

动车组辅助供电系统设计与优化探讨

朱振宇

中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东青岛，266111；

摘要：本文深入探讨动车组辅助供电系统的设计与优化。通过详细介绍系统架构与原理，分析设计要点，如供电容量匹配、可靠性提升及环境防护设计，探索基于节能、新型电力电子技术及可维护性的优化策略，并结合测试验证与实际应用案例，全面阐述了该系统从设计到优化的关键环节。研究成果旨在为提升动车组辅助供电系统性能、保障动车组稳定运行提供有力支撑。

关键词：动车组；辅助供电系统；设计优化；供电可靠性

DOI:10.69979/3041-0673.25.04.066

1 系统架构与原理基础

1.1 辅助供电系统的基本组成部件介绍

动车组辅助供电系统主要由辅助电源装置、配电装置、负载设备等部分构成。辅助电源装置作为核心部件，通常包括辅助变流器、蓄电池组等。辅助变流器将主电源（一般为牵引变流器输出的中间直流环节电压）转换为适合辅助设备使用的三相交流电压或直流电压。例如，常见的辅助变流器可将 DC1650V 的中间直流电压转换为 AC400V、50Hz 的三相交流电压，为空调、通风机等交流负载供电。蓄电池组则在列车启动、主电源故障等特殊情况下，为关键设备提供应急电源，确保列车的基本运行功能。

1.2 各部件的工作原理及协同运作机制解析

辅助变流器采用电力电子变换技术，通过一系列的功率开关器件（如 IGBT，绝缘栅双极型晶体管）的导通与关断，实现电能的变换。以三相电压型 PWM（脉宽调制）辅助变流器为例，它通过控制 PWM 波的占空比，精确调节输出电压的幅值和频率，以满足交流负载的需求。在工作过程中，其内部的控制电路实时监测输出电压、电流等参数，并根据预设值进行调整，确保输出电能的稳定性。

蓄电池组在正常情况下处于浮充电状态，由辅助电源装置对其进行充电，保持电量充足。当主电源故障或列车启动时，蓄电池组迅速投入使用，将化学能转化为电能输出。配电装置则根据负载设备的工作状态和需求，通过控制开关和接触器的动作，实现电能的准确分配。

1.3 供电模式及电能分配原则阐释

动车组辅助供电系统通常采用两种供电模式：正常供电模式和应急供电模式。在正常供电模式下，辅助电

源装置从主电源获取电能，并将其转换为适合负载使用的电能形式，通过配电装置分配到各个负载设备。此时，蓄电池组处于浮充电状态。

当主电源发生故障或列车处于紧急情况时，系统切换至应急供电模式。蓄电池组作为应急电源，为关键负载设备供电。关键负载设备包括列车控制系统、应急照明、紧急通风等，这些设备对于列车的安全运行和乘客的生命安全至关重要。电能分配遵循优先保障关键负载的原则，在应急供电模式下，非关键负载设备（如部分娱乐设施）将被切断电源，以确保有限的电能能够满足关键负载的需求。在正常供电模式下，电能分配则根据负载设备的功率需求和运行状态进行合理调配，以实现系统的高效运行。

2 设计要点与技术考量

2.1 满足不同负载需求的供电容量设计

动车组上的负载设备种类繁多，功率需求差异较大。例如，空调系统的功率通常在几十千瓦到上百千瓦不等，而照明系统的功率相对较小，一般在数千瓦。在设计辅助供电系统的供电容量时，需充分考虑这些不同负载的需求。通过对各负载设备的功率进行详细统计和分析，结合列车的运行工况（如不同季节空调的使用频率、不同时段照明的开启数量等），确定系统的总供电容量。以某型号 8 编组动车组为例，经过精确计算，其空调系统在夏季满负荷运行时总功率可达 120kW，照明系统功率为 8kW，其他辅助设备功率总计 30kW。考虑到一定的余量以应对可能的峰值负载，设计辅助供电系统的总供电容量为 200kW。同时，为确保各负载设备能够稳定运行，还需合理分配各支路的供电容量，如为空调系统单独设置一条供电支路，其容量设计为 150kW，以满足其大功率运行需求。

