

基于有限元分析的轨道交通电气柜体设计

吴海滨

(广州鼎汉轨道交通装备有限公司 广东 广州 510000)

摘要：随着绿色环保节能目标的提出，轨道交通车辆发展逐步迈向轻量化道路。基于此背景，本文以铝合金电气柜体为原型，设计复合材料电气柜体，就柜体结构、连接结构和柜门结构的具体设计予以阐释。并运用有限元分析手段，对比分析模态和静强度计算，试验验证防护等级和冲击振动等级。经分析，本文所设计的复合材料电气柜体符合轨道交通运行需要，具备轻量化特征。

关键词：有限元分析；轨道交通；电气柜体

0 引言

轻量化是当前轨道交通零件和结构体设计的重要原则，车辆重量减轻，将施以更小动作用力，缓解轮轨压力，减弱噪声和振动，延长车辆使用寿命。电气柜体作为轨道车辆的核心装置，其安装于车辆底部，主要材料为金属蒙皮和钢材，质量高达数千千克，不满足轻量化装置标准。因此，研究利用复合材料替代传统材料十分必要。综合考量柜体的可维护性和可制造性，使用复合材料，利用纤维材料的可设计性、高比刚度、高比强度和低密度优势，实现轻量化铝合金柜体的目标。

1 轨道交通电气柜体设计

1.1 基本性能

我国在复合材料方面的研究材料较少，缺乏结构设计与优化的实践经验，但相关领域专家并未停止研究国外复合材料电气柜体的设计模式。本文给出一种使用碳纤维材料设计电气柜体的结构，借鉴某公司所研制的复合材料车体，通过设计使得电气柜体具备耐腐蚀、耐疲劳的性能^[1]。相较于普通的铝合金柜体，复合材料具备优良的耐腐蚀性，具体性能对比结果见表 1。碳纤维复合材料基本结构近似于纤维网状，裂纹出现后扩散所需时间较长，有助于提升车身安全性能。同时，复合材料本身重量较轻，列车行驶中所消耗的能量更低，适合在

轨道交通领域普及^[2]。

1.2 基本结构

1.2.1 柜体结构

外部结构运用整体设计的方式，蒙皮和外骨架一体成型，单独将内部隔板和主承载纵梁制作成型，结合不同区域对承载的结构要求，设定复合材料具体厚度，达到蒙皮和承载梁一体化成型目标^[3]。在设计柜体的过程中，所使用的零件数少于 35 件，而传统铝合金电气柜体使用的零件数为 80，零件数量减少约 60%，整体结构间更具稳定性，降低连接紧固件的零件成本。铝合金横梁作用于柜体顶部，呈现同平面均匀分布特征，并将吊耳设置于横梁两端，可发挥在车体底部安装固定电气柜的效用。依据承载力大小，合理设计安装内部模块的位置，预设不锈钢和铝合金安装座，遵从铝合金柜体安装流程与位置，直接在不改变原本结构的基础上替换柜体^[4]。

1.2.2 连接结构

常见的复合材料连接方式包括混合连接、胶接连接和机械连接。其中，机械连接具有无厚重限制和重复装配的优点，但使用此种方式会造成材料损伤，并且损伤位置在制孔处。胶接连接具有无电偶腐蚀、抗疲劳、绝缘性好和减振密封的优势，但不具备高剥离强度^[5]。鉴于此，设计电气柜体时采取胶螺混合连接方式，加强紧固件，切断胶层损伤发展路径，延缓发展趋势，保证复

合材料的抗蠕变、抗疲劳、抗冲击和抗剥离特性可完全发挥。

经过分析，考虑到柜体的壁厚和承载特性，使用胶接连接方式，连接碳纤维复合材料部件；使用胶螺混合连接方式，连接内部模块安装座、铝合金横梁及柜体。为提高连接紧密度，使用绝缘性优良的胶黏剂，填入胶螺

