

电力机车 DK-1 型制动力调节阀性能优化与试验验证

王勇

国能新朔铁路有限责任公司机务分公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8681

[摘要] 在现代铁路运输体系中，电力机车扮演着极为关键的角色，其运行的安全性与效率直接关乎整个铁路运输网络的稳定与效益。制动系统作为电力机车的核心安全装置，是保障列车在各种运行条件下能够准确、及时停车的关键，而 DK-1 型制动力调节阀则是这一关键系统中的核心部件。对 DK-1 型制动力调节阀进行性能优化和试验验证具有重大的现实意义。从安全角度看，优化后的调节阀能够显著提升制动系统的可靠性，降低制动故障发生的概率，为铁路运输提供更为坚实的安全保障，保护乘客和货物的生命财产安全。从效率方面而言，精准的制动力控制可以减少列车制动与启动过程中的能量损耗，提高列车的周转效率，降低运营成本，进而提升整个铁路运输系统的经济效益和竞争力。本文结合其结构原理与故障特征，提出多维度性能优化方案，为既有机车制动系统升级改造提供技术支持。

[关键词] DK-1 型制动机；制动力调节阀；性能优化；试验验证

Performance optimization and experimental verification of DK-1 type braking force regulating valve for electric locomotive

Wang Yong

Guoneng Xinshuo Railway Co., Ltd. Locomotive Branch

[Abstract] Electric locomotives play a crucial role in the modern railway transportation system, and their operational safety and efficiency directly affect the stability and efficiency of the entire railway transportation network. The braking system, as the core safety device of electric locomotives, is the key to ensuring accurate and timely stopping of trains under various operating conditions, and the DK-1 type braking force regulating valve is the core component of this critical system. The performance optimization and experimental verification of DK-1 type braking force regulating valve have significant practical significance. From a safety perspective, the optimized regulating valve can significantly improve the reliability of the braking system, reduce the probability of braking failures, provide more solid safety guarantees for railway transportation, and protect the life and property safety of passengers and goods. In terms of efficiency, precise braking force control can reduce energy loss during train braking and starting processes, improve train turnover efficiency, reduce operating costs, and ultimately enhance the economic benefits and competitiveness of the entire railway transportation system. This article proposes a multidimensional performance optimization scheme based on its structural principles and fault characteristics, providing technical support for the upgrade and renovation of existing locomotive braking systems.

[Key words] DK-1 type brake; Braking force regulating valve; Performance optimization; Experimental verification

引言：

电力机车制动系统是保障列车运行安全的核心环节，DK-1 型电空制动机凭借“准、快、轻、静”的特点，广泛应用于 SS 系列等电力机车，其制动力调节阀通过精准控制均衡风缸及制动管压力，实现对列车制动力的阶梯式调节。然而，在长期重

载循环制动、恶劣工况腐蚀及部件老化等因素影响下，DK-1 型制动力调节阀逐渐暴露出系列问题，这些问题不仅降低制动系统可靠性，还可能引发行车安全隐患。因此，开展制动力调节阀性能优化及试验验证研究，对提升机车制动系统安全性与稳定性具有重要工程意义。

一、DK-1 型制动力调节阀核心结构与工作原理

DK-1 型制动力调节阀的核心控制逻辑以均衡风缸为中间控制参量，通过调压阀设定均衡风缸定压，再由双阀口式中继阀跟随均衡风缸压力变化，控制制动管充排风，进而实现全列车制动、缓解与保压控制。

调压阀采用 QTY-15 型结构，主要由调压弹簧、膜板、进气阀、溢流阀等组成，通过膜板两侧作用力平衡实现压力调节：供气状态下，调整弹簧推动阀杆下移开启进气阀，压力空气充入输出端及膜板下侧中央气室；当输出压力达到整定压力时，膜板受力平衡关闭进气阀；若压力超调则开启溢流阀排气泄压。双阀口式中继阀作为压力放大执行部件，通过主活塞膜板感应均衡风缸与制动管的压力差，带动顶杆开启供气或排气阀口，实现制动管快速充排风，其过充柱塞可在快速充风位提供 30~40kPa 附加作用力，提升充风效率。总风遮断阀则负责控制制动管充风风源的通断，保障制动系统气路安全。

