

# 城市轨道交通车辆段再生制动能量电阻吸收装置 选型及散热分析

霍长龙

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

**摘要** [目的]城市轨道交通车辆段再生制动能量电阻吸收装置散热量较大,为有效解决此类装置的散热问题,需对再生制动能量电阻吸收装置进行选型,并对其散热能力进行分析。[方法]通过推导得出的城市轨道交通车辆段再生制动能量的计算方法,以及车辆段内的列车运行工况,对再生制动能量电阻吸收装置的电阻值选取、选型及散热分析等方面进行了详细分析。[结果及结论]结合列车在车辆段内的实际运行工况,提出了车辆段再生制动能量电阻吸收装置中制动电阻的计算及选取方法。再生制动能量电阻吸收装置的散热量一般依据该装置峰值功率,并结合其间歇工作的特性进行估算,但该计算方法未考虑热电阻工况,其理论计算值与实际运行工况存在一定程度的偏差。提出了再生制动能量电阻吸收装置的散热功率估算方法,以及散热功率的校验方法,并提出了该装置布置方式的建议方案。

**关键词** 城市轨道交通; 车辆段; 再生制动能量电阻吸收装置; 装置选型; 散热分析

**中图分类号** U279.1

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.03.023

## Selection and Heat Dissipation Analysis of Regenerative Braking Energy Absorption Device in Urban Rail Transit Depot

HUO Changlong

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China)

**Abstract** [Objective] The regenerative braking energy absorption resistance in urban rail transit depot has a large heat dissipation. In order to effectively solve the problem, it is necessary to select the right type of regenerative braking energy absorption resistance and analyze its heat dissipation capacity.

[Method] Based on the deduced calculation method of regenerative braking energy and train operating conditions in the urban rail transit depot, three aspects of the resistance are analyzed in detail, i. e. resistance value selection, type selection and heat dissipation analysis. [Result & Conclusion] Based on the actual train operation conditions in the depot, the calculation and selection method of the braking resistance in the a-

bove energy absorption device is proposed. The heat dissipation of the resistance is generally estimated according to the peak power of the device and in view of the characteristics of its intermittent operation. However, as the thermal resistance working condition is not considered in the above-mentioned calculation method, there is a certain degree of deviation between the theoretical calculation value and the actual operation condition. The estimation and verification methods for the heat dissipation power of the device are put forward. Furthermore, a recommended scheme for the braking energy absorption device layout is proposed.

**Key words** urban rail transit; depot; regenerative braking energy absorption device; equipment type selection; heat dissipation analysis

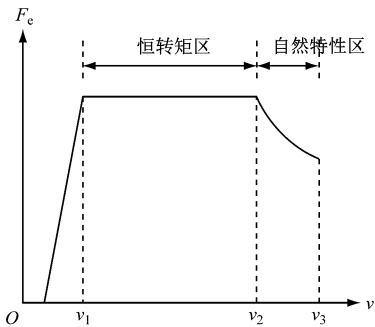
在我国政府倡导节能减排的大背景下,城市轨道交通系统的节能问题愈发重要。如何依托装置选型、技术方案优化有效降低城市轨道交通的能耗,对于促进城市轨道交通可持续发展具有重要的现实意义。现阶段城市轨道交通项目一般设置再生制动能量吸收装置,列车也逐步取消了车载制动电阻而仅保留了过渡电阻。城市轨道交通车辆段均设置有地面再生制动能量电阻吸收装置,该装置缺点较为明显,需要有效地解决散热问题。

本文基于某城市轨道交通项目,围绕车辆段再生制动能量电阻吸收装置(以下简称“装置”)的电阻值选取、选型及散热分析等方面进行论述。

## 1 车辆段再生制动能量计算方法

列车再生制动能量计算的输入条件为:列车为8辆编组(6M+2T,M为无受电弓的动力车,T为拖车),试车线列车运行速度为80 km/h,场段内库外列车运行速度 $\leq 20$  km/h,库内列车运行速度 $\leq 5$  km/h,场段最大收发车间隔约为190 s,全日最小收发车间隔为6 min。列车在制动工况下运行于自然

特性与恒转矩两种控制模式下,列车在牵引工况下运行于恒转矩、恒功率及自然特性控制模式下<sup>[1]</sup>。图1为列车再生制动特性曲线示意图。



注: $F_e$  为牵引电机的牵引力; $v$  为列车速度; $v_2$ 、 $v_1$  分别为列车在恒转矩区的起止速度; $v_3$  为列车在自然特性区的起始速度。

