_{ij} 表示第 i 台电梯目前在 j 层运行; e_{is} 表示第 i 台电梯的当前运行方向; e_{ip} 表示第 i 台电梯的当前载客人数。

(2) 电梯目标层矩阵

电梯内所有乘客当前的目标层矩阵如下。

$$A_i = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{p1} & \dots & a_{pj} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

式中: a_{pj} 表示有 p 个人在第 j 层下站, $i=\{1,2,\dots,M\}$, $j=\{1,2,\dots,N\}$, $p=\{1,2,\dots,18\}$ 。

(3) 电梯外部呼叫信号矩阵

$$C_i = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{j1} \\ c_{12} & \dots & c_{j2} \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

式中: $c_{j1}=1$ 表示第 j 层存在向高楼层运输乘客的需求, $c_{j1}=0$ 表示该层无此类型需求; $c_{j2}=1$ 表示第 j 层存在向低楼层运输乘客的需求, $c_{j2}=0$ 表示该层无此类型需求;

4.4.3 仿真分析

首先需要设置模拟初始参数, 电梯内初始人数为 0, 电梯外呼梯总人数设定为 25, 随机设置电梯初始位置, 随机模拟电梯当前状态、电梯内部目标层状态、呼梯信号状态。

4.4.3.1 上行高峰模式

上行高峰模式的限定条件如下：大多数行为是从少数低楼层，例如地下车库、门厅（1楼）等，上行去往随机高楼层，小部分行为随机。多次随机初始化模拟参数，生成多个样本，对每个样本分别使用传统 LOOK 算法、基本的 ABC 算法与改进后的 ABC 算法进行研究。对最终得到的算法迭代曲线与电梯群控调度优化模型的性能评价指标结果进行比较分析。

下图为上行高峰模式下的传统 LOOK 算法、标准 ABC 算法与改进 ABC 算法的最佳适应度曲线对比结果图。

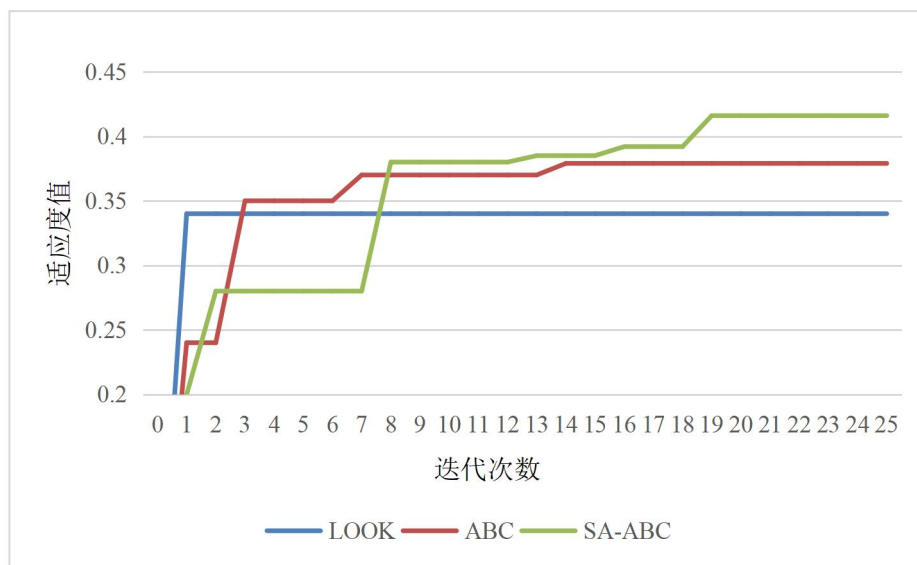


图 4.4 上行高峰模式下模拟曲线图

为了进一步说明模拟仿真的有效性，对各组样本仿真的最佳适应度情况进行研究，对不同算法下的三类系统性能指标进行分析，图 4.5 至图 4.7 分别为乘客候梯时间对比图、乘客乘梯时间对比图、电梯停靠次数对比图。

