# 某复合材料发射筒模具的吊具力学分析及优化设计

王树宏[1,2],潘 韵[1,2],史耀辉[1,2],沈 峰[1,2],李 川[1,2],孙友刚[3,4]

(1.上海复合材料科技有限公司,上海 201112;2.上海航天树脂基复合材料工程技术中心,上海 201112;3.同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804;4.同济大学 国家磁浮交通工程技术研究中心,上海 201804)

**摘 要**:复合材料发射筒向大尺寸方向发展,其成型模具的长度和质量随之增加,导致吊具设计难度显著提高。吊具的承载能力关系吊装作业的安全,需要进行严格校核。以某发射筒模具的吊具设计为研究对象,基于实际吊装过程结合影响吊具的因素初步开展吊具设计,对吊具进行受力分析,发现吊具受到轴向力,故不仅需要考虑刚度、强度,同时需要考虑稳定性。建立有限元分析模型,系统性地开展了刚度、强度和稳定性计算。综合分析吊具的变形特征、应力分布以及屈曲形式可知,吊具的强度和稳定性不满足要求,刚度基本接近要求值。仿真结果表明,吊具纵向刚度相对较低,同时吊耳受到的力没能有效传递至约束端。结合起吊过程受力情况进行结构优化,优化后的吊具最大变形量由 26.110 0 mm 减小至 15.830 0 mm,降低 39.4%,满足刚度要求;最大应力由 195.200 MPa 减小至 149.000 MPa,降低 23.7%,满足强度要求;屈曲系数由 1.19 增加至 4.19,提高了 252.1%,满足稳定性要求,优化后的吊具综合承载能力得到全面提升。

**关键词**:发射筒;大型吊具;力学分析;稳定性;结构优化

**中图分类号**:TH21 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0167-06

**DOI**:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.029

## Mechanical Analysis and Optimization Design of Spreader for a Composite Launch Cylinder Mold

WANG Shuhong[1,2], PAN Yun[1,2], SHI Yaohui[1,2], SHEN Feng[1,2], LI Chuan[1,2], SUN Yougang[3,4]

(1. Shanghai Composites Technology Co. , Ltd. , Shanghai 201112, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Aerospace Resin Based Composite, Shanghai 201112, China; 3. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. National Maglev Transportation Engineering R&D Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract**: As composite launch cylinder have progressed toward larger size, the length and mass of their forming molds have correspondingly increased, which has significantly raised the design difficulty of the spreader. The load-bearing capacity of the spreader is critical to the safety of lifting operations and therefore requires rigorous verification. Taking the spreader design for a launch cylinder mold as the research object, an initial spreader design was carried out based on the actual lifting process and the influencing factors. A mechanical analysis of the spreader was then conducted, revealing that the spreader was subjected to axial forces. Consequently, both stiffness and strength, as well as stability, needed to be considered. A finite element analysis model was established, and systematic calculations of stiffness, strength, and stability were performed. Comprehensive analysis of the deformation characteristics, stress distribution, and buckling modes showed that the strength and stability of the spreader did not meet the requirements, while the stiffness was close to the required value. The simulation results indicated that the longitudinal stiffness of the spreader was relatively low, and the forces on the lifting lugs were not effectively transmitted to the constraint ends. Based on the stress analysis during the lifting process, a structural optimization was carried out. After optimization, the maximum deformation of the spreader was reduced from 26.110 0 mm to 15.830 0 mm, with a decrease of 39.4%, meeting the stiffness requirements. The maximum stress was reduced from 195.200 MPa to 149.000 MPa, with a decrease of 23.7%, meeting the strength

收稿日期 Submitted date 2025-08-25;修回日期 Revised date 2025-09-13;录用日期 Accepted date 2025-10-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3701603)

联系人,wangshuhong202012@163.com

引用本文:王树宏,潘韵,史耀辉,等.某复合材料发射筒模具的吊具力学分析及优化设计[J].塑料科技,2026,54(8):167-172.

Citation:WANG S H, PAN Y, SHI Y H, et al. Mechanical analysis and optimization design of spreader for a composite launch cylinder mold [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 167-172.

requirements. The buckling coefficient was increased from 1.19 to 4.19, with an increase of 252.1%, meeting the stability requirements. The optimized spreader thus achieved a comprehensive improvement in its load-bearing capacity.