表 1 金属材料和碳纤维复合材料的相关性能

材料	弹性模量 /GPa	比模量 /(GPa · (g/cm ³) ⁻¹)	拉伸强度 /MPa	比强度 /(MPa · (g/cm ³) ⁻¹)	密度 /(g/cm ³)
GFRP	49	24.2	1120	560.1	2.0
CFRP	115	71.4	1636	1022.0	1.6
铝合金 (6005A-T6)	73	26.0	250	89.4	2.0
不锈钢 (SUS301)	196	25.2	520	66.2	7.9
碳钢 (Q345)	207	26.2	490	63.1	7.8

混合连接缝中，协调机械连接变形与胶接变形，尽可能降低复合材料与铝合金间发生电偶腐蚀的概率^[6]。实际胶接中容易出现低强度破坏问题，解决此问题要从选定螺栓孔几何参数着手，具体参数见表 2。

表 2 螺栓孔几何参数

项目	孔径 / 板厚 (D/t)	端距 / 孔径 (e/D)	边距 / 孔径 (S _w /D)	排距 / 孔径 (p/D)	列距 / 孔径 (S/D)
比例值	[1,2]	≥ 3	≥ 2.5	≥ 4	≥ 5

1.2.3 柜门结构

柜门结构设计要在满足使用要求的基础上，达到刚度和轻量化需要，使用复合材料，利用铆接和铝合金板金焊接工艺制作^[7]。反映材料性能的弹性模量和反映构件几何参数的截面尺寸是构成构件刚度的参数，衡量柜门结构是否达标要对以上两个参数的具体数值加以确定，将参数控制在刚度限度内。相较于铝合金面板，准各向同性碳纤维具备更低弹性模量，完全满足刚度设计需要。为保证复合材料具备与铝合金面板等效的弯曲性能，要适度加大截面惯性矩，以此获得相应弯曲刚度。夹层结构和工字梁是多种截面形式中提供重量最轻和应力最小效果的结构，因此所设计的柜门结构以“三明治夹芯”结构为主，在碳纤维复合材料间加入泡沫层，提高轻量化率。

完成柜体、连接和柜门结构设计后，所设计的复合材料电气柜体（图 1）总质量为 345kg，轻量化率趋近于 35%。

2 有限元分析

本文有限元分析的理论基础为模态分析理论，描述运动的微分方程为：

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Q(t) \tag{1}$$

式中： $x(t)$ - 位移响应列向量；

$\dot{x}(t)$ - 速度响应列向量；

$\ddot{x}(t)$ - 加速度响应列向量；

K - 刚度矩阵；

C - 阻尼矩阵；

M - 振动系统结构质量；

$Q(t)$ - 节点受到的外力向量^[8]。

在无阻尼自由振动条件下，运动微分方程为：

$$M\ddot{x}(t) + Kx(t) = 0 \tag{2}$$

设定该方程的解是： $x(t)=\phi \sin(\omega_n t+\phi)$ ，得到：

$$-\omega_n^2 M\phi \sin(\omega_n t+\phi) + K\phi \sin(\omega_n t+\phi) = \{0\} \tag{3}$$

化简后得到：

$$(K - \omega_n^2 M)\phi = \{0\} \tag{4}$$

此方程的解存在两种情况：一是当 $\det(K - \omega_n^2 M) \neq 0$ 时，此时方程有唯一解，且 $\phi \neq 0$ ；二是当 $\det(K - \omega_n^2 M) = 0$ 时，此时方程有非奇异解，且 $\phi \neq 0$ 。

当方程有非零解时，所得到的系数矩阵行列式的值必为零，即：

$$\det(K - \omega_n^2 M) = 0 \tag{5}$$

此方程为模态分析的频率或者特征方程，通过解方程，得出特征向量 ϕ_i 、每个特征值 ω_i^2 ，将以上数值组成振动模态，用 ω_i 表示系统第 i 阶圆频率，用 ϕ_i 表示模态振型。因为 $f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}$ ，得到的自由度系统中各阶固有频率间的关系为：

$$f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_n \tag{6}$$

结合无阻尼系统自由振动的运动微分方程及模态特征方程可得到系统第 i 阶固有频率对应模态振型，对振型向量采取归一化处理办法，得到：

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} = 1 \tag{7}$$

进而求得：

$$f_i' = \frac{1}{8\pi^2 f_i} \{\varphi_i\}^T ([K'] - 4\pi^2 f_i^2 [M']) \{\varphi_i\} \tag{8}$$

