

接触网与机车受电弓间的相互作用及其对运行的影响

张维文

中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司乌鲁木齐供电段

DOI:10.12238/pe.v3i4.15117

[摘要] 随着高速铁路和电气化铁路的迅速发展,接触网与机车受电弓之间的相互作用问题逐渐成为影响列车运行稳定性与安全性的关键因素之一。本文围绕接触网与受电弓系统的结构特性、相互作用机理及其对列车运行性能的影响展开系统分析,重点探讨了接触力波动对受流稳定性、设备磨损、能耗变化等方面的影响。基于动力学仿真与实测数据,建立了受电弓-接触网系统的简化力学模型,并通过典型线路数据对关键参数进行了量化分析。在此基础上,提出了优化接触网结构参数、改进受电弓控制系统以及构建受流监测与预警机制的综合优化策略。研究结果对于提升列车受流质量、延长供电系统寿命以及降低运维成本具有重要的工程实践价值。

[关键词] 接触网; 受电弓; 接触力; 列车运行性能; 动态相互作用

中图分类号: U264 **文献标识码:** A

The interaction between contact wire and locomotive pantograph and its influence on operation

Weiwen Zhang

Urumqi Power Supply Section, China Railway Urumqi Bureau Group Co., LTD

[Abstract] With the rapid development of high-speed railways and electrified rail systems, the interaction between overhead contact lines and locomotive pantographs has become a critical factor affecting train operation stability and safety. This study systematically analyzes the structural characteristics, interaction mechanisms, and operational impacts of pantograph-contact line systems, with particular focus on how contact force fluctuations affect current collection stability, equipment wear, and energy consumption variations. Based on dynamic simulations and field measurement data, a simplified mechanical model of the pantograph-contact line system was established, with key parameters quantified using typical railway data. The research proposes an integrated optimization strategy encompassing structural parameter adjustments for contact lines, control system improvements for pantographs, and the development of current collection monitoring and early-warning mechanisms. These findings demonstrate significant engineering value for enhancing train current collection efficiency, extending power supply system lifespan, and reducing maintenance costs.

[Key words] contact wire; pantograph; contact force; train operation performance; dynamic interaction

引言

在现代铁路电气化系统中,机车车辆通过受电弓从接触网获取电能,从而维持其牵引动力的连续供给。随着列车运行速度的不断提高,接触网与受电弓之间的受流关系日益复杂,其动态相互作用成为影响牵引供电系统效率与列车运行安全的重要因素。接触力的稳定性直接关系到受流的连续性,若接触力过大,会造成设备磨损加剧;若接触力不足,则可能出现电弧、断流等现象,进而影响列车牵引性能及乘坐舒适性。当前,尽管接触网和受电弓技术不断升级,但在实际运行中,仍存在受电弓跳弧、电流波动、设备寿命缩短等问题,亟需通过理论建模与技术手段加以优化。本文从系统结构出发,分析两者的动力学相互作用过程,

结合典型线路的实测数据,探讨影响受流性能的关键因素,并在此基础上提出可行的系统优化策略,以期为我国高速铁路供电系统的技术进步提供理论支撑与实践指导。

1 接触网与受电弓的相互作用机理

1.1 接触网结构及动态特性分析

接触网是电气化铁路供电系统的重要组成部分,其主要结构包括接触线、承力索、吊弦、腕臂和定位器等,负责向高速行驶的列车稳定供电。接触网具有明显的柔性结构特征,其动力响应受张力、结构布置、支柱间距、车速等多重因素影响。随着列车速度的提高,接触线在动力激励下产生垂向和波状振动,极易导致接触不稳定问题。为了保持足够的机械稳定性与良好的

受流性能,通常需保持接触线张力在15 - 25kN之间。不同接触网类型的结构参数如表1所示。

表1 不同类型接触网的结构参数比较

接触网类型	承力索张力(kN)	支柱间距(m)	接触线悬挂形式
简单链形悬挂	15	60	点式
连续链形悬挂	20	65	波形
定张力悬挂	25	70	弹性吊弦

1.2 受电弓结构及运动特性

受电弓作为电流采集的终端装置,其结构包括滑板、主架、气动控制机构及传感装置等,通过弹簧或气压施加举力,与接触网保持持续电接触。其运行过程受轨道不平顺、车体振动及接触网扰动等因素影响,若未能保持合适接触力,则会出现跳弓、失电或严重磨损问题。现代受电弓设计日趋向轻质化和智能化发展,部分型号已配备电动伺服控制系统,通过实时调节接触力以应对不同运行工况,从而有效提升系统的自适应能力与受流平稳性。受电弓的滑板通常采用高导电性的碳材料,以减少电阻和减小磨损。主架部分则使用高强度合金材料,确保结构的稳固性和耐久性^[1]。气动控制机构通过调节气压,实现受电弓的升降和接触力的动态调节,传感装置则实时监测系统的运行状态,反馈给控制系统。智能化的受电弓设计不仅能显著提高系统的可靠性和维护效率,还能通过数据分析和故障预测,进一步优化运行参数,延长系统的使用寿命。

