

城市轨道交通车辆电气制动能量 建模及仿真

师 蔚, 方 宇

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)



作者简介: 师 蔚 (1981-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为城市轨道交通车辆电力传动与控制。

摘 要: 通过分析城轨车辆在电气制动过程中发生再生制动及电阻制动的条件, 并且根据车辆的编组、线路、载重、运行策略、运行图、牵引供电等基本因素, 在单车牵引计算模型及多车运行的牵引供电网络模型的基础上, 建立了城轨车辆电气制动能量分布模型, 并进行了实例仿真计算。仿真计算结果表明, 在相同的线路及车辆条件下, 车辆发车间隔为 180 s 时, 再生制动能量占总电气制动能量的比率为 80.1%, 随着发车间隔的增大, 该比率逐渐减小; 当发车间隔在 900 s 时, 电气制动能量绝大多数消耗在制动电阻上。该制动能量分布模型可以为各种城市轨道交通制动能量回收方法提供理论支持, 还可以为各种制动能量回收装置提供装置选型等方面的依据。

关键词: 城市轨道交通车辆; 再生制动; 电阻制动; 能量回收; 仿真

中图分类号: U260.13*8; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)01-0047-05

Model Building and Simulation of the Electric Brake Energy of Urban Rail Vehicle

SHI Wei, FANG Yu

(College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: By analyzing conditions that urban rail vehicles in the traction power supply network occur the regenerative braking or resistor braking in electric braking process, and depending on the grouping of vehicles, lines, load, run strategy, operation plans, traction power supply and other basic conditions, based on single vehicle computing model and multi-vehicles power supply network model, electric braking energy distribution model were established and simulation were carried out. Simulation results showed that in the same line and vehicle conditions, the ratio of regenerative braking energy occupying the total braking was 80.1% when vehicle interval was 180 seconds, with the interval increases the ratio decrease. When the interval was 900 seconds the electric braking energy was almost consumed by braking resistor. The braking energy distribution model can provide theoretical support for a variety of urban rail transit braking energy recovery methods, but also offer foundation for selection of braking energy recovery device.

Key words: urban rail vehicle; regenerative braking; resistor braking; energy recovery; simulation

0 引言

频繁的启动和制动是城市轨道交通车辆运行的最大特点。城市轨道交通车辆制动以电气制动为主, 机械制动为辅。当车辆进站前开始制动时, 牵引电机进入发电工况, 通过电气制动使列车减速。如果此时牵引网电压小于最高允许电压, 则车辆向牵引网反馈电能并

供其他列车吸收使用, 实现再生制动; 当牵引网电压高于允许最高电压值, 车辆制动电能不再回馈给牵引网, 而通过车载电阻制动方式以热能方式释放。在电阻制动中不仅浪费了电能, 并且由此产生的热量散发到地铁隧道内或空气中, 使隧道内温度逐年升高, 这给列车的运行带来诸多安全隐患。在当前国际和国内能源短缺时期, 针对电阻制动带来的问题, 国内外研究人员纷纷着手研制各种车辆电阻制动能量回收利用装置, 主要方式包括将车辆制动能量逆变至中压网络、低压负荷、蓄电池储能、电容储能、高速飞轮储能、低速飞轮储能等^[1-6]。

收稿日期: 2010-06-28; 收修改稿日期: 2010-07-20

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (08ZR1409000); 上海市教育委员会重点学科建设项目 (J51401)

车辆再生制动和电阻制动的能量分配模型则是研究各种制动能量回收方法的理论依据。文献[7]利用 Simulink 对城市轨道交通车辆驱动和储能系统进行了建模仿真,但是在数学建模中,只考虑了车辆的运行状态和牵引电机特性,没有考虑再生制动与电阻制动分配比例。文献[8]构建了城市轨道交通供电系统模型并进行了仿真,但并没有考虑再生制动对该模型的影响。上述理论研究均没有全面考虑城市轨道交通多车线路运行和制动的复杂工况,数学建模和仿真研究不够全面。本文主要特点在于分析了单车牵引能量模型,并充分考虑车辆在牵引网络中再生制动发生条件,在多车运行的牵引供电网络模型基础上,首次对城市轨道交通车辆电气制动能量进行建模及仿真。

