

研
究
开
发HXD1C 型大功率交流货运机车
粘着利用控制的研究与应用李江红¹, 胡照文², 陈华国¹, 徐立恩¹, 彭辉水¹(1. 株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001 ;
2. 中南大学 物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410037)

作者简介: 李江红(1970-), 男, 博士, 首席设计师, 现主要从事机车粘着利用控制、交流变频调速控制、系统仿真的科研工作。

摘要: 介绍了HXD1C型大功率交流传动货运机车的粘着利用控制系统, 对该型机车现场运行的粘着利用控制数据进行了详尽的分析, 表明了HXD1C型机车粘着利用控制系统能够充分地利用轮轨粘着, 具有全天候粘着利用的功能。

关键词: HXD1C型机车; 粘着利用; 粘着利用控制; 交流传动; 货运电力机车

中图分类号: U260.11*5; U264.2*23 文献标识码: A 文章编号: 1000-128X(2011)01-0001-03

Research and Application of Adhesion Utilization Control for High Power AC Freight Locomotive HXD1C

LI Jiang-hong¹, HU Zhao-wen², CHEN Hua-guo¹, XU Li-en¹, PENG Hui-shui¹

(1. Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha, Hunan 410037, China)

Abstract: Introduction was given to the adhesion utilization control system of the high power AC locomotive HXD1C. And field sampled data of the adhesion utilization control for the locomotive HXD1C were fully analyzed, which demonstrates the effectiveness of the adhesion utilization control system and its capability of making use of adhesion in all weather.

Key words: HXD1C locomotive; adhesion utilization; adhesion utilization control; AC drive; freight locomotive

0 引言

自HXD1C型机车在重庆机务段投入运营以来, 目前已有数百台的HXD1C型机车在我国的西南、华南和华中地区担负货运牵引任务, 日夜奔驰在浙赣线、京广线、湘黔线、襄渝线等铁路干线。

HXD1C型六轴大功率交流传动货运机车的单轴功率为1 200 kW, 整车功率7 200 kW, 最大启动牵引力570 kN 23 t轴重启动时所需粘着系数为0.42 25 t轴重启动时所需粘着系数为0.39 远高于轮轨潮湿时的物理粘着系数^[1]。因此, 为充分发挥HXD1C型机车强大的牵引性能, 必须为该机车装备性能优越的粘着利用控制系统, 以保证机车在各种轨面状况下充分利用轮轨粘着, 实现多拉快跑的运营目标。

1 HXD1C型机车的粘着利用控制方案

针对机车轮轨粘着特性随自然条件和环境非线性时变的特点^[2], HXD1C型机车的粘着利用控制系统采用了基于相位法的粘着利用控制方案^[3], 以实现对轮轨粘着特性的实时辨识, 迅速检测当前轮轨条件的粘着系数变化率, 通过调节牵引电机的输出转矩, 使轮轨粘着系数的变化率跟随设定的粘着系数变化率, 实现轮轨粘着的最大利用。图1给出了HXD1C型机车粘着利用控制系统的结构框图。下面将基于图1, 分析和介绍HXD1C型机车的粘着利用控制方案, 基于相位法的粘着利用控制原理及其应用实例请参考文献[4-6]。

图1中虚线框内为HXD1C型机车粘着利用控制系统的详细结构, 它是由粘着变化率给定、粘着控制器、最小电机给定转矩选择、正弦信号产生、带通滤波和相位检测等功能模块构成的闭环控制系统。对应于给