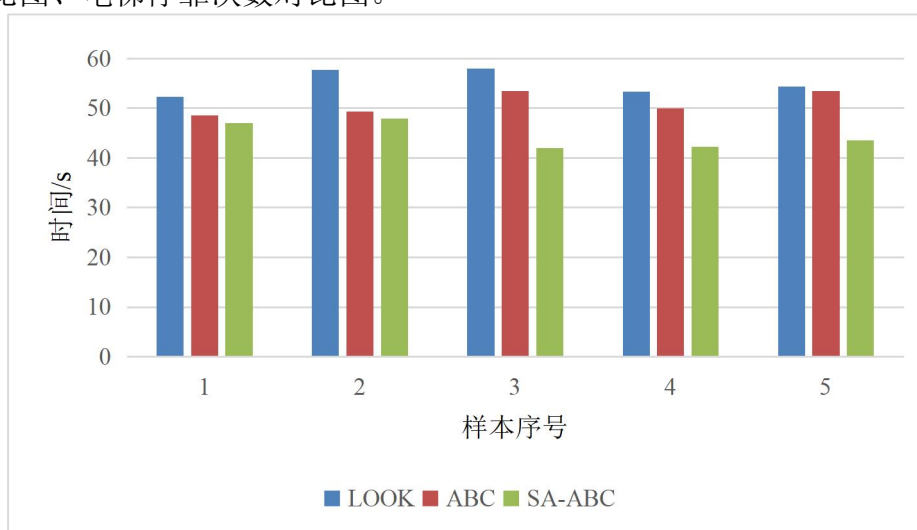


图 4.5 乘客乘梯时间对比图

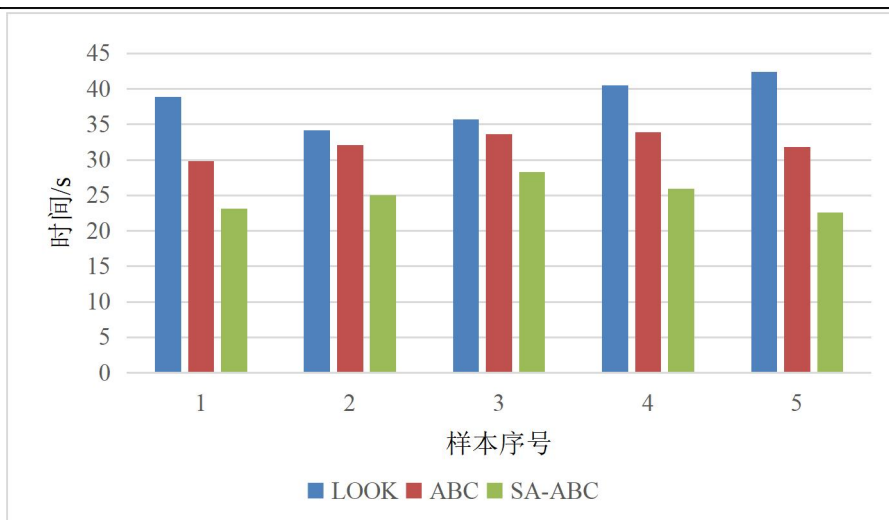


图 4.6 乘客候梯时间对比图

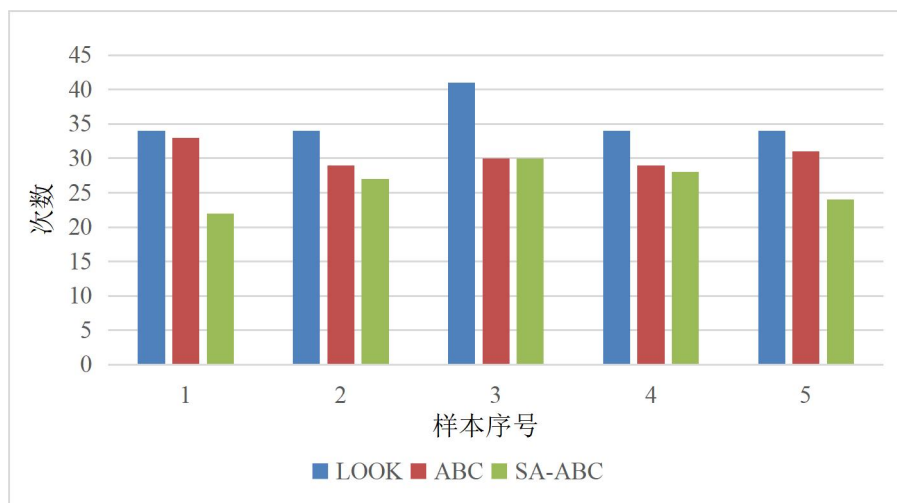


图 4.7 电梯停靠次数对比图

由图 4.5 至图 4.7 可看出在上行高峰模式下，改进后的 ABC 算法相比于传统 LOOK 算法和标准 ABC 算法，使用者的整体乘梯时间、电梯的平均停靠次数都有所减少。

上行高峰模式期间标准 ABC 算法与改进 ABC 算法的系统性能指标的仿真结果对比如表 4.3 所示。

表 4.3 系统性能指标对比

	LOOK	标准 ABC	改进 ABC
平均候梯时间/s	55.14	50.98	44.52
平均乘梯时间/s	38.34	32.24	24.98
平均停靠次数/次	35.4	30.4	26.2

由表可知，改进 ABC 算法相比于传统 LOOK 算法和标准 ABC 算法而言，平均候梯时间分别减少了 17.1%和 10.1%，平均乘梯时间减少了 24.2%和 20.2%，停靠次数分别减少了 26.0%和 13.8%，故系统能耗也有所减少。

4.4.3.2 下行高峰模式

上行高峰模式的限定条件如下：大多数行为是随机高楼层去往门厅（1楼），小部分行为随机。多次随机初始化模拟参数，生成多个样本，对每个样本分别使用传统 LOOK 算法、基本的 ABC 算法与改进后的 ABC 算法进行研究。对最终得到的算法迭代曲线与电梯群控调度优化模型的性能评价指标结果进行比较分析。