**Keywords**: Launch cylinder; Large-scale spreader; Mechanical analysis; Stability; Structural optimization

随着导弹技术向更远射程、更高精度和更强突防能力的方向发展，发射筒体长度持续增加，以适应更大尺寸推进段和更复杂制导系统的需求[1-5]。筒体长度已从早期的2 m级逐步提升至5 m级，目前已达8 m级，模具长度与质量随之增大[6-9]，因此保证发射筒体模具吊装安全已成为亟待解决的重要工程问题[10-12]。国内外研究人员已对大型吊具设计[13-18]及优化[19-23]开展大量研究。孙远韬等[24]针对跨海大桥建设中大型桥梁构件的起吊问题，结合海上运架梁用2 500 t起重船吊具设计，以吊具主梁构件质量为优化目标进行截面优化设计，有效减轻了结构质量。柳胜举等[25]以某MW级风电机组主机吊装为对象，采用ANSYS软件建立有限元模型，对吊具强度进行计算，基于应力分布和变形结果分析吊具受力情况，优化主机吊具结构。

上述研究主要关注大型吊具在受载状态下的刚度和强度，但未对其刚度、强度与稳定性进行协同分析。本文以某发射筒模具吊具为研究对象，基于实际吊装过程建立有限元分析模型。设计时不仅校核结构的刚度和强度，还重点考察其稳定性。本文系统分析了吊具的变形特征、应力分布及屈曲形式，并结合起吊过程的力学特性对结构进行优化设计。该优化思路与方法可为同类大型吊具的设计提供参考。

## 1 吊具结构设计

影响吊具结构设计的因素很多[26-29]，主要包括以下3点。

第一，吊装方案。在生产中，本吊具用于起吊大型圆筒体模具(长度约为8.4 m)。图1为发射筒体模具天线罩结构。圆筒体模具用于缠绕复材壳体，起吊时将吊机吊钩与吊耳通过吊带和卸扣相连，吊具吊孔与筒体模具延长轴通过吊带连接。

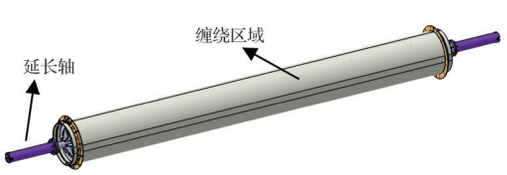



图1 发射筒体模具天线罩结构

Fig.1 Antenna cover structure of launch cylinder mold

起吊过程为：第一步需要将圆筒模具利用吊具起吊至缠绕机，等复材壳体缠绕好后，再起吊至热压罐固化平台。图2为发射筒体模具受力分析。从图2可以看出，如果不用吊具起吊，直接将吊钩和筒体模具延长轴通过吊带相连，吊带会受到拉力，吊带拉力($F_t$)可分解为水平力($F_{tx}$)和竖直力($F_{ty}$)，$F_{ty}$由圆筒体模具重力($G$)平衡，而$F_{tx}$则转化为模具的轴向压力。这种轴向压力会显著增加圆筒体模具设计复杂度，并导致制造成本上升，而通过吊具进行转接后，可以消除或减少筒体模具承受的轴向压力。