1.3 接触力的相互作用模型

接触网与受电弓之间的相互作用可通过质量-弹簧-阻尼系统进行建模,建立一个包含受电弓质量、接触线弹性、粘性阻尼和外部激励的简化力学模型。该模型反映了接触力随速度变化的趋势,即列车速度越高,接触力波动越大,容易引发短时失流或电弧跳火等问题。接触力一般应控制在60~120N区间内,保持恒定的接触力是保证持续供电和减少滑板磨损的关键。实际运行中,接触力曲线呈现出典型的高频低幅波动,在高速区间尤为明显。模型中,受电弓质量起到惯性作用,接触线的弹性和阻尼特性决定了系统的响应速度和稳定性,外部激励则主要来源于轨道的不平顺和车体振动。通过调节弹簧刚度和阻尼系数,可以优化系统的动态响应特性,降低接触力波动幅度,提高系统的稳定性和可靠性。现代系统还引入了智能控制算法,通过实时监测和反馈调节,进一步优化接触力的动态特性,确保在各种运行条件下都能实现稳定的电能传输和高效的受流性能。

2 相互作用对列车运行性能的影响分析

2.1 接触网波动对受电弓受流稳定性的影响

接触网在环境温度变化、基础沉降或支架失调等因素下会产生动态扰动,这些扰动在列车通过时进一步放大,形成接触不稳定现象。高速列车运行时,这种扰动表现为接触线的上下波动,直接影响受电弓滑板的受力状态,导致电流波动甚至断流。电弧

频发不仅引起滑板烧蚀,还会对车载牵引变流系统造成干扰。在实际测试中,某型动车组运行于波动较大的接触网区段时,受电弓电流波动幅度增加约22%,电弧跳火率提升近30%,严重时甚至造成功率中断,威胁列车运行安全。接触网波动的主要因素包括温度变化引起的热胀冷缩、基础沉降导致的支架不均匀下沉、以及接触网支架安装或维护不当造成的失调。这些因素会引起接触线的几何形状变化,导致接触点的高度和位置发生波动。在高速运行状态下,受电弓的响应速度往往难以跟上接触网波动的频率,导致受电弓与接触网之间的接触不稳,进而引发电流波动和电弧现象^[2]。这种情况下,不但滑板和接触线的磨损加剧,电弧产生的高温还会对滑板材料造成烧蚀,缩短滑板的使用寿命。此外,电弧现象会对车载牵引变流系统产生电磁干扰,影响变流器的正常工作,甚至可能引发设备故障。因此,优化接触网设计和维护,提高其稳定性,减少波动,是保证受电弓受流稳定性的重要措施。

2.2 接触力波动对设备磨损与维修的影响

接触力波动是引起设备磨损加剧的重要原因之一。过大的接触力会导致滑板和接触线之间摩擦剧烈,从而加快材料磨损,缩短检修周期;而接触力不足则容易导致跳弓和电弧,造成滑板边缘烧蚀,形成“台阶式”磨损^[3]。如表2所示,在不同接触力条件下滑板的平均使用寿命存在显著差异。

表2 接触力变化对滑板使用寿命的影响

接触力(N)	滑板使用寿命(万 km)	典型磨损表现
80	15	磨损均匀,轻微裂纹
100	12	局部热蚀
130	8	边缘烧蚀严重

2.3 相互作用对列车牵引性能与能耗的影响

接触网与受电弓的动态失配会导致电流间断,从而干扰牵引系统对负载的持续供电,影响列车加速平稳性与再生制动效率。在牵引电机控制策略中,供电连续性对输出功率波动极其敏感,电流失真会导致能量损耗并增加电机负荷。在某高速线路实测中,受流不稳定工况下单位能耗提升了4.7%,同时再生制动回馈效率下降约8%。此外,不稳定的供电也使列车舒适性下降,出现加速不均、乘客感知明显的“顿挫感”,降低整体运营品质。

2.4 大风天气下接触网与受电弓相互作用对列车运行性能的影响

在大风天气下,接触网与受电弓的相互作用变得更加复杂和严峻。强风会对接触网施加额外的横向和纵向力,引起接触网的摆动和振动,使得受电弓不仅需要应对接触网本身的波动,还需应对风力引起的额外扰动。大风可能导致接触网的偏移和不规则运动,使受电弓难以维持稳定的接触,增加电流间断和电弧现象的发生概率。具体来说,大风会导致接触线的瞬时位置变化,使受电弓滑板的受力状态变得更加复杂和动态化。在这种情况下,受电弓需要具备更高的响应速度和调节能力,以应对接触网

