

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题 目： 高压断路器数据采集与
故障诊断技术研究

研 究 生 王从舸

专 业 电子科学与技术

指导教师 陈科明 教授

企业导师 曾 佳

完成日期 2024 年 5 月 29 日

杭州电子科技大学硕士学位论文

高压断路器数据采集与故障诊断技术研究

研 究 生： 王从舸

指导教师： 陈科明 教授

2024 年 5 月

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

**Research on Data Acquisition and Fault
Diagnosis Technology of High Voltage Circuit
Breakers**

Candidate: Wang Congge

Supervisor: Prof. Chen Keming

May, 2024

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：王从舸 日期：2024年6月6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：王从舸 日期：2024年6月6日

指导教师签名：陈利明 日期：2024年6月6日

摘要

随着我国电网规模不断扩大，各类电力负荷容量和种类也相应增加，因此对电力系统的可靠性和稳定性提出了更高的要求。电网的稳定运行需要高压断路器这种重要的保护和控制设备的准确及时发现缺陷或故障，并且保证其正常工作。高压断路器操作机构机械部分出现故障会导致机械传动部分的运动特性产生相应变化，而对于高压触头行程曲线、分合闸线圈电流等信号在线数据监测则可以有效评估这些变化。因此，研究高压断路器机械故障的监测与诊断方法，并根据研究结果安排合理的维护与检修计划，对于提高电力系统的可靠性具有十分重要的意义。

本文根据目前行业内数字化、智能化的需求和不足的现状，设计了一种高压断路器在线监测系统。系统主要包括数据信息采集、物联网传输、云平台可视化管理。信息采集部分主要由主控 MCU 及外围传感器实现，文中详细介绍了相关硬件选型以及软件流程。无线通信模块主要负责数据的远程收发，实现设备自动注册与远程控制等功能。在云平台的架构上，搭建了配套的设备管理及数据可视化展示的全面监控系统，通过 Web 页面可以直观地查看设备状态，移动端小程序能够及时的通知运维人员进行及时的故障排查。

高压断路器的触头行程曲线是高压断路器中重要的特征信息。针对数据采集需求以及现有传感器方案的不足，本文提出一种基于巨磁阻传感器的离轴角位移测量方法。分析了巨磁阻效应在角度测量应用的可行性以及不同安装方式带来的误差。通过分析环形磁钢外围径向与切向磁场的变化规律以及角度测量原理，计算补偿系数，消除了轴侧测量的误差。经过实验测试表明，最大相对误差仅有 0.24%，本测量方法能够满足数据采集需求。

针对分合闸线圈动作时产生的电流信号以及触头行程曲线，提出了一种基于滑动窗口导数中心差分和的特征提取方法，准确地提取出电流波形和触头行程的特征点，为故障诊断提供了数据基础。对于高压断路器常见故障，本文首先分析并通过实验证明了 KNN 算法对已标记故障分类诊断的准确度。针对传统 KNN 对故障幅度不同导致的训练样本不足的情况，结合 KNN 分类与 DBSCAN 聚类算法，正确率提高了 18%。多种故障的综合诊断正确率也从 89.5%提高至 94%。一定程度上解决了对同种类不同幅度故障的严重误判问题。

关键词：高压断路器、GMR、离轴角度传感器、KNN、DBSCAN、故障诊断

ABSTRACT

As the scale of China's power grid continues to expand, the capacity and types of various types of power loads are also increased accordingly, so the reliability and stability of the power system puts forward higher requirements. The stable operation of the power grid requires the accurate and timely detection of defects or failures of high-voltage circuit breakers, an important protection and control equipment, and to ensure its normal operation. Failure of the mechanical part of the operating mechanism of high-voltage circuit breakers will lead to corresponding changes in the movement characteristics of the mechanical transmission part, and online data monitoring of the high-voltage contact travel curve, closing coil current and other signals can effectively assess these changes. Therefore, it is of great significance to study the monitoring and diagnostic methods of high-voltage circuit breaker mechanical failures and arrange reasonable maintenance and overhaul plans according to the results of the study in order to improve the reliability of the power system.

In this paper, a high-voltage circuit breaker online monitoring system is designed according to the current digital and intelligent needs and insufficient status in the industry. The system mainly includes data and information acquisition, IoT transmission, and cloud platform visualization management. The information acquisition part is mainly realized by the main control MCU and peripheral sensors, and the relevant hardware selection and software process are described in detail in the paper. The wireless communication module is mainly responsible for the remote sending and receiving of data, and realizes the functions of automatic registration and remote control of equipment. On the architecture of the cloud platform, a comprehensive monitoring system with supporting equipment management and data visualization display is built, and the equipment status can be viewed intuitively through the Web page, and the mobile applet can notify the operation and maintenance personnel to carry out timely troubleshooting.

The contact travel curve of high-voltage circuit breaker is an important characteristic information in high-voltage circuit breaker. Aiming at the data acquisition needs and the shortcomings of the existing sensor program, this paper proposes an off-axis angular displacement measurement method based on giant magnetoresistive sensors. The feasibility of the giant magnetoresistive effect in angular measurement applications and the errors brought by different installation methods are analyzed. By analyzing the change rule of radial and tangential magnetic field at the periphery of the ring magnet and the principle of angle measurement, the compensation coefficient is calculated to eliminate the error of axial side measurement. After experimental testing

shows that the maximum relative error is only 0.24%, this measurement program can meet the data collection needs.

For the current signal generated during the operation of the switching coil and the contact travel curve, a feature extraction method based on the center difference sum of the sliding window derivatives is proposed, which accurately extracts the characteristic points of the current waveform and contact travel and provides a data basis for fault diagnosis. For the common faults of high-voltage circuit breakers, this paper first analyzes and experimentally proves the accuracy of the KNN algorithm for the classification and diagnosis of marked faults. For the case of insufficient training samples caused by the traditional KNN for faults with different amplitudes, combining the KNN classification with the DBSCAN clustering algorithm, the correct rate is increased by 18%. The combined diagnosis correct rate of multiple faults is also improved from 89.5% to 94%. The problem of serious misdiagnosis of the same kind of faults with different magnitudes is solved to some extent.

Keywords: High Voltage Circuit Breaker, GMR, Off-Axis Angle Sensor, KNN, DBSCAN, Fault Diagnosis

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 高压断路器简介	3
1.3 国内外研究现状	3
1.3.1 高压断路器检测系统研究现状	3
1.3.2 高压断路器机械特性采集与分析研究现状	4
1.3.3 电力行业物联网通信与数字化研究现状	6
1.4 论文主要研究内容以及各章节安排	7
第 2 章 高压断路器智能在线监测系统设计	8
2.1 系统总体设计	8
2.1.1 需求分析	8
2.1.2 系统总体框架设计	9
2.2 系统硬件设计	10
2.2.1 主控模块设计	10
2.2.2 无线通信模块	11
2.2.3 传感器应用	12
2.3 系统软件设计	16
2.3.1 主控模块软件设计	16
2.3.2 无线通信模块及云平台软件设计	18
2.4 效果展示	19
2.5 本章小结	21
第 3 章 基于巨磁阻传感器的高压断路器触头行程测量方法	22
3.1 应用场景需求分析	22
3.2 基于巨磁阻效应的角度传感器	24

3.2.1 巨磁阻效应 (Giant Magneto Resistance)	24
3.2.2 巨磁阻效应测量角度原理	26
3.2.3 离轴角度测量补偿	33
3.3 角度传感器试验测试及结果分析	36
3.3.1 角度传感器安装方案	36
3.3.2 测试与分析	37
3.4 本章小结	39
第 4 章 基于 KNN-DBSCAN 的高压断路器故障诊断	40
4.1 高压断路器机械特性分析及特征提取	40
4.1.1 分合闸线圈电流信号机理	42
4.1.2 主轴转动行程信号机理	44
4.1.3 基于滑动窗口导数中心差分法的特征提取方法	45
4.1.4 故障模拟及特征提取	47
4.2 基于 KNN 的高压断路器故障诊断	49
4.2.1 KNN 算法	49
4.2.2 合闸线圈故障特征分析	51
4.2.3 传动主轴故障特征分析	53
4.2.4 故障诊断结果	54
4.3 基于 DBSCAN 的未标记故障聚类处理	55
4.3.1 DBSCAN 算法	55
4.3.2 不同幅度的电压跌落故障分析	56
4.3.3 KNN-DBSCAN 联合故障诊断	58
4.4 本章小结	59
第 5 章 总结与展望	60
5.1 全文总结	60
5.2 未来的工作展望	60
致谢	62
参考文献	63
附录	68

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

稳定运行的电力系统对社会经济发展至关重要，因此对电力设备进行监测和维护显得尤为紧要。高压断路器作为电力系统的关键组件，承担着控制和保护电力设备的重要职责。

在运行过程中，高压断路器可能面临各种故障和问题，这些问题有可能引发电力系统的故障，甚至导致火灾等危险事件。因此，建立一个高效的在线监测系统对提高电力系统的安全性和可靠性至关重要^[1]。通过实时监测高压断路器的工作状态和性能，能够进行故障的早期检测和预测，从而采取及时措施，防止设备故障，降低维修成本，并最大程度地减少停电时间。

设计一个高压断路器在线监测系统涉及使用传感器和数据采集技术，这有助于实现数据驱动的维护。通过分析实时数据，可以制定更有效的维护计划，避免不必要的停机，提高设备的使用寿命。在线监测系统的实施还能更好地了解高压断路器的能耗情况和工作效率，从而制定优化策略，提高电力系统的能效，符合环保和可持续发展的要求^[2,3]。

同时随着科技的不断发展，新的传感器技术、数据处理算法以及通信技术的涌现为实现高效的在线监测系统提供了更多的可能性。因此，研究这一主题有助于推动相关技术的不断进步和应用。

综上所述，高压断路器在线监测系统的研究对提升电力系统的稳定性、可靠性和安全性具有积极作用，促进电力系统维护的智能化和数据驱动的发展。这不仅有助于确保电力系统的正常运行，降低维护成本，还符合可持续发展的要求，为未来能源领域的进步做出重要贡献。

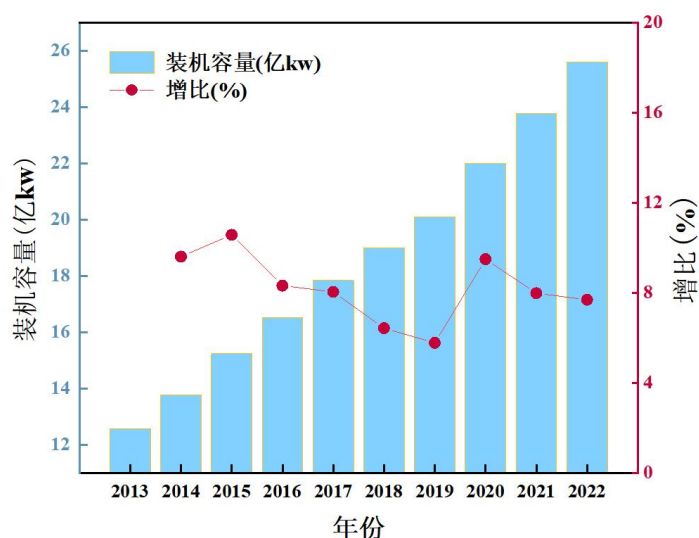


图 1.1 2013-2022 年装机容量与增幅

随着电力系统的不断发展和现代化的进程，高压断路器作为电力系统的核心组件之一，在电力传输、配电及控制中扮演着重要的角色。它的正常运行对电力系统的稳定安全具有相当重要的意义。然而，随着设备老化、负荷增加以及外部环境因素的影响，高压断路器在长期运行中可能会出现各种潜在问题，如接触不良、过载、绝缘老化等，这些问题可能会导致设备故障、事故甚至火灾，严重威胁电力系统的安全性和可靠性。传统的高压断路器监测手段主要依靠人工巡检和定期维护，存在着以下一些不足之处：

（1）人工巡检效率低：对于大型电力系统而言，人工巡检需要耗费大量的人力物力，并且存在着盲区和不确定性。

（2）无法实现实时监测：传统监测手段通常是定期的，无法及时发现设备运行状态的突变和异常。

（3）无法远程监控：在某些特殊场合下，如远程无人岛屿、高海拔地区等，人员难以实时抵达进行监测和维护。

为了解决这些问题，高压断路器智能在线监测系统应运而生，其基于先进的传感器技术、数据采集与传输技术、信息处理与分析技术等，实现对高压断路器运行状态的实时、全面、准确监测与评估，为电力系统的安全稳定运行提供强有力的技术支持。

高压断路器智能在线监测系统致力于提高电力系统运行的安全性和可靠性、降低运维成本和提高效率、促进电力系统的智能化和信息化发展。高压断路器智能在线监测系统的设计与实现，可以实现对关键参数的实时监测和数据采集，对断路器的运行状态进行全面评估和分析。一旦发现设备存在潜在故障或异常情况，系统能够及时发出预警信号，为运维人员提供必要的信息，从而有效避免了设备故障和电力事故的发生，提高了电力系统的安全性和可靠性。传统的人工巡检和定期维护费时费力，且无法做到全面实时监测。而高压断路器智能在线监测系统能够实现远程监测与控制，大大减少了人力物力投入，提高了运维效率，降低了运维成本。高压断路器智能在线监测系统的应用，将推动电力系统向智能化、信息化方向发展。系统通过传感器、数据采集与传输、大数据分析等技术手段，实现对设备状态的实时感知、分析和处理，为电力系统的智能化运行提供了技术支持和保障。通过对高压断路器智能在线监测系统的设计与实现研究，积累相关领域的经验和技能，并为今后类似系统的设计提供参考和借鉴。同时，对于相关行业和企业而言，也将推动相关技术的应用与推广，促进行业的发展与进步。

综上所述，高压断路器智能在线监测系统的设计与实现具有重要的现实意义和深远影响，对于提高电力系统运行的安全性和可靠性，降低运维成本，促进智能化发展，以及推动行业的进步都具有重要意义。本研究将致力于探索高压断路器智能在线监测系统的关键技术与方法，为相关领域的研究和应用提供理论支持和技术指导。

1.2 高压断路器简介

高压断路器乃是对高压电力系统进行控制与保护的装置。其主要应用领域涵盖电力输配电系统中的变电站、工业及商业建筑物，以及其他具备对高压电力进行控制与分配需求之场所。

高压断路器的主要功能是实现对电力系统的开关操作、过载保护、短路保护和地面保护。它们通常由多个开关单元组成，每个单元负责控制和保护特定的电力线路或设备。高压断路器可以根据不同的应用需求，包括户内和户外安装、固定式和可移动式等不同形式。

高压断路器通常包括以下主要组件^[4,5]：

（1）断路器（Circuit Breaker）：用于开关和断开电力系统中的电路。它能够在出现故障（如短路）时迅速断开电流，并保护电力设备免受损坏。

（2）隔离开关（Isolator Switch）：用于隔离电力设备或电路，以便进行维护和检修工作。隔离开关通常与断路器配合使用，确保在断开电路之前先进行隔离操作。

（3）接地开关（Grounding Switch）：用于将电力系统的设备和线路与地面连接，以确保安全操作并防止电气设备的过电压。

（4）保护装置（Protection Device）：包括过载保护、短路保护和地面保护等功能，以便在电力系统出现异常情况时及时采取保护措施，避免设备受损和人员安全受到威胁。

（5）控制装置（Control Device）：用于操作和监控高压断路器的状态和功能，例如开关操作、电流测量和通信接口等。

高压断路器在电力系统中起着至关重要的作用，它们能够确保电力设备的正常运行、保护电力系统免受故障和损坏，并提供对电力系统的灵活控制和管理。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 高压断路器检测系统研究现状

根据高压断路器的状态量区分，目前主要分为温度检测、绝缘特性检测、机械特性检测三种^[6,7]。

（1）高压断路器的温度检测：目前高压断路器的温度检测技术主要包括红外测温、光纤测温及无线测温等^[8]。

高压断路器的红外测温原理是基于物体发射红外辐射的特性。每个物体都以一定温度发射红外辐射，其强度和频谱分布与温度密切相关^[9]。红外测温仪器通过测量这些辐射，将其转换为相应的温度值，实现对物体表面温度的准确测量。部分红外测温系统还融入了热成像技术，通过生成热图直观展示设备表面的温度分布，帮助用户更全面地了解设备状态。红外测温技术不仅能够实现非接触式测温，而且具备迅速响应和广泛测量范围等特点，因此在高压断路器内部元件的温度监测方面得到广泛应用，如电器元件、连接器、绝缘子等^[10]。通过监测这些元件的温度，可以及时发现潜在的过载、接触不良、绝缘故障等问题。

相较于传统的红外测温技术，将光纤测温及无线测温结合是更为先进的监测手段。光纤测温技术通常采用拉曼光纤温度传感器或布拉格光栅温度传感器，光纤在温度变化下的光学特性变化，因此可用于高温、高精度的测量点^[11]。而无线测温技术则主要通过无线通信传输温度数据，一般使用无线传感器节点实时采集温度信息，适用于更灵活的布局和实时监测需求^[12-14]。这种综合应用可以在保证监测精度的同时，提高监测系统的灵活性和覆盖范围，被广泛应用于监测设备表面、连接器、电缆等关键部位的温度。

(2) 高压断路器的绝缘特性检测：高压断路器的绝缘特性检测是确保电气设备正常运行和安全运行的重要步骤之一。绝缘电阻测量、介质损耗和介质电容测量、直流高压耐压试验、泄漏电流测量和环境温度检测等都是常用的高压断路器绝缘特性检测方法。随着物联网和人工智能技术的发展，智能检测系统在高压断路器绝缘特性检测中得到了应用。这些系统可以通过传感器和数据分析算法实时监测和评估设备的绝缘状态，实现预测性维护和故障诊断。

(3) 高压断路器的机械特性检测：高压断路器的机械特性检测是一项重要的监测手段，旨在实时监测和评估断路器内部机械部件的运行状态，以预防潜在的故障并提高设备的可靠性。该检测主要关注连接器、断路器、接地开关等机械元件，以确保其正常运行，防止意外故障，降低维护成本，延长设备寿命。

高压断路器的机械特性检测最早可以追溯到 20 世纪初期，这个时期电力系统中的高压断路器主要以机械传动为主，机械元件相对简单。在这个阶段，高压开关的测试和监测主要依赖于传统的手动方法和仪器，如示波器和电流表。然而对于定量的机械特性检测研究较为有限。随着电力系统的不断发展，高压断路器的结构和工作原理逐渐变得复杂。在 20 世纪中期，研究开始集中在机械振动分析、电流和电压波形分析等方面，以识别潜在的机械问题。机械振动传感器的应用逐渐成为机械特性检测的一部分。20 世纪 90 年代，箱式断路器机械特性测试仪开始广泛应用。然而，在其初期使用时，这类仪器存在着较大的测量误差、自动化程度低和检测功能不够完善等缺陷^[15]。进入 21 世纪，数字化技术和先进的传感器技术为高压开关机械特性测试仪的发展提供了新的机遇。机械特性测试系统逐渐集成了更先进的数据采集和分析功能，实现了更全面、自动化的测试过程。红外热成像技术等新型传感器的应用，使得机械特性测试可以更全面地考虑温度、振动等因素。无线通信技术的进步，使得机械特性测试仪器可以更便捷地进行数据传输和远程监测。

1.3.2 高压断路器机械特性采集与分析研究现状

高压断路器机械特性包括开关机构的运行速度、动作次数、接触系统的接触力等，这些参数的准确获取是为了评估断路器的性能、可靠性和操作特性，以确保其正常运行和安全操作。

在高压断路器机械特性的采集方面，传感器技术是关键。传感器的发展使得可以实时监测和采集断路器的机械参数。常用的传感器包括振动传感器、位移传感器、压力传感器、角

度传感器等^[16,17]。这些传感器可以安装在断路器的关键部位，如操作机构、断路器运行机构等，用于采集机械参数。此外，无线传感器网络和互联网技术的进步也实现了对分布式断路器的远程采集。

Peng 等人^[18]采用超声传感器和温湿度传感器进行断路器缺陷检测，通过同步采集加热器、冷凝器以及风机的状态参量，实现对高压开关机的调节，然而这种方法并未考虑到超声波持续衰减所产生的影响。Wang 等人^[19]采用平面等角螺旋天线设计特高频传感器，采用直线代替指数渐变巴伦，在对故障进行准确识别的同时解决了常用传感器灵敏度低、频带窄等问题，然而这种检测数据为间接量、经验性较强，易造成缺陷误判。为了解决上述问题，Fan 等人^[20]采用 TEV 传感器进行局部放电检测，获取了放电典型图谱和带电检测信号-局放量关系，得到了不同缺陷下超声波检测和特高频检测灵敏度相当但大于暂态地电压检测灵敏度，然而这种采用单一传感器对放电信号进行采集和分析，具有一定的局限性。Li 等人^[21]设计了基于巨磁阻效应的角度传感器实现了在线自动测量的需求，然而这种传感器在某些端面无法安装。本文设计了一种适配型更广的角度传感器用于高压开关机，使自动检测更精确更方便。

采集到的机械特性数据需要进行记录和存储，以便后续的分析 and 处理。现代的数据采集系统具备高速采样、大容量存储和实时通信等功能。这些系统能够准确记录断路器的机械特性数据，并提供数据接口用于后续的分析 and 处理。数据采集系统可以包括传感器连接模块、数据存储设备和数据通信模块等组件。其中，数据存储设备可以使用大容量硬盘、闪存存储器或云存储等方式。

针对采集到的机械特性数据，研究人员提出了多种分析方法^[22,23]。振动分析是一种常用的方法，可以通过振动信号的频谱分析和时域分析来评估断路器的机械运行状态和异常情况。频谱分析可以将振动信号转换为频域信号，以便检测和识别故障频率和谐波分量。时域分析则可以通过对振动信号的波形和振幅进行分析，判断断路器的机械状态。

除了振动分析，声音分析也是一种常用的方法。通过分析断路器产生的声音信号，可以判断其操作和运行是否正常。声音信号的频谱分析和时域分析可以揭示出声音的特征和异常情况。

此外，还有基于图像处理和机器学习等技术的分析方法在高压断路器机械特性研究中得到应用^[24-28]。图像处理可以通过对断路器的外观图像或内部结构图像进行分析，提取关键特征并进行故障诊断。机器学习方法可以利用大量的机械特性数据进行训练，建立预测模型来预测断路器的性能和寿命。

随着物联网和人工智能技术的发展，智能监测系统在高压断路器机械特性采集与分析中得到了广泛的应用。这些系统能够实时监测断路器的机械特性，并通过数据分析和模型预测来提前发现潜在的故障和问题。智能监测系统可以与断路器的操作和控制系统集成，实现实

时监测和智能决策。通过对断路器机械特性数据的分析，智能监测系统可以判断断路器的健康状况，提供预测性维护和优化断路器的运行。

为了确保高压断路器机械特性采集与分析的准确性和可比性，一些国际和地区标准与规范被制定和采用。例如，国际电工委员会（IEC）制定了 IEC 62271-100 标准，提供了高压断路器机械特性测试和评估的指导和要求。该标准包括了断路器机械特性测试的方法、测试设备和测试程序等内容，为研究人员和工程师提供了统一的测试和评估标准。

1.3.3 电力行业物联网通信与数字化研究现状

电力行业物联网通信和数字化研究正处于快速发展的阶段，其对整个电力系统的管理、运营和维护带来了深远的影响。目前，研究者们正在积极探索如何利用物联网和数字化技术来提高电力系统的效率、可靠性和安全性。

首先，物联网技术在电力行业的应用已经成为研究的热点之一。针对电力装备及其相关设施，综合应用温度、湿度、振动等多类传感技术，构建传感器网络，实现对电力系统关键部件的实时在线监测。这使得电力公司能够远程监控设备的运行状况，及时发现潜在问题，并采取预防措施，从而提高了电力系统的可靠性。此外，物联网技术还支持设备之间的信息交互，实现设备的智能协同，优化能源利用，减少能源浪费。

数字化研究方面，电力系统的数字化转型不仅仅体现在设备监测上，还包括了数据的采集、存储和分析。研究者们通过建立强大的数据中心和云平台，将大量的实时数据整合起来，形成对电力系统全局的全面洞察。这种大数据的应用使得电力公司能够更好地理解电力系统的运行趋势，为决策提供更为科学的依据。同时，数据分析技术的引入也为电力系统的故障诊断和预测提供了更为精准和高效的手段，有助于提前发现设备潜在的问题并进行及时处理。

在通信技术方面，物联网的实现离不开先进的通信技术的支持。5G 技术的逐步普及为电力行业的物联网通信提供了更高的带宽和更低的时延，使得大量实时数据的传输变得更加可行。此外，边缘计算的概念也应运而生，通过在设备端进行数据处理，可以减轻中心服务器的负担，提高数据传输的效率和安全性。

在实际应用中，智能电表、智能电网、远程监控系统等已经成为电力系统中不可或缺的一部分。通过这些应用，电力公司能够更加灵活地进行电力供需平衡调整，提高电网的稳定性和可持续性。与此同时，数字化技术也为用户提供了更多的选择和便利，例如智能家居系统、可再生能源的集成利用等，推动了电力行业朝着更加智能、绿色的方向发展。

总体而言，电力行业物联网通信和数字化研究的现状表明，这两个领域的不断创新和应用已经显著改变了电力系统的运行方式和管理模式。这一趋势预示着未来电力系统将更加智能、高效，为可持续发展提供了更为可行的路径。然而，随着技术的不断演进，研究者们仍然面临许多挑战，如数据隐私和安全性、通信网络的鲁棒性等，这需要更深入的研究和持续的努力来解决。

1.4 论文主要研究内容以及各章节安排

本论文针对高压断路器数据采集与故障诊断技术所存在的某些问题展开相关研究并给出解决方案。主要的研究工作和进展情况大致归纳如下：

第一章：绪论。介绍了高压断路器智能在线监测系统的研究背景以及意义。然后从高压断路器监测系统的整体发展、采集对应数据所需的传感器以及高压断路器故障诊断分析的研究状况进行分析介绍。最后罗列本文结构框架。

第二章：详细介绍了本文所研究的高压断路器智能在线监测系统整体设计。首先分析了高压断路器智能在线监测系统的整体系统需求，并根据需求进行了多个模块的设计选型。主要从硬件、软件两个方面去分析系统的设计，再具体介绍整个应用层的组成，包括云平台的整体框架、通信协议等。最后展示整体的界面效果。

第三章：研究了巨磁阻效应的理论角度传感器原理，分析其在角度测量中应用的可行性。根据 GMR 传感器的工作原理，设计相应的传感电路，并通过电路将磁场的角度变化转换为电压输出。进一步设计安装方案、研究补偿方法，减小轴侧测量带来的误差。最后通过实验验证其测量的可靠性。

第四章：提出了一种特征提取方法，基于滑动窗口导数中心差分和对分合闸线圈电流信号进行特征提取。分析并验证了 KNN 算法在已标记故障分类诊断准确度方面的表现。在此基础上，针对传统 KNN 算法在故障幅度不同所引发的训练样本不足问题，本文结合 KNN 分类与 DBSCAN 聚类算法，成功解决了对同种类不同幅度故障的严重误判问题。

第五章：对本文的研究工作进行了总结，对本人硕士期间的学习经历、工作成果作了简单回顾，并且分析设计的不足和对于未来高压断路器智能在线监测系统的深层应用做出展望。

第2章 高压断路器智能在线监测系统设计

面对高压电网智能化需求，需要解决高压断路器远程数据采集、分析、存储和监测问题。为此，本文提出一种基于物联网技术的高压断路器在线监测系统^[29]，该系统包括信号采集设备、数据传输模块和可视化实时监测终端。信号采集设备负责实时读取高压断路器的各项传感器数据。使用串口连接数据传输模块智能网关，上传设备运行数据至 OneNET 云平台，提供高压断路器的可视化实时监测。系统能进行故障分析，出现异常情况时通过移动端小程序向运检人员发送警报信息，保障电力供应安全可靠。

2.1 系统总体设计

2.1.1 需求分析

鉴于当前高压断路器监测技术和故障检测技术存在的缺陷，对于本研究所设计的高压断路器智能在线监测系统而言，以下几个需求被提出：

（1）为了提高人力资源的使用效率，需要改变传统的定期现场检查高压断路器工作状态的方法，并融入数字化技术，确保高压断路器的运行数据和动作信息能够被实时收集。我们需要调整事后的处理策略，以最大限度地提前避免电力安全事故的出现。

（2）将高压断路器的状态及运行数据信息通过监测设备进行采集，并上传至云平台，乃实现高压断路器实时监测的必要步骤之一，进而实现物联网技术的应用。这项技术使得高压断路器的运行数据能够被有效地收集、传输和处理。一旦数据被上传至云平台，便可以通过前端页面进行展示和分析。

（3）优化数据传输，在保证高压断路器稳定监测的前提下，通过采用波形判断裁剪和数据压缩算法来节省数据传输流量消耗。这种优化方法可以在有效地传输必要的监测数据的同时，减少不必要的数据传输，从而提高系统的效率和性能。

（4）离轴角度传感器设计，在本应用场景中存在诸多传感器不适配的情况出现，因此根据整体需求，设计相应的离轴角度测量方案。解决传感器精度不足，抗干扰性差，安装环境不适用等问题。

（5）监测平台提供的可视化界面，用户可自主选取所需的数据，以图形化的方式直观展示所选监测数据。通过可视化展示的 Web 页面，设备维护人员可直接查看高压断路器的运行状态，实现对整个高压电站运行状态的实时监测，以便及时掌握并处理电站异常情况。

（6）本地屏幕离线监测控制，通过在高压断路器上安装的可触摸屏幕，可以无需网络进行参数与状态的离线监测，以预防无线运营商出现信号异常的情况。并且可以通过触摸屏对断路器进行分合闸动作的控制，以及动作情况展示。

