

# 基于平面变压器的高电压隔离变送器的设计与测试

郭志奇<sup>1</sup> 管怀军<sup>2</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100037, 北京;

2. 上海浦东和普电子有限公司, 200126, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 根据轨道交通牵引供电与直流测量需求, 针对直流牵引系统电气参数频繁变化的特点, 采用 MCU(微控制单元)控制的 PWM(脉冲宽度调制)方法, 利用 PCB(印刷电路板)内嵌磁耦合互感器技术, 研发了适用于直流高电压检测的隔离变送器, 能够承受最高达 3 600 V AC/DC 的持续电压和最高 AC 20 kV 瞬态电压, 适合 3 600 V 以下的交直流高压系统检测。该隔离变送器已通过国家电气检测中心性能及电磁兼容试验, 指标均达到或超过国外同类产品。

**关键词** 高电压隔离变送器; 平面变压器; 脉冲宽度调制解调; 印刷电路板内嵌磁耦合互感器; 电流测量

**中图分类号** U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.022

## Design and Test of High Voltage Isolation Transmitter Based on Flat Transformer

GUO Zhiqi, GUAN Huaijun

**Abstract** According to the requirements of rail transit traction power supply and DC measurement, in view of the characteristics of frequent changes of the electric parameters of the DC traction system, adopting the pulse width modulation (PWM) method controlled by microcontroller unit (MCU) and making use of the printed circuit board (PCB) embedded with magnetic coupling transformer technology, isolated transmitter suitable for the detection of DC high voltage is developed, which could withstand up to 3 600 V AC/DC voltage and AC 20 kV transient voltage. It is applicable for detecting up to 3 600 V AC/DC high voltage system. The isolation transmitter has passed the performance and electromagnetic compatibility test of the National Electrical Testing Center, and its indicators have reached or exceeded similar foreign products.

**Key words** high-voltage isolation transmitter; planar transformer; pulse width modulation (PWM) demodulation; printed circuit board (PCB) embedded magnetic coupling transformer; current measurement

**First-author's address** Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100037, Beijing, China

大直流电流检测技术已广泛应用于工业生产和科学研究, 如直流高压输电、金属电解、机车牵引、电动汽车、新能源及核动力和高能物理等领域<sup>[1]</sup>。现阶段, 大直流电流测量主要分为接触式测量(如测量被测电流在已知电阻上电压降的分流器)、非接触式测量<sup>[2]</sup>(如直流电流互感器、罗氏线圈、光学电流传感器、霍尔电流传感器等检测被测电流建立的磁场)。

由于霍尔传感器技术在应用中存在易受环境影响、测量性能不稳定、抗干扰性能差、存在零点漂移、成本较高等诸多问题, 尚未达到轨道交通直流电流测量性能的要求; 光电隔离放大装置单级隔离电压有限, 无法满足系统隔离耐压要求; 电磁隔离变压器由于漏感的存在, 无法同时满足响应时间、隔离耐压、测量精度的要求。而实践证明, 目前分流器是更适合于地铁大直流电流测量的简单可靠方案。

轨道交通牵引供电高电压隔离变送器工作在直流母线附近, 这种强磁场线圈电磁工作环境较恶劣, 这就必然要求数据采集和传输具有较强的抗干扰能力。基于我国轨道交通牵引供电系统的特殊性, 如地铁牵引系统要求隔离耐压在 AC 15 kV 以上, 高压大功率系统中存在高共模电压信号。长期以来, 由于核心技术由国外公司掌握, 国内轨道交通牵引供电直流开关设备(包括配套的隔离变送器)主要依赖于进口, 运行维护成本随年限的增加而大幅增长, 我国轨道交通设备国产化需求迫切。

高隔离变送器具有采用电磁隔离式 PWM(脉冲宽度调制)电路中传递脉宽信号的特点, 使得传输准确度几乎不受采用变压传递时有漏感的影响, 适合高隔离监测场合。

本文利用磁耦合技术, 将大电流高电压端的采样信号隔离成为低电压小电流信号, 利用输入信号的幅度控制 PWM 脉冲的信号宽度, 将平面变压器

技术与感应式电能传输技术相结合,经互感器转换输出,设计了一款高电压隔离变送器。该变送器具有体积紧凑、高隔离电压、高测量精度、高响应速度、高可靠性等特点,其指标达到我国轨道交通牵引供电系统直流测量应用的要求。

