

中低速磁浮列车基础制动装置制动效率的影响因素

廖志坚 徐少亭 李 龙 古龙瑞

(中车制动系统有限公司制动事业部, 266031, 青岛//第一作者, 工程师)

摘要 目的:为了更好地提高制动系统性能,对中低速磁浮列车基础制动装置制动效率的影响因素进行研究。方法:以中低速磁浮列车用无间隙调整机构的基础制动装置为研究对象,对制动输出效率影响因素进行理论分析和试验验证。结果及结论:空气压力越小,制动效率越低,闸瓦/闸片磨耗量越大,制动效率越低;当空气压力低于一定程度时,制动效率的降低更为明显;空气压力越小,闸瓦/闸片的磨耗对制动效率的影响越大,即同样的磨耗量下,制动力的离散性更大。在进行基础制动装置设计时,应合理选择弹簧参数、制动倍率、摩擦因数、闸瓦/闸片磨耗量等参数,尽量降低空气压力、闸瓦/闸片磨耗量对制动效率的影响;在进行制动系统设计时,应注意结合基础制动装置本身特性,合理设定各制动级位下的制动压力,尽量减小空气压力和闸瓦/闸片磨耗量对制动效率的影响。

关键词 中低速磁浮列车;制动系统;基础制动装置;无间隙调整机构;制动效率

中图分类号 U270.35:U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.08.028

Factors Influencing the Braking Efficiency of Medium-low Speed Maglev Train Basic Brake Device

LIAO Zhijian, XU Shaoting, LI Long, GU Longrui

Abstract Objective: To improve braking system performance, the factors influencing the braking efficiency of MLM (medium-low speed maglev) train basic brake device are studied. Method: The basic brake device with a zero-gap adjustment mechanism used in MLM trains is taken as the research object. The influencing factors over braking output efficiency are analyzed theoretically and verified through experiments. Result & Conclusion: The lower the air pressure, the lower the braking efficiency and the greater the wear amount of brake shoes/brake pads, especially when the air pressure falls below a certain level, the reduction in braking efficiency becomes more pronounced. As the air pressure decreases, the wear of brake shoes/brake pads has a greater impact on braking efficiency, resulting in greater discreteness of braking force under the same amount of wear. In the design of basic brake device,

it is necessary to select appropriate spring parameters, brake pedal ratio, friction coefficient, and wear amount of brake shoes/brake pads, while minimizing the effects of air pressure and brake shoe/pad wear amount on braking efficiency. In the design of braking system, it is important to consider the characteristics of the basic brake device and set the braking pressure for each braking level appropriately, aiming to minimize the influence of air pressure and brake shoe/pad wear on braking efficiency.

Key words medium-low speed maglev train; braking system; basic brake device; no-clearance adjustment mechanism; braking efficiency

Author's address Braking Business Department, CRRC Braking System Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

基础制动装置作为制动系统的执行机构,对城市轨道交通列车制动系统的整体性能有着重要的影响。对于中低速磁浮列车及有轨电车等,受安装空间及车体质量等因素的影响,其基础制动装置多采用无间隙调整机构的结构,相应的制动输出效率会受制动缸压力及一次动作行程等多重因素的影响。从产品结构原理分析来看,无间隙调整机构基础制动装置输出的制动力与输入压力间呈非线性关系。这给提高制动系统的控制精度带来一定难度,进而影响制动控制策略和逻辑。

对于中低速磁浮列车所采用的无间隙调整机构基础制动装置,我国目前尚缺乏相关研究。为了更好地提高制动系统性能,本文以某中低速磁浮列车的无间隙调整机构基础制动装置为对象,基于试验台及现车测试数据,研究其制动效率的影响因素及制动特性。