图1 列车再生制动特性曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of train regenerative braking characteristic curve

由图1可以得出自然特性区的列车再生制动特性曲线方程为:

$$F_e v^2 = f \tag{1}$$

式中:

$f$ ——常量。

恒转矩区的列车再生制动特性曲线方程为:

$$F_e = g \tag{2}$$

式中:

$g$ ——常量。

由图1可见:当列车处于恒转矩区时,其起、止速度分别为  $v_1$ 、 $v_2$ ,平均加速度为  $a_1$ ;当列车处于自然特性区时,其起、止速度分别为  $v_2$ 、 $v_3$ ,平均加速度为  $a_2$ ;当列车速度降至  $v_3$  时,列车将切除电制动转换为空气制动直至停车。

通过计算可得到:列车在恒转矩区的运行时间  $t_1 = (v_1 - v_2)/a_1$ ,列车在自然特性区的运行时间  $t_2 = (v_2 - v_3)/a_2$ ,列车在降速过程中总的制动时间  $t = t_1 + t_2$ 。

结合列车的再生制动特性曲线方程及式(1),可推导出列车在再生制动阶段的机械功率瞬时值:

$$P_A = F_e v = \frac{f}{v} \tag{3}$$

$$P_B = F_e v = g v \tag{4}$$

式中:

$P_A$ 、 $P_B$ ——自然特性区和恒转矩区列车的机械功率瞬时值。

根据图1,在各制动时段内输入轮缘的机械

能为:

$$W_A = \int P_A dt = \int_{v_3}^{v_2} \frac{f}{v} \frac{1}{a_1} dv = \frac{f}{a_1} \ln\left(\frac{v_2}{v_3}\right) \tag{5}$$

$$W_B = \int P_B dt = \int g v dt = \frac{g}{2a_2} (v_1^2 - v_2^2) \tag{6}$$

式中:

$W_A$ 、 $W_B$ ——制动时段内输入轮缘的机械能。

通过上述推导可以得出  $t$  内,电机至传动齿轮的平均机械功率为:

$$P_{\text{Gear}} = \frac{W}{t} \tag{7}$$

式中:

$W$ ——制动时段内输入轮缘的总机械能;

$P_{\text{Gear}}$ ——制动时段内输送到传动齿轮的平均机械功率。

忽略列车的辅助用电设备,可以得出列车反馈至牵引网的平均有功功率  $P_N$  为:

$$P_N = \eta_1 \eta_M \eta_{\text{Gear}} P_{\text{Gear}} \tag{8}$$

式中:

$\eta_1$ ——逆变器的效率;

$\eta_{\text{Gear}}$ ——齿轮的传动效率;

$\eta_M$ ——异步电机的效率。

2 车辆段内列车运行工况分析

列车在车辆段内的运行工况如下:

1) 工况1:仅考虑在试车线上对列车进行调试或对新司机进行培训。

2) 工况2:可按照两列车同时制动计算最大制动功率。表1为全日部分时段行车计划。

表1 全日部分时段行车计划  
Tab.1 Full day driving plan (partial)

时段	列车开行数/对			
	近期		远期	
	大交路	小交路	大交路	小交路
05:30—06:30	8		10	
06:30—07:30	12	6	14	7
07:30—08:30	16	8	20	10
15:30—16:30	10		12	
16:30—17:30	12	6	14	7
17:30—18:30	16	18	20	10
19:30—20:30	12	6	14	7
22:30—23:30	6		8	

结合表1可得,车辆段内最大收发车数量为10

辆,最小收发车间隔为 6 min。因此,车辆段可按照两列车同时制动计算最大制动功率。

3) 工况 3:考虑极端工况,在试车线上对列车进行调试或对新司机进行培训,且场段内同时有 1 列车进行制动。

### 3 再生制动能量电阻吸收装置选型分析

#### 3.1 工况 1

结合列车再生制动特性输入条件为:列车平均减速度为  $-1.0 \text{ m/s}^2$ ,  $\eta_{\text{Gear}} = 0.975$ ,  $\eta_{\text{M}} = 0.930$ ,  $\eta_1 = 0.980$ 。图 2 为列车再生制动力、阻力特性曲线。