(7) 在操动机构故障诊断领域，采用算法模型对机构运行状态进行监测，并对已知故障进行识别和预警，保证运行的安全性和稳定性。对于未知故障的情况，及时记录通知运维人员进行故障排查分析，并记录故障特征，不断完善和提升算法的准确性和适应性。利用新一代智能优化技术，通过不断学习和探索，优化算法模型并推广应用，提高机器性能和工作效率，逐步实现对机构故障的自动化检测和快速响应，促进相关产业的发展和进步。

2.1.2 系统总体框架设计

本文高压断路器智能检测系统根据需求以及功能等因素主要分为主控模块，无线通信模块以及云平台。系统的整体框架如图 2.1 所示。

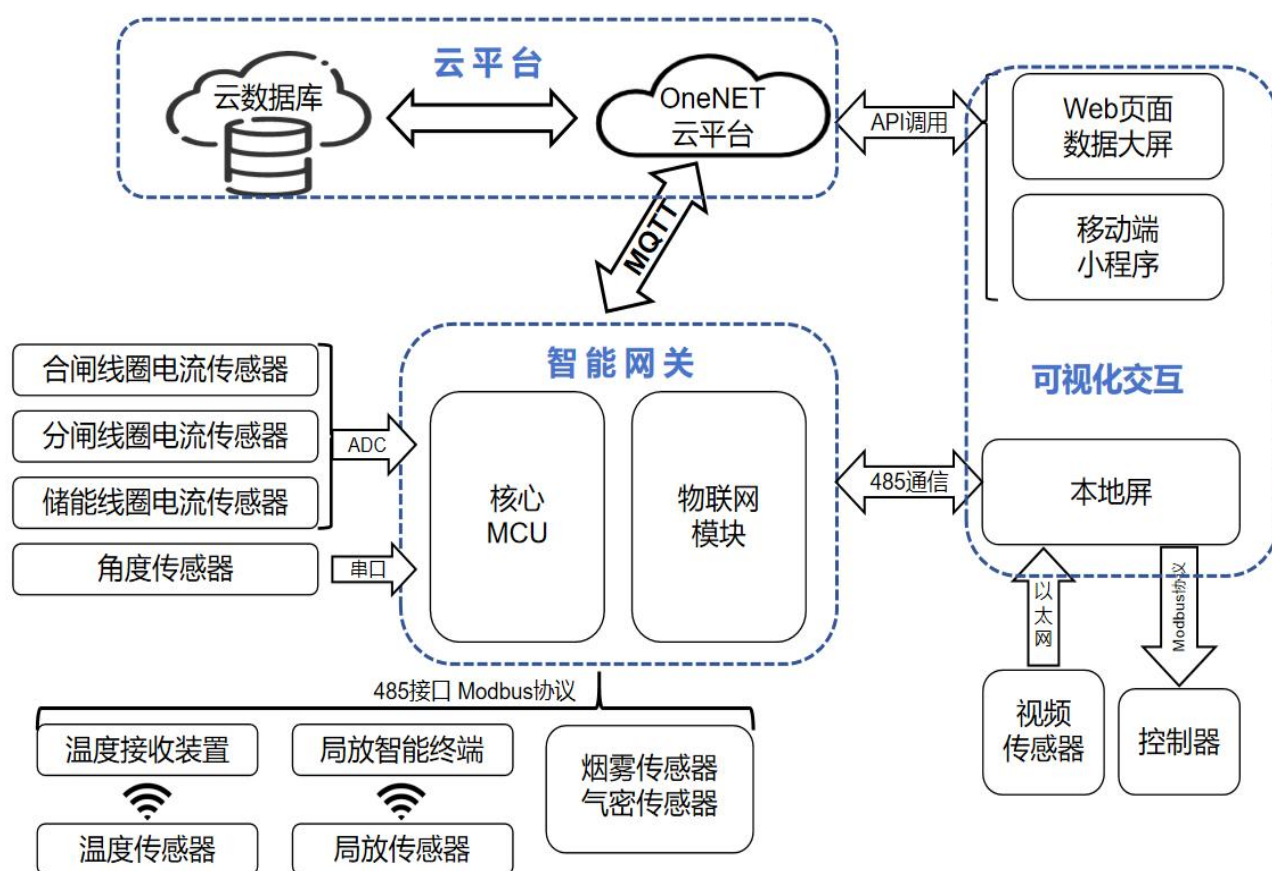


图 2.1 系统总体框架图

主控模块主要负责与波形相关的数据采集处理。首先通过串口和 ADC 采集角度传感器数据、分闸电机互感器电流、合闸电机互感器电流、储能电机电流互感器电流，并且对采集到的数据进行处理。当触发分合闸事件时，MCU 保持数据记录，裁剪无用数据然后生成波形文件。事件结束后，通过 IO 口通知 Air724 芯片开启波形文件的发送与接收。

无线通信模块为整个系统的主要中转站，芯片采用 Air724。其主要功能包括读取其他传感器数据，接收核心 MCU 发来的事件触发信息和波形数据，将波形数据发送至云平台进行展示、与就地屏的相关通信以及通过 BootLoader 远程更新核心 MCU 程序。

OneNET 平台作为一个物联网云平台，可以注册记录每一台设备，并通过 MQTT 协议接收储存无线通信模块发送的对应设备数据。Web 端的管理展示平台通过 OneNET 提供的 API 接口获取相应的数据进行展示。

2.2 系统硬件设计

本位设计的系统主要由主控模块电路，无线通信模块电路，角度传感器和其他传感器等几个硬件部分组成，以实现高压断路器的智能在线监测。

2.2.1 主控模块设计

本系统以主控模块为核心，该模块对所需监测的多种数据进行分组并细分为不同的子模块，而主控 MCU 则承担着调度子模块任务、采集并分析数据以及做出相应处理等重要职责。能够实时接收来自传感器的数据，如线圈电流、触头角位移等。

MCU 主控单元由 GD32F303RCT6 处理器以及晶振电路实现。其 256KB 的 FlashROM 和 48KB 的 SRAM，高达 72MHz 的处理速度可以满足系统需求。此外，系统所需的 UART、ADC、DMA 等硬件接口也一应俱全。本系统将 PC0~PC1 引脚配置 ADC 分别接入分闸、合闸、储能线圈电流传感器。

系统设计中，MCU 通过 UART 串口与 485 通信电路相连接。PD0 和 PD1 被配置为 OSC_IN 和 OSC_OUT 引脚，其目的是为了单片机接入一个 16MHz 的晶体振荡器。同时，外部时钟电路也应用了两个电容值为 12pF 的电容器。为了确保单片机在上电复位后的正常运行，NRST 引脚被连接了一个 10K Ω 的上拉电阻和一个 100nF 的滤波电容接地，保证了高电平信号的正常传送。为了稳定单片机运行系统，去耦电容以消除电源噪声干扰，被并联安装于单片机的电源和地之间^[30]。

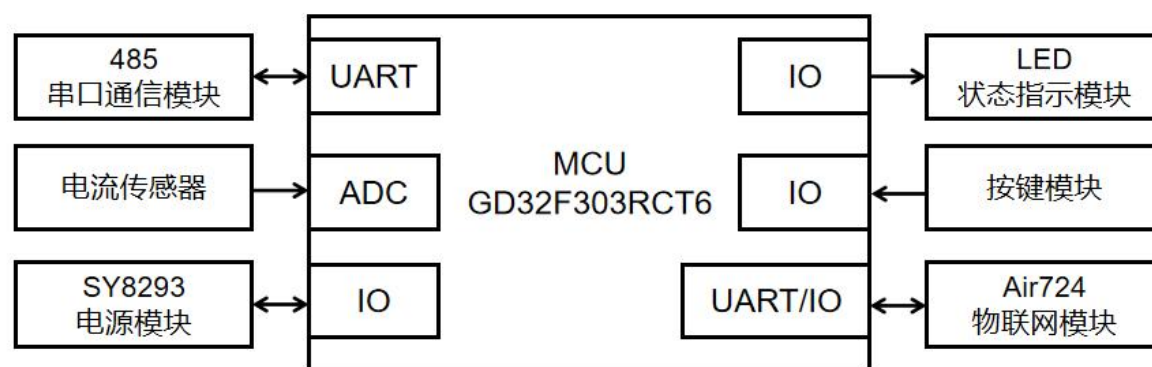


图 2.2 主控模块框图

智能网关所采用的电源为直流 24V，用于为其他模块提供所需的电力支持。该电源模块可将 24V 直流电源转换为 5V 直流电源，以供 485 接口、隔离芯片等外围设备使用。接下来，5V 电源再经过降压转换，将电压降至 3.3V，以满足 MCU 等部件的工作电源需求。

在 LED 指示模组中，通过配置 3 个 LED 发光二极管，来展示设备运作的不同状况。具体包括电源指示灯、运行状态指示灯以及校零信号灯。其中，设备上电后会点亮电源指示灯，标识电能输入状态。而在设备进入常规作业阶段，运行状态指示灯会按照 1Hz/s 的频率进行闪烁，表示正常运行心跳。运行状态指示灯常亮长灭均代表故障。校零指示灯在运行校零操作时闪烁，熄灭后表示校零完成。

共设计两个功能按键：复位与校零。主控芯片根据 IO 口电平变化，来判断按键的点击动作，以此执行相应操作。点击复位按钮，通过引脚直接强制 MCU 硬件复位重启。校零按钮需长按三秒直至校零指示灯闪烁，分别记录当前电流传感器 ADC 数据以及当前角度传感器角度值，写入 Flash 以实现零点数值掉电保存。

485 串口通信模块主要负责角度传感器模块数据的读取，以及和 Air724 芯片文件的传输。经过添加光耦隔离器的电路设计，其抗干扰能力得到了明显提升，同时也实现了电路的隔离及高速信息传输等功能；而双向 TVS 管的应用更为有效地保护了芯片的完整性。PA9、PA10 引脚配置 UART1_TX、UART1_RX 对应 485 通信模块的 TX、RX。

2.2.2 无线通信模块

无线通信模块选用 Air724UG 作为主控芯片，其主要功能是实现设备之间的无线通信和数据传输。该芯片已经集成了 Cat.1 功能^[31]，Cat.1 通信技术可以使用现有的信号基站，直接接入 LTE 网络。降低了网络覆盖成本。通过在 Air724UG 上面编程，实现串口、GPIO 管脚的控制。在本高压断路器智能在线监测系统中，Air724UG 充当着连接各个监测设备与云平台之间桥梁的关键角色。通过 Air724UG，设备能够将采集到的高压断路器数据传输至云端进行处理和分析，同时也可以接收云端下发的远程指令或数据，实现高压断路器监测以及核心 MCU 的代码远程更新升级。

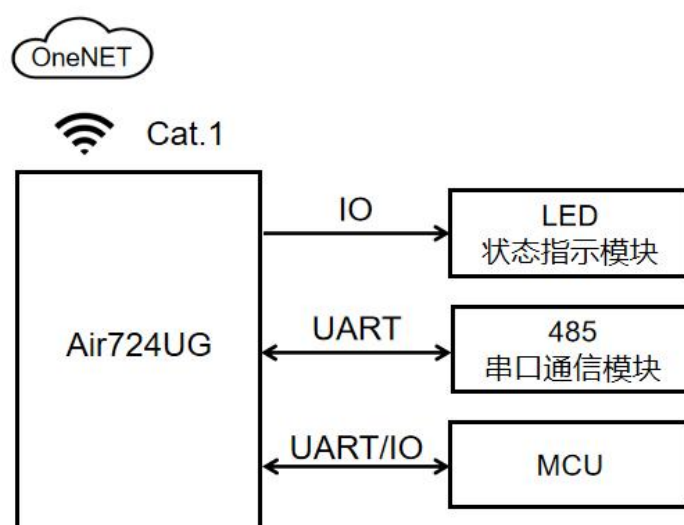


图 2.3 无线通信模块硬件框图

如图 2.3，无线通信模块中采用四个 LED 灯，分别指示 SIM 卡是否接入、联网是否成功、485 通信状态以及分合闸事件。通过 485 接口连接温度、局放、烟雾传感器，周期性读取传感数据。事件 IO 口与 MCU 的一个 IO 引脚直接相连，当 MCU 检测到触发分合闸事件时，改变该 IO 电平，运行波形数据的接收中断，并向云平台转发该数据。也可以通过 485 接收云平台的远程指令并下发至 MCU。

2.2.3 传感器应用

传感器监测整体布局示意如图 2.4 所示。

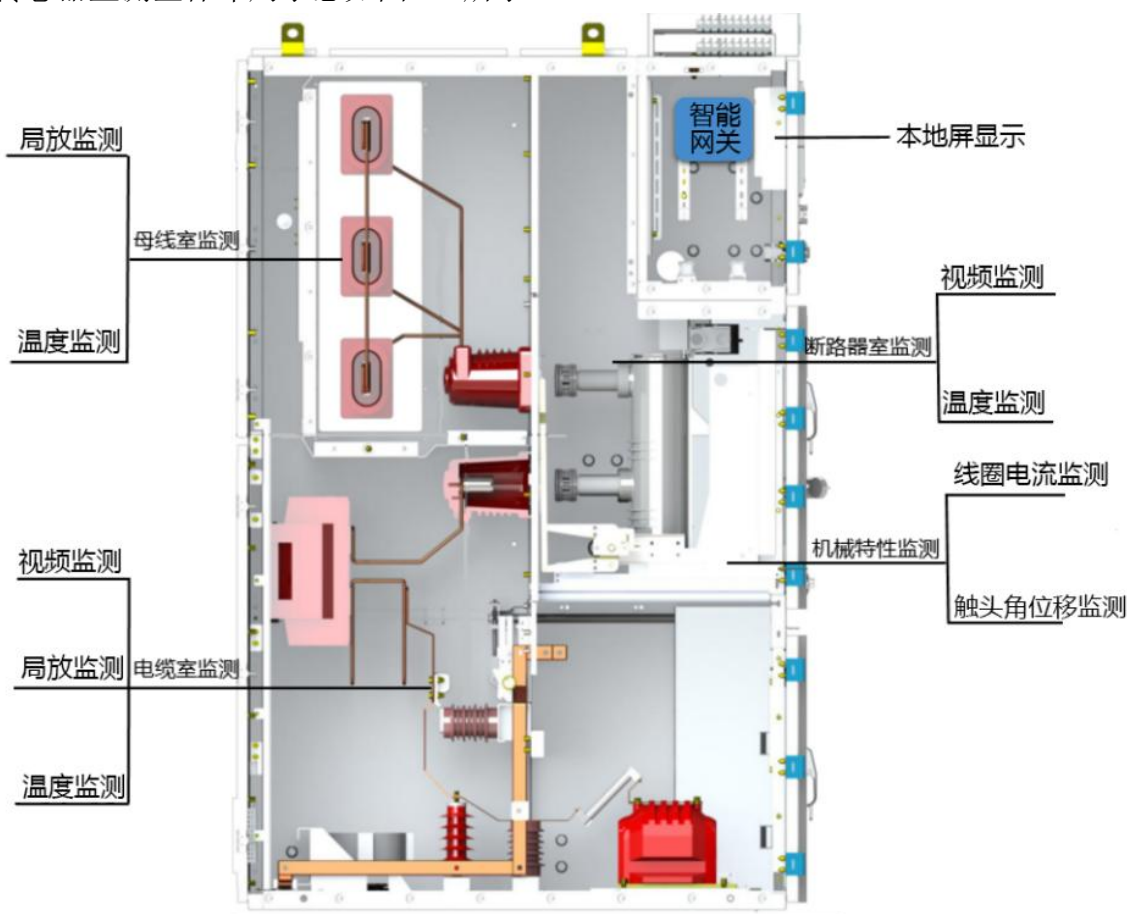


图 2.4 传感器监测布局示意图

(1) 电流传感器的应用

分、合闸线圈动作时根据其电流特性曲线，通常最高电流值不超过 10A。考虑到便于安装、重量轻便、温度系数小、频率响应高等需求，本系统采用一种开启式电流传感器^[32]。核心 MCU 通过 ADC 引脚与电流传感器相连，连续的模拟信号通过采样和量化的方式转换为相应的离散的数字信号。这种转换过程使得模拟信号能够被数字系统所理解 and 处理，从而实现了信号的数字化、存储和传输。核心 MCU 读取该传感器产生的电压值 V_{out} 。根据输出电压公式：

$$V_{out} = 2 \times I_p / I_{pn} + 2.5 \quad (2.1)$$

其中 I_p 为所测电流值， I_{pn} 为额定电流，可以得出所测电流值为：

$$I_p = (V_{out} - 2.5) \times I_{pn} \times 0.5 \quad (2.2)$$

开启式电流传感器可以在不影响原设备结构的基础上，直接卡套在被测线路上。实物安装如图 2.5 所示。



图 2.5 开启式电流传感器安装

(2) 温度传感器的应用

温度传感器选择无源检测节点搭配信号采集终端的测量方案^[33]。可以在不影响高压断路器整体结构的情况下监测多个节点的温度，核心 MCU 与 Air724UG 芯片只需要与采集终端通过 485 总线相连，就可以使用 Modbus 协议从采集终端独立或连续读取各个节点的温度数据。天线选择磁吸式平板天线，可以直接吸附在高压断路器内壁，便于安装。功能示意图如图 2.6 所示。实物安装如图 2.7 所示。

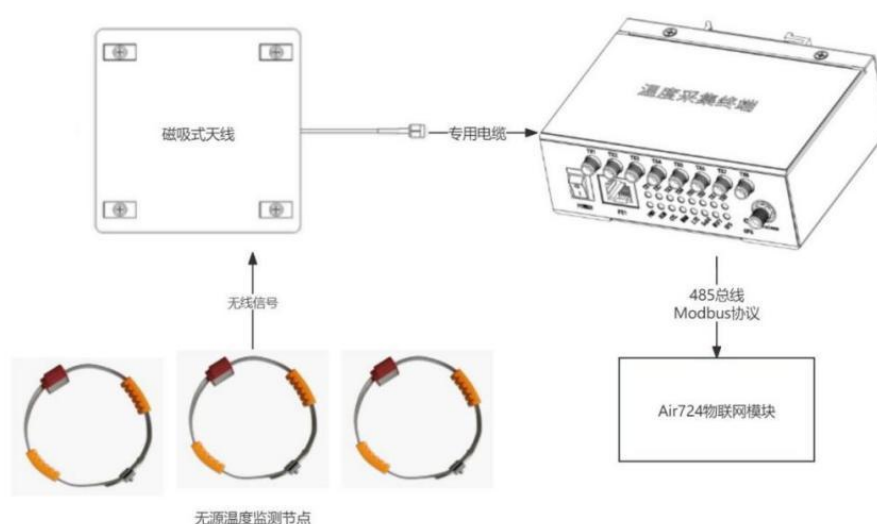


图 2.6 温度传感器功能示意图

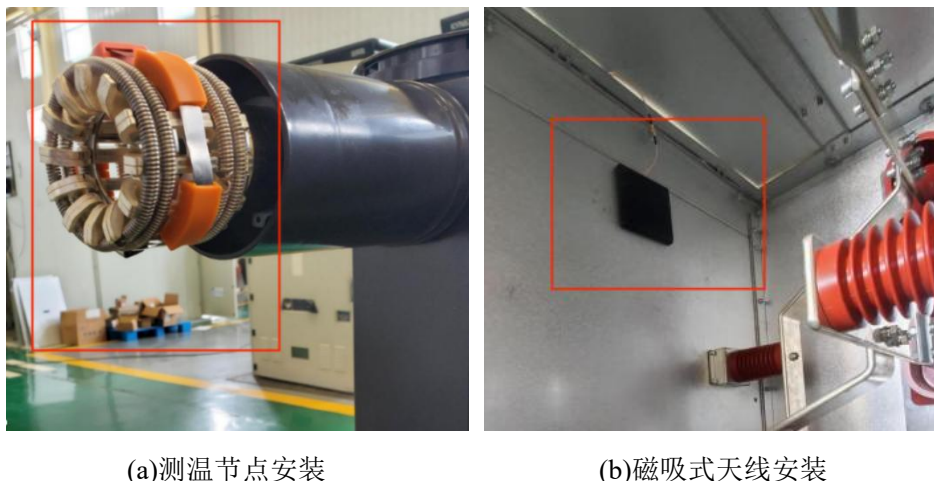


图 2.7 温度传感器实物图

(3) 局放传感器的应用

局放是指局部放电（Partial Discharge, PD），局部放电是指电气设备中的局部区域由于电压或电场的异常而导致放电现象的发生^[34,35]。局放监测是通过实时监测和分析电气设备中的局部放电活动，以避免设备故障和供电中断。通过采用多种监测方法，如超声波监测、电容耦合局放监测、电磁波局放监测等，配合专用的监测设备和传感器，能够及时检测局部放电信号，并通过数据分析和诊断，评估放电的类型、位置和严重程度。

通过测量局部放电产生的超声波信号的声压大小，可以推测出放电的强弱。电子设备运行时，可能会因为局部放电而产生暂态电波。这些电波信号序列主要激励在设备的接地外壳和接地线中。高压断路器内部局部放电产生的电磁波可以产生一个暂态地电波，通过设备的金属箱体外表面而传到地下。因此，本系统选用一种基于超声波监测（AE）与暂态地电波监测（TEV）二合一的局放监测传感器，实物安装如图 2.8 所示。

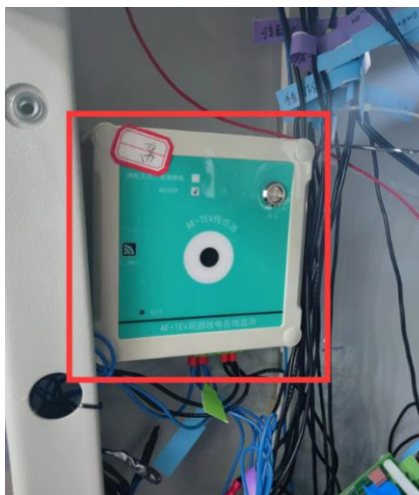


图 2.8 AE+TEV 局放传感器实物图

(4) 烟雾传感器的应用

高压断路器中存在着高电压和大电流，以及可能发生的电弧故障引发火灾。比起通过监控和远程通知，烟雾报警器使火灾的监管更加高效，更有效地保障高压断路器的安全运行

[36]。烟雾火灾报警器在市面上以及有非常成熟的相关产品，本系统选则一款支持 485 信号输出，Modbus 协议通信的光电感烟探测传感器，可以同过串口实时监测信息以及修改设置。静态功耗以及报警功耗分别只有 0.12W 和 0.7W。

(5) 视频传感器的应用

安装在断路器室和电缆室，用于监视断路器遥进遥出过程活门机构的打开和关闭情况、断路器的试验位和工作位是否准确、梅花触头是否有损坏、绝缘件是否有异常等，从辅助开关状态和可视化状态双确认动作状态。接地开关的合闸位和分闸位是否准确、动静触头是否有损坏、出线电缆是否有异常、电缆室有无异物闯入等。选用以太网接口，支持 RTSP 信号流传输的视频传感器，不仅可以通过交换机同时接入多个视频信号，也便于通过第三方系统远程调用视频图像。实际安装位置图 2.9 所示。

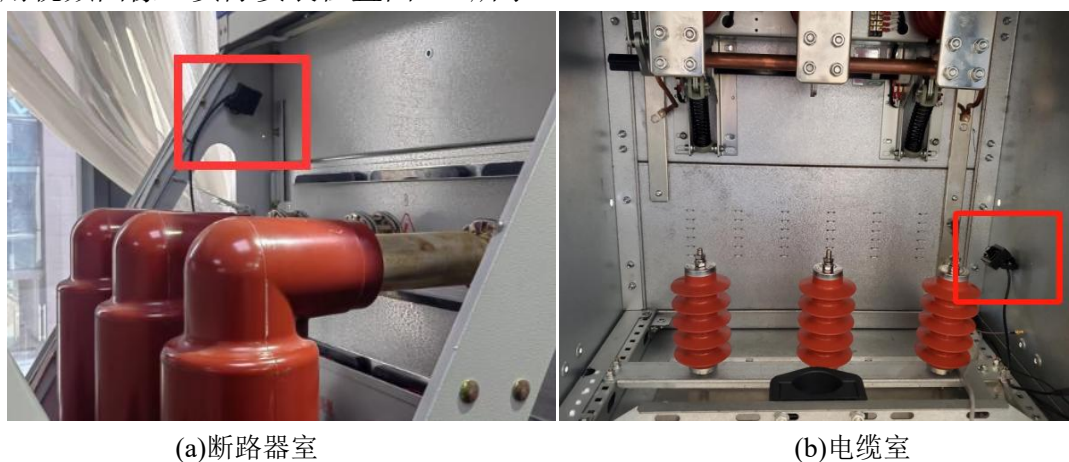


图 2.9 视频传感器安装实物图

(6) 角度传感器

由于角度检测位置与安装空间问题，角度传感器采用独立模块设计，通过 485 数据线链接至网关主电路板实现供电及数据通信。对于不同信号的断路器结构，给出轴端与轴侧两种安装方案，分别如图 2.10(a)与(b)所示。具体传感器设计见本文第三章详述。

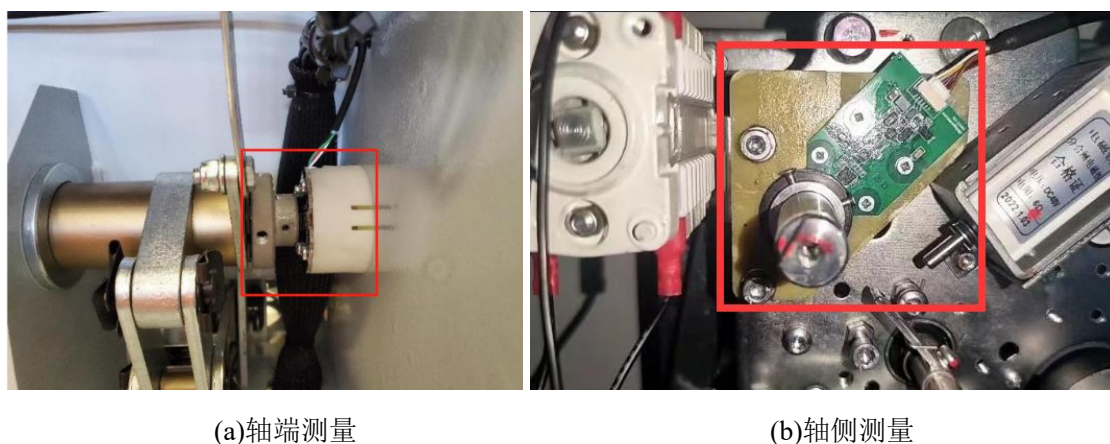


图 2.10 角度传感器实物安装图

2.3 系统软件设计

2.3.1 主控模块软件设计

主控模块软件流程如图 2.11。系统上电时，首先对单片机芯片进行初始化配置^[37-39]。初始化主要包括：设置时钟源和频率、初始化必要的硬件接口、外设，以及设定中断优先级等。根据硬件设计配置对应引脚功能。为防止程序异常导致卡死，本系统启用了软件看门狗，在系统正常运行时，定时器会周期性地重置看门狗计数器。如果系统发生异常导致未能及时重置计数器导致超时，触发看门狗复位，强制系统重新启动，从而使系统恢复到一个稳定的状态。

主程序运行时，通过长按校零按钮进入校零中断。每个 ADC 通道分别连续采集 20 个数值并进行均值滤波，记录对应 0A 电流所产生的电压值，写入 Flash 以实现零点数值掉电保存。角度校零同理。因此，在存储器初始化过程中需要读取指定地址的 Flash 闪存内的校零数据，并在校零操作中先擦除再重新写入新的校零数据。

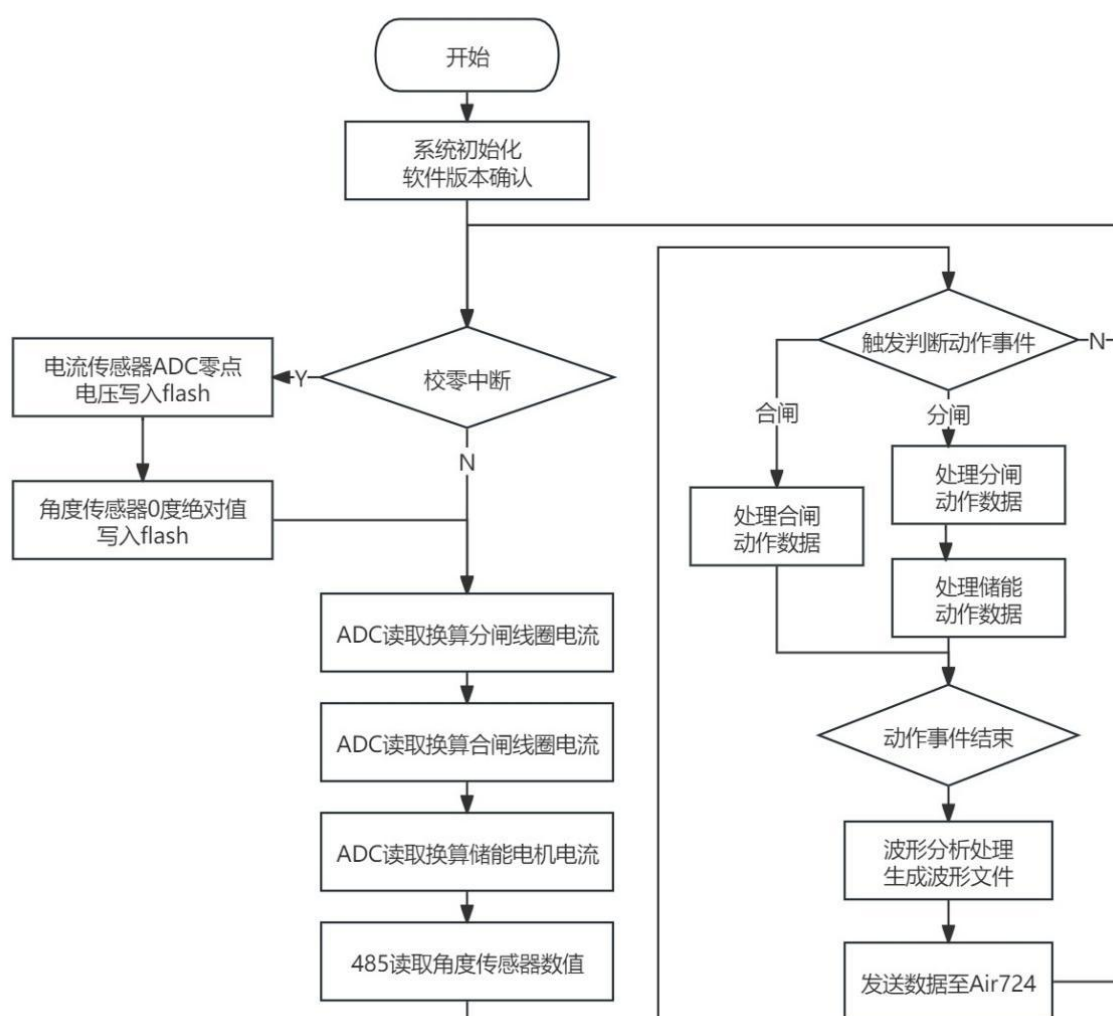


图 2.11 主控模块软件流程图

在主程序循环中，核心单片机 GD32F303RCT6 持续读取换算分闸线圈电流值、合闸线圈电流值、储能电机电流值、角度传感器角度值，并写入 4 个循环数组结构中，进行最新数据的实时记录和对旧数据的清除覆盖。这样的设计确保了对关键参数的持续监测和记录，以便及时响应系统状态变化，并保留了最新的状态信息，为系统的稳定运行提供了重要支持。在数据初始化时，从核心 MCU 的内存中申请固定大小的空间，即为固定长度的数组空间，当前指针指向头指针所在位置并开始持续写入实时电流数据。波形数据的实时缓存流程图如图 2.12 所示。由此便可以实现在有限的内存空间内对有效数据的实时缓存，以备数据的处理整合发送。