收稿日期: 2010-02-26; 收修改稿日期: 2010-11-17

定粘着变化率的给定相位 ψ^* 同相位检测模块输出的代表实际粘着变化率的相位 ψ 比较,二者的偏差被送至粘着控制器。粘着控制器根据给定相位 ψ^* 和相位 ψ 之间的偏差,经PI调节,计算出电机应当输出的电机转矩 T_2^* 。转矩 T_2^* 与经网络传送、来自司机给定的转矩 T_1^* 进行比较,二者之中最小者作为电机给定转矩 T^* 。电机给定转矩 T^* 再同来自正弦信号发生器的轮轨粘着辨识用激励信号 $A\sin(\omega t)$ 相加,二者之和作为电机最终应输出的转矩,以实现在驱动机车运行的同时辨识轮轨粘着特性。在信号 $A\sin(\omega t)$ 的激励下根据线性系统理论机车牵引传动系统的输出——电机转速信号 $v(t)$ 中含有与激励信号 $A\sin(\omega t)$ 频率相同的信号 $B\sin(\omega t + \psi)$ 并且其相位移 ψ 反映了轮轨粘着变化率。因此,机车牵引传动系统输出的转速信号 $v(t)$ 被送往带通滤波器以得到信号 $B\sin(\omega t + \psi)$ 。信号 $B\sin(\omega t + \psi)$ 经正交鉴相器处理后获得相位移 ψ 。相位移 ψ 再反馈至系统输入端与给定相位移 ψ^* 相比较,从而构成完整的闭环粘着利用控制系统。

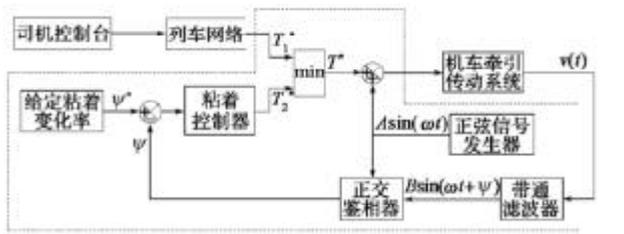


图 1 HXD1C 型机车粘着利用控制的系统结构框图

2 粘着利用控制应用

为了解HXD1C型机车粘着利用控制系统的应用效果,自该型机车投入运营后技术人员赴重庆服务现场对机车的粘着利用控制进行了现场跟踪,采集到了小雨天气下HXD1C机车在多隧道的山区的运行数据。下面将对此次现场采集的粘着利用控制数据进行分析,以了解粘着利用控制的实际效果。

在机车运行过程中,为了解粘着利用控制的应用效果,技术人员采集了离列车操作端最近、轮轨粘着条件最差的第一轴位电机的转速(Speed)、设定牵引力(Reference Force)和实际牵引力(Actual Force)。图2给出了全程采集的数据,图中上半部分为牵引电机转速

曲线(对应机车轮对线速度),下半部分为牵引力曲线(后续各图的上、下部分也如此,不再说明)。

为便于观察和分析,图3~图7给出了以1000s为步长分解图2后所得各不同时间段的粘着利用控制参数波形。

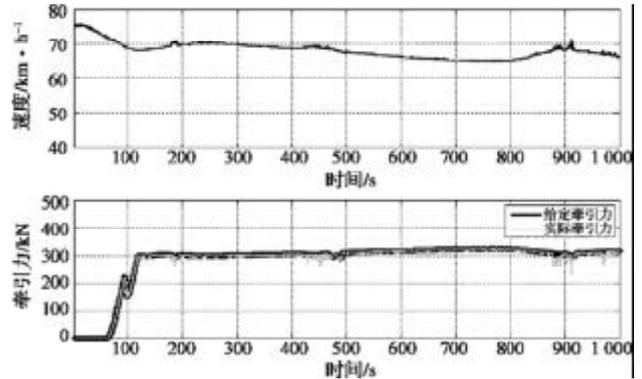


图 3 局部采集数据 1 (t = 0 ~ 1000 s)

