

学
术
交
流HXD1C 型电力机车电传动系统
设计 及 运 用

高首聪, 刘可安, 李 鹏

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



摘 要: 介绍了HXD1C型大功率交流传动货运机车电传动系统的主要技术参数、设计思想,并详细描述了电传动系统的试验、应用情况,表明HXD1C型电力机车电传动系统设计合理、性能可靠,达到了设计要求。

关键词: HXD1C; 电力机车; 交流传动系统; 技术参数; 试验; 运用

中图分类号: U264.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)02-0070-05

作者简介: 高首聪 (1976-), 男, 工程师, 主要从事交流电传动系统技术研究及应用开发。

The Design and Application for Electric Drive System of HXD1C Locomotive

GAO Shou-cong, LIU Ke-an, LI Peng

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

Abstract: The design concept and major parameters of electric drive system of the HXD1C locomotive was introduced. The test and application of the electric drive system were described, which showed that the design was reasonable and reliable, meeting the design requirement.

Key words: HXD1C; electric locomotive; AC drive system; technic parameters; test; application

0 引言

为解决中国铁路运能紧张问题,采用先进的高速、重载交流传动机车将是必然选择。交流电传动系统是电力机车的关键核心系统,主要由牵引变压器、主变流器、牵引电机等组成。2008年,由南车株洲电力机车有限公司组织研发了HXD1C型大功率交流传动电力机车,株洲南车时代电气股份有限公司负责主变流器、辅助变流器及网络控制系统的研发工作。该型机车基于完全自主的技术平台,实现了我国高端电气传动科技领域的突破性发展。

1 牵引系统主电路及主要技术参数

HXD1C型机车的牵引系统主电路由1台牵引变压器、2台主变流器及6台牵引电机组成,可实现由网侧单相定频定压(CVCF)向电机侧三相变频变压(VVVF)的交直交的电路变换。

1.1 主电路及系统参数

HXD1C型机车牵引系统主电路如图1所示,受电弓从接触网接受AC 25 kV/50 Hz电源,经高压隔离开关、主断路器输入牵引变压器,一次侧电流经轴端接地装置返回大地。牵引变压器的6个二次侧绕组给2个主

