

# 南京宁和城际轨道交通大胜关桥 感应电压吸收装置设计

林晓伟<sup>1</sup> 丰瀚麟<sup>2</sup>

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 210061, 南京; 2. 南京麦格安倍电气科技有限公司, 211100, 南京 // 第一作者, 高级工程师)

**摘要** 高铁和城际轨道交通同桥近距离敷设并线过江, 这在国内建设的城际轨道交通线路中未有先例可循, 而由此带来的由电磁感应造成的安全隐患尤为突出。对高铁与城际轨道交通同桥并行情况下, 高铁对城际轨道交通所产生的电磁影响进行了定量分析与计算, 并在此基础上提出了感应电压吸收装置的设计方案。阐述了该装置的功能及其部件选型。

**关键词** 城际轨道交通; 大胜关桥; 感应电压吸收装置

**中图分类号** O441.3; U231.8; U238

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.06.048

## Design of Nanjing Ninghe Intercity Rail Transit Dashengguan Bridge Induced Voltage Absorption Device

LIN Xiaowei, FENG Hanlin

**Abstract** The situation where high-speed railway and intercity rail transit are laid on the same bridge crossing the river at close distance has no precedent cases in the domestic construction of intercity rail transit lines. The safety hazards caused by electromagnetic induction are particularly noticeable. In view of the situation that high-speed railway and intercity rail transit are passing through the same bridge, the electromagnetic influence of high-speed railway on intercity rail transit is quantitatively analyzed and calculated, on the basis of which, design scheme of the induced voltage absorption device is given. Functions and component selection of the device are expounded.

**Key words** intercity rail transit; Dashengguan bridge; induced voltage absorption device

**First-author's address** NARI Technology Development Co., Ltd., 210061, Nanjing, China

南京宁和城际轨道交通一期工程大胜关桥区段与沪汉蓉铁路(设计速度为 250 km/h)和京沪高铁(设计速度为 380 km/h)同桥并行 3.674 km。这种特殊情况在国内外尚属首例。宁和城际轨道交通上、下行线路分别位于沪汉蓉铁路和京沪高铁外侧, 与两线

的线间距分别约为 8.2 m 和 8.4 m, 如图 1 所示。

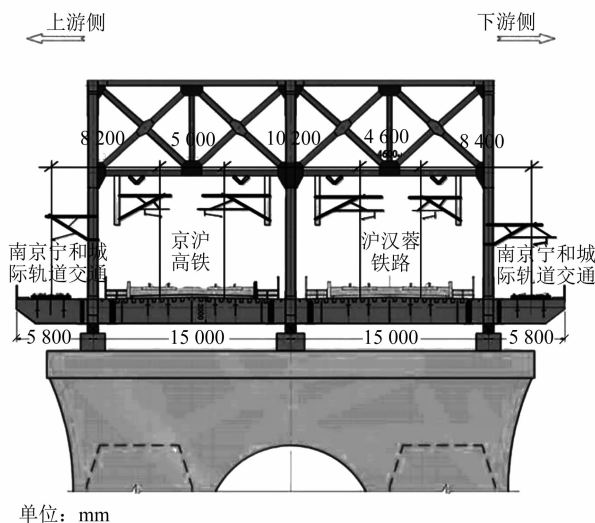


图 1 大胜关桥区段各线路接触网位置示意图

京沪高铁及沪汉蓉铁路均为国家铁路大动脉, 且均采用 AT(自藕变压器)供电方式, 牵引供电为交流 27.5 kV, 牵引电流每线约为 1 000~1 200 A; 而宁和城际轨道交通采用直流 1 500 V 电压供电。两者在供电制式及电压等级上存在很大差异。高铁接触网在电磁影响下, 作为干扰源通过感性和容性耦合, 会在线间距不超过 9 m 的城际轨道交通接触网、钢轨等与其平行敷设的导体上产生电磁和静电感应, 其产生的感应电压会对维护人员的人身安全产生严重危害; 同时城际轨道交通通信、信号等系统也易受高铁接触网电磁感应和电磁干扰的影响, 甚至会严重危害设备运行安全, 造成不可挽回的损失。因此, 研究高铁与城际轨道交通同桥并行情况下, 高铁对城际轨道交通所产生的电磁影响, 并设计相应的感应电压吸收装置, 是解决上述难题的有效途径。

