

高原电力机车 IGBT 主变流器

范荣辉, 秦方方, 郭君博, 李 华

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 范荣辉 (1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事变流器结构设计与系统技术研究。

摘 要: 介绍了应用于高原环境下的电力机车 IGBT 主变流器的主要技术参数、主电路及其变流器模块特点, 并叙述了主变流器高原环境适应性相关设计, 如内置加热器的工作原理等。型式试验数据表明, 该变流器相关技术参数能够满足高原电力机车应用要求。

关键词: IGBT; 主变流器; 加热器; 试验; 电力机车; 高原

中图分类号: U264.3+7

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)03-0070-05

IGBT Traction Convertor of Electric Locomotives for Altiplano

FAN Rong-hui, QIN Fang-fang, GUO Jun-bo, LI Hua

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

Abstract: Main technic parameters, power circuit and it's converter module characteristics of IGBT traction convertor of electric locomotives for altiplano were introduced. The adaptability design for altiplano was presented such as the working principle of heater, and so on. The traction converter was validated satisfying altiplano locomotive applying requirement by the test data.

Key words: IGBT; traction convertor; heater; test; electric locomotive; altiplano

0 引言

交流传动电力机车以其可靠性高、绿色节能、快捷便利等优点越来越受到重视, 而主变流器作为交流传动电力机车的核心部件, 承担着将电网能量进行一系列转换后用以驱动牵引电机的重大任务, 正朝着性能齐全与多样性方向发展, 其对地域和环境适应性的要求也越来越高^[1]。本文介绍的TGA9B型IGBT主变流器是为满足六轴7 200 kW高原电力机车的系统可靠性以及高原运用环境要求的主变流器。应用该主变流器的机车轴式为C₀-C₀, 每台机车配置2个主变流器, 每个主变流器向1个转向架的3台牵引电机供电。主变流器采用IGBT元件作为开关器件, 中间直流环节电压为DC 1 800 V, 采用水冷散热方式。牵引电机轴功率为1 200 kW, 牵引逆变器-牵引电机采用轴控方式^[2]。

1 TGA9B型IGBT主变流器的工作原理

1.1 主电路介绍

变流器主电路采用二电平四象限PWM整流器

+VVVF逆变器模式, 由三重四象限PWM整流器和3个VVVF逆变器组成。每重四象限PWM整流器和1台逆变器组成1组独立的供电单元, 为1台牵引电机供电。3个主电路单元的中间直流环节通过隔离开关(K1、K2、K3)并在一起, 正常工作时隔离开关闭合, 3个单元共用中间直流环节和二次谐振电路。每个主电路单元有独立的充电短接电路和固定放电电路, 当其中任意一个主电路单元故障时(四象限PWM整流器或逆变器), 断开相应的隔离开关和充电短接开关(如第1个单元故障时, 断开接触器K1、KM1、KM4), 将该故障单元切除, 其余2个单元正常工作, 机车只损失1/6的动力, 从而将故障造成的影响降至最低。三重四象限互相错开一定的相位角度, 减小对电网的谐波污染, 降低中间直流环节的纹波。

需要库内移车时, 外接DC 600 V库内电源通过R、S端子输入变流器, 经整流、逆变后输出三相VVVF电压驱动牵引电机。

1.2 主电路原理

下面以主电路的第1个功能单元来说明主变流器主电路的工作原理。

收稿日期: 2011-11-07; 收修改稿日期: 2012-02-28

牵引变压器牵引绕组a1-x1输入电压首先经由KM4、R1组成的充电电路对中间直流环节的支撑电容充电, 充电完成后闭合短接接触器KM1。牵引工况时单相工频电网电压经四象限PWM整流器整流为1 800 V直流电压, 再经逆变器逆变为三相VVVF电压供给牵引电机; 再生制动工况时牵引电机发出的三相电压经整流、逆变后通过牵引变压器、受电弓反馈

回电网。电抗器L1和C3~C8组成二次谐振电路, 用于滤除四象限PWM整流器输出的二次谐波电流; RCH1为过压斩波电阻, 用于中间直流环节的过电压抑制及停机后的快速放电; R4、R5为固定放电电阻, 用于快速放电回路故障后将支撑电容上的电压放至安全电压以下; R12、R13为直流分压电阻, 中点接地, 用于变流器主电路接地检测; LH1和LH4、LH5为电流传感器, 分别用于检测变流器输入和输出电流; VH2、VH3和VH1为电压传感器, 分别用于检测变流器中间直流环节电压和半电压。

