

# Research on Structural Optimization and Performance Improvement of 120-Type Brake Valve Based on Flow Control Characteristics

Zhongjie Li

Baotou West Vehicle Depot, Hohhot Bureau Group Co., Ltd. of China Railway, Baotou, Inner Mongolia, 014040, China

## Abstract

In recent years, with the continuous increase in train running speed and train formation weight, higher requirements have been put forward for the response accuracy and flow regulation capability of brake valves. This paper proposes a comprehensive scheme for structural optimization and performance improvement in response to the deficiencies of the 120-type brake valve in terms of flow control characteristics. By analyzing factors such as the valve body structure, throttle hole layout, flow channel transition form and feedback damping, improvement measures such as drag reduction and vortex suppression, pressure equalization and flow diversion, streamlined guidance and modular damping were designed. Combined with the actual operation requirements, application strategies were proposed from three aspects: response speed, pressure smoothness and maintenance convenience. Research shows that this scheme can significantly enhance the charging and exhaust efficiency and pressure stability of the brake valve, reduce maintenance costs, and provide a reference for the upgrading of key components in the braking system of railway vehicles.

## Keywords

120-type brake valve Flow control Structural optimization Performance improvement

## 基于流量控制特性的 120 型制动阀结构优化与性能提升研究

李忠杰

中国铁路呼和浩特局集团有限公司包头西车辆段, 中国·内蒙古 包头 014040

## 摘 要

近年来, 随着列车运行速度与编组重量的不断提升, 对制动阀的响应精度与流量调节能力提出了更高要求。本文针对 120 型制动阀在流量控制特性方面的不足, 提出了结构优化与性能提升的综合方案。通过分析阀体结构、节流孔布置、流道过渡形态及反馈阻尼等因素, 设计了减阻抑涡、均压分流、流线化导向及模块化阻尼等改进措施, 并结合实际运营需求, 从响应速度、压力平顺性和维护便利性三个方面提出应用策略。研究表明, 该方案可显著提升制动阀的充排气效率与压力稳定性, 降低维护成本, 为铁路车辆制动系统关键部件的升级提供了参考。

## 关键词

120 型制动阀; 流量控制; 结构优化; 性能提升

## 1 引言

随着铁路运输向高速化、重载化和长编组方向发展, 制动系统面临响应时间更短、压力控制更精准、稳定性更高的挑战。然而在长期运行中, 现有 120 型制动阀暴露出一些制约性能发挥的问题, 如流道设计导致的中高开度流阻偏大、局部涡流造成的压力波动、节流孔布局不合理引发的流量不均以及反馈阻尼调节范围有限等。本研究旨在结合结构设计改进与实际应用需求, 提出可落地的优化方案, 推动 120 型制动阀在技术与运营层面的双向提升。

【作者简介】李忠杰 (1969-), 男, 中国内蒙古包头人, 从事货车制动阀检修研究。

## 2 120 型制动阀结构及其流量控制特性

### 2.1 120 型制动阀结构

120 型制动阀通常采用“先导级 + 主阀级”的两级气动放大型式, 由阀体、进气口 P/ 输出口 A/ 排气口 R 三口主阀、先导阀芯与阀座、膜片或活塞式执行元件、复位 / 定值弹簧、节流孔板与阻尼腔、导向套与限位机构、消声排气通道及压力反馈微孔构成。工作时, 压缩空气 (典型供气 0.70 ~ 0.85 MPa, 经滤水减压器后进入) 先到先导腔, 手柄或电 - 气信号改变先导阀芯位置, 使先导腔压力对膜片 / 活塞产生力, 与主阀弹簧力形成平衡, 进而位移主阀芯, 按比例开启 P → A 通道或 A → R 通道, 实现充风、保持、缓解与快速排风等工况的切换。主阀阀口多采用圆锥 - 环隙结构, 低开度由环隙控制有效流通面积, 高开度由阀座直径与导向套窗

口共同限定；导向套外形经流线化以减小分离与涡核。阀体内部设置若干微小节流孔与阻尼腔，构成压力反馈与动态阻尼网络，使主阀芯在快速跃迁中避免过冲与抖振；排气侧配置消声多孔材料与扩散腔，降低高速喷射导致的压力波动及噪声。为保证工况稳定，常在主阀两端布置对称导向，配合低摩擦涂层与硬化阀座以降低迟滞；关键密封采用耐油耐低温的氟橡胶或聚醚醚酮材料，泄漏（20℃）控制在≤0.1 L/min。整体原理可概括为：以先导压力作“指令”，以主阀大流量作“功率放大”，通过反馈节流实现静、动态双闭环的气动比例控制。

## 2.2 120型制动阀流量控制特性

120型制动阀流量控制的本质由“可压缩流经收缩通道”的气动规律与“阀芯—弹簧—阻尼网络”的动力学共同决定。在稳态特性上，阀口有效面积由阀芯开度决定，质量流量满足 ISO6358 / 可压缩孔口公式：

当下游压力比  $P_2/P_1 > b$ （未 II 盖界）时：

$$\dot{m} = C_d A_{\text{eff}} P_1 \sqrt{\frac{2\gamma}{RT_1(\gamma-1)} \left[ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