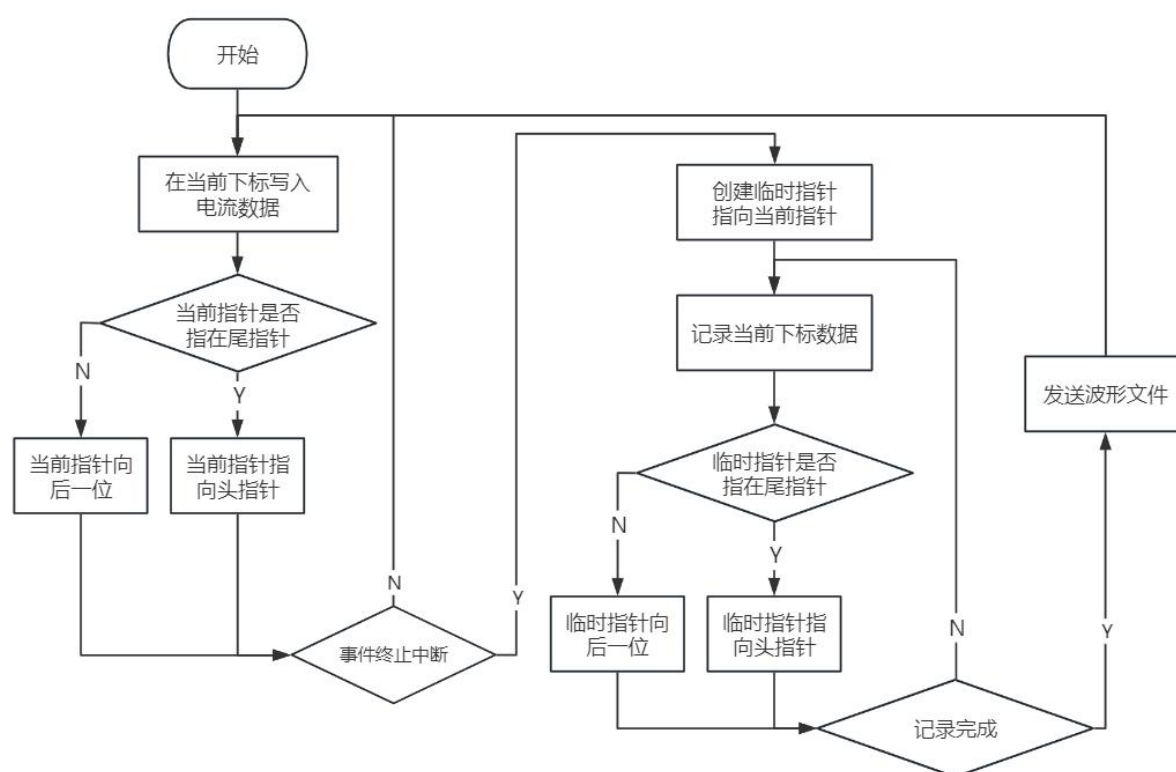


图 2.12 波形数据缓存流程图

高压断路器的分闸、合闸、储能流程包括以下几个步骤：首先，当需要进行分闸或合闸操作时，控制系统向操动机构发送相应的指令；然后，操动机构接收指令后，通过控制电机系统，对开关进行力学运动，实现分闸或合闸动作；接着，在分闸或合闸过程中，可能会涉及到储能操作，本系统所研究的对象是通过释放或储存弹簧能量，以提供足够的动力完成开关动作；最后，当开关完全分闸或合闸完成后，操动机构向控制系统发送反馈信号，确认动作已完成。基于对电网运行安全的考虑，高压断路器在合闸状态下要具备随时分闸的能力是为了应对可能发生的紧急情况。即使在合闸状态下，如果系统检测到电网或设备出现异常情况，需要立即中断电流以防止设备损坏或电网发生故障，断路器需要能够迅速分闸。因此，在分闸状态转为合闸状态前，需要进行储能动作，这一储能动作通常在操动机构完成合闸指令后自动进行。但为了合闸线圈电流数据的及时上报，本系统会在对于分闸事件的处理之后，将已经采集完成的储能电机的波形数据，与分闸线圈电流数据波形同时上传。

分合闸事件的判断采用持续阈值法。以合闸动作为例，事件判断流程如图 2.13 所示。核心 MCU 持续运行数据采集的主程序，当合闸电流超过有效阈值达 10ms 时，判断进入合闸事件。正常情况下，分合闸动作时长只有数十 ms。当合闸电流低于无效阈值持续 200ms，则判断为动作完成，合闸事件有效。如果进入事件判断超过 1s，判断为异常情况，合闸事件无效。当动作完成事件有效后，进行下一步整合并发送波形数据。对分闸动作和储能动作的判断同理。

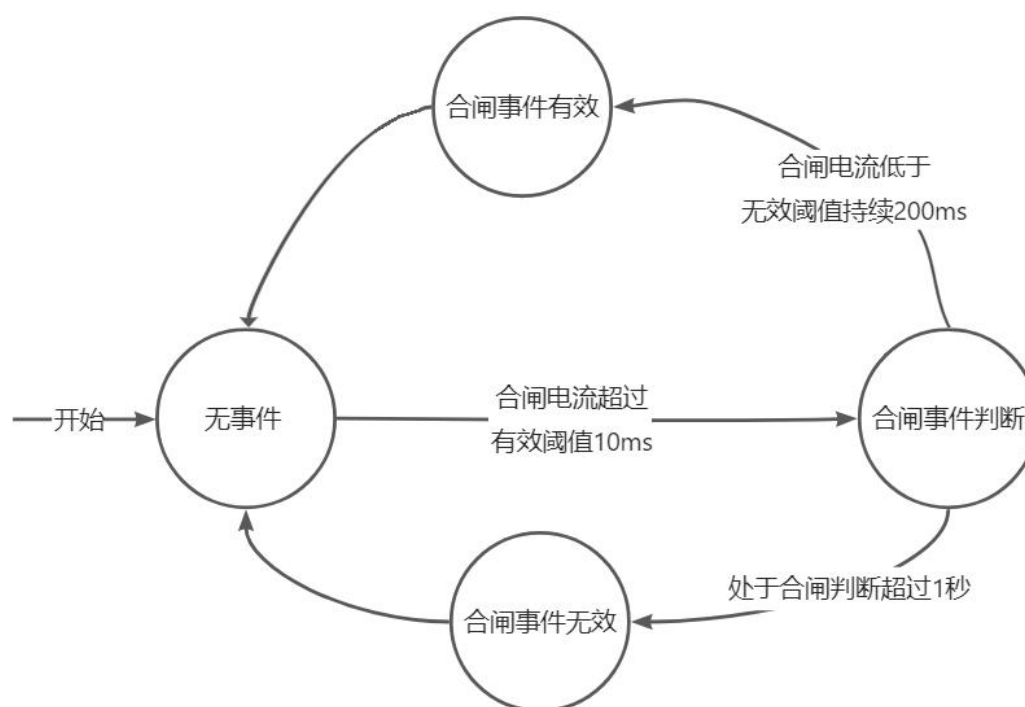


图 2.13 合闸电机的标准动作电流波形

2.3.2 无线通信模块及云平台软件设计

OneNET 物联网开放平台^[40-43]是中国移动打造的面向产业互联和智慧生活应用的物联网 PaaS(Platform as a Service)平台，OneNET 平台支持各种网络环境和协议类型的灵活适配，实现了对各种传感器和智能硬件的快速接入；该平台提供了丰富的 API 和应用模板，以支撑各个行业应用和智能硬件的开发；此外，该平台还可有效降低物联网应用的开发和部署成本，并提供了平台级服务，以满足物联网领域中诸如设备连接、智能化改造、协议适配、数据存储、数据安全以及大数据分析等各种需求。通过 OneNET 平台，本系统可以实现设备自动注册、网关信息上报、设备状态查询、设备远程控制等功能。

如图 2.14 框图所示，网关初次上电，检测到自己未注册到 OneNET 时，会自行根据产品 ID 在 OneNET 平台上创建设备并进行注册。注册成功后，网关进行初始化信息上报，主要有 Air724UG 以及核心 MCU 的代码版本号、SIM 卡卡号、IMEI 码等设备信息。完成初始化工作之后，定期上报网关心跳以确保网关的在线离线状态，上报监测设备相关监控点信息，

例如各个传感器的数据信息，以确保各项功能正常运转。管理人员也可以通过 OneNET 平台对网关设备进行远程控制。远程控制指令主要包括远程重启、远程升级、下挂设备数据透传等。对于的操作也都会实时记录在平台的历史数据中。

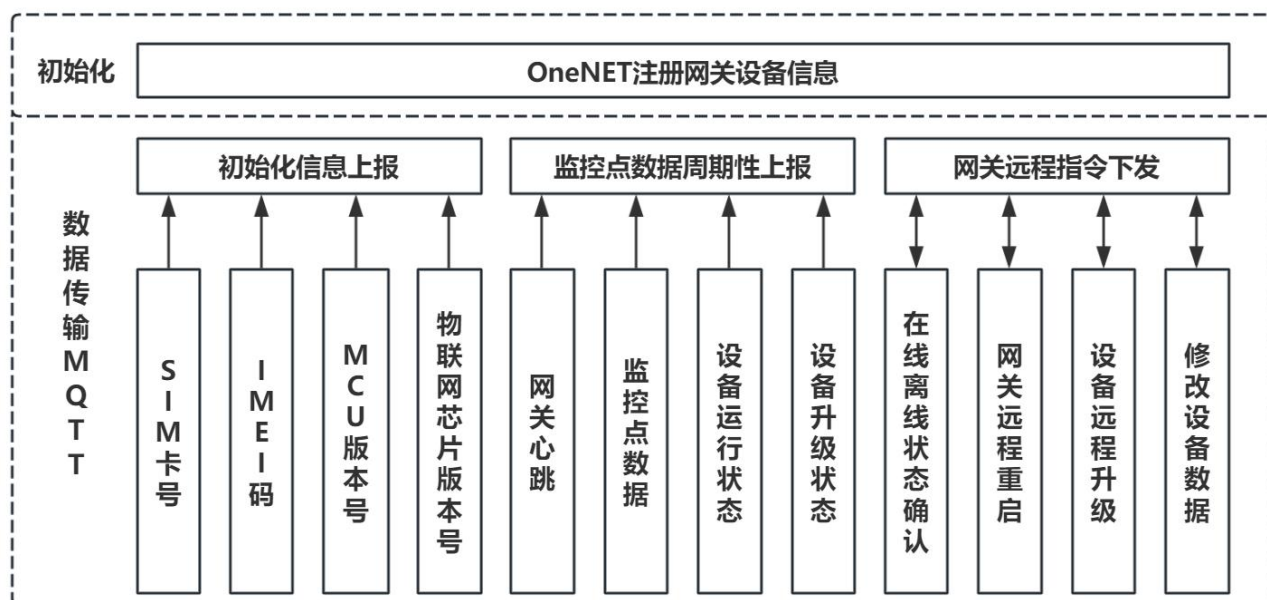


图 2.14 物联网云平台软件框图

网关与 OneNET 平台之间的通信协议为 MQTT（Message Queuing Telemetry Transport）^[44-47]。MQTT 是一种轻量级通信协议，主要应用于物联网和传感器网络中。它采用发布/订阅模式，包括发布者、订阅者和代理服务器，以实现设备间的可靠通信。具有轻量、异步、可靠、灵活和跨平台等特点，为实时通信提供了有效的解决方案。

核心 MCU 的远程升级是通过 Bootloader 实现的^[48,49]。嵌入在 MCU 内部的 Bootloader 程序会在设备上电后自动启动。Bootloader 会初始化相关硬件和通信接口，准备接收远程升级的指令和数据。通过 OneNET 云平台向网关下发 MCU 升级指令，打开文件传输接口。通过通信接口，将升级文件传输给 MCU，包括新固件的二进制数据以及文件的 MD5 校验信息。接着，Bootloader 会对接收到的升级文件进行验证和解析，确保文件的完整性和合法性。这包括核对文件校验、数字签名验证等操作，以防止恶意文件的升级。一旦验证通过，Bootloader 会将新固件的二进制数据写入代码的存储区域，覆盖原有的固件。完成覆盖后，Bootloader 会重新启动 MCU，并将控制权转交给新的固件。新固件会开始运行，完成 MCU 的升级操作。通过 Bootloader 实现 MCU 远程升级的过程能够方便地对设备进行固件更新而无需物理接触或替换芯片，提高了系统的可维护性和可扩展性。

2.4 效果展示

智能网关实物如图 2.15 所示。为方便安装、保护电路，配套有相应的保护壳与接线柱。

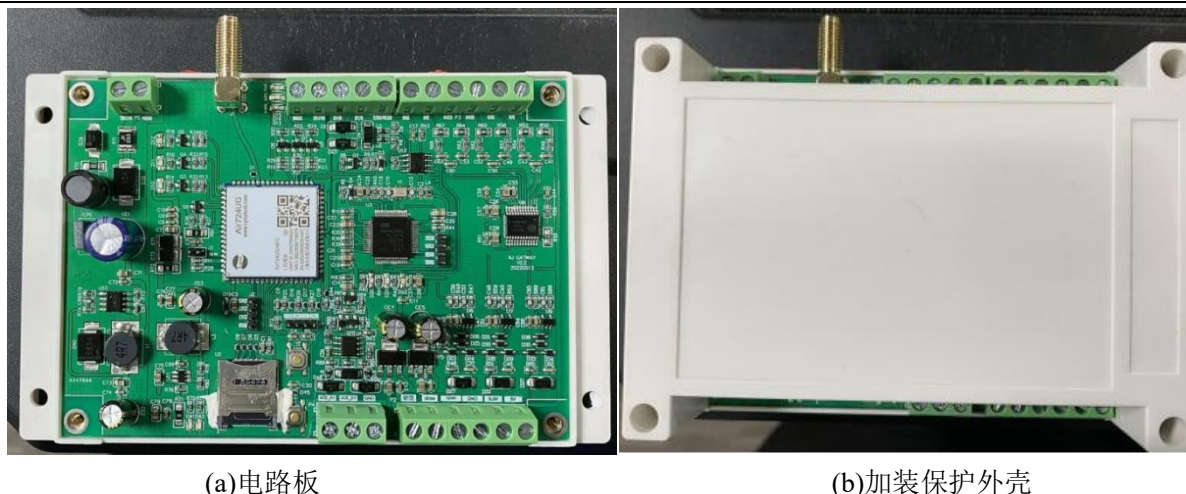


图 2.15 智能网关实物图

图 2.16 为 Web 端平台主界面，可以直观的显示设备的站点布局、运行状态评估、异常处理统计等总体情况。图 2.17 为综合管理页面，此页面包含项目创建、人员管理、设备添加等功能。



图 2.16 平台主界面

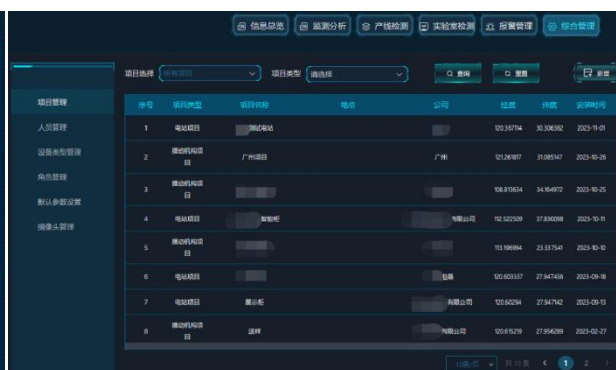


图 2.17 综合管理页面

图 2.18 所示的监测分析页面可用于查看所有数据列表以及具体设备的动作数据，同时提供历史数据查询功能。用户可以通过页面自主选择需要查看的设备历史数据，点击查看详情进入图 2.19 中的详细展示形式，而该页面呈现了详细的线圈电流波形和触头行程曲线等数据。通过监测分析页面的功能，可以有效提高设备监控和管理的精度和效率。



图 2.18 监测分析页面



图 2.19 详细数据波形页面

本地屏幕的功能与 Web 页面类似，除了信息波形的展示之外可以直接通过点触屏幕的控制按钮，通过屏幕向控制器发送指令，实现对断路器的分合闸控制。如图 2.20 所示。



(a)设备监控页面

(b)监测分析页面

图 2.20 本地屏幕实物图

小程序功能相对简洁，主要是方便通知运维人员查看设备列表接收故障告警，及时排查故障。图 2.21(a)、(b)、(c)分别是小程序主页面、告警列表和设备列表。



(a)主界面

(b)告警列表

(c)设备列表

图 2.21 小程序页面展示

2.5 本章小结

本章分析了高压断路器智能在线监测系统的整体系统需求，并根据需求进行了多个模块的设计选型。从硬件与软件两个角度出发，对系统的设计进行了深入地分析。硬件设计方面，详细介绍了各个模块的功能和选型。软件方面主要探讨了嵌入式软件以及无线通信模块的程序逻辑流程和架构，以期为系统的优化提供更为全面的参考依据。最后，介绍了云平台的整体框架，并对可视化交互界面进行整体效果展示。本系统切合实际需求，功能完整，逻辑通顺，并且在测试环境中持续运行近一年时间，共计记录动作数据数千条，稳定性和可靠性初步满足了实际项目需求，后文在此基础上就其他关键技术问题进行研究论证。

第 3 章 基于巨磁阻传感器的高压断路器触头行程测量方法

断路器操动机构机械故障的诊断需要采用先进的传感器技术和相关算法，对操动机构产生的机械信号进行处理、特征提取和故障识别。衡量断路器健康状况的重要指标是其触头行程-时间特性曲线^[50-53]，能够较全面地反映断路器操动机构的各个部件状况。基于对传统触头行程测量方法的综合分析，为解决传感器安装条件受限以及特殊安装方式带来测量误差的问题，本章节就一种基于巨磁阻效应的角度传感器展开研究，分析了巨磁阻传感器在角度测量应用中的原理，并以此提出补偿方法很大程度上解决了轴侧测量带来的误差。

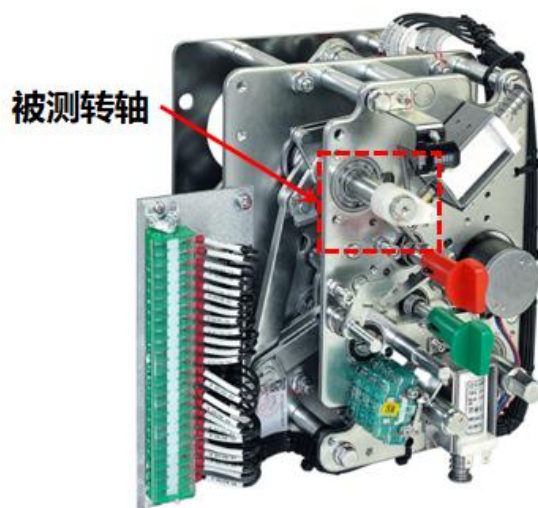
3.1 应用场景需求分析

为了获得断路器的触头行程曲线，需要在操动机构上安装位移传感器^[54-56]。在安装传感器时必须满足两个基本要求：首先，在不影响断路器运行性能的前提下，尽量保持断路器原有的机械结构不被改变或破坏；其次，传感器应能够准确、快速地获取断路器的触头行程曲线。

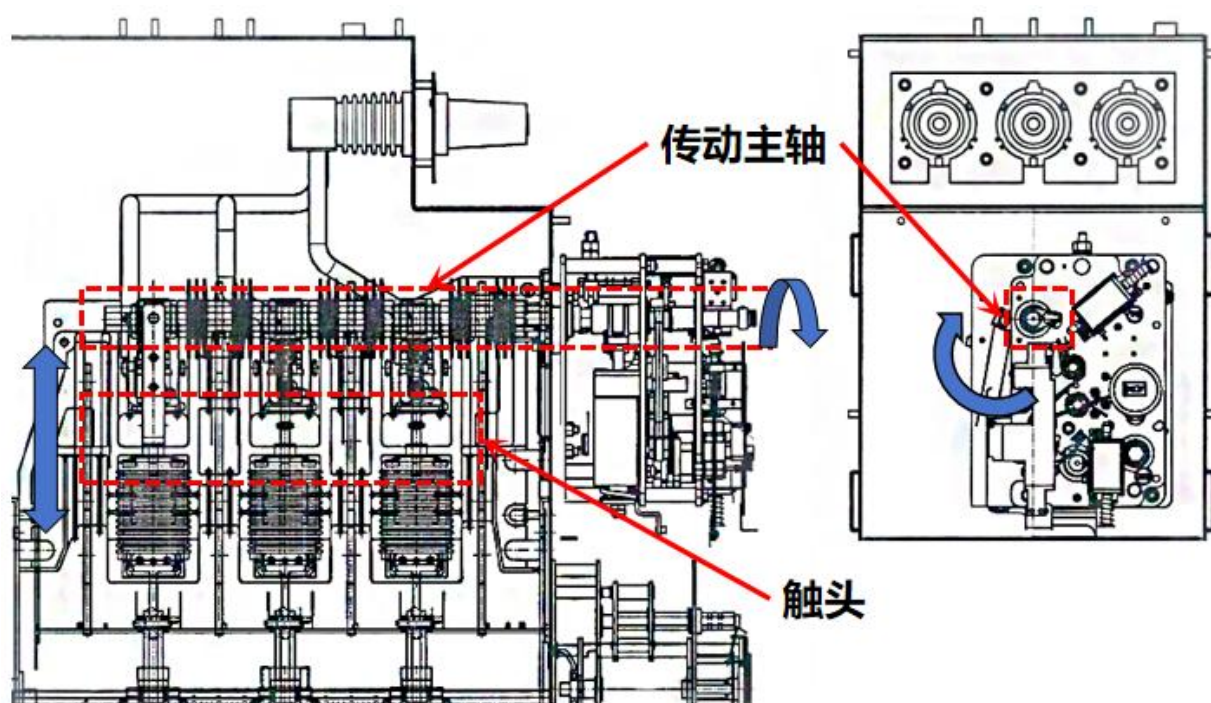
目前，常见的断路器触头行程位移测量方法有：滑动变阻式行程传感器、激光式行程传感器、光电编码器等。滑动变阻式行程传感器^[57]既可以用于旋转式测量，也可以用于直线式测量，但在测量旋转角度或线距离时存在些局限性，特别在被测对象高速运动或者频繁往复运动的情况下容易损坏不适合长期上电进行在线监测。激光行程传感器^[58,59]是一种非接触式距传感器，因此其使用寿命不受断路器设备动作影响，但也存在无法长时间通电运行的缺点。然而，由于其需要较大的安装空间和较高的成本以及不能长时间通电运行的限制，它并不适合用于实时的在线监测。光电编码器^[60-62]利用光栅盘和光电检测装置来测量角度或距离。然而，光电编码器的成本较高，容易受到灰尘、震动等外部因素的影响，对安装环境有一定的要求，抗干扰能力较差。

本文设计方案的应用场景示例如图 3.1(a)所示，其中红色虚线框内的圆柱轴体即为被测断路器传动主轴。图 3.1(b)中传动主轴旋转时带动其机械联动装置，拉动高压触头上下位移，实现断路器的分合闸动作。通过对传动主轴的旋转角度进行实时测量，得到角度波形数据，直接通过该角度数据确认触头运行进度。也可以根据不同操动机构的转轴角度-触头行程对应点表，得到触头行程曲线。操动机构动作时会产生剧烈震动，因此不适合一些抗干扰能力弱的传感器。王超^[63]基于 AMR 效应设计出磁阻角度传感器，磁阻传感芯片的角度测量范围仅有 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ，需要结合霍尔元件将测量范围扩展至 360° 。李航^[64]从材料与理论上论证了 GMR 巨磁阻效应在非接触式角度测量中应用的合理性。李曼，王志鹏^[21]基于巨磁阻效应设计出了一种采煤机摇臂角度传感器，其方式是将传感器安装于旋转轴的端面来检测磁场变化。基于 GMR 效应的角度测量方法中，通常都选用圆形或环形磁体作为外部磁场发生元件。

在本应用场景中，被测传动主轴的端面有其他的机械联动结构，不具备安装相关传感器的条件，因此需要一种离轴的角度测量方法。离轴角度测量是指将传感器与被测旋转轴不同心同轴的测量方式。而上述 GMR 角度传感器，通常是将传感器与磁体同轴放置，以在传感器位置得到一个平行与检测模块的均匀磁场。然而当将 GMR 传感器安装于圆形或环形磁体的侧面时，在传感器位置的磁场并不再是均匀且平行的分布，因此磁场测量角度和实际机械角度之间的关系不再是直接线性的，需要分析磁场变化对角度输出做出一定的参数补偿。



(a) 设备实物



(b) 机械结构

图 3.1 应用场景示例图

3.2 基于巨磁阻效应的角度传感器

3.2.1 巨磁阻效应 (Giant Magneto Resistance)

巨磁阻效应是在外磁场作用下相较于无外磁场作用时磁性材料的电阻率产生巨大改变的一种量子力学现象。它产生于由铁磁和非铁磁材料薄层交替叠合而成的层状薄膜结构中。1986年,德国物理学家彼得·格林贝格尔(Peter Grünberg)在铁(Fe)和铬(Cr)制备而成的Fe/Cr/Fe/三层单晶薄膜^[65],1988年法国物理学家阿贝尔·费尔(Albert Fert)在Fe/Cr周期性多层膜中相继独立发现巨磁阻效应的存在^[66,67]。

基于巨磁阻效应的传感器磁敏感应材料主要包括磁性层、非磁性层^[68,69],磁性层根据其磁化方向是否会收到外界磁场方向影响分为自由层和参考层,其结构如图3.2所示。

自由层(Free Layer):自由层是磁性多层结构中的一个关键组成部分。它通常由可在外部磁场作用下自由磁化的材料构成,例如铁、镍、钴及其合金。自由层的磁化方向能够在外部磁场变化时发生调整,导致整个材料的电阻发生变化,从而实现巨磁阻效应。

普通层(Normal Layer):普通层将两层磁性材料薄膜层分隔开,采用非磁性材料,位于自由层和参考层之间。其作用是通过磁性交换耦合机制将自由层的磁化方向固定在特定方向上,当普通层的厚度达到一定条件,在外部磁场未作用时,两个铁磁层所表现出的磁化方向呈现一种互为反向的状态。这有助于确保自由层在无外部磁场时保持稳定的磁化状态。典型的普通层材料包括铁氧化物(FeO)或其他非磁性金属,其磁性相对于自由层较弱。

参考层(Reference Layer):参考层也是磁性多层结构的重要组成部分,通常与自由层相对应,但其磁化方向是固定的。参考层的磁化方向提供一个基准,用于测量自由层在外部磁场变化下的相对磁化方向。参考层通常由铁、镍、钴等材料构成,并通过磁性耦合与其他层相连接。

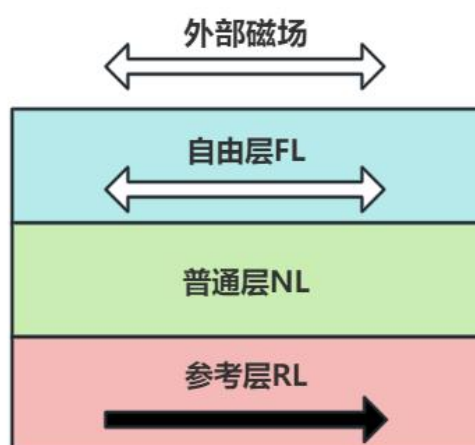


图 3.2 磁敏感应材料组成示意图

根据莫特（Mott）所提出的二流体模型^[70]，电子的自旋可分为两个方向，即自旋向上和自旋向下。该模型主要基于将传导电子的输运过程按照电子的自旋分为两个并联通道，每个通道各自承载电流，二者互相独立。在铁磁/非磁性/铁磁（FM/NM/FM）多层结构中，由于磁性层的自旋方向呈交替排列，并且存在非磁性层，这导致了自旋平行和反平行的电子之间出现了不同的电子散射情况。当自旋电子通过与其自旋极性相一致的铁磁层时，其散射受到较小影响，因此在宏观上表现为低电阻状态。相反地，当遇到自旋电子自旋极性方向相反的磁性层时，电子会经历极强的散射，这是由于磁化方向交替排列所引起的，散射增强导致电子的平均自由程减小，进而导致电阻显著增加。

