DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.105

轨道交通大电流输出充电机研制

庄　曦，哈大雷，万　争
（中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春 130062）

摘　要：文章介绍了适用于轨道交通领域的大电流输出充电机的产品研制。首先，对充电机的主电路和控制系统进行了介绍；然后，对充电机的主电路参数进行了计算，对电气原理进行了仿真验证；其次，对充电机的IP防护等级进行了设计，对箱体结构进行了静强度、疲劳强度和模态计算分析；最后，对充电机的电气和机械分析均表明充电机满足设计需求。10 kW工程化样机型式试验结果验证了设计的有效性。

关键词：充电机；大电流输出；参数计算；IP防护等级；仿真

中图分类号：U270.38　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)04-0058-08

0　引言

轨道交通领域充电机受辅助变流器和蓄电池温度补偿曲线影响，其输入和输出电压范围均较宽，因此多采用移相全桥变换器拓扑[1-6]。DC 24 V辅助直流供电系统在安全电压DC 36 V以下，具有安全优势。然而，相比于轨道交通常用的DC 110 V等辅助直流供电系统，在功率等级相同的情况下，DC 24 V充电机输出电流将成倍增加，当额定功率为10 kW时，输出电流接近400 A。在传统的移相全桥变换器中，输出侧多采用全桥整流拓扑，在大电流输出条件下将增大输出滤波电感和变压器的体积，以及整流管的电压应力，不利于在低压大电流输出场合应用。针对这种情况，本研究团队研制了一款大电流输出充电机，该充电机由2个功率模块并联组成，功率模块采用适用于低压大电流输出场合的倍流整流移相全桥变换器拓扑；同时，由于大电流输出，自然冷却的散热方式势必会导致散热片体积、重量增大，对器件散热和机械结构强度提出考验，对此本研究团队专门进行了攻关。该充电机的研制对于出口国外适用于更加恶劣的工作环境具有积极推动意义。

1　系统介绍

充电机主电路原理图如图1所示，主要技术参数如表1所示。为满足低压大电流输出的应用要求，充电机整机由2个功率模块PM1、PM2并联组成，每个功率模块额定输出功率5 kW，整机对外额定输出功率10 kW，功率模块采用前级不控整流、后级倍流整流移相全桥变换器的主电路拓扑结构。移相全桥变换器二次侧整流二极管工作在倍流整流方式，实现了自然换流，消除了整流二极管的开关损耗，也避免了其反向恢复引起的振荡和尖峰。高频变压器二次侧绕组和2个输出滤波电感中流过1/2的输出平均电流，并且其中的电流纹波能相互抵消，实际工程设计时可减小其电感量。

功率模块PM1负责给电池充电，同时与模块PM2通过二极管硬并联，实现对本车负载和母线负载的供能。外部3AC 400 V作为充电机的输入电源，在每个功率模块内部经过不控整流、直流滤波得到直流电，再经过移相全桥DC-DC变换，得到输出可控的DC 24 V电源。工作原理为：功率模块检测到三相输入电压满足充电机启动条件后，闭合预充电接触器；当直流支撑电容电压达到预定电压值时，闭合主接触器，后级移相全桥电路开始工作；通过变压器将能量传递到变压器二次侧，二次侧交流电经过倍流整流和LC滤波后输出稳定的直流电压。

根据实际工况设计了充电机控制系统，具体控制系统框图如图2所示。充电机每个模块配置了1块控制板，独立冗余工作，控制板采用TMS320LF28335作为

基金项目：中国中车科技研究开发计划重点项目（2025CTB085）
通信作者：庄　曦，男，主要从事动车组辅助供电系统研发工作；E-mail: zhuangxi_crc@126.com
引用格式：庄曦, 哈大雷, 万争. 轨道交通大电流输出充电机研制[J]. 机车电传动, 2026(4): 58-65.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.105.
Citation: ZHUANG Xi, HA Dalei, WAN Zheng. Development of a high-current output charger for rail transit[J]. Electric drive for locomotives,2026 (4): 58-65.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.105.

