

## 城市轨道交通车辆基础制动装置选型及统型\*

王震<sup>1,2</sup> 孟繁辉<sup>3</sup> 孔德鹏<sup>1,2</sup> 史建航<sup>2</sup> 王超恒<sup>2</sup> 翟维东<sup>2</sup> 黄士伟<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛; 2. 中车制动系统有限公司, 266031, 青岛;

3. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春)

**摘要** [目的] 基础制动装置的选型会影响城市轨道交通列车的制动性能、运行性能及运营成本等。针对我国目前基础制动装置种类众多, 规格接口不同, 以及通用化程度低的特点, 对城市轨道交通车辆基础制动装置的合理选型显得尤为重要。[方法] 从摩擦副热负荷的计算, 空气制动与停放制动能力的校核, 转向架接口及安装空间的校核等方面对基础制动装置进行了分析。完成了适用于设计速度分别为 80 km/h、120 km/h 的 A、B 型车辆基础制动装置的简化工作, 并给出了系列化中国标准城市轨道交通车辆制动执行机构的主要参数。[结果及结论] 系列化中国标准城市轨道交通车辆的统型方案, 可为基础制动装置选型提供参考。

**关键词** 城市轨道交通; 车辆; 基础制动装置; 选型; 统型  
**中图分类号** U270.38

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.054

## Type Selection and Unification of Urban Rail Transit Train Basic Braking Device

WANG Zhen<sup>1,2</sup>, MENG Fanhui<sup>3</sup>, KONG Depeng<sup>1,2</sup>, SHI Jianhang<sup>2</sup>, WANG Chaoheng<sup>2</sup>, ZHAI Weidong<sup>2</sup>, HUANG Shiwei<sup>2</sup>

(1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China; 2. CRRC Braking System Co., Ltd., 266031, Qingdao, China; 3. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

**Abstract** [Objective] Selection of basic braking device (abbreviated as BBD) may affect the braking performance, running performance and operating cost of urban rail transit trains. Targeting the characteristics of wide variety, different interface specifications and low generalization in terms of BBD in China, the reasonable type selection of BBD for urban rail transit trains is particularly important. [Method] An analysis of BBD is conducted from aspects such as the calculation of friction pairs heat load, the checking of air brake and parking brake capacities, the checking of bogie interface and installation space. The simplified unification of BBD for type A and type B trains with the design speed of 80 km/h and 120 km/h

respectively is completed, and the main parameters of the braking actuator of serialized Chinese standard urban rail transit trains are given. [Result & Conclusion] The unification scheme of serialized Chinese standard urban rail transit trains can provide reference for the selection of BBD.

**Key words** urban rail transit; train; basic braking devices; type selection; type unification

基础制动装置安装在城市轨道交通车辆转向架上, 是实施空气制动及停放制动作用的执行机构, 是制动系统及转向架的核心关键部件, 也是制动系统中其他制动措施失效情况下的最后一道安全保障<sup>[1]</sup>。根据摩擦副的不同列车基础制动装置分为踏面制动及盘形制动两种形式, 其中: 踏面制动由踏面制动单元及闸瓦组成, 盘形制动由制动夹钳单元、制动盘及闸片组成。针对城市轨道交通列车载重大、减速快、制动频繁, 以及转向架安装空间狭小等特点, 不同速度等级、不同车型的城市轨道交通车辆如何更加合理地选择摩擦副形式及材料, 以及如何选择或设计制动执行机构, 成为目前基础制动装置选型过程中应充分考虑的问题。

## 1 车辆基础制动装置

城市轨道交通列车基础制动装置一般采用踏面制动或盘形制动两种形式之一。盘形制动以轮盘制动为主, 少数项目则选用踏面制动与轴盘制动相结合的形式。列车运行速度为 120 km/h 及以下的城市轨道交通车辆闸瓦、闸片一般采用合成材料, 每节车辆配置 8 套基础制动装置, 其中停放制动占比为 1/2。