第二，圆筒体模具吊点的分布方式。由于圆筒体模具用于缠绕，在其缠绕区域不能布置吊点，所以吊点只能布置于非缠绕区，一般布置于筒体模具延长轴端。

第三，筒体模具和产品质量。即吊具所承受的载荷。

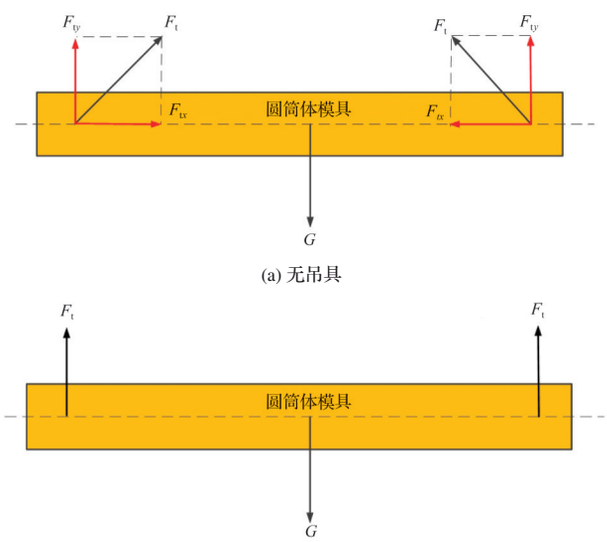



图2 发射筒体模具受力分析

Fig.2 Force analysis of launch cylinder mold

综合考虑以上3个因素，设计吊具结构，如图3所示。其结构为腹板加筋形式，截面为工字形，材质为Q345B，腹板厚为15 mm，上、下翼缘宽度均为120 mm，厚度为11 m，吊耳间距为3 200 mm，下端起吊孔间距为8 440 mm。保证圆筒体模具只受重力，不受轴向力。

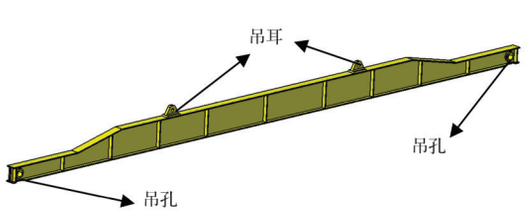



图3 吊具结构

Fig.3 Structure of spreader

## 2 吊具力学分析

吊具起吊模具和产品(以下统称重物)共7 t，吊具重0.53 t，吊耳通过吊带、卸扣与吊机吊钩连接，吊带与吊具的水平夹角约为42°。图4为吊具的受力分析。重物受重力时，上端两根吊带会受到拉力，将沿吊带拉力的分解

为$F_{tx}$和$F_{ty}$，$F_{ty}$和载荷重力以及吊具重力相平衡。$F_{tx}$体现至吊具上为轴向受压，故吊具力学分析时不仅需要考虑刚度、强度，同时需要考虑稳定性。

$$F_{ty}=\frac{G_{物}+G_{吊}}{2}=\frac{(7.00+0.53)\times 9\,800}{2}=36\,897\ \text{N} \quad (1)$$

$$F_{tx}=\frac{F_{ty}}{\tan 42°}=41\,008.91\ \text{N} \quad (2)$$

式(1)~式(2)中：$F_{ty}$为吊带分解至竖直方向力，N；$F_{tx}$为吊带分解至水平方向力，N；$G_{物}$为重物重力，N；$G_{吊}$为吊具重力，N。

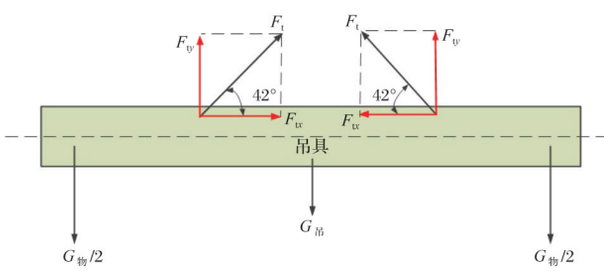



图4 吊具的受力分析

Fig.4 Force analysis of spreader

参考QJ 2472.1—1993[30]中4.2功能及性能，本吊具级别为III级。表1为吊具性能指标。

表1 吊具性能指标

Tab.1 Performance indicators of spreader

| 级别 | 整个吊具安全系数 | 屈曲系数($N_{临}/N_{压}$) | 挠度/mm |
|---|---|---|---|
| I | ≥3.0 | 5.0 | $L$/1 000 |
| II | ≥2.5 | 4.0 | $L$/600 |
| III | ≥2.0 | 3.5 | $L$/300 |

注：$N_{临}/N_{压}$表示屈曲临界载荷与工作载荷的比值；$L$表示吊具下端吊孔之间的跨度。

## 2.1 有限元模型

针对所起吊的超长尺寸、大吨位模具吊装工况，为确保吊具结构刚度、强度以及稳定性分析的准确性，对吊具采用三维实体建立有限元模型，选用六面体高阶实体单元。图5为吊具有限元模型。