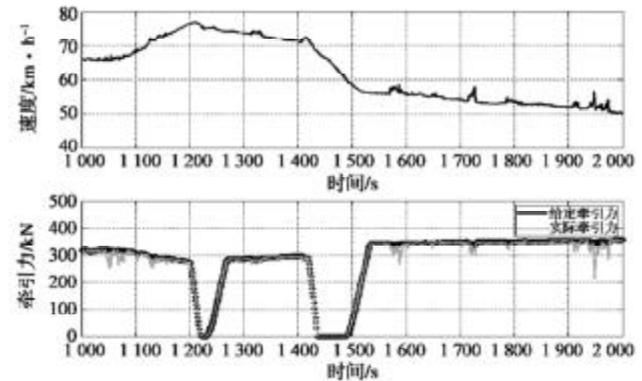


图 4 局部采集数据 2 (t = 1000 ~ 2000 s)

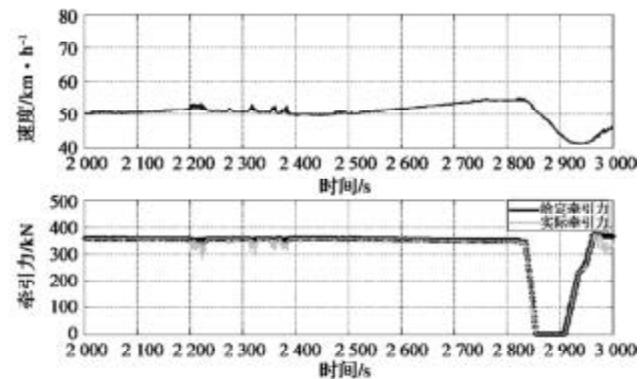


图 5 局部采集数据 3 (t = 2000 ~ 3000 s)

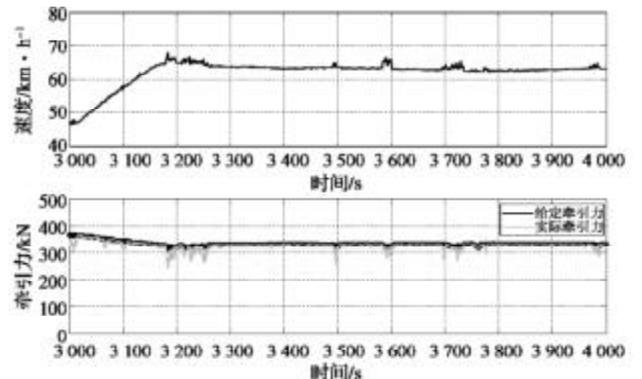


图 6 局部采集数据 4 (t = 3000 ~ 4000 s)

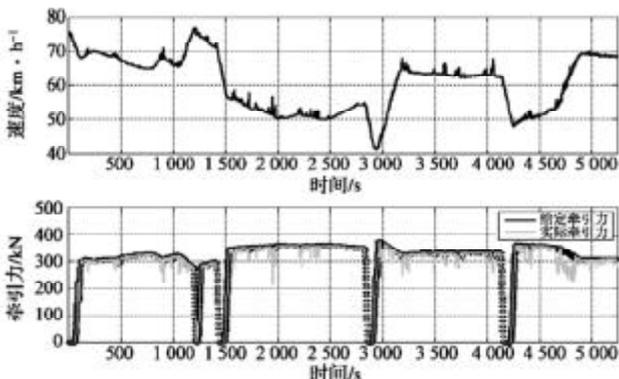


图 2 全程采集数据 (t = 0 ~ 5420 s)

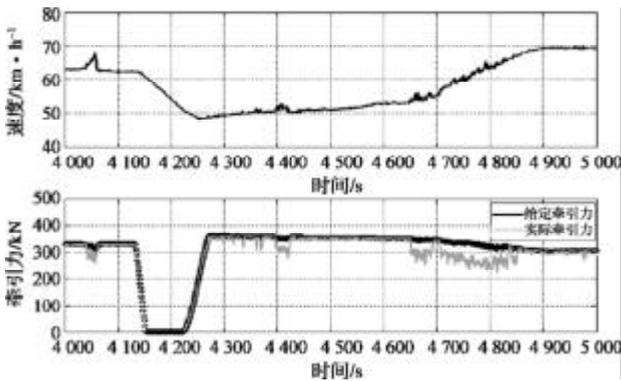


图7 局部采集数据5($t = 4\ 000 \sim 5\ 000\ \text{s}$)