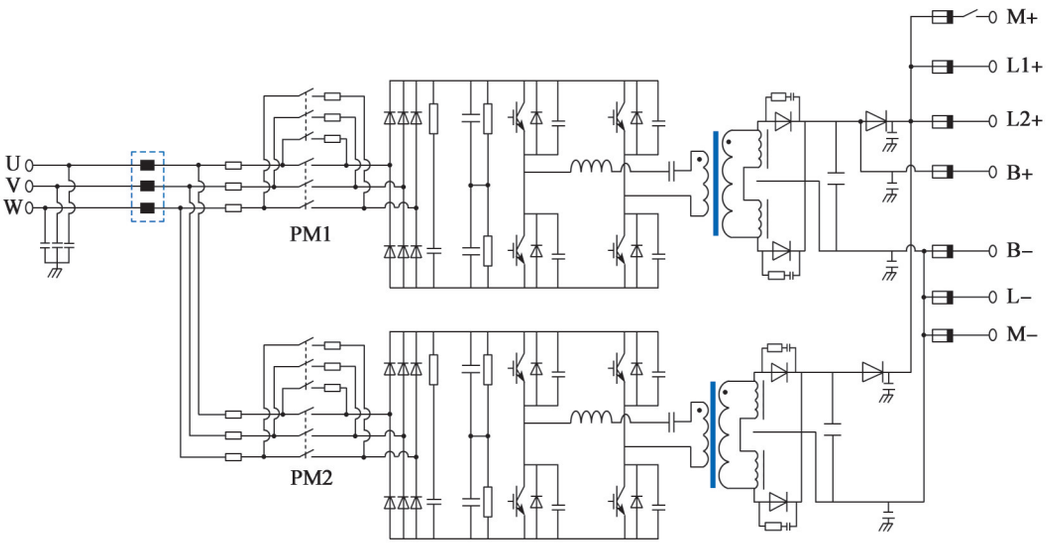


图 1　充电机主电路原理

Fig. 1　Schematic diagram of charger main circuit

表 1　充电机主要技术参数

Table 1　Main technical parameters of the charger

参数名称	参数值或说明	参数名称	参数值
额定输入电压/V	3AC 400	额定直流输出电压/V	24
输入电压频率/ Hz	50	输出电压纹波因数	≤5%
输入电压变化范围	1±10%	最大输出功率/kW	10
直流充电电压/V	26.03~30.02	使用环境温度/℃	–40~40
冷却方式	自然冷却		

核心控制芯片，控制板内部设计有相应的外围调理电路，实现相应的电压、电流和温度等信号的采集，并完成 PWM 输出、DI、DO 等功能。其中，2 个功率模块共同并联为整车负载供电，蓄电池仅由模块 1 为其充电。当模块 1 故障时，由于模块 2 可以继续为整车供电，模块 2 输出电压高于蓄电池电压，不会造成电池亏电，此种方式在硬件电路上可以减少 1 个电流传感器，从而节省成本、减少故障率。

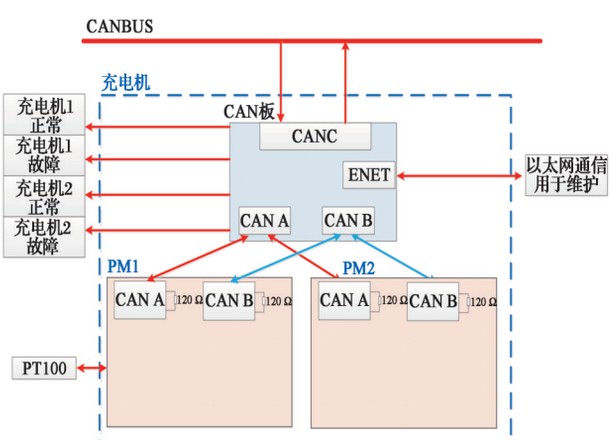


图 2　充电机控制系统框图

Fig. 2　Block diagram of the charger control system

2 个模块通过 CAN 板建立通信。CAN 板采用 RM48L95 作为核心控制芯片，实现与内部功率模块的通信和整车的信息交互功能。

2　电气设计

2.1　主电路参数计算

1）高频变压器

高频变压器的变比由输入电压、输出电压和占空比来确定。为了提高高频变压器的利用率、减小开关管的电流、降低输出整流二极管的反向电压、减小损耗、降低成本，高频变压器的变比应尽量选大一些。为了在输入任意电压时能够得到所要求的电压，变压器的变比选择应按移相全桥输入电压最小、占空比最大和输出电压值最大时的情况计算，具体如下：

$$n=\frac{U_{\text{in_min}}D_{\max}}{2\left(U_{\text{o_max}}+\Delta U\right)} \tag{1}$$

式中：$U_{\text{in_min}}$ 为移相全桥输入电压最小值；$D_{\max}$ 为变压器二次侧最大占空比；$U_{\text{o_max}}$ 为充电机输出电压最大值；ΔU 为输出滤波电感直流压降或二次侧整流二极管导通压降。

计算时取 $U_{\text{in_min}}=400\times0.9\times1.35=486\ \text{V}$，$D_{\max}=0.75$，$U_{\text{o_max}}=30.02\ \text{V}$，$\Delta U=2\ \text{V}$，那么 $n=5.69$，取 $n=5$。

2）输出滤波电感

由于倍流整流结构是交错并联的连接方式，通过 2 个输出电感的电流交错变化，输出电流的纹波可互相抵消。因此，和常规的滤波电感相比，在输出纹波要求相同的情况下，倍流整流电路中电感值可以较小。输出滤波电感的数值由输出电流的纹波来确定，这里按额定工况输出电流纹波不超过 10% 来设计。当额定输出电压 28.5 V，额定负载 5 kW 时，输出电流为 175.4 A，则最大纹波电流 Δi 为 17.5 A。额定工况时充电机的占空比为

$$D=\frac{2n\left(U_{\mathrm{o}}+\Delta U\right)}{U_{\mathrm{in}}}=\frac{2\times5\times(28.5+2)}{400\times1.35}\approx0.56 \tag{2}$$

那么，输出滤波电感上的纹波电流为

$$\Delta i_{\mathrm{L}}=\frac{1-0.5D}{1-D}\Delta i\approx28.6\ \mathrm{A} \tag{3}$$

