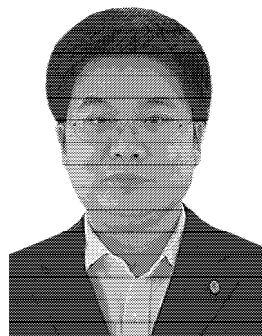


地铁集成式辅助电源研制

曾明高, 严志勇, 张 晓, 刘长清

(株洲南车时代电气技术有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 曾明高(1980-), 男, 工程师, 现从事轨道车辆辅助电源的研发工作。

摘 要: 为了满足地铁车辆大功率交流负载、简化电气接口和降低设备重量的要求, 研发了集成逆变器、充电机、输出隔离变压器电路的集成式辅助电源。从电路、结构和控制方面介绍了地铁集成式辅助电源的研制方案及技术特点, 并通过试验验证各项参数达到设计目标。

关键词: 集成式辅助电源; 逆变器; 充电机; SPWM; 地铁车辆

中图分类号: U231; U264.5*6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2014)01-0069-05

Design of Integrated Auxiliary Power Supply for Metro

ZENG Ming-gao, YAN Zhi-yong, ZHANG Xiao, LIU Chang-qing

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

Abstract: In order to satisfy the requirements of metro vehicle high-power loading, electrical interface simplifying and weight reducing, integrated auxiliary power supply was developed with inverter, charger and output isolation transformer circuit integrated. Development scheme and technical characteristics of integrated auxiliary power supply from the circuit, structure and control were introduced. Auxiliary power supply parameters were proved achieve the design goal by test.

Keywords: integrated auxiliary power supply; inverter; charger; SPWM; metro vehicle

0 引言

地铁辅助电源系统主要包括高压隔离开关、逆变器、充电机、隔离变压器等几部分。目前采用分体式的辅助电源, 其高压隔离开关、逆变器、充电机和隔离变压器都是独立柜体安装, 各柜体都要进行散热设计和相互连线。通过把逆变器、充电机、隔离变压器集成在一起, 统一进行散热管理、简化电气接口, 整体综合考虑布局, 大大减小了整体质量, 节约成本, 方便安装连接。

1 系统方案

集成式辅助电源逆变器电路将外部高压DC 1 500 V转换成AC 380 V为交流负载供电; 充电机电路通过AC 380 V转换成DC 110 V为直流负载供电。

1.1 技术参数

辅助电源主要技术参数如下:

输入电压	DC 1 500 V(1000~1 800 V)
交流输出容量	240 kVA

直流输出功率	25 kW
交流输出	三相380 V/220 V, 频率 50 Hz
直流输出	DC 110 V
交流输出精度	± 5%
直流输出精度	± 1%
交流输出谐波含量	≤ 5%
直流输出纹波	≤ 5%

1.2 主电路

系统采用“二电平IGBT逆变电路+全桥整流和高频DC/DC变换电路”的方式, 主电路图如图1。其工作原理为:

直流输入高压经直流滤波电抗器(L1)、电容器充电电路(V1、RC、KM2)、直流滤波电容器(C1), 送至IGBT逆变器进行逆变后输出PWM波交流电压, 再经输出变压器(TR1)进行电压隔离、降压, 滤波得到低谐波含量的三相正弦电压, 输出三相380 V/50 Hz电压。

从逆变电路输出的稳定的三相380 V输出电压输入到三相整流桥整流, 经过电抗器、电容器滤波后得到直流电压(中间电路电压), 中间电路电压经半桥变换电路高频变换为矩形波电压然后经高频变压器进行隔