闸片安装在制动夹钳单元上, 空气制动时与制动盘形成摩擦副。既有制动盘以铸铁制动盘(以下简称“铸铁盘”)为主。随着城市轨道交通列车对轻量化等要求的提高, 铝基复合材料制动盘(以下简

\* 中国中车股份有限公司重大专项课题(BZDT08)

称“铝盘”)逐渐开始应用,每套铝盘的质量相对于传统铸铁盘可减重约 50% 以上。

制动夹钳单元是盘形制动装置中的执行机构,是将压缩空气压力或储能弹簧力转化为闸片正压力的部件<sup>[2]</sup>。由于技术来源和作用原理等的不同,我国城市轨道交通车辆制动夹钳单元结构多样,甚至同一城市的制动夹钳单元结构也各不相同。制动夹钳单元的安装接口与转向架相互关联,根据安装接口形式,制动夹钳单元分为传统式(三点安装)及紧凑型(单点安装)两种类型。

踏面制动单元是踏面制动装置中的执行机构,是将压缩空气压力或储能弹簧力转化成闸瓦托推力的部件。由于技术来源和作用原理等的不同,我国城市轨道交通车辆踏面制动单元结构多样<sup>[3]</sup>,闸瓦安装在踏面制动单元的闸瓦托上,空气制动时与车轮踏面形成摩擦副。根据安装闸瓦的数量,踏面制动单元分为单闸瓦结构及双闸瓦结构 2 种类型,其中双闸瓦结构摩擦副接触面积相对较大,可降低闸片压强及接触面积内的热流密度。

在城市轨道交通车辆基础制动装置的选型及设计过程中,摩擦副的热负荷、空气制动能力、停放制动能力及基础制动装置所需空间等的计算或校核是必不可少的。

## 2 摩擦副热负荷计算

空气制动作用实际上是将列车动能转换为热能的过程,影响列车制动能力的一个重要因素是热负荷。列车在实施空气制动时,由动能转换成的热能必须能够被制动摩擦副充分吸收并及时散发而不超过其承受限度,热负荷仿真计算是摩擦副选型及运输组织、试验的重要理论支撑。基础制动装置摩擦副选型应根据需求模拟多种应用工况及故障模式下的热负荷计算。以我国某城市轨道交通线路为例,列车运行速度为 100 km/h,轴重为 14.5 t,线路最大坡度为 35‰。分别模拟两种工况进行计算。工况一:列车在 100 km/h 下,以  $-1.35 \text{ m/s}^2$  的加速度连续施加两次紧急制动;工况二:列车以 100 km/h 在轨道交通线路上运行一个往返,在每个站点以  $-1.13 \text{ m/s}^2$  的加速度施加最大常用制动以停车,中间站停车时间为 30 s,折返站停车时间为 120 s。

双瓦式踏面制动装置温度时程曲线,如图 1 所示。由图 1 可知:在工况一下,车轮踏面表面最高温

度约 263 °C;在工况二下,车轮踏面表面最高温度约 484 °C。由此可见,在模拟线路最大常用制动工况下,车轮踏面表面温度已明显高于 350 °C 的限值<sup>[4]</sup>,因此,该线路车辆已不再适宜选用踏面制动装置。