二、DK-1 型制动力调节阀主要性能缺陷

结合现场故障数据与部件检测结果，DK-1 型制动力调节阀现存核心问题可归纳为四类。第一，定压精度不足。调压阀膜板疲劳变形、弹簧弹性衰减，导致均衡风缸定压偏差超 ±10kPa，制动管减压量控制不准，引发制动力波动。部分调压阀还存在压力缓慢上升故障，影响中立位保压性能；第二，密封性能劣化。中继阀主活塞 O 形圈、供气、排气阀密封件长期受压力冲击与介质腐蚀，易出现磨损、老化漏泄，导致制动后保压时压力下降速率超标，甚至引发自然缓解风险；第三，动态响应滞后。中继阀顶杆传动间隙、阀口节流特性设计不合理，在紧急制动及快速缓解工况下，制动管压力变化速率不足，无法满足长大列车制动同步性要求；第四，部件磨损严重。小闸定位凸轮与位置开关配合间隙过大，凸轮长期磨损位置开关接触弹片，导致电信号传递异常，影响制动逻辑控制可靠性。

三、DK-1 型制动力调节阀性能优化方案

(一) 结构改进

在结构改进方面，考虑对阀芯和阀座进行重新设计。采用高精度的加工工艺，减小阀芯与阀座之间的配合间隙，提高其密封性能，从而减少压力泄漏，提升压力调节精度。同时，优化阀芯的形状，使其在移动过程中对流体的阻力更小，提高调节阀的响应速度。例如优化溢流阀阀口结构，采用锥形密封面替代平面密封，提升泄压响应速度，避免压力超调累积。具体可利用计算机辅助设计 (CAD) 技术，对阀芯和阀座进行全新的三维建模设计。将阀芯的形状优化为抛物线型，这种形状能够使流体在通过阀口时，流速分布更加均匀，减少压力损失，提高流量调节精度。同时，采用电火花加工等高精度加工工艺，将阀芯与阀座之间的配合间隙控制在 0.01mm 以内，有效提高密封性能，减少压力泄漏。对阀座的结构也进行改进，增加导流槽，使流体在进入阀座时能够更顺畅地流动，进一步提高调节阀的响应速度。

(二) 参数优化

参数优化也是关键环节。通过对调节阀内部弹簧的弹性系数、膜片的刚度等参数进行重新计算和调整，使其能够更好地适应不同的工作压力和工况要求。对于弹簧弹性系数的优化，可以根据不同的制动需求，选择合适的弹簧材料和规格，例如选用高强度耐疲劳合金弹簧替代原有弹簧，提升弹性稳定性，同时优化弹簧预紧力调节结构，将其弹性系数调整为根据不同制动等级进行分段变化的形式。在轻制动时，采用较小的弹性系数，使阀芯能够更灵敏地响应压力变化；在重制动时，采用较大的弹性系数。确保弹簧在提供足够复位力的同时，不会对阀芯的动作产生过大的阻碍，从而提高调节阀的稳定性和响应速度。对于膜片刚度的优化，则可以根据实际运行中的压力变化范围，选择合适的膜片材料和厚度，可选用新型的高分子材料，增加膜片的厚度，提高膜片对压力变化的敏感度，使其能够更准确地传递压力信号，控制阀芯的动作。