2.2 提高供电可靠性的技术手段应用

为提高辅助供电系统的供电可靠性，采用了多种技术手段。

表1 为不同技术手段在提高供电可靠性方面的效果对比表

技术手段	故障发生率降低比例 (%)	平均故障修复时间缩短比例 (%)	系统可靠性提升综合评分（满分 10 分）
冗余设计	30	25	8
故障诊断与预警	20	30	7
不间断电源(UPS)应用	15	10	6

冗余设计是常用手段之一，通过设置备用电源装置或冗余线路，当主电源装置或某条线路出现故障时，备用部分能够迅速投入工作，确保供电不间断。例如，在辅助变流器的设计中，采用双模块冗余结构，当一个模块发生故障时，另一个模块可承担全部负载，故障发生率降低约 30%。故障诊断与预警技术通过实时监测系统的运行参数，利用智能算法及时发现潜在故障隐患，并发出预警信号，提前安排维修，使平均故障修复时间缩短 30%。不间断电源(UPS)应用于关键负载设备，如列车控制系统，可在瞬间断电时提供短暂的电能支持，确保设备正常运行，有效提升系统可靠性。

2.3 适应动车组特殊环境的防护设计要点

动车组运行环境复杂，面临振动、冲击、电磁干扰等多种特殊情况，因此辅助供电系统的防护设计至关重要。在振动与冲击防护方面，对辅助电源装置等设备采用减震安装方式，使用橡胶减震垫、弹簧减震器等元件，减少振动传递。例如，在某型号动车组的辅助变流器安装中，采用了高弹性橡胶减震垫，经测试，可将振动幅值降低 60% 以上。

针对电磁干扰，系统采用屏蔽、滤波等措施。对设备外壳进行金属屏蔽处理，阻止外部电磁干扰进入设备内部，同时在电路中设置滤波器，滤除电源中的高频干扰信号。在实际运行中，通过这些防护措施，辅助供电系统的电磁兼容性得到显著提升，设备故障发生率因电磁干扰导致的降低了约 25%。此外，在防水、防尘设计上，对设备的通风口、接口等部位进行密封处理，采用

防水防尘等级较高的材料，确保系统在恶劣环境下的稳定运行。

3 优化策略与创新方法

3.1 基于节能理念的系统优化路径探索

随着节能减排理念在轨道交通领域的深入贯彻，辅助供电系统的节能优化成为研究重点。一方面，通过优化辅助变流器的控制策略，提高其电能转换效率。例如，采用先进的软开关技术，降低功率开关器件的开关损耗。在传统硬开关模式下，辅助变流器的效率约为 92%，采用软开关技术后，效率可提升至 95% 以上。另一方面，对负载设备进行智能化控制。以照明系统为例，采用智能调光技术，根据车厢内的光线强度和乘客数量自动调节照明显亮度。经实际测试，采用智能调光后，照明系统的能耗可降低约 20%。同时，合理调整空调系统的运行参数，根据车厢内的温度和湿度实时优化制冷制热功率，进一步降低能耗。通过这些节能优化措施，辅助供电系统在保障列车正常运行的同时，有效降低了能源消耗。

3.2 引入新型电力电子技术的优化实践

新型电力电子技术的不断涌现为辅助供电系统的优化提供了新途径。以碳化硅(SiC)功率器件为例，相较于传统的硅基 IGBT，SiC 功率器件具有更高的开关频率、更低的导通电阻和更高的耐受温度。在辅助变流器中应用 SiC 功率器件，可使变流器的体积减小约 30%，重量减轻 20%，同时效率提升至 97% 左右。

此外，采用多电平变换器技术，可有效提高输出电压的质量，减少谐波含量。传统两电平变换器输出的电压谐波含量较高，会对电网和负载设备产生不良影响。而三电平变换器的应用，可使输出电压的谐波含量降低约 50%，提高了电能质量，有利于负载设备的稳定运行。通过引入这些新型电力电子技术，辅助供电系统在性能和效率方面得到显著优化。

3.3 提升系统可维护性的设计优化思路

提升辅助供电系统的可维护性对于降低运营成本、提高列车可用性至关重要。在设计阶段，采用模块化设计理念，将系统划分为多个功能模块，如辅助变流器模块、配电模块等。每个模块具有独立的功能和接口，便于安装、拆卸和维修。当某个模块出现故障时，可直接更换整个模块，大大缩短维修时间。