变流器供电,由主变流器变换后分别给6台牵引电机提供变频变压交流电源,牵引电机采用三相交流异步

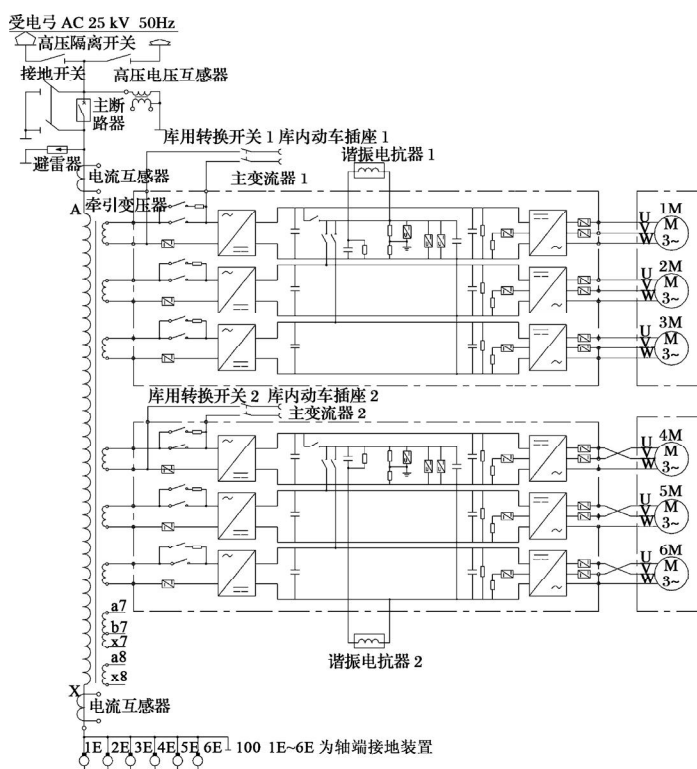


图1 HXD1C型机车牵引系统主电路

收稿日期: 2011-11-07

电机，主电路具有过压、过流、接地保护等功能。
机车功率发挥情况如图 2 所示。

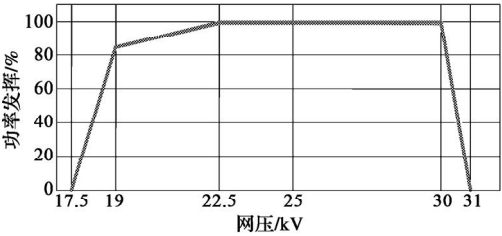


图 2 HXD1C 型机车功率网压发挥曲线

基本技术参数：

电压制	25 kV/50 Hz
网压允许波动范围	17.5~31 kV
机车轮周牵引功率(持续制)	7 200 kW
机车轮周再生电制动功率(持续制)	7 200 kW
机车最高运营速度	120 km/h
持续速度	

23 t轴重时70 km/h
25 t轴重时65 km/h

牵引特性

机车启动牵引力(0~5 km/h速度范围内半磨耗的
轮周平均牵引力,轨面干燥无油)
23 t轴重时520 kN
25 t轴重时570 kN

机车持续制牵引力

23 t轴重时370 kN
25 t轴重时400 kN

恒功率速度范围

牵引工况 23 t轴重时70~120 km/h
25 t轴重时65~120 km/h
再生制动 23 t轴重时70~120 km/h
25 t轴重时65~120 km/h

最大再生制动力(车钩处)

23 t轴重时370 kN
25 t轴重时400 kN

牵引特性曲线和再生制动特性曲线见图 3。

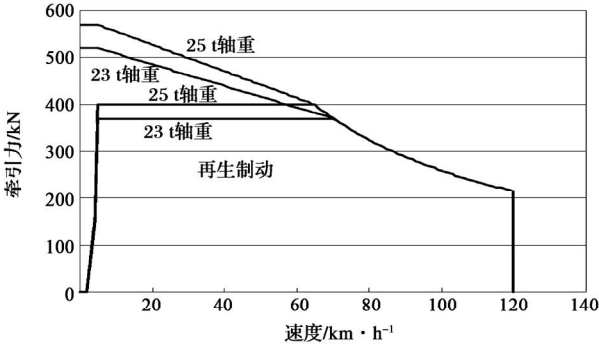


图 3 HXD1C 型机车牵引/制动特性曲线

功率因数 $\lambda \geq 0.98$ 条件是接触网电压在22.5~27.5 kV
(正弦网压)范围内,且机车牵引功率在额定牵引功率
的20%~100%范围内。

等效干扰电流 $I_p \leq 2.5$ A,条件是机车在满功率牵引工
况下,距牵引变电所10 km处测量,接触网0.63 Ω /km,64°。

机车总效率 ≥ 0.85 ,条件是机车在额定网压下,在
牵引工况下发挥持续额定功率。

独特的主电路结构：机车采用交直交电传动形
式；电源侧采用三重四象限整流器,采用动态锁相及
多重化技术,达到了高功率因数、低电磁干扰、低干
扰电流的目的；电机侧采用轴控方式,粘着利用率更
高,并可实现单轴隔离,实现故障下的最小动力损失。

1.2 主要部件技术参数

1)牵引变压器

牵引变压器由1个一次侧绕组、6个二次侧牵引绕
组、2个辅助绕组构成,采用油循环、强迫风冷方式。
谐振电抗器安装在钢制的牵引变压器油箱内。牵引变
压器设有油温、油流及腔体内过压保护等功能,其主
要参数如表 1。

表 1 牵引变压器主要电气参数

项目	参数
网压	25 kV, 50 Hz
一次侧绕组额定容量	8 900 kVA
一次侧绕组额定电流	356 A
牵引绕组额定容量	6 × 1 350 kVA
牵引绕组额定电压	6 × 970 V
牵引绕组额定电流	6 × 1 390 A
短路阻抗	$U_{k1}=36\%$
谐振电抗器电感值	0.27 mH
额定电流	1 620 A

2)主变流器

主变流器输入端与牵引变压器的二次侧牵引绕组
相连,并通过接触器分/合,主要由三重四象限 PWM
整流器、中间直流环节和3个VVVF逆变器组成。中间
直流环节设有支撑电容、二次谐波回路、接地检测电
路和过压斩波回路等。每重四象限 PWM 整流器和1
个逆变器组成1组供电单元,为1台牵引电机供电,3
个主电路单元的直流环节通过隔离开关并在一起,正
常工作时隔离开关闭合,3个单元共用直流环节。主
变流器具有完善的过流、过压、接地、温度、水系
统等主要故障诊断、保护和记录功能,其主要参数如
表 2。