输出滤波电感最小值为

$$L=\frac{U_{\mathrm{o}}(1-0.5D)}{\Delta i_{\mathrm{L}}\cdot f} \tag{4}$$

式中：f为开关频率。

当f=25 kHz时，输出滤波电感L=28.7 μH，取L=33.7 μH。

3）IGBT选型

充电机输入线电压最高为AC 440 V，则中间直流母线最大峰值电压为DC 622 V，因此IGBT的耐压值应不小于DC 1 200 V。

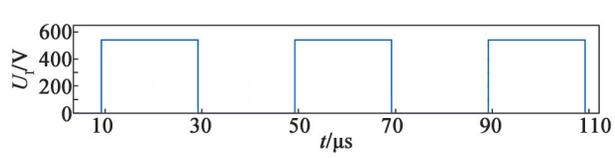
充电机的最低输入电压为AC 360 V，则中间直流母线电压值为DC 486 V。按效率90%计算，则直流母线最大电流为11.4 A。

综上所述，选取BSM100GB120DN2K型号的IGBT作为高频变压器一次侧的功率开关器件。

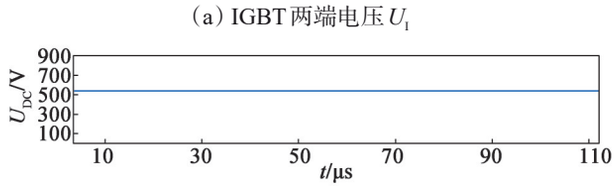
2.2 电气原理仿真

根据主电路设计原理和设计要求，使用MATLAB仿真软件进行主电路仿真，仿真中主要器件参数为：三相输入电抗器1 mH，支撑电容1 100 μF（2个550 μF电容并联），变压器变比5:1，开关频率25 kHz，输出滤波电感33.7 μH，输出滤波电容2 200 μF，阻性负载0.057 Ω。

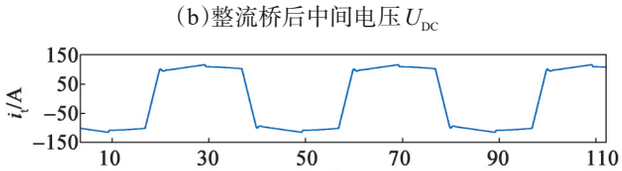
图3、图4和图5分别为稳态波形、充电机输出电压电流波形和输出滤波电感电流波形。由图3、图4和图5可知：IGBT两端电压正常无尖峰；变压器一次侧电流符合移相全桥正常工作模态电流波形；输出纹波电压峰-峰值不到1 V，输出纹波电流峰-峰值不到5 A；充电机工作稳定正常，满足设计需求。



（a）IGBT两端电压U_1



（b）整流桥后中间电压U_{DC}



（c）变压器二次侧电流i_t

图3 稳态波形

Fig. 3 Steady-state waveforms

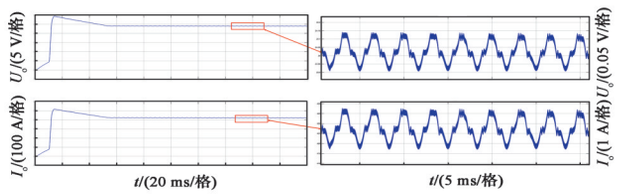


图4 充电机输出电压电流波形

Fig. 4 Waveforms of output voltage and current

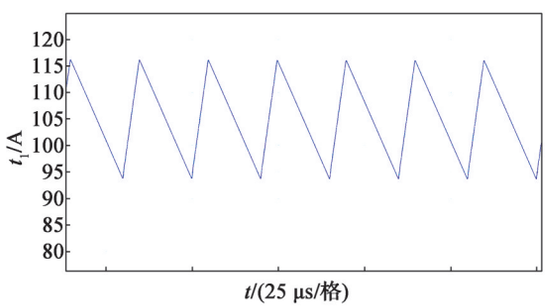


图5 输出滤波电感电流波形

Fig. 5 Waveforms of output filter inductor current

3 机械设计

3.1 IP防护等级设计

由于在恶劣工况下风机故障率较高，为保证箱体具备IP65的防护等级，充电机采用自然冷却的散热方式。

在结构设计方面，为达到在保证IP防护等级的基础上方便检修维护，箱体通过散热片的开合实现对内部器件的检修维护，散热片与箱体之间通过密封胶条实现密封防护，如图6所示。为加强密封效果，散热片箱体设计有突出结构和挡雨板等装置。

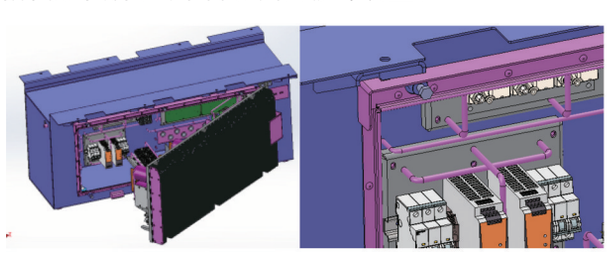


图6 散热片检修门

Fig. 6 Access door of heat sink

电缆垂直于箱体进线，防止接线处长时间存水或存雪造成密封不良。大容量电缆采用电缆密封接头的方式，小容量电缆采用IP68以上防护等级连接器的方式实现密封防护（如图7所示）。