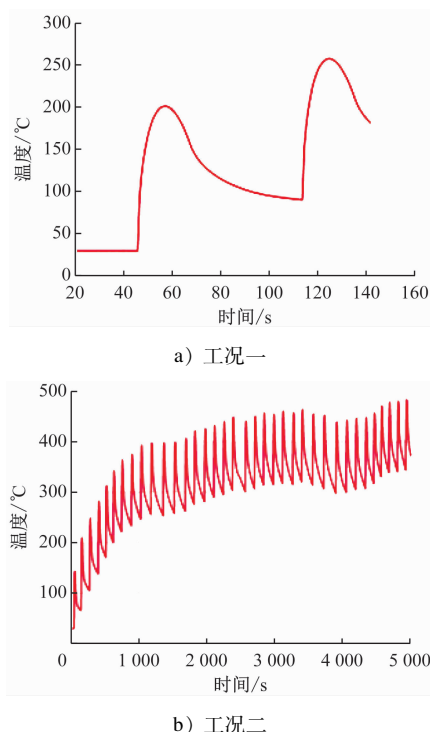


图 1 双瓦式踏面基础制动装置温度时程曲线

Fig. 1 Temperature time-history curves of double-pad tread basic braking device

相对于踏面制动装置而言,盘形制动装置的显著优点是能够承受城市轨道交通车辆频繁制动所产生的热负荷及良好的散热性能,进而大大减轻车轮踏面的机械和热作用<sup>[5]</sup>。铸铁盘及铝盘两种材质下的轮装制动盘温度时程曲线,如图 2 所示。由图 2 可见:在连续两次紧急制动工况下,制动盘表面最高温度分别约为 248 °C 和 213 °C;在模拟线路最大制动工况下,制动盘表面最高温度分别约为 260 °C 和 208 °C,铸铁盘及铝盘表面最高温度均远低于 350 °C 的限值。

铸铁盘在城市轨道交通领域经过长期的大量应用,技术成熟,具有良好的维护性及经济性。相对于铸铁盘,铝盘质量较小,可以减少由于部件质量引起的列车牵引能耗,从而降低列车运营成本。特别是簧下质量的减小,对改善车辆动力学性能及轮轨关系有一定效果,可延长轮轨运维周期。此

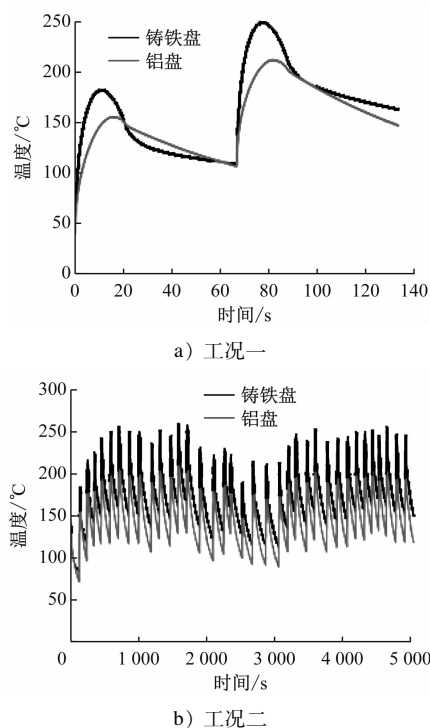


图2 两种材质下的轮装制动盘温度时程曲线

Fig. 2 Temperature time-history curves of wheel-mounted brake discs made of two materials

外,添加增强体的铝盘具有良好的耐磨性。北京地铁昌平线测量结果显示,铝盘单位里程磨耗量约为传统铸铁盘的50%<sup>[6]</sup>;另外,铝盘优越的热传导性能可更好地适应频繁制动所带来的制动热负荷变化<sup>[7]</sup>。通过对铝基复合材料制动盘在德国、日本及我国等国家的多年装车运用情况分析可知,铸铝盘相对铸铁盘使用寿命更长,综合成本更低<sup>[8]</sup>。但由于铝盘基体材料硬度较小,如何减少盘体表面划痕、犁沟,以及避免闸片金属镶嵌仍是铝盘摩擦副亟须解决的问题;现阶段铝盘摩擦副制造成本较高,在我国应用年限较短,使用数量也较为有限,故其全寿命周期经济性尚不明确。因此,在盘形基础制动装置摩擦副材质选型过程中需综合考虑减重需求、技术成熟度及运营成本等因素。