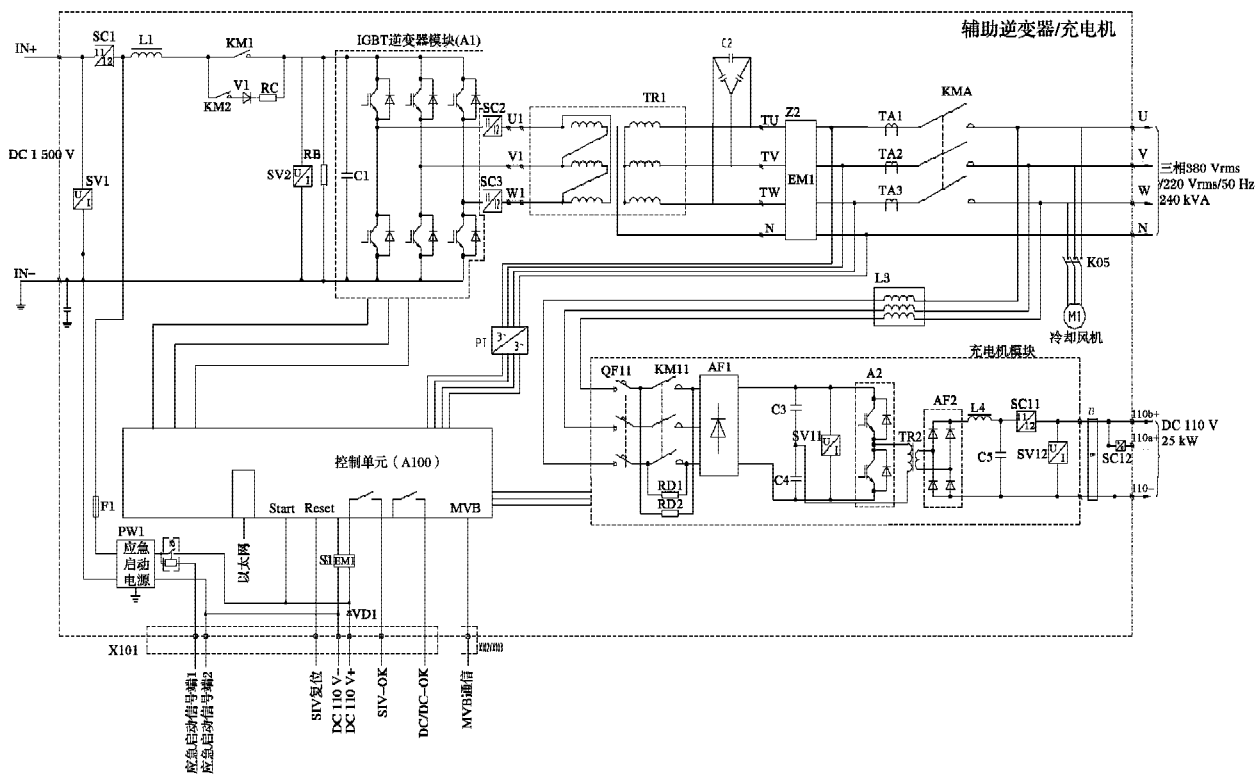


图 1 主电路图

离、降压后,再经高频整流桥整流及电抗器、电容器滤波后得到稳定的DC 110 V电源。

系统采用强迫风冷,交流输出容量240 kVA,直流DC 100 V输出功率25 kW。

2 器件选择

2.1 IGBT 元件参数计算

如果不考虑输出滤波电路及变压器的功率损耗,在逆变器额定输出的情况下,IGBT元件流过的电流为:

$$I_c = 270 \times 10^3 / (1.732 \times 680) \approx 229 \text{ A}$$

考虑2倍过载,在逆变器最大输出的情况下,IGBT元件流过的电流为:

$$I_{c \max} = 2 \times 1.414 \times 270 \times 10^3 / (1.732 \times 680 \times 0.9) \approx 720 \text{ A}$$

选择IGBT的电流的安全系数为峰值电流的1.25倍,则IGBT的 $I_c = 900 \text{ A}$ 。

考虑到最高网压为2 100 V(输入过电压保护值)、关断过电压400 V和1.2倍的电压安全系数等因素,则要求每个IGBT标称电压 $V_{CE} = (2100 + 400) \times 1.2 = 3\ 000 \text{ V}$ 。

