

无温度传感器下地铁车辆制动电阻温度 在线监测方法*

王树宾

(中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春)

摘要 [目的]为实现无温度传感器下地铁车辆制动电阻的实时温度监测,提出一种无需额外安装传感器的新型制动电阻温度估算方法。[方法]对制动电阻结构和散热过程进行分析,建立由制动电阻单元及其冷却域构成的控制体温度模型,基于能量守恒定律与牛顿冷却定律构建制动电阻单元温度及控制体内冷却空气平均温度方程组,根据制动电阻阻值与温度的关系不断更新制动电阻发热功率并迭代计算,得到制动电阻的实时温度。通过有限元热仿真得到稳态和瞬态下的制动电阻温度分布,对新型制动电阻温度估算方法进行验证。[结果及结论]基于直流牵引网电压与斩波电路占空比计算制动电阻发热功率,无需额外安装传感器,可实现对硬件的纯软件替代。该方法与制动电阻温度估算算法相结合,提高了制动电阻温度估算的可靠性。新型制动电阻温度估算方法得到的制动电阻温度与基于 Fluent 软件的热仿真结果基本一致,其相对误差在可接受范围内,证明了该估算方法的有效性。制动电阻温度实时估算方法可实现制动电阻温度在线监测,并根据实时监测的制动电阻温度值调节地铁车辆电制动指令值,提高牵引传动系统的可靠性及安全性。

关键词 地铁车辆; 制动电阻; 温度在线监测; 散热分析; 发热功率计算; 有限元热仿真

中图分类号 U270.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.039

On-line Monitoring Method for Metro Vehicle Braking Resistor Temperature without Temperature Sensor

WANG Shubin

(CRRC Changchun Railway vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] To achieve real-time temperature monitoring of BR (braking resistor) in metro vehicles without temperature sensor, a new temperature estimation method for this purpose without additional sensors is proposed. [Method] By analyzing the BR structure and heat dissipation process, a

control body temperature model composed of BR unit and its cooling domain is established. Based on the law of energy conservation and Newton's law of cooling, equations for the temperature of BR unit and the average temperature of the cooling air within the control body are constructed. According to the relationship between braking resistor value and temperature, the BR heating power is continuously updated and iterative calculations are performed to obtain BR real-time temperature. Finite element thermal simulations are conducted to obtain the BR temperature distribution under steady-state and transient conditions, validating the new BR temperature estimation method.

[Result & Conclusion] By calculating BR heating power based on the DC (direct current) traction network voltage and the duty cycle of the chopper circuit, a software-only solution to substitute hardware is achieved, avoiding the need for additional sensors. This method, combined with the BR temperature estimation algorithm, enhances the reliability of BR temperature estimation. The temperature obtained using this new estimation method is consistent with the thermal simulation results based on Fluent software, with relative errors within acceptable limits, proving the effectiveness of the proposed method. The real-time BR temperature estimation method enables BR temperature on-line monitoring and can adjust the electric braking force command values of metro vehicles based on real-time temperature monitoring, thereby improving the reliability and safety of the traction drive system.

Key words metro vehicle; braking resistor; temperature on-line monitoring; heat dissipation analysis; heating power calculation; finite element thermal simulation

0 引言

地铁车辆制动时制动能量被邻近的其他列车吸收或反馈给直流牵引网,受牵引网的电压限制,多余的制动能量通过制动电阻消耗,使制动电阻温

* 动车组与机车牵引与控制国家重点实验室开放基金项目(2021YJ281)

度升高。由于地铁站间距较短,列车需频繁制动,制动过程中将产生大量制动能量,使得制动电阻的温升现象更为显著。制动电阻温度过高可能导致制动电阻损坏、再生制动失效等问题^[1],因此需要实时监测制动电阻温度,避免因其损坏导致直流牵引网电压过高,进而影响列车运行安全。

