

# 动车组制动系统电气控制策略与机械结构设计

段文荣<sup>1</sup> 殷琳琳<sup>2</sup>

1. 青岛申晟轨道装备有限公司 山东青岛 266000

2. 欧特美交通科技股份有限公司 山东青岛 266000

**摘要:** 动车组制动系统的电气控制策略与机械结构设计是保障列车安全、高效运行的关键。在电气控制方面,常用制动采用分层协同控制,实现电空制动高效配合;紧急制动通过冗余触发与快速响应机制,确保危急时刻快速停车;智能防滑采用自适应控制,提升复杂工况下制动稳定性。机械结构设计上,制动盘优化结构与材料提升散热和力学性能,闸片摩擦副精细化设计保障摩擦性能,基础制动装置集成化设计实现轻量化与便捷维护。二者协同作用,显著提升动车组制动系统的可靠性、安全性与经济性,为高速铁路发展提供有力支撑。

**关键词:** 动车组; 制动系统; 电气控制策略; 机械结构设计

## 引言

随着高速铁路的迅猛发展,动车组运行速度与运输效率不断提升,对制动系统性能提出更高要求。制动系统作为保障列车安全运行的核心,其电气控制策略与机械结构设计直接影响制动力分配、响应速度及部件可靠性。深入研究二者优化路径,不仅能提升制动系统整体效能,还对推动我国高速铁路技术创新、保障行车安全具有重要意义。

## 一、动车组制动系统电气控制的策略

### (一) 常用制动分层协同控制策略

常用制动采用“电空联合、分层控制”策略,其核心目标是实现制动力的高效分配与精准调节,确保动车组在各种运行工况下既能安全制动,又能最大限度回收能量。制动控制单元(BCU)作为策略执行的“大脑”,内置多组高精度传感器和复杂的算法程序,持续采集列车运行速度、载重、轮轨黏着系数等实时参数。其中,列车运行速度通过安装在车轴上的速度传感器获取,载重信息则由车体与转向架间的压力传感器测量得出,而轮轨黏着系数会根据车轮转速变化率、制动力反馈等数据,利用自适应算法进行动态估算。

在制动过程启动时,BCU依据预设的控制逻辑,优先启用再生制动。再生制动通过牵引电机的可逆运行特性,将列车的动能转化为电能,并通过变流装置反馈至电网,这一过程不仅实现了节能目标,还减少了制动系统的机械磨损。然而,再生制动的制动力输出受列车速

度、电网电压等多种因素限制,当检测到电制动力无法满足当前制动需求时(如列车处于低速运行阶段或制动减速度要求较高时),空气制动系统便会自动介入补充。电空制动力的比例分配遵循“速度-载重动态分配模型”,该模型基于大量的仿真测试和实际运行数据构建而成。在模型中,速度和载重作为关键变量,通过非线性函数关系与制动力分配比例相关联。例如,在低速运行阶段( $< 80\text{km/h}$ ),由于再生制动效率显著降低,模型会自动提高空气制动的占比,以确保足够的制动力输出;而在高速运行阶段( $> 200\text{km/h}$ ),则优先发挥电制动能耗低、响应快的优势,空气制动仅作为辅助补充,维持制动系统的稳定性和可靠性。

### (二) 紧急制动冗余触发与快速响应策略

紧急制动系统采用“多重冗余触发+毫秒级响应”机制,通过构建多层防护体系与高速响应链路,全方位保障行车安全。在冗余触发机制层面,系统构建了物理层、信号层、逻辑层三重冗余架构:物理层部署独立的司机紧急制动按钮、ATP紧急制动触发装置、车辆分离检测开关等硬件设备;信号层采用双路差分信号传输,确保触发信号在复杂电磁环境下稳定传输;逻辑层设置主备控制单元,当主控制器故障时,备用单元自动无缝接管控制任务<sup>[1]</sup>。

其触发条件涵盖12类紧急场景,每个场景均设置了严格的触发阈值与判定逻辑。以ATP监测障碍物为例,系统通过雷达、激光传感器与轨道电路信息融合,实时构建前方3公里的动态环境模型,当检测到侵入限界物

体时,依据物体尺寸、速度、距离等参数,通过风险评估算法计算碰撞概率,若超过预设阈值(如碰撞概率>80%),立即触发紧急制动。针对车辆分离场景,采用加速度突变检测、气压骤降监测、车钩力传感器三重验证机制,确保触发信号的准确性,避免误触发。当触发信号产生,电气控制单元立即执行“三步快速响应”流程:首先,在50毫秒内切断牵引变流器的脉冲信号,停止动力输出;其次,通过硬线传输(响应延迟<10毫秒)与网络通信(基于TTE网络,延迟<30毫秒)双冗余通道,向全车32个制动控制装置同步发送最大制动力指令;最后,启动制动压力快速建压程序,利用预增压技术与多级电磁阀联动,使制动缸压力在300毫秒内达到1000kPa的最大工作压力。