3.2 机械强度设计

由于充电机采用自然冷却的散热方式，散热片较为笨重，箱体的机械强度成为设计重点。设计团队根

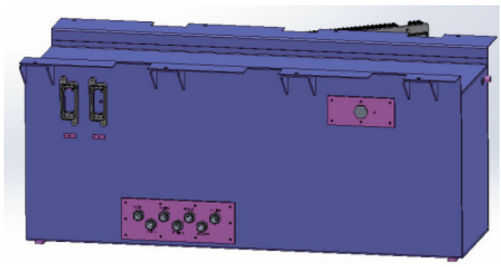


图 7　电缆密封防护

Fig. 7　Cable sealing and protection

据箱体的机械设计要求进行了静强度、疲劳强度和模态计算分析，以保证箱体的可靠性。

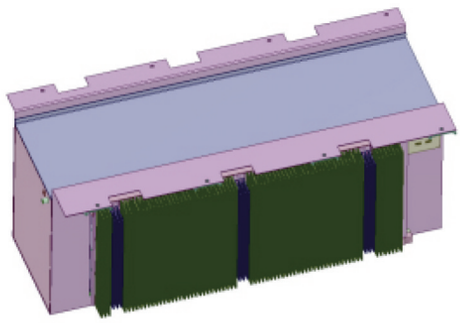
为保证机械强度，充电机箱体设计为蒙皮式整体框架承载结构，箱体通过 8 个吊耳固定于车底，属于 1 类 A 级设备（依据 IEC 61373:2010[7]确定）。箱体框架连接方式为焊接，箱内设备通过螺栓连接的方式固定。其中，箱体框架的材料为 Q345E，内部安装板的材料为 5083-H111。充电机箱设计总质量不超过 350 kg，详细结构如图 8 所示，具体材料属性如表 2 所示。

表 2　材料属性

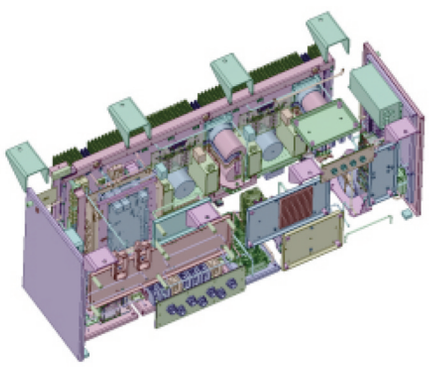
Table 2　Material properties

物理参数	5083-H111	Q345E
弹性模量/GPa	70	210
泊松比	0.33	0.30
密度/(kg·m^{-3})	2 700	7 850
板材厚度/mm	≤50	
母材抗拉强度/MPa	275	≥470
母材屈服强度/MPa	125	345
热影响区屈服强度/MPa	125	313

参照标准 IEC 61373:2010 要求，静强度计算工况 1~工况 5 及其应力统计结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 和表 4 可知，各工况下材料的利用系数均小于 1.0。其中，最大利用系数发生在工况 5，最大值为 0.84，位于吊耳与框架侧板焊接热影响区（材料为 Q345E）。其余利用系数较大点主要出现在滤波器组件安装板螺栓孔



(a) 充电机外部结构



(b) 充电机内部结构

图 8　充电机结构图

Fig. 8　Structure diagram of the charger

区域、框架盖板与侧板焊接热影响区、吊耳安装螺栓孔区域、电抗器组件安装板螺栓孔区域、散热片组件安装柱与框架侧板焊接热影响区、电源模块组件安装梁螺栓孔区域。

表 3　静强度计算工况

Table 3　Conditions for static strength calculation

工况	纵向加速度 a_x	横向加速度 a_y	垂向加速度 a_z
1	5g		−1g
2	−5g		−1g
3		3g	−1g
4		−3g	−1g
5			−4g

注：g 为重力加速度，取 g=9.81 m/s^2。

表 4　静强度工况应力统计结果

Table 4　Statistical results of stress under static strength conditions

工况	最大应力/MPa	位置	类型	材料	许用应力/MPa	材料利用系数
1	37.4	滤波器组件安装板螺栓孔区域	母材	5083-H111	125	0.30
	170.3	框架盖板与侧板焊接热影响区	热影响区	Q345E	313	0.54
2	45.9	滤波器组件安装板螺栓孔区域	母材	5083-H111	125	0.37
	116.5	吊耳安装螺栓孔区域	母材	Q345E	345	0.34
3	21.6	电抗器组件安装板螺栓孔区域	母材	5083-H111	125	0.17
	226.4	吊耳与框架侧板焊接热影响区	热影响区	Q345E	313	0.72
4	26.6	电抗器组件安装板螺栓孔区域	母材	5083-H111	125	0.21
	146.4	散热片组件安装柱与框架侧板焊接热影响区	热影响区	Q345E	313	0.47
5	41.0	电源模块组件安装梁螺栓孔区域	母材	5083-H111	125	0.33
	261.7	吊耳与框架侧板焊接热影响区	热影响区	Q345E	316	0.83

参照 EN 12663:2010[8]标准，疲劳强度计算工况与仿真结果分别如表 5 和表 6 所示。由表 5 和表 6 可知，各工况下材料的利用系数均小于 1.0，利用系数较高的部位主要出现在电源模块组件安装梁螺栓孔区域、电抗器组件安装板螺栓孔区域、吊耳下角边缘区域、吊耳安装螺栓孔区域、框架盖板与侧板焊接热影响区、吊耳与框架侧板焊接热影响区、散热片组件安装柱与框架侧板焊接热影响区等。

