

动车组电气柜小型化及轻量化研究

秦飞龙¹ 夏好广^{1,2} 通讯作者 王海琦^{1,2} 卢宏康^{1,2} 杨先超¹ 密启欣¹

(1 北京纵横机电科技有限公司 北京 100094; 2 中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所 北京 100081)

摘要: 如今, 高铁已成为人们的重要出行选择, 高铁更是“中国速度”的代表。在节能减排、低碳环保的大背景下, 高铁的轻量化设计将是未来的发展方向。电气柜作为高速动车组的重要组成部分, 其小型化和轻量化效果将影响整车的布局及轻量化设计。本文主要探索电气柜的小型化及轻量化研究方向, 电气柜内通过采用输入输出模块、继电器逻辑单元、优化结构布局的方式, 使电气柜体积减少了约50%, 质量减少了约26%, 实现电气柜小型化及轻量化设计, 同时小型化电气柜具有数字化、集成化、智能化特点, 为后续电气柜小型化的研究提供了可借鉴的思路。

关键词: 小型化; 智能化; IOM; 继电器; 轻量化

0 引言

电气柜是动车组的重要组成部分, 在列车的控制中起着重要作用, 电气柜主要由继电器、接触器、断路器等电气元件组成。目前动车组电气柜的体积和质量都比较大, 其中继电器占据了很大一部分, 而且由于线束较多、接线复杂, 工人作业过程中容易产生错误, 且存在故障率高、维护不便、不容易监控等问题。因此, 电气柜的小型化、轻量化、数字化、集成化和智能化将是其未来的发展方向, 可通过以下途径实现。

(1) 通过减少继电器的使用数量, 采用输入输出模块替代部分继电器, 以节省继电器占用的空间, 实现电气柜的小型化、轻量化、数字化、智能化设计。

(2) 通过改变继电器的安装方式, 采用板载式继电器集成的继电器逻辑单元替换部分继电器, 实现电气柜的小型化、轻量化、集成化、智能化设计。

(3) 优化柜体结构及元器件布局, 以达到最优的空间利用率, 实现电气柜的小型化、轻量化设计。

本文以某动车组电气柜为例, 综合采用上述三个方向的设计路线, 对电气柜进行小型化及轻量化设计。

1 输入输出模块 (IOM)

1.1 IOM 介绍

输入输出模块 (Input and Output Modules, IOM) 是集 TCMS 网络通信、信号处理、无触点开关、热备元

余等技术于一体的输入输出及逻辑控制装置, 其采用新型光耦和场效应等无触点控制电路替代传统继电器等有触点元器件电路, 通过逻辑可编程的形式, 实现车辆控制所需的输入输出、逻辑控制、故障诊断、状态监控等功能^[1]。IOM 功能如图 1 所示。

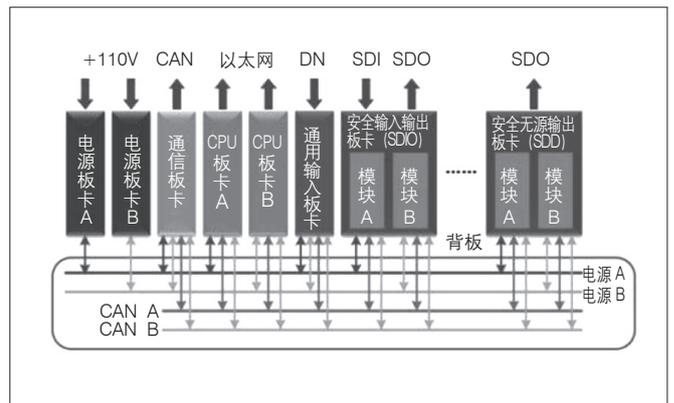


图 1 IOM 功能框图

1.2 IOM 与继电器对比

目前, 动车组控制电路主要是有触点控制的继电器, 其在列车长期运行过程中, 不可避免地会出现因继电器发热、变形、触点氧化、触点粘连等问题, 导致整个控制电路虚接、断开或者误动作, 严重影响列车的运行安全。

