

轻量化复合材料风冷机箱设计技术研究

张家乐, 常选仓, 冯志新, 朱永强

(西南电子设备研究所, 成都 610036)

摘要: 碳纤维复合材料在风冷机箱轻量化设计中, 具有力学性能、电磁屏蔽与可制造性等多目标难以协同优化的难题。提出轻量化复材风冷机箱设计技术, 突破传统的简单材料替换思路, 根据机箱内部“薄壁”与“非薄壁”结构的承载和功能差异, 分别提出差异化的轻量化构型设计方法; 以某典型风冷机箱为例, 基于随机振动 3σ 法则进行碳纤维轻量化机箱设计, 并开展随机振动、冲击和加速度仿真分析和试验验证。结果表明: 所设计的轻量化机箱方案能够满足动静强度、刚度要求, 且相比原铝合金结构减重 851 g, 减重比例约 25.7%。本文设计方法可为复杂工况下机载电子设备的复材轻量化设计提供明确的技术路径和理论依据。

关键词: 轻量化设计; 风冷机箱; 碳纤维; 结构设计; 机载电子设备

中图分类号: V229⁺.7

文献标识码: A

Research on design technology of lightweight composite air-cooled chassis

ZHANG Jiale, CHANG Xuancang, FENG Zhixin, ZHU Yongqiang

(Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China)

Abstract: In the lightweight design of carbon fiber composite materials for wind-cooled enclosures, there are the difficulties of multi-objective synergistic optimization among mechanical properties, electromagnetic shielding and manufacturability. The design technology for lightweight composite air-cooled enclosures is proposed, which breaks through the traditional concept of simple material substitution. According to the load-bearing and functional differences of 'thin-walled' and 'non-thin-walled' structures within the enclosure, the differentiated lightweight configuration design methods are proposed. Taking a typical air-cooled enclosure as an example, the carbon fiber lightweight enclosure is designed based on the random vibration 3σ method, and the simulations and experimental validation for random vibration, impact, and acceleration analysis are conducted. The results show that the designed lightweight enclosure can meet the requirements of dynamic and static strength, and rigidity, the weight is reduced by 851 g compared to the original aluminum alloy structure, which is approximately 25.7%. The methods proposed in this paper can provide a clear technical path and theoretical basis for the lightweight design of composite materials in airborne electronic equipment under complex working conditions.

Key words: lightweight design; air-cooled chassis; carbon fiber; structural design; airborne electronic equipment

收稿日期: 2025-07-12; 修回日期: 2025-10-19

通信作者: 张家乐(1997—), 男, 硕士, 工程师。E-mail: 1498164948@qq.com

引用格式: 张家乐, 常选仓, 冯志新, 等. 轻量化复合材料风冷机箱设计技术研究[J]. 航空工程进展.

ZHANG Jiale, CHANG Xuancang, FENG Zhixin, et al. Research on design technology of lightweight composite air-cooled chassis [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

轻量化设计是航空结构设计重点,美国NASA将降低飞行器结构重量、增加有效载荷的质量、提高任务性能作为顶级技术挑战之一^[1],然而结构轻量化设计与大机动作战中力学性能的高效承载之间,矛盾日益突出。电子机箱因其结构形式简单、承载性能好等优点是现代飞机中电子设备常用的结构形式之一。相对于民用飞机电子机箱而言,军机电子机箱的静动力学环境更加恶劣、环境适应性要求更高,且随着作战环境的日益复杂,飞机机动性能的不断提 高,对机箱重量的限制也更加严苛。

在满足机载电子机箱环境适应性、强度刚度、电磁兼容性等性能的同时,国内外研究者对机载电子机箱轻量化设计也做了很多探讨。郭建平^[2]针对机载电子设备进行了随机振动仿真和试验校核,提高了仿真准确性,为结构强度的保证和减重设计提供了支持;贾光楠^[3]对某机载电子机箱的轻量化设计和强度进行了研究,从结构件减重和元器件减重两个角度对设备进行了重量优化设计和仿真分析;Priyank Prasad^[4]设计了一种包括结构设计、轻量化设计等的机架系统工程设计方法,并成功实现了某监视平台机架的轻量化设计;蒋尚^[5]针对实际需求,研究出了一种刚度好、连接可靠性高、重量轻、工艺性好的电子设备机箱,在提高设备工作适应性和可靠性的同时,实现了轻量化设计。