目前国内外对于制动电阻的温度研究主要集中在制动电阻的热设计^[2-3]、传热系数和冷却优化^[4]等方面,针对温度在线监测的研究较少。文献[5]利用牛顿冷却定律建立了制动电阻温度的差分方程。文献[6]基于能量守恒定律对电力机车制动电阻的温升进行定量计算。文献[7]利用集总参数法计算制动电阻的瞬态温升,并在计算中考虑热辐射的影响。

本文提出了一种基于模型的制动电阻温度在线监测方法,依据制动电阻的发热与散热过程建立制动电阻温度在线监测模型。该模型仅凭地铁车辆原有的传感器就可实时估算制动电阻温度,实现制动电阻温度在线监测。

1 制动电阻散热分析

1.1 制动电阻器结构

制动电阻器主要由箱体外壳、制动电阻单元、冷却风道和风机组成。制动电阻器由多个并列放置的制动电阻单元构成,每个制动电阻单元又由多个平行的电阻片即电阻元件构成。电阻片上设有压筋,能够增强通风散热,减小电阻片的热变形。本文研究的制动电阻器采用强迫风冷的冷却方式,该制动电阻器由6个并列放置的制动电阻单元构成,制动电阻器与制动电阻单元结构如图1所示。

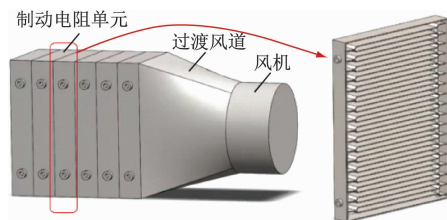


图1 制动电阻器及制动电阻单元结构

Fig. 1 Braking resistor and its unit structure

1.2 制动电阻散热过程分析

列车运行过程中,再生制动产生的电能通过制动电阻转换为热能消耗,导致制动电阻的温度快速上升。制动电阻温度与周围冷却空气的温度之差

使得制动电阻通过热传导、热对流和热辐射的方式与冷却空气进行热交换,其中最主要的热交换方式是对流换热。

冷却空气在制动电阻器内部的流动如图2所示。冷却风机产生冷却风的风向与制动电阻单元的电阻片表面平行,冷却空气流过每个制动电阻单元时由于吸收了热量而导致自身温度升高,流速也发生变化,随后又流过下一个制动电阻单元。因此,不同空间位置处的制动电阻单元的温度不同,离进风口越远,制动电阻单元温度越高,靠近出风口位置的制动电阻单元温度最高。

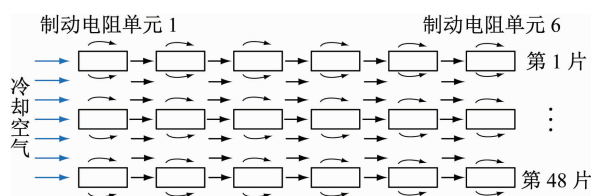


图2 制动电阻器内部冷却空气流动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cooling air flow inside the braking resistor

2 制动电阻瞬时温度估算方法

建立制动电阻温度模型,根据能量守恒定律和牛顿冷却定律实现制动电阻瞬时温度估算算法,实时监测制动电阻温度。

2.1 控制体温度模型

由于垂直于冷却空气流向的同一制动电阻单元的电阻元件冷却情况相同,其温度变化也基本相同,因此每个制动电阻单元可以只取其中一个电阻元件进行研究。根据毕渥数准则,将电阻元件温度视为均匀一致,原来连续分布的质量与热容可集中到一个点上。因此,整个制动电阻可等效为沿冷却空气流向的一层电阻元件,且电阻元件温度一致。

将每个电阻元件及其所在的流体域部分视为一个控制体,控制体内空气温度随时间变化如图3所示。

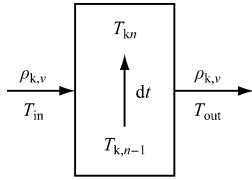
2.2 制动电阻单元温度估算算法

冷却空气流过电阻元件表面时,与之发生对流换热,该过程可描述为:

$$Q_{kn} = \int_0^t hA(T_{dn} - T_{kn})dt \quad (1)$$

式中:

Q_{kn} ——冷却空气吸收的热量;



注: T_{in} —冷却空气进口温度; T_{out} —冷却空气出口温度; v —冷却空气流速; dt —时间间隔; ρ_k —冷却空气密度; T_{kn} —当前时刻冷却空气的温度; $T_{k,n-1}$ —上一时刻冷却空气的温度。

图3 控制体内空气温度变化示意图

Fig.3 Schematic diagram of air temperature variation inside the control body

h ——对流传热系数;

A ——制动电阻散热面积;

T_{dn} ——电阻元件温度。

一方面电阻元件产生的热量使其自身温度升高,另一方面冷却空气与电阻元件对流传热使其温度下降。电阻元件的内能增量可描述为:

$$Q_{dn} = \rho_d c_d V_d dT_{dn} \quad (2)$$

式中:

Q_{dn} ——电阻元件吸收热量;

ρ_d ——电阻元件密度;

c_d ——电阻元件比热容;

V_d ——制动电阻体积;

dT_{dn} ——电阻元件单位时间内温度变化。

设电阻元件在第 n 个单位时间间隔的初始时刻温度为 $T_{d,n-1}$,由式(1)和式(2)可得:

$$T_{dn} = \left(T_{kn} + \frac{P_{br}}{hA} \right) - \left(T_{kn} - T_{d,n-1} + \frac{P_{br}}{hA} \right) e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} \quad (3)$$

式中:

P_{br} ——制动电阻吸收的电功率。

将式(3)代入式(1)中可得 dt 时间内冷却空气与电阻元件的换热量为:

$$Q_{kn} = \int_{dt} hA(T_{dn} - T_{kn})dt = P_{br}dt + \rho_d c_d V_d \left(T_{kn} - T_{d,n-1} + \frac{P_{br}}{hA} \right) (e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} - 1) \quad (4)$$

制动电阻单元在具有一定温度和速度的冷却空气中冷却,将每个制动电阻单元所在的流体域部分视为一个控制体,则该控制体的体积 $V_k = vSdt$ (S 为风道横截面面积)。对控制体内的冷却空气运用能量守恒定律,即 dt 时间内流入控制体的热量减去流出控制体的热量等于控制体内空气内能的增量

减去冷却空气与电阻元件的换热量,且 T_{out} 与 T_{kn} 相等,可得冷却空气温度 T_{kn} 为:

$$T_{kn} = \frac{\rho_k c_k v S T_{in} dt + \rho_k c_k V_k T_{k,n-1} + Q_{kn}}{\rho_k c_k v S dt + \rho_k c_k V_k} \quad (5)$$

式中:

c_k ——冷却空气比热容。

将式(4)代入式(5)可得控制体内冷却空气的平均温度 T_{ka} 为:

$$T_{ka} = \frac{\rho_k c_k (v S T_{in} dt + V_k T_{k,n-1}) + P_{br} dt}{(\rho_k c_k v S dt + \rho_k c_k V_k - \rho_d c_d V_d (e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} - 1))} + \frac{\rho_d c_d V_d \left(-T_{d,n-1} + \frac{P_{br}}{hA} \right) (e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} - 1)}{(\rho_k c_k v S dt + \rho_k c_k V_k - \rho_d c_d V_d (e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} - 1))} \quad (6)$$

设定电阻元件和冷却空气的初始温度值,将电阻元件和冷却空气的热物性参数、冷却风道的结构参数及电阻元件发热功率代入上述方程即可求得制动电阻单元和冷却空气的瞬态温度。

2.3 制动电阻温度估算算法

由于冷却空气温度随空间变化,与电阻元件的对流传热强弱程度不同,因此不同空间位置处的制动电阻单元瞬态温度不同。根据制动电阻单元在空间上的温度联系可建立整个制动电阻的瞬态温度估算算法。