1 基础制动装置的工作原理

基础制动按作用方式可分为踏面制动和盘形制动,按制动力传递介质可分为气压制动和液压制动。某中低速磁浮列车的无间隙调整机构基础制

动装置采用气-液转换结构,由空气加力泵和液压夹钳组成,通过空气加力泵将空气压力转换成液压油的油压,由液压夹钳将油压转换成机械推力(即闸片压力)。

空气加力泵为气-液转换部件,由气缸和油缸两部分组成。气缸活塞与油缸活塞固定连接,气缸内部装有活塞复位弹簧。空气加力泵结构如图 1 所示。

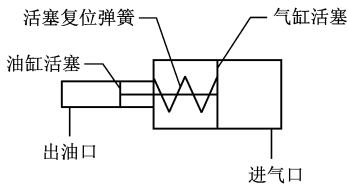


图 1 空气加力泵结构示意简图

Fig. 1 Simplified diagram of air booster pump structure

液压夹钳主要包括外侧杠杆、内侧杠杆、液压缸及闸片等部件,是制动系统的最终执行机构。液压夹钳结构如图 2 所示。液压缸结构如图 3 所示。液压缸内部设有活塞、活塞杆及活塞复位弹簧等。受安装空间、质量等限制,该液压夹钳结构简单,无闸片间隙调整机构。

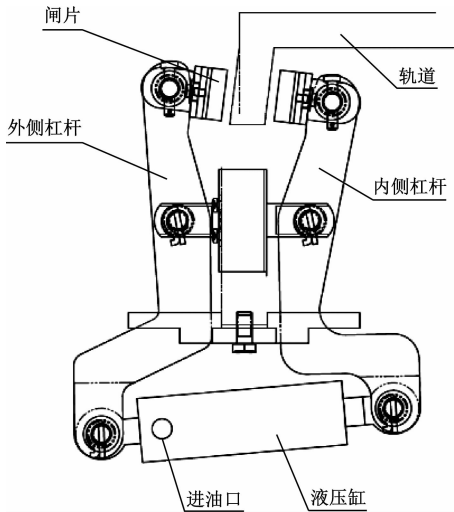


图 2 液压夹钳结构示意简图

Fig. 2 Simplified diagram of hydraulic clamp structure

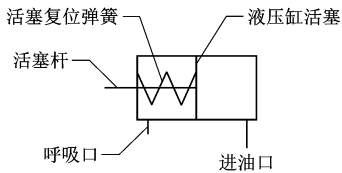


图 3 液压缸结构示意简图

Fig. 3 Simplified diagram of hydraulic cylinder structure

该基础制动装置中,空气加力泵的气液转换倍率为 18,液压缸活塞直径为 40 mm,液压缸工作行程 ≥ 70 mm,液压缸最高工作压力为 10.0 MPa,液压缸充入 0.3 MPa 液压油时的活塞杆动作量 ≥ 30 mm,闸片的最大磨耗厚度为 8 mm^[1]。

在施加制动时,空气加力泵利用输入的压缩空气,通过气转液结构输出高压液压油;高压液压油通过油路充入液压夹钳的液压缸;液压缸内部活塞杆伸出,推动液压夹钳的内侧杠杆与外侧杠杆动作;与内外侧杠杆连接的闸片托贴靠轨道,使安装在闸片托上的闸片夹紧轨道制动面,进而产生制动力。

在缓解制动时,在空气加力泵和液压缸各自的复位弹簧作用下,二者内部活塞回退复位,闸片与轨道分离,实现缓解。

2 影响因素

2.1 影响因素的理论分析

液压夹钳的闸片压力为:

$$F = (P_1 i \eta_1 d^2 \pi / 4 - f) \gamma \eta_2 \quad (1)$$

式中:

- F ——闸片压力;
- P_1 ——空气压力;
- i ——气、液转换放大倍率;
- η_1 ——气、液转换效率;
- d ——液压缸活塞直径;
- f ——液压缸阻力;
- γ ——夹钳杠杆倍率;
- η_2 ——夹钳静态传动效率。

由于该基础制动装置采用气转液结构,故相对纯空气和纯液压形式的制动机构,该制动装置力的转换及传递路径相对复杂。

在闸片厚度不变的情况下,由于液压油存在难以压缩的特性,故可认为不同空气压力下的空气加力泵和液压夹钳活塞行程不变。此时,空气加力泵和液压夹钳的内部阻力(复位弹簧力及内部摩擦力)基本保持不变。因此,空气压力越大,制动输出力越大,整个基础制动装置内部阻力占制动输出力的比例就越小,相应的制动效率就越高。

