

动车组蓄电池系统的故障分析与维护策略

罗涛

中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东青岛，266111；

摘要：动车组蓄电池系统作为保障列车正常运行的关键组成部分，其性能的可靠性至关重要。本文深入剖析了动车组蓄电池系统常见的故障类型，包括蓄电池故障、充电机故障以及监控系统故障，并针对性地提出了一系列科学全面的维护策略，涵盖制定维护计划、运用先进检测技术、强化设备管理与零部件更换规范以及开展专业培训等方面，旨在提升动车组蓄电池系统的稳定性和可靠性，为列车安全运行提供有力支撑。

关键词：动车组；蓄电池系统；故障分析；维护策略

DOI:10.69979/3041-0673.25.05.030

动车组在现代铁路运输发挥着重要的作用，它的安全运行直接关系到人民的生命和财产安全，而且动车组的稳定运行也同样是保障列车稳定运行的关键，蓄电池系统作为动车组的重要组成部分承担着在列车启动、紧急制动、辅助供电等多种工况下提供稳定电源的关键任务。但在现实中由于动车组运行环境复杂、工况多变，蓄电池系统不可避免地会出现各类故障影响列车的正常运行，因此，深入研究动车组蓄电池系统的故障分析方法，并制定切实有效的维护策略，具有极其重要的现实意义。

1 动车组蓄电池系统工作原理与结构

1.1 工作原理

1.1.1 充电原理

动车组蓄电池系统的充电过程基于电化学原理，在充电时，外部电源通过充电机将交流电转换为直流电，并施加于蓄电池组，以常见的铅酸蓄电池为例，电流流入蓄电池后在正极板上，二氧化铅（ PbO_2 ）与硫酸（ H_2SO_4 ）中的氢离子（ H^+ ）以及从外电路获得的电子发生反应，生成硫酸铅（ PbSO_4 ）和水（ H_2O ）；在负极板上，铅（ Pb ）与硫酸根离子（ SO_4^{2-} ）反应也生成硫酸铅，这个过程中，电能被转化为化学能储存起来，使蓄电池的电量得以增加，充电机通常具备智能控制功能，可根据蓄电池的充电状态自动调整充电电压和电流，以确保充电过程既高效又安全，避免过充对蓄电池造成损害。

1.1.2 放电原理

当动车组需要蓄电池供电时，放电过程启动，蓄电池内部发生与充电相反的化学反应，负极板上的硫酸铅在电解液作用下，释放电子并转化为铅离子（ Pb^{2+} ），铅离子与硫酸根离子结合再次生成硫酸铅，同时电子通

过外电路流向负载，为列车的启动、紧急制动以及辅助供电等设备提供电能。在正极板上，硫酸铅与水反应，在获得从外电路流回的电子后，重新生成二氧化铅和硫酸，随着放电的持续，蓄电池的电量逐渐减少，电压也随之下降，当电压降至一定程度时，需及时进行充电，以保证蓄电池下次能正常工作。

1.2 系统结构

1.2.1 蓄电池组构成

动车组的蓄电池组由多个单体蓄电池串联和并联组成，以满足不同的电压和容量需求，常见的蓄电池类型有铅酸蓄电池、镍镉蓄电池和锂离子蓄电池等，铅酸蓄电池因其成本较低、技术成熟，在早期动车组中广泛应用，但它存在能量密度低、寿命较短、维护工作量大等缺点，镍镉蓄电池具有较好的耐过充和过放性能，循环寿命长，但由于镉元素对环境有污染，应用受到一定限制。近年来，锂离子蓄电池凭借其高能量密度、长循环寿命、无记忆效应等优势，逐渐成为动车组蓄电池的发展趋势，不同类型的蓄电池在结构和性能上存在差异，例如锂离子蓄电池通常采用正极材料（如钴酸锂、磷酸铁锂等）、负极材料（石墨等）、电解液和隔膜等组成，通过合理的材料选择和结构设计，实现高效的电能存储和释放。

1.2.2 充电机等辅助设备

充电机是蓄电池系统的重要辅助设备其作用是将外部电网的交流电转换为适合蓄电池充电的直流电，并对充电过程进行精确控制，充电机一般由整流模块、控制模块和滤波模块等组成。其中整流模块负责将交流电转换为直流电，控制模块根据蓄电池的充电状态和特性，实时调整充电电压和电流，确保充电过程的稳定和安全；滤波模块则用于去除充电电流中的杂波提高充电质量，