当  $P_2/P_1 \leq (2/(\gamma+1))^{\gamma/(\gamma-1)} \approx 0.528$ （空气， $\gamma = 1.4$ ）进入临界流：

$$\dot{m} = C_d A_{\text{eff}} P_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT_1} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}}$$

此时流量仅随上游态变化，对下游扰动不敏感。由此形成低开度“线性区”、中开度“增益提高区”（ $C_d$ 随雷诺数与收缩形态上升）、高开度“临界平台区”（流量饱和）的分段特性；工程上常以声速导数  $C$ 、临界比  $b$  表征阀的额定通量与临界点。

120型阀的  $C$  可设计在  $2.0 \sim 3.0 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$ 、 $b$  约  $0.3 \sim 0.5$  以兼顾快速性与稳健性。动态方面，受控容积  $V$ （制动管/缸）满足：

$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} (\dot{m}_{\text{in}} - \dot{m}_{\text{out}})$$

等效为一阶惯性叠加二阶阀芯机电类振子：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = K_p(p_{\text{pilot}} - p_{\text{fb}})$$

其中阻尼  $c$  由节流孔与阻尼腔等效获得，设计目标是  $\zeta = c/2\sqrt{km} \approx 0.6 \sim 0.8$  以抑制过冲与压力振铃；反馈微孔决定“保持”工况的静态刚度，孔径过大将致稳态漂移，过小则响应迟缓。高流速下的局部马赫数升高会引发喷注不稳定与噪声，需通过出口扩散角（ $10^\circ \sim 15^\circ$ ）、圆角过渡与多孔消能抑制；当入口含水率与油雾导致雷诺应力变化时， $C_d$  与  $b$  亦会偏移，需在标定中给出温度/湿度修正。

基于上述，120型制动阀期望实现“低开度小流精控、

中开度高增益、临界区稳平台”的流量—压力曲线，并通过先导—主阀的双环节配气与阻尼设计，使充气/排气时间常数在目标容积（如  $20 \sim 60 \text{ L}$ ）下达到  $t_{63\%} \approx 0.25 \sim 0.6 \text{ s}$ ，配合迟滞 ≤ 5% 与稳态波动 ≤ ± 0.015 MPa，方可满足高速重载场景的制动响应与稳定性需求。

## 3 基于流量控制特性的 120 型制动阀结构优化策略

### 3.1 主流道与过渡几何重构

将阀体内部由“直角转折+短直段”的传统流道改为“收缩段—喉部—渐扩扩散段”的三段式气动通道：收缩段采用多圆弧复合过渡，关键拐点圆角半径由  $R6 \text{ mm}$  提高至  $R12\text{-}R16 \text{ mm}$ ，喉部有效长度取  $0.8D1.2D$  以稳定剪切层，扩散段采用轴对称扩散器，半角控制在  $8^\circ \sim 12^\circ$ ，出口前加一段  $1.5D$  等径整流段，避免尚未再附着即进入下游。导流肋由锐边改为圆头流线剖面（弦厚比 ≈ 12%），并在弯道外侧设薄壁“导流翼”引导高能核流靠壁转向。对阀腔内易形成停滞的死腔进行体积压缩与回注开孔，死腔总体积降低 ≥ 30%，同时对主通道内表面实施精加工与喷丸/微抛光，表面粗糙度由  $Ra3.2 \mu\text{m}$  降至  $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ 。上述几何与表面联动优化，可将局部马赫数峰值由  $0.92$  降至 ≤ 0.8，等效压力损失系数  $\zeta$  降低 20%~30%，为中高开度区的流量平台与压力稳定性提供基础。

### 3.2 行程—面积曲线线性化

将单中心孔节流改为“等压环腔+多孔矩阵”并联布置：在阀座上开设一圈等压环腔（环宽  $2.0\text{-}2.5 \text{ mm}$ ），向内径向钻设  $4\text{-}6$  个  $\Phi 3.6\text{-}3.9 \text{ mm}$  的等距微孔，总面积与原设计等效；环腔通过两处  $\Phi 1.2 \text{ mm}$  均压孔与上游连通，保证各孔入口压头一致。阀芯锥面角由  $45^\circ$  调整至  $38^\circ$ ，冠部增加  $R0.5\text{-}R0.8 \text{ mm}$  圆角，阀座喉口入口倒角  $C0.3$ ，构建“先小后大”的有效流通面积曲线，使  $0\text{-}40\%$  行程具近线性增益， $40\%\text{-}80\%$  行程呈等百分比上升， $>80\%$  行程逐步进入临界平台。配合总行程  $3.0 \text{ mm}$ 、起启预载  $x_0 \approx 0.2 \text{ mm}$  的微启闭设定，低开度段克服静摩擦而不致突增流量。阀座采用 CrN 或 DLC 硬质涂层（厚  $35 \mu\text{m}$ ）以降低磨损与泄漏，密封唇口采用 PEEK/氟橡胶复合圈，常温泄漏控制 ≤ 0.1 L/min@0.8 MPa。该组合在不提高上游压力的前提下提升流量均匀性与开度可控性，并将临界流进入点提前至约  $P_2/P_1 \approx 0.500.55$ ，稳住高开度流量平台。