### (三) 智能防滑自适应控制策略

防滑控制采用“多传感器融合+动态阈值调节”算法,构建起高精度、自适应的车轮滑行监测与调控体系。系统集成的轮速传感器采用磁电式或光电式编码器,以±0.1%的测量精度实时捕捉车轮转速;加速度传感器基于MEMS技术,可感知0.01g级别的微小加速度变化;压力传感器则部署于制动缸与闸片之间,精确测量制动力施加情况。三类传感器数据通过高速CAN总线传输至制动控制单元(BCU),利用卡尔曼滤波算法进行融合处理。该算法基于车轮运动状态方程与传感器观测方程,通过预测-更新迭代过程,有效滤除噪声干扰,实现对车轮真实运行状态的精准解算,为滑行趋势识别提供可靠数据支撑<sup>[2]</sup>。

动态阈值调节机制是该策略的核心创新点。系统根据轮轨黏着系数实时变化,动态调整滑行判断阈值。黏着系数通过轮速变化率、制动力反馈等参数,结合自适应神经网络模型进行估算。当估算的黏着系数处于高黏着区间(如干燥轨道),系统设定较高的速度差阈值,避免制动力调节过于频繁;而在低黏着区间(如冰雪、湿滑路面),阈值自动降低,确保系统对潜在滑行趋势快速响应。一旦检测到车轮转速与列车速度差超过动态阈值,BCU立即启动“压力-速度双闭环控制”。速度环以列车运行速度为参考,压力环以目标制动力为基准,两个控制环相互嵌套,通过比例-积分-微分(PID)控制器,以每秒20次的高频次对制动缸压力进行动态修正。在制动压力调节过程中,系统还采用模糊控制算法优化PID参数,根据速度差变化率、压力调节幅度等变量,动态调整控制参数,提升控制响应速度与稳定性。

## 二、动车组制动系统机械结构设计

### (一) 制动盘结构与性能优化设计

制动盘作为动车组制动系统的核心部件,其结构与性能直接影响制动效果,关乎列车运行的安全性与可靠性。在结构设计领域,轮盘式和轴盘式是当前的两大主流类型,二者在安装位置、散热特性及适用场景上存在显著差异。轮盘式制动盘安装于车轮辐板处,这种布局使制动盘能够充分利用车轮旋转产生的气流,形成高效的自然通风散热条件。以CRH系列动车组为例,其轮盘式制动盘采用双侧对称布置,表面设置螺旋状通风槽与径向散热筋,配合车轮的高速转动,可将制动过程中产生的热量迅速散发到周围环境中,有效应对高速制动时高达600℃-800℃的瞬时高温,确保制动盘在频繁制动工况下仍能保持稳定的力学性能。轴盘式制动盘则安装在车轴上,凭借其紧凑的结构设计,能够有效节省车辆下部空间,特别适用于转向架空间有限的拖车或特殊用途车辆<sup>[3]</sup>。轴盘式制动盘通常采用空心结构设计,在减轻自重的同时,内部设置蜂窝状散热通道,通过强制通风方式提升散热效率,满足车辆制动需求。

在材料选择方面,制动盘的材料特性直接决定其使用寿命与制动性能。灰铸铁曾因成本低廉、铸造工艺成熟,在早期动车组中被广泛应用。然而,随着列车运行速度的不断提升,灰铸铁在高温下易出现热裂纹、耐磨性差等问题,逐渐难以满足现代高速列车的制动要求。如今,球墨铸铁、合金钢以及碳-碳复合材料已成为制动盘材料的主流选择。球墨铸铁通过特殊的热处理工艺,使石墨球化,显著提高了材料的强度和韧性,相比灰铸铁,其抗热疲劳性能提升约30%,被广泛应用于中低速动车组。合金钢制动盘则凭借高强度、高硬度以及良好的耐热性能,在城际列车和部分高速动车组中发挥重要作用。

### (二) 闸片摩擦副精细化设计

闸片与制动盘构成的摩擦副是实现制动功能的直接载体,其设计需兼顾摩擦性能、磨损特性与舒适性,这要求在材料研发、结构与参数匹配上进行精细化把控。闸片结构通常由摩擦层和背板组成,其中摩擦层作为直接与制动盘接触产生摩擦力的部分,其材料性能决定了闸片的核心表现<sup>[4]</sup>。

有机材料闸片主要由酚醛树脂、橡胶、纤维等有机成分构成,这类闸片凭借较低的硬度和良好的柔韧性,在制动过程中产生的噪音极低,对制动盘表面磨损也相对较小,因此广泛应用于城市轨道交通等中低速列车。