表 2 主变流器主要参数

项目	参数
额定输入电压	970 V
额定输入电流	3 × 1 390 A
额定输入频率	50 Hz
中间直流环节电压	DC 1 800 V
额定输出电压	1 375 V(三相交流)
额定输出电流	3 × 598 A
最大输出电流	3 × 814 A
牵引变流机组效率	≥ 0.975 (额定功率)
主变流器机组冷却方式	强迫水循环冷却

3)牵引电动机

牵引电动机为三相鼠笼式异步牵引电动机,根据

电压型PWM逆变器供电的特点进行特殊设计。牵引电机与主变流器控制单元配合,具有电流、温度等保护功能,其主要技术参数见表3。

表3 牵引电动机主要参数

项目	参数
额定功率	1 224 kW
额定电压(基波)	1 375 V
最大电压(基波)	1 420 V
额定电流(基波)	598 A
启动电流(基波)	814 A
启动转矩	9 717 N·m
额定效率(基波)	≥ 0.945
额定转速	1 720 r/min
最高转速	3 452 r/min
额定功率因数(基波)	0.906

1.3 主要参数的设计考虑

1)变流器中间直流环节电压的选择

中间直流环节电压是机车交流传动系统的一个关键参数,它决定牵引变压器、主变流器以及异步牵引电动机等系统主要设备的电压等级,决定了设备的输入/输出电流(在机车功率一定的条件下),进而决定了设备的体积、重量等。根据铁道部的技术要求,HXD1C型机车轮缘轴输出功率为1 200 kW,在这种技术要求下,综合考虑主变流器、牵引电机的绝缘、体积、重量及散热等因素,基于产品模块化、平台化的设计理念,结合产品全生命周期成本,选择3 300 V等级的IGBT元件构成的二点式主变流器是合适的,直流电压取1 800 V。这也是该功率等级下国际各制造商的主流选择。

2)变压器牵引绕组电压及短路阻抗的选择

变压器牵引绕组也就是主变流器的四象限输入电压,其选择要结合主变流器的调制指数、牵引绕组短路阻抗、中间直流环节电压的选取、变流器功率等因素的限制,并满足图4、图5所示的矢量关系。

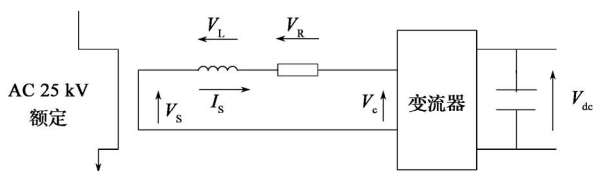


图4 变压器二次侧等效电路图

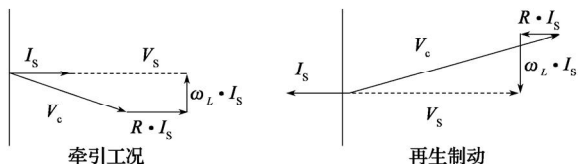


图5 变压器二次侧等效电路图的矢量图

短路阻抗的选取,理论上开关频率越高,可以做得越小,而实际上由于受大功率IGBT元件发热影响及变流器冷却效果的限制,大功率变流的开关频率一般选择在500 Hz以内。短路阻抗越大,将会有效地改善电网电流的谐波状况,减少交流传动机车高频谐波对

供电网下直流机车及其他周边设备的影响。但短路阻抗越大,会使牵引变压器的成本升高。

综合以上因素,牵引绕组额定电压取970 V,短路阻抗选择36%。

3)中间直流环节支撑电容

中间直流环节支撑电容参数的确定主要考虑的因素有:负载的无功补偿,提供的瞬态电流,中间直流环节的滤波。按照公式(1)综合考虑容值、装配等因素,主变流器支撑电容取25.8 mF。

$$C \geq \frac{L_N r_{ni} I_{Nm}^2}{r_{dev} U_{dc}^2} \quad (1)$$

式中: C 为电容器容量; L_N 为等效电感; I_{Nm} 为电流基波峰值; r_{ni} 为电流纹波系数; r_{dev} 为电压纹波系数; U_{dc} 为中间直流环节电压。