1 城市轨道交通车辆能耗分析

城市轨道交通车辆用电主要分为辅助用电及牵引主电路用电两部分,如图1所示。辅助用电主要供给车辆照明、通风、空调、空气压缩机、控制电路等部分,这部分用电功率相对恒定;而牵引主电路与牵引网功率交换大小则由列车处于何种工况决定,必须首先分析单车牵引能耗。

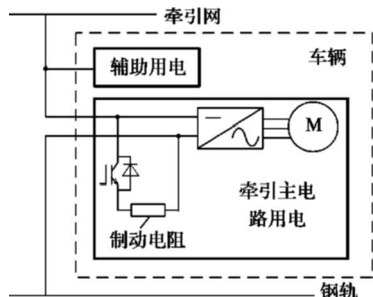


图1 城市轨道交通车辆用电组成示意图

单车牵引能耗主要根据车辆的编组、牵引特性、线路等基本参数的列车牵引计算得到,不考虑线路其他列车情况。牵引计算模型中将列车视作均匀质点链,不考虑列车进行紧急制动情况,主要使用电气制动,当速度低于一定速度(计算中定为10 km/h)时,列车通过机械制动实现定位停车,此时列车牵引功率为零;电气制动阶段不考虑车辆是电阻制动还是再生制动。运行策略则使用最接近城市轨道交通车辆实际运行的定时约束条件下的节能策略,即通过启动阶段使用最大牵引力,在中间过程充分利用惰行运行,制动阶段用较大制动力制动,通过调节在停车制动阶段惰行点及速度波动范围,设计了定时约束下城市轨道交通节能牵引算法并进行仿真计算。仿真结果记录牵引功率-时间曲线 $P_{tr}(t)$ 、距离-时间曲线 $S(t)$ 。仿真结果的牵引功率 P_{tr} 并不考虑车辆是进行再生还是进行电阻制动,仅考虑当列车处于牵引工况时,牵引功率 P_{tr} 为正;列车处于制动工况时牵引功率 P_{tr} 为负。

为分析牵引主电路与牵引网能量交换特性,将列车工况分为牵引、惰行、再生制动、电阻制动、机械制动几种情况。列车与牵引网总交换功率计算公式为:

$$P = P_{au} + P_m \quad (1)$$

式中:

- P_{au} —— 车辆辅助用电功率;
- P_m —— 车辆牵引主电路与牵引网交换功率;
- P —— 列车与牵引网总的交换功率。

P_m 的值主要取决于列车处于何种工况。当列车处于牵引工况时,牵引主电路从牵引网吸收功率,此时 P_m 为正,牵引主电路与牵引网的交换功率 P_m 等于牵引功率 P_{tr} ,即 $P_m = P_{tr}$;当列车处于惰行与机械制动工况时,牵引主电路不向牵引网吸收或释放电能, P_m 为零;当列车处于电气制动工况并满足再生制动条件时,牵引主电路向牵引网释放电能, P_m 为负,此时 $P_m = P_{tr}$,牵引功率 P_{tr} 取绝对值,计入再生制动功率 P_{rg} ;当列车处于电气制动工况并不满足再生制动条件,车辆进入电阻制动,牵引主电路不与牵引网发生能量交换, P_m 为零,将此时牵引功率 P_{tr} 取绝对值记入电阻制动功率 P_{rs} 。

2 城市轨道交通制动能量模型分析

城市轨道交通列车在电气制动阶段到底是进行再生制动还是进行电阻制动,主要取决于制动瞬时的牵引网电压,该电压的大小并不是完全由本列车的运行工况决定,而是由牵引供电网络中的所有车辆、变电所等牵引供电系统共同决定。因此,在分析城市轨道交通制动能量分布模型时必须在分析单车能量模型的基础上建立整个牵引供电系统模型。