## 1 静电感应电压计算

南京宁和城际轨道交通一期工程在大胜关桥

上采用架空柔性接触网 DC 1 500 V 供电,钢轨回流。直流牵引供电系统的电压及其波动范围应符合如下规定:在任何运行方式下,接触网最高电压不得高于最高值 1 800 V;高峰小时负荷时,全线任一点的电压不得低于最低值 1 000 V。

并行区段接触网于大胜关桥主桥两侧分别设置绝缘锚段关节,由区间牵引变电所 1、2 组成双边供电回路,如图 2 所示。

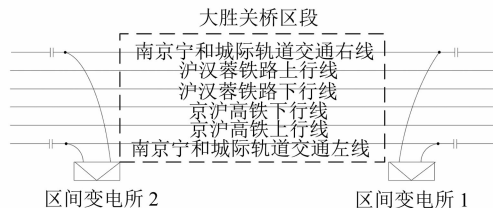
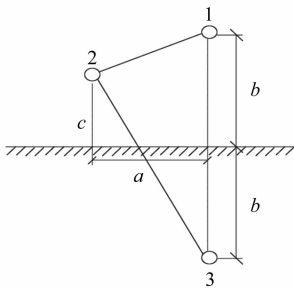


图2 大胜关桥区段各线路示意图

本文对高铁停运后,接触网带电 AC 2×27.5 kV 的场景进行分析。此场景下,高铁接触网正常送电,对城际轨道交通接触网主要产生静电感应电压。根据电场效应,建立如下静电感应电压计算模型,如图 3 所示。



注: 1 为高铁接触网(接触线、承力索、正馈线);  
2 为城际轨道交通接触网(接触线、承力索);  
3 为高铁接触网带电导线相对于梁面的镜像;  
a 为高铁接触网与城际轨道交通接触网的水平距离;  
b、c 分别为高铁与城际轨道交通接触网距离轨面的高度。

图3 静电感应电压计算模型

高铁接触网正常通电时对城际轨道交通接触网产生的感应电压  $\Delta U_g$  为:

$$\Delta U_g = K_j U_j bc / (a^2 + b^2 + c^2) \quad (1)$$

式中:

$K_j$ ——感应系数,京沪高铁与沪汉蓉铁路均为复线,取 0.6;

$U_j$ ——高铁接触网或正馈线电压。

将京沪高铁、沪汉蓉铁路接触网及正馈线相关数据代入式(1),分别计算高铁接触网对城际轨道交通接触网的感应电压值后再进行叠加,从而得到相应的感应电压值。在不考虑京沪高铁与沪汉蓉

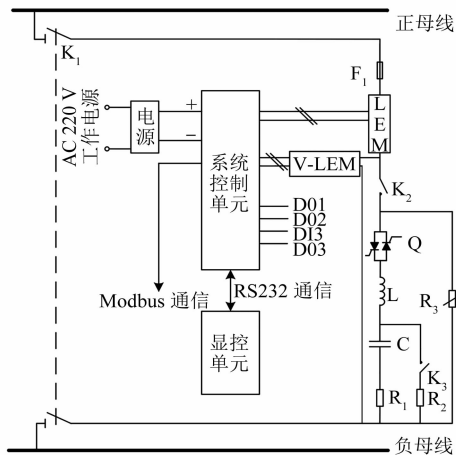
铁路上、下行相位差的情况下,通过计算得出高铁接触网对城际轨道交通接触网产生的静电感应电压约为 373.8 V。

## 2 感应电压吸收装置设计

### 2.1 设计方案

感应电压吸收装置系统采用电感与电容串联的电路进行稳压滤波。高铁线路正常运行时,会引起城际轨道交通接触网感应电压瞬间升高,其最大值可能达到 400 V 左右,感应电流最大值为 100 A。GB 50157—2013《地铁设计规范》规定:电压的允许值范围为 1 000~1 800 V,因此只要将该瞬间升高或者降低的电压通过 LC(电感电容)串联谐振电路的方式进行滤波,实现削峰填谷,将接触网供电电压稳定在标准范围内,实现其对感应电压的吸收作用,就可以保证在出现极端感应电压的情况下城际轨道交通供电系统正常运行。