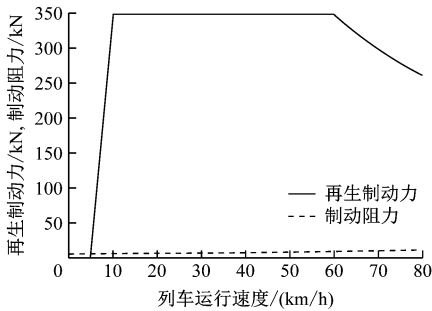


图 2 列车再生制动力、阻力特性曲线

Fig. 2 Characteristic curves of train regenerative braking force and resistance

根据式(5)一式(7)结合图 2 可以求出:  $W$  为 84 178 kJ,  $t$  为 19.44 s,  $P_{\text{Gear}}$  为 4 330 kW,  $P_{\text{N}}$  为 3 848 kW, 牵引网侧的平均电流  $I_{\text{N}}$  为 2 332 A。

图 3 为单电机制动功率、电流特性曲线。结合图 3 可以求出:传动齿轮侧的瞬时最大机械功率  $P_{\text{Gear,max}}$  为 8 880 kW, 牵引网侧的瞬时最大有功功率  $P_{\text{N,max}}$  为 7 890 kW, 牵引网侧的瞬时最大电流  $I_{\text{N,max}}$  为 4 781 A。

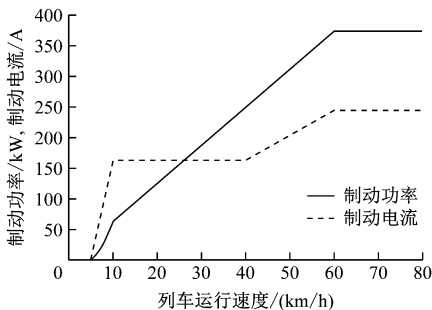


图 3 单电机制动功率、电流特性曲线

Fig. 3 Characteristic curves of single motor braking power and current

#### 3.2 工况 2

工况 2 下的计算结果为:  $W = 8\,578 \text{ kJ}$ ,  $t = 2.78 \text{ s}$ ,  $P_{\text{Gear}} = 3\,085 \text{ kW}$ ,  $P_{\text{N}} = 2\,741 \text{ kW}$ ,  $I_{\text{N}} = 1\,661 \text{ A}$ ,  $P_{\text{Gear,max}} = 6\,240 \text{ kW}$ ,  $I_{\text{N,max}} = 3\,360 \text{ A}$ 。

在实际工程中,装置选型应统筹考虑技术与经济性价比。因此,制动电阻的总电阻值考虑一般按照工况 1 选取。吸收电阻的电阻值应能可靠吸收车辆制动时的瞬时最大电流,装置的总冷态电阻值<sup>[2]</sup>为:

$$R_0 = \frac{U}{I_{\text{N,max}}} \quad (9)$$

式中:

$R_0$ ——装置的总冷态电阻值;

$I_{\text{N,max}}$ ——制动时的瞬时最大电流;

$U$ ——导通电压。

本文设定  $U$  为 1 730 V, 可得  $R_0$  为 0.36  $\Omega$ 。将装置导通比设定为 90%, 按照 4 支路考虑可得支路冷态电阻值为 1.5  $\Omega$ 。

则单个支路的最大短时功率为:

$$P_{\text{Z0}} = I_{\text{N}}^2 R_{\text{Z0}} \quad (10)$$

式中:

$P_{\text{Z0}}$ ——支路的最大短时功率;

$R_{\text{Z0}}$ ——支路的冷态电阻值。

由式(10)可得  $P_{\text{Z0}}$  为 509 kW, 装置的最大短时功率为 2 036 kW, 因此装置峰值功率可选定为 2 400 kW。

#### 4 再生制动能量电阻吸收装置散热分析

装置配置有过热保护:当装置空气出口的温度达到 200  $^{\circ}\text{C}$  时,吸收功率自动降低为额定吸收功率的 2/3;当装置空气出口温度超过 220  $^{\circ}\text{C}$  时,吸收功率自动降低到 1/2 并报警;当装置空气出口温度超过 235  $^{\circ}\text{C}$  时,装置将自动关闭。因此,必须有效地解决装置的散热问题,才能保证装置正常运行。

按照持续的均方根电流计算装置的持续散热功率。装置运行周期内(总时长为 120 s,制动时长为 20 s)的持续均方根电流为:

$$I_{\text{C}} = \sqrt{\frac{I_{\text{E}}^2 t_{\text{ZD}}}{T}} \quad (11)$$

式中:

$I_{\text{C}}$ ——装置运行周期内的持续均方根电流;

$t_{\text{ZD}}$ ——制动时间;