2.1 城市轨道交通牵引供电系统组成及工作原理

城市轨道交通牵引供电系统组成如图2所示,主要包括牵引变电所、馈电线、接触网、走行轨及回流线等。直流牵引变电所将三相高压交流电变成适合城市轨道交通车辆取用的低压直流电;馈电线将牵引变电所的直流电送到接触网上;接触网是沿列车走行轨架设的特殊供电线路,列车车辆通过其受流器与接触网的直接接触而获得电能;走行轨道构成牵引供电电路的一部分;回流线将轨道回流引回牵引变电所。

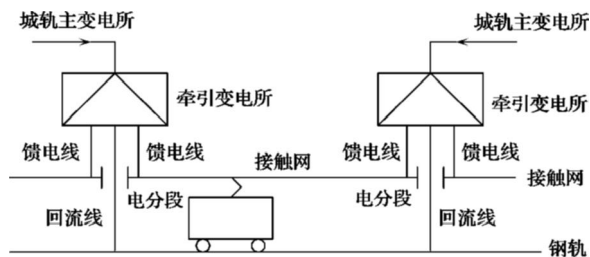


图2 城市轨道交通牵引供电系统示意图

2.2 牵引供电模型简化

列车车辆在运行过程中,列车具体位置是在不断变化的,因此城市轨道交通牵引供电系统的模型与一般的电路不同,是一个复杂的时变网络。由于运营过程中各种不确定性因素的存在,城市轨道交通牵引供电网络的精确模型是难以获得和求解的,为了对牵引网进行分析,需要根据城市轨道交通运营特点将此系统进行简

化, 并利用简化模型进行分析。

1) 接触网和轨道

将接触网和轨道等效为电阻, 并认为接触网及轨道电阻在长度方向均匀分布, 即接触网及轨道电阻为车辆所在位置的线性函数。

2) 直流牵引变电所

在对直流侧牵引网进行分析时, 仅研究其外特性, 所以可以将直流变电所等效为直流电压源 E_1 和内阻 R_0 的串联。

3) 列车车辆

将列车车辆等效为理想电流源模型, 认为列车在某一时刻的取流值由牵引计算结果和运行图决定。

2.3 牵引网络拓扑模型

有了上述的局部等效假定后再进行整个牵引网络的模型分析。当今城市轨道交通大多采用固定发车间隔的运营模式, 同时区别对待运营高峰和低谷时段, 以求达到满足实际运力的需求。一般而言, 发车的时间间隔一旦固定, 在整个线路上运行的列车数目也就已经固定, 这样这个网络结构就相对固定下来了。此外, 网络中与计算关系密切的各主要模型的参数都是随时间变化的周期函数。因此, 牵引网模型的建立和求解只需分析1个周期内的情况, 图3是全线设有4个牵引变电站的城市轨道交通系统牵引网拓扑结构模型示意图。

可以将图3所示牵引网模型拓扑结构用节点电压方程表示:

$$\left\{ \begin{aligned} &\left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{22}} \right) U_{11} - \frac{1}{R_{12}} U_{12} - \frac{1}{R_{22}} U_{22} = \frac{E_1}{R_{11}} \\ &-\frac{1}{R_{12}} U_{11} + \left(\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} \right) U_{12} - \frac{1}{R_{13}} U_{13} = -i_{12} \\ &\dots \\ &-\frac{1}{R_{68}} U_{67} + \left(\frac{1}{R_{68}} + \frac{1}{R_{69}} \right) U_{68} = i_{63} \\ &-\frac{1}{R_{67}} U_{66} + \left(\frac{1}{R_{67}} + \frac{1}{R_{68}} \right) U_{67} - \frac{1}{R_{68}} U_{68} = i_{64} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式(2)写成矩阵形式为 $GU=I$, 即:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{22}} & -\frac{1}{R_{12}} & \dots & -\frac{1}{R_{22}} \\ -\frac{1}{R_{12}} & \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} & -\frac{1}{R_{13}} & \\ \dots & \dots & \dots & \\ -\frac{1}{R_{67}} & \frac{1}{R_{67}} + \frac{1}{R_{68}} & -\frac{1}{R_{68}} & \\ -\frac{1}{R_{68}} & \frac{1}{R_{68}} + \frac{1}{R_{69}} & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{12} \\ U_{13} \\ \dots \\ U_{22} \\ \dots \\ U_{67} \\ U_{68} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{R_{11}} \\ -i_{12} \\ \dots \\ i_{63} \\ i_{64} \end{bmatrix} \quad (3)$$

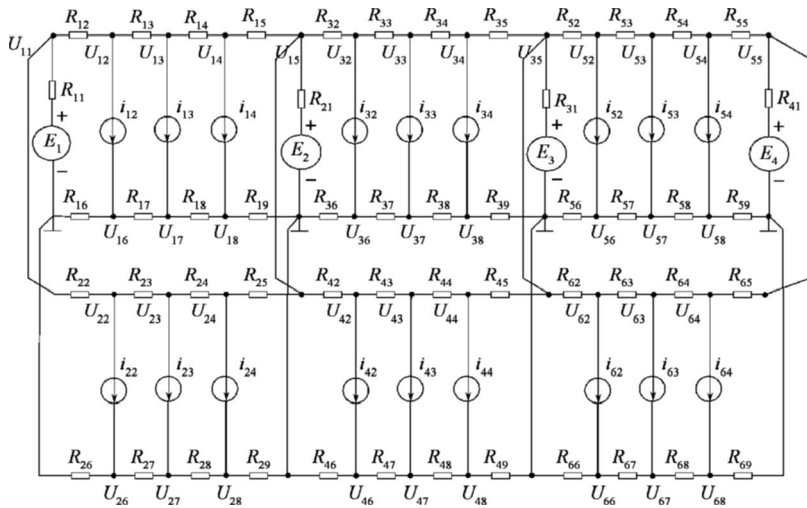


图3 城轨交通系统牵引网拓扑结构模型示意图

2.4 制动能量分布模型

通过上述城市轨道交通系统牵引网络拓扑模型的建立, 可以扫描任一时刻直流牵引供电网络, 建立系统导纳矩阵 G , 根据节点电压法, 通过高斯消去法求解式(3), 从而可以求得系统各节点电压。而节点电流向量 I 中包含列车等效的理想电流源, 并假设列车所在点供电电压为系统电压, 本研究中为1500V, 列车电流可以通过式(4)求得, 列车功率 P 即为列车与牵引网总的交换功率, 由式(1)计算得到。

$$I=P/U \quad (4)$$

将式(4)求出的列车负载电流代入式(3), 获得新的列车所在点网压, 然后把新的列车所在点网压代入式(4), 更新列车所在点网压, 这样不断更新下去, 直到列车所在点网压偏差 ε 达到许可值, 本文 ε 取1V。当误差在0.01%以内时, 迭代停止, 具体求解列车节点电压流程如图4所示。

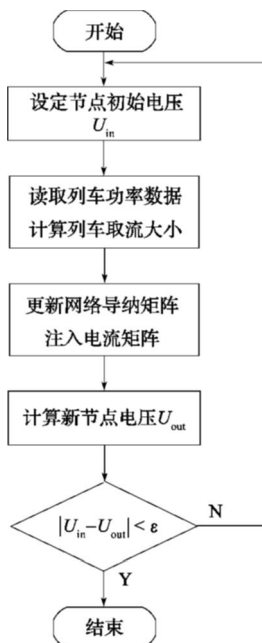


图4 直流牵引网络求解流程图

在分析了牵引网络模型的基础上, 根据列车实际运行时电阻制动与再生制动发生条件, 对上述牵引供电网络模型更新, 用来建立制动能量分配模型。

对上述牵引供电模型, 在程序中设定牵引网电压最大值 V_{limit} , 在本研究中该值设定为1800V。当列车所在牵引网压 $V \leq V_{limit}$ 时, 进行再生制动, 读取牵引计算曲