2 TGA9B型IGBT主变流器的主要技术参数

TGA9B型IGBT主变流器的主要技术参数如下:

输入电压	三相交流 970 V (679 ~ 1 203 V)/50 Hz
额定输入电流	3×1 390 A
最大输入电流	3×1 544 A
标称直流电压	DC 1 800 V
支撑电容	25.8 mF
二次谐振电感	0.27 mH
二次谐振电容	9.39 mF
额定输出容量	3×1 200 kVA
输出电压	三相交流 0~1 404 V
输出电压频率	0~117 Hz
额定输出电流	3×598 A
最大输出电流	3×814 A
控制方式	直接转矩控制
冷却方式	强迫水循环冷却(有添加剂)
冷却系统散热功率	80 kW
预加热系统标称输入电压	

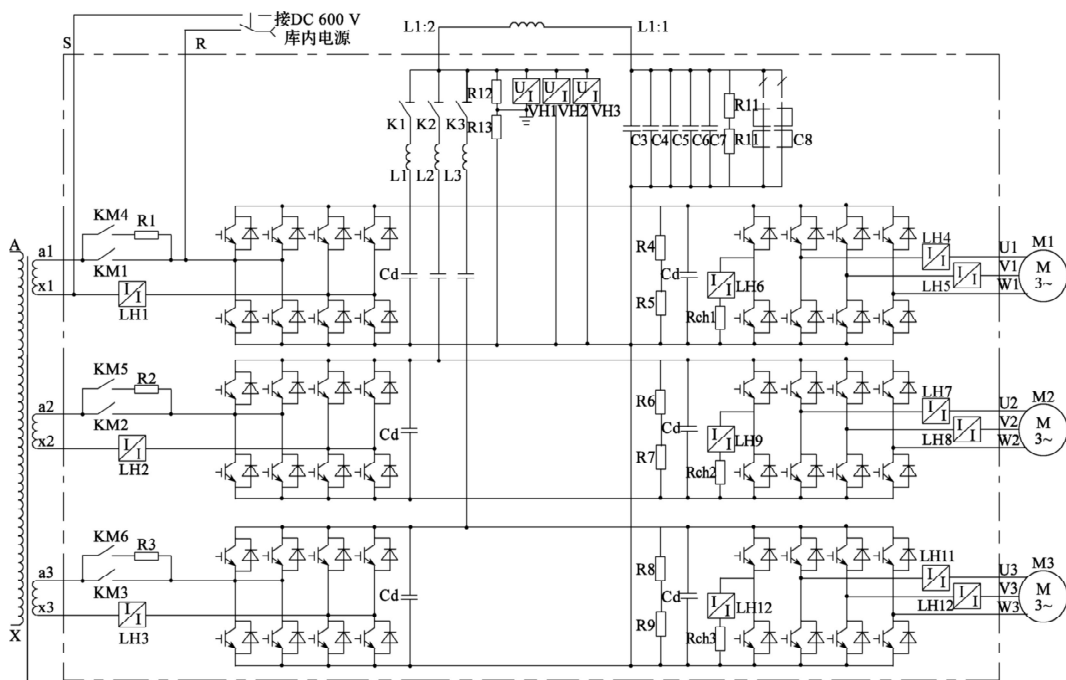


图1 TGA9B型主变流器主电路原理图

加热功率

12 kW

控制电压

DC 110[(1-30%)~(1+25%)]V

主变流器效率

97.5%(4QS:98.5%, INV:99%)

外形尺寸

3 100 mm×1 060 mm×2 000 mm

质量

约2 600 kg

3 TGA9B型IGBT主变流器控制与保护功能

主变流器主要通过传动控制单元(TCU)来实现其控制与系统级保护功能。TCU通过机车MVB网络接收司机指令, 将司机指令转化为机车的运行工况。通过MVB总线, TCU将电传动系统(主要指主变流器)与微机网络控制系统联系起来, 形成控制与通信系统, 完成对机车的牵引/制动特性控制、逻辑控制、故障保护, 实现对四象限整流器和牵引逆变器及交流异步牵引电机的实时控制、粘着利用控制, 以满足车辆动力性能、故障运行、救援能力及实现预期的运行速度等。TGA9B型主变流器的控制框图如图2所示。