对于航空结构而言,在传统铝合金制造的机箱上进行开孔与开槽的减重方式已逐渐满足不了轻量化设计的需求^[6-7],碳纤维作为一种低密度、轻质量的复合材料在飞机结构中得到了广泛应用,例如飞机蒙皮、机载电子设备安装架等^[8-11]。郭晓君^[12]根据碳纤维增强塑料的成型方式,将三个铝合金构件设计为了一个碳纤维增强塑料构件,并通过随机振动分析验证了设计方案的可行性;Wang Henghai^[13]通过对雷达碳纤维机架进行振动、冲击条件分析和试验验证,验证了该机架重量轻、可靠性高的优点,为轻量化设计提供了支持;张翼^[14]提出了一种碳纤维铺层设计方法,并设计了一种碳纤维复合材料电子机架,且通过蔡-吴失效准则计算的铺层失效系数验证了该设计方法;Aglietti^[15]将碳纤维应用到了电子设备外壳上,并

得出结论相比于金属结构,该碳纤维结构可减轻20%的重量;Fei Chengwei^[16]对航空发动机散热器在智能材料的应用上所面临的挑战与发展方向进行了探讨与设计,为航空发动机结构的高性能和轻量化设计提供了有力支持。

碳纤维材料在飞机结构和电子设备结构上有了广泛的应用,然而在电子机箱领域,尤其是需满足高强度、高刚度、严苛环境适应性、电磁屏蔽以及表面耐磨性等多重要求的场合,碳纤维材料对传统铝合金结构的替代仍面临显著挑战。且复合材料机箱的轻量化并非简单的材料替换,而是一套全新的、需要系统考量上述区别的设计技术,目前的研究与工程实践尚缺乏系统性的结构设计分析与验证方法,特别是在如何平衡轻量化效益与综合功能要求方面。因此,针对该类问题开展深入的结构设计理论与应用研究,具有迫切的理论和工程必要性。

本文基于随机振动 3σ 法则设计理念,解决碳纤维在风冷机箱应用过程中面临的高强度、高刚度、环境适应性及电磁兼容性等多重挑战,提出轻量化复材风冷机箱设计技术,包括薄壁与非薄壁结构的不同轻量化技术路径、轻量化与连接可靠性、电磁屏蔽、表面耐磨等功能需求之间的矛盾解决等;并以某典型机载风冷机箱为研究对象,开展轻量化风冷机箱设计研究,设计出轻量化碳纤维机箱结构,并对该轻量化机箱进行仿真分析和试验验证。

1 理论分析

1.1 轻量化设计流程

风冷机箱是机载电子产品中常见的结构形式,且该结构所处静动力学环境复杂、环境适应性要求高,为了满足机箱轻量化设计和高效承载的需求,本文基于随机振动 3σ 法则设计理念,提出了轻量化复材风冷机箱设计技术,主要包括轻量化设计和方案验证2个方面,如图1所示。首先以典型风冷机箱为研究对象,在考虑硬度和耐磨性、电磁兼容性、可制造性等的基础上,将碳纤维材料应用到铝合金机箱,并针对薄壁结构和非薄壁结构开展结构轻量化设计。然后基于随机振动 3σ 法则设计理念,开展随机振动、加速度、冲击仿真分析和试验验证,判断碳纤维结构强度、变形等是否满

足要求,如果不满足,则需调整碳纤维结构的设计方案,如果满足,则得到轻量化风冷机箱的设计方案。

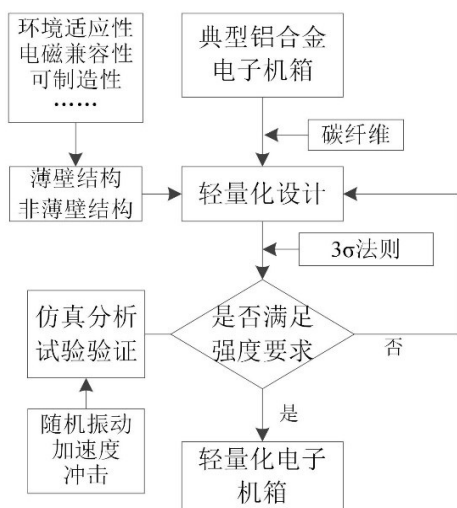


图1 轻量化风冷机箱设计流程图

Fig. 1 Lightweight electronic chassis design flow chart

1.2 随机振动 3σ 法则

机载电子设备工作环境比较恶劣,且需要长时间的承受起飞、着陆等气动因素带来的振动和冲击载荷,其典型的破坏形式为振动疲劳破坏^[17-18]。工程上很多振动过程的概率密度函数服从均值为0的正态分布,且对于线性振动系统,如果激励是正态过程,响应也一定是正态过程,正态分布其函数表达式如式(1)所示,概率密度曲线如图2所示。