在无外加磁场的情况下，自由层和参考层的磁化方向呈相反的状态。通过图 3.3(a)来展示两种不同自旋方向电子的运动状态。由于两条电子运输通道并联，每条自旋通路都表现为高电阻，宏观上看，呈现出高阻状态。同理如图 3.3(b)所示，受到外部磁场的影响，自由层随之磁化，当其与参考层的磁化方向逐渐趋于平行状态时，一条通路的电阻值较高，而另一条的电阻值较低，因此呈现出了低阻态。

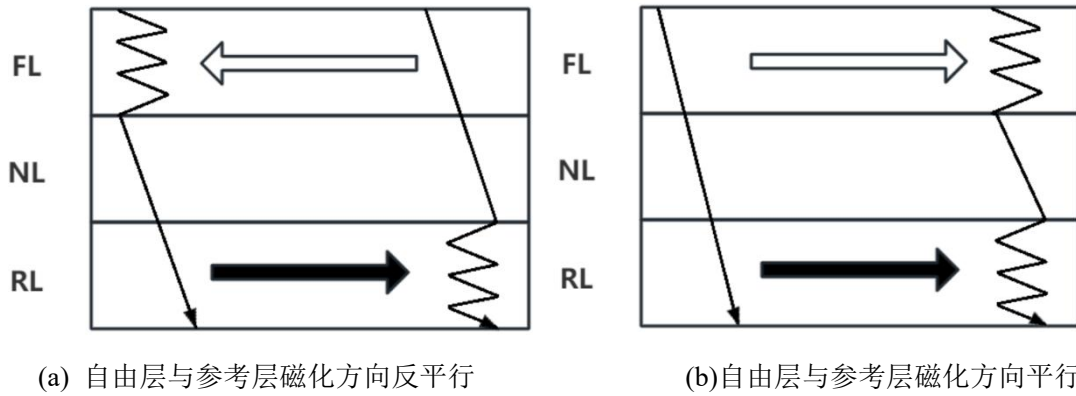


图 3.3 巨磁阻效应二流体模型示意图

结合莫特二流体模型和上文分析，可以通过图 3.4 的巨磁阻效应二流体模型示意图得到自由层磁化方向与参考层磁化方向平行与反平行时的等效电路，如图 3.4 所示。 R 为自旋电阻表现出的高阻值， r 为自旋电阻表现出的低阻值。

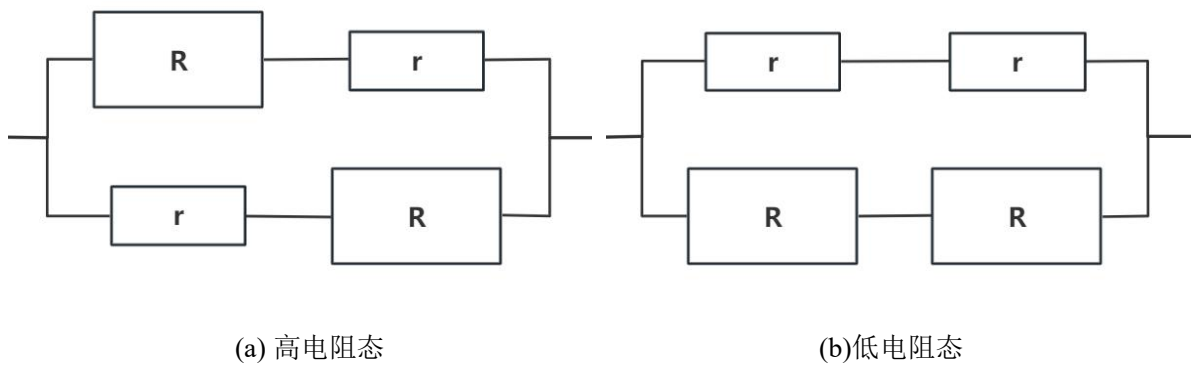


图 3.4 二流体模型等效电路

在无外加磁场时，自由层与参考层的磁化方向呈现反平行排列，根据二流体模型等效电路图 3.4(a)，可以得出反平行阻值 R_{ap} ：

$$R_{ap} = \frac{(R + r) \times (r + R)}{(R + r) + (r + R)} = \frac{R + r}{2} \quad (3.1)$$

收到外部磁场影响，自由层磁化方向发生变化，与参考层的磁化方向到达平行状态时，根据二流体模型等效电路图 3.4(b)，可以得出反平行阻值 R_p ：

$$R_p = \frac{(R + R) \times (r + r)}{(R + R) + (r + r)} = \frac{2Rr}{R + r} \quad (3.2)$$

自由层磁化方向由反平行与参考层方向转变为平行与参考层的反向过程中，巨磁电阻阻值的变化量 ΔR_{GMR} 如公式 (3.3) 所示：

$$\Delta R_{GMR} = R_p - R_{ap} = -\frac{(R - r)^2}{2(r + R)} < 0 \quad (3.3)$$

3.2.2 巨磁阻效应测量角度原理

基于巨磁电阻效应，巨磁电阻体在 $B = 0$ 时表现出其高阻特性，即在外加磁场的情况下，其电阻阻值呈最高值 (R_{ap})。随着磁场强度的增加 ($B < 0$ 或 $B > 0$)，自由层磁化方向发生变化，造成巨磁电阻的阻值发生相应的降低。利用巨磁电阻体的这一特性，我们可以通过其阻值的变化来推算外部磁场发生器件的旋转角度。同时也说明，单独的一个巨磁电阻所具备的磁敏感性在正反向磁场的作用下表现出相似的性质，这说明磁场方向对其磁性不会产生影响。而当外部磁场的影响达到饱和状态，磁性层的磁化方向趋于一致，具有巨磁电阻特性的电子器件的电阻值达到最小值 (R_p)。

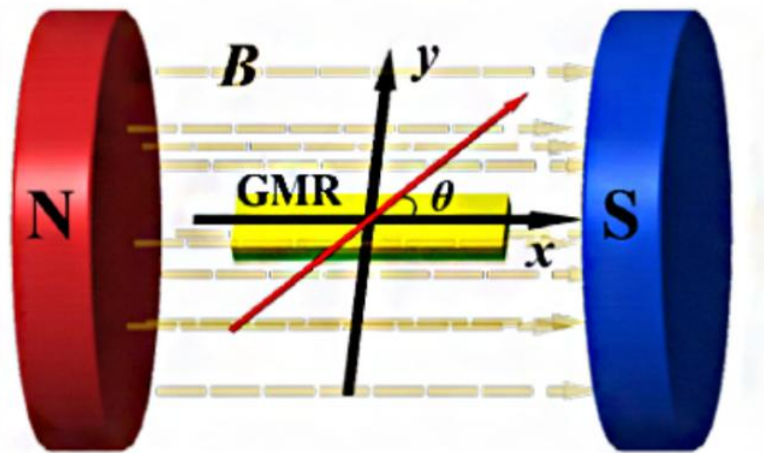


图 3.5 GMR 测量角度原理图

在基于巨磁阻效应测量角度的原理图 3.5 中，在建立直角坐标系后，施加一个饱和且均匀的磁场 B 沿巨磁电阻的 x 轴方向，导致巨磁电阻的自由层与参考层的磁矩方向平行，此时，巨磁电阻的阻值达到了最低点。在磁场 B 沿角度偏转时，相对于巨磁电阻的角度所形

成的余弦值 $B\cos\theta$ 将在巨磁电阻的 x 轴方向施加作用。在 $\theta = 180^\circ$ 时，巨磁电阻铁磁性层的磁化方向与初状态呈反平行状态，此时其阻值达到了最大值。当角度 $\theta = 360^\circ$ 时，巨磁电阻的阻值再次回到了最小值。

在对前述内容进行综合分析后，构建出巨磁电阻阻值变化量(ΔR)与外磁场角度 θ 变动的关系曲线，如图 3.6 所示。

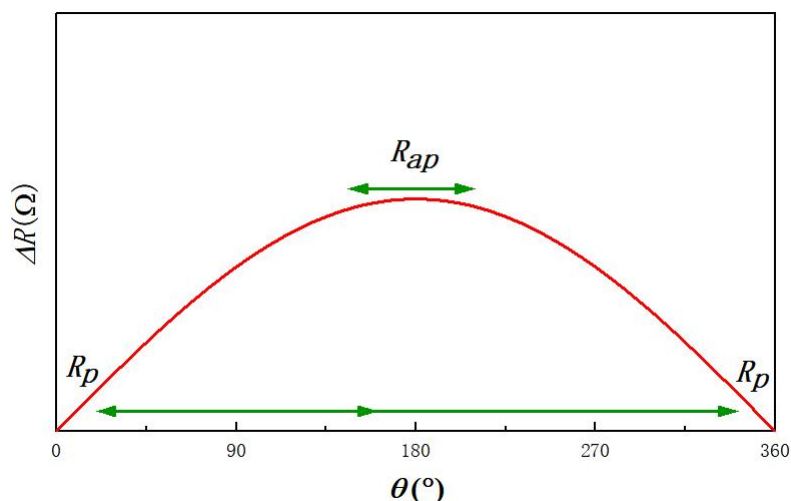


图 3.6 巨磁电阻变化量与外部磁场角度关系曲线

在图 3.7 中。巨磁电阻上的箭头表示在参考层中固定的磁化方向，在未受外部磁场影响或外部磁场反平行与该方向时，阻值最大。如果外部磁场平行于参考层的方向，则电阻最小。

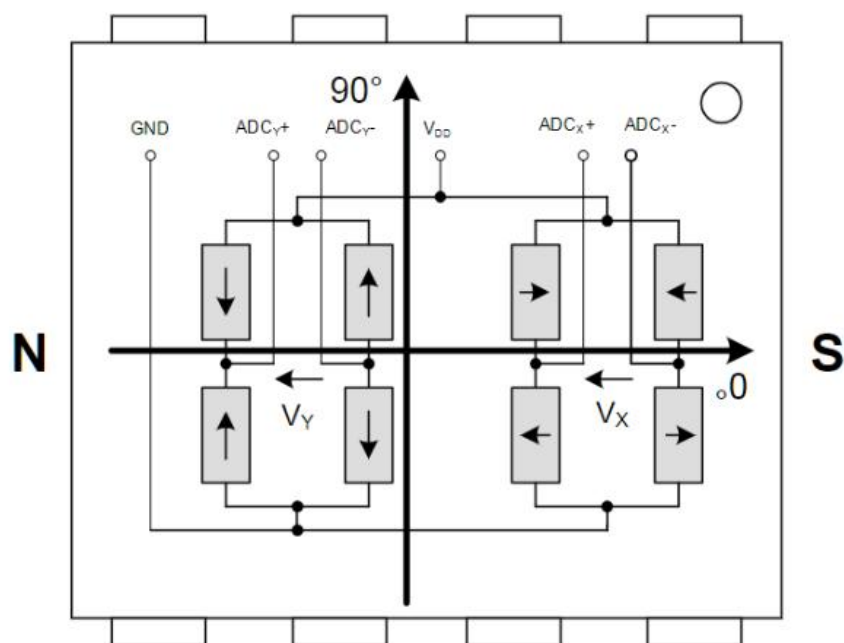


图 3.7 GMR 传感器的原理示意图

基于对巨磁电阻效应分析，图 3.8 给出了磁敏感单元的等效电路图，将四个单独的 GMR 元件连接到一个惠斯通传感器桥，由两个惠斯通电桥感测外加磁场的 x 和 y 两个分量，惠斯通电桥 I 所在方向规定为标准方向。

惠斯通电桥 I 用于测量外部磁场在 x 轴方向的分量。其中巨磁电阻 R_1 和 R_3 排列在水平方向且放置于 x 轴的正方向；巨磁电阻 R_2 和 R_4 同样与 x 轴平行，但是与 x 轴正方向相反，并水平摆放。

惠斯通电桥 II 整体方向相对于惠斯通电桥 I 相差逆时针 90° ，用于测量 y 轴方向上的外部磁场分量。类似地， R_5 、 R_7 沿 y 轴正方向放置； R_6 、 R_8 沿 y 轴负方向放置。

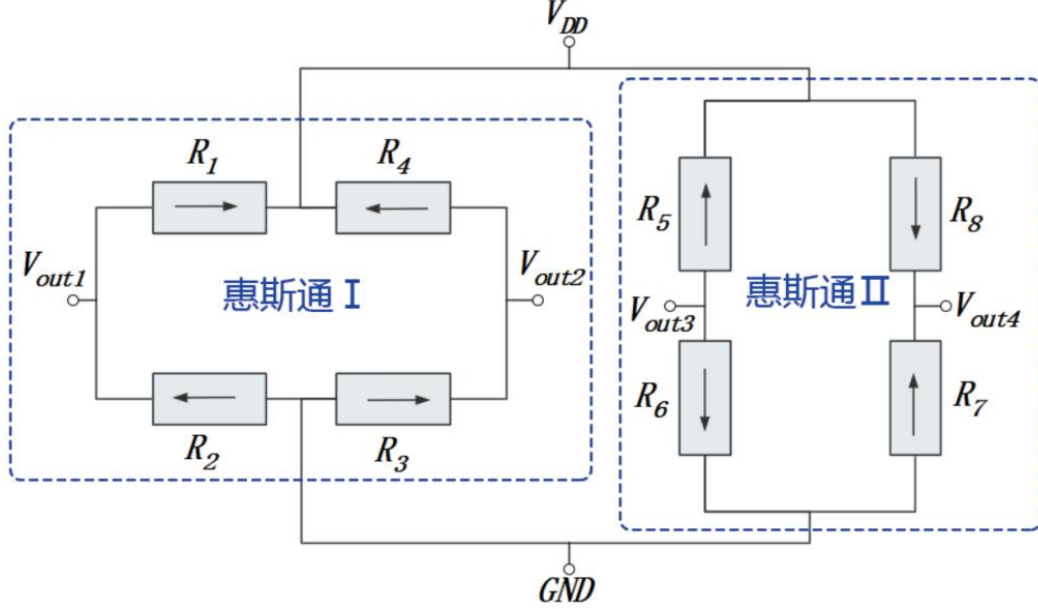


图 3.8 磁敏感单元的等效电路图

当巨磁电阻芯片不受到外部磁场影响的时候，磁敏感单元中的 8 个巨磁电阻的阻值均保持不变，在假设巨磁电阻的阻值相等且处于理想状态的前提下，记作 R ，此时惠斯通电桥 I 和惠斯通电桥 II 输出电压表现分别为：

$$\begin{cases} V_{out1} = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{DD} \frac{R}{R + R} = \frac{V_{DD}}{2} \\ V_{out2} = V_{DD} \frac{R_3}{R_3 + R_4} = V_{DD} \frac{R}{R + R} = \frac{V_{DD}}{2} \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} V_{out3} = V_{DD} \frac{R_6}{R_5 + R_6} = V_{DD} \frac{R}{R + R} = \frac{V_{DD}}{2} \\ V_{out4} = V_{DD} \frac{R_7}{R_7 + R_8} = V_{DD} \frac{R}{R + R} = \frac{V_{DD}}{2} \end{cases} \quad (3.5)$$

两个惠斯通电桥输出端电压与测得的磁场分量存在着一种对应关系，由公式 (3.4) 和 (3.5)，得到：

$$\begin{cases} V_{outx} = V_{out2} - V_{out1} = 0 \\ V_{outy} = V_{out4} - V_{out3} = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

即在不受外部磁场的影响下，两个惠斯通电桥的输出电压为 0V。

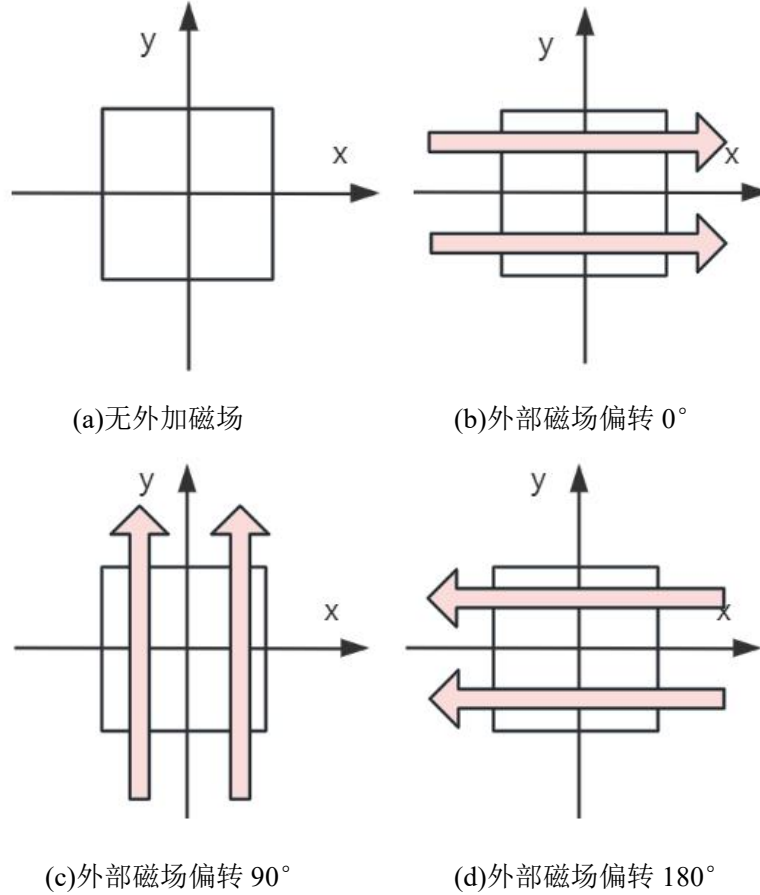


图 3.9 GMR 传感器工作原理

如图 3.9(b)，当对巨磁电阻芯片施加沿 x 轴正方向的匀强磁场时，也就是外部磁场方向与 x 轴正方向夹角 $\theta = 0^\circ$ ，此时 R5、R6、R7 及 R8 均以垂直于外部磁场方向的方式存在。对于这些巨磁电阻的变化量，由于其极性可以被忽略，并且被视为相同的值 $\Delta R_\perp$ 。惠斯通电桥 I 中的 R1、R3 平行于磁场方向，此时电阻的阻值最小，阻值变化幅度达最大值，记作 ΔR_M 。此时有：

$$\begin{cases} V_{\text{out1}} = V_{\text{DD}} \frac{R_2}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot R}{2R + \Delta R_M} \\ V_{\text{out2}} = V_{\text{DD}} \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_3 + \Delta R_3 + R_4} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_M)}{2R + \Delta R_M} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} V_{\text{out3}} = V_{\text{DD}} \frac{R_6 + \Delta R_6}{R_5 + \Delta R_5 + R_6 + \Delta R_6} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} \\ V_{\text{out4}} = V_{\text{DD}} \frac{R_7 + \Delta R_7}{R_7 + \Delta R_7 + R_8 + \Delta R_8} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} V_{\text{outx}} = V_{\text{out2}} - V_{\text{out1}} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_M)}{2R + \Delta R_M} - \frac{V_{\text{DD}} \cdot R}{2R + \Delta R_M} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot \Delta R_M}{2R + \Delta R_M} \\ V_{\text{outy}} = V_{\text{out4}} - V_{\text{out3}} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} - \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} = 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

如图 3.9(c)所示, 当外部磁场与 x 轴的夹角 $\theta = 90^\circ$, 即磁场方向与 y 轴正方向同向时, 惠斯通电桥 I 中巨磁电阻 R1、R2、R3、R4 均与外部磁场方向垂直, 它们的阻值变化量一致, 均视为相同的 $\Delta R_\perp$ 。惠斯通电桥 II 中的 R5 和 R7 平行于外部磁场方向, 巨磁电阻值最小, 变化幅度达最大值, 记作 ΔR_M 。同理可得:

$$\begin{cases} V_{\text{out1}} = V_{\text{DD}} \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} \\ V_{\text{out2}} = V_{\text{DD}} \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} V_{\text{out3}} = V_{\text{DD}} \frac{R_6}{R_5 + \Delta R_5 + R_6} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot R}{2R + \Delta R_M} \\ V_{\text{out4}} = V_{\text{DD}} \frac{R_7 + \Delta R_7}{R_7 + \Delta R_7 + R_8} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_M)}{2R + \Delta R_M} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} V_{\text{outx}} = V_{\text{out2}} - V_{\text{out1}} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} - \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} = 0 \\ V_{\text{outy}} = V_{\text{out4}} - V_{\text{out3}} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_M)}{2R + \Delta R_M} - \frac{V_{\text{DD}} \cdot R}{2R + \Delta R_M} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot \Delta R_M}{2R + \Delta R_M} \end{cases} \quad (3.12)$$

如图 3.9(d)所示, 外部磁场与 x 轴正向有相反的方向, 即夹角 $\theta = 180^\circ$ 。巨磁电阻 R2 以及 R4 与磁场方向平行, 此时所对应的阻值变化量达最大值, 记作 ΔR_M , 电阻呈现低阻态。与 3.9(b)的情况相反, 惠斯通电桥 I 输出电压表现出相反的变化。惠斯通电桥 II 中的巨磁电阻 R5、R6、R7、R8 的变化情况等同于图 3.9(b), 阻值变化量与 $\theta = 0^\circ$ 时一致, 仍可以记为 $\Delta R_\perp$ 。

此时, 阻值变化量可忽略其极性, 均视为相同的 $\Delta R_\perp$ 。此时有:

$$\begin{cases} V_{\text{out1}} = V_{\text{DD}} \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + R_2 + \Delta R_2} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_M)}{2R + \Delta R_M} \\ V_{\text{out2}} = V_{\text{DD}} \frac{R_3}{R_3 + R_4 + \Delta R_4} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot R}{2R + \Delta R_M} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\begin{cases} V_{\text{out3}} = V_{\text{DD}} \frac{R_6 + \Delta R_6}{R_5 + \Delta R_5 + R_6 + \Delta R_6} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} \\ V_{\text{out4}} = V_{\text{DD}} \frac{R_7 + \Delta R_7}{R_7 + \Delta R_7 + R_8 + \Delta R_8} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$\begin{cases} V_{\text{outx}} = V_{\text{out2}} - V_{\text{out1}} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot R}{2R + \Delta R_M} - \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_M)}{2R + \Delta R_M} = -\frac{V_{\text{DD}} \cdot \Delta R_M}{2R + \Delta R_M} \\ V_{\text{outy}} = V_{\text{out4}} - V_{\text{out3}} = \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} - \frac{V_{\text{DD}} \cdot (R + \Delta R_\perp)}{2R + \Delta R_\perp} = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

同理可得 $\theta = 270^\circ$ 时, V_{outx} 和 V_{outy} 为:

$$\begin{cases} V_{outx} = V_{out2} - V_{out1} = V_{DD} \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} - V_{DD} \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} = 0 \\ V_{outy} = V_{out4} - V_{out3} = V_{DD} \frac{R_7}{R_7 + R_8 + \Delta R_8} - V_{DD} \frac{R_6 + \Delta R_6}{R_5 + R_6 + \Delta R_6} = -\frac{V_{DD} \cdot \Delta R_M}{2R + \Delta R_M} \end{cases} \quad (3.16)$$

$\theta = 360^\circ$ 时，输出与 $\theta = 0^\circ$ 完全一致。即：

$$\begin{cases} V_{outx} = V_{out2} - V_{out1} = V_{DD} \frac{R_3 + \Delta R_3}{R_3 + \Delta R_3 + R_4} - V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} = \frac{V_{DD} \cdot \Delta R_M}{2R + \Delta R_M} \\ V_{outy} = V_{out4} - V_{out3} = V_{DD} \frac{R_6 + \Delta R_6}{R_5 + \Delta R_5 + R_6 + \Delta R_6} - V_{DD} \frac{R_7 + \Delta R_7}{R_7 + \Delta R_7 + R_8 + \Delta R_8} = 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

通过公式（3.4）至（3.17）的推导分析，可以明显观察到， V_{outx} 与 V_{outy} 的相位差为 90° ，与两组电桥的相对位置的角度差相吻合。据此可以得出结论，该惠斯通电桥旋转周期为 360° 。

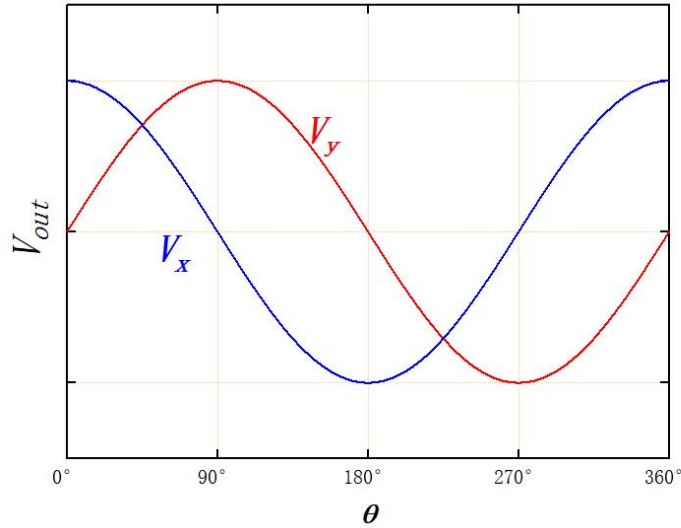


图 3.10 输出电压 V_{out} 与磁场角度 θ 理论关系曲线

图 3.10 所示的输出电压与角度 θ 的理论关系曲线，根据外部磁场在 x 轴和 y 轴两个方向的分量得出，两个惠斯通电桥的输出电压 V_{outx} 和 V_{outy} 的数值分别与 $\cos\theta$ 和 $\sin\theta$ 成正比，其公式可以表达为：

$$\begin{cases} V_{outx} = \frac{V_{DD} \cdot \Delta R}{2R + \Delta R} \cos\theta \\ V_{outy} = \frac{V_{DD} \cdot \Delta R}{2R + \Delta R} \sin\theta \end{cases} \quad (3.18)$$

根据公式（3.18）得出，外加磁场角度与 x 轴、y 轴两方向输出电压的对于关系如公式（3.19）所示：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{B_y}{B_x}\right) = \arctan\left(\frac{V_{outy}}{V_{outx}}\right) \quad (3.19)$$

根据公式 (3.19) 计算所得, 理论测量角度 α 与实际角度 θ 的关系曲线, 如图 3.11 所示。

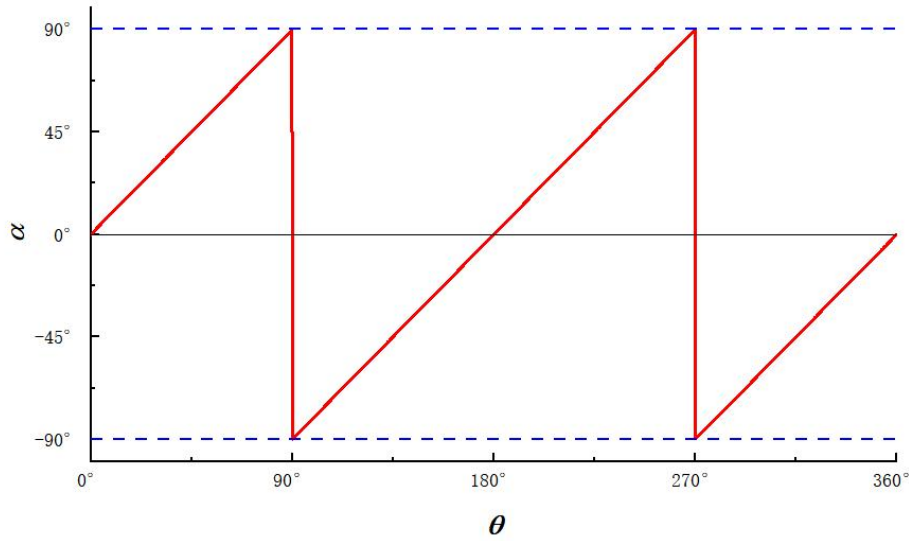


图 3.11 理论角度计算曲线

V_{outx} 与 V_{outy} 两个方向的电压输出分量在相位上存在 90° 的差异, 这导致计算得到的理论角度值在 $0\sim 360^\circ$ 的范围内, 呈现出周期为 180° 的两个周期的曲线。然而, 考虑到 V_{outx} 与 V_{outy} 在直角坐标系的四个象限中的极性不同, 本文提出了一种基于极性判定所得角度区域的方法, 具体公式如下:

$$\theta' = \begin{cases} \alpha & (V_{outx} > 0, V_{outy} > 0) \\ \alpha + 180^\circ & (V_{outx} < 0) \\ \alpha + 360^\circ & (V_{outx} > 0, V_{outy} < 0) \end{cases} \quad (3.20)$$

依据公式 (3.20) 中给出的角度范围判定方式, 根据图 3.11 中给出的理论角度计算曲线进行相应的角度范围转换。得到与实际角度 θ 对应的理论计算角度 θ' 的变换关系, 见图 3.12。该曲线的斜率为 1, 即 $\theta = \theta'$, 满足角度传感器对于平面内全角度进行测量的理论设计要求。

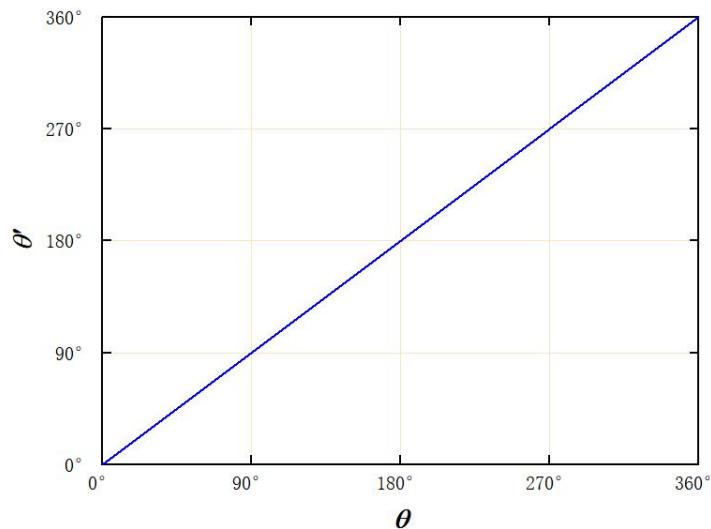


图 3.12 理论计算角度与实际角度的对应关系曲线

3.2.3 离轴角度测量补偿

通常情况下，采用径向充磁的单对极圆形或环形磁钢作为外部磁场的发生元件。如图 3.13 所示，当芯片与磁钢以同心同轴的相对位置进行安装时，磁钢可以为磁敏感芯片提供平行于传感元件的均匀磁场。这种情况下，芯片内的两个惠斯通感应电桥的输出端均呈现规律的正弦、余弦电压波形输出，经过相应的计算可以得出磁场角度与机械角度之间的直接线性关系。