2 牵引电传动系统主要试验情况

2009年4月至9月,牵引电传动系统地面组合试验在铁道部产品质量监督检验中心牵引电气设备检验站进行,2009年6月至10月,整车型式试验在中国铁道科学研究院环行铁道试验基地、重庆机务段开展。

2.1 系统组合试验

为了保证牵引系统各部件在功能性能方面的完备性、可靠性,依据IEC相关标准,开展了牵引系统的地面组合试验。试验项目包括电机、变流器的温升试验,冷态、热态下的转矩特性试验,电机堵转试验,单台转向架的牵引特性试验,网压变化试验,网压中断试验,负载突变试验,故障导向试验等,试验结果完全满足设计要求。组合试验采用了牵引电气设备检验站的背靠背大功率交流传动系统试验台,电路如图6所示。

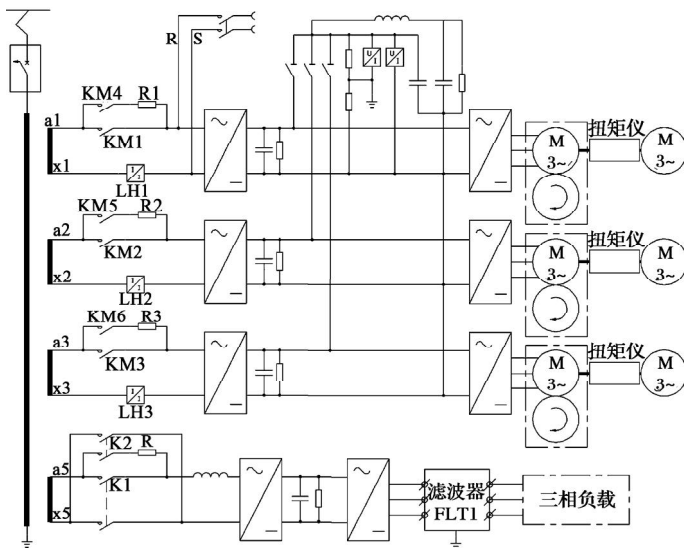


图6 牵引系统背靠背组合试验电路图

2.2 牵引特性试验

分别进行了23 t、25 t轴重下的机车牵引/制动特性试验,实测牵引特性均偏大于设计值,满足设计要求。图7、图8为23 t轴重时的牵引特性实测值。

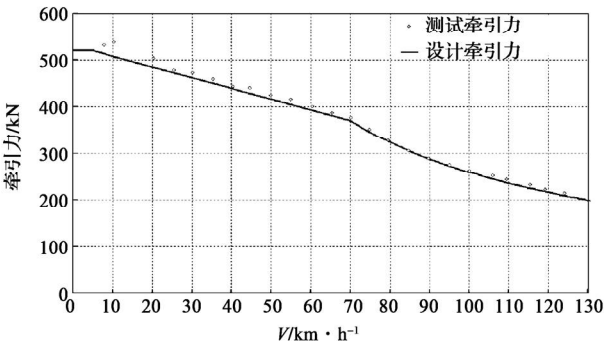


图 7 牵引特性实测值 (23t 轴重)

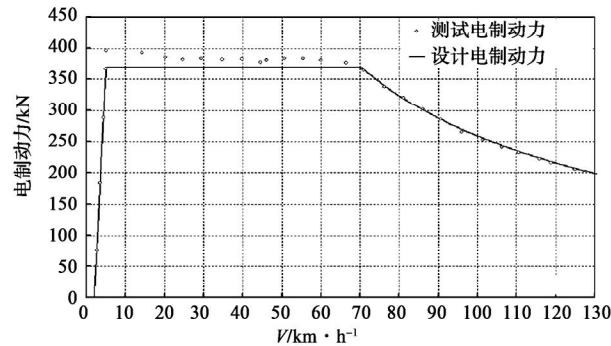


图 8 制动特性实测值 (23t 轴重)

2.3 功率因数及等效干扰电流

测试数据如图 9,横轴为整车功率,纵轴分别为功率因数和等效干扰电流,可以看出,机车满足功率因数 $\lambda \geq 0.98$ 和等效干扰电流 $I_p \leq 2.5A$ 的设计要求。

