

Structural Design and Analysis of Light Truss Robots in Warehousing Logistics

Hao Liu

People's Liberation Army Unit 32286, Gaotang, Shandong, 250000, China

Abstract

In response to the urgent demand for highly efficient and flexible automated equipment in modern warehousing logistics, this paper presents the structural design and analysis of light truss robots. The study first completes the overall structural design of the robot according to specified performance indicators, then systematically conducts static analysis of the truss robot structure using the finite element method to evaluate its stiffness and strength, and also performs dynamic analysis to determine its modal and harmonic response characteristics. The analysis results indicate that this design scheme meets both dynamic and static performance requirements. Subsequently, fatigue analysis is carried out on key components, providing a direction for improving structural reliability and extending service life. This study provides theoretical support and practical reference for the structural development of light truss robots.

Keywords

Light truss robot; Structural design; Static analysis; Dynamic characteristics; Fatigue analysis

仓储物流中轻型桁架机器人结构设计与分析

刘浩

中国人民解放军第 32286 部, 中国·山东 高唐 250000

摘要

针对现代仓储物流高效率, 高柔性自动化设备的迫切需求, 本文便展开轻型桁架机器人的结构设计与分析。研究先按指定性能指标完成机器人的整体结构设计, 再用有限元分析法, 系统地对桁架机器人结构做静力学分析, 以此考量其刚度与强度, 而且做动力学分析来得到它的模态与谐响应特性。分析结果表明此设计方案符合动静态性能要求, 之后又通过对关键部件执行疲劳分析, 给出了期望改善结构可靠性和延长使用寿命的方向。此项研究给轻型桁架机器人的结构开发赋予了理论支撑和实践参照。

关键词

轻型桁架机器人; 结构设计; 静力学分析; 动力学特性; 疲劳分析

1 引言

智能仓储物流行业正在飞速发展, 企业对于自动化搬运设备的效率, 灵活性以及经济性有着更高的要求。轻型桁架机器人是达成空间内高效精准搬运的重要设备, 其具有结构简单, 空间利用率高, 成本可控制的优点, 所以具备广泛的应用前景。但是, 轻型化设计虽然可以减轻设备重量并缩减制作成本, 但也存在一些问题, 比如刚度变小, 动态响应变得更为灵敏等情况, 这些都会影响到机器人的定位精度及其长时间运行时的稳定性。所以在设计之初就要系统地去分析它的结构设计并做力学性能分析, 这对于保证设备工作的可靠性, 提升其使用寿命十分关键。本文据此展开对轻型桁

架机器人结构的全面设计与分析工作。

2 轻型桁架机器人结构设计

2.1 设计目标与性能参数确定

轻型桁架机器人的设计目标要紧密联系仓储物流的实际作业需求, 关键在于要在有限的空间里达成高效的物料搬运。设计之初就要明确一些核心性能指标, 最大运行速度, 重复定位精度, 额定负载能力以及有效工作范围等。这些参数的确定给后续的设计指明了方向, 也是考量设计成果的重要依照。速度和精度指标直接影响着机器人的作业效率, 负载能力则决定了它应用场景的宽窄, 工作范围的划定需综合考虑库区布局和设备占地面积的限制。机器人是否可靠, 能耗水平如何, 守护是否方便, 这些都是很重要的设计考虑因素。这些性能参数常常相互制约, 所以要经由设计过程中的综合权衡并加以改善, 从而谋求达到较好的整体性能效果。材料的选择需按照负载要求和工作环境来决定, 既得保

【作者简介】刘浩(1994-), 男, 中国山东高唐人, 本科, 初级工程师, 从事机械工程专业研究。

障结构强度，也要控制好总体重量。

2.2 关键部件选型与结构布局

关键部件的选型对于保证机器人整体性能十分关键，要综合考量性能适配性，可靠性以及经济性等因素。结构框架一般会选用铝合金型材或者方钢来焊接，这样既能保证刚度，又能够达成轻量化的目的。驱动系统按照负载和速度的要求来挑选合适的伺服电机和减速器，至于传动方案，则可以在齿轮齿条和同步带当中做出选择。导轨和滑块的选取会直接左右到运动精度和使用寿命，所以应当依照负载和速度来确定恰当的规格型号。结构布局设计需改良质量分布情况，把主要载荷安排在支撑结构较强之处。各部件的结合方式应保证传力路径清晰可靠，也要方便安装与调试。布局方案还要顾及电缆守护，传感器安装以及后期维护的可达性。利用三维设计软件执行虚拟装配，可以预先找出并解决潜在的干涉问题。