IOM 与继电器的对比^[2-4]见表 1。由表 1 可见, 相比传统继电器, 在整个控制电路的使用中, 从使用寿命、故障率、可靠性、可维护性、智能化、数字化方面,

表 1 IOM 与继电器对比

项点	IOM	继电器
使用寿命	一般 20 年左右	一般 5 年左右
可靠性	无触点，没有触点开关次数的限制，可显著降低故障率；热备冗余方案设计，避免单点故障对系统的影响，提高系统可靠性	有触点，有使用次数限制，使用过程中容易出现弹簧变形、触点歪斜、触点氧化、触点不动作等问题；无冗余方案，串联线路中任意继电器触点发生故障，都会导致整条线路功能的丧失
可维护性	软件编程，模块化设计，便于变更、检修维护，提高检修效率	任意变更均需重新接线，线束较多，接线越复杂，人工作业越容易出错，检修效率越低
智能化	实时监控和诊断车辆运行及设备运行状态，对故障进行精准定位，同时能够进行故障记录和复现	无监控、诊断、故障定位、故障复现等功能
数字化	无触点式设计，逻辑变更通过软件实现，并预留点位，便于整车逻辑的调整及优化	逻辑变更可能导致器件增加和重新布线，现场操作不便

IOM 都具有较明显的优势。

1.3 IOM 替换继电器

以某车型动车组电气柜为例，IOM 替换继电器时主要遵循安全对等原则、车辆可用原则、电压匹配原则、负载匹配原则及 IOM 使用特性原则，共 100 个继电器，可被 IOM 替代的共 40 个，替代率为 40%，IOM 产品如图 2 所示。

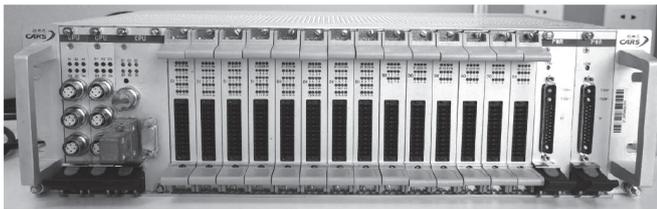


图 2 IOM 机箱

2 继电器逻辑单元

2.1 继电器逻辑单元介绍

继电器逻辑单元采用抽拉式板卡安装结构，多个继电器按功能分组分别安装在不同板卡上，各元器件之间通过集成线路连接。板卡采用模块式集成结构，板卡由金属面板与复合材料为基材制作的电路板及实现功能的元器件、结构件组成。

继电器逻辑单元的板卡类别主要包括继电器板卡、电源板、主控板、电压采集板、电流采集板。继电器逻辑单元拓扑结构如图 3 所示。

继电器逻辑单元集成度高、结构紧凑、性能可靠、板载式继电器安装，可以减少电气柜体积、减轻电气柜总量、降低人工布线出错概率及人工布线成本。同时继电器集成到箱体内部便于实现继电器的实时诊断，构建失效模型，实现健康管理。继电器逻辑单元具有诊断监测