线 $P_{tr}(t)$, 计入再生制动功率 $P_{rg}=P_{tr}$; 当计算出节点的 $U > U_{limit}$ 时, 进行电阻制动, 与牵引网交换功率为该辅助功率, 读取牵引计算曲线 $P_{tr}(t)$, 计入电阻制动功率 $P_{rs}=P_{tr}$, 具体流程图如图5所示。

3 算例

本文列车制动能量分布模型通过 MATLAB / Simulink 软件进行仿真。以上海地铁3号线为例, 3号线现为6节编组交流传动车辆, 由法国阿尔斯通公司和南车浦镇车辆有限公司联合制造。选取运行负载为最恶劣的AW3 超载工况, 首先对列车全线进行基于定时约束下节能牵引算法的模拟牵引仿真计算。取龙漕路—漕溪路区间下行仿真结果显示, 该区段的

图5 列车制动能量建模流程图

表1 线路坡段数据

位置 / m	坡度 / ‰
2 934	2
3 170	-25
3 700	25
4 060	-2
4 224	-20

表2 线路曲线数据

位置 / m	限速 / km · h ⁻¹	曲线半径 / m
2 934	80	0
3 800	75	5 000
4 224	80	0

表2为该区间段内的线路曲线数据, 在定时86 s的时间段内运行。仿真结果时间-速度曲线如图6所示, 牵引功率-时间曲线 $P_{tr}(t)$ 及距离-时间曲线 $S(t)$ 如图7所示, 与实际车辆走行过程及功率消耗基本吻合。

通过单车牵引计算结果放入如图3所示的牵引网拓扑结构模型, 进行城市轨道交通车辆电气制动能量建模。当设定车辆的发车间隔为高峰时段最短发车间隔180 s时, 即牵引网拓扑结构模型每180 s循环1次, 所以设仿真时间为180 s。同理仿真了发车间隔为240 s的列车运行情况。

结果中取任意同一辆车前半段运行时间举例显示。当列车发车间隔为180 s情况下, 该车的牵引网电压-时间曲线及列车负载电流-时间曲线如图8(a)所示, 在该区段内的电气制动能量分配曲线如图8(b)所示;