(三) 控制策略

在控制策略调整方面，引入先进的智能控制算法。传统的 DK-1 型制动力调节阀多采用简单的比例控制算法，难以满足复杂工况下的精确控制需求。因此，可以采用模糊控制算法，将列车的运行速度、载重、轨道坡度等多个因素作为输入量，通过模糊规则库进行推理和决策，输出更精确的控制信号，实现对调节阀的精准控制。具体可将列车的运行速度分为低速、中速、高速三个等级，载重分为轻载、中载、重载三个等级，轨道坡度分为小坡度、中坡度、大坡度三个等级。根据不同的工况组合，制定相应的控制规则，实现精确的压力调节。模糊控制算法能够根据不同的工况自动调整控制策略，提高调节阀在复杂工况下的适应性和稳定性。还可以结合神经网络控制算法，利用神经网络的自学习和自适应能力，对调节阀的运行数据进行实时分析和处理，不断优化控制参数，进一步提高控制精度和响应速度。

四、试验验证方案设计

(一) 试验目的与内容

本次试验的核心目的在于全面且深入地验证针对 DK-1 型制动力调节阀所提出的优化方案的有效性与可靠性。通过实际的试验操作与数据采集分析，精准评估优化后的调节阀在各项性能指标上的提升程度，以及其在实际电力机车制动系统中应用的可行性与稳定性，为该优化方案的实际推广和应用提供坚实的实践依据。

试验内容主要涵盖两大方面。一方面是对优化后调节阀的性能进行细致测试，包括压力调节精度测试、响应时间测试和流量特性测试。另一方面是在实际制动系统中的应用测试。观察并记录在复杂工况下制动系统的整体性能表现，包括列车的制动平稳性、制动距离等关键指标。同时，监测调节阀在实际应用中的工作状态，如是否存在异常振动、噪声以及泄漏等问题，全面评估其在实际制动系统中的适应性和可靠性。

为确保试验的顺利进行和数据的准确性，需要一系列先进且精密的试验设备。压力传感器选用高精度的应变片式压力传

感器,其测量精度可达 $\pm 0.1\text{kPa}$,能够精确捕捉制动缸压力的微小变化。流量传感器采用热式气体质量流量传感器,其测量范围可覆盖试验所需的气体流量范围,能够准确测量通过调节阀的气体流量,为流量特性测试提供准确的数据。数据采集系统采用高速、多通道的数据采集卡,能够同时采集压力传感器、流量传感器以及其他相关传感器的数据。

搭建的试验装置主要包括模拟制动系统试验台、气源系统以及数据采集与控制系统。模拟制动系统试验台模拟了电力机车实际制动系统的结构和工作原理,为调节阀的实际应用测试提供了真实的环境。气源系统为试验提供稳定的高压空气源,能够模拟不同工况下总风缸的供气情况。数据采集与控制系统则负责对试验过程进行实时监控和控制。通过这些设备和装置的协同工作,能够全面、准确地对优化后的DK-1型制动力调节阀进行性能测试和应用测试。

(二) 试验步骤与方法

在试验开始前,首先进行设备的安装调试工作。将压力传感器、流量传感器等各类传感器按照设计要求准确安装在模拟制动系统试验台上的相应位置。连接好数据采集系统与各个传感器,对数据采集系统进行参数设置。对气源系统进行检查和调试。

试验工况的设置根据实际运行情况进行模拟。设置不同的输入压力,分别为 800kPa 、 900kPa 和 1000kPa ,以模拟列车在不同运行状态下总风缸的压力。针对负载特性,设置轻载(载重为额定载重的50%)、中载(载重为额定载重的80%)和重载(载重为额定载重的120%)三种情况,并结合不同的运行速度,如低速(30km/h)、中速(60km/h)和高速(100km/h),以及不同的轨道坡度,如小坡度(0-2%)、中坡度(2-5%)和大坡度(5-10%),组合成多种复杂的试验工况。