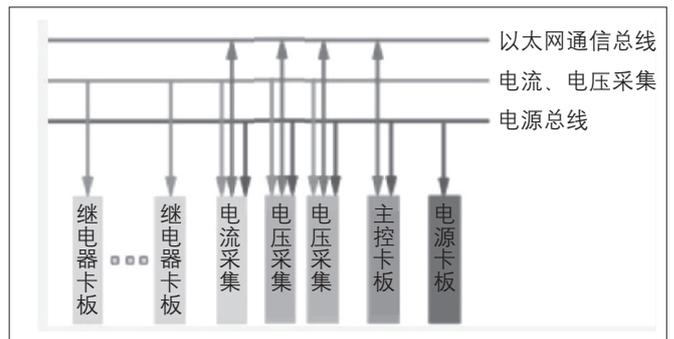


图 3 继电器逻辑单元拓扑结构图

板卡，能够实现对车辆电气控制回路以及回路关联继电器的状态监测，实现电气回路的故障定位、故障预测，继电器的寿命分析及数据记录等功能。

2.2 继电器逻辑单元与导轨式继电器对比

电气柜的整个控制电路中，有些继电器由于工作电流较大，不能用 IOM 替代。对于这些电流较大的继电器，用同种性能的板载式继电器替代。

继电器逻辑单元与传统导轨式继电器对比见表 2。由表 2 可见，相比导轨式继电器，继电器逻辑单元在可靠性、可维护性、集成化和智能化方面，具有较明显的优势。

2.3 继电器逻辑单元替换继电器

以某车型动车组电气柜为例，继电器控制单元替代原继电器主要遵循质量、尺寸、电气特性对等或优于被替换继电器原则，电气柜共 100 个继电器，其中 39 个可被继电器逻辑单元替代，替代率为 39%。继电器逻辑单元产品如图 4 所示。

3 柜体设计

3.1 框架设计

本次小型化电气柜从结构上由主体框架、开关门、

表2 继电器逻辑单元与导轨式继电器对比

项点	继电器逻辑单元	继电器
安装方式	直接焊接在PCB板上	导轨安装
可靠性	触点密封在惰性气体中，避免灰尘影响，防止触点氧化，利用辉光放电进行短路，避免电弧放电时间长，触点寿命短的特点，触点开闭时，滑动动作，具有清洁接触面的效果	触点裸露在空气中，使用过程中容易出现弹簧变形、触点歪斜、触点氧化、触点不动作等问题
可维护性	继电器板卡式安装，更换方便快捷	更换继电器和重新接线，费事费力、容易出错、受限于空间，操作不便
集成化	PCB板走线，线缆集成化程度高，节省空间	线束较多，接线复杂，人工作业容易出错
智能化	具有电气回路监测、器件故障诊断、故障精准定位，数据记录等功能	无智能化相关功能，可追溯性差

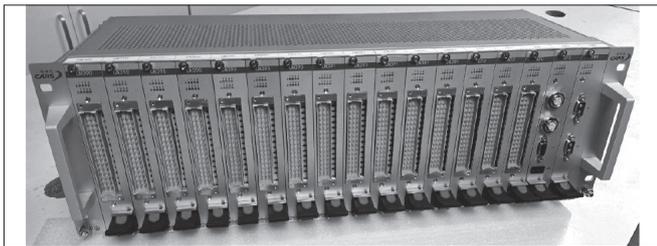


图4 继电器逻辑单元产品图

安装板和连接器安装支架等组成，如图5所示。

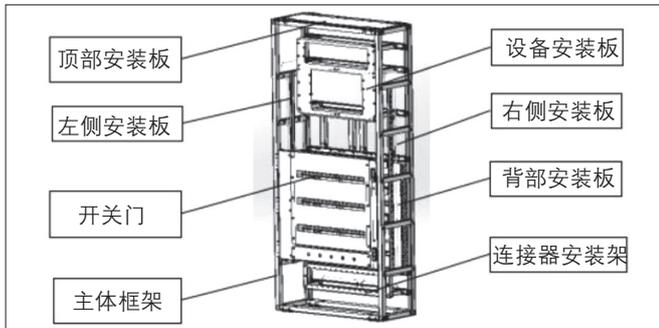


图5 小型化电气柜结构

主体架构采用框架开放式结构，主要由立柱、横梁、连接角合等零件组成，包括器件安装区域框架和设备安装区域框架，两个区域根据用途不同设计不同的型材搭接结构，保证机柜在每个区域具备足够的强度和刚度，可有效减重且具有良好的散热效果。同时，采用7系铝合金挤压型材铆接结构，框架型材连接处采用机加角合结构，有效保证强度。