图5 吊具有限元模型

Fig.5 Finite element model of spreader

## 2.2 材料参数

吊具采用Q345B钢，表2为Q345B钢材料性能参数。

## 2.3 载荷边界

为了在有限元模型中准确模拟吊具的实际受力平衡状态，应将吊孔位置设置为约束边界条件，并将吊耳作为载荷施加区域。同时，将卸扣简化为销轴连接，以便更精确模拟卸扣与吊耳、吊孔之间的关系，从而更真实地反映工况的力学特性。

表2 Q345B钢材料性能参数

Tab.2 Performance parameters of Q345B steel material

| 密度/(kg·m$^{-3}$) | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 屈服应力/MPa |
|---|---|---|---|
| 7.85×10$^3$ | 210 | 0.3 | 345 |

载荷施加方案具体为：在吊耳销轴两侧中心各设置一个集中力加载点，用于等效模拟吊带经由卸扣传递的拉力作用。根据受力分析，每个加载点施加的竖直方向力为$F_{ty}/2$=18 448.5 N，水平方向力为$F_{tx}/2$=20 504.455 N。边界约束条件设置为：底部一个吊孔的销轴轴线施加位移全约束($X$、$Y$、$Z$轴方向上的平动位移$U_1$、$U_2$、$U_3$均为0)，另一个吊孔的销轴轴线约束$U_1$和$U_3$。图6为吊具约束和加载情况。

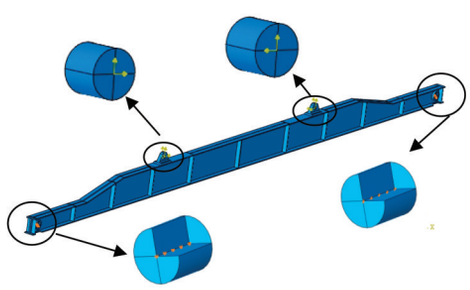


图6 吊具约束和加载情况

Fig.6 Constraints and loading conditions of spreader

## 2.4 结果分析

### 2.4.1 刚度分析

按上述的加载方法及载荷大小，对吊具的刚度进行有限元分析。图7为吊具变形云图。从图7可以看出，吊具变形形式为整体向上拱形，最大变形位置在吊具拱高处，最大值为26.110 0 mm。吊具下端吊孔间距8 440 mm，按表1中III级吊具挠度应不超过8 440/300=28.13 mm。由此可知，吊具的刚度虽满足要求，但变形与要求值也较接近，可进一步优化。

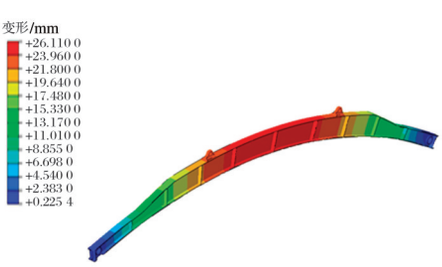



图7 吊具变形云图

Fig.7 Deformation cloud diagram of spreader

### 2.4.2 强度分析

按上述的加载方法及载荷大小，对吊具的强度进行有限元分析。图8为吊具应力分布云图。从图8可以看出，

吊具最大应力为195.200 MPa，安全系数为1.77，不满足表1中整个吊具安全系数要求。

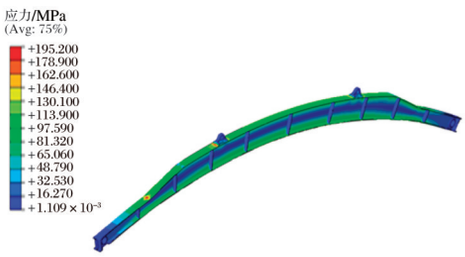



图8 吊具应力分布云图

Fig.8 Stress distribution cloud diagram of spreader

表1中III级吊具整个吊具安全系数≥2，则吊具的许用应力为345 MPa/2=172.5 MPa。为了更清晰地显示出吊具超出许用应力的位置，将应力分布云图下方彩色条的最大值设为172.500 MPa，则超出许用应力的位置显示为灰色。图9为吊具许用应力分析。从图9可以看出，吊耳根部和上翼缘折角过渡处均大于许用应力(图中圆圈标识)，不满足强度要求，故需要进行优化。