表 5　疲劳强度计算工况

Table 5　Calculation conditions for fatigue strength

工况	纵向加速度 a_x	横向加速度 a_y	垂向加速度 a_z
1	0.15g	0.15g	–1.15g
2	0.15g	0.15g	–0.85g
3	0.15g	–0.15g	–1.15g
4	0.15g	–0.15g	–0.85g
5	–0.15g	0.15g	–1.15g
6	–0.15g	0.15g	–0.85g
7	–0.15g	–0.15g	–1.15g
8	–0.15g	–0.15g	–0.85g

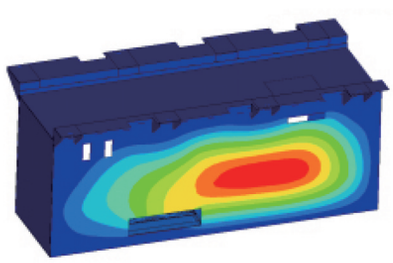
注：g 为重力加速度，取 g=9.81 m/s^2。

表 6　疲劳强度计算结果

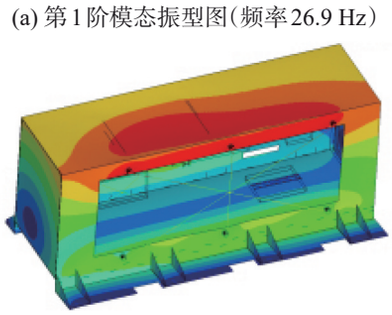
Table 6　Calculation results of fatigue strength

部位	材料	类型	材料利用系数
电源模块组件安装梁螺栓孔区域	5083-H111	母材	0.14
电抗器组件安装板螺栓孔区域	5083-H111	母材	0.14
吊耳下角边缘区域	Q345E	母材	0.29
吊耳安装螺丝孔区域	Q345E	母材	0.22
框架盖板与侧板焊接热影响区	Q345E	热影响区	0.72
吊耳与框架侧板焊接热影响区	Q345E	热影响区	0.57
散热片组件安装柱与框架侧板焊接热影响区	Q345E	热影响区	0.59

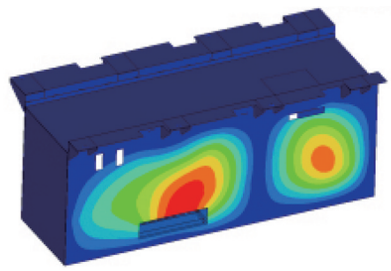
提取充电机箱的前 5 阶约束模态，模态频率及其各阶振型图如图 9 所示。



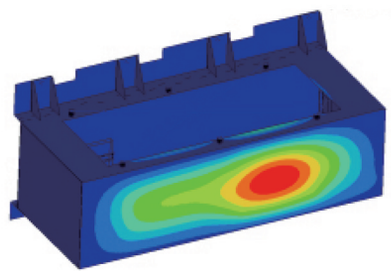
(a) 第 1 阶模态振型图（频率 26.9 Hz）



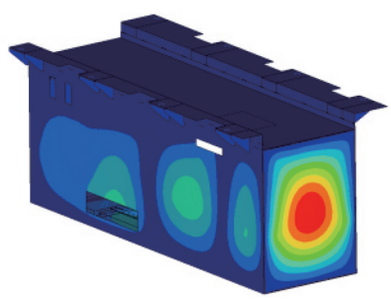
(b) 第 2 阶模态振型图（频率 26.9 Hz）



(c) 第 3 阶模态振型图（频率 35.2 Hz）



(d) 第 4 阶模态振型图（频率 43.4 Hz）



(e) 第 5 阶模态振型图（频率 44.0 Hz）

图 9　模态振型图

Fig. 9　Mode shape diagram

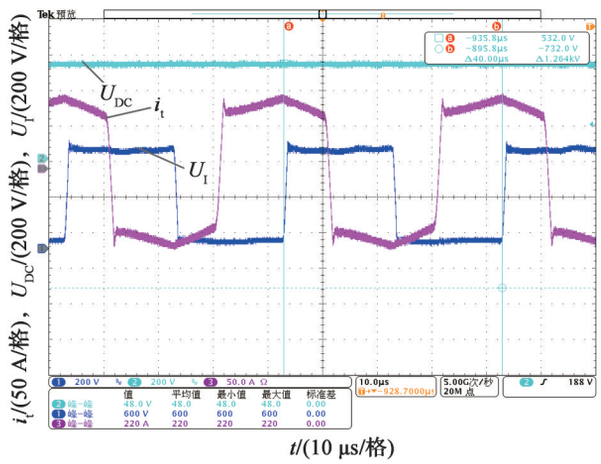
有限元计算结果表明，充电机箱的静强度和疲劳强度性能满足相关标准的要求。

4　试验验证

充电机实物样机主电路参数与上文仿真参数一致。按照充电机型式试验大纲的要求，充电机样机通过了完整的型式试验考核，充电机工作稳定。充电机整机质量为 275 kg；经实测充电机满载 10 kW 时，输出有功功率 10.03 kW，输入有功功率 11.08 kW，系统损耗 1.05 kW，充电机效率为 90.52%；IP 防护等级满足 IP65 防护要求（IEC 60529:1989+A2:2013[9]）；振动冲击满足 IEC 61373:2010 中 1 类 A 级标准。

充电机由 2 个模块并联组成，每个模块额定功率 5 kW，参数波形以“模块 1”的波形为例，“模块 2”波形与“模块 1”一致。图 10 为样机实测稳态波形。由图 10 可知，充电机实测波形与仿真波形一致，工作稳定。

