

Collaborative Braking Control Performance Study of Self-Propelled Equipment under Complex Gradient Conditions

Junpeng Wang¹ He Yang²

1. Baoji CRRC Times Engineering Machinery Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721003, China

2. Institute of Standards and Metrology, China Academy of Railway Sciences, Beijing, 100081, China

Abstract

In recent years, a large number of long tunnels and steep gradients have been constructed in China's high-speed railway projects to overcome complex terrain conditions. However, the adaptability issues of self-propelled maintenance equipment operating on long gradients have become increasingly prominent. For example, brake shoes tend to overheat and wear severely during downhill operation, resulting in limited continuous descent duration. Frequent stops for brake cooling are impractical, which compromises the efficiency and safety of maintenance operations during scheduled windows. This paper provides a comprehensive analysis of the performance of three main braking methods—hydraulic, pneumatic, and resistor braking—under long-gradient and multi-unit operating conditions. Based on experimental data from self-propelled equipment, the study compares key indicators such as braking stability, response time, energy dissipation, and wear characteristics. It also proposes optimized braking system configurations adapted to different gradient levels and formation types.

Keywords

Long gradient self-propelled equipment resistor braking hydraulic braking; air braking

面向复杂坡道工况的自轮运转设备制动系统协同控制性能研究

王军鹏¹ 杨贺²

1. 宝鸡中车时代工程机械有限公司, 中国·陕西 宝鸡 721003

2. 中国铁道科学研究院标准计量研究所, 中国·北京 100081

摘要

近年来,我国高速铁路修建了大量长大隧道来克服复杂的地形地势条件,自轮运转设备在长大坡道运用的适应性问题逐渐突显,如下坡闸瓦温度高、磨耗严重,可持续下坡时间短,频繁停车凉闸无法满足综合维修天窗作业效率、安全运用的要求。本文综合分析了液力、空气、电阻三种主要制动方式在长坡道、多编组工况下的性能表现,结合自轮运转设备试验数据,从制动稳定性、响应时间、能量消散、磨耗特性等指标进行系统对比,并提出适应不同坡道等级和编组方式的制动系统匹配优化建议。

关键词

长大坡道;自轮运转设备;电阻制动;液力制动;空气制动

1 引言

随着我国高速铁路线路向山区、丘陵等复杂地形不断延伸,长大坡道的线路愈发常见,自轮运转设备在长大坡道区段运用的适应性问题逐渐突显。尤其是在持续下坡过程中,传统制动方式存在控速精度差、磨耗大、热衰退严重等问题,严重制约作业效率与运行安全。针对当前研究空白,本文聚焦长大坡道条件下的制动系统性能与协同控制机制,开展系统性对比分析与适应性优化研究。

【作者简介】王军鹏(1989-),男,中国陕西宝鸡人,本科,工程师,从事铁路机车车辆研究。

2 研究的背景和意义

自轮运转设备在长大坡道运行面临的主要问题有一、行车组织困难,长大坡道线路条件下,列车制动距离变大,闭塞分区长度增加,列车速度和追踪间隔时间难以同时满足;二、既有自轮运转设备在下坡时间瓦温度高、磨耗严重,可持续下坡时间短;三、频繁停车凉闸^[1],无法高效满足综合维修天窗作业率、对安全运用也提出了新要求。

国内目前缺乏针对自轮运转设备不同制动系统,在长大坡道运行性能的系统对比研究,尤其是在多编组、重联工况下的实测数据基础上的定量分析。本文从实际运行需求出发,开展多类型制动方式的试验对比分析。

3 国内外研究现状回顾

国外采用 25‰及以上长大坡道的高速铁路并不多见,受列车制动性能的限制,日本新干线铁路的坡度大多采用 15‰的上限,在长大坡度区段列车的限制速度定为 160km/h。德国科隆至莱茵高速铁路,有一段全长约 992m、最大坡度 40‰线路,列车的制动方式为再生加盘形制动,拖车为盘形制动加涡流轨制动。