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

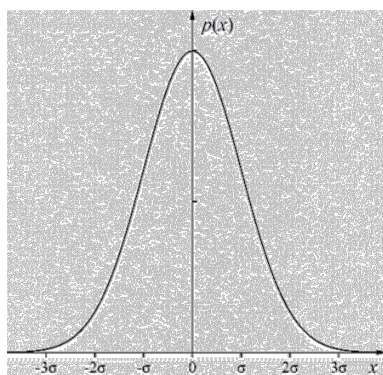


图2 正态分布概率密度曲线

Fig. 2 Normally distributed probability density curve

Steinberg^[19]基于 Miner 线性累计损伤理论和应力正态分布假设,提出了 3σ 法则,即将应力分布划分为三个区域,瞬态应力响应值落在 $[-\sigma, \sigma]$ 、 $[-2\sigma, 2\sigma]$ 、 $[-3\sigma, 3\sigma]$ 区间的概率分别为 68.26%、95.44% 和 99.74%,瞬态应力值超出 $\pm 3\sigma$ 区间外的概率为 0.26%。其将振动的统计特性与工程设计的极限联系了起来,因此工程上通常基于 3σ 法则的设计理念来评估结构的疲劳强度是否满足工程需求。

2 风冷机箱轻量化设计

2.1 机箱组成

某典型铝合金风冷机箱结构主要由背板、加强板、顶板、底板、左侧板、右侧板、面板、托架、风机罩和锁紧器组成,其中锁紧器为标准件,其余结构均由铝合金加工而成,该机箱结构件(包含连接螺钉)总重量为 3 308 g,典型铝合金风冷机箱示意图如图3所示。

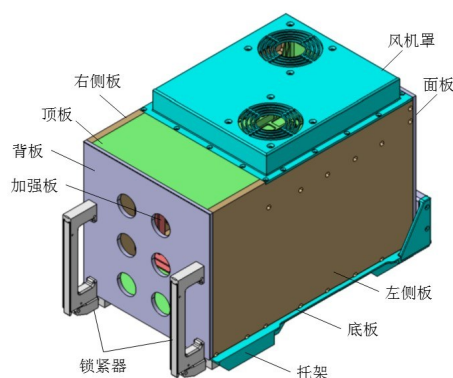


图3 典型铝合金风冷机箱示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a typical aluminum alloy Air-cooled chassis

对于电子设备而言,在设计过程中除了需要考虑其环境适应性,电磁兼容性也是电子设备设计的关键。碳纤维材料在成型设计过程中会存在一定的缺陷,导致导电网格不连续,导电率下降,影响设备的电磁兼容性,因此为保证机箱具有良好的电磁兼容性,对安装滤波器、连接器等器件需保证电磁屏蔽的区域仍使用铝合金结构。碳纤维材料拉伸强度为 1 158 MPa,具有良好的抗拉能力,但其剪切强度仅有 87 MPa,因此对于受剪切力影响的部位应提高该处结构的抗剪强度,在此基础上对机箱其余部分进行轻量化设计。

2.2 薄壁结构轻量化设计

对于非主要承力的结构件而言,为降低结构重量,一般将其设计为厚度较小的薄壁结构,如风机罩和前盖板等。由于该类薄壁结构的厚度较小,因此在轻量化设计过程中,可整体采用碳纤维层合板结构。为充分发挥碳纤维材料的高抗拉能力,可将结构部分区域可进行减薄处理,同时对于连接区域适当增加厚度,确保连接区域的强度。以风机罩和盖板两个典型薄壁结构为例,结构整体采用碳纤维层合板结构,其中中间非承力区域减厚度至1 mm,对外连接区域厚度为2 mm,有效提高连接区域强度的同时,实现了轻量化设计,其中碳纤维风机罩质量为157 g,碳纤维盖板质量为127 g,轻量化碳纤维风机罩结构示意图如图4所示。