$T$ ——运行周期。

根据式(11)可得装置在  $T$  内的持续散热功率为 326 kW。上述计算采用的电阻值实际上是电阻的冷态电阻值,冷态电阻值为室温 20 ℃ 时的电阻值。装置在实际运行工况中电阻值会随着温度的升高而升高,一般将 600 ℃ 时的电阻值称为热态电阻值<sup>[3]</sup>。

以本工程为例,采用 4 支路额定功率为 2 400 kW 的装置,经仿真验证得到电阻运行温度时程曲线。单支路 600 kW 额定功率电阻运行温度时程曲线,如图 4 所示。当装置持续工作时,电阻的最高温度可达 550 K 即 288 ℃。根据式(12),可以计算出热态电阻值为<sup>[3]</sup>:

$$R_{288} = R_{20} (1 + \Delta T c_f) (1 + D_R) \quad (12)$$

式中:

$R_{20}$ 、 $R_{288}$ ——20 ℃ 及 288 ℃ 时的电阻值,单位  $\Omega$ ;

$c_f$ ——温度系数;

$\Delta T$ ——温度差,单位 ℃;

$D_R$ ——制造容差。

式(12)中, $c_f$  取  $0.55 \times 10^{-3}$ , $D_R$  取 7%。经计算得到  $R_{288} = 0.44 \Omega$ ,则装置在运行周期内的持续散热功率为 398 kW。

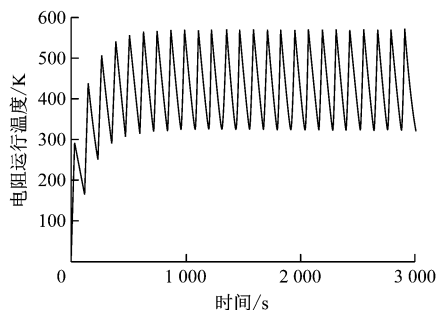


图 4 单支路 600 kW 额定功率下电阻运行温度时程曲线

Fig. 4 Resistance operating temperature time history curve of single branch rated power 600 kW

电阻柜采用强迫风冷冷却方式,装置的散热方式以空气辐射换热和对流换热为主<sup>[4]</sup>,电阻柜散热功率采用单位面积法计算<sup>[5-6]</sup>:

$$Q_{RE} = aS(t_R - t_{\infty}) \quad (13)$$

式中:

$Q_{RE}$ ——装置散热功率;

$S$ ——等效散热面积;

$a$ ——表面传热系数, $a = 11.63 + 7v$ ,其中  $v$  为室内空气流速;

$t_R$ ——电阻表面温度;

$t_{\infty}$ ——柜内冷却空气温度。

此处假定环境温度为 25 ℃,装置内冷却空气温度为 100 ℃,电阻表面最高温度为 288 ℃。假定室内机械排风风口的风速不低于 5 m/s 时,依据上述设定可计算出装置的散热功率为 207.63 kW。

由上述计算可知,当室内机械排风口的风速为 5 m/s 时,不能完全排出室内的热量。经计算当机械排风口风速不低于 10 m/s 时,才能完全将室内热量排出室外。

在实际工程设计中,装置多采用如下 3 种布置方式,即:全室外布置、半开放式布置(固定百叶或半开放式)、全室内布置(机械通风)。针对装置的布置方式应首选全室外布置方式,慎用半开放式布置方式。当采用半开放式布置方式时,若通风条件不良仅利用自然通风是无法完全将装置产生的热量排出室外,极易造成装置过热保护影响正常运营,可优化为活动百叶与机械通风相结合的模式。

## 5 结语

1) 结合车辆段内实际运行工况,系统地给出了车辆段内装置制动电阻的计算及选取方法。

2) 在实际工程设计过程中,一般依据装置峰值功率结合其间歇工作的特性,估算装置的散热功率。上述计算方法并未考虑热电阻工况,因此对于输入至环控专业的散热功率是存在一定程度的偏差。文献[6]并未直接明确电阻类装置散热功率的计算方法。上述原因造成了装置在运行过程中会出现过热保护影响正常运营。本文系统性地给出了装置散热功率的估算及散热功率的校验方法。

3) 针对装置的布置方式,认为应首选全室外布置方式。全室外布置方式存在运维条件恶劣、环境不够协调友好等问题,近年来常采用半开放式布置方式或固定百叶的半开放布置方式。在实际的运行过程中,电阻柜房屋面积较小,通风不畅经常会造成装置过热保护。结合理论计算给出了电阻柜半开放式布置的优化方式。虽然装置属于常规设备类型,设备本身并无创新性,但在节能减排的大背景下,如何精细化的设计对于城市轨道交通节能减排具有一定的积极意义。

## 参考文献

[1] 李鲲鹏,张振生. 广州地铁 4 号线地面制动电阻的设计[J].

