

地铁工程维护车牵引蓄电池充电机的设计

李梅¹, 王南¹, 谢伟², 张晓²

(1. 南车电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001; 2. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 设计了一种基于 DSP 控制并采用两个半桥 DC-DC 变换器模块进行串并联组合的地铁工程维护车辆牵引蓄电池充电机。该充电机具有主电路结构简单、控制精度高、调试和维护方便等特点。

关键词: 牵引蓄电池; 充电机; DSP; 半桥 DC-DC; 充电模式

中图分类号: TM912; U213

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)05-0038-05

Design of Traction Battery Charger for Metro Engineering Maintenance Vehicle

LI Mei¹, WANG Nan¹, XIE Wei², ZHANG Xiao²

(1. CSR Research of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It introduces a traction battery charger of metro engineering maintenance vehicle, which is based on DSP control and installed two half-bridge DC-DC converter modules for series-parallel combination. The charger possesses some features, i.e. a simple structure of the main circuit, high control precision, convenient debugging and easy maintenance.

Key words: traction battery; charger; DSP; half-bridge DC-DC; charging mode

0 引言

在地铁建设期、地铁线路投入运营前和运营中, 地铁工程维护车主要通过机车牵引将材料、设备、物资、地铁车辆等运送到指定地点。目前, 地铁工程维护车大多数采用环保节能的电力工程车取代内燃工程车。电力工程车一般配有车载牵引蓄电池作为备用电源为车辆提供动力电源^[1]。牵引蓄电池充电机(以下简称充电机)可在车辆入库后或在线运行过程中为牵引蓄电池充电。本文介绍一种配有车载柴油机、车载牵引蓄电池的地铁工程维护车充电机。

1 充电机系统

1.1 系统构成

充电机系统主要由三相整流电路、LC滤波电路、半桥逆变电路、隔离驱动电路、二次整流电路、输出滤波

电路等构成。充电机电路原理图如图 1 所示。充电机主电路采用两个半桥 DC-DC 模块(见图 1 中虚线框内)输入并联输出串联(Input-parallel output-series, IPOS)的方式^[2]。

该充电机运行时有 4 种供电模式, 分别为:

(1) 柴油机供电模式。地铁工程建设初期, 采用车载柴油机供电。

(2) 第三供电轨(简称第三轨)供电模式。地铁工程项目建设完成后, 由第三轨供电。

(3) 库内供电模式。维护车辆入库后, 使用库内三相 400 V 交流电源供电。

(4) 蓄电池单独供电模式。在柴油机和第三轨均无法供电的情况下, 由蓄电池单独供电。在蓄电池单独供电模式长时间制动时, 为充分利用制动能量, 需将制动能量通过充电机回馈到蓄电池。