感应电压吸收装置系统逻辑如图 4 所示。该装置主要包括配电系统、吸收电路及保护控制系统等 3 个部分。配电系统包括隔离开关  $K_1$ 、接触器  $K_2$ 、放电接触器  $K_3$ 、熔断器  $F_1$  以及控制这些部件的配电继电器等;吸收电路包括投切晶闸管  $Q$ 、电感  $L$ 、电容  $C$ 、阻尼电阻  $R_1$  和放电电阻  $R_2$ ;保护控制系统包括保护测控单元、隔离放大单元、电压转换单元、辅助电源及其配套传感器等。



注: RS232 表示异步传输标准接口; LEM 表示电流传感器; V-LEM 表示电压传感器。

图4 感应电压吸收装置系统逻辑图

### 2.2 装置功能

感应电压吸收装置可实现对接触网工频感应电压的吸收,保证接触网工作电压在 1 000~1 800 V 额定范围内;该装置也可以通过最大过流保护或电

流增量保护等实现故障录波功能,采样率不小于 10 kHz,可提供波形查看窗口,并实现录波文件的远传。

## 2.3 部件选型与设计

### 2.3.1 隔离开关

隔离开关是一个应用于直流牵引变电站的无载开关,用于线路的接通和隔离,可有效隔断电网的正负线。作为 DC 1 500 V 接触网与感应电压吸收装置的隔离,隔离开关须在不带负载的情况下进行分断。图 5 为该型隔离开关的外观样式。其具体型号为赛雪龙双刀型 SWS1820MA2ZB1,额定电压为 DC 1 800 V,额定电流为 2 000 A,采用人工方式操作。隔离开关使用机械钥匙锁锁定,具有结构紧凑、短时耐受电流能力强等特点。

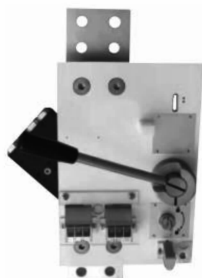


图 5 高压隔离开关

### 2.3.2 熔断器

熔断器用于开断感应电压吸收装置内部的短路故障。熔断器作为保护环节,其短路开断过程中的电弧能量值很高,并且由于直流系统燃弧电压无过零,使得安全熄灭直流电弧要比分断工业电气系统的交直流短路更为艰难。因此,所选择的熔断器必需具备优异的高分断能力、强大的限流能力、短暂的熄弧时间以及消除全部燃弧能量的可靠性;同时,熔断器还需具备正常运行 20 年不熔断的耐过载、抗老化等工作性能。

熔断器的额定电流  $I_{NF}$  是以电路中实际流过熔断器的电流有效值  $I_F$  为基础进行计算,同时计算中应考虑环境温度、冷却条件、电流裕度等因素对其的影响。 $I_{NF}$  的计算公式为:

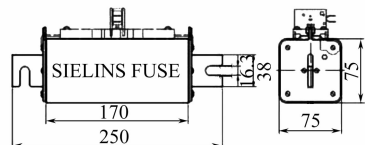
$$I_{NF} \geq KI_F \quad (2)$$

式中:

$K$ ——熔断器裕度系数,通常取 1.5~2.0。

本文选取西安西联熔断器制造有限公司生产的 DTR 系列轨道机车专用型直流熔断器。考虑到开断感应电压吸收装置吸收的额定感应电流为

100 A,结合熔断器应预留 2 倍电流裕量,因此,选择 DTR-LZ3.17-200 型熔断器。该型熔断器的额定工作电压为 DC 1 800 V,额定电流为 200 A,时间常数为 10~20 ms。该型熔断器的外观尺寸如图 6 所示。



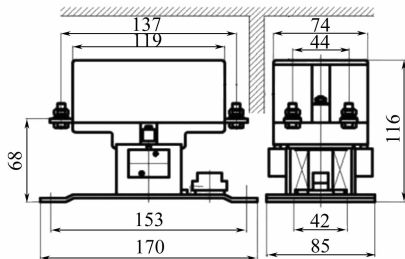
单位: mm

注: SIELINS FUSE 表示西联交直流半导体快速保护熔断器。

图 6 DTR-LZ3.17-200 型熔断器的外观尺寸图

### 2.3.3 直流接触器

直流接触器选用沈阳二一三控制电器制造有限公司生产的 BC98-ZTB 系列铁路专用高压直流接触器。该直流接触器型号为 BC98-Z200/2022T1,额定工作电压为 1 500 V,额定工作电流为 200 A,控制线圈电压为直流 24 V,带有 2 个常开主触点以及 2 个常开、2 个常闭的辅助触点。直流接触器的主触点串联使用,其安装和外形尺寸如图 7 所示。直流接触器采用电磁合闸以降低保持功率,同时限制最大电弧电压,具有高可靠性机械性能和电气性能。直流接触器设计负荷满足 IEC 60077-1/2—2017 和 GB 14048.1—2016《低压开关设备和控制设备总则》的要求。隔离开关的控制需外接控制继电器。继电器选用欧姆龙自动化(中国)有限公司生产的 MY2N-DC 24 V 继电器。该型继电器为直插型、带底座、双刀双掷,且两触点并用,最大可实现 24 V/10 A 的电流通断。控制继电器的外观尺寸如图 8 所示。



单位: mm

图 7 主接触器外形尺寸图

### 2.3.4 放电接触器

放电接触器需要装有放电通路,放电通路用于设备停止工作后或维护前完全释放柜内储能设备剩余电量。由于母线存储的电量较少,因此,可选

择小容量的高压接触器作为放电通路的开关装置。本文选择美国 GIGAVAC 放电接触器,型号为 G81A357,其额定电压达到 10 kV,额定电流为 20 A,控制电压为 24 V。放电接触器的外观尺寸如图 9 所示。放电接触器通过控制继电器来实现连接/断开其控制的线圈电流。控制继电器选用常开触点的欧姆龙 MY2N-DC 24 V 继电器。该型继电器为直插型、带底座,可实现最大值为 10 A 的电流通断。

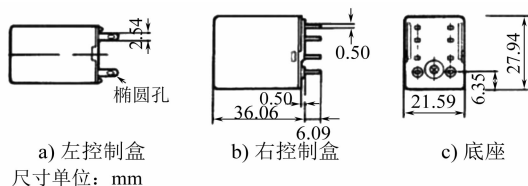
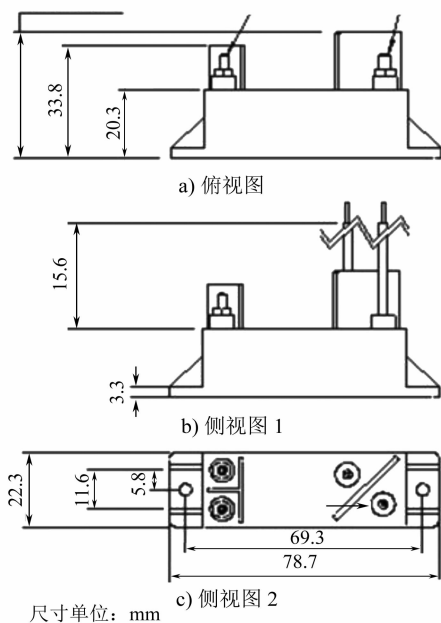


图 8 控制继电器的外观尺寸图



尺寸单位: mm

图 9 放电接触器的外观尺寸图

### 2.3.5 放电电阻

放电电阻  $R$  主要根据电容大小和放电时间进行选择。设电网电压为 1 500 V,吸收电容  $C$  为 320  $\mu\text{F}$ ,设在 10 s 内需将电容放至原有电压的 5%,即 75 V。则电阻值应满足:  $R \leq 10 \text{ k}\Omega$ 。通过计算得到,充电初始瞬态电阻上消耗的功率为 225 W,平均放电功率为 36 W。

考虑到电阻功率和耐压等因素,选择 RX24-50 W 型铝壳绕线电阻器。该电阻器电阻值为 2  $\text{k}\Omega$ ,质量为 30 g,采用 5 个进行串联;标准散热板表面积为 995  $\text{cm}^2$ ,厚度为 1 mm。电阻器外形尺寸如图 10 所示。

