

超静定储运装置仿真分析及结构优化

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1005

付应海¹ 唐文评²
石勇² 胡山¹
曹金舒¹

1. 南京高速齿轮制造有限公司
企业管理部
江苏 南京 211100
2. 湖南工业大学
包装与材料工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 基于 ANSYS Workbench 建立了重型装备与储运装置的三维模型、离散化模型、接触模型。以储存与起吊为典型工况, 计算了超静定储运装置的刚度和强度状态; 基于 Mises 屈服理论, 对储运装置的强度进行评估; 通过调整承载部位刚度, 优化了储运装置各承载部位力的分配, 提高了储运装置钢架节点受力合理性。研究表明, 有限元方法能够为超静定结构的储运装置提供设计和优化依据。

关键词: 超静定结构; 储运装置; 有限元方法; 离散化模型; 起吊; 屈服理论
中图分类号: TB486 **文献标志码:** A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0040-07

引文格式: 付应海, 唐文评, 石勇, 等. 超静定储运装置仿真分析及结构优化 [J]. 包装学报, 2025, 17(1): 40-46.

1 研究背景

随着“中国制造 2025”战略的实施, 中国装备制造业积极推进从规模制造向高质量制造转变、中低端制造向高端制造转变^[1]。重型装备体积大、质量大, 有些装备的质量达到几十吨甚至几百吨; 有些装备为异形结构的非标准件。为适应储运要求, 包装储运装置往往设计成形状不规则、边界条件和承载状态复杂的超静定结构。理论分析法适用于结构简单的包装储运装置分析, 能够快速计算起吊及运输过程中的承载状态。朱海明^[2]将重大件运输的惯性力矩和刚性系固力纳入海运系固校核体系中, 提出一套符合工程实际的重大件系固校核方法。秦皓^[3]参考各环境下的规范标准, 对不同运输环境下的加速度工况进行力学分析, 并校核包装储运装置。汪骥等^[4]通过对产品与包装整体进行倾覆力和惯性力的计算, 发现《海上拖航指南》忽略了垂荡运动对货物所受惯性力的影

响, 并改进了货物惯性力的计算方法。

结构复杂的产品一般存在多个支撑点, 相应的包装储运装置结构一般为超静定结构, 基于理论计算, 一般需要经过大量简化, 存在一定误差。随着监测技术的发展, 对敏感部位安装传感器, 监测敏感部位的应力、应变、加速度等数据, 将监测数据与理论计算结果进行对比分析, 并基于力学理论和设计经验对包装受力情况进行误差分析和包装方案评估, 再对包装结构进行优化改进, 能够弥补理论计算对包装精细化校核的能力。管朝元等^[5]将物联网技术应用到物流运输领域, 采集货物的加速度数据并进行处理, 得到了加速度静态和动态数据, 实现了包装物运输状态的实时监控, 可及时发现并解决包装物运输过程中的复杂情况, 收集的运输环境数据可作为包装设计依据。贺志等^[6]提出了采用运输环境采集设备监控家电产品物流运输过程的方法, 对运输环境进行追踪和采集, 为运输包装的设计和 optimization 提供可靠的数据支撑。

收稿日期: 2024-10-18

基金项目: 湖南省自然科学基金联合基金资助项目(2022JJ30223); 国家重点研发计划基金资助项目(2023YFC3904603); 湖南省高等学校教学改革研究基金资助项目(HNJG-2021-0123)

作者简介: 付应海, 男, 工程师, 主要从事重型装备的运输包装设计, E-mail: fuyinghai2008@163.com

通信作者: 唐文评, 男, 副教授, 主要从事运输包装和包装机械的研究, E-mail: 522187051@qq.com

陈坤^[7]通过试验方式,测试多种工况下大件货物运输时的绑扎受力和运动状态,得到加速度及捆扎力数据,为捆扎设计提供依据。传感器监测数据与理论计算互相校核可以形成较可靠的对比。大尺寸包装结构的某些局部结构仍有不确定性,监测系统通常可以获得基于经验选定的局部敏感部位,难以监测结构全域的受力、变形情况。