因此选用3 300 V/1 200 A的IGBT元件。

2.2 输入滤波电路

1) 滤波电容器C1

$$\text{根据 } C > \frac{10P}{\omega U^2} = \frac{10 \times 270 \times 10^3}{314 \times 1500^2} = 3\ 821 \mu\text{F}$$

式中: P 为额定输出容量, kVA; U 为额定输入电压, V; $\omega = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314$; f 为输出频率, Hz。

取 $C = 4\ 300 \mu\text{F}$ 。

2) 滤波电抗器L1

若取截止频率为 $f_0 = 37 \text{ Hz}$, 则:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} = \frac{1}{4 \times 3.14^2 \times 37^2 \times 4300 \times 10^{-6}} = 4.3 \text{ mH}$$

取 $L = 6 \text{ mH}$ 。实际截止频率 $f_0 = 31.3 \text{ Hz}$ 。

2.3 交流滤波电路

IGBT逆变器输出电压的谐波成分较大,为使SIV输出电压谐波含量低于5%,这些谐波需要由漏磁变压器和滤波电容组成的LC型低通滤波器进行交流滤波。

1) 变压器参数计算

根据HISPWM逆变控制技术可知,逆变模块输出基波有效值(线电压)的最大值为

$$U_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times U_{dc} \times (1 + 15\%)$$

式中: U_{dc} 为逆变器模块的输入端电压。

考虑最小输入电压情况,取 $U_{dc} = 1\ 000 \text{ V}$,则 $U_1 = 680 \text{ V}$ 。

变压器的短路电压降取13%,即在三相电抗器上的相电压压降 $\Delta V = U_1 \times 13\% \div 1.732 = 51.04 \text{ V}$,根据公式 $\Delta V = 2\pi f \times L \times I_c$,则折算到变压器一次侧的漏电感 $L = \Delta V / (2\pi f \times I_c) = 0.709 \text{ mH}$,取变压器空载电压比为680:423,折算到二次侧的漏电感为0.274 mH。

2) 滤波电容器参数计算

交流滤波电容器采用三角形接法,设其每相电容量为 C ,转换为滤波用等效滤波电容量为 $3C$,取 $C = 200 \mu\text{F}$,则 $3C = 600 \mu\text{F}$,LC交流滤波电路的截止频率:

$$f_0 = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{L \times 3C}} = \frac{1}{6.28 \sqrt{0.274 \times 10^{-3} \times 600 \times 10^{-6}}} = 392 \text{ Hz}$$

3 热设计

集成式辅助电源相对于分体式辅助电源来说, 布局更紧凑, 发热元器件更多, 功率等级较大, 传统的自然冷却方式已不能满足设计需要。从结构的复杂性和实现的难易程度来看, 强制风冷结构简单, 复杂性低, 可靠性高, 是功率为数百瓦到数百千瓦的电力电子装置的主要散热方式。因此集成式辅助变流器的冷却采用此类冷却方式。

风道设计对散热效果及噪声有较大的影响。因此集成式辅助电源的风道从以下几个方面来设计:

①逆变模块和整流模块同处一个风道, 将IGBT器件热损耗大的逆变模块布置在进风口, 热损耗较小的充电机模块布置在风道里面。

②通过优化风机蜗壳结构, 减小湍流、负压区。

③离心风机的风对变压器进行散热后再经过出风口出去, 在变压器风道两侧采取隔音降噪措施, 可有效降低由于风机引起的噪声。

在模块的温升、变压器温升、风道阻力的综合因素考虑下, 选择相应的气机, 保证风道中各发热器件所需的风量。

4 结构设计

地铁辅助变流器首次采用大功率的集成式的柜体设计, 柜体尺寸: 2400 mm × 190 mm × 580 mm, 质量1 916 kg。其结构布局如图2所示。

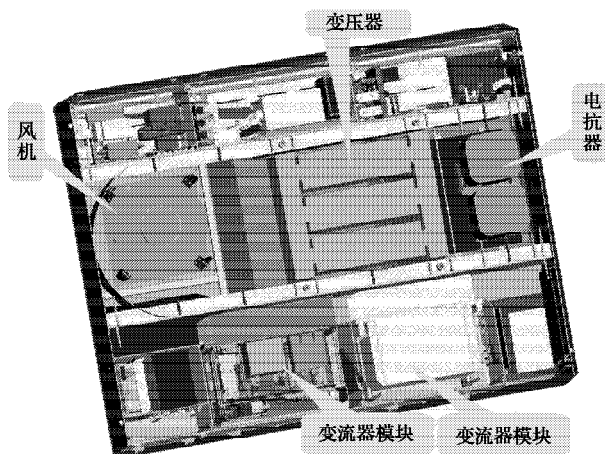


图2 集成式柜体

质量大的磁性元件置于柜体中间, 承重于主梁上, 可使得重心为柜体中部, 并对电磁噪声有较好的隔离作用。变流器模块、控制单元、输入输出电路分别置于两侧, 方便日常维护和故障拆装。进风口置于柜体侧面, 出风口位于底部, 均垂直于行车方向。