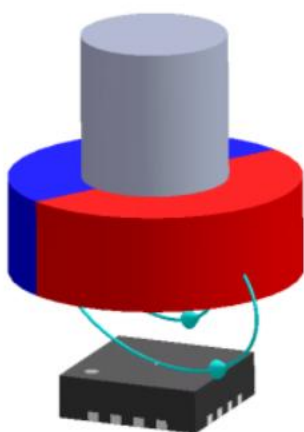


图 3.13 同轴测量相对位置示意图

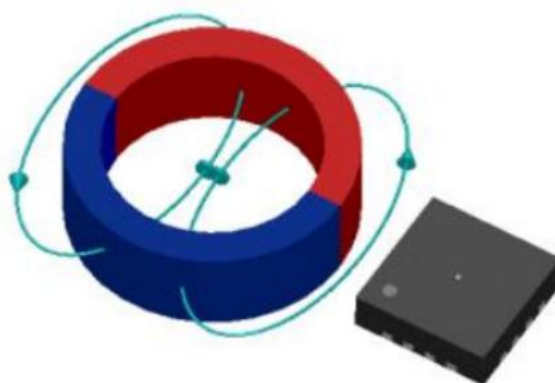


图 3.14 离轴测量相对位置示意图

然而，在一些应用场景中，由于安装空间条件有限等因素，为了实现离轴测量，需要将芯片安装在旋转轴以及磁体的侧面，如图 3.14 所示。

径向充磁的单对极环形磁体的外围磁场分布如图 3.15 所示。其外围磁场分布呈现出一种特殊的形状，磁感线从 N 极呈放射性出发，沿磁环两侧呈现出环形状的分布，收束回 S 极。在磁体轴线附近，磁场相对较强。随着距离轴线的增加，磁场逐渐减弱。总体形成一个类似于圆环的磁场结构。这种分布是由环形磁体的磁极性质和磁场的闭合性质所决定的。

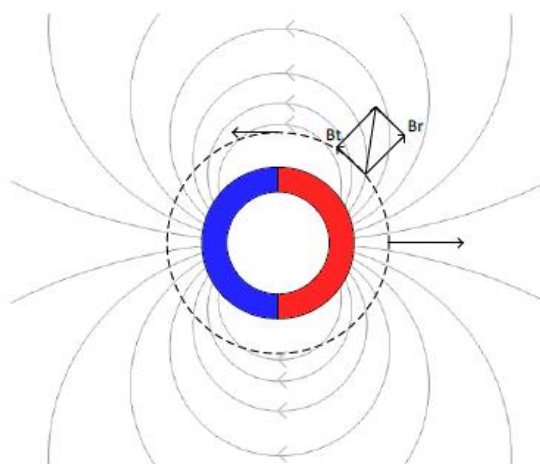


图 3.15 环形磁体的外围磁场分布示意图

理想情况下，沿着图 3.15 中以磁体为中心的圆形轨迹产生的径向磁场 B_r 与切向磁场 B_t 是角度的正弦函数，一般情况下径向磁场振幅 B_{r0} 和切向磁场振幅 B_{t0} 是不同的。这种不同会导致非线性的传感器输出，即所谓的“椭圆”误差。将径向磁场振幅 B_{r0} 和切向磁场振幅 B_{t0} 的比值定义为 k ：

$$k = \frac{B_{r0}}{B_{t0}} \quad (3.21)$$

径向、切向磁场与角度关系如图 3.16 所示。

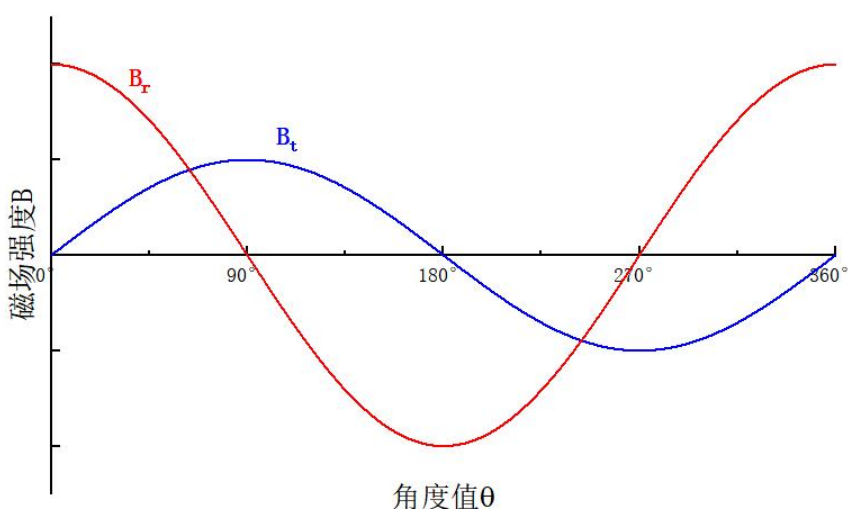


图 3.16 径向、切向磁场与角度关系

然而实际应用中，很难在以磁体为中心的固定半径圆形轨迹上测量出径向磁场振幅 B_{r0} 和切向磁场振幅 B_{t0} 。因此，本文采用一种根据测量角度与实际角度误差的方法，计算出径向磁场幅值与切向幅值的比值 k 。将环形磁体旋转一周，记录其实际旋转角度 θ 与离轴测量得到的传感器度数 θ' ，如图 3.17 所示。

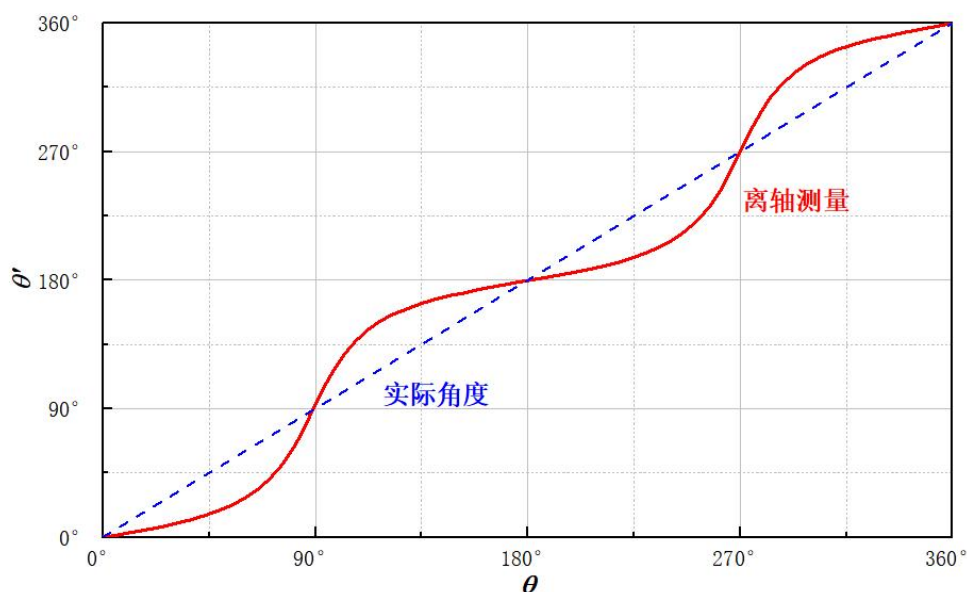


图 3.17 实际角度与测量角度对比

将实际角度与测量角度作差，得到如图 3.18 所示的角度误差曲线。该误差曲线本质上具有二次谐波分量，它让一次完整的旋转产生两个正弦波。此时，磁场角度与机械角度之间的关系不再是直接线性的，改变径向和切向磁场灵敏度之间的比率可以补偿纠正此误差。

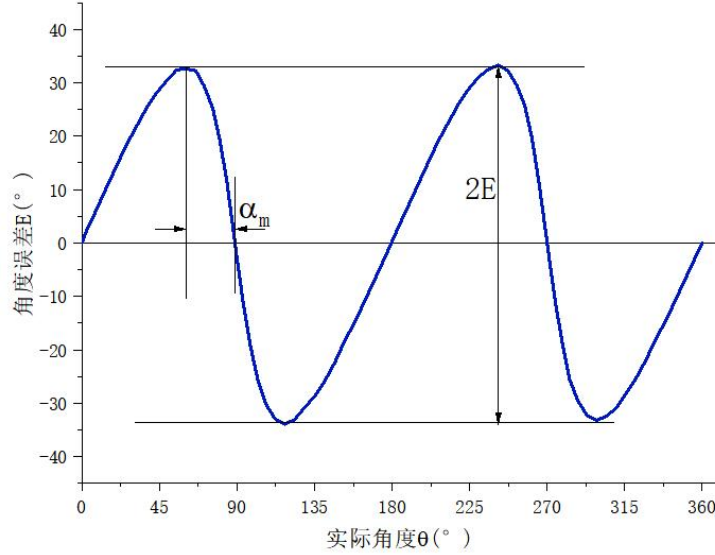


图 3.18 角度误差曲线

图 3.18 角度误差曲线中，记最大误差为 E ，该最大值相对于零点的角度位置为 α_m ，通过公式 (3.20)，可以计算出 k 的值：

$$k = \frac{\tan(E + \alpha_m)}{\tan(\alpha_m)} \quad (3.22)$$

根据公式 (3.19) 可知 $B_{r0} = kB_{t0}$ ，因此通过公式 (3.20) 计算得出的比率 k 便可以使得径向磁场振幅 B_{r0} 和切向磁场振幅 B_{t0} 保持一致，如图 3.19 所示。

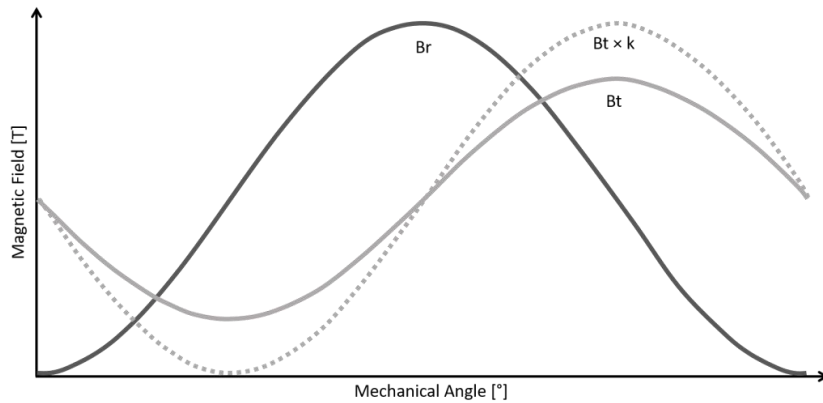


图 3.19 径向、切向磁场系数补偿

再结合公式 (3.17) 与图 3.7，径向磁场对应芯片 x 轴方向的磁场检测，切向磁场对应芯片 y 轴方向的磁场检测：

$$\alpha = \arctan\left(\frac{B_y}{B_x}\right) = \arctan\left(\frac{kB_t}{B_r}\right) = \arctan\left(\frac{kV_{outy}}{V_{outx}}\right) \quad (3.23)$$

根据公式 (3.21)，采用比率 k 对 y 轴磁场检测电路的输出电压进行补偿，即可实现径向磁场和切向磁场灵敏度比率之间的精确定量控制和调整，有效地消除了误差。补偿后的测量结果如图 3.20 所示。

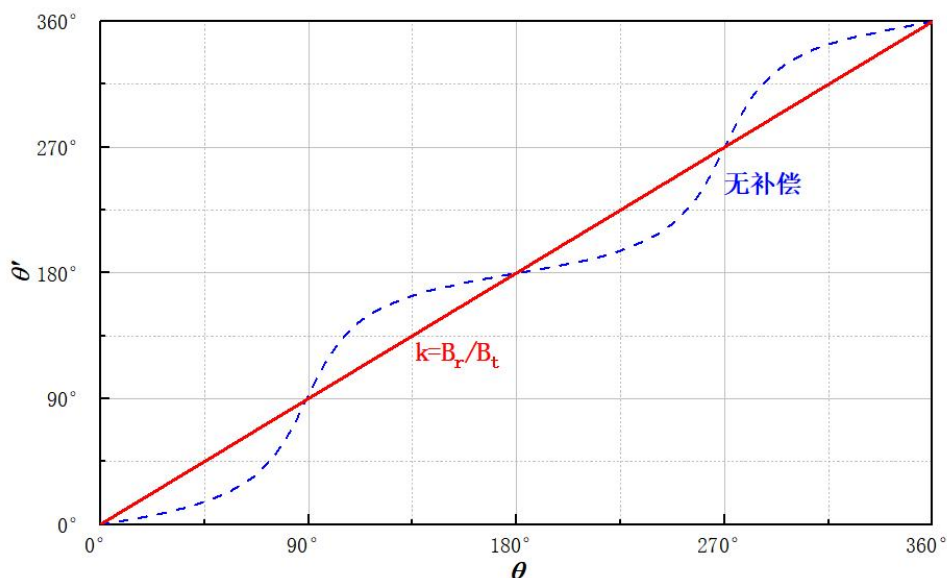


图 3.20 补偿后角度测量对比

补偿后的角度实际值与角度测量值呈现出良好的线性关系，满足了设计需求。

3.3 角度传感器试验测试及结果分析

3.3.1 角度传感器安装方案

补偿后的角度实际值与角度测量值呈现出良好的线性关系，满足了设计需求。

GMR 角度传感器实际检测的是磁场强度与角度的变化，要求外部磁场发生元件与被测轴体同心同轴同步转动。因此需要有严格的安装方式。

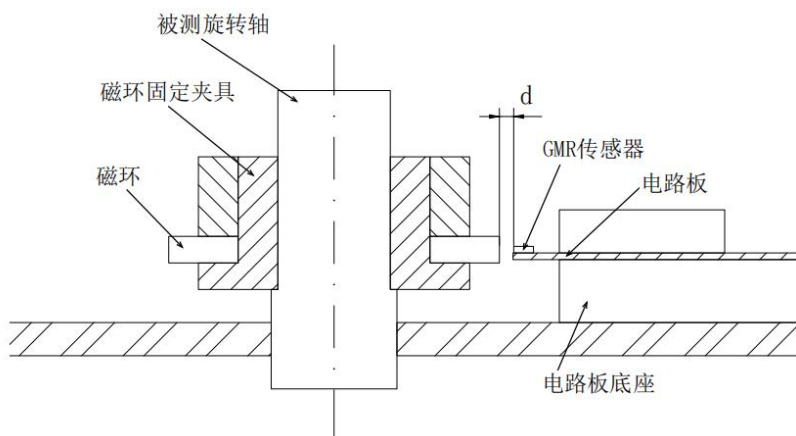


图 3.21 角度传感器安装示意图

如图 3.21 所示，磁环的圆心与磁感应芯片的几何中心连线与磁感应芯片的一条边垂直，同时磁环的中心平面与磁感应芯片的中心平面相重合。同时需要分别在被测旋转轴体和操动

机构面板上加装磁环夹具和 GMR 传感器电路板底座。夹具将磁环固定在被测旋转轴上。为满足使磁环与被测旋转轴同步同轴转动，可以选择在夹具和磁环之间涂抹胶水增加粘合力。根据不同的转轴直径设计对应的夹具即可应用于其他各种场景。GMR 传感器电路板通过底座固定安装在操动机构面板上，使得磁环与磁感应芯片满足上述相对关系。磁环边缘最外圈与 GMR 传感器边缘之间的距离 d ，在本测试环境中设置为 1.5mm，以取得较低的切向磁场振幅 B_{t0} 与径向磁场振幅 B_{r0} 的比值 k 。电路板底座以及磁环辅助夹具安装实物如图 3.22 所示。

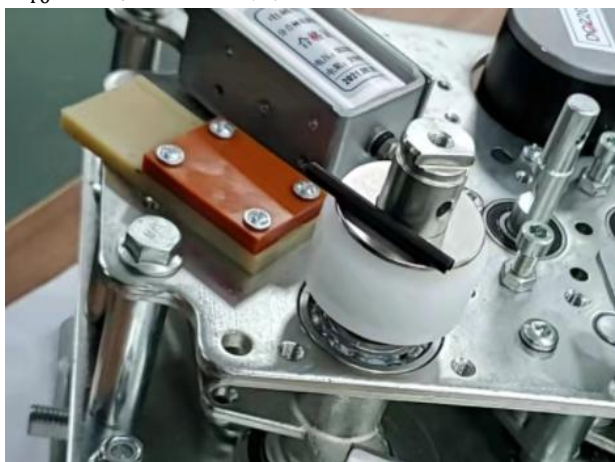


图 3.22 角度传感器安装方案实物图

3.3.2 测试与分析

试验采用数显工业量角器对 GMR 角度传感器进行角度校准和静态特性分析。事先拆除主轴端面的其他部件，拆除工业量角器的松紧调节旋钮，拧入螺丝贯穿主轴与量角器进行安装。固定数显屏幕端，底部旋转尺跟随传动主轴同步转动。传感器电路板采用长条形的测试板，以便于调节传感芯片与磁环边缘的间距。



图 3.23 角度传感器安装方案实物图

试验中，每次调整 1° 进行测量，测试数据如表 3.1 所示。试验数据以工业量角器读数为标准值 θ ，未进行补偿的 GMR 角度传感器输出的角度值为测量值 θ' ，补偿纠正后的角度值标记为 θ'_k 。

表 3.1 角度传感器试验测量数据

$\theta(^{\circ})$	$\theta'(^{\circ})$	$\theta'_k(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$\theta'(^{\circ})$	$\theta'_k(^{\circ})$
10.00	2.709	9.949	190.00	182.942	189.951
20.00	5.519	19.899	200.00	185.542	199.903
30.00	8.715	29.851	210.00	188.757	209.850
40.00	12.597	39.811	220.00	192.574	219.808
50.00	17.617	49.773	230.00	197.575	229.775
60.00	24.731	59.753	240.00	204.754	239.753
70.00	36.148	69.763	250.00	216.192	249.764
80.00	56.479	79.835	260.00	236.456	259.835
90.00	90.004	90.000	270.00	270.011	270.000
100.00	123.520	100.165	280.00	330.543	280.165
110.00	143.812	110.236	290.00	323.854	290.237
120.00	155.268	120.247	300.00	335.245	300.246
130.00	162.429	130.227	310.00	342.387	310.227
140.00	167.402	140.192	320.00	347.425	320.192
150.00	171.247	150.148	330.00	351.289	330.149
160.00	174.479	160.101	340.00	354.456	340.101
170.00	177.337	170.050	350.00	357.295	350.051
180.00	179.988	180.000	360.00	360.003	360.000

计算补偿系数之前，角度测量值与角度标准值之间的最大误差 $E = 35.426^{\circ}$ ，该最大值与零点之间间距 $\alpha_m = 27^{\circ}$ 。根据公式（3.22）计算可得：

$$k = \frac{\tan(E + \alpha_m)}{\tan(\alpha_m)} = \frac{\tan(35.426^{\circ} + 27^{\circ})}{\tan(27^{\circ})} = 3.758 \quad (3.24)$$

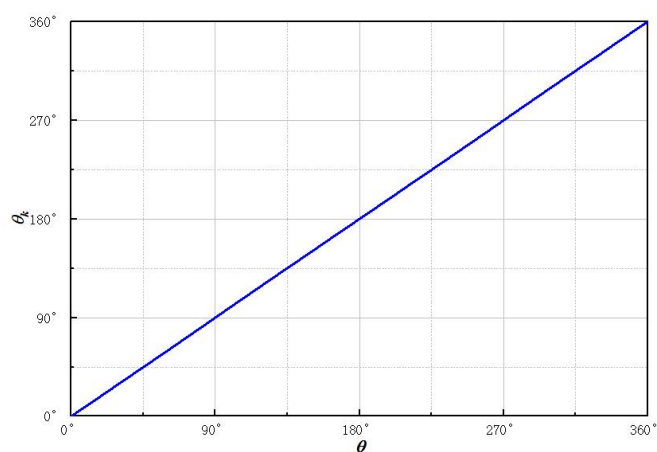


图 3.24 角度传感器静态特性曲线

通过比率 k 的补偿之后得到补偿后的角度值，绘制角度标准值 θ 与补偿纠正后的角度值为 θ'_k 的关系曲线，如图 3.24 所示。此时标准值与测量值之间的最大绝对误差为 0.247° ，最大相对误差为 0.07% 。若是在 100° 的测量范围内，最大相对误差也仅有 0.24% 。

最终确认角度测量的精度后，可以直接测量高压断路器的分合闸行程，如图 3.25 所示。

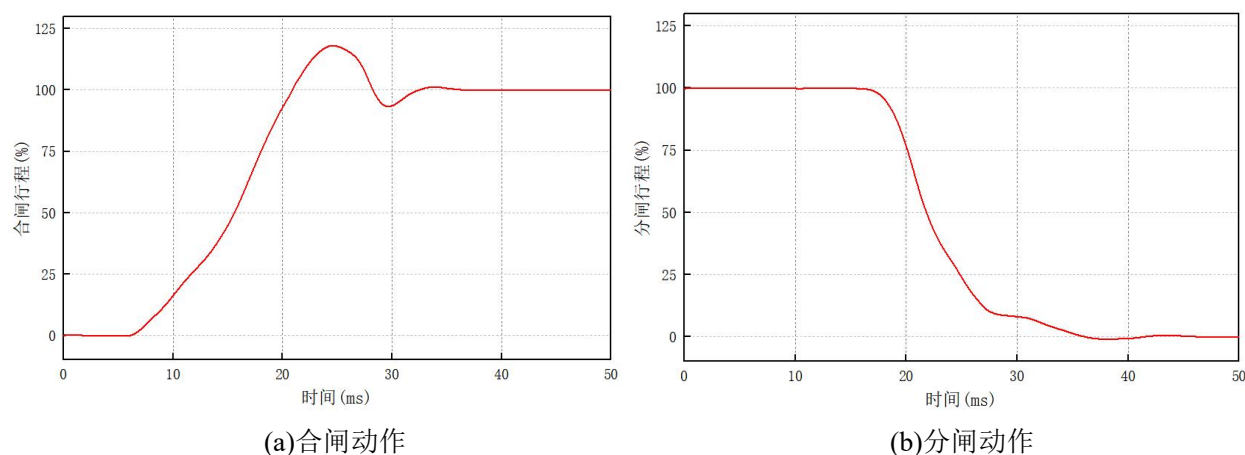


图 3.25 行程曲线

3.4 本章小结

本章节主要针对高压断路器环境噪声干扰强以及传感器安装条件苛刻等问题，从实际信号传感环境的角度出发，提出了一种基于巨磁阻效应的角度传感器设计方案。在此基础上，本研究深入探究了巨磁阻效应的理论，并对巨磁电阻在角度测量中应用的可行性进行了详细分析。接着根据 GMR 传感器的工作原理，设计相应的传感电路，并通过电路将磁场的角度变化转换为电压输出。分析发现离轴测量误差的主要原因为切向磁场的幅值与径向磁场差异较大。为此，进一步研究并尝试通过对径向与切向磁场幅值比率的补偿方法来减小误差。最终，通过精细的实验设计，测试得出了一系列有价值的实验数据，验证该角度传感器电路设计及误差补偿方法的可行性和有效性，确保了该传感器的可靠性。该角度传感器设计的成功，将对高压断路器等领域的信号检测和测量技术进一步提升和发展起到积极的推动作用。

第4章 基于 KNN-DBSCAN 的高压断路器故障诊断

基于机器学习算法的故障诊断方法通常分为两个步骤：特征向量提取和样本分类^[71]。首先通过信号处理技术从断路器的机械特性信号中提取出一组特征来描述该信号。然后在特征向量的空间中，通过机器学习算法来生成相应的决策规则，实现样本的分类。本章以研究机器学习技术在高压断路器故障诊断中的应用为主线，提出了一种滑动窗口导数中心差分的方法，有效地提取出分合闸线圈以及主轴行程波形曲线的特征。针对 KNN 算法对于不同幅度故障的诊断效果欠佳的情况，本文结合改进 DBSCAN 聚类算法提高了准确率。

4.1 高压断路器机械特性分析及特征提取

高压断路器是电力系统的关键开关设备，在短时间内迅速切断电路。随着智能技术与大数据的发展，高压断路器衍生出了多种不同类型和新功能，以适应不同的应用场景。虽然不同类别的断路器各有特色，但它们的主要结构和工作原理相似。在高压断路器的故障中，操作机构和控制回路是发生故障最多的部件，而分合闸线圈作为操作机构和控制回路的关键部件，其电流信号能够有效反映控制回路与机械联动机构中的错误，如电压下降、线圈铁芯卡滞和脱扣器松动等。因此，本章主要以线圈电流信号为例，分析线圈电流的波形，提取其有效特征，并以此作为下文基于机器学习诊断的数据依据，以判断高压断路器的运行状况。

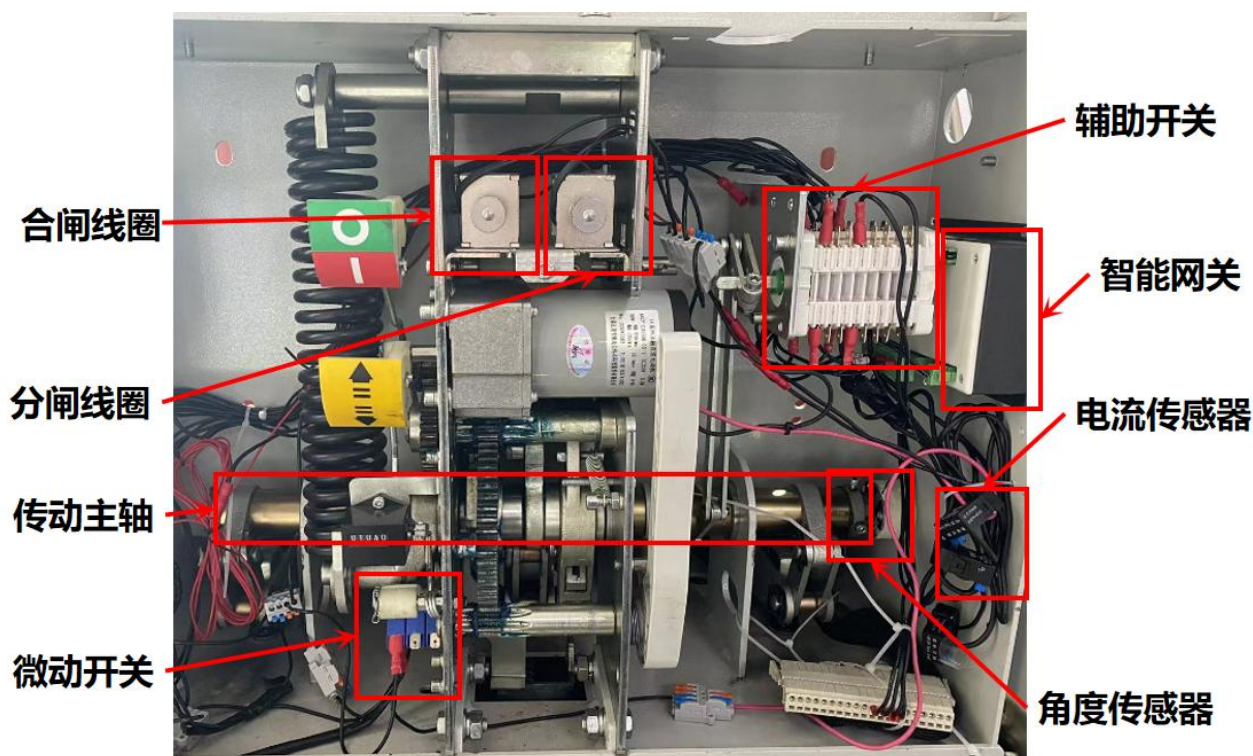


图 4.1 断路器操动机构实物图

如图 4.1, 该断路器通过控制器接收外部的控制信号以及供电, 随后在其电控电路的调节下操纵储能电机、合闸线圈和分闸线圈等三个元件的运转状态, 三个部件均采用直流 220V 供电, 可以完成断路器在分闸、合闸和储能等多种状态之间切换。该断路器采用了一根大储能弹簧进行能量储存以完成合闸动作。在储能弹簧累积能量并伸展到预设幅度时, 微动开关将随机构动作而被触动; 反之, 在储能弹簧能量释放的同时, 微动开关亦会恢复至松弛状态。微动开关设计有复数的触点路径, 其常开和常闭两类开关模式为不同的二次回路提供了对应的控制特性。通过精准反馈微动开关的位置变化, 可以实时检测到断路器的储能状态, 从而保证了系统的高效稳定性。

如图 4.1 所示, 储能电机控制回路的运行状态和启动停止过程, 均由微动开关和辅助触点的状态决定, 也与控制器的控制指令信号密切相关。当该控制回路接收信号导通上电时, 储能电机随即开始工作, 并借助传动结构, 将能量通过变速齿轮等部件储存在合闸储能弹簧中。储能动作完成, 激活微动开关使得常闭开关断开, 从而切断储能电机的电源供应回路。

当弹簧储存完合闸所需的能量后, 合闸半轴卡住传动结构, 操动机构处于一种限位状态。在收到控制指令进行断路器合闸动作时, 合闸线圈回路接通启动, 其内部铁芯产生直线运动, 进而撞击推动合闸半轴, 解除机构限位, 释放合闸弹簧储存的能量。通过采集分析合闸线圈电流波形, 不仅能够识别合闸线圈本身故障情况, 还能反应铁芯、合闸半轴等联动机构存在的问题。