充电机系统及其接口关系图如图 2 所示。为保证 K1、K2、K3 不同时闭合, 采取设置软硬件双重互锁来保障供电安全。二极管 V1 可以阻断第三轨电源直接对蓄

收稿日期: 2012-06-14

作者简介: 李梅(1977-), 女, 工程师, 从事 DC-DC 变换器的设计及其控制技术的研究。

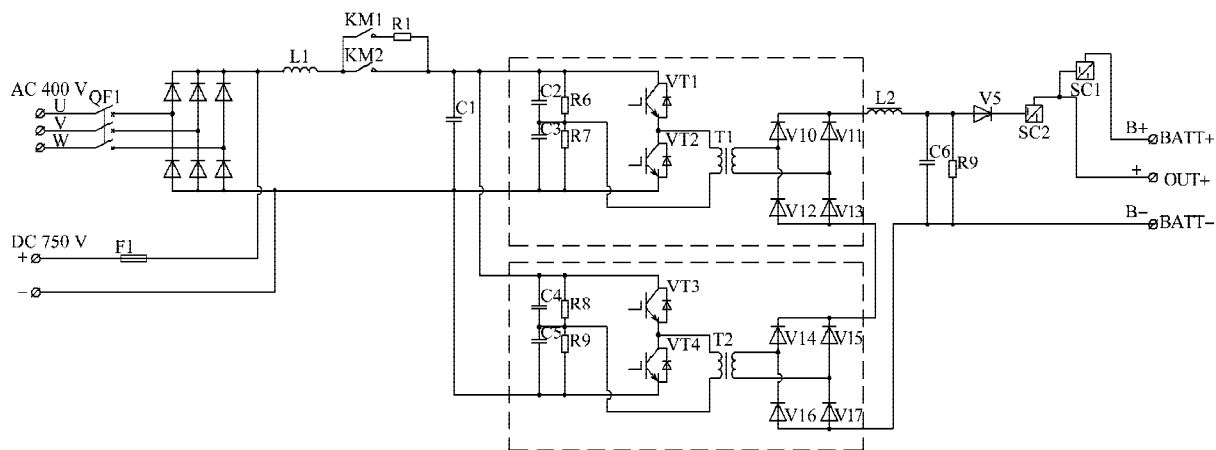
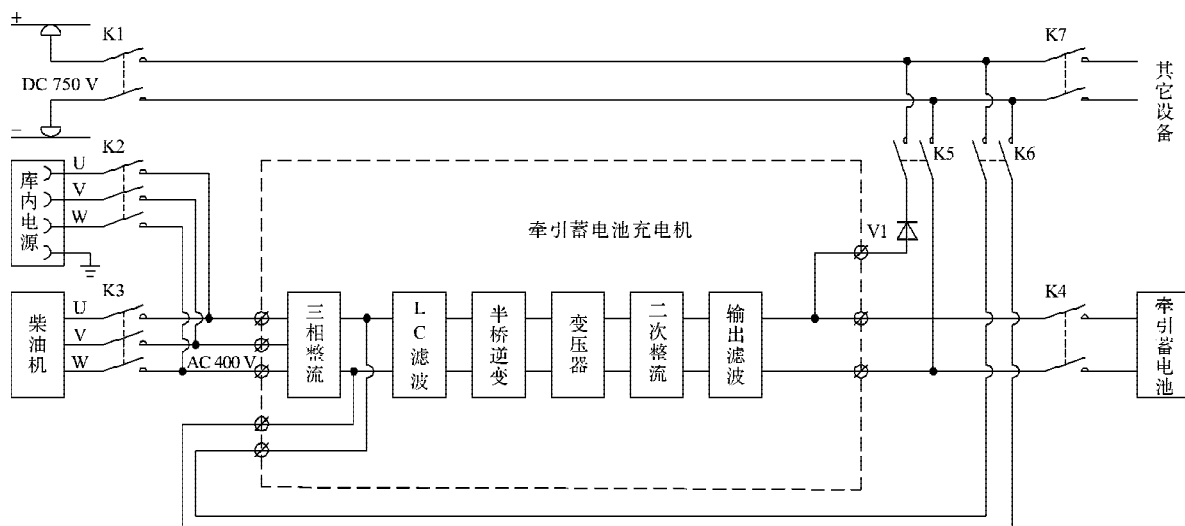


图1 充电机电路原理图

Fig. 1 Diagram of the charger circuit



注：K1——第三轨供电开关；K2——库内供电开关；K3——柴油发电机供电电源开关

图2 充电机系统及其接口关系图

Fig. 2 The charger system and its interface diagram

电池进行充电。

1.2 主要技术参数

输入电源1

第三轨电源：750 V（范围DC 525 V~DC 900 V）

输入电源2

柴油发电机机组：3×AC 400 V±40 V, 50 Hz±0.5 Hz

输入电源3

库内电源：3×AC 400 V±40 V, 50 Hz±0.5 Hz

额定输出

DC 806 V±8.06 V

最大输出电流

75 A

最大输出功率

65 kW

输出电压纹波系数

≤1%

效率（额定条件下）

≥90%

控制电源电压

DC 110 V（DC 77 V~DC 137.5 V）

主要负载

铅酸蓄电池（400 A·h）

2 充电机主要部件设计

2.1 输入滤波电容

依据式（1）可求得输入侧中间直流等效电阻 R_{dc} 为4.431Ω。

$$R_{dc} = \frac{(\sqrt{2} \times U)^2}{\frac{P_o}{\eta}} \quad (1)$$

式中： U ——输入电压，取400 V； P_o ——输出功率，取65 kW； η ——充电机效率，取0.9。

依据式（2）可计算出电容的放电时间 t_i 为 1.898×10^{-3} s。

$$t_i = \frac{T_i}{12} + t_l \quad (2)$$

式中： t_l ——电容的充电时间，根据文献[3]，计算为 0.231×10^{-3} s； T_i ——输入周期，取0.02 s。

依据式(3)可计算出电容最小值 C_{in_min} 为4 065 μF 。

$$C_{in_min} = \frac{t_f}{R_{dc} \times \ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)} \quad (3)$$