下图为下行高峰模式下的传统 LOOK 算法、标准 ABC 算法与改进 ABC 算法的最佳适应度曲线对比结果图。

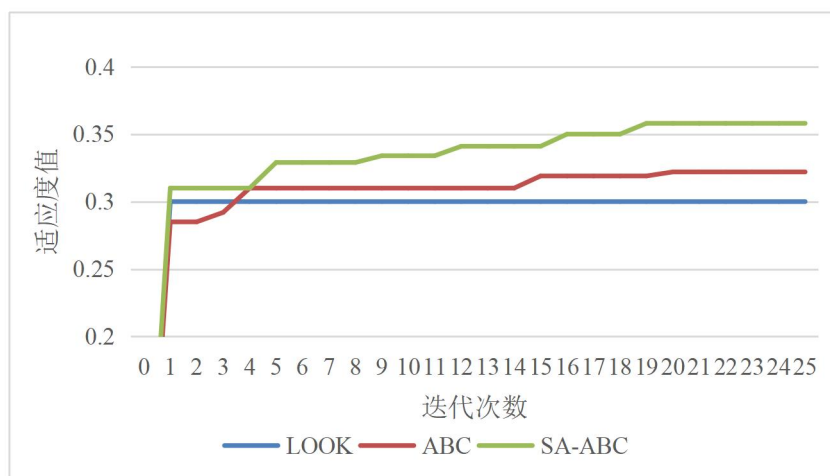


图 4.8 下行高峰模式下模拟曲线图

为了进一步说明模拟仿真的有效性，对各组样本仿真的最佳适应度情况进行研究，对不同算法下的三类系统性能指标进行分析，图 4.9 至图 4.11 分别为乘客候梯时间对比图、乘客乘梯时间对比图、电梯停靠次数对比图。