2.1 模态分析

为验证所设计的轨道交通电气柜体是否达到技术标准，运用模态 FEA 分析和静强度分析办法，提取资料库数据，建立有限元模型，如图 2 所示。在此模型中，模拟网格类型借助 S4R 单元，使用 ABAQUS 软件，采用壳单元仿真复合材料。

通过读图，在各组件重心设置质量点，利用质量点代替各组件实际质量。各组零件安装面上设置质量点耦合位置，保证所设定的总质量为 780kg。

2.2 静强度分析

分析静强度要结合现行强度设计规范，按照鉴定规范中对车内外设计的基本要求，

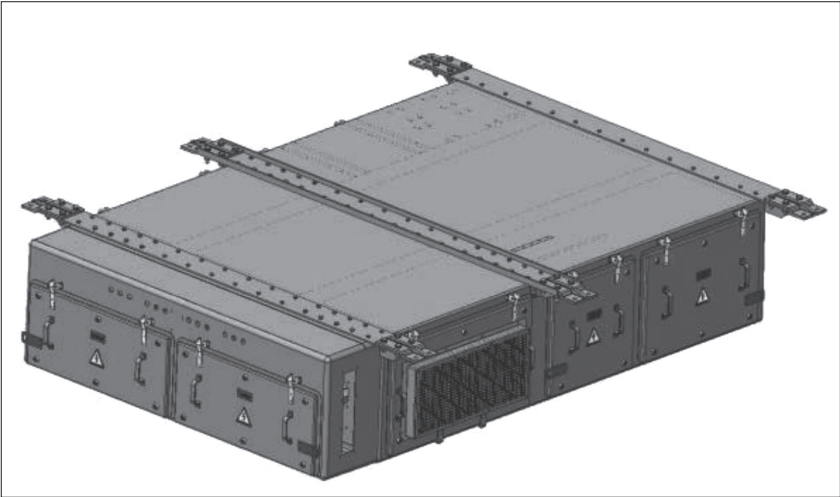


图 1 复合材料电气柜体三维结构

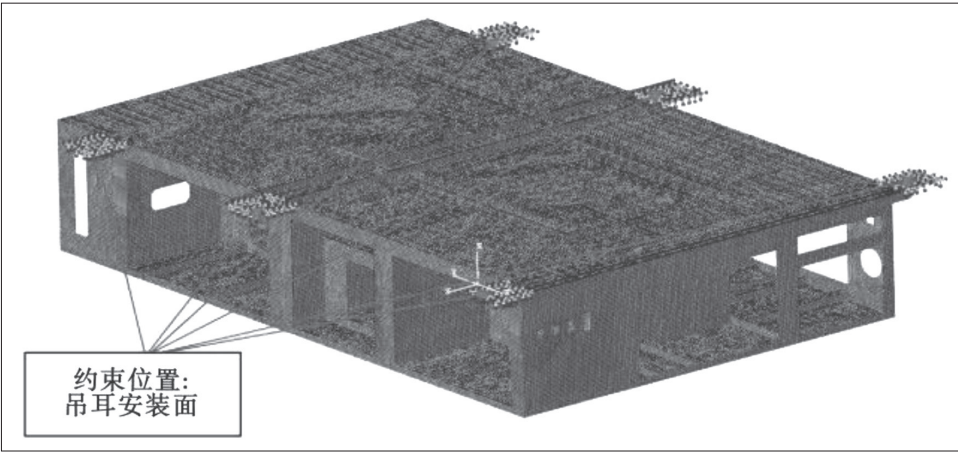


图 2 有限元分析模型

开展强度考核。将三个方向加速度惯性力作为考核对象，替代车内外设计及其紧固件。在对垂向 3g、横向 1g 和纵向 3g 惯性力考核后，得到分析结果，如表 3 所示。