## 1 设计原理

用 PWM 技术进行信号转换,通过改变脉冲的占空比来获得所需的输出电压,通过与耦合互感器结合,可获得高隔离电压,且传输信号不受漏感影响,非常适合高隔离、高精度的电压、电流检测场合。在设计时将 PWM 技术与耦合互感器技术结合,设计了符合国家标准 GB/T 25890.7—2010 要求的高电压隔离变送器。

若采用输入信号与三角波的比较实现 PWM 电路,通常由 RC 电路产生三角波,其线性度受元器件的影响很明显,对 PWM 信号的零点和增益的精确度影响较大。而采用磁芯绕制漆包线的隔离互感器方式,在恶劣的电磁环境下抗辐射干扰能力差,体积较大,小型化实现困难。同时,互感器输出的脉冲信号经包络检波,其幅值随 PWM 脉冲的占空比变化,解调电路精确地零点确定和动态范围调整较为困难。

而将基于平板变压器技术的耦合互感器应用在 PWM 技术进行信号转换的隔离电路中时,MCU (微控制单元)通过控制程控放大器的增益、零点及闭环 PWM 电路的电源调节,实现隔离变送器指标  $\text{Offset} \leq 2 \text{ mV}$ ,  $\text{Gain error} \leq 0.1\%$ ; PWM 信号进入 PCB (印刷电路板) 内嵌高隔离互感器电磁转换后,送到 PWM 解调电路转换成幅度信号,最后经过电压、电流放大电路输出,解决了上述 PWM 信号的零点和增益的精确度及电磁干扰问题。

经过试验及实际应用测试,所设计的高电压隔离变送器脉冲宽度与输入电压  $U_i$  成正比(如图 1 所示),其线性度满足强磁场环境和超量程下短路电流工况的测量要求。

本文设计的高电压隔离变送器,基于高隔离 PCB 内嵌互感器技术,将平面变压器技术与感应式电能传输技术相结合,将互感器完全整合在印刷电路板内,提高了能量密度,减小了互感器的体积,可以准确地控制电参数。

初级线圈和次级线圈为具有相同谐振频率、匝数比为 1:1 的自谐振线圈。设计双层蜗状螺旋线圈

如图 2 所示。

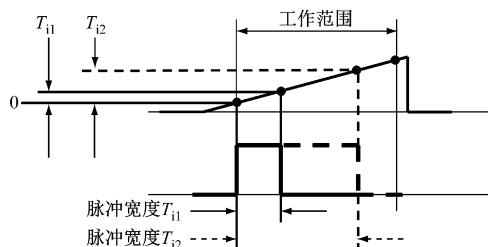


图 1 脉冲宽度和输入电压  $U_i$  成正比

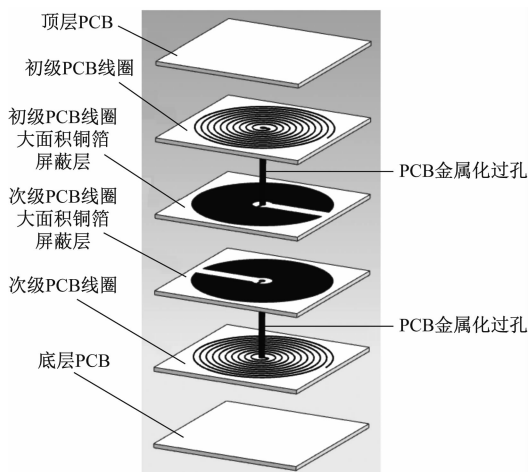


图 2 高隔离 PCB 内嵌磁耦合互感器结构图

采用 PCB 工艺,通过仿真计算,调整了线圈尺寸、匝数、线间距、宽度与厚度、基板厚度等参数,线圈自谐振频率精确且稳定。PCB 的接地屏蔽层可有效抑制辐射噪声对电路的干扰。

与传统变压器相比,平板变压器采用小尺寸的 E 型高频功率铁氧体磁芯,绕组采用多层印制板叠绕而成,具有较低的直流铜阻和低的漏感。平板变压器 PCB 线圈上下均有接地屏蔽层进行全屏蔽,可减小对变送器传输信号的干扰,达到电磁兼容性要求。