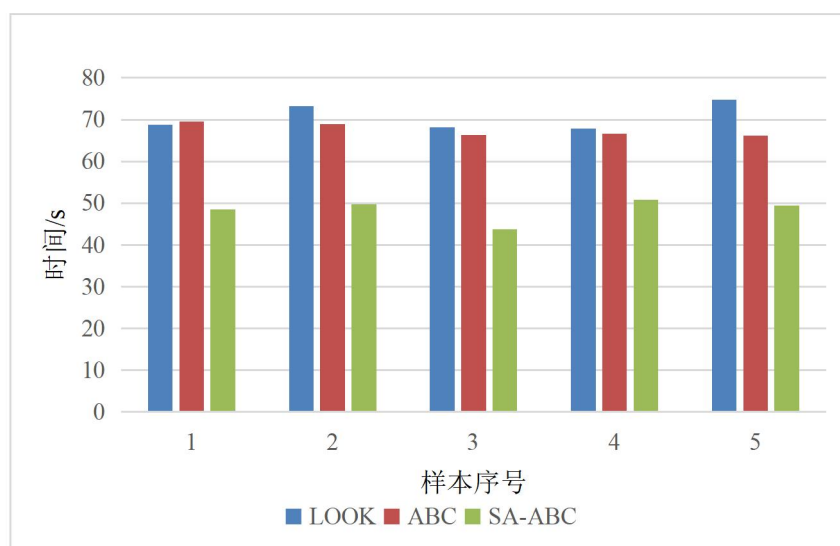


图 4.9 乘客乘梯时间对比图

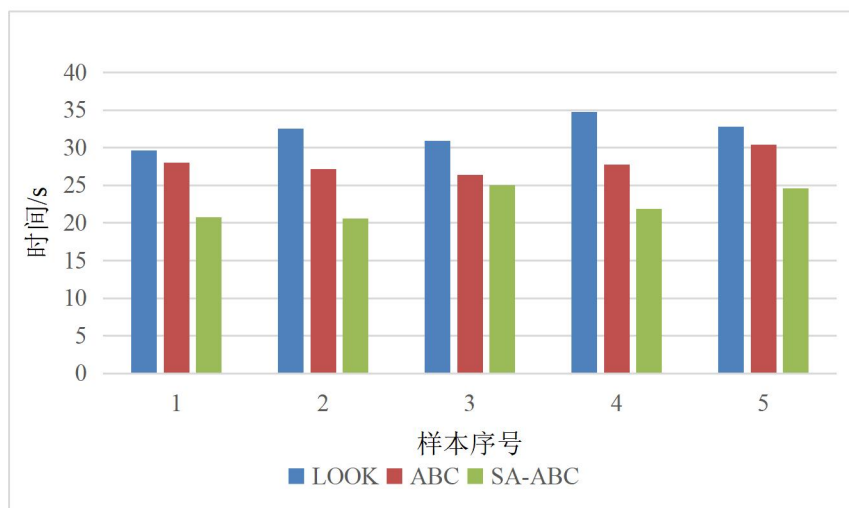


图 4.10 乘客候梯时间对比图

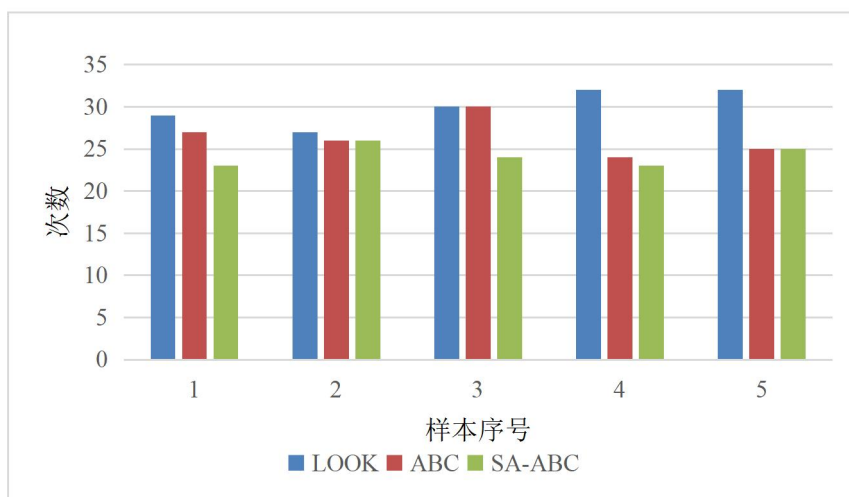


图 4.11 电梯停靠次数对比图

由以图 4.9 至图 4.11 可看出在下行高峰模式下，改进后的 ABC 算法相比于传统 LOOK 算法和标准 ABC 算法，使用者的整体乘梯时间、电梯的平均停靠次数都有所减少。

下行高峰模式期间标准 ABC 算法与改进 ABC 算法的系统性能指标的仿真结果对比如表 4.4 所示。

表 4.4 系统性能指标对比

	LOOK	标准 ABC	改进 ABC
平均候梯时间/s	70.56	67.56	48.46
平均乘梯时间/s	32.12	27.96	22.58
平均停靠次数	30	26.4	24.2

由表可知，改进 ABC 算法相比于传统 LOOK 算法和标准 ABC 算法而言，平均候梯时间分别减少了 31.1%和 28.2%，平均乘梯时间减少了 29.7%和 19.2%，停靠次数分别减少了 19.3%和 8.3%，故系统能耗也有所减少。

4.4.3.3 随机层间模式

随机层间模式的限定条件如下：所有行为均为随机。多次随机初始化模拟参数，生成多个样本，对每个样本分别使用传统 LOOK 算法、基本的 ABC 算法与改进后的 ABC 算法进行研究。对最终得到的算法迭代曲线与电梯群控调度优化模型的性能评价指标结果进行比较分析。

下图为随机层间模式下的传统 LOOK 算法、标准 ABC 算法与改进 ABC 算法的最佳适应度曲线对比结果图。

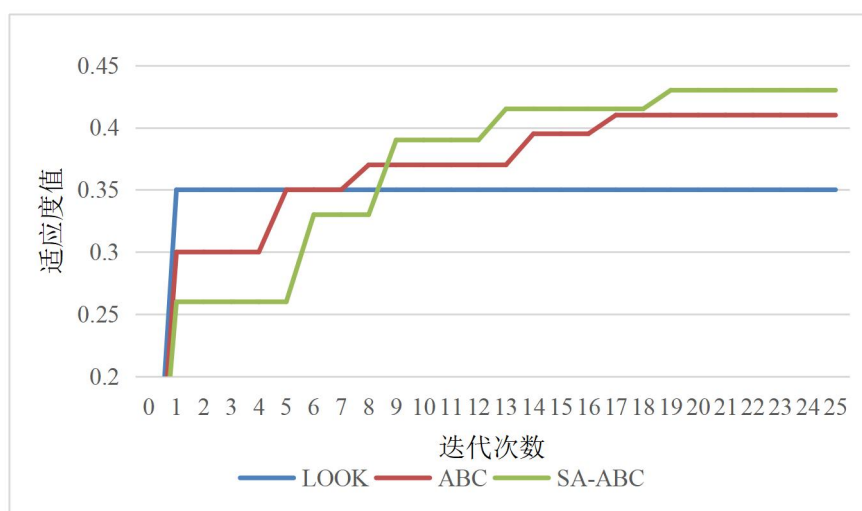


图 4.12 随机层间模式下模拟曲线图

为了进一步说明模拟仿真的有效性，对各组样本仿真的最佳适应度情况进行研究，对不同算法下的三类系统性能指标进行分析，图 4.13 至图 4.15 分别为乘客候梯时间对比图、乘客乘梯时间对比图、电梯停靠次数对比图。