运用有限元分析方法，分别计算出复合材料电气柜

表 3 静强度有限元分析结果

载荷（纵向 / 横向 / 垂向）	最大应力 /MPa				最大变形量 /mm	
	碳纤维 S12	碳纤维 S22	碳纤维 S11	铝合金	碳纤维	铝合金
-3g/-1g/3g	15.12	59.40	-45.65	172.8	1.41	5.10
-3g/1g/3g	16.50	47.42	-46.79	183.3	1.40	5.34
3g/-1g/3g	-10.87	62.04	34.46	181.7	1.63	3.85
3g/1g/3g	8.65	47.09	27.24	177.7	1.60	3.98

体和铝合金电气柜体的静强度具体值，在不同工况状态，铝合金电气柜体的最大变形量均大于复合材料电气柜体，证明铝合金电气柜体刚度性能较差，整体性能弱于复合材料电气柜体。同时，通过读表，复合材料电气柜体最大应力为 62.04MPa，远小于 500MPa 的材料性能测试强度，符合技术控制需要。

在完成静强度分析后，需继续开展模态分析，借助此分析结果能够清楚得出电气柜体的固有

频率和振动特性。分析中约束吊耳安装面，得到有限元模态分析结果见表 4，碳纤维复合材料电气柜体模态分析图（1-3 阶、4-6 阶）如图 3、图 4 所示。

表 4 有限元模态分析结果

模态	固有频率 /Hz	
	碳纤维	铝合金
1 阶	31.61	17.78
2 阶	32.08	20.55
3 阶	38.55	24.68
4 阶	39.75	27.15
5 阶	39.97	28.53
6 阶	42.56	28.70