为了掌握包装结构的全场域安装信息,实现更深层次的精细化校核,提高结构的安全监控和结构求解分析效率,可以采用有限元方法解决包装超静定结构问题。有限元技术是一种工程分析方法,用于解决复杂结构的力学问题,既可在包装设计前对设计方案进行指导,也可在包装设计完成后对结构进行校核验证。黄雨促^[8]基于IMO《货物积载与系固安全操作规则》进行了刚性系固校核研究,利用ANSYS对刚性系固系统的系固索具和焊缝的应力和变形进行仿真分析,校核系固索具和焊缝的强度。王勇奎等^[9]运用ANSYS Workbench对预制舱进行了吊装工况下的仿真分析,得到预制舱底座变形云图和最大值,分析出不同起吊部位的变形规律,为起吊部位选取提供依据。滑广军等^[10]利用ANSYS对运输用钢架包装箱的起吊工况和堆码工况进行数值仿真,基于分析结果对经验设计方案进行了改进,得到的优化方案实现了减重43%的轻量化效果。通过仿真分析,可以快速实现包装结构的校核和分析,预测结构存在的隐患,减少结构设计中的不确定性,推动包装精细化建模设计,提高结构设计效率。

重型装备制造业的发展对包装制造业的高质量发展提出了更高的要求。本文以某重型风电减速箱

包装储运装置为主要研究对象,通过有限元方法对该超静定储运装置的储存工况和起吊工况进行分析,基于Mises屈服准则对包装进行强度校核,基于位移参数分析钢架的变形状态,并提出优化方案。

2 超静定储运装置结构特征及工况分析

2.1 结构特性

超静定结构具有多余的约束,当多余约束被破坏时,结构仍能继续承载,适用于重型装备包装储运装置的设计。超静定结构的全部内力和反力不能仅由平衡条件求出,必须考虑变形条件。其内力与材料的物理性能及结构几何特征或结构刚度有关,可以通过调整各构件刚度比值达到调整内力的目的。另外,温度变化、支座位移、材料收缩、制造误差等因素对超静定结构都会产生内力(自内力状态)。一般地,非荷载外因引起的内力与各杆的刚度绝对值成反比^[11]。理论计算方法通常用力法和位移法进行计算,对于复杂结构的计算较繁琐,采用数值方法进行较精确的计算需要将结构离散成精细的单元,计算量大,但是计算方式简单,其中的有限元法具有较好的计算可行性和可靠性^[12]。

2.2 典型工况

图1为某重型风电减速箱及包装储运装置。减速箱质量为210 t,图中①~⑩为主要支撑部位,产品和包装储运装置的接触部位序号一一对应,其中①和②材料为木材,其余材料为Q235钢,①~②、③~⑥、⑦~⑩分别处于同一高度。产品与储运装置状态及约束状态如表1所示。

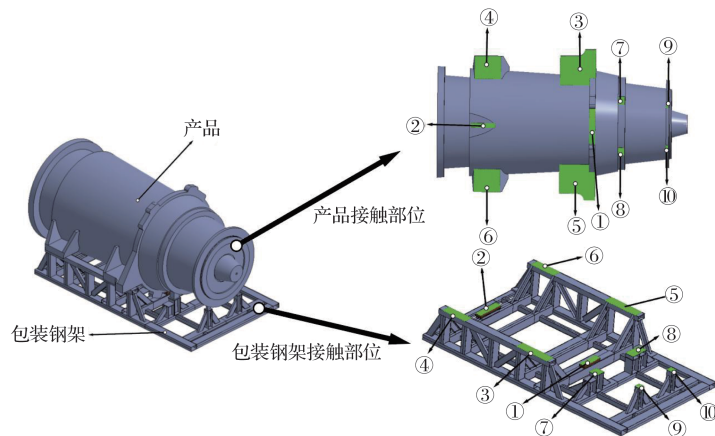


图1 产品与储运装置接触部位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contact area between product and storage and transportation device

表 1 产品与储运装置仿真工况边界条件和接触状态
Table 1 Boundary conditions and contact states of simulated operating conditions for products and storage and transportation device