### 3 空气制动与停放制动能力校核

根据项目对制动距离或减速度的要求,基础制动装置在选型过程中需合理设置摩擦半径,合理选择制动夹钳单元或踏面制动单元的活塞面积、倍率等技术参数。其中在列车纯空气紧急制动工况下对基础制动能力进行校核是必不可少的,必要时还需在特定的故障模式下对其进行校核。

$$S = S_k + \frac{(v_0/3.6)^2}{2(B/m)} \quad (1)$$

式中:

$S$ ——制动距离,单位 m;

$S_k$ ——空走制动距离,单位 m;

$v_0$ ——制动初速度,单位 km/h;

$B$ ——整车制动力,单位 kN;

$m$ ——整车质量(含旋转质量),单位 t。

若采用盘形制动:

$$B = \sum_i (F_j \mu r / R) \quad (2)$$

$$F_j = 10^{-3} \gamma_j \eta_j [(10PA - f_1) \gamma_g \eta_g - f_2] \quad (3)$$

式中:

$F_j$ ——制动夹钳单元输出力,单位 kN;

$\mu$ ——摩擦副平均摩擦因数;

$r$ ——摩擦半径,单位 mm;

$R$ ——车轮半径,单位 mm;

$P$ ——制动缸气压,单位  $10^2$  kPa;

$A$ ——制动缸活塞面积,单位  $\text{cm}^2$ ;

$f_1$ ——制动缸内放大部位前部阻力,单位 N;

$\gamma_g$ ——制动缸倍率;

$\eta_g$ ——制动缸机械效率;

$f_2$ ——制动缸内放大部位后部阻力,单位 N;

$\gamma_j$ ——制动夹钳杠杆倍率;

$\eta_j$ ——制动夹钳机械效率;

$i$ ——基础制动装置的数量。

若制动夹钳单元为一级放大机构,则式(3)中  $f_1$  为 0,  $\gamma_g$  为 1,  $\eta_g$  为 1,此时认为  $f_2$  为制动缸内部阻力。

若采用踏面制动:

$$B = \sum_i (F_t \mu) \quad (4)$$

$$F_t = 10^{-3} \gamma_1 \lambda (10PA - f_i) - 10^{-3} f_o \quad (5)$$

式中:

$F_t$ ——踏面制动单元输出力,单位 kN;

$f_i$ ——制动缸内部阻力,单位 N;

$\gamma_1$ ——制动单元倍率;

$\lambda$ ——传动效率;

$f_o$ ——制动缸外部阻力,单位 N。

除了对空气制动能力校核以外,还需对停放制动进行校核。合理设置停放制动能力,保证列车在最大坡道上(需考虑风速等不利因素)能够安全停放。

#### 4 转向架接口及安装空间校核

根据转向架接口选择基础制动装置。基础制动装置在选型或设计时,需输入转向架的相关尺寸与运动参数,确保基础制动装置从原始状态至最大磨耗全过程中与转向架其他部件保持安全距离,同时需考虑自身受力变形、轮对各向最大变位、车轮磨耗、限界及维护操作空间等因素。

#### 5 系列化中国标准城市轨道交通列车基础制动装置统型

为实现基础制动装置的安装空间、接口及制动性能的对等互换,降低制造及维护成本,系列化中国标准城市轨道交通制动专业组根据整车、线路及使用技术条件,协同转向架专业组对城市轨道交通公司、城市轨道交通车辆制造企业及基础制动装置供应商等进行大量调研,并对摩擦副热负荷进行了计算,对空气制动及停放制动能力,以及转向架接口及安装空间等方面进行了校核,完成了适用于设计速度为 80 km/h 的 A 型、B 型车辆,以及设计速度为 120 km/h 的 A 型、B 型车辆的基础制动装置的简化工作。列车制动系统相关技术参数见表 1。

设计速度为 80 km/h 的 A 型、B 型城市轨道交通车辆均采用踏面制动,踏面制动单元分为单瓦结构与双瓦结构两种形式。分别对踏面制动单元的安装接口、轮廓尺寸、不同气压下的输出力及性能