仔细观察图3~图7的粘着利用控制数据波形可以发现电机转速变化可分为以下3种类型:

转速平稳变化。转速信号既无波动也不含任何毛刺 例如图5中 $t = 2\ 400 \sim 2\ 800\ \text{s}$ 时的电机转速。

转速持续波动。转速信号不含任何毛刺,但信号存在波动 例如图7中 $t = 4\ 700 \sim 4\ 800\ \text{s}$ 时的电机转速。

转速急剧变化。转速突然上升后又快速下降。例如图4中 $t = 1\ 900 \sim 2\ 000\ \text{s}$ 处的转速信号。

下面将针对以上3种不同的电机转速变化情况,分析其对应的电机实际牵引力的变化,以了解粘着利用控制的效果。

1) 转速平稳变化

图8给出了 $t = 2\ 400 \sim 2\ 800\ \text{s}$ 时 转速平稳变化时的粘着利用控制数据,此时电机实际牵引力和设定牵引力几乎完全相等。如前所述,由于此时列车运行于粘着条件良好的隧道内,所需粘着牵引力低于轮轨可提供的最大粘着牵引力,因此,粘着利用控制可以保证实际牵引力完全跟随设定牵引力。

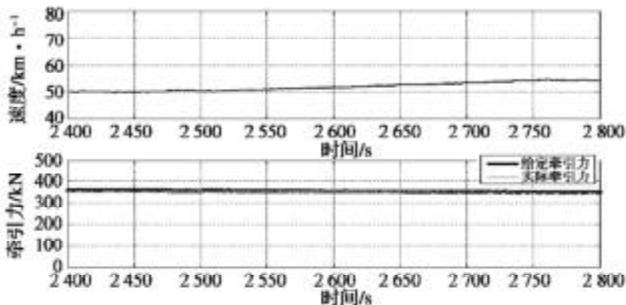


图8 转速平稳变化($t = 2\ 400 \sim 2\ 800\ \text{s}$)

2) 转速持续波动

图9给出了 $t = 4\ 600 \sim 4\ 900\ \text{s}$ 时的粘着利用控制数据。在 $t = 4\ 600 \sim 4\ 650\ \text{s}$ 时 列车在隧道内运行 电机实际牵引力完全跟随设定牵引力,此时转速平稳;但在 $t = 4\ 650 \sim 4\ 690\ \text{s}$ 及 $t = 4\ 710 \sim 4\ 850\ \text{s}$ 期间 列车运行于露天轨道,电机实际牵引力小于设定牵引力,并且电机转速出现波动 而在 $t = 4\ 690 \sim 4\ 710\ \text{s}$ 以及 $t = 4\ 850 \sim 4\ 900\ \text{s}$ 期间,列车由露天进入隧道,粘着条件改善,实际牵引力立即跟随到设定牵引力。

上面的数据表明,在粘着条件较差的露天轨道,

由于司机设定牵引力高于轮轨粘着可提供的最大粘着牵引力,粘着利用控制无法使实际牵引力跟随设定牵引力,只能根据当前轮轨粘着状况,在不引起严重空转的同时,对实际牵引力持续、平稳地进行调节,充分利用可用粘着,尽量发挥最大可用粘着牵引力,一旦粘着条件得以改善时,就能使实际牵引力迅速跟随到设定牵引力。