工况	载荷	约束条件	产品与包装间的接触关系
储存工况	标准重力	底部固定	③~⑥为绑定接触,
起吊工况	标准重力	起吊部位固定	①②⑦⑧⑨⑩为摩擦接触

储存工况是指产品和储运系统不受外部载荷作用时的状态。在该工况下, 结构处于静止状态, 不发生运动或位移。储存工况通常用于分析结构的稳定性、刚度和静态性能, 以便评估结构在不同工况下的性能和安全性, 帮助工程师确定结构的最大荷载承受能力, 预测结构在静荷下可能出现的破坏模式和位置, 为结构设计和优化提供依据。

起吊工况是指使用吊装设备将重型设备、构件或材料从地面或其他位置吊起并移动的工况。起吊物的结构设计会影响吊装过程中的应力和变形。结构设计不合理或存在缺陷的起吊结构, 可能在吊装过程中产生局部应力集中、刚度不足甚至材料破坏的情况。因此, 需要对起吊物的结构进行充分的分析和评估, 确保其能够承受吊装过程中产生的载荷和应力。起吊工况的起吊过程速度较慢, 为准静态过程, 简化为静态过程。储存、起吊工况均可使用静态结构模块进行分析。

2.3 安全系数

安全系数是指在工程设计和分析中用于考虑不确定性和风险因素的一个重要参数, 表示为设计强度或荷载承受能力与实际荷载之间的比率。实际工程设计中, 需要综合考虑结构材料特性、荷载情况、使用环境等因素, 以确保结构在设计寿命内具有足够的安全性和可靠性。基于最大等效应力失效理论, 当结构等效应力达到屈服应力时, 结构发生塑性变形, 结构不确定性增加, 安全性能难以预测。因此本文将安全系数定义为承载结构最大应力与材料屈服应力之比。钢结构设计的安全系数一般为 1.5, 以确保结构在受到最大荷载时仍具有足够的安全储备。

3 典型工况有限元分析

3.1 有限元模型

网格划分是有限元分析的重要前处理过程。工程中模型离散化, 通常是将复杂的结构分割成简单

的几何单元, 以便进一步分析和计算。采用 ANSYS Workbench 对网格模型进行数学处理, 结合边界条件和约束关系求解得到结果, 这种近似解的准确性取决于离散化的精度、网格划分的密度、材料模型的准确性等因素。通常提高网格数量和采用更精确的材料模型可以提高求解的精度。图 1 中储运装置的离散化模型如图 2 所示, 表 2 为对应的单元信息。

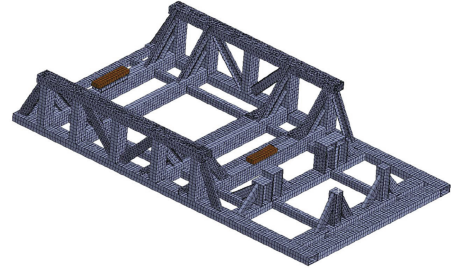


图 2 储运装置离散化模型

Fig. 2 Discretization model of storage and transportation device

表 2 储运装置离散化单元信息

Table 2 Discretization unit information of storage and transportation device

部件类型	弹性模量 / MPa	密度 / (kg·m ⁻³)	单元类型	单元数量	节点数量
木材	11 750	530	solid	75	686
钢架	200 000	7850	solid	46 643	172 330

3.2 计算结果

以图 1 所示的重型装备及储运装置为研究对象, 利用 ANSYS Workbench 的静力学分析模块对其储存和起吊工况分别进行分析。两种工况下重型装备与储运装置的接触及约束如表 1 所示。钢架计算强度应同时满足储存工况和起吊工况, 计算强度安全系数小于 1.5 即为不满足设计要求。

3.2.1 储存工况结果

图 3 为储存工况下储运装置优化前模型的应力云图。已知储运装置所使用材料为 Q235 钢材, 即屈服应力为 235 MPa。由图可知, 其最大应力为 84.238 MPa (具体部位如图 4 所示), 计算得到安全系数为 2.78。其结果通过了强度校核, 并且有安全裕量。

储存工况下储运装置优化前模型的变形云图如图 5 所示, 承载面示意图如图 6 所示。由图可知, 其最大变形为 0.1589 mm, 整体钢架刚度较稳定并满足设计要求, 各构件变形一致性较好。各承载面的承载力