辅助设备还包括熔断器、接触器等保护装置,用于在发生过流、短路等故障时,迅速切断电路,保护蓄电池和其他设备不受损坏。

1.2.3 监控系统

监控系统如同蓄电池系统的“智能大脑”,实时监测蓄电池的各项参数和工作状态,它通过传感器采集蓄电池的电压、电流、温度等数据,并将这些数据传输至中央控制单元进行分析和处理,当发现蓄电池参数异常时,监控系统会及时发出报警信号,提醒维护人员进行检查和处理。监控系统还能对充电机的工作状态进行监测和控制,确保充电机与蓄电池之间的协同工作正常,就好比当蓄电池电压过高或过低时,监控系统可自动调整充电机的输出,以维持蓄电池的正常工作状态,一些先进的监控系统还具备数据分析和预测功能,通过对历史数据的分析,预测蓄电池的剩余寿命和潜在故障为预防性维护提供依据,提高蓄电池系统的可靠性和可用性。

2 动车组蓄电池系统的故障分析要点

2.1 蓄电池故障

蓄电池容量衰减是最为常见的故障之一,随着使用时间的增加,电池内部的化学反应逐渐导致活性物质减少从而使电池容量降低,由于电池长期处于过充或过放状态,导致电极材料受损;或者是运行环境温度过高或过低,影响了电池内部化学反应的速率,例如,在高温环境下,电池内部的电解液挥发加快,极板腐蚀加剧,进而导致容量衰减加速。此外正常情况下,蓄电池存在一定程度的自放电现象,但当自放电速率超出正常范围时就会影响电池的性能,这一故障很多时候都是由于电池内部存在杂质,引发了局部微短路,使得电池在未使用时也会持续消耗电量,此外,电池的密封性能不佳,导致电解液与空气接触发生氧化反应,也可能加剧自放电。在蓄电池长期处于欠充电状态或电解液密度过高时,极板表面会逐渐生成一层白色坚硬的硫酸铅结晶,即极板硫化,极板硫化会导致电池内阻增大,充放电性能变差,严重时甚至会使电池无法正常工作。

2.2 充电机故障

充电机作为动车组蓄电池系统的关键组件,其故障会严重影响蓄电池的性能与寿命,充电机输出电压异常是较为常见的故障类型,在开关电源型充电机中,PWM(脉冲宽度调制)控制电路负责调节输出电压。若该电路中的控制芯片损坏,无法精确调控脉冲宽度,会致使输出电压失控,当电压过高时,蓄电池内部会发生剧烈的析气反应,加速极板腐蚀,造成不可逆的容量损失;

电压过低则无法克服蓄电池的极化内阻,无法实现充分充电,使电池实际可用容量降低,例如,电压采样电阻因长期工作在高电压、大电流环境下,阻值发生漂移,反馈给控制电路的电压信号失真,进而导致充电机输出电压偏离设定值。充电机输出电流不稳定同样不容忽视,在充电机的功率变换电路中,IGBT(绝缘栅双极型晶体管)或MOSFET(金属-氧化物半导体场效应晶体管)等功率器件承担着电能转换的关键任务,当这些功率器件的栅极驱动电路出现故障,如驱动芯片损坏、电容漏电导致驱动信号异常,功率器件无法正常导通与关断,会使输出电流产生剧烈波动。同时,LC滤波电路用于平滑充电机输出电流,若滤波电感磁芯饱和、滤波电容干涸或击穿,滤波效果大打折扣,交流纹波电流注入蓄电池,会引发电池局部过热,加速极板硫化,极大缩短电池使用寿命。过热保护频繁动作也是充电机常见故障之一。充电机工作时,功率器件会因导通电阻消耗功率而发热,正常运行时,散热片与风扇协同工作,将热量散发到周围环境,但当散热风扇因电机绕组短路、轴承磨损卡死而停转,或者散热片表面积聚大量灰尘,热阻大幅增加,热量无法及时散发,充电机内部温度急剧上升。

2.3 监控系统故障

监控系统中的传感器可以用于实时监测蓄电池的电压、电流、温度等参数,当传感器发生故障时,会导致监测数据不准确,从而使监控系统无法及时准确地判断蓄电池系统的运行状态,例如,电压传感器的零点漂移或线性度变差,会使测量的电池电压与实际值存在偏差,可能导致误报警或无法及时发现电池故障。监控系统需要将采集到的数据传输至列车控制中心或其他相关设备,通信故障可能表现为数据传输中断、数据丢失或数据错误等,这可能是由于通信线路损坏、接口松动、通信协议不匹配等原因造成的。通信故障会导致监控系统与外部设备之间无法有效沟通,影响对蓄电池系统的远程监控和管理,监控系统的软件负责数据处理、分析和故障诊断等功能,软件在处理大量数据时可能出现内存溢出,导致系统死机;或者是故障诊断算法不够准确,将正常状态误判为故障状态,影响对蓄电池系统的维护和管理。