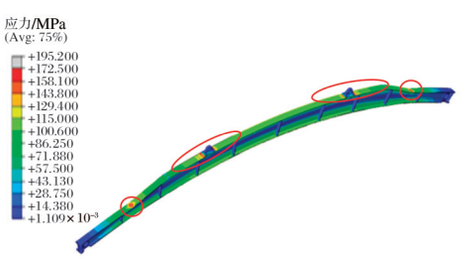



图9 吊具许用应力分析

Fig.9 Allowable stress analysis of spreader

2.4.3 稳定性分析

按上述加载方法及载荷大小对吊具的稳定性进行有限元分析。表3为吊具前3阶屈曲系数。其中，正号表示与施加载荷方向一致，负号表示与施加载荷方向相反。从表3可以看出，第1阶屈曲系数为负值，实际不会出现与负载相反情况；第2阶相较于第3阶屈曲系数更小，意味着承载能力更弱，优先发生屈曲，故只考虑第2阶屈曲系数。

表3 吊具前3阶屈曲系数

Tab.3 The first three order buckling coefficients of spreader

| 阶数 | 屈曲系数 |
|---|---|
| 1 | -0.79 |
| 2 | +1.19 |
| 3 | +2.39 |

图10为吊具的第2阶屈曲变形云图。从图10可以看出，吊具第2阶屈曲形式为整体在两吊点处发生扭转，屈曲系数为1.19，小于表1中屈曲系数3.5，不满足稳定性要求，故需要优化。综合以上分析结果，吊具的强度和稳定性不满足要求，刚度也基本接近要求值，故需对此吊具进行优化设计。

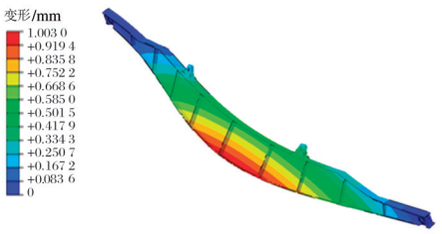



图10 吊具的第2阶屈曲变形云图

Fig.10 Cloud diagram of the second order buckling deformation of spreader

## 3 吊具结构优化设计

通过吊具变形云图分析可知，吊具在受重力载荷情况下，发生弯曲变形。同时，结合吊具屈曲变形云图，由于吊具纵向长度较长，达到8 700 mm，因此吊具在纵向长度上刚度相对较低，在受到轴向载荷时，会发生侧向扭转。另外，吊具上翼缘折角处和吊耳根部有较大的应力，除了应力集中的影响，也表明吊耳的受力未能有效传递至下端吊孔。

基于上述吊具的受力分析，可以采用以下优化方案：(1)为了提高抗弯刚度，增加吊具高度，以减小吊具的弯曲变形。(2)上、下翼缘均加宽，设计为“上窄下宽”结构形式，以提高整体稳定性，增加吊具的承载能力。(3)在吊耳下方的腹板增加加强筋板，保证吊耳的力能有效传递至吊孔，以降低吊耳根部应力。(4)上翼缘取消折角形式，从吊孔至吊耳直接设计为斜面形式，以减小应力集中。

另外，通过吊具的应力分布云图可知，腹板和下翼缘的应力较小，根据工程经验，对于应力低于许用应力的50%的区域(即86.250 MPa)可进行优化设计。为了更清晰地显示吊具低应力区域，将应力分布云图下方彩色条的最大值设置为86.250 MPa，则低于此值的位置显示为黑色。图11为低应力区域云图。对于低应力区域，可适当减小壁厚以及设置减重孔，以降低之前优化带来的质量增加。




图11 低应力区域云图

Fig.11 Cloud diagram of low stress area

表4为优化前后吊具的尺寸和质量对比，图12为优化后的吊具三维模型。

表4 优化前后吊具的尺寸和质量对比

Tab.4 Comparison of size and quality of spreader before and after optimization

| 项目 | 整体高/mm | 腹板厚/mm | 上翼缘宽/mm | 上翼缘厚/mm | 下翼缘宽/mm | 下翼缘厚/mm | 质量/kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 优化前 | 372 | 15 | 120 | 11 | 120 | 11 | 524.4 |
| 优化后 | 390 | 8 | 190 | 10 | 280 | 10 | 551.4 |