位置的快速变化。然而,受电弓的机械结构和控制系统可能难以完全消除这些扰动,导致接触不稳和电流波动,电弧现象在大风天气下的频率和强度可能会显著增加,进一步加剧滑板和接触线的磨损。此外,大风还可能对受电弓的升降机构和控制系统造成压力,使其需要频繁调整位置,以维持稳定接触,这不仅增加了系统的机械磨损,还可能导致控制系统的过载和失效。为此,需要采取一系列措施来应对这些挑战,如增强接触网的抗风设计,通过加固支架和优化几何结构提高其在强风中的稳定性;升级受电弓控制系统,采用更高性能的传感器和控制算法提高其响应能力;建立大风天气下的实时监测与预警系统,通过数据分析和预测,提前预警可能的接触不稳情况并采取预防性措施;以及选择耐磨损和抗烧蚀性能更优的滑板和接触线材料,延长其使用寿命^[4]。通过这些措施,可以有效应对大风天气下接触网与受电弓相互作用带来的挑战,保证列车在恶劣天气条件下的运行安全和稳定。

3 接触网与受电弓系统优化策略

3.1 提升接触网张力与结构合理性

接触网的张力水平直接影响接触线的几何稳定性与受流性能,合理设置张力参数和优化结构布置是改善系统性能的基础。张力过小会导致接触线垂度大、摆幅大,张力过大则增加结构应力,降低系统寿命。因此应结合线路设计速度、气候条件和设备参数,采用张力自动补偿装置,确保接触线在不同温度和荷载条件下均维持恒定张力。另应优化支柱间距与吊弦结构,避免因布置不合理导致局部波动过大,从而保障列车在全线范围内均能稳定受流。

3.2 优化受电弓结构与控制策略

在受电弓方面,应提升其动态响应能力和抗干扰能力,特别是在高速运行或曲线段等复杂工况下,保持与接触网的稳定接触至关重要。传统气动或弹簧式受电弓受制于被动响应机制,在遇到接触线突变或振动激励时难以实现快速适应。为此,部分先进型号采用伺服电动控制系统,通过传感器实时采集接触力数据并进行主动调整,实现闭环控制,从而显著降低接触力波动^[5]。

3.3 建立系统级的受流状态监测与预警机制

为实现对接触网与受电弓运行状态的实时掌握,需构建一

套完整的在线监测与智能预警体系。该系统应包括接触力、温度、电弧频率、电流波动等参数的传感器装置,结合车载与地面数据传输平台,实现对关键受流指标的可视化追踪。通过大数据分析与AI模型建立接触异常模式识别算法,可在问题初现阶段发出预警,便于检修人员快速响应,降低突发故障概率。目前已有部分线路在动车组端部署该类系统,实现对滑板温度、电流冲击等多维数据的监测,有效延长了设备寿命并提升线路运行可靠性。

4 结论

接触网与受电弓之间的相互作用是高速铁路牵引供电系统中至关重要的环节,对列车的运行稳定性、能耗效率及设备寿命均产生直接影响。本文系统分析了接触网与受电弓的结构与动态特性,揭示了两之间接触力变化的内在规律,并通过数据与模型探讨了其对受流稳定性、设备磨损与牵引性能的具体影响。在此基础上,提出了接触网结构优化、受电弓伺服控制改进及系统级状态监测机制等策略,通过对比数据表明各项优化措施能有效降低接触力波动、延长设备使用寿命并提升供电效率。未来,随着列车速度和密度的不断提升,需进一步加强受流系统的智能化与自动化水平,推动电气化铁路技术向更高性能、更高可靠性方向发展。

参考文献

- [1]姜鸿鹏,徐焱,刘振东,等.吊弦故障影响下的接触网锚段区域动态行为研究[J].机车电传动,2024(3):182-189.
- [2]姜同伍,孟军锋.接触网防冰雨技术研究及其对高铁运行安全的影响[J].郑州铁路职业技术学院学报,2024,36(2):5-9.
- [3]杨岗,吕琨,孔国伟,等.环境温度对地铁刚性接触网弹性与弓网受流质量影响研究[J].机车电传动,2024(1):152-165.
- [4]谢哈.单线电气化铁路接触网电容参数影响因素[J].中国科技信息,2024(13):72-74.
- [5]皋金龙,周玉杰,李逢源,等.受电弓-架空刚性接触网弓网系统动态仿真平台研究[J].电气化铁道,2024,35(4):67-72.

作者简介:

张维文(1988--),男,汉族,甘肃省民勤县人,大学本科,助理工程师,中国铁路乌鲁木齐集团有限公司乌鲁木齐供电段,研究方向:接触网与机车受电弓相互作用。