然而，其耐热性能是明显短板，当制动温度超过250℃时，有机材料中的树脂成分会发生分解碳化，导致摩擦系数大幅衰减，制动效能显著下降。以某城市地铁列车为例，在高峰时段频繁制动工况下，有机闸片的摩擦系数在连续10次制动后，从初始的0.35降至0.2左右，严重影响制动稳定性。半金属材料闸片则结合了金属与有机成分，通过添加钢纤维、铜粉等金属增强材料，提升了闸片的强度和导热性能。这种材料在150–400℃的温度区间内，能够保持相对稳定的摩擦系数，综合性能较好，在城轨列车和部分中速动车组中得到广泛应用。但由于金属成分的存在，半金属闸片在制动时容易产生较高的噪音，并且对制动盘的磨损程度也高于有机闸片。研究数据显示，使用半金属闸片的列车，制动盘的年均磨损量约为0.8–1.2mm，较有机闸片高出30%–50%。粉末冶金闸片凭借高硬度、耐高温、摩擦系数稳定的特性，成为高速动车组的首选材料。它通过将铜、铁、钼等金属粉末与石墨、陶瓷等润滑耐磨材料，在高温高压下烧结成型，形成具有复杂孔隙结构的摩擦体。

### （三）基础制动装置集成化设计

基础制动装置作为将制动力传递到车轮的关键机械结构，其设计需满足轻量化、高可靠性与维护便捷性的严苛要求，以适应现代动车组高速、重载的运行需求。现代动车组基础制动装置多采用单元式制动缸结构，该结构通过高度集成化设计，将制动缸、闸片间隙自动调整器、杠杆传动机构等核心部件整合为一个紧凑的功能单元。这种集成化设计有效减少了零部件数量，相比传统分散式结构，零部件数量可降低25%–30%，不仅简化了装配流程，还显著提高了结构紧凑性，优化了车辆下部空间布局。集成化设计减少了部件间的连接接口，降低了因连接件松动、磨损导致的故障风险，提升了整个制动装置的可靠性<sup>[5]</sup>。

在轻量化设计方面，工程师们积极探索新型材料与创新结构。制动缸体和杠杆部件采用高强度铝合金、钛合金等轻质材料替代传统钢材。以某型动车组为例，其制动缸体采用7075高强度铝合金，通过精密铸造工艺一体成型，相比钢制缸体，重量减轻了35%；杠杆部件则选用钛合金材料，运用锻造–机械加工复合工艺制造，在保证高强度的前提下，减重幅度达到40%。降低车辆簧下质量带来的效益显著，一方面，减少了车轮与轨道

之间的动作用力，降低了轨道的疲劳损伤，延长了轨道使用寿命；另一方面，提升了车辆的运行平稳性，使乘客的乘坐舒适性得到有效改善。此外，轻量化设计还有助于降低列车运行能耗，实现节能减排的目标。为确保基础制动装置的高可靠性，在密封与材料选择上进行了精心设计。制动缸密封件采用氟橡胶等高性能材料，这类材料具有优异的耐高低温性能（工作温度范围可达–50℃–200℃）、耐化学腐蚀性和良好的弹性。即使在高温、高压以及潮湿、沙尘等恶劣环境下，氟橡胶密封件仍能保持良好的密封性能，有效防止制动缸内部气体泄漏，确保制动压力稳定。

### 结语

动车组制动系统的电气控制策略与机械结构设计相辅相成，共同构筑起列车安全运行的坚实防线。电气控制策略通过分层协同、冗余响应与智能调节，实现制动力的精准分配与高效利用；机械结构设计则从部件优化、材料革新与集成创新出发，保障制动性能的稳定可靠。二者的深度融合显著提升了制动系统的安全性、可靠性与经济性。未来，随着新材料、新技术的不断涌现，进一步探索电气与机械的协同优化路径，将为动车组制动系统的持续发展注入新动能。

### 参考文献

- [1] 彭轲, 阳靖, 蔡振东, 齐济玮, 陈翔. 制动控制系统在城际线路运用中的优化研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2024, 47(06): 118–122.
- [2] 李海泉, 侯娜娜, 刘德华, 翟朝凯, 伍妍妮. CRH380B型动车组制动静态调试试验原理及故障分析[J]. 时代汽车, 2024, (21): 163–165.
- [3] 李中浩, ZHANG Liman. 动车组制动系统具有换代特征的技术进步[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(08): 3+341.
- [4] 王鹏, 章阳, 王涤非, 程宏明. 动车组制动系统PHM人机界面设计方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2024, 44(03): 56–62.
- [5] 赛华松, 杨帆, 陈旭, 胡森, 路金昌. 动车组制动系统紧急制动设置方式的研究[J]. 铁道车辆, 2024, 62(03): 54–56.