式中: α ——整流后的直流电压波动幅度,取0.1。

上述计算值为中间电容最小值,实际设计电容量要超过此计算值。考虑安装空间、成本等综合因素,采用6个6 800 μF /450 V电容三串两并的方式,实际电容量 C_{in} 为4 533 μF 。

2.2 高频变压器

依据式(4)计算单模块变压器一、二次侧匝比 n 为0.243。

$$n = \frac{U_{dc_min} \times D_{max}}{U_{o_max}} \quad (4)$$

式中: U_{dc_min} ——中间直流环节电压最小值,取486 V;
 D_{max} ——IGBT单管最大占空比,取0.45; U_{o_max} ——输出电压最大值,取900 V。

依据式(5),计算单管最小占空比 D_{min} 为0.2。

$$D_{min} = n \times \frac{U_{o_min}}{U_{dc_max}} \quad (5)$$

式中: U_{o_min} ——输出电压最小值,取741 V; U_{dc_max} ——中间直流环节电压最大值,取900 V。

IGBT的开关频率为8 kHz,则可计算出IGBT的最大开通时间 t_{on_max} 为0.056 25 ms,最小开通时间 t_{on_min} 为0.025 01 ms。

变压器磁芯选用VAC公司的4个130-W352并联。根据式(6)计算出一次侧匝数 N_{pri} 为10(计算值向上取整)。

$$N_{pri} = \frac{t_{on_max} \times U_{dc_min}}{A_{Fe} \times \Delta B} \quad (6)$$

式中: A_{Fe} ——4个铁芯等效面积,取 $1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$;
 ΔB ——导通期间磁感应强度增量,取1.2 T。

根据式(7)计算出二次侧匝数 N_{sec} 为21(计算值向上取整)。

$$N_{sec} = \frac{N_{pri} \times \frac{1}{2}(U_{o_max} + \Delta U_o)}{2U_{dc_min} \times D_{max}} \quad (7)$$

式中: ΔU_o ——输出电压纹波,取9 V。

2.3 输出滤波电抗器

根据式(8)和式(9)计算出IGBT单管实际最大占空比 D_{max} 和最小占空比 D_{min} 分别为0.441、0.196。

$$D_{max} = \frac{U_{o_max}}{U_{dc_min}} \times \frac{N_{pri}}{2N_{sec}} \quad (8)$$

$$D_{min} = \frac{U_{o_min}}{U_{dc_max}} \times \frac{N_{pri}}{2N_{sec}} \quad (9)$$

根据式(10)和式(11)计算出最大、最小占空比时的电感量分别是0.255 1 mH、1.081 mH。

$$L_{f_A} = \frac{U_{o_max}}{\Delta I_{Lf}} \times \left(\frac{1}{2} - D_{max}\right) \quad (10)$$

$$L_{f_B} = \frac{U_{o_min}}{\Delta I_{Lf}} \times \left(\frac{1}{2} - D_{min}\right) \quad (11)$$

式中: ΔI_{Lf} ——输出电流纹波,按输出电流纹波为输出最大电流的30%计算,为26.055 A。

实际设计电感量取上述计算电感量的较大值。

3 热设计

3.1 选择冷却方式

充电机系统热量主要集中在IGBT、变压器、电抗器、输入三相整流桥、输出整流桥上。系统热设计的目的是保证半导体器件、磁性元器件工作在允许的温度范围内。本充电机热设计的关键是IGBT的散热设计。

首先按照IGBT模块的放置要求,预先确定散热器外形尺寸为440 mm(宽)×440 mm(长),然后根据功率密度选择散热方式为强迫风冷。

3.2 散热器设计

3.2.1 计算对流换热系数

本文采用准则方程计算对流换热系数,首先根据式(12)计算出雷诺数 Re 为33 489.8。

$$Re = \frac{\lambda \times v \times D}{\mu} \quad (12)$$

式中: λ ——流体的导热系数,取50℃下干燥空气的值0.028 3 W/(m·℃); v ——流体流速,预估为2 m/s; μ ——流体动力粘度,取50℃下干燥空气的值0.000 019 6 Pa·s;
 D ——特征尺寸,对于换热表面形状为沿平板流动(或平行主体流动)的,特征尺寸为沿流动方向长度,根据散热器外形尺寸,取0.3 m。