- 机车电传动, 2005(5): 43.
- LI Kunpeng, ZHANG Zhensheng. Design of ground braking resistor in Guangzhou metro line 4 [J]. Electric Drive For Locomotives, 2005(5): 43.
- [2] 刘雨. 地铁牵引系统电制能量吸收方法的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
- LIU Yu. Study on absorption method of electric-brake energy in Metro traction system [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2021.
- [3] 李鹤群, 曲诗健, 侯朋岐, 等. 基于地面再生制动能量吸收装置的地铁车辆过渡电阻设计[J]. 铁道机车与动车, 2021(2): 1.
- LI Hequn, QU Shijian, HOU Pengqi, et al. Design of subway vehicle transition resistance based on ground regenerative braking energy absorption device [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2021(2): 1.
- [4] 欧宗味. 制动电阻散热特性及其瞬态温度响应仿真模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- OU Zongwei. Research on heat transfer characteristic and simulation model of transient temperature of braking resistor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [5] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- LU Yaoqing. Practical heating and air conditioning design manual [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [6] 李辰加. 制动电阻强化散热分析[J]. 机车电传动, 1998(2): 43.
- LI Chenjia. Analysis of enhanced heat dissipation by braking resistors [J]. Electric Drive for Locomotive, 1998(2): 43.
- 收稿日期:2023-06-13 修回日期:2023-08-03 出版日期:2024-03-10  
Received:2023-06-13 Revised:2023-08-03 Published:2024-03-10  
· 作者:霍长龙,高级工程师,15146967@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
- ~~~~~
- (上接第 129 页)
- ZHOU Jianbo, YANG Ziyue, XU Peng. Analysis of soil arching effect of soldier pile and optimal pile spacing [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021, 49(9): 25.
- [5] 赵晓彦, 吴兵, 李登峰, 等. 考虑桩间水平土拱效应的边坡桩间墙组合结构受力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 811.
- ZHAO Xiaoyan, WU Bing, LI Dengfeng, et al. Load calculation method for retaining wall between piles considering horizontal soil arching effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 811.
- [6] 张玲, 陈金海, 赵明华. 考虑土拱效应的悬臂式抗滑桩最大桩间距确定[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4497.
- ZHANG Ling, CHEN Jinhai, ZHAO Minghua. Maximum cantilever anti-slide piles spacing determination with consideration of soil arching effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4497.
- [7] 李登峰, 赵晓彦, 胡卸文, 等. 抗滑桩截面尺寸对土拱性状的影响[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 484.
- LI Dengfeng, ZHAO Xiaoyan, HU Xiewen, et al. Influence of sectional dimension of stabilizing piles on soil arching characteristics [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 484.
- [8] 弗洛林. 土力学原理: 第一卷[M]. 同济大学土力学及地基基础教研室, 译. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- FLORIN B A. Principles of soil mechanics; Vol. 1 [M]. Department of Soil Mechanics and Foundation, Tongji University, trans. Beijing: China Industry Press, 1965.
- [9] 李同林, 殷绥域. 弹塑性力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.
- LI Tonglin, YIN Suiyu. Elastic-plastic mechanics [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2006.
- [10] 徐秉业, 王建学. 弹性力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- XU Bingye, WANG Jianxue. Elastic mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- 收稿日期:2023-03-25 修回日期:2023-07-03 出版日期:2024-03-10  
Received:2023-03-25 Revised:2023-07-03 Published:2024-03-10  
· 作者:吴行州,高级工程师,19953124369@163.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
- ~~~~~

## “市域(郊)铁路发展联合研究中心”揭牌

2024 年 1 月 30 日,国家铁路局规划与标准研究院和中铁上海设计院集团有限公司签订了共建“市域(郊)铁路发展联合研究中心”框架协议并举行了揭牌仪式。该联合研究中心将以科技创新为驱动、以人才培养为核心、以解决问题为导向,开展规划设计、建造施工、运营管理等领域内的基础理论研究、应用技术开发、标准制修订、产品研发等工作,共同打造具有行业影响力的综合性研究中心,为行业发展提供前瞻性、系统性、创新性的智库支撑。

(来源:中铁上海设计院集团有限公司)