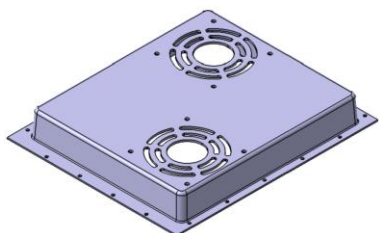


图4 轻量化碳纤维风机罩结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the structure of a lightweight carbon fiber fan hood

2.3 非薄壁结构轻量化设计

为满足机架整体的装配和连接关系,部分结构无法设计为薄壁结构,采用整体层合板的设计思路会极大地增加结构重量,因此在轻量化设计过程中,在确保整体强度的同时应采取合理地设计方式减少结构重量。为减少各结构件之间的连接关系,提高碳纤维结构的可制造性,可以将多个零件设计为一个整体,减少各个结构之间的螺钉连接,例如原金属左侧板、右侧板、底板和顶板设计为整体结构,托架侧板和底板设计为整体结构。

为实现该类非薄壁结构的轻量化设计,可采用碳纤维蒙皮泡沫共固化的型式,对结构的主要承力区域采用碳纤维蒙皮,其余部分通过填充泡沫的型式实现轻量化设计。例如将碳纤维机箱主体设计为碳纤维蒙皮泡沫夹层结构,蒙皮整体采用0.8 mm后的碳纤维,连接处增厚至1.2 mm,在保证整体强度的同时,极大地减轻了结构重量,机

箱主体内填泡沫示意图如图5所示。

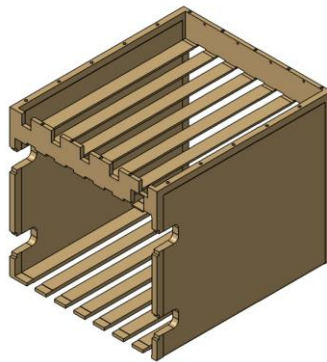


图5 机箱主体内填泡沫结构示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the foam structure filled in the main body of the chassis

碳纤维复合材料具有良好的抗拉能力,但其抗剪切能力较差,因此对承受剪切力的部位可采用金属预埋件的型式,例如在螺纹孔和导向销座处预埋金属件,然后根据装配关系在金属件上开孔,有效提高了结构强度和连接可靠性。

在机箱使用过程中,由于调试、维修等使用因素,需要经常拆装机架和内装结构,因此导致结构的表面会产生一定的磨损,进而破坏了碳纤维的整体强度。为提高接触面的耐磨性,可采用在接触表面粘接耐磨材料的型式,如机架主体导轨接触面等处粘接0.05 mm 不锈钢表层,托架表面粘接聚四氟乙烯板,最终设计得到的碳纤维机箱主体和碳纤维托架结构示意图如图6和图7所示,其中碳纤维机箱主体总质量为885 g,碳纤维托架总质量为534 g。

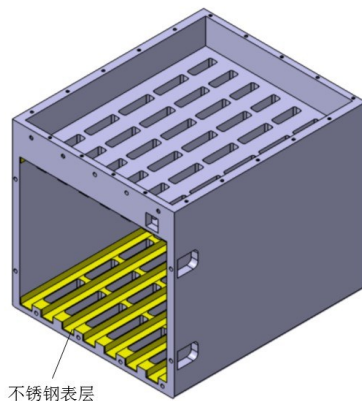


图6 碳纤维机箱主体结构示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the main structure of the carbon fiber chassis

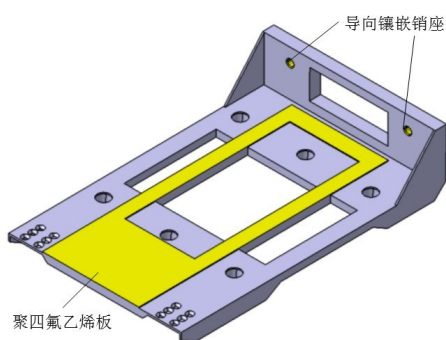


图7 碳纤维托架结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the carbon fiber bracket structure

2.4 质量对比分析

为实现风冷机箱结构的轻量化设计,将碳纤维复合材料应用到典型铝合金风冷机箱,并针对薄壁结构和非薄壁结构开展结构轻量化设计,最终设计得到的轻量化碳纤维机箱示意图如图8所示,与铝合金机箱质量对比表如表1所示。