国内采用长大坡道的线路除西成高铁外,还有大西高铁、贵广高铁和兰新双线等。自轮运转设备在长大坡道运营组织、故障处置、应急救援方法尚无经验积累,也缺乏详实数据支撑和理论研究,还需不断补充和完善;

4 研究目标与内容概述

通过对比分析连续长达坡道,自轮运转设备的液力、空气、电阻等不同制动方式的性能差异,提出适用于典型坡道与编组下的优化制动组合策略。

5 制动系统分类与原理简析

5.1 液力制动系统

液力制动^[2]是一种依靠油液传递能量实现制动作用的系统,通过控制系统向工作腔注入传动油,转子高速旋转带动油液在定子叶片间形成高速涡流,油液与叶片剧烈摩擦并产生粘性阻力,转子的机械能被转化为油液的热能,从而对车辆产生制动力矩,实现车辆减速。在自轮运转设备、重型工程机械等设备中应用较多,尤其适用于低速、大扭矩、连续制动的场合。可精确调节制动力大小,实现无级制动,避免传统刹车的冲击感。

5.2 空气制动系统

空气制动是一种利用压缩空气驱动传动机构,使闸瓦压紧车轮或制动盘,产生摩擦力,实现车辆减速或停车,响应快、结构简单,广泛应用于铁路列车、自轮运转设备等。但在外界环境,对制动系统气压稳定性和制动性能会产生较大影响,在长大坡道持续制动过程中,闸瓦或制动盘温度升高,闸瓦或制动盘温过高更有可能导致材料的不可逆损伤,导致热衰退,影响制动性能。

5.3 电阻制动系统

电阻制动是一种非接触式制动方式,广泛用于自轮运转设备中,尤其适用于下坡控速、长时间连续制动的场景。电阻制动的原理是:制动时牵引逆变器的逆变功能使牵引电机转变为发电机,发电机线圈中会产生反电动势,形成制动力矩,减慢车轮转速,达到制动目的。所产生的感应电流被引入制动电阻并转化为热能并释放到空气,通过将运行中的动能转化为电能,再在制动电阻中以热能形式消耗掉,实现制动效果。

5.4 混合制动与控制逻辑

电阻+空气混合制动^[3]:在中、高速段由电阻制动主控;当速度降低至一定阈值(如 <20 km/h)或电阻温度达到设限(如 >300℃)时,自动切换空气制动;低速停车或紧急制动始终保留空气制动能力。

液力+空气混合制动:液力制动特别适用于坡道断续制动。空气制动负责低速或停车控制;各制动方式协调动作,可在运行速度、坡度、编组状态变化时自动切换或联合使用,提升制动系统适应性和安全性。

6 不同坡道工况下的制动性能分析

6.1 工况设定与编组形式

西成高铁长大坡道(25‰坡道、45km)不同编组工况下,电阻制动+空气制动性能研究:

试验编组一:1台 GCD1000 轨道车。

编组一工况下,被试车以初速 100km/h,开始采用电阻制动,探索能够保持被试车恒定下坡的最高运行速度;以 70km/h~80km/h 速度运行时,采用空气制动进行停车制动试验,记录相关数据;

试验编组二:1台 GCD1000 轨道车+2台平板车(100t)+1台 DAS12 作业车。

编组二工况下,被试车组重联沿 25‰下坡道运行,采用纯电阻制动,初速度从 80km/h 开始,探索采用纯电阻制动时,能够保持被试车组恒定下坡的最高运行速度;被试车组以 40km/h~50km/h 运行时,使用空气制动进行停车制动试验,记录相关数据;模拟一台车电阻制动故障,仅另一台车采用纯电阻制动时,记录能够保持被试车组恒定下坡的最高运行速度。

试验编组三:1台 GCD1000 轨道车+2台机车(400t)+1台 DAS12 作业车。

编组三工况下,被试车组重联沿 25‰下坡道运行,采用纯电阻制动,初速度从 55km/h 开始,探索采用纯电阻制动时,能够保持被试车组恒定下坡的最高运行速度;被试车组以 20km/h~30km/h 运行时,使用空气制动进行停车制动试验,记录相关数据;