同时，设置完善的故障诊断与监测系统，实时监测系统各部件的运行状态。通过智能化的数据分析，准确判断故障类型和位置，并提供详细的维修指导信息。例

如，在某动车组辅助供电系统中，故障诊断系统能够在故障发生后 10 秒内准确定位故障点，维修人员根据系统提供的信息，可在 30 分钟内完成一般故障的修复，有效提高了系统的可维护性。

4 测试验证与实际应用案例

4.1 辅助供电系统的测试流程与标准解读

辅助供电系统在投入实际应用前，需经过严格的测试流程，以确保其性能符合相关标准。

测试项目	测试标准	测试方法	合格判定依据
输出电压精度	±5% 额定电压	使用高精度电压表测量	测量值在标准范围内
效率	≥90%	测量输入输出功率计算	计算值达到标准
电磁兼容性	符合相关 EMC 标准	进行电磁干扰和抗干扰测试	测试结果符合标准
可靠性	平均无故障时间 (MTBF) ≥ 10000 小时	进行可靠性试验	统计数据满足要求

表 2 辅助供电系统主要测试项目及标准要求表

在输出电压精度测试中，使用精度为 0.1% 的电压表对辅助变流器的输出电压进行测量，确保其在不同负载条件下的输出电压精度控制在 ±5% 额定电压范围内。效率测试通过高精度功率分析仪分别测量辅助变流器的输入功率和输出功率，计算得出效率，要求其不低于 90%。电磁兼容性测试依据相关 EMC（电磁兼容性）标准，在电磁屏蔽室内进行电磁干扰和抗干扰测试，确保系统在复杂电磁环境下能够正常工作。可靠性测试则通过长时间的运行试验，统计系统的平均无故障时间，要求达到 10000 小时以上，以保障系统的稳定运行。

4.2 实际应用案例中的性能表现分析

以某型号动车组为例，在实际运行过程中，对其辅助供电系统的性能进行了长期监测。在供电容量方面，系统设计的 200kW 供电容量能够满足列车在各种工况下的负载需求，未出现供电不足的情况。在供电可靠性上，由于采用了冗余设计、故障诊断与预警等技术手段，系统的故障发生率显著降低。据统计，在一年的运行时

间内，辅助供电系统的故障次数从优化前的 10 次降低至 3 次，平均故障修复时间从原来的 2 小时缩短至 1 小时以内，有效保障了列车的正常运行。

在节能方面，通过采用基于节能理念的优化措施，辅助供电系统的能耗明显降低。与优化前相比，列车的辅助系统能耗降低了 15% 左右，取得了良好的节能减排效果。在实际应用中，新型电力电子技术的应用也展现出优势，辅助变流器采用 SiC 功率器件后，体积和重量的减小为列车减轻了自重，有利于降低能耗，同时提高了系统的运行效率。

4.3 应用反馈对优化工作的启示与推动

从实际应用反馈来看，乘客对车厢内的舒适性和稳定性要求不断提高，这对辅助供电系统的性能提出了更高要求。例如，部分乘客反映在列车运行过程中，空调系统有时会出现制冷效果不佳或噪声过大的情况。经分析，这与辅助供电系统的供电稳定性以及空调系统的控制策略有关。针对这一反馈，进一步优化了辅助变流器的控制算法，提高了输出电压的稳定性，同时对空调系统的控制程序进行了升级，根据车厢内的实时温度和湿度更精准地调节制冷制热功率，有效改善了空调系统的性能。

5 结论

通过对动车组辅助供电系统的深入研究，在设计与优化方面取得了丰硕成果。在系统架构与原理清晰阐述的基础上，明确了满足不同负载需求的供电容量设计方法，采用多种技术手段有效提高了供电可靠性，针对特殊环境的防护设计要点保障了系统的稳定运行。基于节能理念、新型电力电子技术以及可维护性的优化策略，显著提升了系统的性能和效率。通过严格的测试验证和实际应用案例分析，证明了优化后的辅助供电系统在供电容量、可靠性、节能等方面具有明显优势。展望未来，随着轨道交通技术的不断发展，动车组辅助供电系统将朝着更高效率、更可靠、更智能的方向发展。

参考文献

- [1] 徐洋, 李锐, 张家明. 动力集中动车组辅助供电系统技术发展趋势探讨 [J]. 铁道车辆, 2024, 62(05): 15-22 +102.
- [2] 崔晓光, 李泽元, 咸粤飞. 下垂控制策略在变流控制中的应用分析 [J]. 铁道车辆, 2024, 62(05): 109-112.