5 控制设计

5.1 控制单元

控制单元采用标准6U插件箱结构(见图3), 插件箱内部包含逆变控制板、充电机控制板、模拟输入输

出板、数字输入输出板、电源板、MVB通信接口板和机箱背板。控制单元具备数字信号处理、变流器控制、故障记录、网络通信等功能。

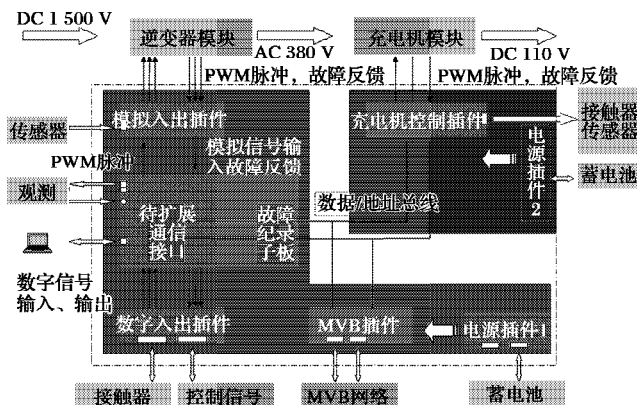


图3 控制单元

5.2 逆变器控制策略

逆变器控制原理如图4所示。

①电压指令和电压互感器PT产生的输出电压反馈(FB)值进行比较得出电压差值, 该值作为电压控制器的输入。

②逆变器输出电流指令和三角载波相比较得到IGBT的门极控制信号。

③频率控制: 启动前, 输出电压 U 与频率 f 为0, 启动时, 频率 f 和电压 U 慢慢上升, 按 U/f =常数关系, 最后 U/f 达到稳定的额定值。

④逆变器输出电压基波频率50 Hz, 正常运行时的频率精度 $\pm 1\%$; 开关频率选择范围1~2 kHz。

5.3 充电机控制策略

充电机控制原理如图5所示。

①直流输出电压和电流通过电压传感器SV12和电流传感器SC11反馈到控制电路, 电流反馈值由限幅器进行限制。

②电压指令和输出电压、电流反馈值比较产生电压差值, 送入电压控制器。

③电压控制器的输出进行A/D转换, 其输出则输入到主控制器。

④主控制器产生半桥电路的IGBT门极控制信号。

5.4 保护控制

系统保护进行分级控制, 共有3种类型的保护: 输入电压故障保护、可自恢复故障保护和手动恢复故障保护。

输入电压故障: 只要故障条件不满足时不要求司机采取任何措施, 可自动复位。

可自恢复故障保护: 在规定时间内(如2 min), 连续发生3次相同故障, 电源运行被锁定, 此时电源一直保持故障状态, 只有进行人工手动复位才能解锁重新启动。

手动恢复故障保护: 只要发生1次, 就直接被锁定, 只有进行人工手动复位才能解锁重新启动。

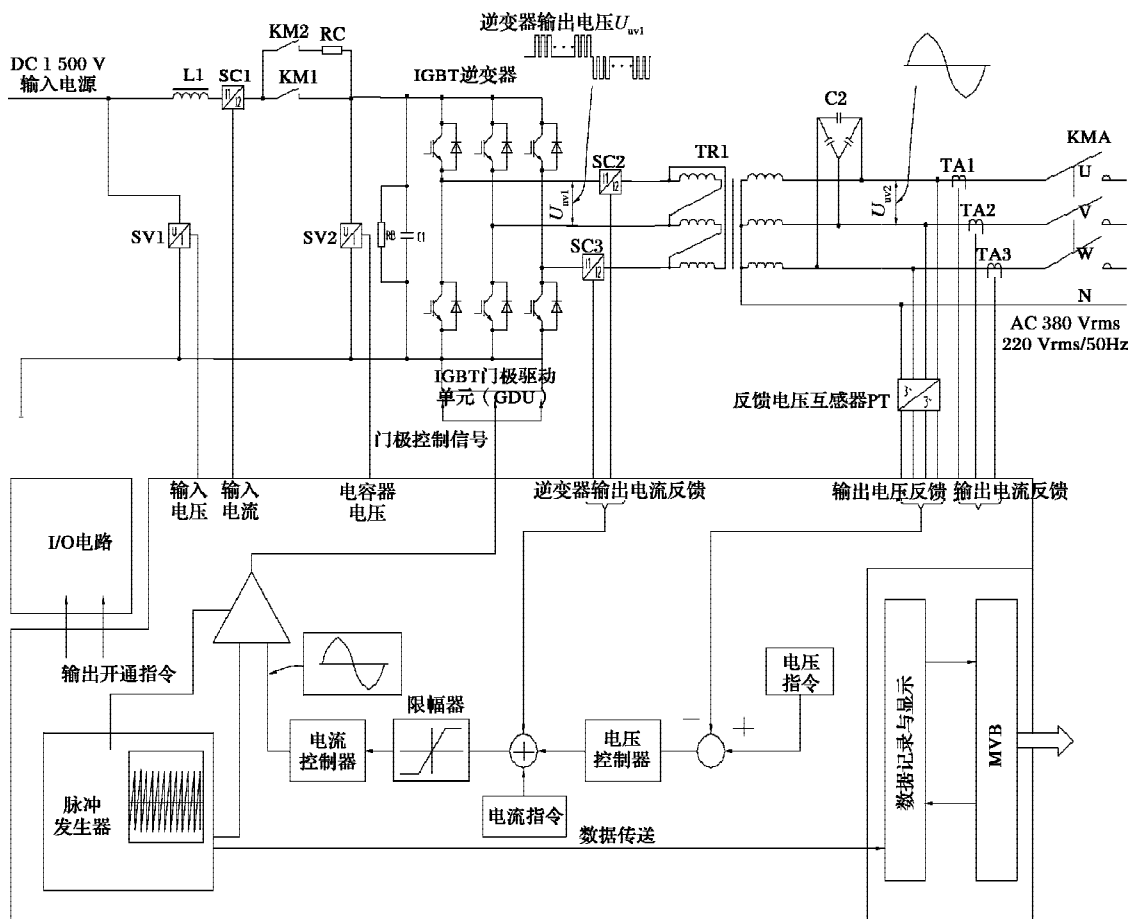


图4 逆变器控制原理图

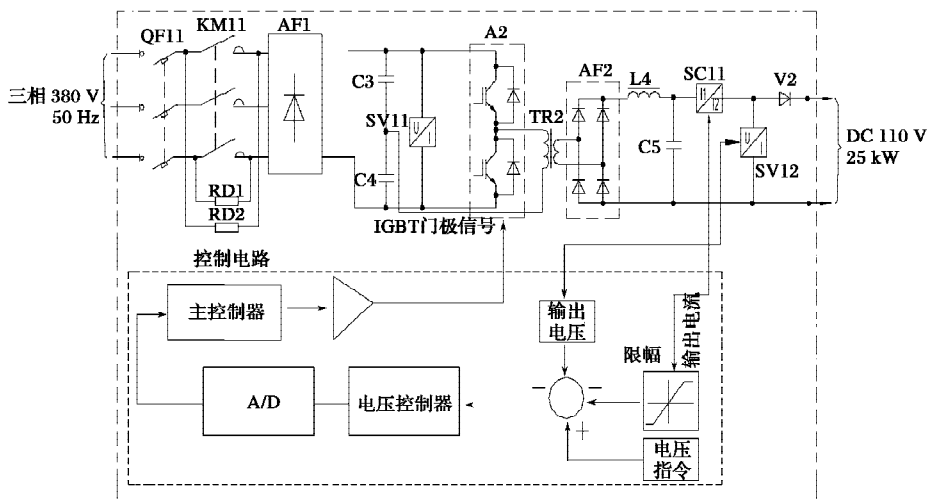


图5 充电机电路控制原理图

5.5 故障记录和诊断

辅助电源正常工作时控制单元的故障存储模块周期性地记录系统的以下状态和参数数据:

①电压/电流参数: 电网电压、滤波电容器端电压、输入电流、IGBT逆变器三相输出电流、三相交流输出电压、输出频率、三相交流输出电流、充电机中间电压、充电机输出电压、充电机输出电流、DC 24 V输出电压和电流等。

②输入/输出状态数据: 接触器KM1、KM2、KM3

的控制信号和状态反馈信号、接触器KMA的控制信号和状态反馈信号、接触器KM11的控制信号和状态反馈信号、IGBT脉冲驱动单元(GDU)的状态反馈信号、温度保护开关信号、SIV启动/停止信号、复位信号等。

当SIV发生故障时这段数据包将随故障类型(故障代码)、故障时间一起存储于FLASH内。

故障记录可通过以太网接口与便携式

计算机进行通信传输,利用地面故障分析软件下载到便携式计算机上形成报表或波形文件,供维修人员进行故障分析和诊断。故障记录下载到计算机的硬盘内。

6 试验验证

根据前面介绍的系统电路和软件编程,对该辅助电源进行了各项性能试验,其输入在DC 1 000~2 000 V,逆变器额定负载240 kVA(功率因数为 0.85 ± 0.05),充电机负

载25 kW。

逆变器输出特性如表1,充电机输出特性如表2。

图6为其中一些试验波形。

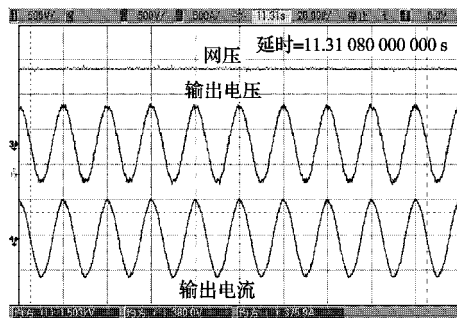


图6 输出电压电流波形

表1 逆变器输出特性

容量 /kVA	输入电压 /V	输出功率因数	频率 /Hz	输出电压 /V			谐波含量 (THD)		
				U_{uv}	U_{vw}	U_{uw}	U_{uv}	U_{vw}	U_{uw}
240.0	1 499.0	0.849 2	50.0	379.28	379.78	379.06	4.0%	4.1%	4.2%
240.0	1 785.9	0.849 2	50.0	379.03	379.67	379.06	4.1%	4.2%	4.1%
240.0	1 206.8	0.849 2	50.0	378.93	379.42	379.54	4.4%	4.4%	4.3%

表2 充电机输出特性

输入电 压 /V	负载容 量 /kW	输出电压 /V		输出直流 电流 /A	纹波 系数
		直流	交流		
1 499.0	25.113	109.13	0.660	230.06	0.61%
1 785.9	25.118	109.18	0.633	230.00	0.59%
1 206.8	25.175	109.05	0.694	230.78	0.64%