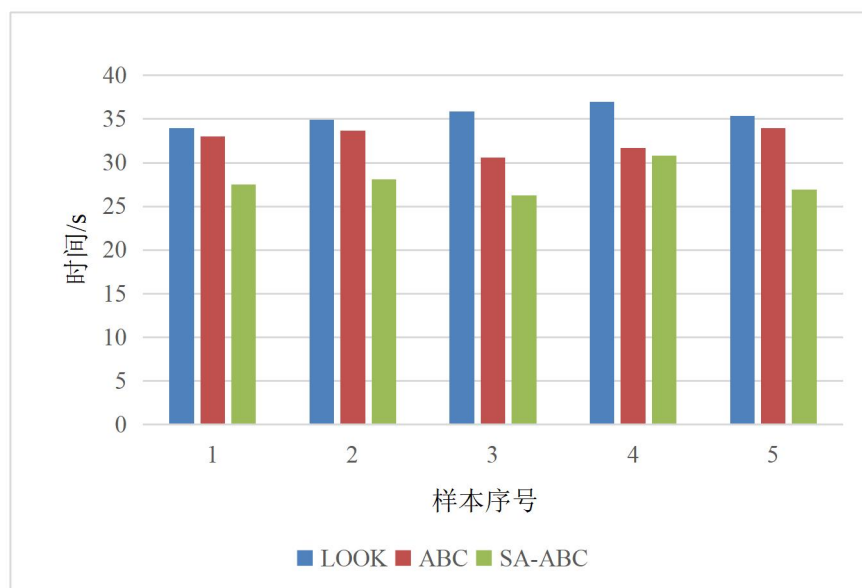


图 4.13 乘客乘梯时间对比图

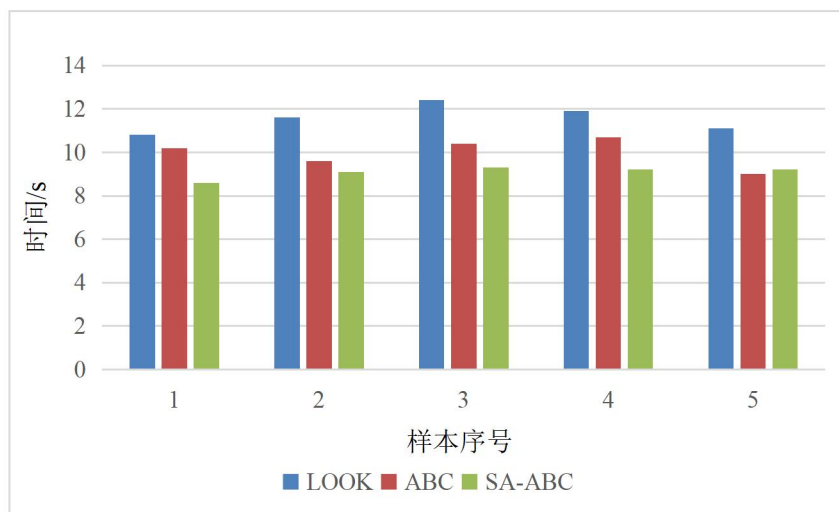


图 4.14 乘客候梯时间对比图

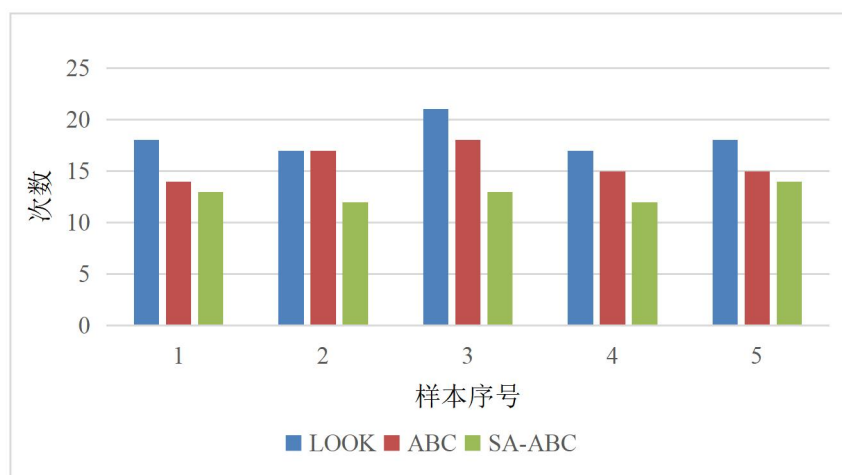


图 4.15 电梯停靠次数对比图

由图 4.13 至图 4.15 可看出在随机层间模式下，改进后的 ABC 算法相比于传统 LOOK 算法和标准 ABC 算法，使用者的整体乘梯时间、电梯的平均停靠次数都有所减少。

随机层间模式期间标准 ABC 算法与改进 ABC 算法的系统性能指标的仿真结果对比如表 4.5 所示。

表 4.5 系统性能指标对比

	LOOK	标准 ABC	改进 ABC
平均候梯时间/s	35.44	33	27.92
平均乘梯时间/s	11.44	10.14	9.08
平均停靠次数	18.2	15.8	12.8

由表可知，改进 ABC 算法相比于传统 LOOK 算法和标准 ABC 算法而言，平均候梯时间分别减少了 21.3%和 14.4%，平均乘梯时间减少了 21.5%和 9.0%，停靠次数分别减少了 29.7%和 19.0%，故系统能耗也有所减少。

4.4.3.4 整体方案总结

电梯群控调度优化方案主要根据上行与下行呼梯请求分布状况来应用合适的模式，以得到更为合理的派梯方案，对于电梯群控调度优化方案整体如何适用这三种模式，可见下表所示。

表 4.6 电梯群控调度整体方案

交通模式	判断标准
上行高峰模式	上行请求数量占总请求 70%及以上，且行程起点为 1、2 层
下行高峰模式	下行请求数量占总请求 70%及以上，且行程终点为 1、2 层
随机层间模式	其余情况

本节所提出的三种客流模式下的仿真结果体现了改进后的 SA-ABC 算法对于电梯群控调度优化在三种客流模式下的实用性与高效性，改善了乘客的使用体验并减少了系统能耗。提高了整个电梯群控系统（EGCS）的服务质量以及性能。

4.5 本章小结

本章节对电梯群控系统的原理进行了阐述，研究了如何建立了电梯群控系统优化模型，并对客流强度进行分类分析，给出了不同交通模式下的优化目标结构。对 EGCS 调度优化算法进行了研究，分析了传统电梯调度方案，然后对人工蜂群算法进行改进，模拟建立电梯运行状态与呼梯状态等输入，测试改进算法的性能。通过与传统调度算法和传统 LOOK 算法、标准人工蜂群算法进行对比，表明在平均候梯时间、平均乘梯时间和系统能耗上都能取得更优秀的效果，证实了所提新型派梯方案的合理性、实用性。