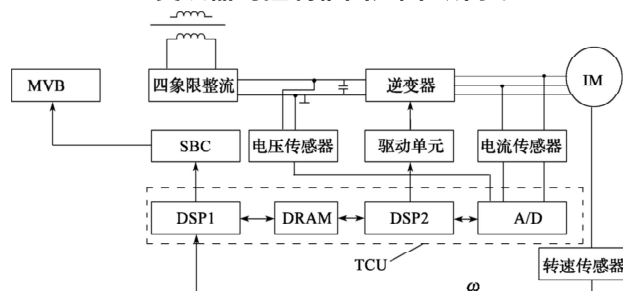


图2 传动控制单元功能示意图

TCU除用于控制四象限整流、中间直流环节和牵引逆变3个环节协调工作外, 还监测牵引电机、牵引变压器等的相关状态量用于机车的控制和保护, 并和机

车的CCU进行通信等。根据司机指令完成对主变流器及交流异步牵引电机的实时控制、粘着利用控制,同时具备完整的故障保护功能、模块级的故障自诊断功能和一定程度的故障自复位功能。

4 TGA9B型IGBT主变流器的高原环境适应性设计

4.1 预加热装置的设计

我国境内的高原大都处在北方,那里除了高原特有的低气压环境之外,冬天还有超低气温环境。主变流器上所用元器件均有一个能正常工作的极限温度值,若温度低于该极限温度值,则主变流器不能发挥正常功效,或者根本不能启动。为了使主变流器适用于低温环境,使主变流器内部元器件在低温环境下能够正常工作,发挥其额定功效,TGA9B型IGBT主变流器在其内部布置了相应的加热装置。环境温度处于较低温度时,在启动主变流器之前,先由主变流器内的温度继电器检测环境温度值,并将信号反馈给司控室。若信号显示当时环境温度低于设定的温度限制,那么就先启动主变流器内部的加热装置,对主变流器内的元器件进行加热。加热过程中温度继电器即时检测环境温度的变化,并将信号反馈,当环境温度上升到主变流器可以正常启动的温度值后,温度继电器跳开,加热装置停止工作,控制室可以正常启动主变流器。

预加热装置由加热系统和通风系统组成,是主变流器辅助加热装置,在冬季机车环境温度低于 -25°C ,柜内其电子产品不能正常工作时,加热器自动控制给主变流器柜内辅助加热。

每台主变流器内安装有1台预加热装置。冷空气由安装在加热器后方的2台轴流风机吸入,流经风道后进入加热装置,由加热单元加热后,热空气从加热器正前方出风口进入主变流器柜内。加热装置的额定功率为12 kW,低温环境下,能够在30 min内将主变流器内部的温度从 -40°C 加热到 -25°C ,以便主变流器及其内部元器件能够正常启动与工作。预加热装置的工作原理简图如图3所示。

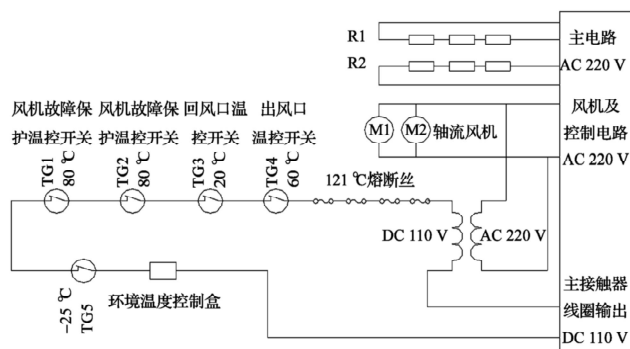


图3 加热装置电气原理简图

图3中R1和R2为加热管,TG1~TG4为各温度档值

的温控保护开关,TG5为 -25°C 的加热装置起停控制开关。当变流器内部的环境温度低于 -25°C ,TG5闭合,加热装置开始工作,加热管经电源加热散发热量,轴流风机M1和M2将加热管散发的热量均衡地吹散在变流器的内腔里面,用来加热变流器内部各个元器件。温控开关TG1~TG4用以防止加热器在工作中出现局部高温现象,以保护加热器,具有很强的自我保护功能。