基于上述高隔离 PCB 内嵌互感器结构,设计的 HVT10000 隔离变送器工作原理如图 3 所示。首先利用电阻网络进行电流分流信号采集,经放大电路,用于 PWM 电路输出信号的幅度控制;然后经过耦合互感器, PWM 电路将信号转换成包络信号,经放大电路输出。

信号隔离电路设计流程如图 4 所示,其由 MCU 控制电路、输入信号程控放大器、PWM 脉宽和幅度程控电路、耦合互感器、PWM 解调电路、线性积分电路、输出放大器等组成。通过 MCU 控制程控放大器的增益、零点、PWM 幅度和脉宽,实现对输入

增益和零点控制。

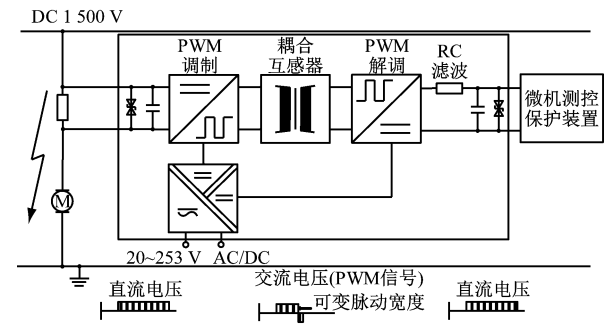


图 3 隔离变压器工作原理图

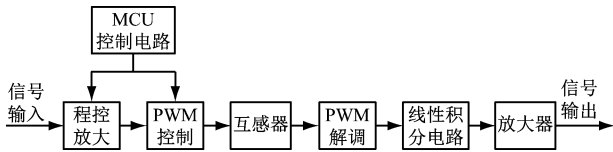


图 4 硬件电路设计流程图

同样采用上述 PCB 内嵌互感器结构,设计的高隔离电源电路结构如图 5 所示。输入端供电电压经整流电路、PWM 电路、平面变压器、整流滤波电路,产生高精度的线性稳压电源后,为信号输入电路和

信号输出电路供电。

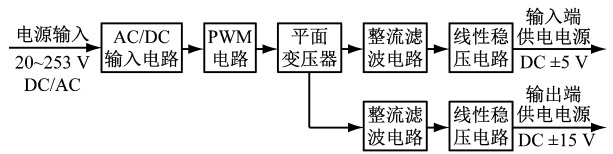


图 5 隔离电源设计构架图

采用的隔离平面变压器体积紧凑,实现了电源电路的高压隔离,输出多绕组结构分别输出  $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 15\text{ V}$  电压。变压器使用铁氧体磁芯灌封在绝缘壳内,满足高耐压要求。绝缘测试表明,其绝缘性能达到  $20\text{ kV}$  以上。

电路采用单片机控制 PWM 方波信号 0 点与占空比,通过调节运放  $U_1$  的输出控制三角波与反相器正负门限电压的交点位置,实现对 PWM 波占空比的调节。电路设计如图 6 所示,PWM 波的占空比与  $V_{\text{IN}}$ 、 $V_{\text{F}}$ 、 $V_{\text{CC}}$  相关。PWM 波电路供电电压  $V_{\text{CC}}$  为  $V_+$  和  $V_-$  的电压差。 $V_{\text{CC}}$  调节的精度取决于单片机晶振的振荡频率和频率精确度,且不依赖三角波边沿的线性度,对元器件参数的容差能力强。