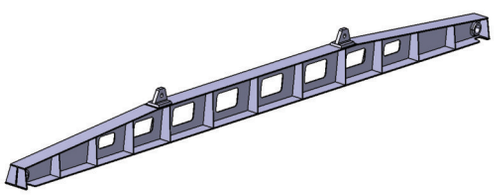


图12 优化后的吊具三维模型

Fig.12 3D model of optimized spreader

按照上述加载方法及载荷大小对优化后的吊具进行力学分析。图13为优化后吊具的变形云图。从图13可以看出,吊具的最大变形由优化前的26.110 0 mm减小至优化后的15.830 0 mm,最大变形降低39.4%。同时,优化后的变形满足表1中的挠度要求。




图13 优化后吊具的变形云图

Fig.13 Deformation cloud diagram of optimized spreader

图14为优化后吊具的应力云图。从图14可以看出,吊具的最大应力由优化前的195.200 MPa减小至优化后的149.000 MPa,最大应力降低23.7%,优化后的安全系数为2.3,满足表1中的安全系数要求。

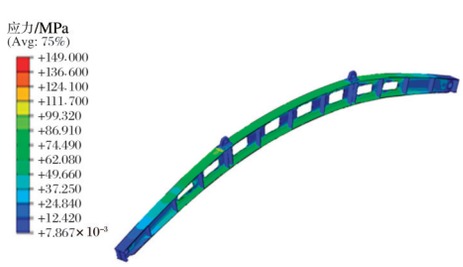



图14 优化后吊具的应力云图

Fig.14 Stress cloud diagram of optimized spreader

图15为优化后吊具的第3阶屈曲变形云图,表5为优化后吊具的前3阶屈曲系数。从图15和表5可以看出,吊具的屈曲系数由优化前的1.19增加至优化后的4.19,屈曲系数提高252.1%,承载能力大幅提高,同时优化后的屈曲系数满足表1中的稳定性要求。

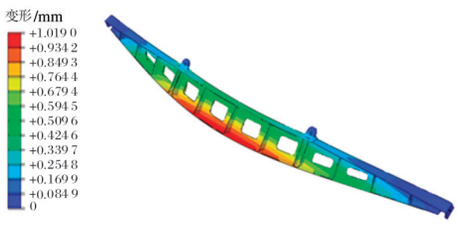



图15 优化后吊具的第3阶屈曲变形云图

Fig.15 Cloud diagram of the third order buckling deformation of optimized spreader

表5 优化后吊具的前3阶屈曲系数

Tab.5 The first three order buckling coefficients of optimized spreader

| 阶数 | 屈曲系数 |
|---|---|
| 1 | -1.13 |
| 2 | -3.86 |
| 3 | +4.19 |

## 4 结论

基于吊具的实际吊装过程,采用有限元仿真软件对吊具进行系统性分析。根据有限元分析计算结果,对弱刚度、高应力区进行加强,而低应力区采用减薄处理并设置减重孔。通过结构优化,吊具的最大变形、应力明显减小。最大变形由优化前的26.110 0 mm减小至优化后的15.830 0 mm,最大变形降低39.4%,满足刚度要求;吊具的最大应力由优化前的195.200 MPa减小至优化后的149.000 MPa,最大应力降低23.7%,满足强度要求。吊具的屈曲系数由优化前的1.19增加至优化后的4.19,屈曲系数提高252.1%,承载能力大幅提高,满足稳定性要求。目前,该吊具已成功应用于实际生产的模具吊装,使用过程中未出现任何结构性损伤(包括断裂、塑性变形及失稳等现象),表明优化后的吊具具有良好的承载能力。本次优化设计方法和优化思路可为同类大型吊具的设计提供重要参考。

## 参考文献

[1] MARTINS L A L, BASTIAN F L, NETTO T A. Reviewing some design issues for filament wound composite tubes[J]. Materials & Design, 2014, 55: 242-249.

[2] LOPATIN A V, MOROZOV E V. Buckling of the composite sandwich cylindrical shell with clamped ends under uniform external pressure[J]. Composite Structures, 2015, 122: 209-216.