表 1 列车制动系统相关技术参数

Tab.1 Relevant technical parameters of train braking system

设计速度/ (km/h)	车型	轴重/t	平均减速度/ (m/s <sup>2</sup> )	最大坡道/‰	折返站停车时间/s
80	A 型	17	≥1.2	35、40	120
	B 型	15	≥1.2	35、40	120
120	A 型	17	≥1.2	35、40	120
	B 型	15	≥1.2	35、40	120

参数等进行了规范。闸瓦安装接口采用 UIC 541-4; 2017 规定的 K 型瓦背,单闸瓦的长度为 320 mm,双闸瓦中单块闸瓦长度为 250 mm。对闸瓦的摩擦磨耗性能等进行了规定。

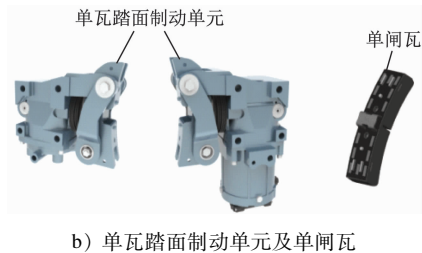
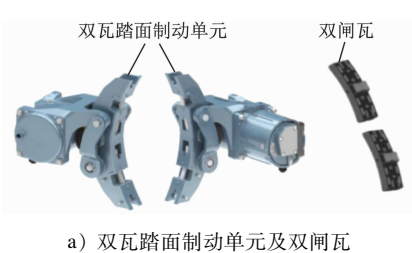
设计速度为 120 km/h 的 A 型、B 型城市轨道交通车辆均采用轮盘制动,制动夹钳单元分为传统式及紧凑型两种形式。分别对制动夹钳单元的安装接口、轮廓尺寸、不同气压下的输出力及性能参数等进行了规范。根据盘体材料的不同,制动盘分为铸铁盘及铝盘。对制动盘的安装接口、内外径、厚度及力学性能等进行了统一要求。采用 UIC 541-3;2017 中单侧半幅摩擦面积为 200 cm<sup>2</sup> 的有机合成闸片。对闸片的摩擦磨耗性能等进行了规定。

简化的中国标准城市轨道交通车辆制动执行机构的主要参数及外形结构示意图分别见表 2 及图 3。

表 2 简化的中国标准城市轨道交通车辆制动执行机构的主要参数

Tab.2 Simplified and unified main parameters of Chinese standard urban rail transit vehicle brake actuators

项目		缓解间隙/ mm	一次调整量/ mm	最大调整量/ mm	停放制动输出 力/kN	推荐活塞面 积/cm <sup>2</sup>	推荐制动 倍率
踏面制动单元	双瓦式	10 ~ 14	≥2.5	≥125	≥26.5(A 型车);	248.8	4.10
	单瓦式	8 ~ 12	≥2.5	≥125	≥22.0(B 型车)	248.8	3.40
制动夹钳单元	传统式	2 ~ 6	≥3.0	≥80	≥45.0(A 型车);	510.7	2.60
	紧凑型	2 ~ 6	≥1.1	≥80	≥37.0(B 型车)	142.7	8.58





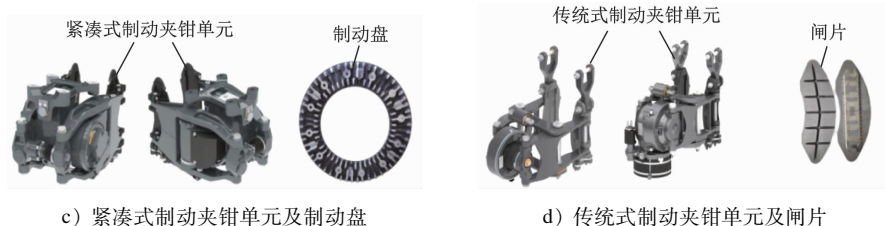


图3 简统化的中国标准城市轨道交通车辆基础制动装置外形结构示意图

Fig.3 Simplified and unified shape structure diagram of Chinese standard urban rail transit vehicle basic braking devices