然后根据准则方程,换热表面形状为沿平板流动(或平行主体流动),且 $Re < 10^5$,流态为层流,通过 $0.66Re^{0.5}$ 计算出努谢尔特数为120.78。

然后根据式(13)可计算出对流换热系数 H_c 为11.39 W/(m·℃)。

$$H_c = \frac{N_u \times \lambda}{D} \quad (13)$$

式中: N_u ——努谢尔特数,取120.78。

3.2.2 计算散热器热阻

根据式(14)计算出散热器的热阻 θ_{sa} 为0.034 17℃/W。

$$T_j - T_a = P_{total} \times \theta_{sa} + P_{MODULE} \times \theta_{ca} + P_{IGBT} \times \theta_{jc} \quad (14)$$

式中: P_{MODULE} ——单个IGBT模块热损耗, 计算为458 W (计算过程略); P_{IGBT} ——IGBT热损耗, 计算为383 W (计算过程略); P_{total} ——散热器上4个IGBT模块热损耗, 取1 832 W; T_a ——环境温度, 取45℃; T_j ——IGBT最大允许结温, 为保证IGBT可靠工作, 计算时 T_j 取最大允许结温的85%; θ_{jc} ——IGBT模块结到壳的热阻, 取0.04℃/W; θ_{sa} ——IGBT模块壳到散热器的热阻, 取0.01℃/W。

3.2.3 计算散热器散热面积

根据式(15)计算散热器散热面积 S 为2.85 m²。

$$S = \frac{1}{H_c \times \theta_{sa} \times \eta_{\text{散}}} \quad (15)$$

式中: $\eta_{\text{散}}$ ——散热器效率, 假定为90%。

3.2.4 确定散热器肋片

结合散热器尺寸及肋片加工工艺水平, 最终确定散热器肋片高度为144 mm, 肋片长度为316 mm, 肋片厚度为2 mm, 肋片间距为8 mm, 共42个肋片, 则实际总的散热面积为3.87 m²。

3.3 风机选型

根据式(16)计算强迫风冷所需风量 Q 为0.111 1 m³/s。

$$Q = \frac{P_{\text{total}}}{C_p \times \Delta t \times \rho} \quad (16)$$

式中: C_p ——空气定压比热, 取50℃下干燥空气的值1 005 J/(kg·℃); Δt ——系统内温度与环境温度之差, 取15℃; ρ ——空气密度, 取50℃下干燥空气的值1.094 kg/m³。

预估风道静压损失为120 Pa, 对比2D200系列风机的特性曲线(图中线A)和4D200系列风机的特性曲线(图中线B), 采用1个2D200系列风机时, 风量为300 m³/h (图中实线A), 小于计算风量400 m³/h。考虑到一定裕量, 最终我们选用两个风扇并联。

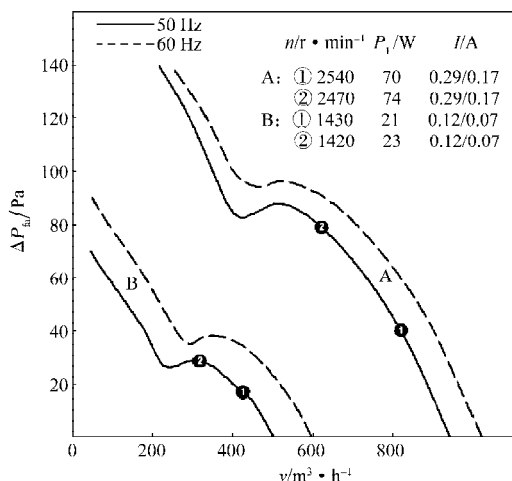


图3 风机特性曲线

Fig. 3 Characteristics curves of fan

4 充电

4.1 三阶段充电

本充电机日常充电采用带温度补偿的三阶段充电, 充电曲线如图4所示。第一阶段为恒流充电, 恒流充电电流 I_1 为64 A; 待单节蓄电池电压上升至2.35 V/单体时, 转为第二阶段恒压充电, 恒充电压为2.35 V/单体(20℃); 待充电电流下降至第一阶段充电电流的0.09倍时, 转为第三阶段恒压浮充, 浮充电压为2.3 V/单体(20℃)。