如表 3 所示。

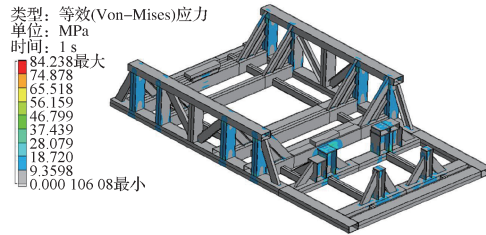


图 3 储存工况下储运装置整体应力云图

Fig. 3 Overall stress nephogram of storage and transportation device under storage conditions

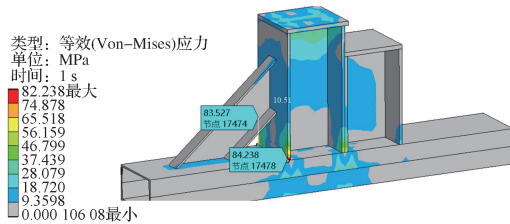


图 4 储存工况下储运装置应力最大值部位指示图

Fig. 4 Indication diagram of maximum stress location of storage and transportation device under storage conditions

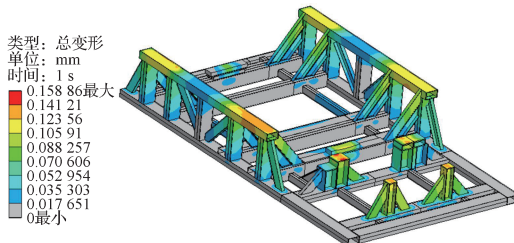


图 5 储存工况下储运装置整体变形云图

Fig. 5 Overall deformation nephogram of storage and transportation device under storage conditions

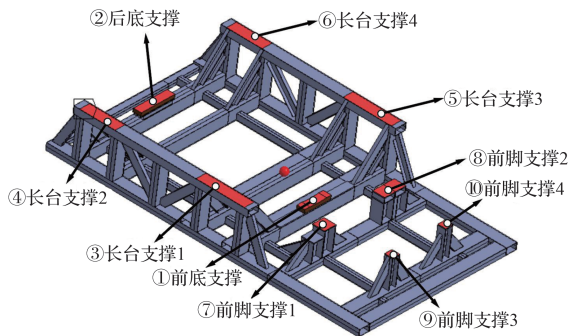


图 6 储存工况下储运装置各承载部位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of each bearing part of the storage and transportation device under storage conditions

表 3 储存工况下储运装置各承载部位承载情况
Table 3 Load bearing conditions of each bearing part of the storage and transportation device under storage conditions

承载部位	承载力 /N	承载比例 /%
①	422 630	20.24
②	123 690	5.92
③	277 150	13.28
④	231 300	11.08
⑤	265 160	12.70
⑥	220 900	10.58
⑦	193 410	9.26
⑧	239 330	11.46
⑨	60 010	2.87
⑩	58 507	2.80

3.2.2 起吊工况结果

图 7~8 分别为储运装置起吊工况下的应力和变形云图。由图可知, 钢架的最大应力为 254.82 MPa (具体部位见图 9), 超过 Q235 钢材的屈服强度 235 MPa, 安全系数为 0.92。其结果未通过强度校核, 应力超出部分覆盖范围较小, 处于焊接部位。最大变形量为 0.979 6 mm, 变形量较小, 位于⑨、⑩两个前脚支撑底部节点处, 包装结构整体变形较小。综上所述, 需要对超出屈服应力的部位进行分析并优化。

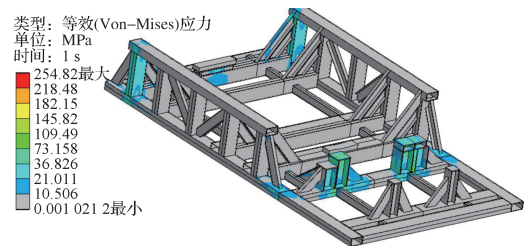


图 7 起吊工况下储运装置整体应力云图

Fig. 7 Overall stress nephogram of storage and transportation device under lifting conditions

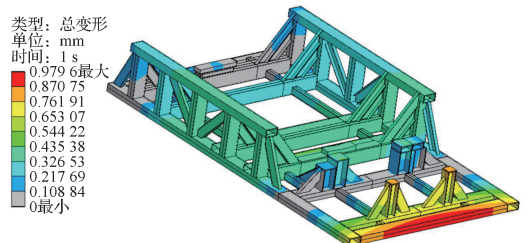


图 8 起吊工况下储运装置整体变形云图

Fig. 8 Overall deformation nephogram of storage and transportation device under lifting conditions