## 6 结语

针对我国城市轨道交通车辆基础制动装置种类众多,规格接口不同,以及通用化程度低的特点,合理的装置选型能减少设计和制造成本,降低全寿命周期运维费用。系列化中国标准城市轨道交通车辆的统型,为基础制动装置选型提供了参考。

## 参考文献

- [1] 韩晓辉,李继山,李业明,等. 和谐号动车组基础制动装置[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(5): 52.  
HAN Xiaohui, LI Jishan, LI Yeming, et al. Foundation braking equipment of Hexie EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2011, 31(5): 52.
- [2] 中国中车股份有限公司. 城市轨道交通车辆制动夹钳单元: Q/CRRCJ 1058—2020 [A]. 北京: 中国中车股份有限公司, 2020.  
CRRC Co. Ltd. Brake caliper unit of urban rail transit vehicles: Q/CRRCJ 1058—2020 [A]. Beijing: CRRC Co. Ltd., 2020.
- [3] 孔德鹏,张维坤,张昕,等. 标准城市轨道交通车辆单元制动器统型浅析[J]. 铁道车辆, 2021, 59(3): 82.  
KONG Depeng, ZHANG Weikun, ZHANG Xin, et al. Analysis of unified type unit brakes for standard metro vehicles[J]. Rolling Stock, 2021, 59(3): 82.
- [4] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通车辆制动系统 第2部分: 电空制动系统装车后的试验规则: T/CAMET 04004. 2—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.  
China Association of Metros. Brake systems of urban rail vehicles Part 2: Test methods for electro-pneumatic brake system after com-

- pletion of construction: T/CAMET 04004. 2—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing, 2018.
- [5] 李继山,李和平,严霄惠. 盘形制动是城市轨道交通车辆基础制动装置的发展趋势[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(4): 69.  
LI Jishan, LI Heping, YAN Xiaohui. Disc brake is development trend of the foundation brake rigging for urban railway cars[J]. Railway Locomotive & Car, 2011, 31(4): 69.
- [6] 曹建行,梁洪,薛江,等. 基于提高列车运行品质的制动盘轻量化技术研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(11): 47.  
CAO Jianhang, LIANG Hong, XUE Jiang, et al. Research on brake disc lightweight technology based on improving train running quality[J]. Modern Urban Transit, 2019(11): 47.
- [7] 王新海,韩晓辉,宫明兴,等. 城市轨道交通制动系统技术发展趋势[J]. 铁路技术创新, 2015(4): 33.  
WANG Xinhai, HAN Xiaohui, GONG Mingxing, et al. Development trend of urban rail transit braking system technology [J]. Railway Technical Innovation, 2015(4): 33.
- [8] 杜建华,李卫强,杨智勇. 140~160 km/h 城市快速轨道交通车辆基础制动模式及其选材[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 174.  
DU Jianhua, LI Wei-qiang, YANG Zhiyong. Basic brake mode of 140~160 km/h urban rail express vehicle and material selection [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(6): 174.

· 收稿日期:2022-04-21 修回日期:2022-09-09 出版日期:2024-08-10  
Received:2022-04-21 Revised:2022-09-09 Published:2024-08-10  
· 通信作者:王震,高级工程师,qdsfwz@126.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第308页)

- [10] 李幸人,邹涛,张江田,等. 钢制车体疲劳强度校核方法[J]. 铁道车辆, 2012, 50(4): 21.  
LI Xingren, ZOU Tao, ZHANG Jiangtian, et al. The checking method for the fatigue strength of steel carbodies[J]. Rolling Stock, 2012, 50(4): 21.

· 收稿日期:2021-09-26 修回日期:2022-01-24 出版日期:2024-08-10  
Received:2021-09-26 Revised:2022-01-24 Published:2024-08-10  
· 第一作者:李本怀,正高级工程师,lbh1008@163.com  
通信作者:王康,硕士研究生,1458824214@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license