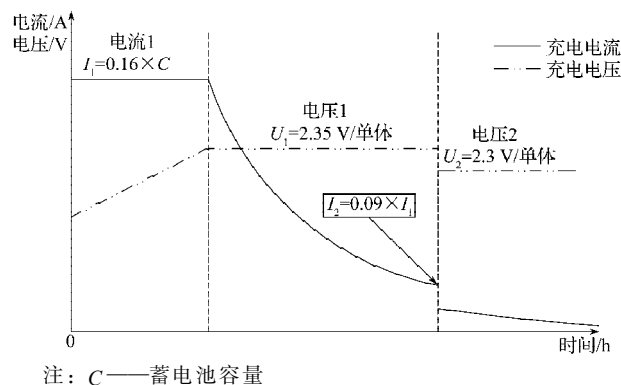


图4 三阶段充电曲线

Fig. 4 Three-stage charging curves

4.2 均衡充电

为了延长蓄电池的使用寿命, 需保证每隔一定周期对蓄电池进行一次均衡充电^[4](以下简称均充)。均充可以消除蓄电池在长期浮充状态下极板的过度硫化。本充电机定期(三个月)对蓄电池进行一次均充, 20℃时的均充电压为2.4 V/单体。

4.3 温度补偿

研究表明, 蓄电池充电电压与蓄电池温度有着密切的关系, 温度过高或过低都对充电有影响, 这时要采取温度补偿。本充电机在浮充和均充时需按图5温度补偿曲线对蓄电池进行充电, 温度补偿率为-0.005 V/℃。

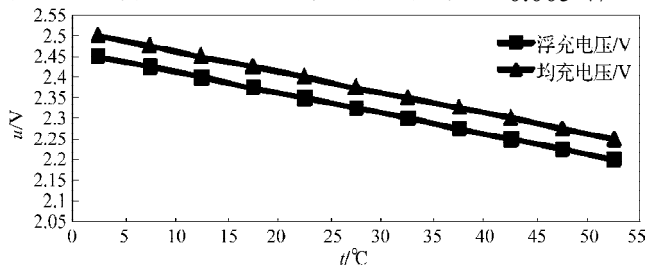


图5 单节蓄电池电压温度补偿曲线

Fig. 5 Temperature compensation curve of single-battery voltage

5 微机控制单元

微机控制单元由以TMS320F2812 DSP为核心的控制单元、电源转换单元、数字信号输入输出处理单元、模拟信号输入输出处理单元、故障记录单元组成。微机控制单元原理框图如图6所示。其主要功能有信号采集

与处理、逆变脉冲输出、信号输出、系统保护、故障记录、显示及通信。微机控制单元可通过指示灯、LED数码管等显示充电机的状态信息和故障信息,并将这些信息通过通信传递到司机室,方便进行信息查看。当发生故障后,可通过以太网接口将故障信息下载到计算机,并使用专用的地面分析软件进行波形再现和故障分析。

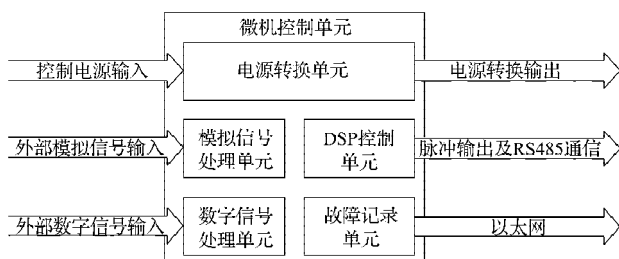


图6 微机控制单元原理框图

Fig. 6 Block diagram of the microcomputer control unit

6 仿真及试验验证

6.1 输入电抗器参数仿真

输入电抗器 L 的参数在仿真时确定。本充电机交流输入采用三相桥式整流,滤波采用LC电路,LC滤波电路的设计要求为保证电源满载工作时其输入功率因数 ≥ 0.92 。输入滤波电感的仿真电路图如图7所示。