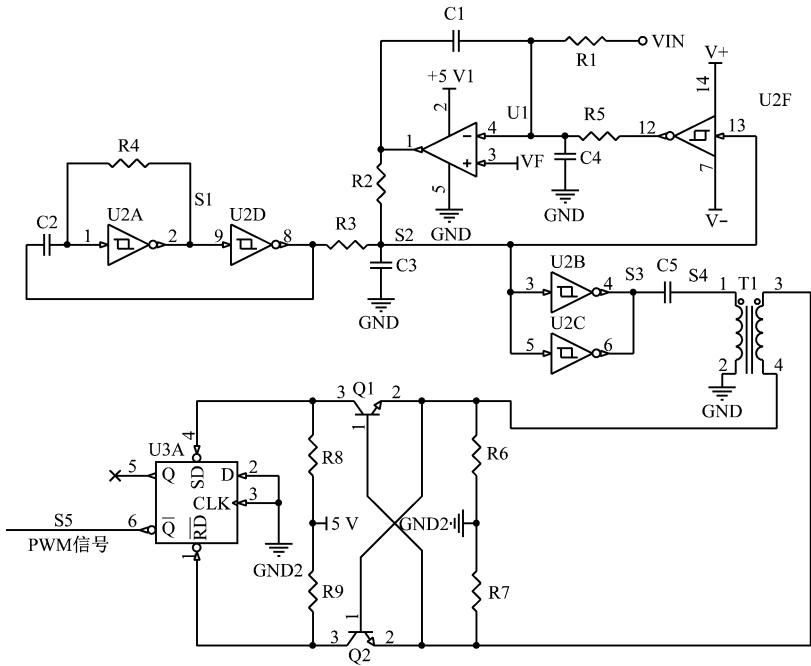


图 6 PWM 调制解调电路

2 抗干扰措施与设计

隔离变送器工作在轨道交通牵引直流供电母线附近,这种环境必然要求数据采集和传输具有较强的抗干扰能力。为满足地铁牵引系统 AC 15 kV

以上隔离耐压的要求,利用平板变压器和 PCB 内嵌互感器进行信号隔离,增加接地屏蔽层,减少辐射噪声的影响。输入端采用低噪声差分放大设计,抑制高压大功率系统中存在的高共模电压信号,通过电路板合理布局提高电路的抗干扰性能。采用禁

用单片机通讯端口,设计单片机 I/O(输入/输出)口滤波。整机采用低功耗设计,采用核心的两级串联稳压技术,通过单片机产生调节的信号使开关稳压电路输出稳定的直流电压,降低线性稳压电路的功耗;其他器件也均采用低功耗器件,电源输入端采用低通滤波器,将开关电源产生的高次谐波成分滤除,以提高装置的稳定度,进一步适合高隔离监测场合。

### 3 测试结果与分析

#### 3.1 温度系数

该高隔离变送器的关键器件均采用低温度系数的器件。该产品具有良好的温度系数,温度系数 $\leq 50 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。隔离变送器输出电流与环境温度的关系图如图 7 所示。

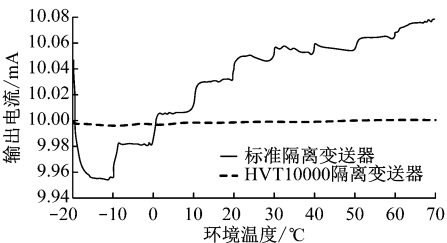


图 7 隔离变送器输出电流与环境温度的关系图

#### 3.2 共模截止

该高隔离变送器具有良好的共模抑制比(CM-

RR)性能,在直流电压输入时,CMRR $\geq 150 \text{ dB}$ ;交流 50 Hz 电信号输入时,CMRR $\geq 120 \text{ dB}$ ;瞬态电压输入时,T-CMRR $\geq 115 \text{ dB}$ (1 000 V, $t_r = 1 \text{ }\mu\text{s}$ ),如图 8 所示。