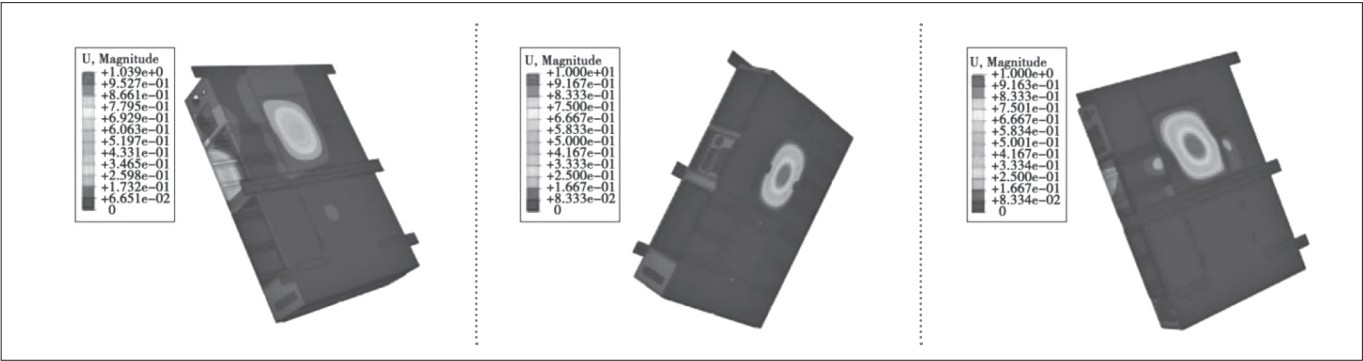


图 3 碳纤维复合材料电气柜体模态分析图（1-3 阶）

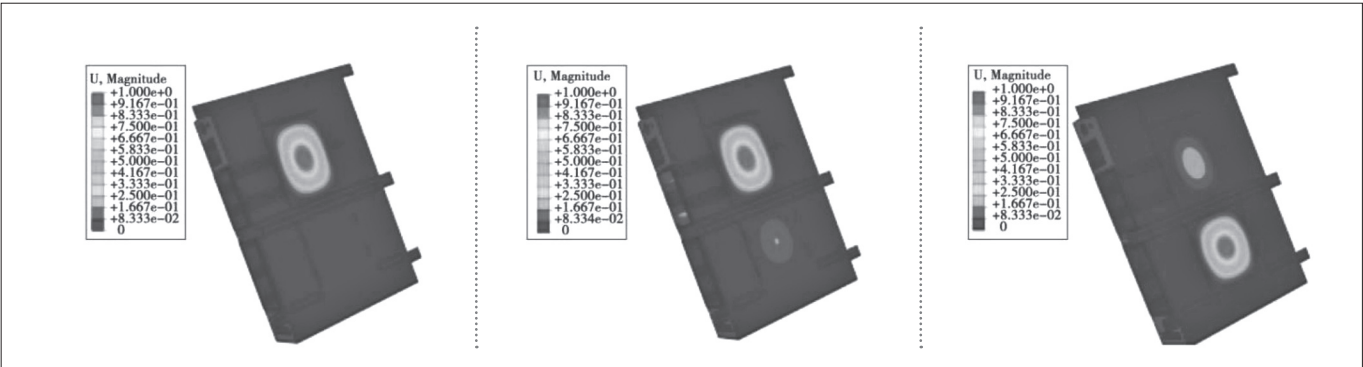


图 4 碳纤维复合材料电气柜体模态分析图（4-6 阶）

通过读表可以看出,电气柜体的底板与顶板处若存在支撑少和面积大的部分,将发生振动。出现此种情况的原因是:特殊部分刚度小,外界振动传输至此会带来共振问题,造成振动频发。对比铝合金和碳纤维复合材料,在1阶固有频率层次,铝合金数值小于复合材料数值,契合固定频率需要。

2.3 试验验证

参照 IEC 61373:2010 的 I 类 A 级要求标准设计冲击振动试验,验证复合材料电气柜体是否能够应对冲击,满足防护等级需要。在垂向、横向和纵向分别设计冲击振动试验,检查试验后柜体是否出现机械损伤、紧固件松动、损伤、裂纹等问题,若未出现以上问题,证明柜体结构满足规范要求。继续按照 GB/T 4208-2017《外壳防护等级(IP 代码)》的 IP55 要求,开展复合材料电气柜体防尘放水试验,检查柜体内部是否有灰尘和进水问题。经检验,本文所设计的复合材料电气柜体无机械损伤、紧固件松动、损伤、裂纹等问题,且无灰尘和进水问题,证明满足技术需要和规范要求。

3 结语

综上所述,本文所设计的复合材料电气柜体是在传统铝合金柜体结构基础上,使用碳纤维复合材料替代部分结构材料,利用此种材料所具备的高比刚度、高比强度和低密度特性,使得所设计的柜体在工艺和结构方面均有所优化。并得出以下结论:

(1) 复合材料电气柜体的总质量为 345kg,轻量化率趋近于 35%;

(2) 经过有限元分析,复合材料电气柜体的材料强度、刚度等性能表现强于传统电气柜体;

(3) 复合材料电气柜体使用的零件数少于 35 件,而传统铝合金电气柜体使用的零件数为 80,零件数量

减少约 60%,整体结构间更具稳定性。

由此可见,经过防护等级和冲击振动试验后,本文所设计的复合材料电气柜体无机械损伤、紧固件松动、损伤、裂纹等问题,且无灰尘和进水问题,证明满足技术需要和规范要求,值得在实际应用中采取现场核验考证的方式继续优化相关性能,以此助力我国轨道交通行业发展。

参考文献:

- [1] 刘昊杰. 轨道交通中的电气自动化布线原则及施工技术[J]. 时代汽车, 2022(17): 184-186.
- [2] 林冰. 电气火灾监控系统在轨道交通的应用研究[J]. 中国设备工程, 2022(16): 272-274.
- [3] 刘平郭, 魏强, 高晓芳, 等. 地铁调车机车电气控制柜结构优化[J]. 科技与创新, 2022(14): 41-43.
- [4] 刘昊杰. 自动化技术在轨道交通工程中的应用[J]. 集成电路应用, 2022, 39(07): 244-245.
- [5] 邹文骏. 苏州轨道交通列车再生制动能量吸收装置应用情况分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(05): 21-26.
- [6] Bader M. P. Concept and Technical Development Prospects of the Electric-Power Industry of Rail Transport[J]. Russian Electrical Engineering, 2021, 92(9): 499-503.
- [7] 魏中堂. 城市轨道交通受流与磨耗试验台供电电源系统研制[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
- [8] 刘波, 李榆银, 李建林, 等. 碳纤维复合材料轨道车辆电气柜体研制[J]. 机车电传动, 2021(01): 34-39.

作者简介: 吴海滨(1994.01-), 男, 汉族, 广东东莞人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 机械设计。