7 结语

试验结果表明，集成式辅助电源满足设计要求。同时，根据装车情况来看，把逆变器、充电机、隔离变

压器集成在一起，可以降低整体重量、节约成本，安装简单且维护方便。产品的研发成功满足了市场需求、为后续批量的市场产品的开发奠定了基础。

参考文献：

[1] 丁荣军，黄济荣. 现代变流技术与电气传动[M]. 北京：科学出版社，2008.
[2] 赵清良. 城轨地铁车辆辅助电源系统研究与发展[J]. 机车电传动，2012(1)：52-57.
[3] 王 鑫，赵清良. 地铁车辆辅助逆变器的设计与仿真[J]. 机车电传动，2006(4)：43-46.

(上接第 68 页)

单根导线产生的磁场通常可以互相抵消。主要措施有：

① 前向输入导线与反向回路导

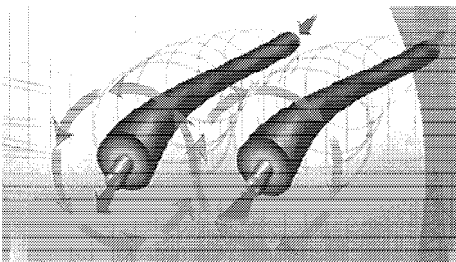


图 9 前向导线与反向回流线磁场相互抵消线放置尽可能地紧凑 (见图 9)。

② 三相导线排布成三角形方式 (见图 10)。

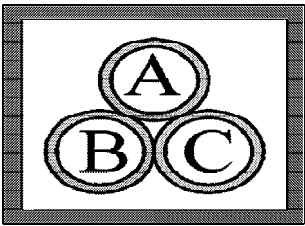


图 10 三相导线排布

③ 如果有 4 根电缆，两两具有同相流向的电流 (输入和回路导线各 2 根)，电缆应被放置成正方形，中心对称结构，也就是不允许同相流向的电缆互相靠近 (见图 11)。如果可能整个电缆铺设路径都要遵守这种布线方法。其他的布线方法会导致更大能量的磁场发射。

4.2 增加间距衰减辐射

磁场强度会随着距离 (距离的平方) 的增加而迅速地衰减。每厘米的间距增加都会导致明显的磁场强度下降。具体措施：① 电力传输线和乘客区域间保持尽可能大的间距。② 电力传输导线和信号应答器天线间保持尽可能大的间距。尤其注意转向架区域，因为这里列车保护系统的应答器天线非常接近牵引电机，

容易被干扰。

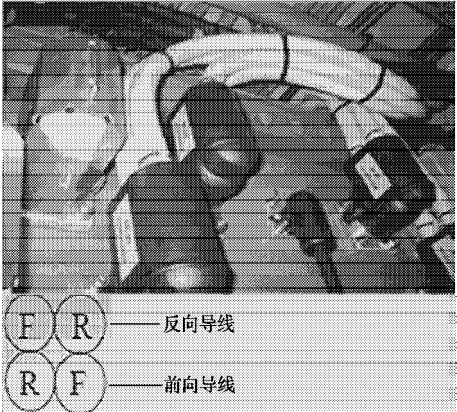


图 11 4 根电缆捆束的最佳布置

5 结语

100% 低地板现代有轨电车的电磁兼容性设计涉及到了总体布局、布线、电气设备、电气材料、屏蔽、接地等多个方面。本文描述了大致的设计方法和设计思路，由于列车电气系统非常复杂，各种干扰与被干扰现象也非常复杂，电磁兼容设计原则需要在设计和运用过程中逐步加以完善。

参考文献：

[1] 沙斐. 机电一体化系统的电磁兼容技术[M]. 北京：中国电力出版社，1999.
[2] 王定华，赵家升. 电磁兼容设计原理与应用[M]. 成都：电子科技大学出版社，2006.
[3] 袁国良. 电磁场与电磁波[M]. 北京：清华大学出版社，2008.