用 i 作为控制体元编号,整个制动电阻包含 6 个控制体元, $i=1,2,3,\dots,6$ 。根据式(3),第 i 个控制体单元、第 n 个单位时间间隔、第 j 个制动电阻单元的温度 $T_{dn,i,j}$ 为:

$$T_{dn,i,j} = \left(T_{kn,i,j} + \frac{P_{br}}{hA} \right) - \left(T_{kn,i,j} - T_{d,n-1,i,j} + \frac{P_{br}}{hA} \right) e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} \quad (7)$$

冷却空气的温度沿流向逐渐升高且不断流动到下一个控制体,因此,第 i 个控制体元的进口温度 $T_{in,i}$ 等于第 $i-1$ 个控制体元的出口温度 $T_{kn,i-1}$,即 $T_{in,i} = T_{kn,i-1}$ 。根据式(6),第 n 个时间间隔、第 i 个控制体元内冷却空气的平均温度为:

$$T_{ka,i} = \frac{\rho_k c_k v S T_{kn,i-1} dt + \rho_k c_k V_k T_{k,n-1,i} + P_{br} dt}{(\rho_k c_k v S dt + \rho_k c_k V_k - \rho_d c_d V_d (e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} - 1))} + \frac{\rho_d c_d V_d \left(-T_{d,n-1,i} + \frac{P_{br}}{hA} \right) (e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} - 1)}{(\rho_k c_k v S dt + \rho_k c_k V_k - \rho_d c_d V_d (e^{-dt(hA)/(\rho_d c_d V_d)} - 1))} \quad (8)$$

对各个制动电阻单元建立式(7)和式(8)方程组并迭代求解,即可得到整个制动电阻的瞬时温度。

在 MATLAB 软件中编程计算每个制动电阻单元和控制体内冷却空气瞬态温度,算法流程如图 4 所示。

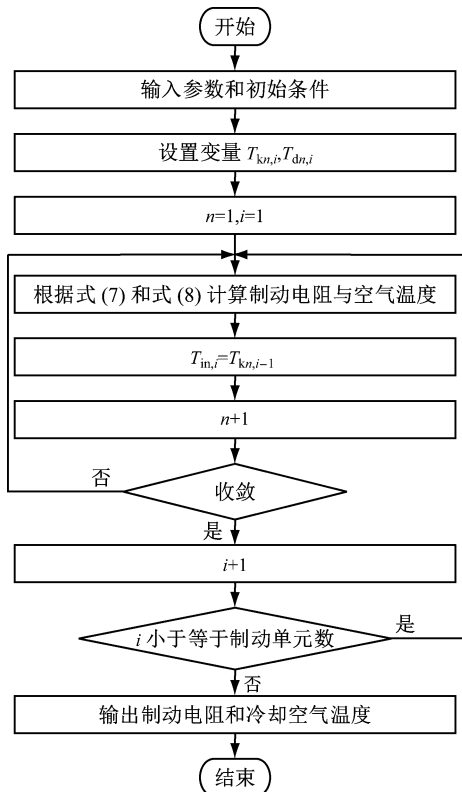


图 4 制动电阻和冷却空气瞬态温度计算流程图

Fig. 4 Flow chart of transient temperature calculation of braking resistor and cooling air

3 电阻发热功率新型计算方法

制动电阻通过制动斩波器 IGBT(绝缘栅双极晶体管)连接至直流牵引网,如图 5 所示。当再生制动能量没有被完全吸收而导致牵引网电压上升至超过其限制值时,IGBT 开通,制动电阻吸收多余制动能量;否则,制动电阻不工作。本文提出了一种无需电流传感器,仅依靠列车原有的直流母线电压传感器即可计算制动电阻发热功率的新型方法,该方法可以省去电流传感器的安装,提高了制动电阻温度估算的可靠性。制动电阻发热量为:

$$Q_{pn} = \int_0^t P_{br} dt = D \frac{U_{DC}^2}{R_{br}} dt \quad (9)$$

式中:

Q_{pn} ——制动电阻发热量;

U_{DC} ——直流母线电压值;

D ——制动电阻斩波占空比;

R_{br} ——制动电阻阻值。

制动电阻实时发热功率与温度估算流程如图 6 所示。该方法有效结合了制动电阻实时温度估算与发热功率计算。制动电阻阻值与温度的关系为:

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(T_t - T_0)] \quad (10)$$

式中:

R_t —— t 时刻的电阻值;

R_0 ——室温下的电阻值;

T_t —— t 时刻的电阻温度;

T_0 ——环境温度;

α ——定子和转子绕组材料温度系数。

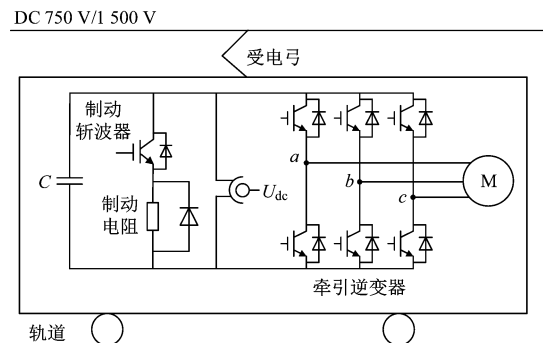


图 5 制动电阻连接示意图

Fig. 5 Schematic diagram of braking resistor connection

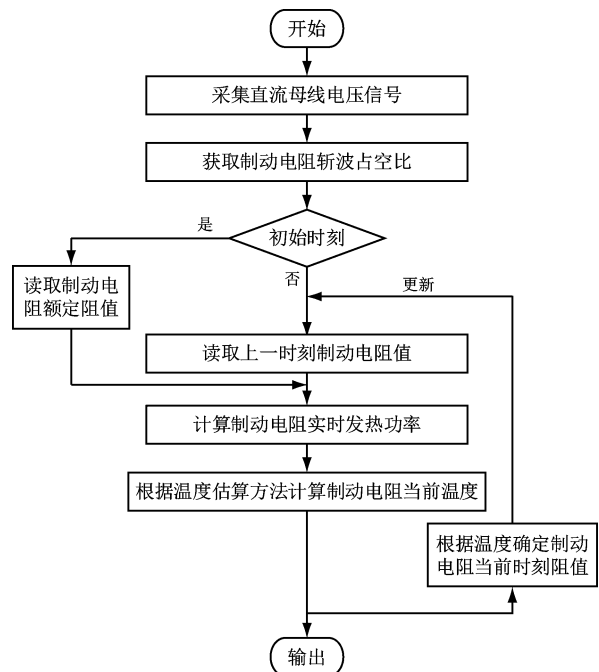


图 6 制动电阻实时发热功率与温度估算流程图

Fig. 6 Flow chart of braking resistor real-time heating power and temperature estimation process

4 温度估算结果及分析

4.1 稳态温度估算与验证

制动电阻单元依次编号为1—6。设制动电阻和冷却空气初始温度为20℃,当输入制动功率为300 kW时,制动电阻单元和控制体内冷却空气的稳态温度估算结果如图7所示。

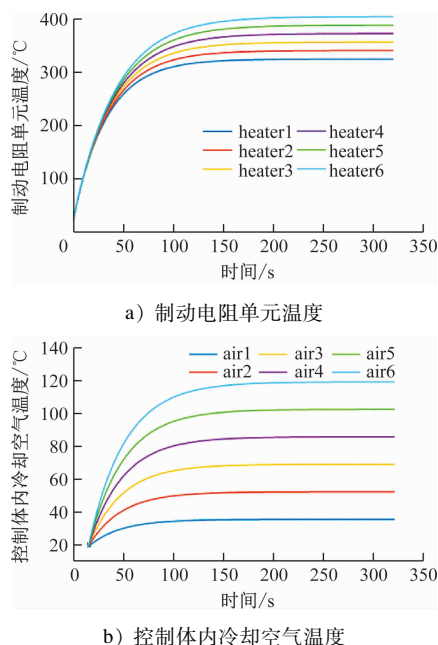


图7 输入制动功率300 kW时稳态温度估算结果

Fig.7 Estimation results of steady-state temperature with 300 kW braking power input