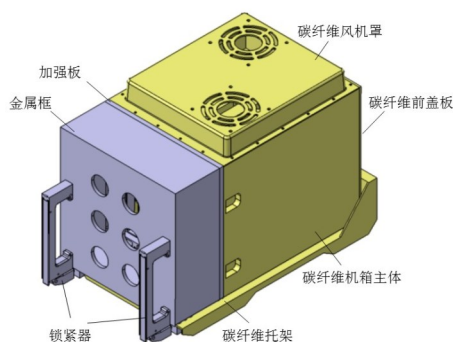


图8 碳纤维机架结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the carbon fiber frame structure

表1 质量对比表

Table 1 Weight comparison table

质量	铝合金机箱	轻量化机箱
铝合金结构/g	3 004	450
碳纤维结构/g	0	1 703
其余结构/g	304	304
合计/g	3 308	2 457

从表1可以看出:轻量化机箱结构总质量为2 457 g,其中碳纤维结构质量为1 703 g,铝合金结构质量为450 g,把手、螺钉等其余结构质量为304 g,相比于典型铝合金机箱结构共减重851 g,减重约25.7%。

3 仿真分析及试验验证

3.1 仿真分析

为验证碳纤维机架设计方案的可行性,对机架结构进行适当简化,如去掉倒角这类细节特征,以利于有限元模型建模部分的工作。

对于机架中的铝合金构件,将其视为刚体,仅用来模拟其与碳纤结构之间的连接关系。同时将机架的内装产品如模块、风机、滤波器等构件简化为质量点,确保仿真模型与实际产品的载荷要求一致。

为模拟实际装机工况,托架与飞机连接区域采用固定约束,机箱锁紧器及导销与托架之间连接则采用接触约束,如图9所示。最终在给定振动、冲击和加速度载荷工况基础上开展仿真分析,仿真结果如表2所示,随机振动载荷作用下最大响应仿真云图如图10所示。

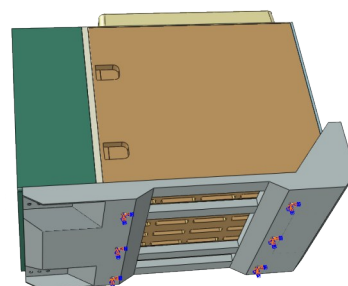


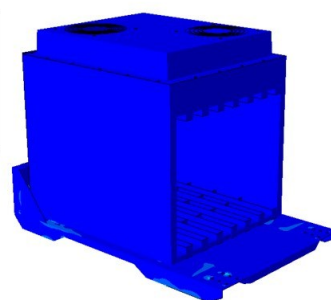
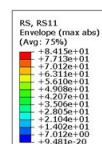
图9 边界条件示意图

Fig. 9 Schematic diagram of boundary conditions

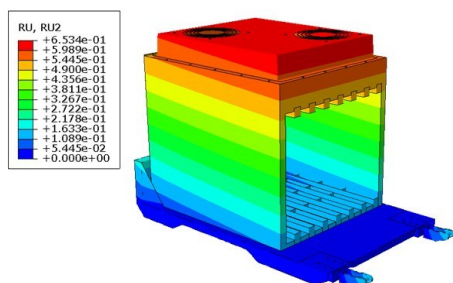
表2 仿真结果汇总表

Table 2 Summary table of simulation results

方向		航向	侧向	垂向
随机振动载荷	最大主应力/MPa	62.61	84.15	64.38
	位移/mm	0.47	0.65	0.42
冲击载荷	TASIA值	0.50	0.67	0.49
	位移/mm	1.88	3.03	1.48
加速度载荷	TASIA值	0.08	0.16	0.14
	位移/mm	0.31	0.72	0.72



(a) 最大主应力云图



(b) 位移云图

图 10 随机振动载荷作用下侧向响应云图

Fig. 10 Lateral response contour under random vibration load

从表 2 可以看出:在随机振动载荷作用下,结构最大位移为 0.65 mm,最大主应力为 84.15 MPa,考虑 3σ 法则下最大应力为 252.45 MPa,远小于碳纤维材料的许用应力 1 046 MPa。在冲击载荷和加速度载荷作用下,最大变形为 1.88 mm,最大 TSAIW^[20] 值为 0.67,安全系数为 1.49。因此碳纤维机架在给定随机振动、冲击和加速度载荷工况下满足强度和刚度要求,结构设计合理可行。