对于不同磨耗厚度的闸片,液压夹钳无闸片间隙调整机构,因此,在同一空气压力下,若闸片磨耗越多,则空气加力泵和液压夹钳内部活塞杆的运动行程越大,空气加力泵和液压夹钳的复位弹簧力就

越大,整个基础制动装置的制动输出力就越小,制动效率就越低。

综上所述可知,同一闸片厚度下,空气压力越小,空气加力泵与液压夹钳的转换效率就越低;同一空气压力下,闸片磨耗越多,液压夹钳的转换效率就越低。可见,该基础制动装置制动效率主要受空气压力及闸片磨耗量等因素影响。

2.2 制动效率所影响的试验研究

在 AW0(空载)工况下,分别采用新闸片和磨耗闸片(摩擦体磨耗厚度约为允许磨耗厚度的 2/3),对不同制动级位下的制动输出效率进行试验研究。每个制动级位各进行 3 次试验,采集空气加力泵的空气压力 P_1 、液压缸的油压 P_2 和闸片压力 F 等数据。试验测得的数据平均值见表 1。

表 1 试验测得的数据平均值

Tab.1 Mean values of data obtained in tests

闸片	制动级位	P_1 平均值/ kPa	P_2 平均值/ MPa	F 平均值/ kN
新闸片	B1	61	0.85	1.02
	B2	83	1.26	1.96
	B3	97	1.52	2.42
	B4	111	1.76	2.86
	B5	125	2.02	3.37
	B6	145	2.39	4.05
	B7	167	2.76	4.72
磨耗闸片	B1	62	0.84	
	B2	83	1.22	
	B3	98	1.49	
	B4	107	1.66	
	B5	115	1.79	
	B6	142	2.27	
	B7	165	2.68	

注:受空间限制,由于无法安装测试设备,因此无磨耗闸片的闸片压力数据。

为了研究该基础制动装置在不同制动级位下的制动效率,定义空气加力泵效率因数 $\alpha = 1\,000\,P_2/P_1$,液压夹钳效率因数 $\beta = F/P_2$,整个基础制动装置效率因数 $\delta = 1\,000\,F/P_1$ 。计算可得各制动级位下的 α 、 β 、 δ 如表 2 所示。

对于新闸片, α 、 β 、 δ 随制动级位的变化曲线如图 4 所示。

从图 4 可以看出,制动级位越大,液压夹钳、空

气加力泵转换效率越高,整个基础制动装置的输出效率越高。同时,制动级位越大,基础制动装置的输出效率变化越小,越趋于稳定。

表 2 各制动级位下的 α 、 β 、 δ 值统计表

Tab.2 Statistics of α 、 β and δ values at each brake level

闸片	制动级位	α	β	δ
新闸片	B1	13.9	1.20	16.72
	B2	15.2	1.55	23.56
	B3	15.7	1.59	24.85
	B4	15.9	1.62	25.77
	B5	16.2	1.67	26.95
	B6	16.5	1.69	27.84
	B7	16.5	1.71	28.30
磨耗闸片	B1	13.5		
	B2	14.7		
	B3	15.2		
	B4	15.6		
	B5	15.5		
	B6	15.9		
	B7	16.3		

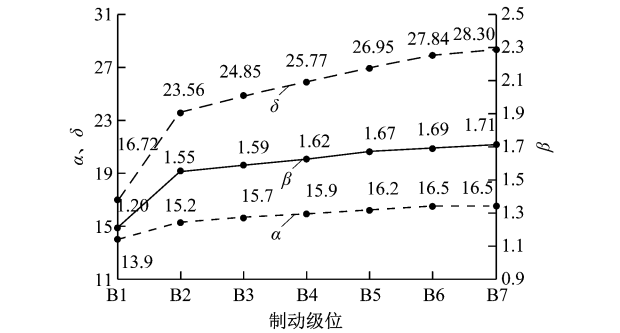


图 4 新闸片 α 、 β 、 δ 随制动级位的变化曲线
Fig. 4 Change curves of new brake pad α 、 β and δ at each brake level