由估算结果可知,冷却空气温度沿流向逐渐升高,对于整个制动电阻来说,靠近入风口的电阻单元对流换热较强,因此温度较低;靠近出风口的电阻单元对流换热弱,因此温度较高,与前文分析一致。对于单个控制体来说,制动功率使得电阻单元和冷却空气温度逐渐升高,当对流换热达到平衡时,电阻单元和冷却空气的温度保持不变。

在流体仿真软件 Ansys Fluent 环境建立制动电阻及其流体域的简化物理模型,在相同输入下进行热仿真,得到制动电阻及其流体域的温度分布如图8所示。

通过本文温度估算算法得到的制动电阻最高稳态温度为306.52℃,通过 Ansys Fluent 软件热仿真得到制动电阻最高稳态温度为326.05℃,两者相对误差为5.9%。

分别输入制动功率为50 kW、100 kW、200 kW、300 kW、400 kW和500 kW,通过温度估算算法和

Ansys Fluent 软件热仿真得到的制动电阻最高稳态温度以及相对误差如表1所示。

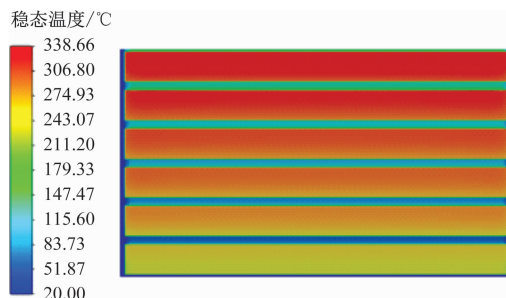


图8 制动电阻和冷却空气稳态温度

Fig.8 Steady-state temperature of braking resistor and cooling air

表1 不同输入制动功率下的制动电阻稳态温度与相对误差

Tab.1 Steady-state temperature and relative error of braking resistor with different braking power inputs

输入功率/kW	估算稳态温度/℃	热仿真稳态温度/℃	相对误差/%
50	70.33	71.01	0.96
100	117.49	122.02	3.71
200	211.92	224.03	5.40
300	306.52	326.05	5.99
400	401.21	428.06	6.27
500	495.95	530.08	6.44