将主变流器柜体的材料全部当成钢材,30 min内达到指定温升所需功率理论值为 P ,考虑到热损耗,实际值为 P_y [3]:

$$P=(Q_1+Q_2)/t+Q_3+Q_4 \quad (1)$$

$$P_y=1.2P \quad (2)$$

$$Q_1=c_1 \cdot m_1 \cdot \Delta t=28\,750\,000\text{ J}$$

$$Q_2=c_2 \cdot m_2 \cdot \Delta t=241\,831\text{ J}$$

$$Q_3=hA\Delta t=2\,700\text{ W}$$

$$Q_4=\varepsilon_1 A \sigma (T_2^4 - T_1^4)=1\,757\text{ W}$$

$$h=C(G_r \cdot P_r)n \cdot \lambda_2/l=4.65\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$G_r=g l^3 \cdot \alpha \Delta t / v_2^2$$

式中: Q_1 ——柜体从始温 -40°C 升至稳定温度 -25°C 的吸热量;

Q_2 ——空气从始温 -40°C 升至稳定温度 -25°C 的吸热量;

Q_3 ——柜体与外界空气自然对流单位时间损失的热量;

Q_4 ——柜体与列车辐射换热单位时间损失的热量。

Q_3 、 Q_4 是在柜体温度达到稳定温度时计算出的,这时的 Q_3 、 Q_4 值也是柜体单位时间损失热量的最大值,同时也是维持系统温度稳定时所需的最低功率。按以上计算公式计算,柜体在30 min内从 -40°C 加热到 -25°C 需要加热器功率为14 kW。该值是将主变流器及其内部元器件的材料都折算成钢材得出的,实际所需功率应低于该值,所以就将加热装置的功率定为12 kW。

4.2 绝缘参数设计

根据《铁路应用 机车车辆电气设备第1部分:一般使用条件和通用规则》(GB/T 21413.1—2008)规定的电气间隙、爬电距离及工频和雷电冲击耐受电压只适用于常规型(海拔1 400 m及以下),对于高原型产品需要进行修正。对于海拔高于1 000 m,但不超过4 000 m处的设备的外绝缘及干式变压器的绝缘,海拔每升高100 m,绝缘强度降低约1%;在海拔不高于1 000 m的地点试验时,其试验电压应按本标准规定的额定耐受电压乘以海拔校正因数 K_a ,海拔4 000 m时的海拔修正因数 $K_a=1.43$ 。

根据《机车车辆用电力变流器》(IEC61287)中规定介质试验要求,试验电压有效值为

$$U_p=2Um/\sqrt{2}+1\,000\text{ V} \quad (9)$$

海拔在4 000 m时

$$U_p = 1.43 \times (2 \times 2\,000 / \sqrt{2} + 1\,000) \text{ V}$$

$$U_p = 5\,475 \text{ V}$$

即介质试验电压 U_p 为5 475 V。

充分考虑高海拔情况下对绝缘性能要求的增加,在型式试验中提高介电强度试验等级,由4 500 V耐压提高至5 500 V耐压试验。同时要求传感器、接触器等部件的供应商对其所提供的器件进行改型设计,以便达到新的耐压要求。TGA9B型主变流器样柜已经通过最高5 500 V耐压试验并交付使用。

4.3 电气间隙参数设计

根据《高原电工电子产品 第1部分:通用技术条件》(GB/T20626.1—2006),在海拔0~5 000 m范围内海拔每升高1 000 m,即平均气压每降低7.7~10.5 kPa,电工产品外绝缘强度降低8%~13%。对于设计定型的产品,由于电气间隙已固定,随着空气压力的降低,其击穿电压也下降。为了保证产品在高原使用时有足够的耐击穿能力,必须增大电气间隙。高原用产品的电气间隙可按表1进行修正。

表1 电气间隙修正系数表

项目	各海拔下的数据					
	0	1000 m	2000 m	3000 m	4000 m	5000 m
相应气压/kPa	101.3	90	79.5	70.1	61.7	54.0
电气间隙修正系数	0.89	1.00	1.13	1.28	1.46	1.67