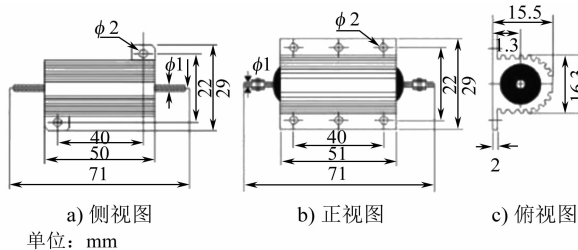
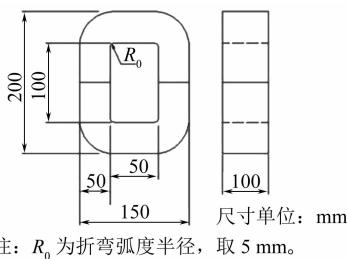


图 10 RX24-50 W 型铝壳绕线电阻器的外观尺寸图

### 2.3.6 吸收电感

吸收电感按照感应电流最大值 100 A、直流母线电压 1 500 V 进行设计,LC 在 50 Hz 处谐振,则  $L$  的容量为 100 kVar。因此,采用 LC 吸收方案的参数选取为:  $L = 31.7 \text{ mH}$ ,  $C = 320 \mu\text{F}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $I_{\text{max}} = 141.4 \text{ A}$ 。吸收电感采用硅钢 CD 型磁心,线包环氧树脂浇注,电抗器额定电流为 100 A。吸收电感铁心规格为 XCD 40 mm×100 mm×100 mm,其尺寸如图 11 所示。设计最大磁通密度为 1 T,实际磁心  $A_e A_w = 2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^4$ 。



注:  $R_0$  为折弯弧度半径,取 5 mm。

图 11 吸收电感铁心的外形尺寸图

根据 PQ 法估算所需串联的电感个数为:

$$P_Q = L I_L I_{\text{max}} / (B_m K_\mu j) \quad (3)$$

式中:

$j$ ——电流密度。

根据式(3)可知,采用 12 个电感串联时,可以达到需要的电感值,即单个电感值为 2.642 mH。则电感匝数  $N$  为:

$$N = L_f I_{\text{max}} / (B_m A_e) \quad (4)$$

最大磁感应强度为:

$$B_m = L_f I_{\text{max}} / (N A_e) \quad (5)$$

气隙为:

$$\delta = \frac{\mu_0 N^2 A_e}{L_f} \left( 1 + \frac{\delta}{a} \right) \left( 1 + \frac{\delta}{b} \right) \quad (6)$$

导线选择玻璃丝包扁铜线,其截面尺寸为 2 mm×6 mm,有效截面积为 11.79  $\text{mm}^2$ 。通过计算可得, $j$  为 805 A/ $\text{mm}^2$ ,窗口系数  $K_\mu$  为 0.184。根据式(3)一式(6),得到  $P_Q = 3.2 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ ,  $N = 78$ ,  $B_m =$

0.998 T,  $\delta=30.2$  mm。

2.3.7 吸收电容

吸收电容  $C$  取  $320\text{ }\mu\text{F}$ , 则电容电压最大值  $V_{C,\text{max}}$  为  $3\text{ }207\text{ V}$ 。设定电网电压最大值为  $1\text{ }800\text{ V}$ , 电流为  $100\text{ A}/50\text{ Hz}$ 。选用 DAWNCAP 的  $4\text{ }000\text{ V}$  无感薄膜电容, 型号为 DHE4000K33 和 DHE4000K47 各  $4$  个并联, 组成  $320\text{ }\mu\text{F}$  的吸收电容。其外形尺寸如图 12 所示, 参数如表 1 所示。

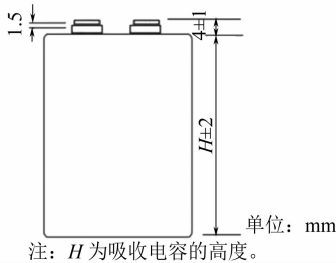


图 12 吸收电容外形尺寸图

表 1 吸收电容参数

型号	$C/\mu\text{F}$	$D/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$I_{\text{peak}}/\text{kA}$	$I_{\text{rms}}/\text{A}$	$R_{\text{ES}}/\text{m}\Omega$	$L_s/\text{nH}$	$R_{\text{th}}/(\text{K}/\text{W})$	$W_n/(\text{Ws})$
DHE4000K33	33	116	130	1.2	33	4.2	40	2.8	264
DHE4000K47	47	136	130	1.6	37	3.0	40	2.4	376