为提高空间利用率，实现小型化的目的，增加电气柜开关门结构设计，此开关门采用折页与柜体连接，方便打开与关合，右侧关合处设有导向销，保证闭合时的精度。

安装板包括顶部安装板、背部安装板、设备安装板、左侧安装板和右侧安装板，与主体框架通过铆接形式连接，为器件、线槽等提供固定安装位置。

连接器安装支架采用螺柱与安装板组合方式，使用3mm不锈钢板折弯后，连接在主体框架上，为连接器提供有效支撑和固定。

3.2 布局设计

3.2.1 原则

为实现电气柜的小型化设计，元器件布局的合理且紧凑尤为重要，同时，元器件的布局也直接影响了柜内走线的合理性。在本次元器件布局设计中，主要遵循以下几个原则^[5]：

- (1) 同种类同功能器件集中布置原则；
- (2) 机箱类大尺寸器件优先布置原则；
- (3) 根据元器件安装特点布置原则；
- (4) 布局紧凑且方便走线原则；
- (5) 减少走线长度，就近接线原则。

3.2.2 布局方案

综合上述布置原则，小型化电气柜元器件布置方案如图6所示。

3.3 布线设计

为实现小型化电气柜布线的整齐美观，同时具有良好的电气性能，本次布线设计主要遵循以下原则：分类

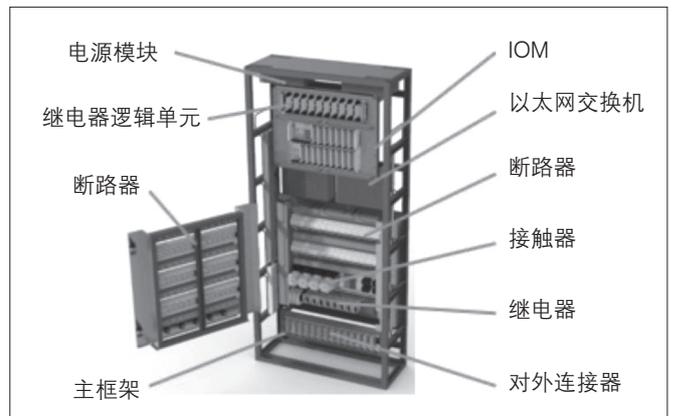


图6 小型化电气柜布局

布线原则、可靠原则、集中简化原则、就近原则、预布线原则、整齐美观原则。

电气柜布线在考虑上述原则的同时，还要满足TB/T 3153-2007^[6]所规定的布线要求，尤其要考虑电缆的电磁兼容性，不同种类的电缆间可能会通过辐射、感应等方式互相干扰，因此，在电气柜布线设计时，不同种类的电缆应尽可能分开布置，电缆间的敷设距离取决于功率、频率、并行敷设长度及辐射抗扰度。在不同种类的电缆最小间距无法满足要求时，电缆可通过金属管道、金属板、金属导管或者整体屏蔽等方式进行隔离。

根据上述布线原则和器件布置特点，本次小型化电气柜主要采用扎线板、扎线杆和线槽三种走线方式。顶部安装板处采用扎线板走线，背部安装板断路器走线和背板左右两侧主路径采用线槽走线，其余开关门处断路器、背部安装板其他器件、左右侧端子排及设备安装处均采用扎线杆走线方式。