发车间隔为240 s情况下, 该车的牵引网电压-时间曲线及车辆取流-时间曲线如图9(a)所示, 在该区段内的电气制动能量分配曲线如图9(b)所示。

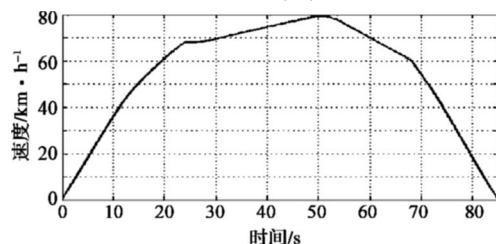


图6 速度-时间曲线仿真结果

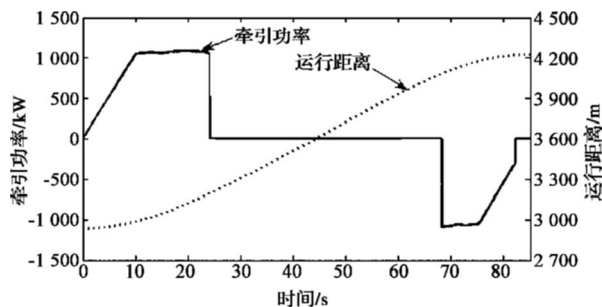
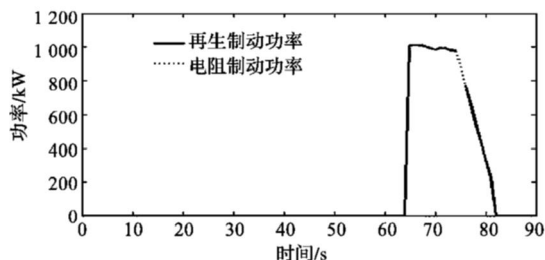
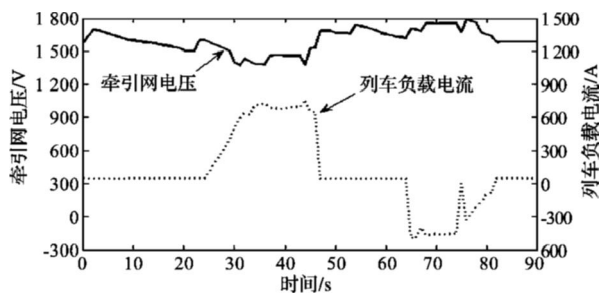


图7 牵引功率-时间及运行距离-时间曲线仿真结果

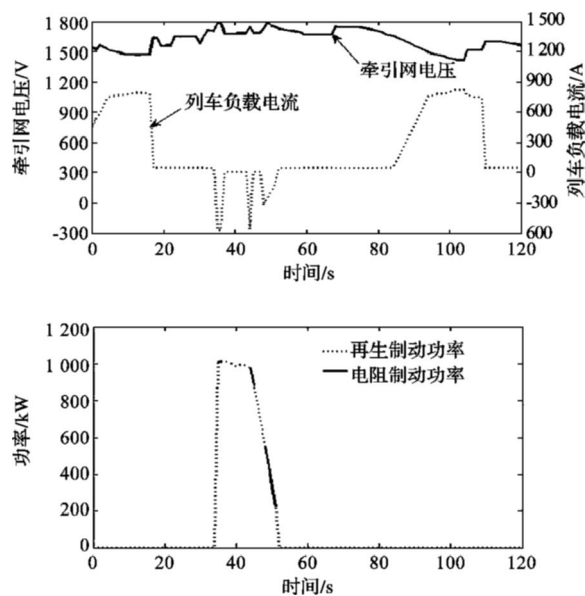


(b) 再生制动功率-时间及电阻制动功率-时间曲线

图8 发车间隔为180 s时电气制动能量仿真结果曲线

同时对牵引网络中的所有列车在运行时间内的再生制动功率与电阻制动功率曲线[如图8(b)、图9(b)所示]对时间进行积分, 便可以得出在运行时间内所有列车再生制动与电阻制动能量大小。因发车间隔差别, 牵引网络中车辆数与运行时间均不同, 制动能量大小不具有可比性, 所以取再生制动与电阻制动占总电气制动能量比率进行分析比较。在列车发车间隔为180 s时, 再生制动能量占总电气制动能量的80.1%, 电阻制动能量占总电气制动能量的19.9%; 在列车发车间隔为240 s时, 再生制动能量占总电气制动能量的77.5%, 电阻制动能量占总电气制动能量的32.5%; 当设定发车间隔为900 s时, 再生制动能量占总电气制动能量仅为

2.2%, 电阻制动能量占总电气制动能量的97.8%。由此看出发车间隔较短时, 车辆产生的能够被回收再利用的再生制动能量所占电气制动能量比率较高。



(b) 再生制动功率 - 时间及电阻制动功率 - 时间曲线

图9 发车间隔为240s时制动能量仿真结果曲线

4 结语

①详细分析了在牵引网络中的城市轨道车辆在电气制动过程发生再生制动及电阻制动的条件, 在单车牵引计算模型及多车运行的牵引供电网络模型的基础上, 通过局部等效假设建立了城市轨道车辆电气制动能量分布模型。