合闸弹簧在能量释放的过程中, 一方面使得传动主轴旋转, 带动动触头的运动, 使得动静触头得以接触, 进而接通高压回路; 另一方面, 合闸弹簧拉动分闸弹簧, 为后续的分闸动作提供能量存储。此断路器中设计了三根分闸储能弹簧, 其体积较小, 位于传动主轴内侧, 在图中未被直接呈现。传动主轴是传递储能弹簧能量的重要媒介, 当储能弹簧因分合闸控制信号释放能量时, 主轴会转动并通过其机械联动机构将能量传递给断路器中各个部件。主轴的转动行程不仅与高压触头存在直接的位置对应关系, 还能体现与其联动的其他机构的状态信息, 其波形蕴含着很多有价值的特征信息, 因此, 该行程波形也被视为高压断路器的监测方案中极为重要的一环。

主轴与辅助触点之间的联动是实现高压回路通断的关键, 该联动能够将主轴的旋转转化为辅助触点在不同位置之间转动并变换通断状态。辅助触点中包含多个常开以及常闭触点, 使其能够控制多个回路的通断产生不同的控制信号, 从而反映主轴的具体位置和状态信息。

当高压回路导通时, 即断路器完成合闸动作之后, 分闸弹簧一定应处于储能状态, 同样受到半轴机构的限制, 维持分闸弹簧形变产生的弹性势能。类似于合闸动作, 执行分闸动作时, 分闸线圈受到控制信号激发, 铁芯撞击分闸半轴产生位移, 解除机构锁扣的限制, 释放弹簧的能量。同样的, 分闸线圈电流波形曲线特征也能够体现对应分闸机构的相关机械运作状态^[72]。

4.1.1 分合闸线圈电流信号机理

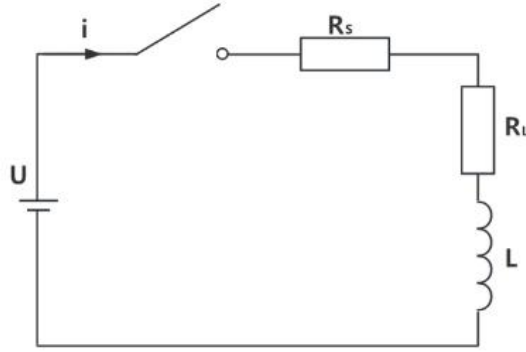


图 4.2 分合闸线圈等效电路图

当分（或合）闸线圈通电时，电流经过由电阻 R 和电感 L 组成的等效电路。根据图 4.2 所示的简化模型，铁芯在电磁力、弹簧力和摩擦力的作用下实现直线运动。其中，电路的控制参数分别为电压 U 和电流 i 。假定线圈磁链不处于饱和状态，其电感与电流无关，而是与线圈和铁芯之间的气隙以及铁芯位移 x 相关。此时，其回路方程可用于描述变化的特性。

分（合）闸线圈回路导通时，电流经过由电阻 R 和电感 L 组成的等效电路。根据图 4.2 所示的简化模型，铁芯受到电磁力随着电流的升高而增大，发生直线位移。电路的控制电压为 U ，电流为 i 。假设理想情况下，线圈电感与电流无关，而与铁芯位移 x 相关，此时回路方程的模型表达式为：

$$U = R_i + L(x) \frac{di}{dt} \quad (4.1)$$

如图 4.3 所示，分合闸线圈电流的理论波形变化过程可以分为以下几个阶段：

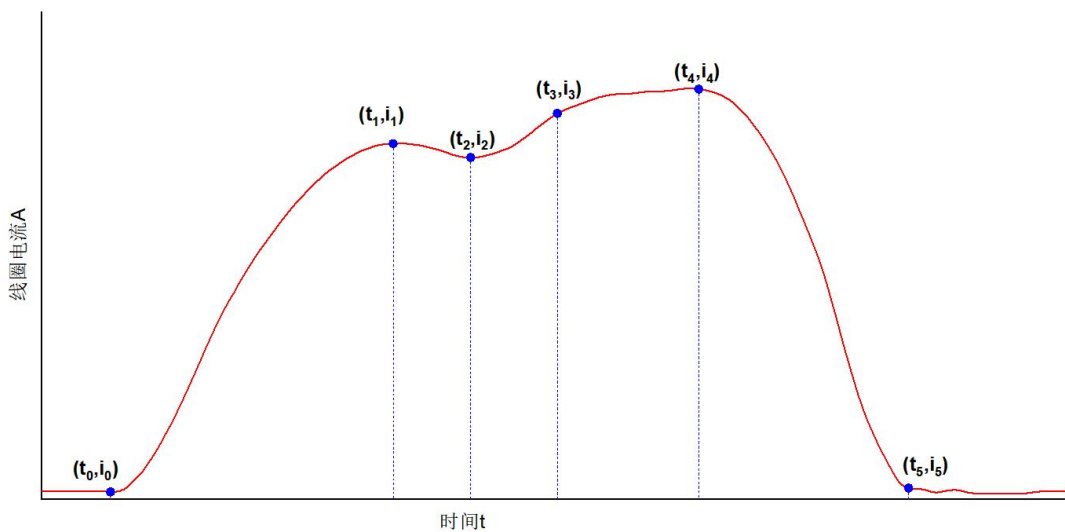


图 4.3 分合闸线圈电流信号理论波形

第一阶段（ $t_0 \sim t_1$ ）：线圈供电回路导通后，铁芯受到的电磁力随电流逐渐增加而增大。在这个过程中，铁芯受到的电磁力与阻力达到平衡，使得铁芯没有产生位移。因此，线圈的电感值 $L(x)$ 保持最小值不变。此阶段的电流可以表示为：

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad (4.2)$$

在当前阶段，电流呈对数形式逐渐增加，公式(4.2)求导运算后可得电流的上升速率：

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{U}{L} e^{-\frac{R}{L}t} \quad (4.3)$$

当到达 t_1 时刻，电流不断增大到 i_1 大小，铁芯所受的电磁力将超过其在静态状态下所受的最大阻力，因此铁芯在此时开始运动。

第二阶段（ $t_1 \sim t_2$ ）：随着铁芯运动速度 v 逐渐增大，其产生的位移 x 导致铁芯电感也随之发生相应的变化，因此这个阶段的表达式为：

$$U = Ri(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} + i(t) \frac{dL(x)}{dx} \cdot v \quad (4.4)$$

随着速度的提升，线圈产生了一个附加项 $v \cdot i(t) dL(x)/dx$ ，此项可看作一个反电动势，与速度呈正相关，会导致线圈电流减小。运动到 t_2 时刻，铁芯接触半轴锁扣机构，电流值下降至 i_2 大小。

第三阶段（ $t_2 \sim t_3$ ）：因在 t_2 时刻铁芯触碰到半轴锁扣机构，导致其速度瞬间下降，将其视为减速至零以简化模型，忽略上述附加项。在这种情况下，铁芯要克服弹簧阻尼和摩擦阻力，还需要产生足够的推力来驱使半轴转动，同时还要克服半轴上的弹簧产生阻力。随后，线圈电流再次呈现出类对数规律的增长趋势，表达式如下：

$$i(t) = \left(i_2 - \frac{U}{R} \right) \times e^{\frac{R(t_2-t)}{L}} + \frac{U}{R} \quad (4.5)$$

在 (t_3, i_3) 处，此时铁芯已经足够推动半轴产生位移，从而使得锁扣机构脱扣并解除限位，释放分合闸弹簧储存的能量，最终，断路器会相应地发生分合闸的动作。

第四阶段（ $t_3 \sim t_4$ ）：在铁芯接近其位移行程终点时，回路模型可近似为 $i=U/R$ ，这个阶段的电流波形趋于稳定，没有较大幅度的变化。

第五阶段（ $t_4 \sim t_5$ ）： t_4 时刻，一般情况下因为断路器完成了分合闸指令的运作，微动开关或辅助触点发生变化，线圈回路的供电正常断开。但也有可能因发生故障，在超出电控回路设置的时间之后切断电源，导致线圈电流迅速降至 0。

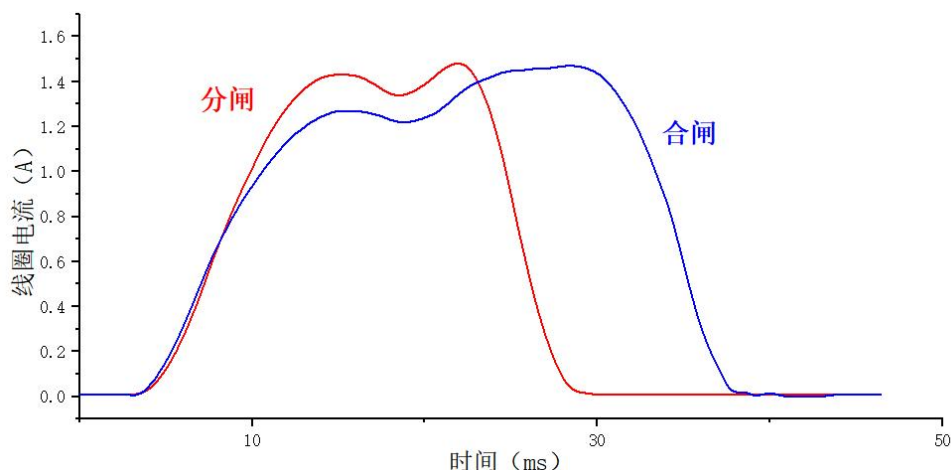


图 4.4 分、合闸线圈典型电流波形对比

电流波形分析可用于铁芯卡涩、电压跌落等故障的检测。一旦遭遇这些故障，不仅会显著增加断路器的分断时长，可能进一步导致线圈烧毁等严重后果，最终使得断路器失去动作能力，给高压电网带来极大的运行风险。故此，对于这类故障的监测和诊断显得尤为必要。

所测得的分闸线圈电流波形如图 4.4 所示，可看出其与合闸线圈电流波形存在差异。分闸线圈需要更高的动作电流；此外，分合闸线圈的波形形状也存在一定区别。在 22ms 时刻左右，分闸线圈电流达到动作值，断路器进行分闸。考虑到断路器对两种动作的需求不同，一般都会要求分闸联动部件变化更快。由于断路器对分闸和合闸动作的需求不同，要求分闸时的联动部件变化更迅速。因此，断路器在分闸和合闸时的机械传动结构设计也各有不同，导致分闸时辅助触点等部件的变化更为迅速，从而在断路器的动作期间迅速中断线圈电流，未能达到图 4.3 中所示的电流波形的稳定阶段便直接减少。分（合）闸线圈电流波形的相似之处在于：回路导通 15ms 后铁芯产生位移，约在 19ms 时铁芯接触半轴，推动半轴 3ms 左右后，释放弹簧能量实现分合闸。这些数据具显著的特征，有很高的参考价值，可为故障诊断提供依据。也可通过异常数据判断特定的故障类型。

4.1.2 主轴转动行程信号机理

总行程是指动触头运动的总位移量，在其中包含了超程行程和开距行程两个部分。在合闸动作中，开距行程是指断路器动触头接触静触头之前的一段距离，动触头会在开距行程的末尾与静触头接触，从而使高压回路得以连接。动静触头刚接触的点称为刚合点，在这之后的行程为超程。在刚合点之后持续压缩触头上装配的弹簧装置，以确保动静触头能够牢固接合。由于该弹簧的存在，动触头因动作惯性导致其最大位移超出总行程产生一个弹跳现象，最后，动触头回到总行程的稳定位置。

合闸动作过程中动触头的理论行程波形如图 4.5 所示。 (t_0, l_0) 的 t_0 时刻触头开始动作， t_1 时刻到达最大位移位置 l_1 ，弹簧压缩到底，之后触头受到弹簧的力回弹。 t_2 时刻之后逐步稳定至总行程位置。

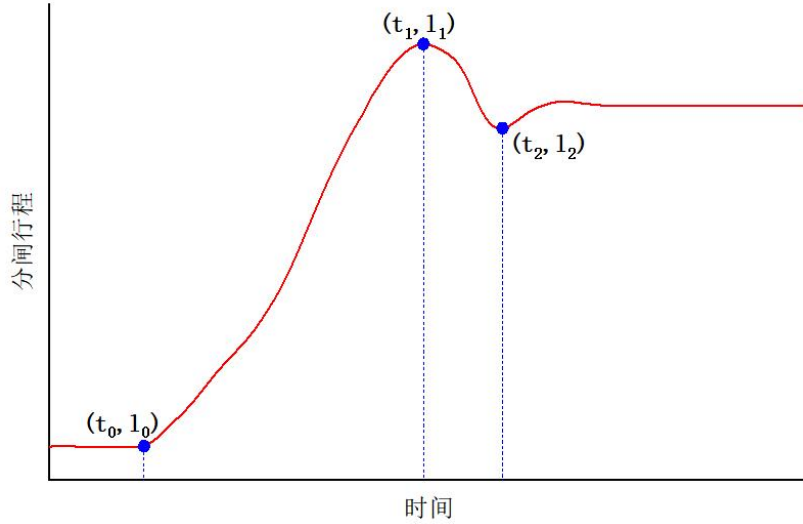


图 4.5 合闸动触头行程曲线理论波形

4.1.3 基于滑动窗口导数中心差分法的特征提取方法

特征提取算法具有多种形式，相关研究者采用了不同的方法进行特征点的提取。例如，孙银山等人^[73]通过小波分析检测信号波形的突变点，基于时域波形微分提取特征点；王天泽等人^[74]通过条件筛选得到该信号中的特征点；宋亚凯等人^[75]对线圈电流波形进行微分运算并根据波形各点处的斜率划分单调区间，进而提取所需的信号特征点。本文基于时域信号的线圈电流数据，以合闸线圈电流信号为具体案例，设计了一套可行的特征提取方案来处理该信号。导数定义如下：

$$f'(x_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} \quad (4.6)$$

实际的电流数据采集为离散的数字信号，采样频率设定为 5 kHz，相邻两个采样点间的时间间隔有 0.0002s，此条件下，两采样点间信号变化能够按照线性关系近似处理。基于这一假设，信号在任意采样点的瞬时变化率可以用其与临近采样点之间的斜率加以估计，进一步计算出信号序列中每一点处的斜率为：

$$f'(t_0) = \frac{I(t_0 + 1) - I(t_0)}{0.0002} \quad (4.7)$$

计算出信号的导数 $f'(t)$ 后，据文献^[75]所述，归一化处理能够通过导数值的衡量来对各点间的差异进行比较， $f'(t) > 0$ 时记作 $F(t) = 1$ ，反之为 $F(t) = -1$ 。规定一段信号区间 $[t, t + k]$ ，其信号值 $G(t) = F(t) + F(t + 1) + \dots + F(t + k)$ ，该方法通过 $G(t)$ 正负值的区分来界定信号单调增区间和单调递减区间，以此为基础确定信号的极大值与极小值点。该方法存在只划分了单调区间，合闸电流信号中出现的电流稳定阶段的数据，在采样点之间呈现微小波动的情况下，对应的 $G(t)$ 绝对值很小。在判断正负过程中，极易将电流稳定阶段的数据变化

趋势错误归类为单调递增或递减。同时，由于信号区间长度会影响 $G(t)$ 值的大小，这也会影响判断信号区间是否为平缓区间的阈值确定。

本文提出了一种称为滑动窗口导数中心差分和方法的新方法。设定一个长度为 $2a+1$ 的滑动窗口，窗口内的数据点为 $f'(i-a), f'(i-a+1), \dots, f'(i), \dots, f'(i+a-1), f'(i+a)$ 。计算每点右半窗口导数和与左半窗口导数和之间的差，即：

$$F(t) = \sum_{i=1}^a [f'(t+i) - f'(t-i)] = \sum_{t=1}^{t+a} f'(t) - \sum_{t=-a}^{t-1} f'(t) \quad (4.8)$$

某一信号点的左右增减趋势变化逐渐增大时， t 点处 $F(t)$ 的绝对值也会随之增大，因此可以有效识别信号的转折点、凸显其特征。针对信号变化较为稳定的情况，窗口导数中心差分和方法的值较小，导致 $F(t)$ 曲线的变化幅度也较小。在下文中，将运用该种鉴别方法对在线圈电流信号及主轴转动行程信号进行分类特征提取。

如图 4.6 所示，差分曲线 $F(t)$ 的分析能够有效提取与信号特征紧密相关的重要标识。当信号出现明显的变化， $F(t)$ 曲线上相应的数据点可以达到较高的幅值。同时，合闸线圈电流曲线中的拐点位置与 $F(t)$ 曲线中的极值或最值位置相对应。识别合闸线圈电流信号中的各类特征点具有较强的自动化可能性，尤其是对于波峰及波谷等特征的识别，通过计算机实现会更加便捷、可靠。对比窗口大小 a 的不同取值所得到的差分 $F(t)$ 波形，可以看出当 $a=8$ 时，其极值、最值点与合闸线圈电流曲线中特征点的对应关系更好。

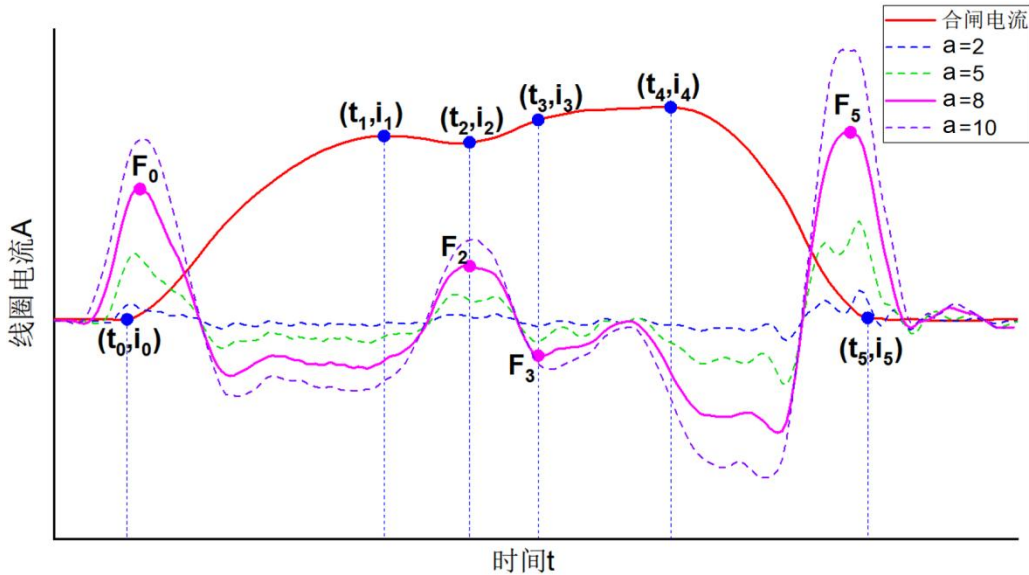


图 4.6 合闸线圈信号的特征提取

根据图 4.6 中窗口大小 $a=8$ 的差分曲线 $F(t)$ 与合闸线圈电流曲线的对比，识别出 $F(t)$ 中最大的三个波峰位置 F_0 、 F_2 、 F_5 的横坐标，对应了 i_0 、 i_2 、 i_5 的位置。 i_1 的位置为 F_0 、 F_2 对应位置之间的最大值点。 $t_3 \sim t_4$ 之间的平顶阶段， i_3 的位置可以通过 F_2 之后的第一个波谷位置来确定其横坐标。而 i_4 则是整个合闸动作过程中最大的电流值，即整段波形的最大值点。

4.1.4 故障模拟及特征提取

(1) 线圈故障模拟

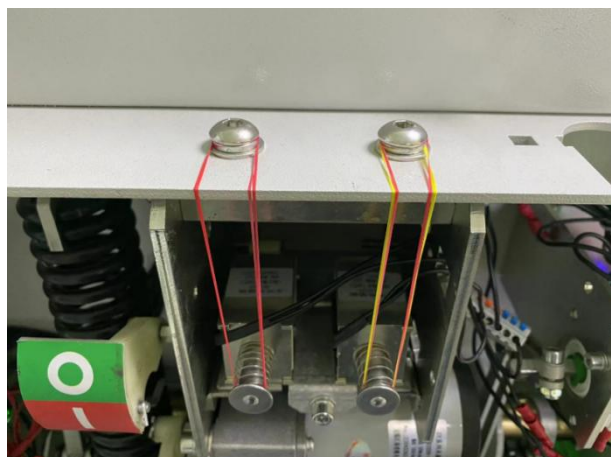


图 4.7 线圈铁芯卡涩故障模拟

常见的线圈故障有线圈铁芯卡涩、脱扣器松动、电压跌落等。首先对于铁芯卡涩、脱扣器松动、电压跌落这三种故障进行模拟。如图 4.7 所示，为了模拟铁芯卡涩故障，实验过程中采取在铁芯表层捆绑橡皮圈的方式，模拟其在动态过程中因卡涩产生的阻力，进而达至对应故障状态的模拟效果^[76]。

脱扣器松动模拟则是通过拧松锁扣机构的支点螺丝，来降低其脱扣所需的力度。电压跌落故障的模拟直接通过调整断路器控制回路的电源电压即可实现。由于电压跌落幅度不同会导致不同程度的故障波形变化，此处模拟将原先 220V 直流供电降低至 160V，以得到更明显的特征对比。

以合闸线圈为例，根据上述故障模拟得到的波形曲线，加上正常状态的电流信号，对比电流波形的 4 种状态。如图 4.8(a)所示，合闸线圈电流波形在各种不同情景下展现出的差异性特征主要体现在关键时刻以及该时刻对应电流值的变动之上，这种特征的显著不同为后续的故障分类及诊断工作提供了关键且有效的数据支撑。

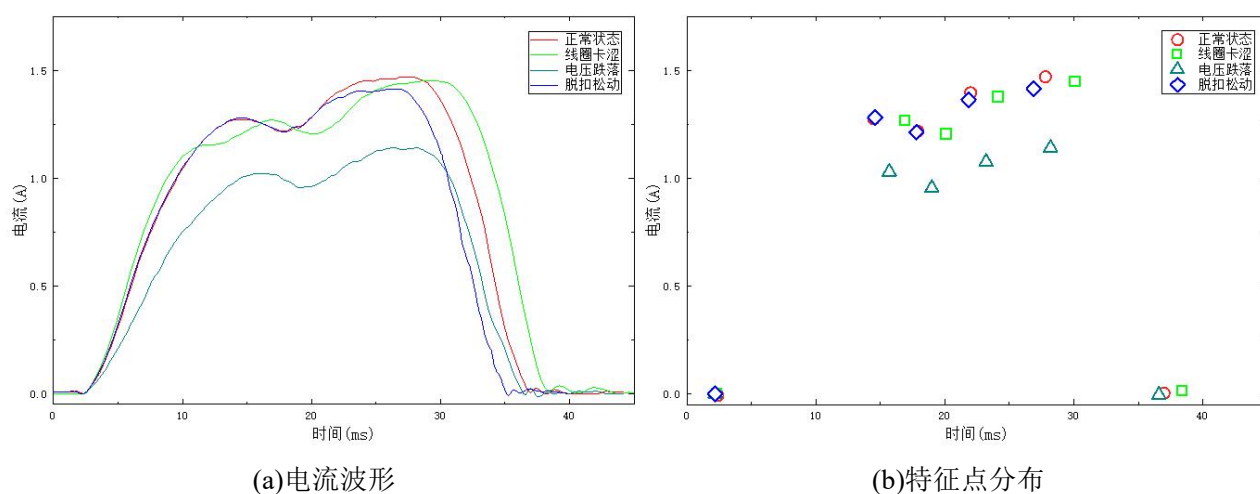


图 4.8 四种状态下的合闸线圈

造成不同状态下的线圈电流波形差异的主要特征点为 (t_1, i_1) 、 (t_2, i_2) 、 (t_3, i_3) 、 (t_4, i_4) 、 (t_5, i_5) 。如图 4.8(b)所示, 不同状态下的同一特征点差异较为明显, 因此选则该 5 个特征点, 通过这 10 个特征量来对合闸线圈电流信号进行诊断和分类。

(2) 传动主轴故障模拟



图 4.9 主轴转动卡涩故障模拟

如图 4.9 所示, 为了模拟断路器主轴转动卡涩故障, 在主轴下方加入木块以限制其后期转动行程。主轴作为断路器的核心传动部件, 一旦卡涩, 将直接影响断路器的分合闸速度。由于该模拟方式受到断路器机械结构的局限, 只能影响其合闸动作。

在完成角度传感器的正确安装后, 测量断路器合闸状态的位置。对于主轴, 设置分闸状态的稳定位置为 0%, 合闸状态的稳定位置为 100%。测量出正常状态与模拟卡涩状态下的合闸行程曲线与特征点对比如图 4.10 所示。

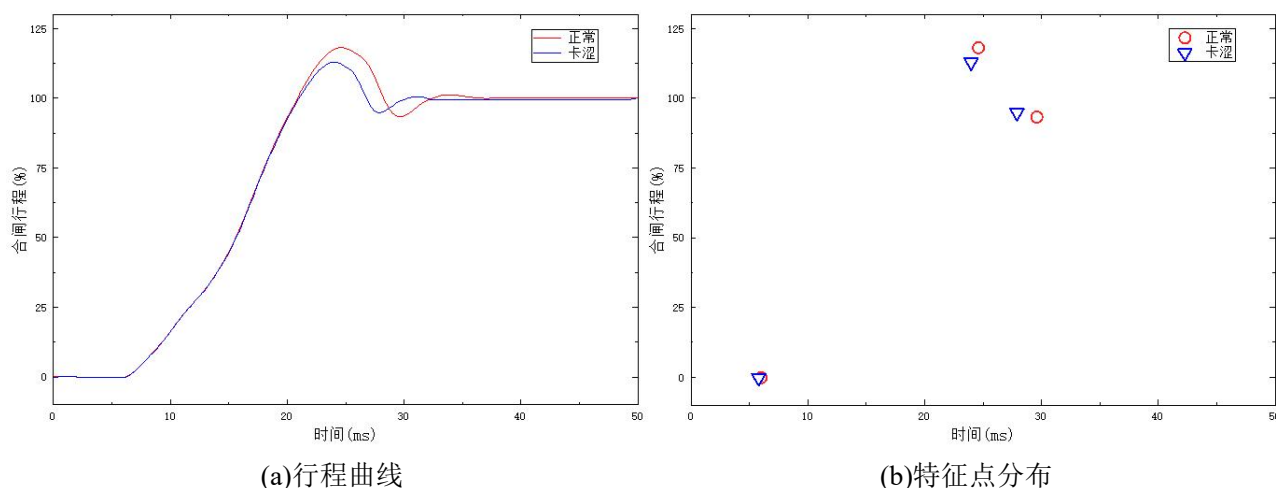


图 4.10 正常与卡涩状态下的合闸行程

故障导致行程曲线差异的特征点主要为 (t_1, l_1) 、 (t_2, l_2) 。如图 4.10(b)所示可以明显地观测到同一特征点在正常工作状态和故障状态下的显著不同。为了对合闸行程信号进行分类诊断, 选择这两个特征点并提取了其中的 4 个特征量。

4.2 基于 KNN 的高压断路器故障诊断

机器学习技术在模式识别、数据挖掘、自然语言处理等方面具有广泛的应用^[77,78]，尤其在大数据时代，这些技术已逐渐成为人工智能领域的热点和前沿。在高压断路器故障诊断领域，采用机器学习技术进行分类和聚类，能够更加准确地判断故障类型和故障数量，提高诊断准确率和效率，对保障电力系统的安全运行具有十分重要的意义。

4.2.1 KNN 算法

K 近邻 (KNN, K-Nearest Neighbor) 算法是数据分析技术中的一种基础方法，最早在 1968 年被 Cover 和 Hart 提出^[79]，作为一种理论成熟分类算法，广泛应用于各个领域。其基本思想是在特征空间中寻找与待分类样本最相似的 K 个样本，若其中大多数属于某一类别，则将待分类样本归为该类别。该算法的决策过程仅依赖于少数最近邻样本的类别信息，而参数 K 则代表着待分类样本所考虑的邻近样本数量。

该方法基于简单直观的思路：对于一个待分类样本，在特征空间中寻找与其最相似的 K 个样本，若其中大多数属于某个类别，则该待分类样本也归属于该类别。该算法在决策过程中只依赖于少数最近邻样本的类别信息，而 K 的取值则代表着待分类样本所考虑的邻近样本数量。因此，K 近邻算法在分类问题中利用最接近的 K 个邻近样本来代表每个样本进行分类决策的方法。

KNN 算法中和 K 值相关联的另一个技术关键点就是距离公式的选取。闵可夫斯基距离 (Minkowski Distance)，也被称为闵氏距离^[80]：

$$D(a, b) = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (4.9)$$

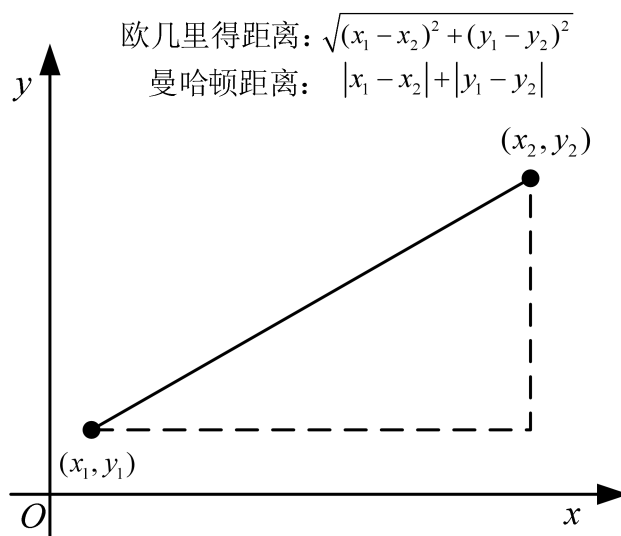
其中， $p > 0$ 是一个可变参数。当 $p=1$ 时，便可推导出曼哈顿距离，也称为城市街区距离，表示两个点在坐标系上沿着网格线移动的距离总和，二维平面中的表达为：

$$D(a, b) = \sum_{i=1}^n |a_i - b_i| = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (4.10)$$