重新考虑主变流器内部电气绝缘间隙,对于目前结构中不满足绝缘间隙的部分进行调整,部分母排采用进口绝缘材料(TGP达可纶玻璃纤维带单层半叠包和silicon橡胶带双层半叠包)进行隔离。新造柜体绝缘性能由耐压4 500 V提高至耐压5 500 V。

4.4 变流器模块设计

因变流器模块是整个主变流器的核心部分,为了保证变流器模块的可靠运行,在IBBM120S2的基础上进行高原适应性设计,其改进型号IBBM120S4型变流器模块有如下改进:

①复合低感母排采用四周封边技术,增加了低感母排的抗污染能力,使其免受外界环境污染,并增加了低感母排正负极间的爬电距离。

②集成在变流器模块中的中间支撑电容也做了相应的高原适应性改进,主要是增加芯子和外壳的绝缘,耐压由原来的6 000 V增加到10 000 V。

③变流器模块绝缘电压由4 500 V提高到6 000 V。

4.5 温度适应性设计

变流器内部加装预热装置,当环境温度低于-25℃时,变流器内部的加热装置预先启动进行工作,对变流器内部空气进行加热,以保证变流器内的部件能够正常工作。

关键元器件选型时均要求工作温度在-40~70℃的

范围内。TCU和网络控制系统控制插件芯片换型军品级,进行-40℃超低温环境试验。

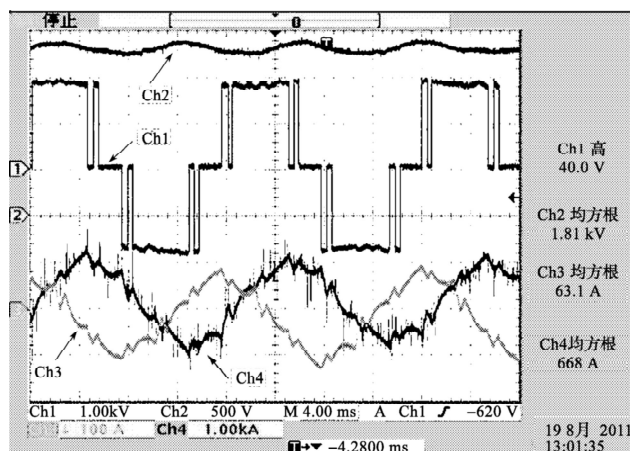
为应对连续超低温环境,TCU改善斩波程序、降低斩波风机的运行时间和频率,或是开发性能更优的风机,以加强风机在-40℃时的连续正常工作能力。

4.6 散热性能设计

TGA9B型主变流器采用的是强迫水循环冷却的散热方式,冷却液为由蒸馏水和乙二醇组成的混合物,两者的体积比为44%:56%;冷却液能够在-40℃的环境下保持液体状态,这基本上能够符合我国所有高原低温环境的要求。主变流器内部的功率元件都有水冷板对其进行散热,而主变流器内部的水—气热交换器和风机也能够很好地对柜内空气与冷却液进行热量交换。TGA9B型主变流器针对高原环境空气稀薄、空气的散热性能低的客观因素,在借鉴TGA9型主变流器水冷系统的基础上,加大了其水冷系统的散热功率,保证主变流器进水口温度符合在TGA9型主变流器中低于55℃的要求,以达到良好的散热效果。