注:  $I_{\text{peak}}$  表示峰值电流;  $I_{\text{rms}}$  表示有效值电流;  $R_{\text{ES}}$  表示寄生电阻;  $L_s$  表示寄生电感;  $R_{\text{th}}$  表示热阻;  $W_n$  表示谐振频率;  $I_{\text{rms}}$  中的数值表示每  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、每  $10\text{ kHz}$  下吸收电容通过的电流;  $R_{\text{ES}}$  中的数值表示每  $1.0\text{ kHz}$  下吸收电容的电阻值。

2.3.8 阻尼电阻

阻尼电阻用于抑制感应电压吸收装置内部的 LC 谐振。阻尼电阻太大会影响吸收效果, 阻尼电阻太小, 会使得振荡时间太长, 影响吸收的响应时间。根据相关仿真计算, 得到阻尼电阻  $R$  为  $0.7\text{ }\Omega$ 。选择 ZB-2 型板型电阻器, 具体型号为 ZB2- $0.7\text{ }\Omega$ 。经试验验证, 其拥有良好的散热效果, 且具有短时的抗过电流能力。电阻器的外形如图 13 所示。

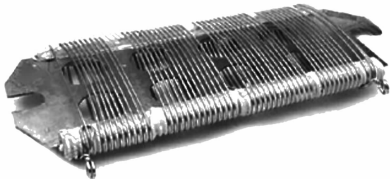


图 13 阻尼电阻外形图

2.3.9 投切晶闸管

投切晶闸管用于对 LC 滤波回路的快速投切。由于感应电流为双向, 因此采用两个晶闸管模块进行反向并联。选用中车株洲电力机车研究有限公司设计的 KP8300-65 型模块, 其通态平均电流为  $300\text{ A}$ , 反向重复峰值电压为  $6\text{ }500\text{ V}$ 。

2.3.10 压敏电阻

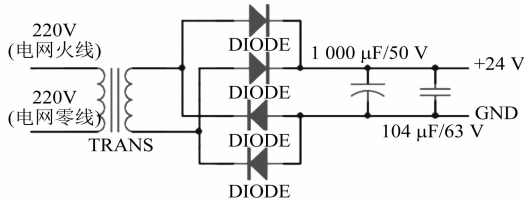
压敏电阻用于在接触器切合时保护感应电压吸收装置的内部器件。其设计在接触器后级, 选用 Littelfus 公司生产的 BB 系列压敏电阻, 型号为 V172BB60。该型压敏电阻的正常工作电压为  $2\text{ }150\text{ V}$ , 瞬态吸收能量达到  $6\text{ kJ}/2\text{ ms}$ 。

2.3.11 辅助电源

辅助电源为整个控制系统和控制继电器提供能量。辅助电源系统采用 DC  $24\text{ V}$  低压供电, 设计

功率为  $48\text{ W}$ 。设计  $1$  个  $200\text{ W}$  变压整流器, 将辅助供电的  $220\text{ V}$  交流市电转换为所需的电压。辅助电源电路原理图如图 14 所示。

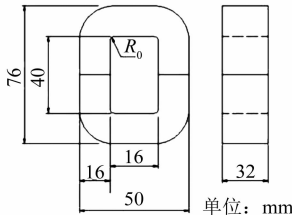
设额定输入电压  $V_p$  为  $220\text{ V}$ , 频率  $f$  为  $50\text{ Hz}$ , 变压器效率  $\eta$  为  $0.95$ , 不考虑整流桥效率。则输出电压  $V_o=24\text{ V}$ , 输出电流  $I_o$  为  $2\text{ A}$ , 绕组电流密度  $J$  为  $6\text{ A}/\text{mm}^2$ 。因此, 变压整流器绕组额定, 原边参数为:  $V_p=220\text{ V}$ ,  $I_p=0.23\text{ A}$ ,  $S_p=0.038\text{ mm}^2$ ; 副边参数为:  $V_s=20\text{ V}$ ,  $I_s=2.4\text{ A}$ ,  $S_s=0.4\text{ mm}^2$ 。