4 有限元分析

4.1 模型建立

将模型导入 Hypermesh 中进行几何清理、抽中面、网格划分，并赋予各自的材料属性，包括密度、弹性模量、泊松比等，有限元模型如图 7 所示。

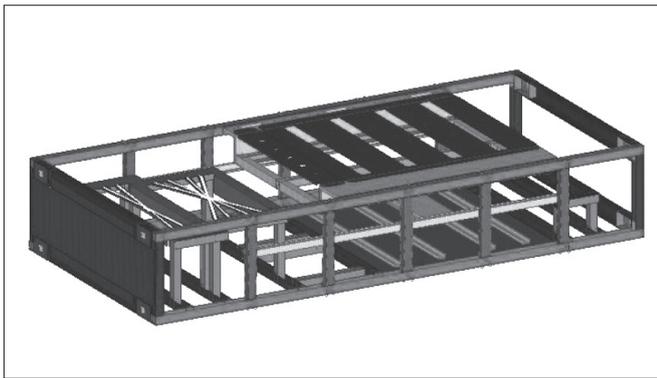


图 7 柜体有限元模型

有限元模型简化一般原则如下：

(1) 对整体结构强度无影响的零件不建立有限元模型，结构中的孔、倒角、倒圆等对整体强度无影响，全部予以简化；

(2) 柜内设备根据重心位置简化为质量点单元；

(3) 设备通过 RBE3 单元与设备安装架进行连接；

(4) 为不降低设备与支架结合体的刚度，固定同一设备插箱的安装点通过 RBE2 单元进行连接，保证结合体的实际刚度；

(5) 薄板零件抽中面简化为壳单元 (shell)，厚度取零件的实际厚度，单元尺寸为 10mm、8mm；

(6) 紧固件用 CWELD 单元模拟，直径和材料按实际紧固件材料定义。

4.2 工况及约束

电气柜按标准 EN 12663-2010《Rail applications-Structural requirements of railway vehicle bodies》的结构强度要求，分析了 6 种静强度工况，如表 3 所示。

表 3 仿真工况汇总

工况	纵向加速度 a_y	垂向加速度 a_z	横向加速度 a_x
1	5g	-1g	-
2	-5g	-1g	-
3	-	-1g	3g
4	-	-1g	-3g
5	-	-1g+3g	-
6	-	-1g-3g	-

注：g 为重力加速度，取值 9810mm/s²。

小型化电气柜与车体连接处施加全约束，如图 8 所示。

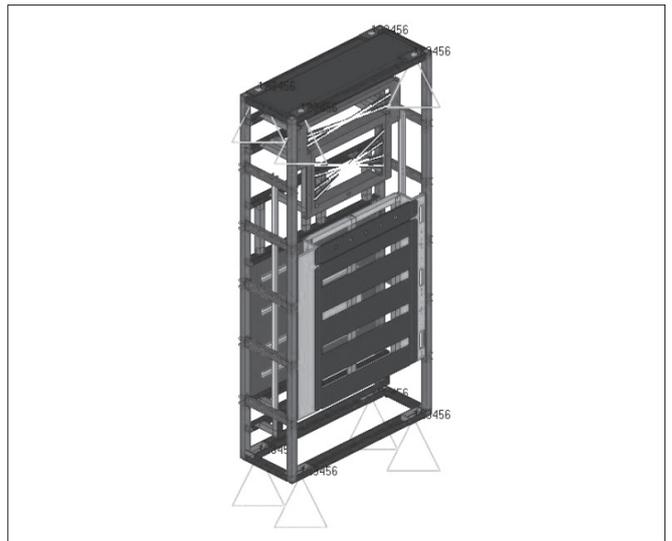


图 8 电气柜约束条件

4.3 强度分析

采用有限元分析方法，对结构和设备进行建模，施加边界条件和载荷，计算得到结构应力，与结合材料的屈服强度及拉伸强度进行对比，从而判断结构的安全性。6 个工况下的应力云图如图 9 所示。

在 6 种工况下，电气柜最大应力发生在工况 4，最大值为 378.8MPa，位于电气柜前右侧立柱与开关门连接处，此处柜体材料为 7050 铝合金，材料拉伸强度为 505MPa，屈服强度为 435MPa，电气柜的最大计算应