4.2 瞬态温度估算与验证

输入地铁列车运行时的一次完整的制动功率,如图9所示。制动电阻和冷却空气初始温度设为20℃,估算得到制动电阻最高瞬态温度如图10所示。

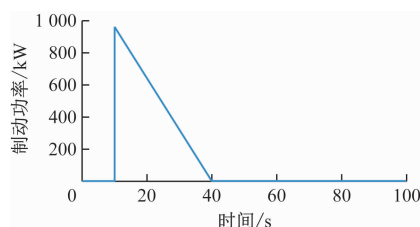


图9 地铁列车运行时一次完整制动过程的制动功率

Fig.9 Braking power of a complete braking process during metro train operation

由估算结果可知,制动电阻最高温度出现在31.4 s,最高温度约为296.52℃。

在 Ansys Fluent 软件环境中进行瞬态热仿真,

每隔 1 s 记录一次得到的制动电阻瞬态温度,与本文估算算法得到的制动电阻瞬态温度进行比较,结果如图 11 所示。

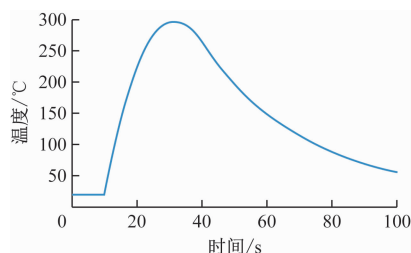


图 10 制动电阻最高瞬态温度

Fig. 10 Maximum transient temperature of braking resistor

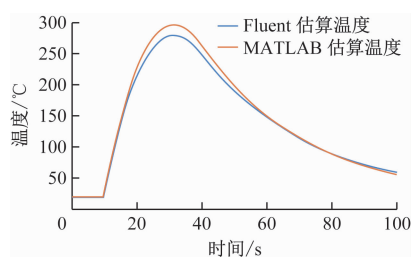


图 11 制动电阻瞬态温度估算结果对比

Fig. 11 Comparison of braking resistor transient temperature estimation results

由上述比较结果可以看出,本文方法估算得到的制动电阻瞬态温度与 Ansys Fluent 软件热仿真结果变化趋势一致,两者相对误差最大为 6.23%,能够满足工程应用的需求,证明了本文估算算法的有效性。

5 结语

本文提出了一种无温度传感器地铁车辆制动电阻实时温度估算方法,可实现在线监测制动电阻温度。建立了一种制动电阻发热功率新型计算方法,将制动电阻阻值随温度变化的关系与温度估算相结合,无需额外安装传感器且温度估算值更为精确。通过该估算算法得到的制动电阻温度与基于 Ansys Fluent 软件的热仿真结果基本一致,两者相对误差在可接受范围内,证明了该算法的有效性。本文估算方法可用于地铁车辆制动电阻温度实时监测,并利用监测到的制动电阻温度提供及时有效的预警或保护,具有重要的工程应用意义;可根据

实时监测的制动电阻温度值调节地铁车辆电动力指令值,提高牵引传动系统的可靠性及安全性。

参考文献

- [1] 刘海. 西安地铁 2 号线车载制动电阻过温故障研究[J]. 现代城市轨道交通, 2018(10): 31.
LIU Hai. Research on over-temperature protection of vehicle brake resistance for Xi'an Metro Line 2[J]. Modern Urban Transit, 2018(10): 31.
- [2] 丁杰,唐玉兔. 轨道车辆制动电阻的 CFD 模拟[J]. 机车电传动, 2012(4): 37.
DING Jie, TANG Yutu. CFD simulation for brake resistor of rail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(4): 37.
- [3] LEE D D, KANG H I, SHIM J M. Thermal analysis and temperature characteristics of a braking resistor for high-speed trains for changes in the braking current[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2015, 67(6): 975.
- [4] 孙晓霞,王义春,邵春鸣,等. 混合动力车用制动电阻散热性能试验研究[J]. 车辆与动力技术, 2015(3): 25.
SUN Xiaoxia, WANG Yichun, SHAO Chunming, et al. Experimental research on braking resistor heat dissipation performance of hybrid electric vehicle[J]. Vehicle & Power Technology, 2015(3): 25.
- [5] 高吉磊,郑雪洋,李岩磊,等. 牵引变流器限压电阻选型及保护策略研究[J]. 机车电传动, 2021(2): 87.
GAO Jilei, ZHENG Xueyang, LI Yanlei, et al. Research on selection and protection strategy of voltage-limiting resistor in traction converters[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(2): 87.
- [6] 刘严,石建成,邬航东. 制动电阻通风及温升计算探讨[J]. 电力机车技术, 2002, 25(2): 11.
LIU Yan, SHI Jiancheng, WU Hangdong. Calculation of ventilation and temperature-rise for brake resistance[J]. Technology For Electric Locomotives, 2002, 25(2): 11.
- [7] 唐邕浦,彭自坚. 基于数值计算的制动电阻元件表面传热系数研究[J]. 机车电传动, 2017(3): 62.
TANG Yongpu, PENG Zijian. Research on the surface heat transfer coefficient of brake resistor element based on numerical method[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(3): 62.

· 收稿日期:2023-06-05 修回日期:2023-09-15 出版日期:2024-07-10

Received:2023-06-05 Revised:2023-09-15 Published:2024-07-10

· 通信作者:王树宾,正高级工程师,wangshuibin.ck@crrecg.cc

· ©《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