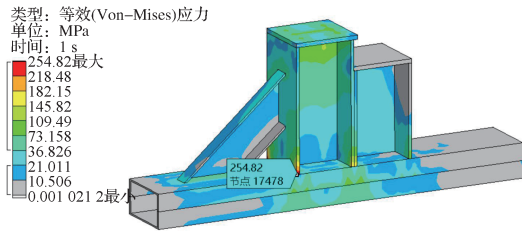


图 9 起吊工况下储运装置应力最大值部位指示图

Fig. 9 Indication diagram of the maximum stress location of the storage and transportation device under lifting conditions

4 储运装置优化

在工程应用中，材料经常会同时受到多个方向的应力，即多轴应力状态。为了描述塑性流动发生时材料各主应力之间的复杂关系，德国力学家 Mises 提出了 Mises 屈服准则^[13]，又称能量屈服准则。其表述为金属体内任一小部分发生由弹性状态向塑性状态过渡的条件是，等效应力达到单向塑性应力状态下相应变形温度、应变速率及变形程度下的流动应力。Mises 屈服准则通常用于预测金属材料的屈服行为，特别是在塑性变形方面。在工程设计和材料评估中，通过 Mises 屈服准则确定材料在多轴应力状态下的屈服条件，从而帮助设计师评估材料的安全性和可靠性。计算公式为

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (1)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、二、三主应力。

根据弹性理论，存在 3 个垂直方向仅有正应力而剪应力为零的状态，这 3 个应力大小关系为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 。

由优化前计算结果可知，储存工况下的安全系数满足要求，起吊工况下的等效应力超过屈服强度，局部焊接处容易产生塑性应变。该钢架未能同时满足储存和起吊工况的强度要求，需要针对起吊工况进行局部优化。

4.1 优化策略

由于储运装置在储运过程中连续作业，储运装置设计方案应同时满足普通工况和相对恶劣工况。优化策略为优先优化相对恶劣工况，同时优化方案不影响其他普通工况的校核结果。由于恶劣工况的载荷强度往往大于普通工况的载荷强度，优化后普通工况的安全系数通常会增加。由优化前仿真计算

结果可知，储存工况为普通工况，起吊工况为相对恶劣工况。

通过对大应力部位的受力特点分析，发现该部位的 H 型钢与底部拼接槽钢的力传导路径截面积较小，通过增大传导路径截面积能够减小该部位应力集中。优化方案是给翼缘板两边缘之间各加焊一块与腹板相同厚度的钢板，使得该钢结构节点的力传导更为合理。优化前后槽钢的力传导截面如图 10 所示。

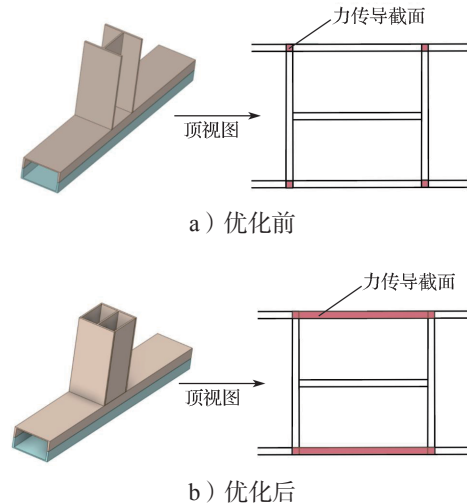


图 10 槽钢的力传导截面示意图

Fig. 10 Schematic diagram of force transmission cross-section of channel steel

4.2 优化后结果

4.2.1 储存工况

产品 - 储运装置重心位置侧视图如图 11 所示。承载结构各支撑部位的承载比例、承载支撑与重心位置之间的距离有关，与重心位置距离越近的部位承载比例越高。表 4 为储运装置优化后储存工况的受力部位承载比例情况。