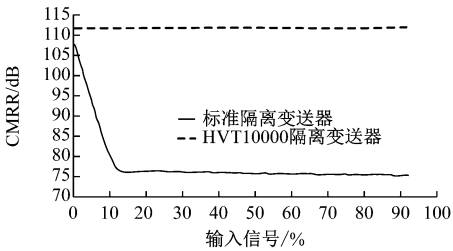


图 8 隔离变送器 CMRR 性能对比

#### 3.3 零点特性

该高隔离变送器选用低零点漂移的器件和精准控制 PWM 电路电源的参考地电平,控制整机的零点偏移 $\leq 5 \text{ mV}$ 。

#### 3.4 响应时间

该高隔离变送器在满足可靠性的基础上,经过反复试验验证可控制整机响应时间 $\leq 110 \text{ }\mu\text{s}$ 。

#### 3.5 传导发射和敷设发射试验

传导发射和辐射发射试验数据如表 1 所示。隔离变送器传导发射试验频谱如图 9 所示。隔离变送器敷设发射试验频谱如图 10 所示。

表 1 传导发射和辐射发射试验

发射种类	频率范围/MHz	极限值	参考标准
辐射式发射	30 ~ 230	30 dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ ) 准峰值,在 3 m 处测试	EN 61326 Klass B EN 55022 Klass B
	230 ~ 1 000	37 dB( $\mu\text{V}/\text{m}$ ) 准峰值,在 3 m 处测试	
	0.15 ~ 0.50	66 ~ 56(dB $\mu\text{V}$ ) 准峰值,56 ~ 46(dB $\mu\text{V}$ ) 平均值	
传导式发射	0.50 ~ 5.00	56(dB $\mu\text{V}$ ) 准峰值,46(dB $\mu\text{V}$ ) 平均值	EN 55022 Klass B
	5.00 ~ 30.00	60(dB $\mu\text{V}$ ) 准峰值,50(dB $\mu\text{V}$ ) 平均值	