在宝成线长大坡道(25‰~30‰坡道、12km)工况下,液力制动+空气制动性能研究:

试验编组四:1台 JJD 作业车+1台 DAS12 作业车。

编组四工况下,被试车组连挂沿 20‰下坡道运行,本务车采用液力制动,初速度从 55km/h 开始,探索采用纯液力制动时,能够保持被试车组恒速下坡的最高运行速度,记录相关数据。

6.2 西成高铁及宝成线长大坡道试验结果及分析

1、西成高铁 25‰下坡道,试验编组一工况制动性能试验

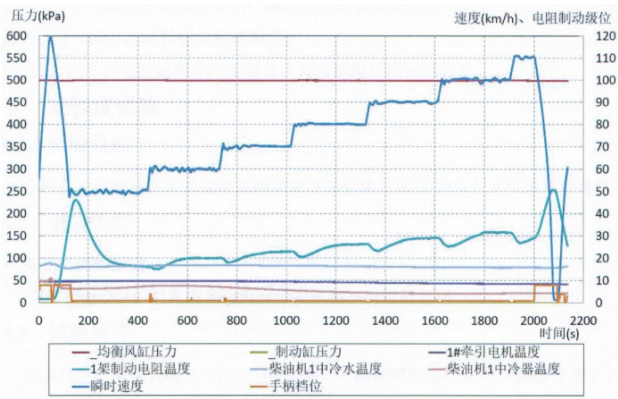


图 1.1 编组一工况下下坡道制动性能曲线

由图 1.1 试验数据可知，被试车在 60km/h、70km/h、80km/h、90km/h、100km/h 速度级时，可稳定控速，电阻带温度最高 235℃，牵引电机温度最高 49℃，以 110km/h 速度级运行 80s，速度控制平稳，试验过程中被试车制动缸压力为 0，只有电阻制动有效。

2、西成高铁 25‰下坡道，试验编组二工况制动性能试验

1) 从坡顶出发加速至 80km/h，采用电阻制动可分别稳速至 70km/h、80km/h、90km/h（距离影响未再提速），采用空气制动减速至 30km/h 时切换到轨道车单机电阻制动（模拟作业车电阻制动失效）可分别稳速至 30km/h、40km/h、50km/h。

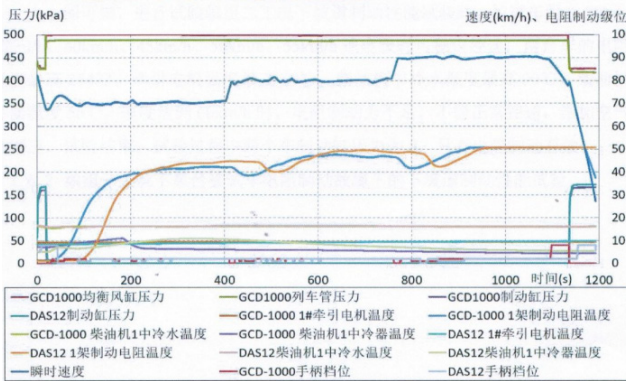


图 1.2 编组二工况下下坡道制动性能曲线

2) 由图 1.2 试验数据可知，在编组二工况下坡道制动性能试验时，被试车组在 70km/h、80km/h、90km/h 速度级

时可稳定控速，两台车的电阻制动带温度最高 254℃，牵引电机温度最高 49℃，试验过程中两个车制动缸压力为 0，只有电阻制动有效。

3、西成高铁 25‰下坡道，试验编组三工况下制动性能试验

1) 完成 25‰坡道下坡稳速电阻制动运行试验。试验车组从坡顶出发加速至 95km/h 出发，采用空气制动减速至 13km/h 后，使用电阻制动分别稳速至 20km/h、30km/h、40km/h、45km/h、50km/h、55km/h、60km/h；从 55km/h 采用电阻制动（满级）减速 4.6km/h，测得制动距离：1537m，制动时间：145s。