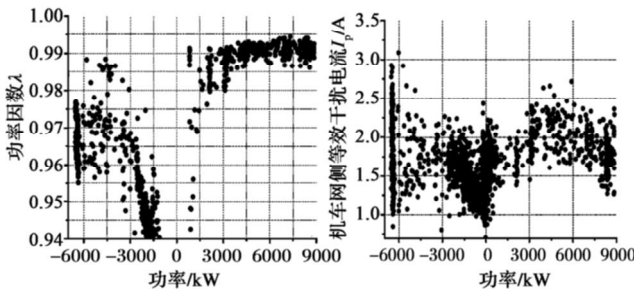


图 9 功率因数及等效干扰电流实测值

2.4 整车效率试验

机车总效率的计算如公式 (2):

$$\eta = \frac{P_k}{P_1} \times 100\%$$
(2)

式中:

$$P_k = \frac{F_k \times V}{3.6}, P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \times i(t) dt$$

其中 F_k 为机车轮周牵引力,kN;V为机车运行速度,km/h; P_1 为网侧有功功率,kW; $u(t)$ 为网压瞬时值,V; $i(t)$ 为网流瞬时值,A。

机车总效率测试结果如表 4。可见,牵引工况发挥额定功率时,在额定速度 65~115 km/h 范围内,机车总效率高于 0.85。

表 4 HXD1C 型机车总效率测试数据

机车速度 /km · h ⁻¹	轮周牵引力 /kN	轮周功率 /kW	电网电压 /kV	电网电流 /A	网端功率 /kW	机车总效率
65.3	404	7 321	27.1	313	8 400	0.872
70.9	373	7 340	27.1	313	8 410	0.873
75.7	349	7 333	27.1	313	8 422	0.871
80.3	325	7 253	27.0	310	8 331	0.871
85.0	304	7 191	27.0	308	8 271	0.869
90.0	287	7 178	26.9	310	8 295	0.865
96.4	272	7 274	26.9	316	8 435	0.862
100.5	261	7 300	27.0	315	8 427	0.866
105.9	254	7 465	26.8	325	8 671	0.861
114.3	238	7 562	26.7	334	8 849	0.855

2.5 网压中断试验

网压中断试验,分别模拟了网压中断 20 ms、100 ms、500 ms、1 s 等工况,图 10、图 11 分别为中断 100 ms、1 s 时的波形,其中 Ch1 为直流电压,Ch2 为网压,Ch3 为四象限输入电流,Ch4 为电机电流。从试验结果来看,主变流器能够承受诸如跳弓、供电网故障造成的瞬时供电中断,而不至于造成变流器损害。

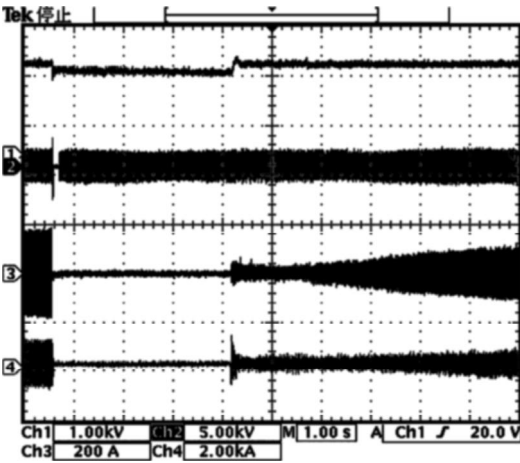


图 10 网压中断 100 ms 时电压电流波形

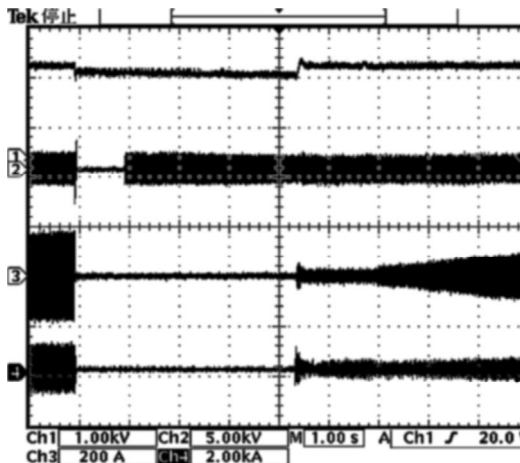


图 11 网压中断 1 s 时电压电流波形

3 运用情况介绍

电力机车的应用环境恶劣,特别是货运机车电传动系统,需适应各种严酷应用条件,如动态变化的弓

网条件(起伏网压、谐波、共振、跳弓、冰冻等),动态变化的轮轨关系(长大坡道、雨雪、凝露、油污、弯道等),复杂的气候环境(高原、高温、严寒、潮湿、风沙、盐雾等),恶劣的运行工况(负载瞬变、振动、电磁干扰、快速温度变化等)。交流电传动系统就是在这种宽域的气候环境下,在前端供电、后端负载无关联性复杂非线性时变系统条件下,保证了系统的稳定可靠工作。