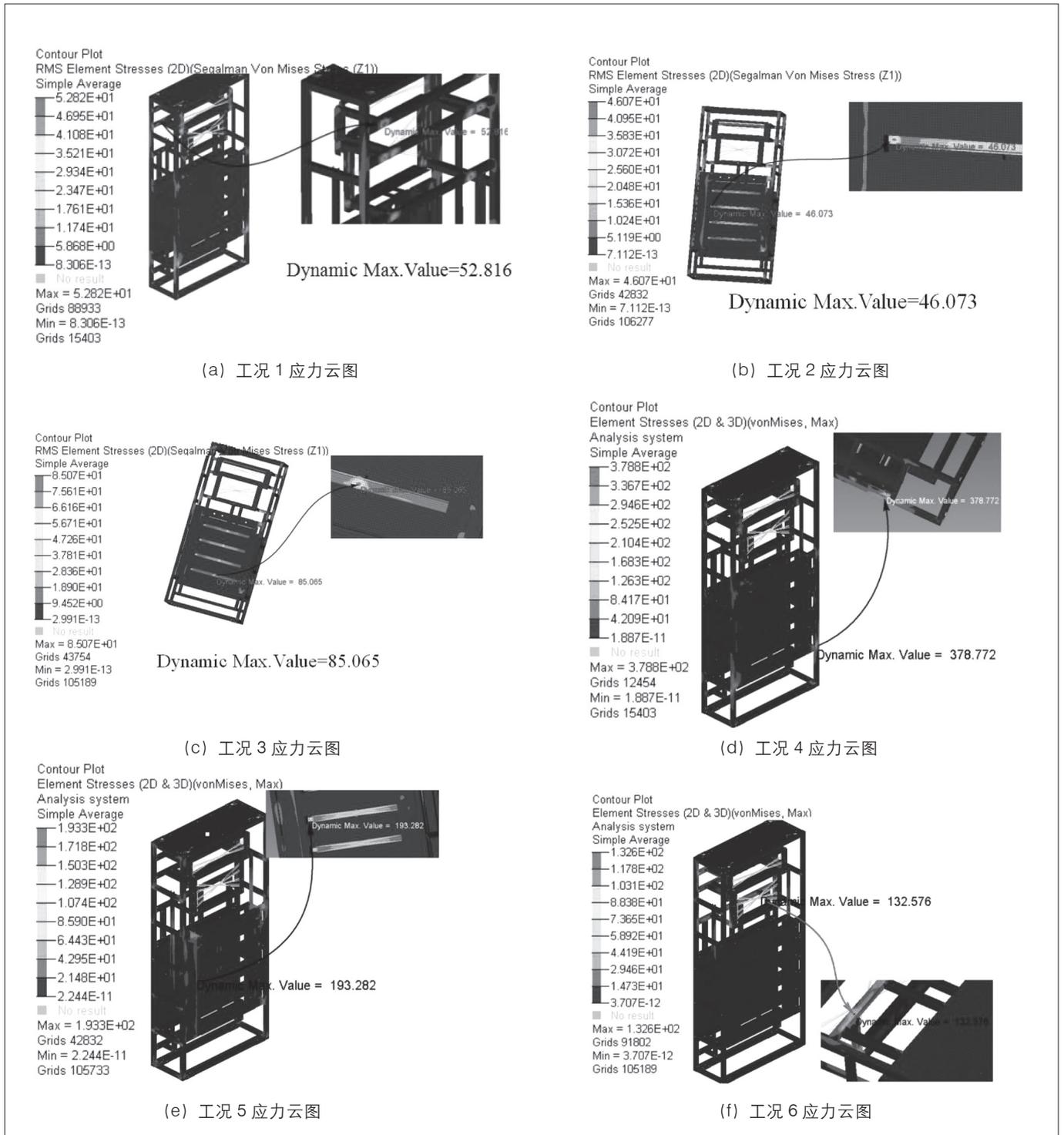


图9 各工况应力云图

力值低于材料的屈服强度，且具有一定的安全余量。因此，小型化电气柜结构设计满足强度要求。

5 实验验证

小型化电气柜按照 IOM 和继电器逻辑单元替换继电器、柜体结构设计优化的设计路线生产的样柜如图 10 所示。

为验证小型化电气柜结构设计强度满足要求，有限元分析的准确性，对柜体进行冲击振动试验。

冲击振动试验按照标准 IEC 61373-2010《铁路应用 铁道车辆设备冲击和振动试验标准》中的 1 类 A 级的振动要求进行模拟长寿命振动试验和冲击振动试验。