3.2 试验验证

为进一步验证轻量化机箱是否满足强度要求,对装配完成的碳纤维风冷机箱开展随机振动、冲击和加速度试验,如图 11 所示。

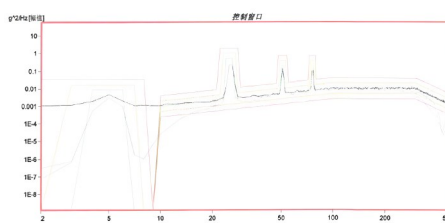


图 11 侧向安装图

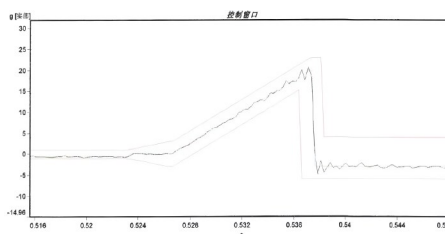
Fig. 11 Sideways installation drawing

根据 GJB 150A^[21] 相关规定进行试验,试验成功判据为:试验过程中无结构破坏、异常响声;试验后产品结构无机械损伤、所有安装连接无松动;产品通电后功能性能检测正常。为确保输入载荷与试验载荷一致,分别在试验台、托架、机架顶部粘贴传感器,试验过程中 Y 向(侧向)的试验载荷

和冲击载荷误差较大,其中 Y 向随机振动试验控制点载荷为 2.05 g,试验载荷为 2.01 g;冲击试验控制点载荷为 20.68 g,试验载荷为 20.00 g,最大误差百分比为 3.4%,如图 12 所示,但控制点载荷均大于试验载荷,试验误差满足试验标准要求。试验过程中状态监控无异常;试验后对机箱进行外观检查 and 功能检测,结果均符合上述成功判据。



(a) Y 向随机振动加载曲线



(b) Y 向冲击加载曲线

图 12 试验控制加载曲线

Fig. 12 Experimental control loading curve

4 结 论

1) 针对薄壁与非薄壁两种典型结构形式,以某型风冷机箱为例,通过差异化设计策略将薄壁结构设计为变厚度层合板、非薄壁结构设计为蒙皮-泡沫共固化结构,完成了轻量化碳纤维机箱设计。经仿真分析与试验验证,该机箱静动强度、刚度均满足要求。

2) 通过混合结构设计将关键电磁屏蔽区域保留铝合金、连接处预埋金属件、滑动面粘接不锈钢/聚四氟乙烯耐磨层等,减重同时有效解决了碳纤维的电磁兼容性差与耐磨性不足的问题。