第五章 总结与展望

5.1 本文工作总结

近年来,物联网技术蓬勃发展,逐渐改变了人们的生活方式,极大改善了人们的生活质量。电梯保有量保持较高的增长率,电梯物联网产业在我国也处在高速发展时期,但是电梯物联网平台的建设存在标准不统一、数据独立,维保功能不够完善等问题。本文针对电梯物联网平台建设的核心需求与项目特点,设计了一套基于物联网技术的电梯运维系统。系统通过 4G 模块将电梯实时运行数据上报到云平台,能够通过 Web 端对电梯的大小数据实时监控,还能够与移动端联动,对电梯维保和维修的过程进行细致地追踪与记录,随时对不同项目、电梯的人员变动进行综合管理。对电梯系统的故障诊断提出一种优化方案,加强电梯的安全性。对电梯群控系统的调度提出一种优化方案,对乘客的平均乘梯体验与系统能耗的节省有一定的提升。本文主要做了以下工作:

(1) 对当前众多电梯运维系统进行调研分析,结合目前项目需求,将电梯通过智能网关与中国移动物联网云平台 OneNET 相连,能够持续将电梯数据传输至云平台并进行永久储存,解决了数据壁垒与数据丢失的问题,且便于后续对数据的分析与处理。设计 Web 端与移动端的多个模块,实现以下几项功能:随时掌握电梯系统的多项指标与简单分析;监控每一部电梯的详细运行数据;结合移动端小程序和微信推送高效地应对电梯故障,通过详细的故障信息提高维修质量,降低维修时间,记录储存维修信息并做到责任到人;将定期保养和紧急维修的信息统一储存并分析,可以随时查看;通过人员、权限、项目和部门多个维度管理电梯运维系统,高效且自由。

(2) 针对基于物联网技术的电梯运维系统的核心安全问题进行深入研究,电梯故障诊断的准确率对于维保人员至关重要。本文针对几种高频电梯故障类型运用神经网络智能算法进行诊断。对于普通的 PSO-BP 神经网络,本文对 PSO 算法易陷入局部最佳的情况进行了以下优化:优化惯性和学习因子;加入动态步长系数;加入烟花算法,加强了 PSO 算法的全局搜寻能力和收敛速度。使用复杂测试函数论证了改进后 PSO-BP 算法的性能对比原来有一定提升,再对大量电梯正常与故障运行数据进行分析,取得了不错的效果,证实了改进后 PSO-BP 算法对于电梯故障的辅助诊断具有良好的应用价值。

(3) 电梯的核心作用是为乘客上下楼提供便利,高楼内人数众多,需要使用多台电梯,而电梯群控的不同调度方式对乘客使用体验的影响比较大,且在耗电方面也有一定差距。本文设计的电梯运维系统旨在获取乘客的交互信息后,通过算法设计更为合理的调度方案,以实现更高效调度电梯、节约系统能耗的目的。首先建立一般系统性能指标表征乘客使用体验与系统能耗。对一般 ABC 算法通过加入动态因子和模拟退火算法两种策略进行优化。在三

种交通模式下进行仿真，表明了改进后的 SA-ABC 算法在乘客乘梯耗时与系统能耗上均有一定优化。

5.2 展望

本文设计的基于物联网技术的电梯运维系统，解决了电梯远程运维的难点，实现故障报警主动推送、维保流程透明详细的功能，并对电梯故障诊断与电梯群控调度上做出了一定优化。但是由于个人经验不足、项目开发周期较短、电梯故障错综复杂，本系统还存在不足之处，还有许多发展空间。

（1）电梯远程运维所监测的监控点还有所不足，需要在满足经济性价比的情况下，尽量全面地安装合适的传感器，为电梯的安全持久保驾护航。同时在传输数据量巨大的情况下可以在网关加入边缘计算筛选出部分无意义的的数据。运用 5G 技术，减少系统数据互联互通的延迟，让用户拥有更方便快捷的体验，让政府、企业、物业多个部门获得更高的效益。

（2）电梯故障种类繁多，相对应的故障原因及故障部位更是数不胜数，利用人工智能技术对电梯故障诊断的范围与复杂程度还能进一步加强，为维保员提供进一步便利。

（3）电梯群控调度方案在实际运行中将会遇到更为复杂多变的情况，例如：不同交通模式需要实时根据情况调整；乘客流动的人数很难精确获得且容易变化，高峰时容易出现乘客等待时长过久而放弃等待的情况，将来可以开发专属 app 进行配合。