3 动车组蓄电池系统维护策略

3.1 制定科学全面的维护计划

管理人员应该根据动车组的运行里程和时间,制定详细的定期巡检计划,巡检内容包括蓄电池外观检查,

查看是否有漏液、鼓包、破裂等异常情况；并检查连接线缆是否松动、腐蚀；测量蓄电池的电压、电流、温度等参数，并与正常范围进行对比分析，通过定期巡检，可以及时发现潜在的故障隐患，提前采取措施进行处理。根据蓄电池的使用寿命和充放电次数等因素，制定预防性维护计划，在蓄电池使用寿命接近尾声时，提前安排更换，避免因电池突然失效而影响列车运行，定期对充电机进行维护保养，如清洁散热器、检查功率元件和控制电路等，确保充电机正常工作，还应建立完善的维护记录档案，详细记录每次维护的时间、内容、发现的问题及处理结果等信息，通过对维护记录的分析，可以总结出蓄电池系统的故障规律，为后续的维护计划制定和故障诊断提供依据。

3.2 运用先进技术进行定期检测

利用在线监测系统实时监测蓄电池的各项参数，如内阻、容量、充放电曲线等，通过对这些参数的连续监测和分析，可以及时发现蓄电池的性能变化趋势，提前预测故障发生的可能性，例如，当蓄电池内阻逐渐增大时，可能意味着电池内部出现了极板硫化或连接不良等问题，在线监测系统可以及时发出预警信号。此外，还可以采用智能诊断算法，对监测数据进行深度分析和处理，智能诊断技术可以综合考虑多种因素，如电池的历史数据、运行环境等，准确判断蓄电池系统是否存在故障以及故障的类型和位置。无损检测技术也是现阶段应用比较多的一种检测方式，如超声波检测、X 射线检测等，对蓄电池内部结构进行检测，查看是否存在极板断裂、短路等隐性故障，无损检测技术可以在不损坏电池的前提下，获取电池内部的详细信息，为故障诊断提供有力支持。

3.3 强化设备管理与零部件更换规范

管理人员应该建立详细的设备台账，记录蓄电池系统中各个设备和零部件的型号、规格、生产厂家、采购时间、安装位置等信息，通过设备台账管理，可以方便地对设备进行跟踪和管理，及时掌握设备的使用情况和维护需求。而且在采购零部件时严格把控质量关，选择质量可靠、性能稳定的产品，对采购的零部件进行严格的检验和测试确保其符合相关标准和要求，并且要制定

规范的零部件更换流程，明确更换的步骤、注意事项和安全要求，在更换零部件时，严格按照流程操作，确保更换过程的安全可靠，更换完成后还要对设备进行全面测试，验证新零部件的性能是否正常，确保蓄电池系统能够正常运行。

3.4 开展专业培训提升维护人员技能

管理人员应定期组织维护人员参加动车组蓄电池系统的理论知识培训，包括电池的工作原理、充电机的控制技术、监控系统的架构和功能等，通过理论知识培训，使维护人员深入了解蓄电池系统的技术原理，为故障诊断和维护工作提供理论支持，并且在此基础上还要开展实践操作培训，让维护人员在实际设备上进行操作练习，掌握蓄电池的安装、拆卸、检测、维护等技能，通过实践操作培训，提高维护人员的实际动手能力，使其能够熟练应对各种维护工作任务。并定期组织案例分析和经验交流活动，分享实际工作中遇到的故障案例及处理方法，通过案例分析，让维护人员学习借鉴他人的经验，提高自身的故障诊断和处理能力，鼓励维护人员在交流活动中提出自己的见解和疑问，共同探讨解决问题的方法，促进团队整体技能水平的提升。

4 结语

动车组蓄电池系统的可靠性对于列车的安全稳定运行起着至关重要的作用，通过对蓄电池系统常见故障的深入分析，如蓄电池故障、充电机故障以及监控系统故障，并针对性地制定科学全面的维护策略，包括制定维护计划、运用先进检测技术、强化设备管理与零部件更换规范以及开展专业培训等，可以有效提升蓄电池系统的性能和可靠性，在实际工作中，应不断总结经验，持续改进维护策略和技术手段，以确保动车组蓄电池系统始终处于良好的运行状态，为铁路运输的安全高效提供坚实保障。

参考文献

- [1] 叶思成. 动车组蓄电池劣化检测及剩余寿命预测[D]. 西南交通大学, 2021.
- [2] 周永勤. ETS 动车组镍镉蓄电池故障分析及维护方法[J]. 技术与市场, 2021, 28(05): 99-100.