3) 在保证强度刚度与性能的前提下,轻量化机箱结构相比原铝合金机箱实现减重 851g,减重比例约 25.7%。

参 考 文 献

- [1] 唐绍锋, 吴晗玲, 万舒晨. 《美国航空航天局航天技术路线图与优先发展技术》分析: 以材料、结构、机械系统与制造

- 领域为例[J]. 中国航天, 2022(5): 40-46.
- TANG Shaofeng, WU Hanling, WAN Shuchen. Analysis of NASA space technology roadmaps and priorities: Take the materials, structures, mechanical systems, and manufacturing fields for example[J]. Aerospace China, 2022(5): 40-46. (in Chinese)
- [2] 郭建平, 李振东, 张杰. 机载电子设备结构强度仿真与校核[J]. 技术与市场, 2023, 30(2): 101-104.
- GUO Jianping, LI Zhendong, ZHANG Jie. Simulation and verification of structural strength of airborne electronic equipment[J]. Technology and Market, 2023, 30(2): 101-104. (in Chinese)
- [3] 贾光南. 某机载电子设备减重设计及仿真分析[J]. 舰船电子对抗, 2019, 42(3): 95-98, 103.
- JIA Guangnan. Weight reduction design and emulation analysis of a certain airborne electronic equipment[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2019, 42(3): 95-98, 103. (in Chinese)
- [4] PRASAD P, RAMKUMAR R V, CHANDRAKUMAR J, et al. Design and development of mission avionics racks for airborne surveillance platforms[C]// 2025 IEEE Space, Aerospace and Defence Conference. Bangalore: IEEE, 2025: 1-6.
- [5] 蒋尚, 张利清, 卢阳. 一种电子机箱的结构设计研究[J]. 电子机械工程, 2016, 32(3): 15-18, 22.
- JIANG Shang, ZHANG Liqing, LU Yang. The structural design of an electronic chassis[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2016, 32(3): 15-18, 22. (in Chinese)
- [6] 王博, 郝鹏, 田阔, 等. 航空航天结构轻量化设计与实验方法研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 596-606.
- WANG Bo, HAO Peng, TIAN Kuo, et al. Advances in lightweight design and experimental methods for aerospace structures[J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(4): 596-606. (in Chinese)
- [7] 周海亮. 机载电子设备轻量化设计[J]. 科学技术创新, 2020(4): 159-160.
- ZHOU Hailiang. Lightweight design of airborne electronic equipment [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(4): 159-160. (in Chinese)
- [8] 郑学搏. 飞机结构中碳纤维复合材料的应用研究[J]. 中国设备工程, 2023(7): 92-94.
- ZHENG Xuebo. Study on application of carbon fiber composites in aircraft structure [J]. China Plant Engineering, 2023(7): 92-94. (in Chinese)
- [9] 杨龙, 刘冰野. 碳纤维在机载电子设备结构中的应用[J]. 航空计算技术, 2018, 48(5): 154-155, 159.
- YANG Long, LIU Bingye. Application of carbon fiber in airborne electronic equipment [J]. Aeronautical Computing Technique, 2018, 48(5): 154-155, 159. (in Chinese)
- [10] ZHAO K L, JIA Y F. Study on equivalent modeling technology of helicopter complex skin structure [C]// 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference. Chongqing: IEEE, 2018: 264-268.
- [11] AHMAD M A, ALI SHAH S I, ALI SHAMS T, et al. Design and structural analysis of composite strut for a lightweight aircraft [C]// 2021 International Conference on Applied and Engineering Mathematics. Taxila: IEEE, 2021: 19-24.
- [12] 郭晓君, 宋桂珍, 扶肖肖, 等. 某机载构件的轻量化设计与研究[J]. 机械设计与制造, 2021(11): 237-241.
- GUO Xiaojun, SONG Guizhen, FU Xiaoxiao, et al. Lightweight design and research of an airborne component [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(11): 237-241. (in Chinese)
- [13] WANG H H, ZHANG L J, XIA P, et al. Integrated structure design and analysis of a carbon fiber cabinet for airborne radar [C]// 2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering. Changsha: IEEE, 2020: 2410-2417.
- [14] 张翼, 王恒海, 黄春江. 某碳纤维机载电子机架设计及仿真分析[J]. 电子机械工程, 2020, 36(1): 6-9.
- ZHANG Yi, WANG Henghai, HUANG Chunjiang. Design and simulation analysis of an airborne electronic CFPR frame [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2020, 36(1): 6-9. (in Chinese)
- [15] AGLIETTI G S. A lighter enclosure for electronics for space applications[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2002, 216(3): 131-142.
- [16] FEI C W, LI C, LIN J Y, et al. Structural design of aeroengine radiators: State of the art and perspectives[J]. Propulsion and Power Research, 2024, 13(3): 319-334.
- [17] 吴敬凯, 向华平, 闫鹏飞. 机载设备安装架随机振动疲劳分析与结构优化[J]. 电子机械工程, 2023, 39(2): 23-26, 31.
- WU Jingkai, XIANG Huaping, YAN Pengfei. Random vibration fatigue analysis and structure optimization of airborne equipment mounting frame [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2023, 39(2): 23-26, 31. (in Chinese)
- [18] 姚起杭, 姚军. 工程结构的振动疲劳问题[J]. 应用力学学报, 2006, 23(1): 12-15, 167-168.
- YAO Qihang, YAO Jun. Vibration fatigue in engineering structures [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(1): 12-15, 167-168. (in Chinese)
- [19] Preventing thermal cycling and vibration failures in electronic equipment [book review [J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 2005, 21(4): 35.
- [20] TSAI S W, WU E M. A general theory of strength for anisotropic materials [J]. Journal of Composite Materials, 1971, 5(1): 58-80.
- [21] 中央军委装备发展部. 军用装备实验室环境试验方法: GJB 150A[S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2009.
- Equipment Development Department. Laboratory environmental test methods for military materiel: GJB 150A [S]. Beijing: Equipment Development Department, 2009. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)