### 3.3 导向套与排气侧流线化协同

导向套改为梭形开窗与反涡槽组合形式：把原来的矩形孔改成了长轴沿着流向的梭形窗，将开孔率控制在百分之三十到百分之三十五之间，窗缘采用全圆角过渡方式，并且在外壁加工出深度为零点七到零点九毫米、螺旋角为二十度到三十度的浅反涡槽，以此迫使周向二次流可有序地泄散出去，抑制因尾涡脱落所导致的力振耦合现象。在排气侧设置

了“文丘里—整流—扩散”三段式消能腔，扩散半角为十二度到十五度、扩散腔等效容积是一百五十到二百五十立方厘米，同时在出口处加装了厚度为三十五毫米、孔径在一微米到二百微米之间变化的多孔青铜消声片，让高速射流在多孔介质中实现分段膨胀以及湍动耗散。

### 3.4 反馈阻尼与温度补偿的一体化结构化调参

针对“先导—主阀”双环节的动态耦合情况，把反馈与阻尼设计成可进行更换的微孔—腔体模块：在主阀的背腔中布置两只并联的微孔，一只微孔的直径为  $\Phi 0.35$  mm，另一只的直径为  $\Phi 0.50$  mm，借助拨片来选择不同的等效阻尼，背腔连接一个带有迷宫通道的  $6010\text{ cm}^3$  薄片式阻尼腔，以此形成二阶欠阻尼系统的结构化  $c$  增量，设定目标阻尼比  $\zeta$  在 0.60 到 0.8 之间。在背腔与排气侧之间增加一个直径为  $\Phi 0.25$  mm 的旁通微喷嘴，来实现快速卸压，缩短回位滞后的时间，在弹簧座下方添加 PTFE/橡胶复合阻尼垫圈，用来削减高频机械回弹，对于对环境温度敏感的粘性阻尼，采用双金属片驱动针阀的小行程温补机构，使得在  $-30\sim+70$  °C 的温度范围内等效孔径的变化为  $\pm 0.05$  mm，这样就能把  $t63\%$  的波动控制在  $\pm 10\%$  以内。微孔托盘、阻尼腔以及旁通喷嘴都制作为插拔式标准件，方便依据车型气源与制动容积  $V$  在现场进行“配孔”标定，这种模块化结构可将过冲抑制到  $<5\%$ ，把静态迟滞降低至  $<4\%$ ，让重复性  $\sigma$  收敛到  $\pm 0.01$  MPa 级别，有效提升在复杂载荷以及温湿条件下的动态稳健性。

## 4 基于流量控制特性的 120 型制动阀性能提升方案

### 4.1 围绕“操纵—响应—一致性”的快速性提升

以司机操纵体验为出发点，首先要解决“动手慢半拍、回位拖泥带水”这种感受方面的问题，实际改造工作可从三个地方同时展开：先导级进行“轻启—快起”的调校，将

起始启闭的阻力以及行程打造得更加精细，让轻微的操纵就能产生可以感知到的压力变化，以此减少多次小幅补推的情况，主阀侧在不改变供气条件的情形下，对内部流道的弯折以及出口扩散形态给予优化，降低不必要的气流折返现象，使得充气与排气路径变得更短且更顺畅，增添有“快速缓解/重载缓解”两档可供选择的排气通道，借助简单的拨片或者维修态切换方式，在客货、长编组与坡道区间等不同场景中可迅速匹配所需的响应速度。

### 4.2 围绕“稳态压力可控”的平顺性提升

列车运行中最令人不适的是制动过程中车钩纵向冲击与车厢点头，这往往源于阀内局部冲击喷流与节流不均导致的压力小幅振荡。应用层面的改进重点在两端：入口端通过更均匀的分流方式减轻单点喷射，避免个别通道“抢风”；出口端设置更顺畅的整流与消能结构，让排气不再“呼吸”式忽强忽弱。与之配套，应把背腔阻尼和微小回路做成可更换的小模块，检修时根据当地气候与线路特点选择更“稳”的组合。

## 5 结语

本文以结构优化为切入点，依托流道几何调整、节流孔群布局改进、导向与排气结构流线化以及反馈阻尼模块化等策略，构建了兼顾快速性、稳定性与可靠性的优化路径。研究成果不仅为铁路车辆制动系统关键部件的升级提供了工程参考，也为气动控制类阀门的标准化、模块化发展奠定了实践基础。

### 参考文献

- [1] 王刚,王荣胜,何守山,等. 重载车辆制动阀缓解阻力稳定性研究[J].铁道车辆,2025,63(02)
- [2] 李明亮. 铁路货车120型制动阀的故障判断与处理方法[J].包头职业技术学院学报,2024,25(04):39-43.
- [3] 石晓聪,朱兴涛,崔贺东. 120型货车空气制动阀故障分析及处理方法[J].内燃机与配件,2023,(23):76-78.