从表 2 中 α 的数据可以看出,在同一制动级位下,新闸片下空气加力泵的效率高于磨耗闸片下空气加力泵的效率。

为了进一步研究更低空气压力下新闸片和磨耗闸片对制动效率的影响,通过调整试验台 AW0 工况下各制动级位的空气压力来进行试验,得到不同制动级位下的 P_1 及 P_2 平均值如表 3 所示。

依据表 3 数据,不同磨耗闸片下 α 值随制动级位的变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可见,制动级位越大,闸片磨耗对制动效率影响越小;随着制动级位的增大,闸片磨耗对制

动效率的影响逐渐减小。

表 3 试验台测得的不同制动级位下的 P_1 及 P_2 平均值
Tab.3 Mean values of P_1 and P_2 at different brake levels
obtained from test bench

闸片	制动级位	P_1 平均值/kPa	P_2 平均值/MPa
新闸片	B1	36	0.41
	B2	48	0.65
	B3	72	1.07
	B4	98	1.51
	B5	122	1.91
	B6	139	2.26
	B7	163	2.62
磨耗闸片	B1	36	0.31
	B2	50	0.63
	B3	76	1.06
	B4	98	1.44
	B5	121	1.85
	B6	143	2.24
	B7	163	2.60

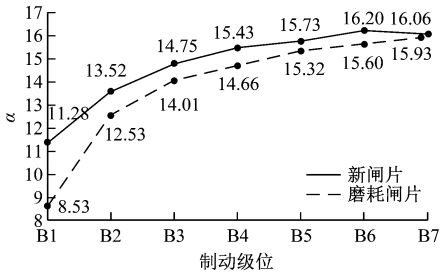


图 5 不同磨耗闸片下 α 值随制动级位的变化曲线
Fig.5 Change curve of α value at each brake level under
different brake pad wear conditions

3 结语

对于无间隙调整机构的基础制动装置,空气压力及闸片磨耗对基础制动装置制动效率有明显影响,影响特性结论如下:

1) 同一工况下,空气压力越小,闸瓦/闸片的磨耗量越大,制动效率越低。此外,对于本文所研究

的基础制动装置,在同样闸片磨耗量下,当低于 B2 制动级位时(AW0),制动效率的降低更为明显。因此,在进行制动控制时,为提高制动系统的控制精度,有必要在不同的空气压力下,采用不同的制动效率参数,而且在进行各制动级位下的空气压力值设定时应选取合适的压力值。比如,本文中的对象应尽量避免各制动级位下的空气压力值低于 B2 制动级位下的空气压力值。

2) 同一工况下,空气压力越小,闸片的磨耗对制动效率的影响越大,表现出来的即空气压力越小,分别采用新闸片和磨耗闸片时,制动力的离散程度越大。对于本文所研究的基础制动装置,同样的,应尽量避免各级位下的空气压力值低于 B2 制动级位下的空气压力值。

针对上述影响特性提出以下建议:

1) 进行基础制动装置设计时,合理选择弹簧参数、制动倍率等参数,并优化产品结构降低摩擦阻力,从而降低内部阻力对制动输出力的影响效果,使制动输入压力与制动输出效率尽量处于线性区间。

2) 进行闸瓦/闸片设计时,合理选取闸瓦/闸片的摩擦因数、磨耗量等参数,尽量减小闸瓦/闸片磨耗量对制动效率的影响。

3) 进行制动系统设计时,注意结合基础制动装置本身特性,合理设定各制动级位下的制动压力,尽量减小空气压力和闸瓦/闸片磨耗量对制动效率的影响,降低各制动级位下制动力的离散性,提高制动控制精度。

参考文献

[1] 徐少亭. 中低速磁浮车制动器优化设计方案[R]. 青岛: 中车制动系统有限公司, 2019.
XU Shaoting. Design scheme for brake optimization of medium-low speed maglev train[R]. Qingdao: CRRC Braking System Co., Ltd., 2019.

(收稿日期:2021-03-09)