注: DIODE 表示二极管; GND 表示电线接地端; TRANS 表示变压器。

图 14 辅助电源电路原理图

选择变压器 XCD  $16\text{ mm}\times32\text{ mm}\times40\text{ mm}$ , 设定最大磁通密度  $B_m$  为  $0.8\text{ T}$ , 磁心  $A_cA_w=3.148\text{ }\times10^{-3}\text{ m}^3$ 。其尺寸如图 15 所示。其原边绕组匝数、副边绕组匝数、窗口系数核算如下:  $N_p=2\text{ }518$ ,  $N_s=229$ ,  $K_u=0.294$ 。



注:  $R$  取  $5\text{ mm}$ 。

图 15 辅助电源变压器尺寸

良好安全形势。

3) 建立健全应急演练机制。重视日常应急演练培训,确保工作人员技能熟练,有效减少事故反馈层与事故致因层之间的关联。

## 4 结论

1) 本文构建的 HFACS-MA 模型,更好地反映了地铁事故应急处置的特点。该模型提供了完整的事事故调查分析与决策工具,更加适应地铁事故的分析研究。

2) 采用 Apriori 算法,有效分析事故致因链,可以进行事故的预防,为同类事故发生时的处置提供现场支持,对事故的事后定责和整改亦可以提供系统科学的理论支持。

3) 由于地铁事故案例的稀缺,导致 HFACS-MA 模型还未能作为普适性的地铁行业事故分析模型进行推广。还需进一步丰富数据库中事故案例样本,增强模型的行业普适性。

## 参考文献

- [1] ANDREW W E. Fatal train accidents on Europe's railways: 1980—2009 [J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43 (1): 391.
- [2] 王黎静,莫兴智,曹琪琰. HFACS-MM 模型构建与应用[J]. 中国安全科学学报,2014(8): 73.
- [3] WIEGMANN D A, SHAPPELL S A. A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system [M]. Aldershot: Ashgate Publishing Ltd, 2003: 157-162.
- [4] EMRE A. A marine accident analysing model to evaluate potential operational causes in cargo ships [J]. Safety Science, 2017, 92: 17.
- [5] 詹青见. 基于 HFACS-RA 的铁路事故致因建模及混合学习方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [6] 赵金先, 武丹丹, 李堃, 等. 基于改进 HFACS-SPA 的地铁运营人为因素风险评价——以青岛地铁 3 号线项目为例 [J]. 项目管理技术, 2018(11): 13.
- [7] 韩豫, 成虎. 基于脆弱性的地铁运营安全事故致因分析 [J]. 中国安全科学学报, 2013(8): 164.

(收稿日期: 2019-06-09)

(上接第 218 页)

## 3 感应电压吸收装置的安装

由于高铁与城际轨道交通并行区段属于宁和城际轨道交通的高架区间结构,土建结构施工时未考虑感应电压吸收装置安装空间,因此宁和城际铁路工程在该区间 1、2 变电所内的直流牵引母线上各设置 1 台感应电压吸收装置,共 2 套。感应电压吸收装置安装示意图如图 16 所示。



图 16 感应电压吸收装置安装示意图

## 4 结语

本文对高铁与城际轨道交通同桥并行情况下,高铁对城际轨道交通所产生的电磁影响进行了定量分析与计算,并在此基础上给出了感应电压吸

收装置的设计方案,详细阐述了该装置的功能及其部件选型。2017 年 12 月 6 日,该装置与宁和城际轨道交通一期工程同步投入使用,且首次在高铁、城际轨道交通并线运行的过江大桥上得到应用。项目的成功实施,填补了国内高铁、城际轨道交通并线跨江运行时电磁感应干扰消除难题的技术空白,保障了城际轨道交通列车的行车安全,具有强大的技术示范效应,同时也为后续类似项目的实施提供了有益的借鉴和参考。

## 参考文献

- [1] 罗利平. 南京大胜关桥交直流供电系统电磁感应影响分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2011(6): 29.
- [2] 余南. 宁和城际大胜关大桥感应电压吸收仿真分析 [J]. 电子技术与软件工程, 2017(6): 91.
- [3] 宋奇吼, 李学武. 高速铁路接触网对地铁供电系统的电磁干扰研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2013(12): 42.
- [4] 王长宁, 徐源, 江平, 等. 宁和城际轨道交通工程 DPP 项目管理与工程技术 [M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2020: 264-267.

(收稿日期: 2020-09-04)