当 $p=2$ 时，闵氏距离演变为欧氏距离，即欧几里得距离，是 KNN 算法中最为普遍采用的一种距离度量方法。欧氏距离即通俗所说的点与点之间的直线距离，在二维空间内的表现形式如下：

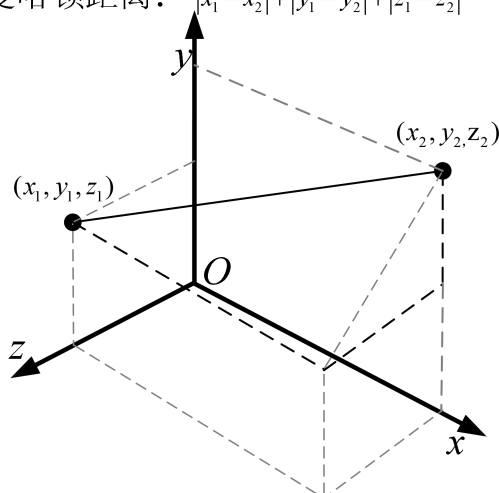
$$D(a, b) = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{|x_1 - x_2|^2 + |y_1 - y_2|^2} \quad (4.11)$$

上述几种距离同样可以运用到三维或更高维空间。



(a) 二维距离函数

欧几里得距离: $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$
 曼哈顿距离: $|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| + |z_1 - z_2|$



(b) 三维距离函数

图 4.11 KNN 的距离函数

结合图 4.11 作为示例, KNN 算法的步骤如下:

(1) 准备数据集: 收集带有标签的训练样本数据, 每个样本包含特征和对应的类别标签。图中分别用圆形、三角形、正方形表示训练样本中的三种类别。

(2) 选择 K 值: K 是一个正整数, 通常较小。它代表在进行分类或回归时将考虑的最近邻居的数量。选择 K 的值会影响算法的结果, 通常通过交叉验证来选择一个最佳的 K 值。图中选择 K=4 来举例。

(3) 计算距离: 当有一个新的未分类或未标记的数据点需要预测时, 计算新数据点与训练集中每个样本的距离。图中的五角星代表新的需要预测的数据点, 计算其与训练样本中各个数据点的距离。

(4) 找到最近的 K 个邻居：根据计算得到的距离，对所有的距离进行排序，找到距离最近的 K 个训练样本，它们就是新样本的最近邻居。

(5) 投票输出结果：对于分类任务，通常采用“投票”方法，即统计这 K 个邻居中每个类别出现的频次，将频次最高的类别标签作为新样本的预测类别。可以看出图中五角星最近的四个训练样本中有一个三角形和三个圆形，因此五角星会被预测分类为圆形这一类别。

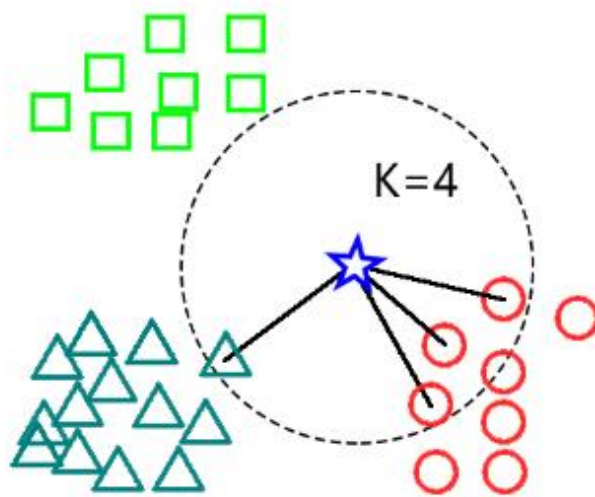


图 4.12 KNN 算法示例图

4.2.2 合闸线圈故障特征分析

接下来对正常运行、铁芯卡涩、螺丝松动、电压跌落四种状态的电流信号，各选取四组提取其特征点。

(1) 在正常运行状态下，随机选取了 4 组合闸线圈的电流信号，并对其进行了降噪处理。所得结果如图 4.13 所示，通过观察波形及特征点分布可以明显看出，所有四组电流信号均表现出了正常状态下的典型规律，且各个特征点之间基本吻合。

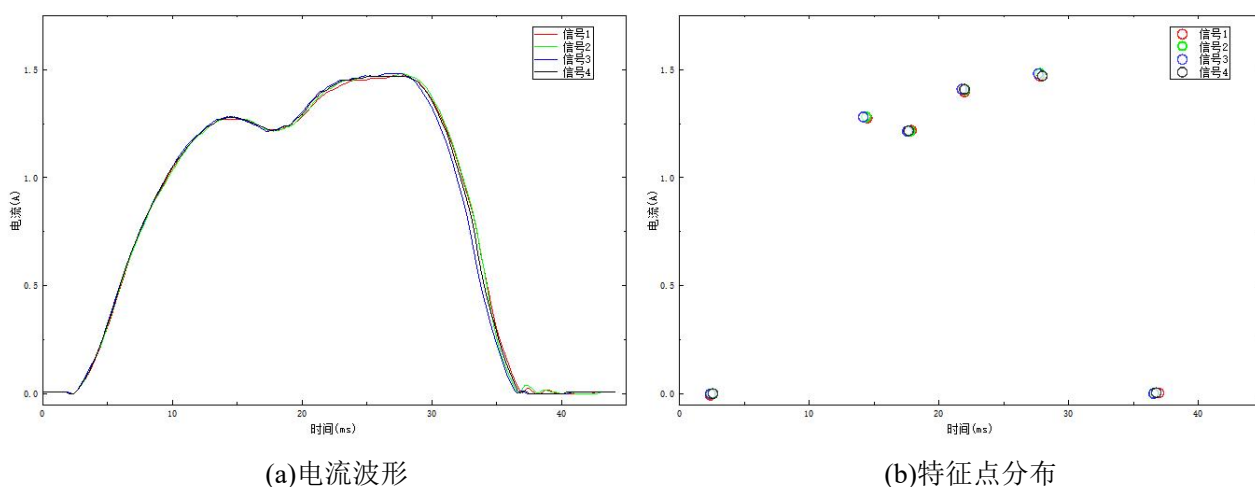


图 4.13 正常状态下的合闸线圈

(2) 针对合闸铁芯卡涩故障情景, 同时观察了四组合闸线圈的电流信号, 通过图 4.14 可知其波形和特征点的分布情况。与触发正常动作下的合闸线圈电流幅值相比, i_1 、 i_2 、 i_4 、 i_5 的电流值均出现了不同程度的下降; 另外, 于 t_1 时刻起的波形也均有一定程度的延迟变化。由于故障模拟的方式与实际卡涩略有不同, 在 (t_1, i_1) 之前出现了一小段模型的凹陷, 但对于之后的几个特征点的提取并无影响。

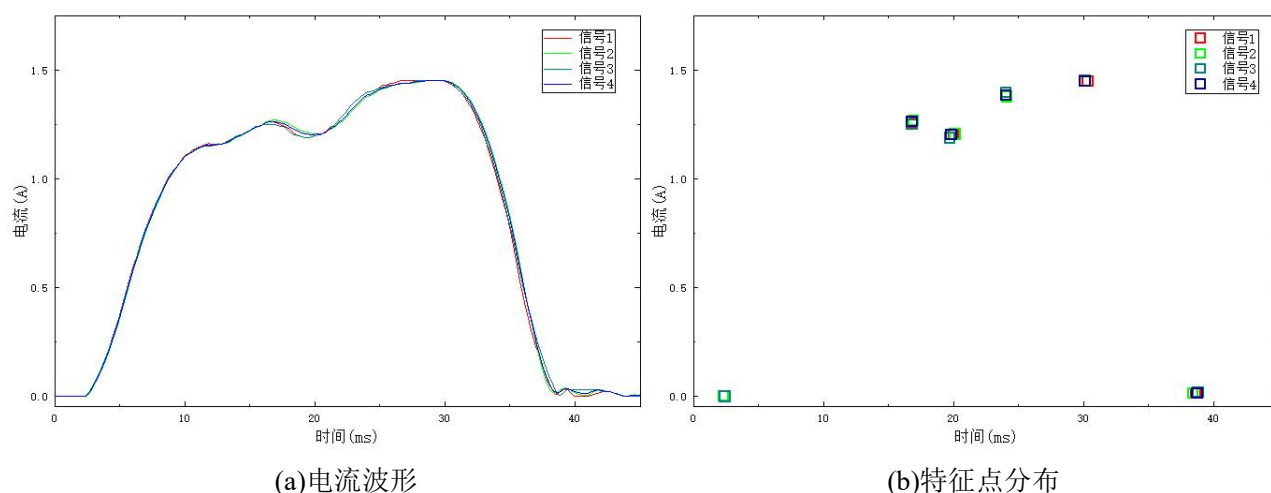


图 4.14 铁芯卡涩故障的合闸线圈

(3) 脱扣器松动状态下的四条合闸线圈电流波形和特征点分布如图 4.15。结合图 4.8 对比, t_2 之前合闸线圈铁芯未与故障部件接触, 所以 $t_0 \sim t_2$ 之间的波形与正常状态下的合闸线圈电流波形基本吻合。由于脱扣器的松动, 脱扣动作所需的力度和动作时间均有减小。具体表现为 i_3 、 i_4 下降, t_3 、 t_4 、 t_5 相比于正常状态都有一定程度的提前, 即 $t_2 \sim t_5$ 之间的动作时间缩短。

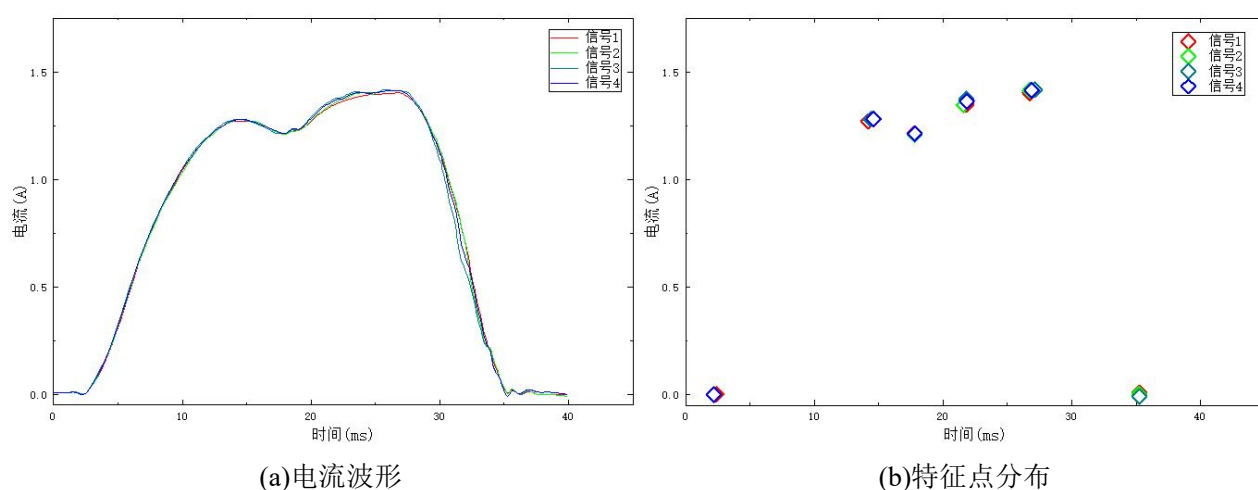


图 4.15 脱扣器松动故障的合闸线圈

(4) 电压跌落故障由于电压跌落的幅度不同, 其合闸线圈电流波形变化幅度也会随之变化。根据国家电网企业标准的规定, 分闸线圈应在电压下降至额定电压的 65% 时仍然能够可靠地进行动作。因此, 在故障模拟实验中, 直流电压被调节至 160V, 其电流波形和特征点分布如图 4.16。当线圈电压下降时, 线圈的电流数值会相应减小, 整体电流波形也会随

之减弱。同时，由于电流数值的减小，线圈上电后电磁铁对铁芯产生的吸引力也会减弱，从而导致动铁心运动速度减缓， t_1 、 t_2 、 t_3 均有一定程度的延后。

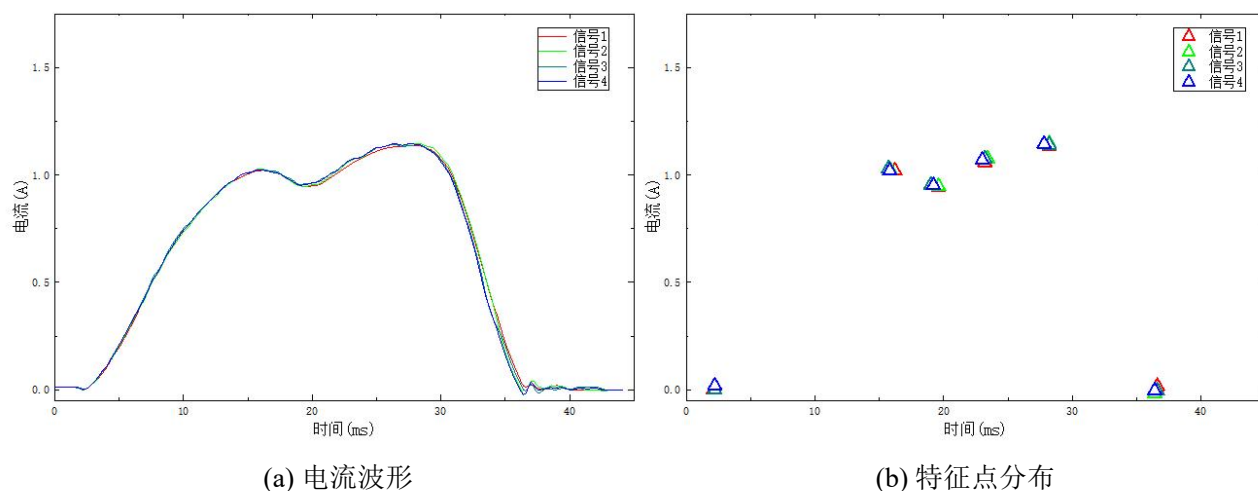


图 4.16 电压跌落至 160V 故障的合闸线圈

4.2.3 传动主轴故障特征分析

分别选取四组正常运行以及主轴卡涩情况下的合闸行程曲线，提取他们的特征点。

(1) 正常动作的合闸行程曲线如图 4.17(a)所示，其曲线吻合度较高，运行十分稳定。

图 4.17(b)中的特这点也都符合其运动规律。

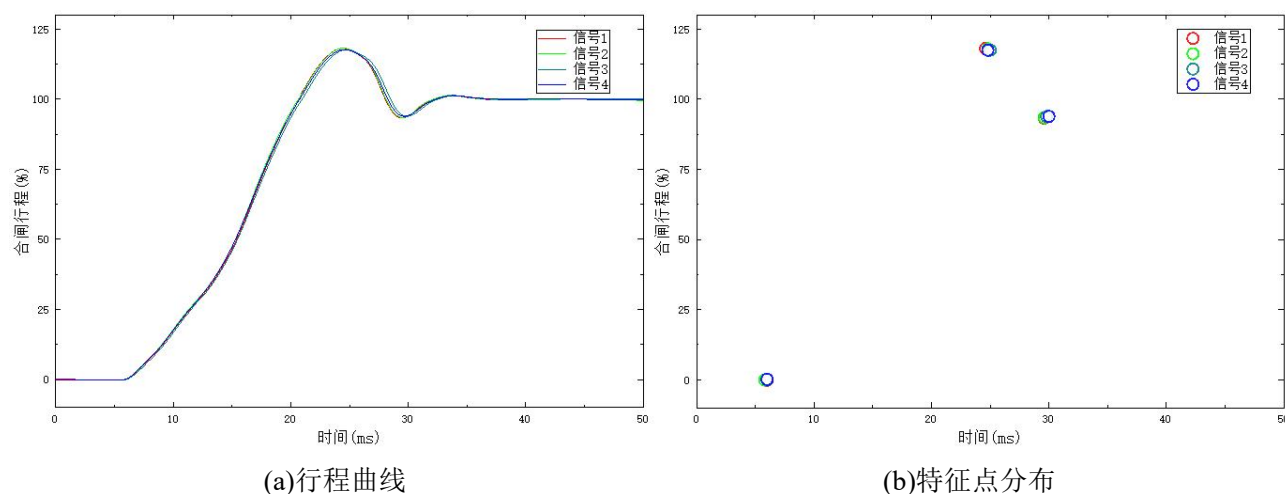


图 4.17 主轴正常状态的合闸行程

(2) 相比于正常状态的合闸行程曲线，模拟主轴卡涩故障的行程曲线的不同特征的主要体现在 (t_1, l_1) 与 (t_2, l_2) 。因为在断路器合闸时，主轴转动带动的联动机构在正常状态下触碰弹跳最大位移量之前，接触到了模拟故障的木块，导致弹跳幅度降低，特征量 l_1 有明显下降。同样的，其回弹之后的力度也随之减小，表现为 l_2 的下降与 t_2 的提前。

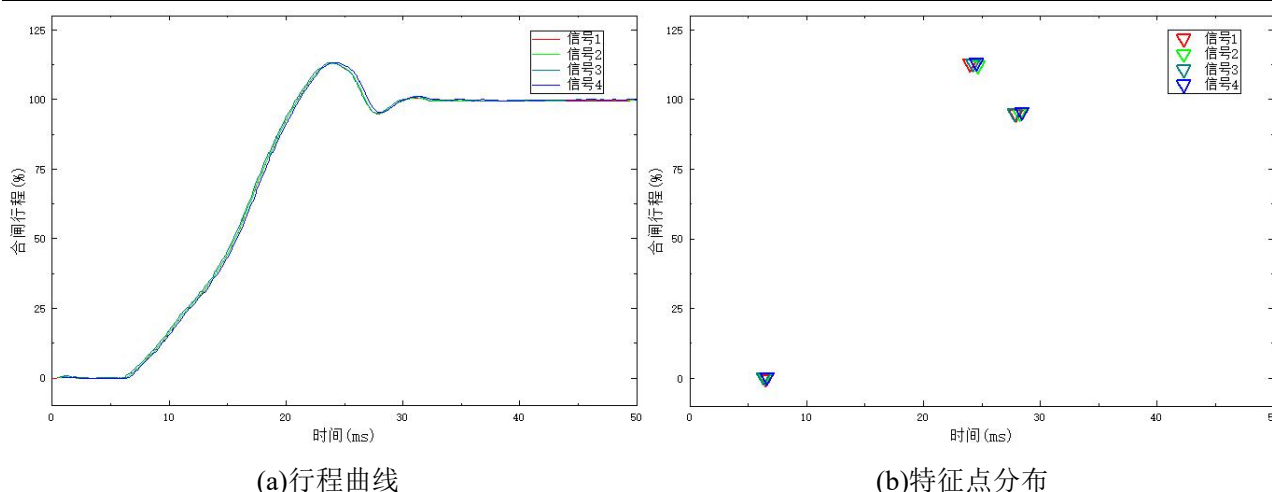


图 4.18 主轴卡涩状态的合闸行程

4.2.4 故障诊断结果

对于正常状态、线圈铁芯卡涩、脱扣器松动、电压跌落至 160V 四种不同状态的合闸线圈电流数据，本研究分别选择每种状态 200 组当作训练数据集、100 组当作为测试数据集，进行故障分类诊断。故障分类的目标是对应断路器的三种不同故障，其中“故障 1”代表“线圈铁芯卡涩”，“故障 2”代表“脱扣器松动”，“故障 3”代表“电压跌落至 160V”。

为了保证故障诊断的准确性和优化模型性能，本文采用了网格搜索方法对 K 值进行了优化。网格搜索是一种系统化的方法，该方法通过在预定义的 K 值范围进行穷举搜索，对每个 K 值进行交叉验证，并选择性能最好的 K 值。根据本章节所选取的训练集规模以及样本特征，在 1~10 的范围内对 K 值进行交叉验证，最终选择 $K=5$ 时，准确率较高。完成 K 值的选取后，故障诊断结果如图 4.19 所示。对于上述四种运行状态数据的总诊断正确率为 94.25%。电压跌落故障的特征较为明显，故诊断准确率达到了 100%。

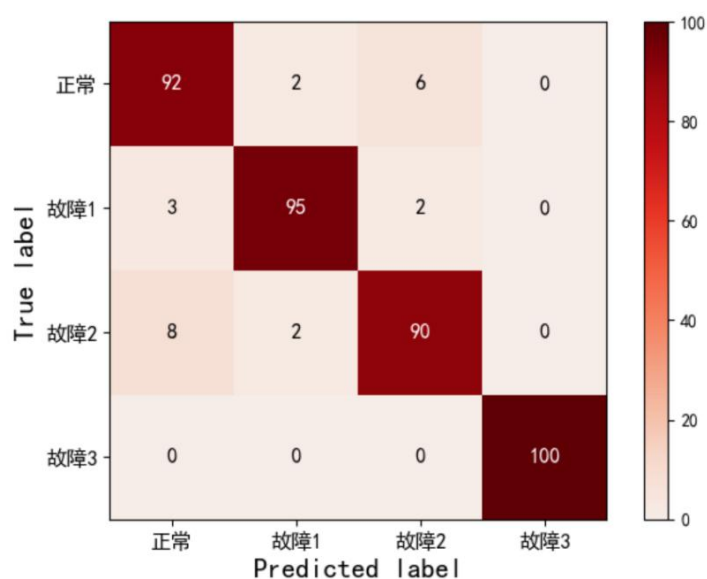


图 4.19 合闸线圈 KNN 诊断结果

同样选取正常状态与主轴卡涩两种状态的合闸行程数据各 200 组作为训练集，100 组作为测试集。故障诊断结果如图 4.20 所示。总正确率为 93.5%，其中正常状态的诊断准确率高达 100%，但是模拟卡涩故障只有 87%。这是由于合闸动作强度较大，传动主轴联动的机械结构对模拟故障的木块破坏程度较大，对主轴转动的影响降低，导致后期的部分故障数据与正常数据相比变化不明显。

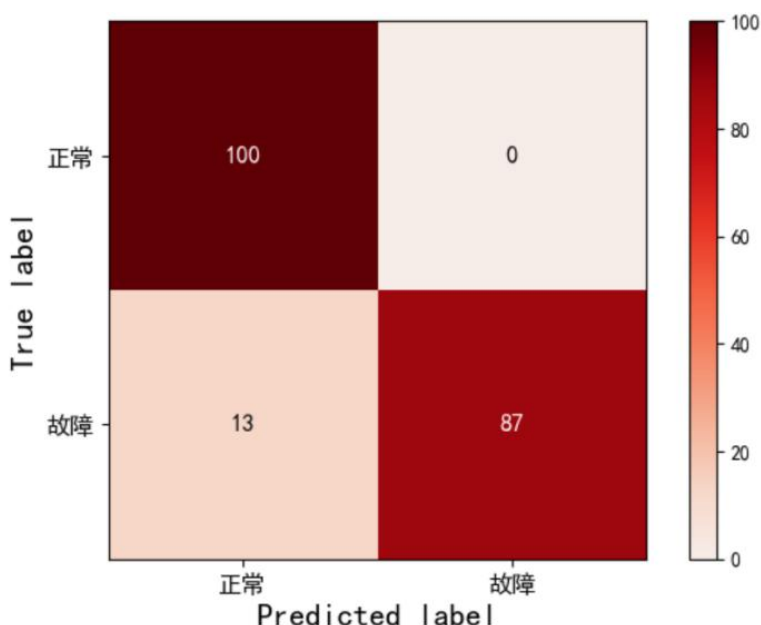


图 4.20 合闸行程 KNN 诊断结果

4.3 基于 DBSCAN 的未标记故障聚类处理

尽管机器学习算法在高压断路器的故障检测中展现出了卓越的性能，但它主要涉及的是较为理想的分类环境。在理想的情况下，训练数据集构建中数据量的充分性及不同类别样本分布的均衡性，乃是评价数据集质量的关键指标。而实际的故障检测场景往往更加复杂。对于高压断路器而言，运行的绝大部分时间都是正常的，导致在采集到的监测数据中，正常状态下的样本量远超于故障状态样本量，这可能导致训练数据的不均衡问题。在机器学习算法应用于断路器故障诊断的初级阶段，往往面临一个实际问题，即仅能获取到正常工作状态下的数据，而缺乏标注明确故障状态的数据。在这种情况下，通常的做法是基于已有的正常状态数据，逐步对故障模式进行标注^[81,82]。虽然已经对于一些常见的故障进行了标记，但同种类不同程度的故障标记不可能穷尽，会严重影响分类算法的诊断正确率。因此，本小节就如何基于 DBSCAN 仅根据已标记的故障解决不同幅度故障的误判问题进行研究。

4.3.1 DBSCAN 算法

DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 是一种基于密度的聚类算法，用于发现具有高密度的区域，并将它们视为簇，同时将低密度区域视为噪声。

相比于传统的基于距离的聚类算法（如 K-means），DBSCAN 能够自适应地处理不同形状和大小的簇，并且不需要提前指定簇的数量^[83-85]。

DBSCAN 的核心思想是通过连续地扩展簇的密集区域来进行聚类，而这些密集区域是由距离较近的数据点组成的。算法通过两个参数来定义簇的特性， ε （epsilon）和 MinPts。对于一个给定的数据点， ε 表示其邻域的半径，根据邻域内包含的所有点的个数，区分该点为核心点（Core Points）、边界点（Border Points）以及噪声点（Noise Points）。MinPts 表示邻域内形成密集区域所需的最少数据点的数量。如果一个点在其邻域内拥有至少 MinPts 个点（包括该点本身），则该点是一个核心点。如果一个点不是核心点，但是在一个核心点的邻域内，则称为边界点。而既不是核心点也不是边界点的点称为噪声点。

DBSCAN 算法的步骤如下：

（1）初始化：将所有数据点标记为未访问状态。确定算法的两个主要参数：邻域半径 ε 和最小点数 MinPts。

（2）选择起始点：从未访问的数据点中随机选择一个点作为起始点。

（3）标记点状态：根据 ε 和 MinPts 的设定，确定起始点的 ε 邻域内是否包含足够数量的数据点。如果是，则将其标记为核心点，并将其 ε 邻域内的所有点加入同一个簇中；如果不是，则将其标记为噪声点。

（4）扩展簇：对于核心点，递归地将其 ε 邻域内的点加入同一个簇中。如果一个点是核心点，则将其 ε 邻域内的所有未被访问的点也加入同一个簇中。

（5）重复步骤 3 和步骤 4，直到所有点都被访问。

通过这种方式，DBSCAN 能够发现任意形状的簇，并且可以有效地过滤噪声点。然而，DBSCAN 对邻域半径 ε 和最小数据点数 MinPts 的选择比较敏感，需要根据具体数据集进行调优。

4.3.2 不同幅度的电压跌落故障分析

当出现 KNN 中未标记的故障特征时，即新样本没有对应 KNN 中已知标签，那么在 KNN 算法中会采取多数表决的方式来确定其所属类别。具体来说，对于该新样本，算法会计算其与最近的 K 个邻居的距离，并查看这些邻居的标签。然后，算法会将新样本归类为这 K 个邻居中出现最频繁类别。就是说出现了已知故障之外的意外故障时，KNN 会将其诊断为一种已知故障。

以合闸线圈的电压跌落故障为例，不同幅度的电压跌落故障合闸线圈电流波形变化，如图 4.21 所示。从图中可以明显看出，合闸线圈发生电压跌落故障时，其整体波形轮廓规律基本保持不变，呈现出一种整体缩放的趋势。根据电压跌落的幅度不同，其整体波形轮廓缩放的程度不同。分别提取 220V 正常状态以及 200V、180V、160V 电压跌落故障状态下的合闸线圈电流波形的特征点。

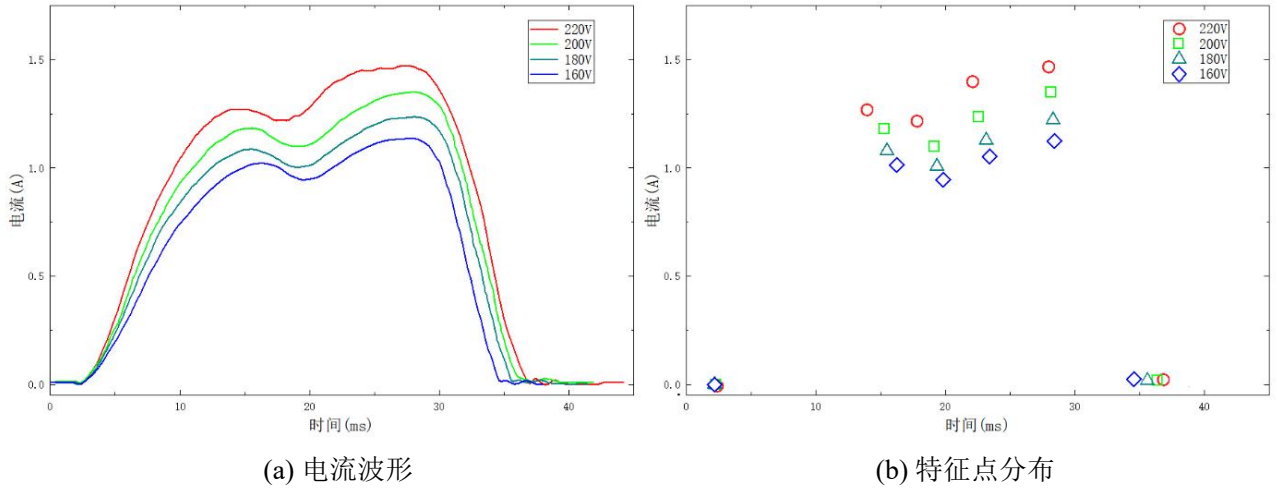


图 4.21 电压跌落至 160V 故障的合闸线圈

根据上文已标记的正常状态以及电压跌落至 160V 的训练样本，在只采用这两种标记，不考虑其他已标记故障的情况下，由于电压跌落的幅度不同，会很大程度的影响诊断结果。从图 4.22 可以看出，由于已标记的样本状态匮乏，并且不同幅度电压跌落的特征点分布明显，200V 与 180V 状态下的合闸线圈电流波形分别被分类成了 220V 与 160V。