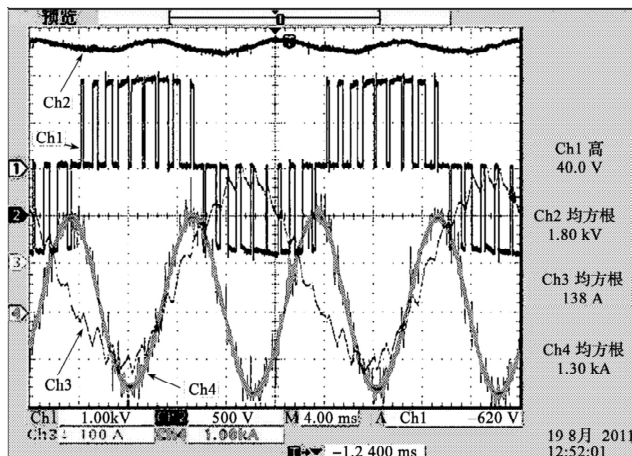
5 TGA9B型IGBT主变流器试验

TGA9B型主变流器在装车之前,根据《TGA9B型主变流器例行试验大纲》和《TGA9B型主变流器型式试验大纲》先后进行了例行试验和型式试验。例行试验主要验证了变流器的主电路、控制电路等满足高原环境下的绝缘电阻和介电性能要求。型式试验的主要试验项目是变流器的功能性试验,变流器在输入电压970 V条件下,与牵引变压器、陪试系统进行了长时间的地面考核试验。四象限整流器可以实现输入电流为1 390 A时持续正常运行,最大电流1 544 A时可靠运行;VVVF逆变器在正常运行中可持续输出电流598 A,并可输出最大电流814 A。变流器的相关试验波形图如图4、图5所示。



Ch1——输出线电压; Ch2——中间直流电压; Ch3(×10)——输出U相电流; Ch4——输出V相电流

图4 变流器性能试验波形图1



Ch1 ——输入电压；Ch2 ——中间电压；Ch3($\times 10$) ——输入电流；Ch4 ——二次电流

图5 变流器性能试验波形图2

6 结语

TGA9B型主变流器在设计过程中充分考虑了高原环境条件对变流器的影响,满足高原运用环境如低温低压以及盐雾环境对主变流器的使用要求。TGA9B型主变流器的成功研制,使得具有完全自主知识产权的主变流器作为核心部件第一次成功运用在高原电力机车上,填补了国内的空白。

参考文献：

- [1] 翁星方. 北京地铁国产化列车IGBT牵引逆变器[J]. 机车电传动, 2008(4).
- [2] 康明明, 樊运新. HX_D1C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, 34(3).
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

(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)

(上接第64页)

③提供给弓头的支撑力应尽量保持稳定,有利于弓网的长期运用,也可减少日常调整工作强度。

④弓体整体电阻应尽量小,减少电阻热。

3.2 运用方面

为进一步掌握其运用技术,还须通过更多的工作来完成,建议可通过以下几个方面进行。

1) 结合现场

在双弓耦合作业与接触线匹配中,往往后弓会受到前弓与接触线振动的影响而造成振动的叠加,使本身接触环境进一步恶化,表现形式通常为出现打火等现象。所以对以后的受电弓打火情况的观察,还要注意打火受电弓是否为车辆前进方向的后弓,如果现象统一,则可进一步确认弓网的运行情况。

由于受电弓在B车,在轮对圆跳动情况跟踪时,还须特别关注B车轮对跳动情况。

2) 掌握弓网系统性能

对弓网系统的整体性能资料的掌握是必要的,这对正确评估碳滑板磨损是否异常也有很大帮助。例如确定接触线材质,接触线刚度,在经常打火区域接触线磨损、布置方式等。受电弓方面也应收集更多资料,可以通过简单的测试来比较各种滑板的硬度、重量、

金属成分含量。

对弓网检测方式也需要了解,目前弓网检测车对接触线硬点检测仍有一定局限性。虽然检测车可以进行不同速度下弓网参数的测量,但由于与实际车辆重量(包括载重)相差太远,即使是在同一条线路上,两者与道床引起的振动差异应不能忽略。另外,对检测车使用何种弓头、何种滑板、检测时受流多大应该进行了解。

3) 进行相关测试

经过上文分析,磨损大小与机械设计方面关系较大,如有条件,建议进行相关弓网动力学试验,则可从弓网接触力、弓头加速度、弓网振动、滑板温升等测试结果中更详尽地了解2种不同受电弓的运用情况,同时也可对弓网关系优化提供依据。

参考文献：

- [1] 梅桂明, 张卫华. 刚性悬挂接触网动力学研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 24-29.
- [2] 毕继红, 张峰, 刘峰涛. 刚性悬挂接触网—受电弓系统内高动力分析[J]. 沈阳理工大学学报, 2007, 26(4): 91-94.
- [3] 松山晋作. 受电弓的受流摩擦学[J]. 东洋电机技报, 1997(91): 52-60.