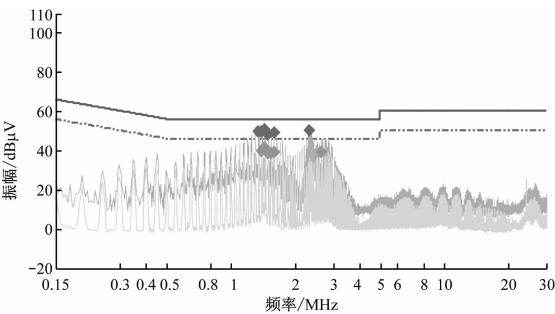


图 9 隔离变送器传导发射试验频谱图

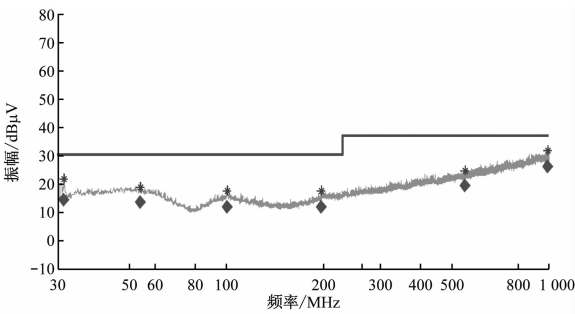


图 10 隔离变送器敷设发射试验频谱图

图 11 为隔离变送器外观图,该模块已顺利通过权威实验室的电磁兼容及功能性试验,目前已经在地铁线路中应用。

测试参数与国外产品主要技术参数对比情况如表 2 所示。由表 2 可见,本设计产品达到并超过国际同类产品水平。

表 2 高压隔离变送器主要技术参数对比表

项目	进口某型号	本设计产品
输入	$\pm 60\text{ mV} \sim \pm 2\text{ 200 V}$	$\pm 60\text{ mV} \sim \pm 3\text{ 600 V}$
输出	$\pm 20\text{ mA}, 4 \sim 20\text{ mA}, \pm 10\text{ V}$	$\pm 20\text{ mA}, 4 \sim 20\text{ mA}, \pm 10\text{ V}$
输入电阻	范围 $\leq 1\text{ V}$ ,约 $100\text{ k}\Omega$ ;范围 $> 1\text{ V}$ , $> 2\text{ M}\Omega$	范围 $\leq 1\text{ V}$ ,约 $1\text{ 00 k}\Omega$ ;范围 $> 1\text{ V}$ , $> 2\text{ M}\Omega$
输入电容	范围 $\leq 1\text{ V}$ ,约 $10\text{ nF}$ ;范围 $> 1\text{ V}$ ,约 $1\text{ nF}$	范围 $\leq 1\text{ V}$ ,约 $10\text{ nF}$ ;范围 $> 1\text{ V}$ ,约 $1\text{ nF}$
过载电容	$\leq 10\text{ V}, 36\text{ V}$ 抑制二极管,连续电流 $20\text{ mA}$ ; $> 10\text{ V}, 150\text{ V}$ 抑制二极管,连续电流 $3\text{ mA}$	$\leq 10\text{ V}, 36\text{ V}$ 抑制二极管,连续电流 $20\text{ mA}$ ; $> 10\text{ V}, 150\text{ V}$ 抑制二极管,连续电流 $3\text{ mA}$
负载	输出电流 $\leq 12\text{ V}(20\text{ mA}, 600\text{ }\Omega)$ 输出电压 $\leq 10\text{ mA}(10\text{ V}, 1\text{ 000 }\Omega)$	输出电流 $\leq 12\text{ V}(20\text{ mA}, 600\text{ }\Omega)$ 输出电压 $\leq 10\text{ mA}(10\text{ V}, 1\text{ 000 }\Omega)$
失调误差	$< 10\text{ mV}$	$< 5\text{ mV}$
纹波	$< 10\text{ mV}$	$< 8\text{ mV}$
增益误差	$< 0.1\%$	$< 0.1\%$ (实测值)
截止频率( -3 dB)	$> 5\text{ kHz}$ ,可在出厂时设置为 $10\text{ Hz}$	$> 5\text{ kHz}$ ,可在出厂时设置为 $10\text{ Hz}$
响应时间 $T_{90}$	约 $110\text{ }\mu\text{s}$	约 $110\text{ }\mu\text{s}$
共模抑制比	输入范围 $\leq 1\text{ V}$ CMRR 约 $150\text{ dB}(\text{DC}/\text{AC}; 50\text{ Hz})$ T-CMRR 约 $115\text{ dB}(1\text{ 000 V}, t_r = 1\text{ }\mu\text{s})$ CMRR,DC 约 $150\text{ dB}$ ;AC $50\text{ Hz}$ 时约 $120\text{ dB}$	输入范围 $\leq 1\text{ V}$ CMRR 约 $150\text{ dB}(\text{DC}/\text{AC}; 50\text{ Hz})$ T-CMRR 约 $115\text{ dB}(1\text{ 000 V}, t_r = 1\text{ }\mu\text{s})$ CMRR,DC 约 $150\text{ dB}$ ;AC $50\text{ Hz}$ 时约 $120\text{ dB}$
温度影响	$< 0.005\%/K$ ,满量程	$< 0.005\%/K$ ,满量程
电源	$20 \sim 253\text{ V}, \text{AC}/\text{DC}$ AC $48 \sim 62\text{ Hz}$ ,约 $2\text{ VA}$ ;DC,约 $1\text{ W}$	$20 \sim 253\text{ V}, \text{AC}/\text{DC}$ AC $48 \sim 62\text{ Hz}$ ,约 $2\text{ VA}$ ;DC,约 $1\text{ W}$
隔离测试电压	$15.0\text{ kV}/\text{AC}$ ,输入对输出和电源	$18.5\text{ kV}/\text{AC}$ ,输入对输出和电源
工作电压 (基本绝缘)	输入、输出和电源:最高 $3\text{ 600 V AC}/\text{DC}$ , 过压 III 类和污染度 2	输入、输出和电源:最高 $3\text{ 600 V AC}/\text{DC}$ , 过压 III 类和污染度 2
额定隔离电压	输入、输出和电源:最高 AC/DC $3\text{ 000 V}$ , 过压 III 类和污染度 2	输入、输出和电源:最高 $3\text{ 600 V AC}/\text{DC}$ , 过压 III 类和污染度 2
EMC(电磁兼容)	辐射干扰为 B 级;抗干扰能力为工业级	辐射干扰为 B 级;抗干扰能力为工业级
环境温度	工作温度为 $-10 \sim +70\text{ }^\circ\text{C}$ ;运输和存储温度为 $-40 \sim +85\text{ }^\circ\text{C}$	工作温度为 $-20 \sim +70\text{ }^\circ\text{C}$ ;运输和存储温度为 $-40 \sim +85\text{ }^\circ\text{C}$



图 11 隔离变送器外观图

4 结语

本文分析了目前轨道交通直流牵引供电系统直流测量的现状,并以电磁兼容为出发点,提出了一种 PWM 调制解调的互感器用于高电压电磁隔离的方法。所研制的基于脉冲幅度调制技术的隔离变送器,具有高精度、高隔离电压、高可靠性的优点。测试表明,该隔离变送器承受 AC/DC 的永久性电压最高达  $3\text{ 600 V}$ ,快速瞬态电压达 AC  $20\text{ kV}$ ,满足 EN 61140 标准在输入输出和电源间实施保护

性隔离,适用于 DC 3 000 V 的直流轨道系统。输入输出和电源之间的隔离电压、截止频率、测量误差、温度系数、失调、纹波等核心参数均优于国际知名品牌的产品,满足直流牵引供电系统保护测量的要求。该隔离变送器已通过国家电气检测中心性能及电磁兼容试验,指标均达到或超过国外同类产品,目前已在地铁线路及直流输配电工程中批量使用。应用实践表明,该设计产品适合最高 DC 3 000 V 的直流轨道系统。该产品也可应用于工业直流配电、船舶军舰推进系统直流配电等直流配电领域。