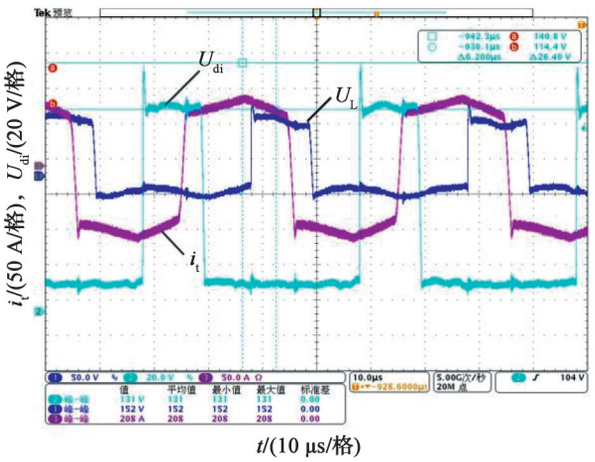
图 11 为变压器二次侧电流和二极管电压波形。由图 11 可知，二极管电压振荡得到了抑制，二极管尖峰电压被抑制在合理范围内。



U_I—IGBT两端电压；U_{DC}—整流桥后中间电压；i_t—变压器二次侧电流。

图 10　模块 1 稳态波形

Fig. 10　Steady-state waveforms of module 1



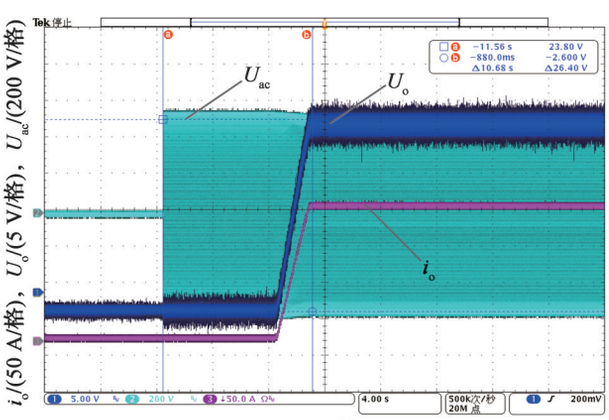
CH1—输出滤波电感两端电压 U_L；CH2—变压器二次侧二极管电压 U_{di}；CH3—变压器二次侧电流 i_t。

图 11　变压器二次侧电流和二极管电压波形

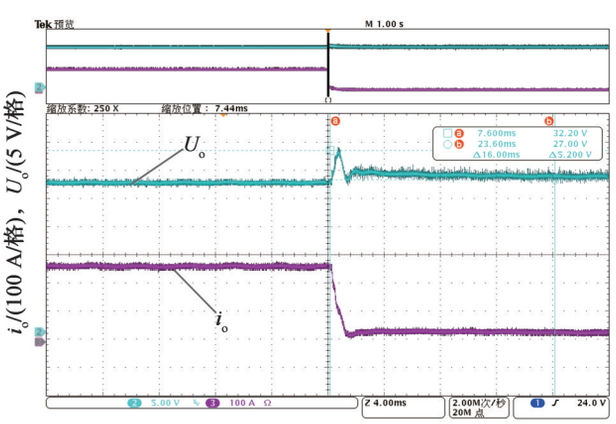
Fig. 11　Waveforms of transformer secondary current and diode voltage

图 12 为充电机参数动态波形。其中，图 12(a)为“模块 1”满载 5 kW 时的启动参数波形；图 12(b)为“模块 1”满载 5 kW 时，负载中断参数波形；图 12(c)为“模块 1”负载由 500 W 突然增加到 4 kW 时的参数波形；图 12(d)为“模块 1”负载由 4 kW 突减到 500 W 条时的参数波形；图 12(e)为满载条件下“模块 1”的输出电压纹波；图 12(f)为整机满载 10 kW 启动时的参数波形。由图 12 可知，充电机性能满足型式试验大纲的技术要求，在负载剧烈波动等动态条件下可快速响应调节，工作稳定。

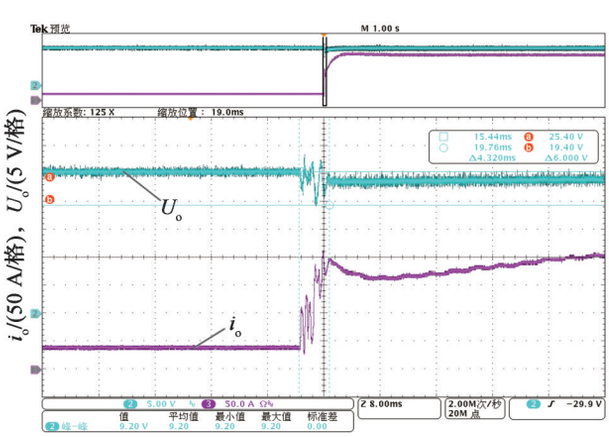
研究团队根据型式试验大纲要求对充电机进行了温升试验。图 13 为温升试验结束时热成像仪显示的部分位置温度，磁性元件内部温升和 IGBT 温升都在 55 K