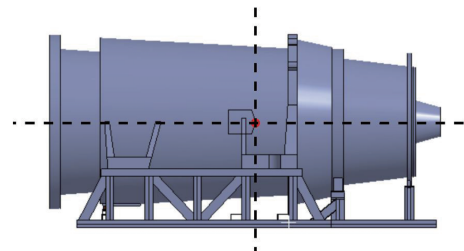


图 11 产品 - 储运装置重心位置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the center of gravity position of the product and storage and transportation device

表 4 优化后储存工况下各承载部位承载情况

Table 4 Load bearing conditions of each bearing part under optimized storage conditions

承载部位	承载量 /N	承载比例 /%
①	397 410	19.04
②	133 180	6.38
③	250 010	11.98
④	229 250	10.98
⑤	243 540	11.67
⑥	224 820	10.77
⑦	245 320	11.75
⑧	263 490	12.62
⑨	51 265	2.46
⑩	50 733	2.43

图 12 和图 13 分别为储运装置优化后储存工况下的应力和变形云图。由图可知, 最大应力由 84.238 MPa 下降至 51.771 MPa, 安全系数为 4.5。优化后, ⑦、⑧部位结构刚度增加, 承载量分别增加 51 910 N 和 24 160 N, ⑦、⑧支撑面承受更大的载荷比例, 减少①支撑部位 25 220 N 的承载负担, 整体承载力分配更为合理。

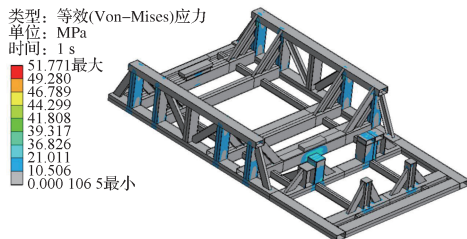


图 12 优化后储运装置在储存工况下的整体应力云图
Fig. 12 Overall stress nephogram of optimized storage and transportation device under storage conditions

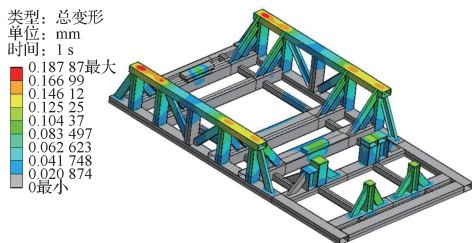


图 13 优化后储运装置在储存工况下的整体变形云图
Fig. 13 Overall deformation nephogram of optimized storage and transportation device under storage conditions

4.2.2 起吊工况

图 14 和 15 分别为优化后起吊工况下储运装置的应力和变形云图。由图可知, 最大应力由 254.82

MPa 降至 136.59 MPa (具体部位如图 16 所示), 承载部位应力分布均匀, 整体模型不发生塑性应变。最大变形量为 1.0068 mm, 增加了 2.78%, 优化前后差异较小, 储运装置刚度表现较稳定。

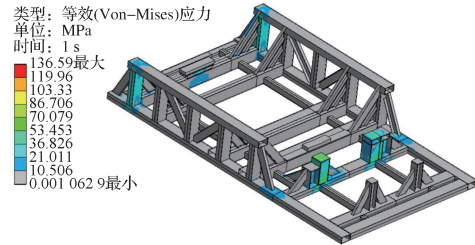


图 14 优化后起吊工况下储运装置整体应力云图
Fig. 14 Overall stress nephogram of optimized storage and transportation device under lifting conditions

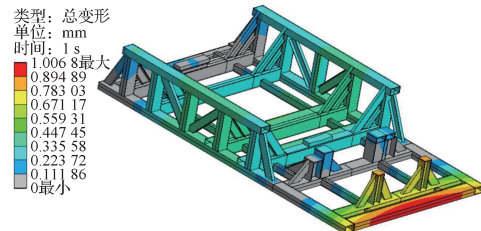


图 15 优化后起吊工况下储运装置整体变形云图
Fig. 15 Overall deformation nephogram of optimized storage and transportation device under lifting conditions

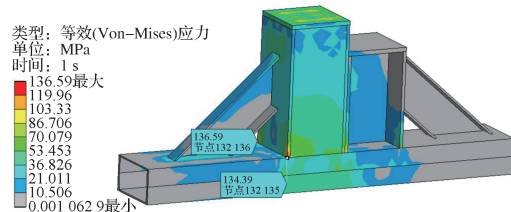


图 16 优化后储运装置起吊应力最大值部位指示图
Fig. 16 Indication diagram of the maximum lifting stress location of the optimized storage and transportation device