[3] 李永康, 赵亚鹏, 李苗. 复合材料发射筒筒体发射力学特性仿真分析与优化[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(2): 180-184.
[4] 杨志维, 张焯轩, 王小春, 等. 基于复合材料铺层方式差异的导弹发射筒结构损伤失效数值仿真[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(5): 1920-1926.
[5] 王业成, 王馨锐, 王晓宏, 等. 干法缠绕用碳纤维复合材料耐压支撑管铺层优化设计[J]. 塑料科技, 2024, 52(6): 56-60.
[6] 王琪. 某动能破门弹复合材料发射筒的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
[7] 王爱阳, 贾铁钢. 薄壁塑件模具设计及其注塑工艺[J]. 塑料科技, 2019, 47(5): 72-76.
[8] 安庆升, 孙立东, 武秋生. 碳纤维增强复合材料发射筒设计研究[J]. 空天防御, 2021, 4(2): 13-19.
[9] 刘争利. 某发射筒工装动态特性分析及其结构优化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
[10] 张磊, 寇若洋, 董磊, 等. 一种含异形结构的汽车合装吊具设计与优化[J]. 机械设计, 2023, 40(8): 135-142.
[11] 黄金昌, 缑依锟, 王翔宇. 舰载机全机吊运研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2025, 57(2): 310-317.
[12] 成惠玲, 李孝敬. 基于Solidworks电子琴键斜销抽芯注塑模具的设计优化分析[J]. 塑料科技, 2021, 49(3): 73-76.
[13] YU F S. Research on evaluation method of unmanned reconnaissance equipment[J]. Academic Journal of Science and Technology, 2023, 5 (3): 96-99.
[14] 王泽, 王文红, 徐格宁, 等. 数据驱动下集装箱吊具结构疲劳寿命预测方法及系统[J]. 机床与液压, 2025, 53(12): 207-216.
[15] 逯彦红, 纪小坤, 刘丹丹, 等. 某型号涡旋压缩机机架拓扑优化与轻量化设计[J]. 机械设计, 2022, 39(4): 110-114.
[16] TANG L Y, LIU G T, GUO T, et al. Controller design and analysis of spacecraft automatic levelling and equalizing hoist device based on hanging point adjustment[J]. MATEC Web of Conferences, 2016, 77: 01015.
[17] 吴颖, 郭开波, 沈桓羽, 等. 基于Moldflow和ANSYS Workbench的塑料按键注塑成型优化分析[J]. 塑料科技, 2022, 50(9): 89-93.
[18] 孙悦楠, 黄利航, 阮家顺, 等. 深中通道锚碇上方大节段钢箱梁吊装卸船方案比选及吊具设计[J]. 桥梁建设, 2024, 54(1): 140-147.
[19] 丁卯, 耿达, 周明东, 等. 基于变密度法的结构强度拓扑优化策略[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(6): 764-773.
[20] XU T, WU H X, XUE F, et al. Structural design of stamping die of advanced high-strength steel part for automobile based on topology optimization with variable density method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(11): 8115-8125.
[21] 冯一波, 谢元云. 风力发电机组塔架吊装吊具的通用化分析[J]. 船舶工程, 2024, 46(增刊2): 126-131.
[22] KIM C, JI C, KOH G, et al. Review on flight control law technologies of fighter jets for flying qualities[J]. International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2023, 24(1): 209-236.
[23] 王志金, 张义, 田世宽, 等. 高空精调吊具的设计与应用研究[J]. 公路, 2023, 68(10): 49-56.
[24] 孙远韬, 徐长生. 大型桥梁构件的起重吊具结构优化建模及有限元计算[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(6): 778-780.
[25] 柳胜举, 赵春雨, 邹荔兵, 等. 基于ANSYS的风电机组主机吊具强度分析及优化设计[J]. 机械, 2021, 48(8): 59-64.
[26] 马跃峰, 于军, 雷世东. 单梁四吊索吊具各吊点受力均匀性影响因素研究[J]. 起重运输机械, 2017(8): 68-72.
[27] 王宴平. 集装箱摇摆分析与减摇吊具结构设计[J]. 机械设计, 2018, 35(7): 68-74.
[28] 邵健帅, 文明, 何冠杰. 基于四连杆机构的火箭水平吊具设计方法[J]. 起重运输机械, 2022(2): 28-31.
[29] 瓮松峰, 董正平. 核电厂核岛主设备专用吊具载荷分析及系数取值方法研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(4): 61-64.
[30] 中华人民共和国航空航天工业部. 吊具通用技术条件 梁式吊具: QJ 2472.1—1993[S]. 北京: 航空航天工业部第七〇八研究所, 1993.