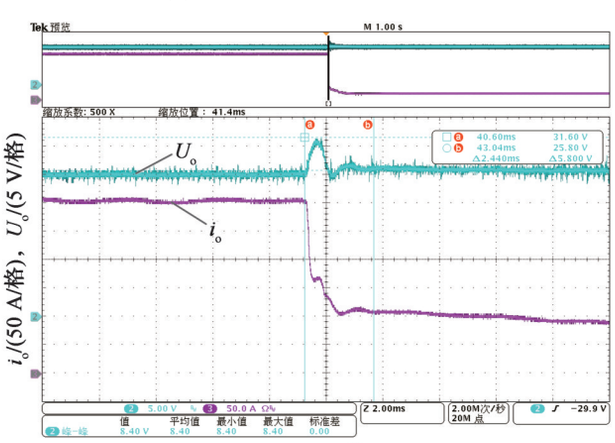
(a) 模块 1 满载启动时的参数波形



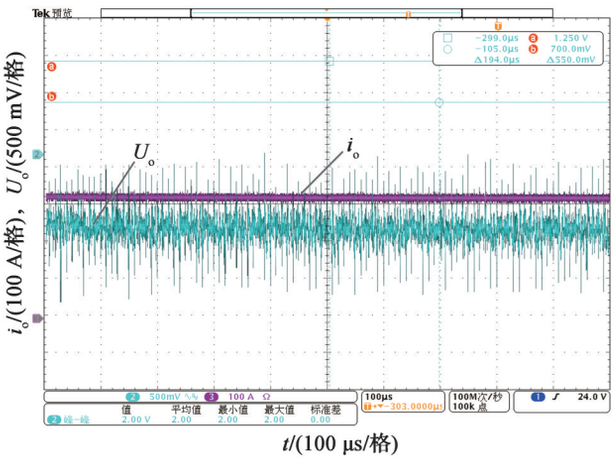
(b) 模块 1 负载中断时的参数波形



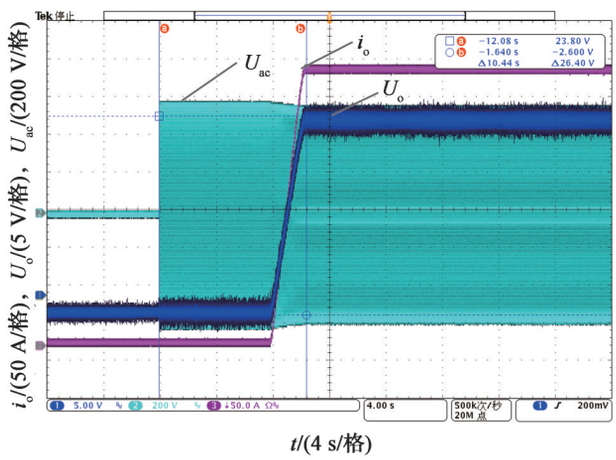
(c) 模块 1 负载突变(增加)时的参数波形



(d) 模块 1 负载突变(减少)时的参数波形



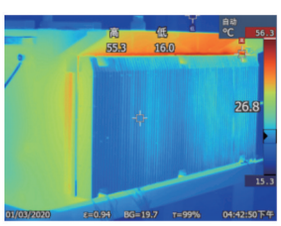
(e) 满载条件下模块 1 输出电压纹波



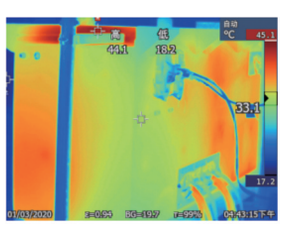
(f) 整机满载启动时的参数波形

图 12　动态波形

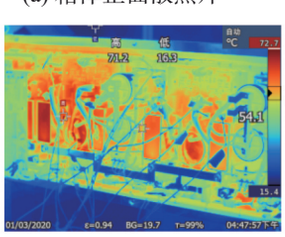
Fig. 12　Dynamic waveforms



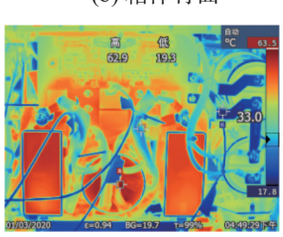
(a) 箱体正面散热片



(b) 箱体背面



(c) 箱体内部模块片



(d) 箱体内部模块 1

图 13　温升试验

Fig. 13　Temperature rise test

左右，散热片温升 45 K 左右，其他部分温升均不超过 40 K，满足相关要求。

图 14 为充电机装车试验时的实物图、HDMI 显示和上位机显示图。充电机可根据温度补偿曲线进行充电，并完成总电流限流、充电限流等模式的转换，可按照网络命令执行相应指令。

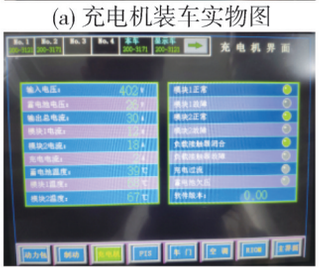
5　结论

在传统的大电流输出充电机中，输出侧多采用全桥整流拓扑，在大电流输出条件下将增加输出滤波电感和变压器的体积，以及整流管的电压应力，不利于在低压大电流场合应用。针对低压大电流输出的要求，本文提出了基于倍流整流移相全桥变换器与双功率模块并联的拓扑结构，完成了主电路参数计算与仿真验证，开展了防护等级 IP65 的机械结构设计，采用自然冷却方式，通过静强度、疲劳强度和模态分析以确保箱体在恶劣振动环境下的可靠性。最后，研制了工程样机，通过了完整的型式试验与装车考核验证。