参考文献

- [1] 李翔. 浅谈电梯的电气控制系统故障诊断及维修技术[J]. 技术与市场, 2020, 27(11): 107+109.
- [2] 冷子文, 卜永刚, 朱文杰. 神经网络在电梯故障诊断中的应用[J]. 中国电梯, 2019, 30(19): 70-72.
- [3] 叶杨庆. 对基于遗传算法的电梯调度模式的改进与分析[J]. 信息通信, 2019(02): 29-30.
- [4] 魏山虎. 电梯故障诊断与维修[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2013.
- [5] 李琨, 张久亭, 陶然, 许有才. 基于VMD-SVD与SSA-SVM的电梯导轨故障诊断[J]. 信息技术, 2021(10): 98-104.
- [6] 陈述. 电梯检验检测技术分析及发展趋势探究[J]. 山东工业技术, 2017(21): 32.
- [7] 石守印. 电梯物联网技术的应用[J]. 中国新技术新产品, 2018(15): 38-39.
- [8] 崔世坤, 陈继文, 杨红娟. 物联网技术及其在电梯中的应用[J]. 中国电梯, 2013(21): 6-10.
- [9] 张靓, 李嘉诚. 智慧电梯物联网系统设计方案与研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(04): 166-167+170.
- [10] 唐强. 电梯物联网技术的应用研究. 现代经济信息, 2018(23): 316+318.
- [11] 杨华. 电梯物联网现状及发展方向思考. 中国电梯, 2019. 30(16): 27-33.
- [12] 蒋雨奇, 韦佳宜, 蒙焕兰, 余钟昌, 易健豪. 基于4G/5G物联网的电梯安全监控系统的设计与实现[J]. 电脑编程技巧与维护, 2021(09): 88-89+96.
- [13] 丁杰. 浅谈电梯物联网的发展[J]. 智能制造, 2020(10): 60-62.
- [14] 林燕, 李刚, 林创鲁, 罗永通. 电梯物联网技术国内外发展现状综述[J]. 中国电梯, 2019, 30(09): 35-37.
- [15] 田明, 芮延年. 电梯安全性远程监控技术与故障诊断[J]. 化工管理, 2015(30): 202.
- [16] 胡兹, 汪有韬, 陈颖, 刘晓青. 对电梯安全性远程监控技术与故障诊断的探讨[J]. 科技资讯, 2019, 17(26): 18+20.
- [17] 陶陶. 电梯安全性远程监控技术与故障诊断[J]. 工程建设与设计, 2018(02): 271-272.
- [18] 乔久鹏. 电梯故障检测及诊断系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [19] 高峰. 电梯故障诊断专家系统的研究与开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [20] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术[J]. 自动化学报, 2009, 35(06): 748-758.
- [21] 刘裕泉. 动态系统的故障诊断技术研究[J]. 机电信息, 2014(12): 92-93.
- [22] 李小珊. 一种基于OneNET物联网的电梯数据远程监测系统[J]. 中国电梯, 2021, 32(19): 13-15.

- [23] An Ziliang, Liu Shaofeng, Bai Dingsong, Wang Ning, Yu Xintong. Intelligent monitoring system of elevator Internet of things[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 791(1): 012127.
- [24] Juanjuan Li. Proceedings of 2017 4th International Conference on Machinery, Materials and Computer[C], Paris: Atlantis Press, 2017: 93-96.
- [25] Ohhoon Kwon, Eunji Lee, Hyokyung Bahn. Sensor-aware elevator scheduling for smart building environments[J]. Building and Environment, 2014, 72: 332-342.
- [26] 林创鲁. 基于NB-IoT的电梯物联网智能监测终端设计[J]. 中国电梯, 2021, 32(15): 42-44+51.
- [27] 邓成. 神经网络技术在电梯故障诊断中的应用[J]. 黑龙江科技信息, 2016(16): 72.
- [28] 郑建军, 陈志军, 杜克峰. 最小二乘支持向量机在电梯故障诊断中的应用(英文)[J]. 机床与液压, 2012, 40(12): 43-50.
- [29] 包健, 魏丽娜, 赵建勇. 基于有限状态机的电梯控制系统故障诊断方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(06): 1692-1695.
- [30] Lan-Da Van, Yi-Bing Lin, Tsung-Han Wu, Tzu-Hsiang Chao. Green elevator scheduling based on IoT communications[J]. IEEE Access, 2020(8): 38404-38415.
- [31] You Zhou, Kai Wang, Hongxia Liu. An Elevator Monitoring System Based On The Internet Of Things[J]. Procedia Computer Science, 2018, 131.
- [32] You Cai Xu, Xin Shi Li, Ran Tao, Shu Guo, Min Gou, Kun Li. Research on the Elevator System with Fault Diagnosis Method Based on Fuzzy Fault Tree[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3400(1014-1014).
- [33] Orhan Yaman, Mehmet Karakose. 2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP) [C]. New York : IEEE, 2017: 1-5.
- [34] Gang Niu, Sun-Soon Lee, Bo-Suk Yang, Soo-Jong Lee. Decision fusion system for fault diagnosis of elevator traction machine[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(1): 85-95.
- [35] Shuo Ding, Xiao Heng Chang, Qing Hui Wu. Application of Probabilistic Neural Networks in Fault Diagnosis of Three-Phase Induction Motors[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 433: 705-709.
- [36] 李俊芳, 曲照伟, 窦立谦, 宗群. 基于神经网络的电梯门系统故障预测方法的研究[J]. 天津理工大学学报, 2009, 25(01): 8-10.
- [37] 邱春玲, 张广明, 钱夏夷. 电梯故障诊断的RBF神经网络方法研究[J]. 机械设计与制造, 2009(09): 175-177.