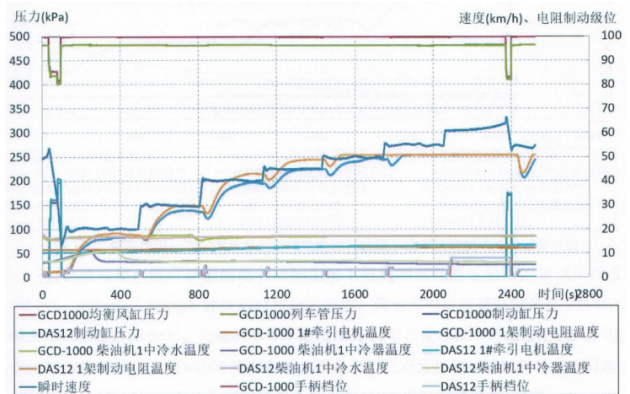


图 1.3 编组三工况下下坡道制动性能曲线

2) 由图 1.3 试验数据可知，在编组三工况下坡道制动性能试验时，被试车组在 20km/h、30km/h、40km/h、45km/h、50km/h、55km/h 速度级时可稳定控速，两台车的电阻制动带温度最高 254℃，牵引电机温度最高 69℃，速度达到 60km/h 时，电阻制动力不足，不能正常控速，施加空气制动调速，试验结束。

4、各编组工况下的停车制动性能试验建表见表 1

5、宝成线 25‰下坡道，试验编组四工况下制动性能试验

在编组四工况下坡道制动性能试验时，被试车组通过宝成线长大坡道线路区段。该线路区段线路限速 60km/h，液力制动最高可控运行速度 54km/h。试验区段内最大下坡为 30‰坡道，坡道长度 12km。试验期间液力传动箱最高油温 89.6℃≤125℃，满足要求。

表 1 各编组工况下停车制动试验数据表

制动工况	制动初速度 (km)	制动距离 (m)	制动时间 (s)	平均减速度 (m/s ²)	闸瓦温度 (°C)	踏面温度 (°C)
编组一	74.2	313.7	27.7	0.678	42	37
编组二	42	87	12.9	0.782	32	31
编组三	23.8	44	10.6	0.497	33	30

6.3 不同制动方式的性能比较

1、不同制动方式控速能力比较

控速区间：电阻制动适用于中、高速段效果最佳；液力制动适用于 10-60 km/h 的低、中速段；空气制动适用于 0-120 km/h 全速度段。

速度调节精度：电阻制动调节精度高，可连续调节且响应线性；液力制动为调节精度中等，响应略滞后，受液体惯性影响；空气制动为调节精度中等，有延迟但调节范围广。

持续控速能力：电阻制动优秀，适合长坡道控速；液力制动一般，温升限制持续性；空气制动一般，需分段施加，长时间制动易过热。

响应速度：电阻制动电控反应快，但功率调节略滞后；液力制动液压油传压需时，响应较慢；空气制动压缩空气作用快，启动迅速。

制动稳定性：电阻制动高，无机械接触，连续性好；液力制动高，平稳柔和，低速平衡；空气制动为中，受气压衰减影响，长编组略差。

2、不同制动方式的能量消散与热特性对比

能量转化路径上，电阻制动：动能→电能→热能→电阻散热；空气制动：动能→摩擦热；液力制动：动能→液压阻力→液压油温升→散热器散热。

能量消散部件分别为制动电阻、闸瓦 / 制动盘、液压回路与散热器。

热源位置依次是电阻装置、轮缘与闸瓦接触面、液压油路。

热容量方面，电阻制动较大，空气制动较小，液力制动中等。

热衰退风险，电阻制动和液力制动为中，空气制动高。

7 制动系统的磨耗性能与维护影响分析

1、不同坡道下磨耗差异对比

1) 长大坡道需连续制动且控制精度要求高，闸瓦升温可达 500℃，存在热衰退现象，平均磨耗速率为 50%-80%，热裂掉块频率显著上升，寿命周期约为传统坡道的 1/2-2/3；损伤为热裂纹→脱层→掉块非线性递进^[4]。