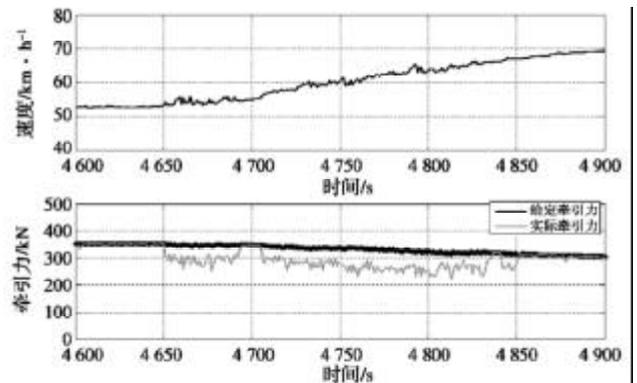


图9 转速持续波动($t = 4\ 600 \sim 4\ 900\ \text{s}$)

3) 转速急剧变化

转速急剧变化发生在列车驶出隧道的瞬间,此时电机转速突然上升,电机实际牵引力随之立刻卸载,紧接着电机转速开始下降。由于隧道外的粘着条件低于隧道内的粘着条件,因此粘着条件的突然下降引起了电机转速的突然增加,粘着利用控制系统迅速降低实际牵引力,即进行粘着卸载,从而抑制了电机转速的继续增加。

通过观察可以发现最大电机转速急剧变化发生在 $t = 1\ 950\ \text{s}$,值得指出 绝非巧合 此处也是最大粘着卸载的地方。为进一步分析,图10 给了此时的局部粘着利用控制数据波形。从该图可知,相对于设定牵引力,最大粘着卸载的幅度约为33%,并且在电机转速开始下降时,实际牵引力就立即上升,并迅速接近设定牵引力。因此粘着利用控制有效地抑制了空转,并快速恢复轮轨粘着,实现粘着利用最大化。

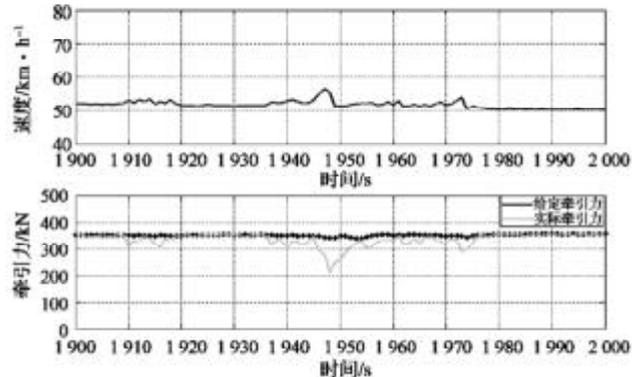


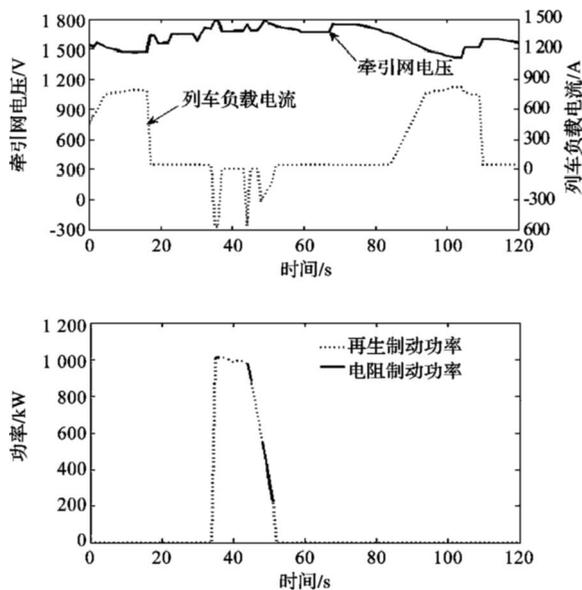
图10 转速急剧变化($t = 1\ 900 \sim 2\ 000\ \text{s}$)

3 结束语

HX_{01C} 型重载货运机车是对轮轨粘着要求很高的

(下转第51页)

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 240 s 时制动能量仿真结果曲线

4 结语

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。

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 180 s 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 240 s 时, 再生制动能量占总电气制动能量的 77.5%; 当发车间隔在 900 s 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。

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 EDL[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 Adhesion 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 Re 464 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.