- [38] 夏文杰, 杨建武, 李屹, 李昆. Quasi-Newton BP神经网络算法在电梯急停故障诊断中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(01): 23-25.
- [39] 李屹, 张慧慧. 基于神经网络技术的电梯动态智能检测系统[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(04): 440-444.
- [40] 冯鑫, 夏洪山, 冯月贵, 刘君强, 张润. 基于遗传神经网络的电梯故障诊断技术研究[J]. 起重运输机械, 2017(01): 28-32.
- [41] 黄放. 电梯故障诊断系统研究与应用[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [42] 王赛男, 陈敢. 基于改进神经网络的电梯故障诊断[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2018, 35(02): 25-27.
- [43] Peiliang Wang, Wuming He, Wenjun. Yan. Proceedings of 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments Vol.4. Institute of Electrical and Electronics Engineers[C]. Beijing: Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009: 1041-1044.
- [44] Hongbo Xu, Guohua Chen. An intelligent fault identification method of rolling bearings based on LSSVM optimized by improved PSO[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1-2): 167-175..
- [45] Chang Liu, Xinzhen Zhang, Xindong Liu, Can Chen. The Research Of Elevator Fault Diagnosis Method Based On Decision Tree Algorithm[J]. Acsr Adv Comput, 2017.
- [46] Hiller, Benjamin, Torsten Klug. An exact reoptimization algorithm for the scheduling of elevator groups[J]. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2014, 26(4): 585-608.
- [47] 王芳, 宗群, 张景龙, 李俊芳. 电梯群的可调整鲁棒优化调度度[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(01): 27-33.
- [48] 李中华. 垂直交通客流分析与电梯群控制优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [49] 张景龙. 电梯群控系统节能调度方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [50] 于德亮, 唐海燕, 丁宝, 张永明, 齐维贵. 基于粒子群优化模糊核聚类的电梯群交通模式识别[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(10): 84-88.
- [51] 张健, 王笑竹. 改进GA优化BP神经网络的电梯群控策略[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2015, 31(04): 36-39+58.
- [52] 李晨. 电梯智能群控调度算法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [53] 黄志锋. 基于强化学习的电梯群控调度技术研究[D]. 苏州大学, 2016.
- [54] 杨华. 电梯物联网现状及发展方向思考[J]. 中国电梯, 2019, 30(16): 27-33.
- [55] 王晨, 冯双昌, 刘小畅, 刘鹏博. 基于大数据的电梯故障预测新模式[J]. 中国科技信息, 2020(12): 71+73.
- [56] 郭普静. 群控电梯交通模式识别与优化调度研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.

- [57] 贾宁宁, 高利平, 袁卫华, 张颖. 基于物联网技术的电梯远程监控系统的现状分析[J]. 科技与创新, 2021(24): 141-142.
- [58] Lai Chia Tai Angus, Wei Jiang. Internet of Things enabling condition-based maintenance in elevators service[J]. Journal of quality in maintenance engineering, 2019: 563-588.
- [59] Jian Liu, Dong Sheng Fan, Yue Wu, Guo Jiang Fu, Mei Ju Liu. Study of Remote Elevator Monitoring Fault Detection System[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1742(499-499).
- [60] 谭营, 郑少秋. 烟花算法研究进展[J]. 智能系统学报, 2014,9(05):515-528.
- [61] 赵晓寒, 张丰, 曹琦, 冯佳. 改进后的轮换步长PSO算法[J]. 通信技术, 2018, 51(04): 805-808.
- [62] Lian Chen, Shengnan Lan, Saihua Jiang. Elevators Fault Diagnosis Based on Artificial Intelligence[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1345(4): 042024.
- [63] Niu Dapeng, Qi Chenshu, Li Guanghai, Li Hongru, Pang Hali, Jiang Xingxing. Rapid Fault Diagnosis Method of Elevator System Based on Multiattribute Decision Making[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021.
- [64] Li, Mei Liu, Jian Bin Li. Fault Diagnosis of Construction Elevator Based on Fuzzy Recognition[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1823(529-529): 459-462.

致 谢

随着论文的完成，研究生阶段的三年生活也接近尾声。回望研究生的学习、科研工作，过得十分充实，这三年不仅增长了我的学识，也丰富了我的人生。感谢给予我帮助的那些人，也感谢在杭电的学习生活带给我美好的一切。

感谢我的导师陈科明教授。研究生期间，陈老师不仅向我传授“为学之道”，更教我“为人之本”。陈老师丰富的工程实践经验、严谨的治学之道以及勤勉的工作精神深深地影响了我。在此，谨向陈老师表示由衷的谢意。

感谢我的同窗好友。他们在学习、工作和思想上都给予了我莫大的帮助和鼓励，难忘与你们一起度过的日子。

感谢父母在这三年研究生生涯中给与的理解与支持。你们在背后辛苦的付出才使得我能够一直坚持走下去。

感谢论文评阅和答辩委员会的老师，感谢你们的耐心，我一定会悉心听取你们宝贵的意见并积极改正。

附 录

作者在读期间发表的学术论文及参加的科研项目

参加的科研项目：

[1] 智能工业运维系统研发及应用-智能工业运维系统研发与应用，横向课题，项目编号：2019C01052，2019.1-2021.12

申请的专利：

[1] 邢豪蔚，陈科明，基于动态步长 PSO 优化神经网络的电梯故障诊断方法[P]，中国专利，申请号：2022102144399