在试验过程中,按照设定的试验工况,依次进行试验。当进行压力调节精度测试时,在每种输入压力和负载工况下,多次改变调节阀的控制信号,使制动缸压力达到不同的设定值,利用压力传感器实时采集制动缸压力数据,记录每次测量的压力值与设定值的偏差。进行响应时间测试时,触发制动指令,同时启动数据采集系统,记录从指令发出到压力传感器检测到制动缸压力发生明显变化的时间间隔。在流量特性测试中,逐步改变调节阀的开度,利用流量传感器测量每个开度下的气体流量,记录流量数据并绘制流量特性曲线。

在实际制动系统应用测试中,将优化后的调节阀安装在模拟制动系统试验台上,按照不同的试验工况,模拟列车的制动过程。在制动过程中,观察列车的制动平稳性,记录制动距离,并通过传感器监测调节阀和制动系统其他部件的工作状态,如温度、振动等参数。每次试验结束后,对采集到的数据进行整理和分析,对比优化前后调节阀的性能指标,评估优化方案的效果。通过严格按照上述试验步骤和方法进行试验,能够全面、

准确地验证优化方案的有效性和可靠性。

五、试验结果与分析

综合上述试验,可以明确评估出针对DK-1型制动力调节阀所提出的优化方案具有显著的有效性,能够很好地满足电力机车制动系统的实际需求。

从压力调节精度的提升来看,优化前,由于阀芯与阀座配合不够精密以及控制算法的局限性,实际输出的制动缸压力与设定值之间偏差最大偏差可达 $\pm 10\text{kPa}$,远超出了铁路行业标准规定的 $\pm 5\text{kPa}$ 范围。而优化后,在各种试验工况下,最大压力偏差均控制在 $\pm 3\text{kPa}$ 以内,且在大多数工况下,压力偏差稳定在 $\pm 2\text{kPa}$ 左右,显著提高了制动过程中制动力的稳定性,在列车制动过程中,稳定的制动力输出有效避免了因制动力不均匀而导致的列车抖动和运行不稳定问题,极大地提高了乘客的乘坐舒适度,同时也减少了对列车部件的冲击和磨损,延长了设备的使用寿命。

响应时间上,优化前,受膜片弹性下降、管路堵塞以及控制策略滞后等因素影响,调节阀的响应时间达到了0.8秒。优化后,响应时间大幅缩短至0.3秒,远远低于行业理想的0.5秒。在紧急情况下,0.3秒的响应时间能够使列车迅速产生制动力,有效缩短制动距离,降低事故发生风险。这对于保障铁路运输的安全,保护乘客和货物的生命财产安全具有不可估量的价值。

稳定性方面,优化前,当列车运行工况发生变化,调节阀的压力调节容易出现波动,难以稳定在设定值,压力波动范围可达 $\pm 8\text{kPa}$ 。优化后,在不同载重、速度和坡度的组合工况下,压力波动范围明显减小,最大波动控制在 $\pm 3\text{kPa}$ 以内,有效提升了调节阀在复杂工况下的适应性和稳定性,为制动系统提供稳定的制动力支持。这使得电力机车能够适应更加多样化的运行环境,提高了铁路运输的效率和可靠性。

综上,优化后的DK-1型制动力调节阀在性能上实现了全面提升,能够满足电力机车制动系统在安全性、稳定性和舒适性等多方面的实际需求。未来研究可结合智能监测技术,在优化后的调节阀上增设压力、温度、振动等多参数传感器,构建故障预警模型,实现部件劣化趋势预判;同时探索电液混合控制技术,进一步提升制动力调节的精准度与响应速度,为下一代机车制动系统升级提供技术参考。

[参考文献]

- [1]丁孟达.高速列车减振器活塞预紧力对阻尼特性影响的研究[J].机床与液压,2024(07)
- [2]马世榜;高原;黄荣杰;李超.汽车减振器锥形圆环缝隙流与阀片动态开度研究[J].振动与冲击,2021(17)
- [3]梁东奇;冯浩波;刘佳薇;张帅;张旭东;杨孔华.高压减压阀气动参数设计与计算[J].流体机械,2024(06)