5 结论

对超静定储运装置进行有限元数值分析, 探究了重型产品储运装置储存工况和起吊工况的受力和变形情况, 可得如下主要结论。

1) 优化前。储存工况下, 模型承载能力良好, 超静定储运装置整体强度和刚度都满足包装要求, 支座结构的底部焊接部位出现应力集中; 起吊工况下, 超静定储运装置刚度满足要求, 个别支座结构的底部焊接部位出现应力集中, 等效应力值超出 Q235 钢材

屈服应力, 该部位可能会出现塑性变形。

2) 优化后。储存工况下, 模型承载能力得到加强, 储运装置强度和刚度满足包装要求, 安全系数更高, 应力集中被分散, 优化了各支撑部位的承载比例。起吊工况下, 各部位承载能力良好, 强度和刚度均满足要求, 安全系数满足钢结构设计安全系数要求。

3) 有限元方法应用于超静定储运装置的安全分析, 可以节省大量分析时间。通过应力云图和变形云图, 对设计的超静定储运装置进行强度和刚度的校核, 针对结构敏感部位进行分析优化, 能得到较理想的优化方案。

参考文献:

- [1] 束 荣, 徐永赛. 重型装备制造行业现状分析与对策 [J]. 港口装卸, 2020(6): 36-37, 59.
- [2] 朱海明. 重大件货陆运及海运系固校核方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [3] 秦 皓. CTU 内货物的安全装载系固研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [4] 汪 骥, 王兆麒, 李 瑞, 等. 重大件货物系固绑扎方案中倾覆力计算方法 [J]. 造船技术, 2016, 44(6): 45-49.
- [5] 管朝元, 蔡锦达, 李晓全. 基于物联网的包装运输监测系统研究 [J]. 软件, 2024, 45(5): 104-109.
- [6] 贺 志, 周 晟, 向 红, 等. 运输环境数据采集设备在家电物流中的应用 [J]. 包装工程, 2012, 33(5): 138-142.
- [7] 陈 坤. 大件设备陆运绑扎测试分析 [J]. 中国新技术新产品, 2020(16): 55-56.
- [8] 黄雨促. 基于 ANSYS 的海工重大件刚性系固分析 [J]. 船舶工程, 2020, 42(3): 123-127.
- [9] 王勇奎, 殷帅兵, 王 哲, 等. 基于 ANSYS Workbench 的预制舱最优起吊位置研究 [J]. 科技视界, 2018(19): 32-34.
- [10] 滑广军, 易颖茵, 肖 建, 等. 基于 Ansys 的重型包装钢架箱工程轻量化设计 [J]. 包装工程, 2022, 43(3): 183-188.
- [11] 温舒瑞. 超静定塔机杆系结构的稳定性与非线性及其动态特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [12] 黄林峰, 滑广军, 卢富德, 等. 4X 框架木箱结构内力计算方法研究 [J]. 包装工程, 2023, 44(17): 167-173.
- [13] 孟祥瑞. 不同应力状态下金属初始屈服和硬化行为的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.

(责任编辑: 邓光辉)

Simulation Analysis and Structural Optimization of Hyperstatic Storage and Transportation Equipment

FU Yinghai¹, TANG Wenping², SHI Yong², HU Shan¹, CAO Jinshu¹

(1. Enterprise Management Department, Nanjing High Speed Gear Manufacturing Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The three-dimensional model, discretization model, and contact model of heavy equipment and storage and transportation equipment were established based on ANSYS Workbench. The stiffness and strength state of the hyperstatic storage and transportation device were calculated using storage and lifting as typical working conditions, while the strength of storage and transportation equipment was evaluated based on Mises yield theory. By adjusting the stiffness of the load-bearing parts, the force distribution of each load-bearing part of the storage and transportation device was optimized, and the rationality of the stress distribution of the steel frame nodes was improved. The results indicate that the finite element method can provide design and optimization basis for storage and transportation devices with hyperstatic structures.

Keywords: hyperstatic structure; storage and transportation equipment; finite element method; discretization model; lifting; yield theory