2) 传统坡道为间断制动且时间短，闸瓦升温一般不超 300℃，热循环较缓和；平均磨耗速率为线性增长，掉块率低；寿命周期是标准周期且运行良好；损伤以均匀磨耗为主。

2、磨耗率随行程增长趋势与分析

1) 闸瓦磨耗在初始阶段呈现线性关系，但随着累计行程的增加，磨耗速率逐步升高，表现出明显的“寿命递减”规律。

2) 从西成高铁长大坡道和宝成线长大坡道，实测数据显示，前 50% 的使用寿命内，平均磨耗率约为后期的 60~70%；使用后期（70% 寿命以上）磨耗速率明显加快，甚至在单次长坡运行中失效概率显著上升；特别是在热应力

频繁波动工况下，闸片从“磨损期”过渡为“失效期”表现尤为明显。

3) 闸瓦磨耗与单位行程制动次数成正相关，且频繁小幅制动比长时间持续制动磨耗更剧烈；高频间歇制动引起的“热-冷-热”循环更容易诱发材料疲劳裂纹；在相同总动能消耗情况下，分散式制动的平均磨耗量高出 15~25%，适用于调车 / 调速频繁作业车的磨耗管理策略调整依据。

3、制动系统的维保策略差异

1) 闸瓦更换周期：空气制动系统中闸瓦属于高频易损件，磨耗严重时须按日或运行里程更换，受制动频率与环境温度影响较大；部分高温区段建议每运行一次即检查。

2) 液压系统密封件寿命：液力制动系统关键在于密封可靠性与液压油洁净度，通常在正常温控下，密封圈更换周期为 6 ~ 12 个月，但若长期处于高温 / 高压下，建议缩短至季度级检修，防止微泄漏与失压。

3) 电阻制动散热模块维护：电阻制动虽无磨耗件，但其散热系统（如电阻柜散热片）易受粉尘、油污污染降低散热效率，导致局部过热。建议每季度清洁检查，运行温度异常时提前检修。

8 结语

本文以长大坡道工况为背景，围绕自轮运转设备制动系统的关键性能指标，系统分析了液力制动、空气制动、电阻制动及其混合策略的运行适应性^[5]。通过实车试验数据对比、磨耗规律提取、热特性分析及综合维保建议，明确了各制动方式在不同速度区间与编组形态下的优势与局限。

研究表明：电阻制动在中高速段具备最佳控速能力，是长坡运行的主力制动方式；液力制动适用于中低速区间，提供稳定衰减力；空气制动在低速停车及应急场景中不可替代，但热损耗大、磨耗快。多制动系统协同控制策略可有效提升整车安全性与使用寿命。

未来应进一步构建具备自适应调节与寿命预测能力的复合制动控制系统，并结合高铁施工综合作业模式，提出作业车和轨道车重联作业和应急救援模式，为自轮运转设备在复杂线路条件下的安全高效运行提供更强支撑。

参考文献

- [1] 杨云,朱红军等.适用于长大坡道的大功率轨道作业车研制及运用.铁道技术监督, 2024,52(8):55-59.
- [2] 王文斌,黄顺华等.一种轨道作业车长大坡道持续制动能力的提升研究.铁道机车与动车,2023.
- [3] 李毅,杨弘.在长大坡道上运行的地铁客车制动系统方案制定与分析.中国铁道科学,2002.
- [4] 李博.适用长大坡道的电传动轨道车制动系统研究[D].兰州:兰州交通大学, 2018:2-6.
- [5] 国家铁路局.铁路自轮运转设备制动系统技术规范(试行)[S].北京:中国铁道出版社,2021.