HXD1C型机车已经批量应用990台,配属在西宁、兰州、重庆、洛阳、株洲、鹰潭、襄阳等机务段,适应了长大坡道、供电条件、高温酷暑、低温严寒等复杂运用条件,机车性能优异、质量稳定。

HXD1C型机车从研制到逐步大批量投入运用,发生和解决的问题主要有:

1) 车网适应性问题

自2009年10月HXD1C机车在重庆投入运营,并陆续配属5个铁路局的7个机务段使用,在不同的供电能力、电网模式及不同的运输组织方式下,陆续暴露了车网匹配性和适应性问题,主要表现在几个方面:一是牵引供电网电压波形畸变,导致检测同步信号异常后机车保护;二是部分区段网压过高,机车限功率运行,影响正常运输;三是牵引网本身供电能力与牵引功率的不匹配,超负荷运行时引起网压剧烈波动,进而产生机车牵引封锁;四是机务段或编组枢纽段,大量机车运行时,易引起网压谐振;五是交流传动电力机车的高次谐波,对直传动电力机车运用造成了不利影响。

2) 坡停及温升过高问题

配属重庆机务段的机车,担当襄渝线货运任务,定吨3 800 t,约23 km的12‰连续长大坡道,并有3个分相区,该区间易发生坡停及电机温升过高保护问题。经现场调研,其主要原因为长大坡道运行,定吨过高,机车只能靠动力闯坡,并长期在额定速度以下以最大牵引力工作,电机电流长时间大于额定值,导致了电机超温。因此,在此种运用条件下,一旦司机操作不慎、雨天机车轮对空转或机车故障,极易造成机车坡停,并因载重过大无法启动,造成机破。并且,牵引电机长期处于大电流、小功率、超负荷状态下也将降低设备的使用寿命。

3) 粘着利用控制优化问题

机车运用对HXD1C型机车的粘着利用效率提出了很高的要求,定吨高、坡道大、机车运用率高,几乎所有用户都提出了粘着优化的需求。但事实上,粘着系数是个物理量,轮轨粘着条件完全由外界自然条件决定,不为人的意志转移,能做的只有根据具体的线路条件,合理设置机车的牵引吨位,并通过轮轨粘着控制以便充分地去利用轮轨粘着。机车投入运用以来,有关粘着的优化工作主要有三方面的工作:一是加强了粘着利用控制的平稳性,以减少牵引力调节带来的机车冲动;二是优化机车撒沙控制,使自动撒沙的时机更合理;三是改善撒沙装置,能够更充分地将沙子洒在轨面上,有效提高粘着。

4 结语

2009年6月12日,首台HXD1C型机车在南车株洲电力机车有限公司下线,经过近3年来的批量应用及改进,电传动系统已经逐步稳定成熟,机车质量得到了用户的一致认可,已成为我国铁路干线、长距离、重载运输的主型机车。这标志着我国在机车电传动核心技术领域取得了实质性的突破和发展。该技术的逐步推广应用,必将有力促进我国轨道交通装备的现代化进程,并带动和推进我国高端电气传动科技领域的自主可持续发展。

参考文献:

- [1] 康明明,樊运新. HXD1C型大功率交流传动电力机车概述[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011(3).
- [2] 王挺泽. “中原之星”号牵引电传动系统设计与试验[J]. 机车电传动, 2002(2).
- [3] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- [4] 张建柏,曾云. HXD1C机车粘着利用控制的研究与优化改进[J]. 机车电传动, 2011(3).
- [5] 李江红,胡照文. 影响铁路机车运行品质的因素分析[J]. 机车电传动, 2010(3).
- [6] 陈燕平,忻力,李中浩. 牵引变流器中支撑电容器研究[J]. 铁道机车车辆, 2011(2).

(本篇文章为南车株洲电力机车研究所有限公司2011年度学术交流论文)