(下转第 16 页)

同敏感度参数变化后变矩器的性能, 总结归纳了叶片关键参数对变矩器性能的影响敏感度。从表4可以得出, 失速变矩比 K_0 对泵轮的出口角和涡轮的入口角最为敏感; 最高效率 η_{\max} 对导轮的进出口角最为敏感; 泵轮的出口角和涡轮的入口角、泵轮叶片前倾和泵轮叶片后倾对液力变矩器的能容系数 λ_B 影响最大。变矩器关键参数敏感度评价方法, 可用来指导变矩器的优化设计, 以缩短变矩器的研发周期和研发成本。

参考文献:

[1] 马文星. 液力传动理论与设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
 [2] 才委, 马文星, 刘春宝, 等. 基于三维流场计算的液力变矩器特性预测方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(03): 316-319+325.
 [3] 严鹏, 吴光强. 液力变矩器性能分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(11): 1504-1507.

(上接第11页)

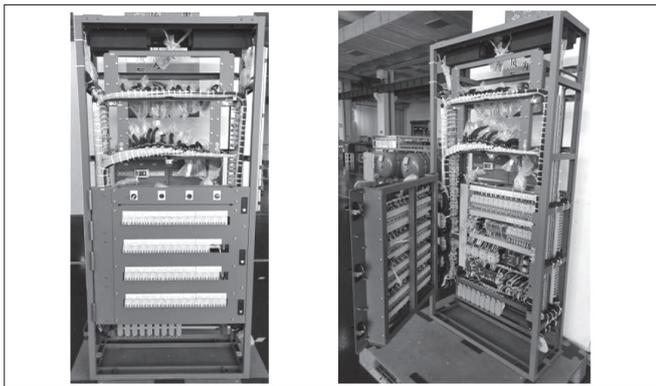


图10 小型化电气柜

经过试验验证, 柜体在经过连续振动试验后, 柜体结构无裂纹、无损伤, 外观和机械结构未发生任何损坏, 试验结果满足标准要求。

6 结语

本文以一种既有动车组车载电气控制柜为原型, 通过采用继电器逻辑单元、输入输出模块、结构优化的方式对原电气控制柜进行小型化及轻量化设计。相比原电气柜, 小型化电气柜体积减少了约50%, 质量减少了约26%, 实现了电气柜的小型化及轻量化设计, 同时小型化电气柜具有数字化、集成化、智能化特点, 为后续电气柜小型化及轻量化的研究提供了可借鉴的思路。

课题项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目。课题名称: 时速400公里动车组关键技术研究; 课题编号: 2019YJ012。

参考文献:

[1] 秦娇梅, 李振, 盖萌. 基于冗余设计的无触点逻辑控制单元的研发 [J]. 铁道车辆, 2020, 58(11): 15-25.
 [2] 王正斌. 简述地铁车辆LCU系统及应用 [J]. 科学大众, 2020(11): 166-167.
 [3] 朱鹏举. 地铁车辆LCU出现的问题及解决方案 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(4): 85-86.
 [4] 彭驹, 袁浩智, 白春光. 城轨列车双冗余LCU系统集成技术研究及应用 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(5): 21-24.
 [5] 崔韬, 贾继云. 标准地铁列车电气柜布置策略及走线方案研究 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2021, 44(5): 101-104.
 [6] 麦金森, 夕文. 铁路机车车辆运行故障监测诊断技术的研究与应用 [J]. 中国铁路, 2007(03): 56-59.

作者简介: 秦飞龙 (1986.02-), 男, 汉族, 吉林吉林人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 机车车辆电气柜设计及研发; 王海琦 (1995.08-), 女, 汉族, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究实习员, 研究方向: 机车车辆列车网络与电气控制研发。

通讯作者: 夏好广 (1987.08-), 男, 汉族, 山东德州人, 博士研究生, 副研究员, 研究方向: 机车车辆列车网络与电气控制研发。