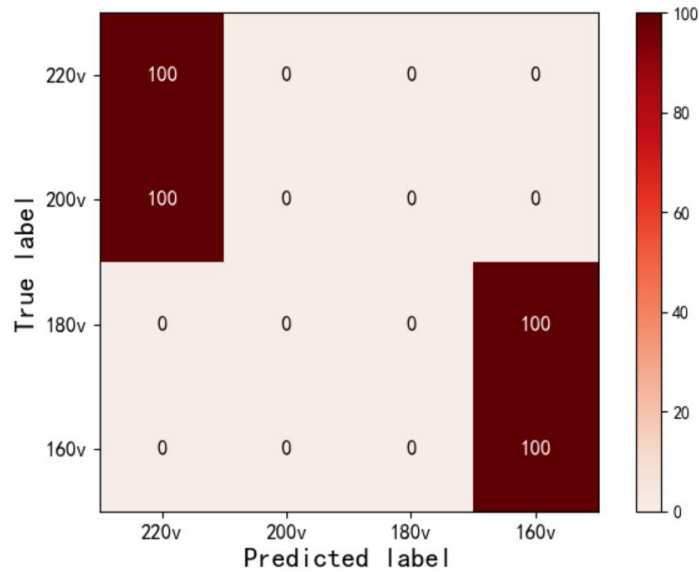


图 4.22 两种标记对不同幅度电压跌落的故障诊断

根据图 4.15(b)所示的特征点分布，对于不同的电压值波形，特征量 t_4 没有明显的变化，其波动幅度小于 1ms。变化最明显的特征量为 i_1 、 i_2 、 i_3 、 i_4 ，随着电压的下降，电流值也都有较大幅度的减小。

由于 DBSCAN 算法的参数 ϵ 是其判断有效数据点的圆形半径，而通过观察图 4.21(b)可以看出，不同幅度电压跌落故障的特征点变化主要以电流值的降低为主，呈现出竖直方向的变化分布。直接以图示大小进行 DBSCAN 的圆形邻域聚类则会较大地影响其准确率，因此需要对聚类范围进行改进优化。根据电压跌落特征点变化规律，采用将圆形邻域拉伸为椭圆

范围的优化方案。反之，也可以将特征点数据按照椭圆邻域的长短轴比例进行归一化处理，以满足 DBSCAN 的圆形邻域算法调节。

如图 4.23 所示，以特征点(t_4, i_4)为例，根据特征量变化量 Δt_4 与 Δi_4 ，按照其比例归一化数据放大 t_4 并压缩 i_4 。以电压跌落至 180V 的合闸线圈电流特征点为核心点，将半径 ε 设置为包含 160V、200V 合闸线圈电流特征点的大小。此时将电压跌落至 180V 作为电压跌落故障的唯一样本训练集，当其他幅度电压跌落的合闸线圈电流特征点作为被测点时，则会被聚类为统一的电压跌落故障。

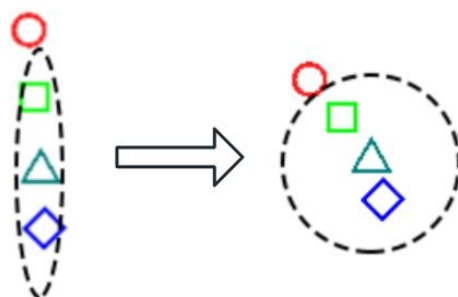


图 4.23 以 180V 特征点为核心点的 DBSCAN 聚类

4.3.3 KNN-DBSCAN 联合故障诊断

在 KNN 诊断中，设定距离阈值，将测试数据的特征点在阈值距离内不能满足 K 个邻近作为聚类诊断条件。同样选择正常状态、线圈铁芯卡涩（故障 1）、脱扣器松动（故障 2）的特征数据各 200 组作为训练集，100 组作为测试集。电压跌落仅选择 180V 的 200 组数据，但测试集选择 200V、180V、160V 各 100 组进行分类预测。

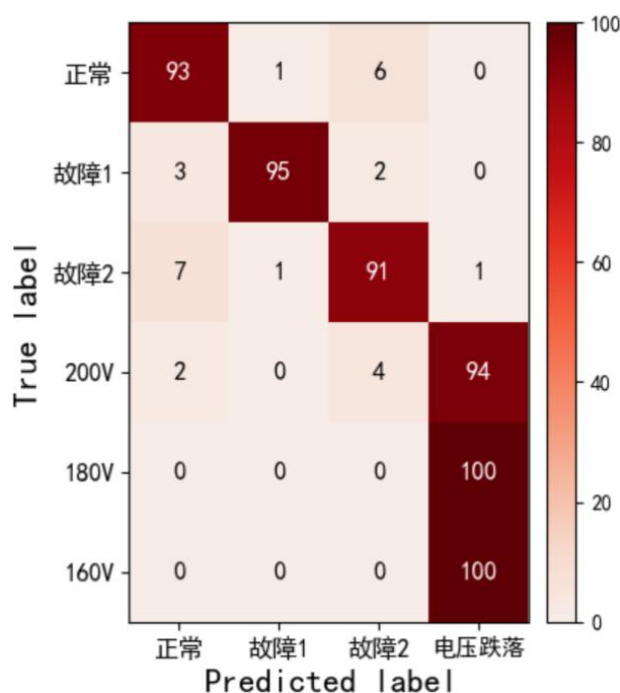


图 4.24 KNN-DBSCAN 诊断结果

KNN-DBSCAN 联合诊断的结果如图 4.24 所示。180V、160V 两组电压跌落幅度较大的数据，均 100%地诊断为电压跌落故障。200V、180V、160V 三种不同幅度的电压跌落故障诊断的综合准确率也高达 98%。当前几种故障类型诊断的整体准确率也达到 94.25%。

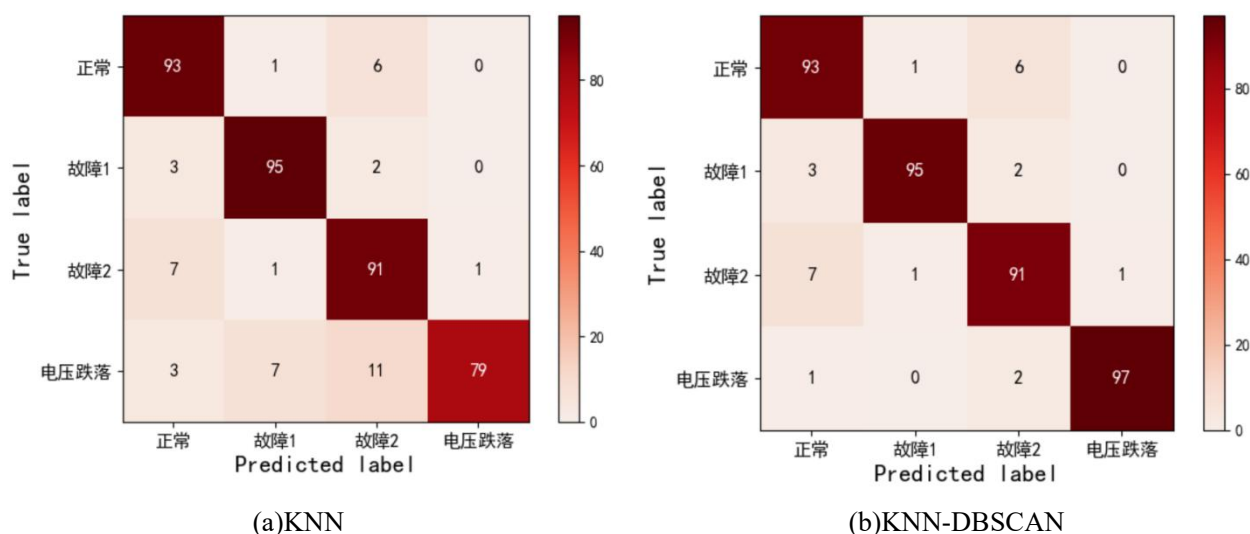


图 4.25 诊断结果对比

最后保持上述训练集不变，除电压跌落外测试集不变，电压跌落故障的测试集均匀地选取 160V~210V 之间的故障数据共 100 组，分别进行 KNN 与 KNN-DBSCAN 诊断，对比结果如图 4.25 所示。在针对不同幅度电压跌落故障的诊断上，KNN 诊断的正确率为 79%，KNN-DBSCAN 诊断的正确率为 97%，提高了 18%。四种状态总体的诊断准确率从 89.5%提高至 94%。

4.4 本章小结

提出了一种基于滑动窗口导数中心差分法的特征提取方法，准确地提取出分合闸线圈电流波形的特征点，为后续的故障诊断提供了数据依据。本文通过实验证明 KNN 算法在高压断路器常见已标记故障分类诊断中具有较高的准确度。同时本文解决了传统 KNN 算法对于故障幅度不同导致训练样本不足的问题，结合了 KNN 分类与 DBSCAN 聚类算法，可以有效避免对同种类不同幅度故障的严重误判问题。最后根据 KNN-DBSCAN 的联合诊断结果证明其准确率。

第 5 章 总结与展望

5.1 全文总结

本文根据目前对于行业需求和不足的现状分析，分为数据信息采集、物联网传输、云平台可视化管理几个部分，设计了一种高压断路器在线监测系统。文中详细介绍了信息采集部分中核心 MCU 及外围传感器的硬件选型以及软件流程。通过无线通信模块传输物联网数据，实现了设备自动注册与远程控制等功能。并将数据信息采集与物联网传输两个模块集成于智能网关电路板中，在不影响设备运行的前提下，实现所需功能的同时又便于安装。一方面，基于 OneNET 云平台，完成了对多设备多监控点的数据管理，并通过 Web 页面实现数据的可视化展示与在线监测。另一方面，开发本地屏幕的应用程序，实现离线的数据监测以及对断路器的触屏控制。移动端小程序的开发也为相关运检人员对故障设备进行及时的排查提供了更高的便利性。

为了实现对于高压断路器的触头行程数据的采集，本文首先分析了目前现有传感器方案的不足，结合实际使用场景的需求，选择非接触式的测量方案。传统的基于电磁效应的非接触式传感方案由于受到安装方式的限制，不适用于本文所研究的项目。分析巨磁阻效应在角度测量应用的可行性以及不同安装方式带来的误差，提出一种基于巨磁阻传感器的离轴角位移测量方法。通过将传感器侧置的方式解决了安装空间的问题，同时分析环形磁钢外围径向与切向磁场的变化规律以及角度测量原理，计算补偿系数，大幅度降低了轴侧测量产生的误差。最终测试得到标准值与测量值之间的最大绝对误差仅为 0.247° ，满足测量精度需求。

针对高压断路器故障诊断这一技术的研究，以断路器合闸动作为例，分析合闸线圈动作时产生的电流以及传动主轴的合闸行程。为了准确地提取出电流波形与行程曲线的特征点，文中提出了一种基于滑动窗口导数中心差分法的特征提取方法。对于高压断路器常见故障，本文首先分析并通过实验证明了 KNN 算法对已标记故障分类诊断的准确度，同时也证明了上述特征提取方法的有效性。为了解决不同幅度故障样本不足导致的严重误判问题，本文在 KNN 分类的基础上，结合 DBSCAN 聚类算法，以电压跌落故障为例，有效地将诊断准确率提高了 18%。

5.2 未来的工作展望

本文分析了高压断路器在线监测系统的不足与缺陷，主要针对数据采集与故障诊断技术展开深入研究。但是结合与日俱增的实际需求，仍存在一些不够完善的地方。一下列举这些问题，以便未来更进一步的解决完善：

(1) 在线监测系统需要长期稳定运行以提供连续的监测数据。对于系统的稳定性和可靠性的评估仍需要更多的量化测试和验证, 确保系统在各种环境和情况下都能稳定运行^[86]。

(2) 使用 GMR 角度传感器采集角度数据时, 除了本文提到的在测量位置环形磁钢产生的径向与切向磁场幅值不同带来的误差, 还存在其他多种误差。包括因磁钢制作工艺问题带来的磁化不均匀、磁化倾斜、去磁失真等误差。在后续研究中可以考虑针对上述误差进行补偿, 从而进一步提高测量精度。

(3) 针对高压断路器故障数据特征的采集和提取工作, 本研究采用了人为模拟故障的方法。考虑到断路器的运行环境较为复杂, 且操动机构和机械部件连接紧密, 单一故障可能导致多种异常状态的出现。为了获取更有效的故障数据, 建议未来研究对实际运行中的故障断路器进行更加广泛和全面的数据采集工作。

(4) 在对断路器不同故障情况进行分析时, 主要考虑的是分合闸线圈电流信号以及触头行程曲线, 对于故障状态下与其相关的其他联动机构的运行机理的变化并未深入研究。未来的研究工作可以联合其他信号, 如震动、声纹等信息^[87], 提取多种特征进行交叉验证, 以提高故障诊断的准确率。

(5) 实际环境中, 必然存在当前未标记过的故障情况。对于这类故障, 是否能够结合其他技术与传感器数据实现自动识别标记, 也仍有待研究。

致谢

总以为来日方长，却不知时光匆匆。行文至此，落笔为终，研究生的时光始于 2021 年的初秋，终于 2024 年的盛夏。在杭电的三年，我成长了很多，虽有磕磕绊绊，但也顺利地完成了学业和工作的任务。这也将会成为我一生中最难忘的时段，感谢每一个在我前行路上帮助我的人。

首先，感谢我的导师陈科明教授，感谢您三年中对我科研能力的培养、思维方式的训练以及人生道路的指导与建议。陈老师不仅教会了我学以致用，还给我提供了宝贵的实习锻炼的机会，将自己学习的理论知识应用于实际工程之后，给我的帮助很大，并且在应用过程中也给了我很大的鼓励，让我在学业和工作上越来越有自信，越来越敢于面对挑战与困难。在今后的日子里，我也会牢记陈老师的教诲，脚踏实地，勇于创新。

感谢我的同门雷宇素、王佳敏、叶宗昆，感谢师兄吴耀增，感谢室友陈美豪、徐溢鸿、郑磊。我们在学习上一一起进步，在工作上一一起克服困难，在生活中一起拥有美好的回忆。相聚在此，皆是缘分，你们的出现为我增添了太多惊喜与美好，感谢你们在学习、工作和生活上的支持和帮助。花开花落总无穷，唯有友情藏心中，祝愿我们保持热爱，奔赴山海，前程似锦、顶峰相见。

感谢父母和家人二十余载对我无微不至的关心和照顾、不求回报的付出和给予，在我遇到困难时给我鼓励，让我有勇往直前的勇气，你们是我成长路上永远的后盾，也是我人生中最好的老师。养育之恩，无以为报，唯有继续努力让自己成为你们的骄傲。在此，愿我的父母及家人们能身体健康、平安喜乐、万事胜意。

感谢一路磕磕绊绊但仍然坚持前行的自己。轻舟已过万重山，感谢过去的所有经历，堆砌成了今天的自己。请保持热爱，从容不迫，与百舸争流。

最后，感谢论文评阅和答辩委员会各位老师，感谢你们提出的宝贵意见，我定会悉心听取，积极改正。感谢培养教育我的杭州电子科技大学，天涯未远，江湖再见！

参考文献

- [1] 邓世杰.中置式开关柜的无线测温方法[J].高压电器,2010,46(11):99-102.
- [2] 朱德恒,严璋,谈克雄.电气设备状态监测与故障诊断技术[M].中国电力出版社,2009.
- [3] 黄新波,方寿贤,王霄宽,等.基于物联网的智能高压开关柜设计[J].电力自动化设备,2013,33(002):147-151.
- [4] 秦冰阳.基于 D-dot 的开关柜局部放电检测及模式识别方法研究[D].山东大学,2016.
- [5] 谢静.高压开关柜状态综合评估方法研究[D].昆明理工大学,2019.
- [6] 苏鹏声,王欢.电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析[J].电力系统自动化,2003,(01):61-65.
- [7] 黄世龙,王晓辉,郭旭敏,等.采用 TEV 传感器的开关柜局部放电检测技术研究与应用[J].高压电器,2016,52(10):8.
- [8] 高胜友,王昌长,李福祺.电力设备的在线监测与故障诊断[M].清华大学出版社,2018.
- [9] 陈衡.电力设备故障红外诊断[M].中国电力出版社,1999.
- [10] 王光强.红外测温技术在氧化锌避雷器带电检测中的应用[J].数字化用户,2018.
- [11] 孙剑.高压开关柜触点超温在线监测仪设计[D].北京化工大学,2008.
- [12] 邬钢,李进.光纤在开关柜触头温度监测中的应用[J].高电压技术,2006,32(2):1.
- [13] Robert Bogue.Structural integrity monitoring with fibre Bragg grating sensors[J].Sensor Review,2005,25(2):109-113.
- [14] 许高俊,马宏忠,李超群,等.高压开关柜有源无线温度在线监测系统设计与实现[J].电测与仪表,2014,000(022):82-86.
- [15] 宿筱.基于 ZigBee 的高压开关柜在线监测系统设计与实现[D].山东理工大学,2018.
- [16] Nick Dominelli,Avaral Rao,Prabha Kundur.Life Extension and Condition Assessment: Techniques for an Aging Utility Infrastructure[J].IEEE power energy magazine,2006,4(3):24-35.
- [17] 李春光.输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J].中文科技期刊数据库（引文版）工程技术,2016(7):00278-00278.
- [18] 彭红霞,李涛,牛硕丰,等.高压开关柜绝缘监测及防凝露调控系统设计[J].电气自动化,2021,43(03):26-28+58.
- [19] 王伟杰,雍明超,何星躲,等.变压器局部放电特高频传感器的研究与应用[J].高压电器,2023,59(08):84-90.

- [20] 范敏,汪佳,黄海波,等.带电检测技术应用于真型开关柜局部放电试验研究[J].高压电器,2019,55(07):235-241.
- [21] 李曼,王志鹏.基于巨磁阻效应的采煤机摇臂角度传感器设计研究[J].煤炭科学技术,2019,47(04):26-31.
- [22] M Žarković, Z Stojković. Analysis of artificial intelligence expert systems for power transformer condition monitoring and diagnostics. Electric Power Systems Research, 2017, 149:125-136.
- [23] Carlos Roncero-Clemente, Eugenio Roanes-Lozano. A multi-criteria computer package for power transformer fault detection and diagnosis[J]. Applied Mathematics and Computation, 2018, 319:153-164.
- [24] W. H. Tang, K. Spurgeon, Q. H. Wu, Z. J. Richardson. An Evidential Reasoning Approach to Transformer Condition Assessments[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4):1696-1703.
- [25] J Sun, G Li, K Gao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for insulation diagnosis of high voltage cable. International Conference on Power System Technology, 2010:1-3.
- [26] J Huan, G Wang, HF Li, et al. Risk Assessment of XLPE Power Cables Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method. Power & Energy Engineering Conference, 2010: 1-4.
- [27] J Buhler, G Balzer. Evaluation of the condition of medium voltage urban cable networks using fuzzy logic. Power tech, IEEE Bucharest power tech conference, 2009:1-8.
- [28] 刘锦杰,叶波,罗赞琛,等.一种基于云模型的 SF₆ 高压断路器状态评估方法[J].高压电器,2019,55(4):31-38.
- [29] Kazemi R A A, Niayesh K. Condition Monitoring of High Voltage Circuit Breakers: Past to Future[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, PP(99):1-1.
- [30] 胡晓双.智能低压分路监测系统的设计与实现[D].杭州电子科技大学,2022.
- [31] 欧浩源,陈春玮,贺易栋,等.基于 Cat.1 物联网技术的环境智能监测系统设计[J].电子技术与软件工程,2022,(20):252-256.
- [32] Bansal Dhruvi, Gupta Kunal, Sharen Ganesh M. C., Goyal Jayesh, Tharani Kusum, Sharma Sandeep. Smart energy meter based on hall effect current sensing techniques with IoT modules[J]. Journal of Information and Optimization Sciences, 2022, 43(1):225-231.
- [33] 冯起辉,李欣洋,辛明勇,等.基于磁场取能的无源无线温度传感器研究及应用[J].自动化与仪器仪表,2023,(11):277-281+285.
- [34] 高阳,张博,许傲然,等. TEV 检测原理在断路器机械特性研究中的应用[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2016,12(04):332-335.

-
- [35] Bang Seungmin, Lee HyunWoo, Lee BangWook. Real-Time Monitoring of the Vacuum Degree Based on the Partial Discharge and an Insulation Supplement Design for a Distribution Class Vacuum Interrupter[J]. *Energies*, 2021, 14(23): 7891-7891.
 - [36] 陈先航. 物联网中高灵敏度低误报烟雾探测器的研究[D]. 北京邮电大学, 2022.
 - [37] 赵凤. 嵌入式单片机在物联网中的应用[J]. *集成电路应用*, 2022, 39(09): 20-21.
 - [38] 李晓红, 付江豪. 基于物联网的 STM32 单片机智能家居系统设计[J]. *电子制作*, 2023, 31(17): 23-25.
 - [39] 李厚军. 电子技术中单片机的应用与开发[J]. *现代工业经济和信息化*, 2022, 12(04): 169-170+173.
 - [40] 胡存. 基于物联网工业云平台系统设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
 - [41] 卢嫚, 袁志军. 基于 OneNet 云平台的智能监控系统设计[J]. *单片机与嵌入式系统应用*, 2022, 22(07): 34-37.
 - [42] Ji Zhenglin, Bin Ren. Weather monitoring system based on STM32 and OneNet Internet of Things platform[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1820(1): 012150-.
 - [43] 闫敏. 基于 OneNet 物联网平台的家用智能断路器系统[D]. 河南科技学院, 2021.
 - [44] 龙巧玲, 牛德雄, 林利云. 基于 OneNET 云平台与物联网 MQTT 协议的智慧节能控制系统[J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29(07): 127-130+135.
 - [45] 梁甄勇. 基于 MQTT 的工业物联网关边缘计算框架研究[D]. 武汉邮电科学研究院, 2022.
 - [46] 王锦涛. 基于 MQTT 的物联网设备接入及云上监控系统研究[D]. 西安工业大学, 2021.
 - [47] Karim Kamoun, Fatma Hmissi, Sofiane Ouni, Sonia Ouni. Improvement of MQTT semantic to minimize data flow in IoT platforms based on distributed brokers[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2024, 35(2):
 - [48] 李瑞, 江学焕. 基于 Ymodem 的 GD32 固件升级 Bootloader 设计[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2023, 37(03): 53-57+62.
 - [49] 陈睿智, 石春, 吴刚, 等. 面向 OTA 需求的汽车电控单元 Bootloader 设计[J]. *仪表技术*, 2021, (02): 8-12+22.
 - [50] 张龙, 黄新波, 蒋波涛, 等. 基于触头行程测量的断路器机械特性在线监测[J]. *西安工程大学学报*, 2018, 32(03): 302-310.
 - [51] 袁峻. 高压真空断路器机械特性在线监测技术研究现状及其展望[J]. *电力设备管理*, 2021, (07): 220-221+224.
 - [52] 董驰, 李晓峰, 顾朝敏, 等. 高压开关柜断路器机械特性在线监测装置研究[J]. *电子器件*, 2021, 44(03): 713-717.
 - [53] Zhang Shuai, Yang Yong, Song Guoquan, Wei Bo, Lin Haofan, Zheng Wenzhe, He Jian, Ji Yuhao, Fang Chengwei, Xia Ligang, Huang Junhao. Application of mechanical characteristic test

- in the development of 220kV SF new type quick circuit breaker[J].Journal of Physics: Conference Series,2022,2369(1):
- [54] 殷士波.真空断路器机械特性在线监测仪[D].沈阳工业大学,2007.
- [55] 武建文,白洪超,张丹丹,等.适用于新标准的断路器机械特性测试装置[J].高压电器,2006,(04):298-300.
- [56] Sang Zhongqing,Gu Xiaodong,Wang Yongxin,Jiang Weiyun,Cheng Wenjuan.Waveform Correlation Analysis Method for Mechanical Characteristics of Circuit Breaker in Intelligent GIS Equipment[J].Journal of Physics: Conference Series,2022,2218(1):
- [57] 肖成林,周化龙,崔相东.用于起重机吊臂的电阻式位移传感器设计[J].建设机械技术与管理,2023,36(04):41-44.
- [58] Fei Liu,Qing Liu,Yaohui Zhi,Ting Shang.Omnidirectional Sensor Design for Distributed Laser Measurement Systems.[J].Sensors (Basel, Switzerland),2024,24(3):
- [59] 张虎,高云,王志虎.激光测距仪在提升机上的应用[J].汽车电器,2022,(02):52-54.
- [60] 张寅,顾恩臣,闫钧华,等.基于相位拟合的绝对式光电精密测角方法[J].仪器仪表学报,2023,44(02):15-23.
- [61] Khurana Archana,Nagla K. S..Extrinsic Calibration Methods for Laser Range Finder and Camera: A Systematic Review[J].MAPAN,2021,36(3):669-690.
- [62] 杨金利,魏晓蓉.绝对式光电编码器测角误差自动检测系统[J].光学与光电技术,2021,19(05):30-35.
- [63] 王超.基于 AMR 效应的磁阻角度传感器的设计[D].西北工业大学,2007.
- [64] 李航.基于巨磁电阻的非接触式角度传感器研制[D].黑龙江大学,2022.
- [65] P. Grünberg, Schreiber R , Pang Y ,et al.Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of Fe Layers across Cr Interlayers[J]. Physical Review Letters, 1986.
- [66] Elsafi Bassem.Tailoring the Magnetic Properties of Giant Magnetoresistance Multilayers via Modification of Ultrathin Non-Magnetic Spacer Thickness[J].Journal of Electronic Materials,2024,53(6):2852-2860.
- [67] 陈斌斌.La_(2/3)Ca_(1/3)MnO₃/CaRu_(1-x)Ti_xO₃ 多层膜界面及层分辨的反铁磁层间耦合的发现[D].中国科学技术大学,2017.
- [68] 张博洋,高凤菊,张云鹏.方兴未艾的磁头材料——巨磁电阻自旋阀材料[J].现代物理知识,2007,(01):36-38.
- [69] 刘华瑞.自旋阀结构及 GMR 传感器研究[D].清华大学,2006.
- [70] Enhanced spin-valve giant magneto-resistance in non-exchange biased sandwich films[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36 (5 Pt.1): 2866-2868.

- [71] 王晓一.高压断路器操作机构机械故障诊断方法研究[D].山东大学,2021.
- [72] 杨泽.10kV 真空断路器机械特性的在线监测与故障诊断研究[D].湖北民族大学,2023.
- [73] 王天泽,陈尔东,吉小军.断路器分合闸线圈电流信号及其特征点采集系统设计[J].仪表技术与传感器,2021,(10):47-51+64.
- [74] 彭在兴,王颂,刘芹,等.高压断路器分合闸线圈电流采集实验平台与故障模拟实验研究[J].高压电器,2018,54(07):248-253.
- [75] 孙银山,张文涛,张一茗,等.高压断路器分合闸线圈电流信号特征提取与故障判别方法研究[J].高压电器,2015,51(09):134-139.
- [76] 宋亚凯,张一茗,张文涛,等.断路器分合闸线圈电流波形特征值提取算法研究[J].高压电器,2020,56(01):181-187.
- [77] Huang Zhongting,Wang Longying,Ge Qiyun,Chen Yongyi,Zhang Dan.An Intelligent Fault Diagnosis Method for CNN-SVM Circuit Breaker Based on Quantum Particle Swarm Optimization[J].Journal of Physics: Conference Series,2021,2113(1):
- [78] Rudsari Fatemeh Nasri,Razi Kazemi Ali Asghar,Shoorehdeli Mahdi Aliyari.Fault Analysis of High-Voltage Circuit Breakers Based on Coil Current and Contact Travel Waveforms Through Modified SVM Classifier[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(4):1608-1618.
- [79] Cover T M , Hart P E .Nearest Neighbor Pattern Classification[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1967, 13(1):21-27.
- [80] Fanyi, 距离度量——闵可夫斯基距离 (Minkowski Distance)[EB/OL].[2022-06-19]
https://blog.csdn.net/qq_21484461/article/details/125357968
- [81] 黄保鑫.基于多元数据分析的低压开关柜故障诊断与预警[D].华北电力大学(北京),2023.
- [82] 陈磊.高压断路器振动信号特征提取及故障诊断方法研究[D].华北电力大学(北京),2021.
- [83] AI 数据派,一文盘点 5 种聚类算法,数据科学家必备! [EB/OL].[2018-12-23]
<https://mp.weixin.qq.com/s/S2eSe6qYPieDSYJ9GGOvkg>
- [84] 程世超.K-Means 及 DBSCAN 聚类算法的研究与改进[D].江西理工大学,2021.
- [85] 巴建军.基于 DBSCAN 算法的异常检测方法研究[D].中国民航大学,2019.
- [86] Payman Dehghanian,Yufan Guan,Mladen Kezunovic.Real-Time Life-Cycle Assessment of High-Voltage Circuit Breakers for Maintenance Using Online Condition Monitoring Data[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55(2):1135-1146.
- [87] Wang Sihao,Zhou Yongrong,Ma Zhaoxing.Research on fault identification of high-voltage circuit breakers with characteristics of voiceprint information[J].Scientific Reports,2024,14(1):9340-9340.

附录

作者在读期间发表的学术论文、专利及参加的竞赛和科研项目

会议论文:

- [1] **Wang Congge**, Chen Keming, Kong Xiuting, Measurement of contact travel of high voltage circuit breaker based on GMR sensor, 2023 3rd International Conference on Electrical Engineering and Control Science(IC2ECS 2023). (EI 收录, 第一作者).

专利:

- [1] **王从舸**, 陈科明, 杨洪, 轴侧检测的旋转轴角度磁性测量装置及方法, 发明专利, 浙江省: CN114577109A, 2022 年 6 月 3 日。(已公开, 第一发明人)

科研项目:

- [1] 高压断路器监测平台开发, 横向课题
[2] 割草车产测系统开发, 横向课题
[3] PLC 设备远程编程系统开发, 横向课题