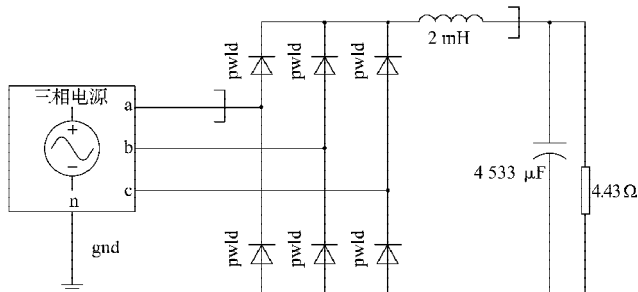


图7 输入滤波电感仿真电路图

Fig. 7 Simulation circuit of input filter inductor

在满载条件下,中间电容值为 $4\,533\,\mu\text{F}$,当输入电感取 $2\,\text{mH}$ 时,输入电流总谐波失真为 $0.276\,3$,根据式(17)计算输入功率因数为 0.964 。因此选择输入电感量 $2\,\text{mH}$ 、电容量 $4\,533\,\mu\text{F}$ 的LC滤波电路能够满足设计要求。

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (17)$$

式中: PF ——输入功率因数; THD ——总谐波失真,根据仿真结果为 $0.276\,3$ 。

6.2 逆变模块热设计仿真

采用仿真软件对逆变模块进行热仿真分析,逆变模块热仿真分析模型如图8所示。在环境温度为 $300\,\text{K}$ 时,逆变模块热设计的仿真结果如图9所示,从图中可以看出,逆变模块的最大温度为 $350\,\text{K}$,计算出最大温升为 $50\,\text{K}$ 。

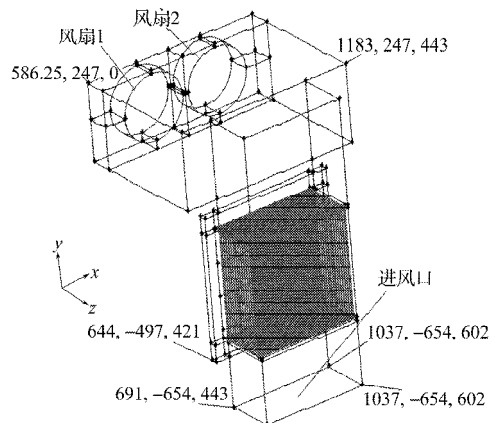


图8 逆变模块热仿真分析模型

Fig. 8 The thermal simulation model of the inverter module

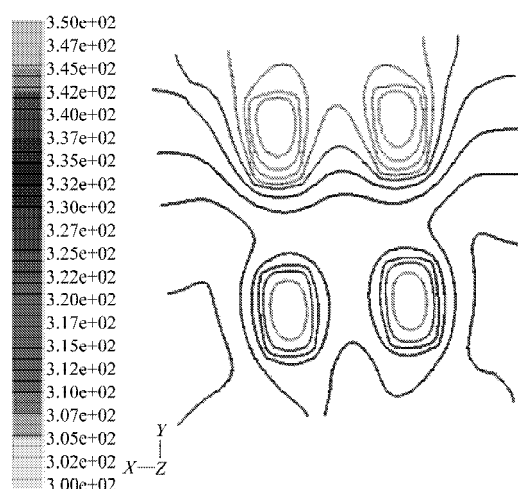


图9 逆变模块热设计仿真结果

Fig. 9 The thermal design simulation results of the inverter module

6.3 逆变模块温升测试

在逆变模块上取两个点进行实际温升测试,测试点设置在位置1和位置2(图10),环境温度为 $23\,^{\circ}\text{C}$ 时,测得位置1的温升为 $46.2\,^{\circ}\text{C}$,位置2的温升为 $36.4\,^{\circ}\text{C}$ 。对比仿真分析结果发现,实测温升与仿真分析温升差别不大,主要原因为:(1)给定的IGBT功耗相对准确;(2)在建模方面,保持了模型和实际物体的体积相等。

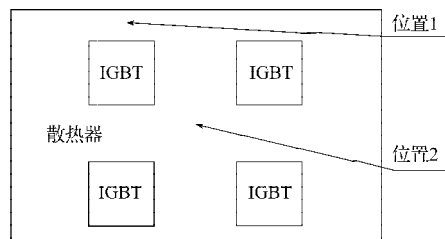


图10 逆变模块温升测量位置图

Fig. 10 Location of temperature measurement for inverter module

6.4 性能测试

性能测试主要是测试充电机输出特性曲线、输出电压精度、纹波、输出电流精度、效率等是否满足要求。测试结果如下:

(下转第54页)