## 参考文献

- [1] 邵海明,梁波,林飞鹏,等.国家直流大电流计量标准研究[J].中国计量,2014(3):72.
- [2] 陈庆.基于霍尔效应和空芯线圈的电流检测新技术[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [3] 张艳,马毅.高压直流电流测量装的应用现状与研究进展[J].电测与仪表,2014(11):32.
- [4] 常伦凯,从培建,张马龙,等.直流牵引供电系统新型传感器的研究[J].城市轨道交通研究,2018(8):53.
- [5] 杨莹冰.用分流器取代霍尔传感器进行电流测量[J].都市轨道交通,2013(2):127.
- [6] 郭旭恒,林国松.基于FPGA的地铁开关柜隔离放大单元设计[J].自动化信息,2016(3):69.
- [7] 杨海英,李辉,李刚.基于现场可编程门阵列的地铁直流保护装置母线采集模块设计[J].城市轨道交通研究,2013(11):103.
- [8] THIERRY B, MARC P. Contactless power and information transmission[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2002, 38(5):1266.
- [9] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834):83.
- [10] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 6-4: generic standards; emission standard for industrial environments; IEC 61000-6-4[S]. Geneva: IEC, 2006.
- [11] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 6-2: generic standards; immunity for industrial environments; IEC 61000-6-2[S]. Geneva: IEC, 2005.
- [12] IEC. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4-8: testing and measurement techniques; power frequency magnetic field immunity test; IEC 61000-4-8[S]. Geneva: IEC, 2016.
- [13] CENELEC. Electrical equipment for measurement, control and laboratory use; EMC requirements Part 1: general requirements; EN 61326-1[S]. Brussels: CENELEC, 2013.
- [14] CENELEC. Information technology equipment; radio disturbance characteristics; limits and methods of measurement; EN 55022[S]. Brussels: CENELEC, 2010.

(收稿日期:2019-07-24)

## (上接第104页)

换乘车站比例高,且换乘站的换乘客流量大。因此,在进行环线的规划时应考虑到未来可能产生的换乘需求,提前做好设施的规划和预留。尽管环线的换乘客流较多,但是其出发和到达功能仍然是其作为轨道交通线路最主要的功能。因此,在进行环线的规划时应尽量使环线经过城市的功能中心,避免环线成为主要承担换乘功能的线路,增加乘客出行的换乘次数。同时,环线与城市空间发展具有互动反馈效应,也可以使环线经过规划的城市功能中心,利用环线对土地开发的引导效应才能加速城市新的功能中心的形成。

但环线的尺度不宜建设过大,即使通过引导,在大环线沿线形成了新的城市功能中心,但仍然会造成沿线开发强度差异过大,使全线的客流强度波动较大,造成资源的浪费。如果有大的环向客运需求,但环线的不同段客流差别较大,且两段之间的换乘客流较小时,可以考虑分段进行运营组织,减少资源的浪费。

国内多个城市正在规划建设城市轨道交通环线,但城市轨道交通的建设是百年大计,而城市的空间结构以及居民的出行需求特征到底是不是支持环线的建设,尚需要经过反复论证。希望本文能为国内环线的规划建设起到一定的借鉴作用。

## 参考文献

- [1] 郑猛,陈华,余世英.城市轨道交通环线及其应用[J].城市轨道交通研究,2008(8):1.
- [2] 孙元广,郑翔.城市轨道交通环线运营模式研究与实践[J].都市轨道交通,2015(2):33.
- [3] 王晓荣,荣朝和,盛来芳.环状铁路在大都市交通中的重要作用:以东京山手线铁路为例[J].经济地理,2013(1):54.
- [4] 中国城市规划设计研究院.成都城市轨道交通9号线工程可行性研究客流预测[R].2015.
- [5] 王文聪,杨东媛,李玮峰,等.东京轨道交通双环线特征分析及其对上海的启示[J].城市轨道交通,2017(2):125.
- [6] 马毅林,温慧敏,刘剑锋,等.城市轨道交通环线客流特征分析及启示[J].城市轨道交通,2013(6):49.

(收稿日期:2019-06-03)