②采用MATLAB/Simulink软件对城市轨道车辆电气制动能量分配进行了仿真分析, 结果表明: 在列车发车间隔为180s时, 再生制动能量占总电气制动能量

的80.1%; 在列车发车间隔为240s时, 再生制动能量占总电气制动能量的77.5%; 当发车间隔在900s时, 绝大多数电气制动能量均消耗在电阻制动中; 发车间隔越小, 再生制动能量比率越大。

③本文的城市轨道车辆电气制动能量模型可以为各种车辆电气制动能量回收装置在方案设计及选型等方面提供理论依据。

参考文献:

- [1] 冯剑冰. 再生制动能量利用方式的探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2007(4): 46-52.
- [2] 曾建军, 林知明, 张建德. 地铁制动能量分析及再生技术研究[J]. 电气化铁道, 2006(6): 12-18.
- [3] Konishi T, Hase S, Nakamichi Y. Verification Tests of Energy Storage System for DC Electrified Railways Using EDLC[J]. Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 2007, 48(2): 71-77.
- [4] Ogasa M. Energy Saving and Environmental Measures in Railway Technologies: Example with Hybrid Electric Railway Vehicles[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2008, 3(1): 15-20.
- [5] Oettich S, Albrecht T, Scholz S. Improvements of energy efficiency of urban rapid rail systems[J]. Advances in Transport, 2004(16): 573-582.
- [6] Lemoufouet S, Rufer A. A Hybrid energy storage systems based on compressed air and super capacitors with maximum efficiency point tracking[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic, 2005, 53(4): 1105-1115.
- [7] Caputo L. Control of Energy Storage Device for Rail Vehicles[D]. Lund, Sweden: Dissertation of Master Degree, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 2000.
- [8] 谢宏诚, 乌正康, 谢维达. 城市轨道车辆牵引仿真计算[J]. 电力机车与城轨车辆, 2005, 28(2): 20-22.

(上接第3页)

车型。针对轮轨粘着特性的时变特点, HXD1C型采用了基于相位法粘着利用控制方法, 实时辨识轮轨粘着关系并控制粘着变化率以提高粘着利用效率。对HXD1C型机车雨天运行的粘着利用控制数据的分析充分表明, 该车型的粘着利用控制系统在粘着条件良好的情况下能够使实际牵引力完全跟随设定牵引力; 在粘着条件突然恶化的情况下能够及时卸载, 快速恢复粘着; 在粘着条件恶化时能够在不产生严重空转的同时持续、平稳地调节实际牵引力使轮轨粘着仍得以充分利用; 在粘着条件改善时能使实际牵引力迅速跟随设定牵引力。因此, HXD1C型机车的粘着利用控制系统能够充分利用轮轨粘着条件, 具有全天候的粘着利用控制功能。

参考文献:

- [1] 裴有福, 金元生, 温诗铸. 轮轨粘着的影响因素及其控制措施[J]. 国外铁道车辆, 1995(2): 5-11.
- [2] Sergeant V. 影响粘着利用的因素[J]. 变流技术与电力牵引, 2000(4): 11-15.
- [3] 李江红, 陈华国, 胡照文. 国产化北京地铁车辆的粘着利用控制[J]. 机车电传动, 2005(6): 40-42.
- [4] Rolf Schreiber, Rudiger Koegel. Identifikations methode zur Bestimmung der Adhasion zwischen Rad und Schiene[J]. ZEV+DET, Glas. Ann., 1996(2).
- [5] R Schreiber, R Koegel, P Haese and P Hidenbrand. 根据粘着力曲线最佳利用三相交流机车粘着力的调节装置[C]// 国外机车粘着控制技术译文集. 2001: 77-83.
- [6] R Schreiber, P Haese, P Gerber. 革新的粘着调节——用BLS的Re464系列三相交流机车的试验结果[C]// 国外机车粘着控制技术译文集. 2001: 100-104.