型式试验与装车考核表明：①本文所提的拓扑结构有效降低了输出电流纹波与器件应力，系统工作稳



(a) 充电机装车实物图



(b) HDMI 显示

PM1信息 | PM2信息 | 主信息 | 控制命令

实时信息

变量名	变量值	变量名	变量值	变量名	变量值
以太网时间	2020-08-17 12:28:27	模块2输出电流	10	复位使能	无效
RPDO生命信号	199	充电电流	9	复位	无效
TCMS时间	2020-08-17 12:28:28	蓄电池温度	39	启停使能	有效
时间校准	无效	模块1散热片温度	59	BC1启动	启动
充电限流	无效	模块2散热片温度	58	BC2启动	启动
断负载接触器	无效	模块1正常	正常	BC启动	启动
TPDO1生命信号	112	模块1故障	正常	接触器Q1控制命令使能1	无效
软件版本	V0.0	模块2正常	正常	接触器Q1控制命令使能2	无效
输入电压	400.0	模块2故障	正常	接触器Q1控制命令	闭合
模块1输出电压（蓄电池电压）	27	负载接触器状态	闭合	接触器Q1反馈	闭合
模块2输出电压	27	时间校准(CANopen)	无效	风机断路器Q0反馈	闭合
充电机输出总电流	28.0	时间同步(Enet)	无效	内部变量	1
模块1输出电流	19	时间有效	无效		

(c) 上位机监控界面

图 14　充电机装车试验

Fig. 14　Onboard charger test

定，动态响应迅速，超调量小于20%，响应时间小于0.5 s，充电机效率超过90%。②箱体采用的蒙皮框架承载结构与密封散热设计，在保证防护等级IP65的同时实现了自然冷却，并且该承载结构在标准IEC 61373规定的振动冲击条件下安全可靠。③样机通过的型式试验和装车考核项目包括温升、防护和振动等项目，各项性能均达到设计要求，具备良好的工程适用性与环境适应性。

本文研制的充电机为轨道交通大电流充电机的国产化与高性能提供了可行方案，未来可进一步提升充电机的功率密度，研究更高效率的拓扑与散热优化方法，同时增强系统智能化水平，如增加状态监测与预测性维护功能，并拓展适用环境范围，适应更高防护等级（如IP68）及极端气候条件的应用要求。

参考文献：

[1] Li Haiyang, Zhao Xuqiang, Zhu Bowei. Development of all SiC EMU charger based on Vienna rectifier[C]//The Proceeding of 2022 International Conference on Wireless Power Transfer, 2023: 951-961. DOI:10.1007/978-981-99-0631-4_95.

[2] 葛洪勇, 祝博伟, 李海洋, 等. 基于碳化硅的VIENNA整流器研究与设计[J]. 电力电子技术, 2022, 56(9): 26-28.
Ge Hongyong, Zhu Bowei, Li Haiyang, et al. Research and design of VIENNA rectifier based on silicon carbide devices [J]. Power Electronics, 2022, 56(9): 26-28.

[3] 张宇龙, 葸代其, 张瑞峰, 等. 基于碳化硅器件的充电机偏磁抑制自动控制装置的研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(1): 111-113.
Zhang Yulong, Xi Daiqi, Zhang Ruifeng, et al. Research on automatic control device of magnetic bias suppression of charger based on SiC[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2020(1): 111-113.

[4] 曹科宇, 刘帅, 高珊, 等. 动车组某型充电机功能分析与设计优化[J]. 铁道车辆, 2024, 62(增刊1): 32-36.
Cao Keyu, Liu Shuai, Gao Shan, et al. Function analysis and design optimization of a specific type of charger in EMU[J]. Rolling Stock, 2024, 62(S 1): 32-36.

[5] 李守蓉, 杨伟. 轨道交通高频充电机应用研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(4): 64-66.
Li Shouyong, Yang Wei. Research on application of high frequency charger for rail transit[J]. Power Electronics, 2022, 56(4): 64-66.

[6] 宫钰明, 葛艳华, 刘金晶, 等. 基于ZVS全桥变换器的有轨电车充电机的研制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(9): 115-118.
Gong Yuming, Ge Yanhua, Liu Jinjing, et al. Development of a tram charger based on ZVS full-bridge converter[J]. Power Electronics, 2020, 54(9): 115-118.

[7] IEC 61373: 2010 Railway applications-Rolling stock equipment-Shock and vibration tests [S].

[8] EN 12663: 2010 Railway applications-Structural requirements of railway vehicle bodies [S].

[9] IEC 60529:1989+A2:2013 Degrees of protection provided by enclosures(IP Code) [S].

Development of a high-current output charger for rail transit

ZHUANG Xi, HA Dalei, WAN Zheng

(CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: This paper presents the development of a high-current output charger for rail transit applications. After introducing the charger's main circuit and control system, the paper detailed the calculation of its main circuit parameters and the simulation verification of the electrical design. The product development also covered IP rating design, static strength and fatigue strength calculations for the enclosure structure, and modal analysis. Electrical and mechanical analyses demonstrate that the charger meets the design requirements. The design is validated by type tests using a 10 kW engineering prototype.

Keywords: charger; high-current output; parameter calculation; IP rating; simulation

收稿日期：2024-12-18；修回日期：2025-10-30
责任编辑：白　云