3 结构静力学与刚度分析

3.1 静力学分析理论基础

静力学分析是考量结构承载能力的关键所在，其理论重点在于运用平衡方程和胡克定律。该分析依照连续性假设，把实际结构简化成理想的弹性体模型。平衡方程可使结构在外力作用下维持静力平衡，物理方程则阐述了应力与应变的本构关联，几何方程创建了位移场和应变场间的数学联系，这三者一同形成起弹性力学的基本方程体系。针对复杂的结构，用解析法求解常常很艰难，所以要采用有限元法之类的数值计算手段。有限元法经由离散化把连续体变成若干个单元的合成，在各个单元里用近似函数来表现位移场，最后把微分方程转为成线性代数方程组加以求解。选取恰当的单元种类，网格疏密以及边界条件，这对保障计算精度十分关键。

3.2 极限工况下的静力学仿真

静力学仿真要设置恰当的极限工况，用以考察结构在最不利载荷情况下的响应特点。常见的极限工况涵盖额定负载时的加速，减速情形，还有紧急制动之类的特别操作状态。仿真前处理步骤包含几何清理，材料性质指定，网格划分以及施加载荷约束等任务。网格质量会左右计算结果的正确与否，所以要在计算效率和精准度二者间寻求调和。施加载荷时得要考虑自身重量，工作负荷，惯性力以及冲击系数等诸多因素共同产生的影响。求解之后，可以得到结构的应力分布云图和位移变形云图，这两张图清楚地显示了高应力区域以及最大变形处。经由对仿真结果加以分析，能够判定结构是否符合强度标准，找出潜藏的不足之处。把不同工况的结果做对比分析，有益于全方位把握结构的力学特性。

3.3 结构刚度与变形量评估

刚度评定属于保障机器人定位精度的重要部分，要着重关注末端执行器处的变形量。评定指标包含静刚度和动刚

度，它们分别体现结构对抗静载荷和动载荷的能力。变形量的允许值按照机器人的精度要求来定，常常需控制到毫米级别甚至更小。就桁架结构而言，整体刚度很大程度上由导轨支撑间距，横梁截面特征以及连接部位的刚度所决定。过大的变形不但会影响定位精度，而且也许会造成振动现象发生。刚度评定要参考应力分析的结果，保证结构既达到刚度需求又不至于过度设计。经由调整截面参数，改良支撑位置或者增添局部加固结构，可以提升系统的刚度。刚度与重量之间的协调是设计阶段必要不断加以完善的主要问题。

4 结构动力学特性分析

4.1 模态分析与固有频率计算

模态分析属于探究结构动态特性的关键手段，目的在于得到结构的固有频率以及振型之类的模态参数。这些参数取决于结构的质量分布情况和刚度特性，体现出结构本身固有的振动特点。计算的时候一般会用块兰索斯法或者子空间迭代法这样的数值方法来解决特征值问题。在执行分析的时候要重视边界条件模拟的准确性，各种不同的约束形式会给计算结果带来很大改变。低阶模态常常关联到整体结构的刚体运动或者是主要梁的弯曲振动，高阶模态则更多地体现局部结构复杂的形变状况。经由模态分析能够找出结构中的不足之处，从而给动态设计赋予参考依照。分析结果需用振型图直观表现各阶模态的振动形态，方便工程人员领会结构的动态行为特性。模态分析的质量会左右后续谐响应分析等动力学计算的准确与否。

4.2 谐响应分析

谐响应分析用来计算结构受简谐激发时的稳态响应，是衡量结构共振风险的有效手段。该分析依靠模态叠加法或者直接频率响应法来执行，计算结构在不同频率激发下的振动幅度。激发力的幅值与相位需遵照实际工作状况加以合理设置，一般会考虑到电机运行，齿轮咬合之类的周期性激发源头。分析成果表现为频率-响应曲线，此曲线可清楚显示出结构的共振频率及其对应的放大系数。经由谐响应分析能够确认工作频率是否规避了结构的各级固有频率，防止共振情况出现。如果无法避开共振区，要考量共振时的应力水平是否处于允许范围之内。分析还要考虑阻尼对振动响应的影响，合适的阻尼可有效地抑制共振峰值。

4.3 结构优化与轻量化设计

结构改良属于工程设计范畴，其目的在于在符合性能需求的情况下找到理想的材料分布方案。轻量化设计需经由参数改良，形貌改良以及拓扑改良这些多层次的方法来完成。参数改良可借助调节杆件厚度，截面大小等参数来提升结构性能，形貌改良侧重于针对现存结构探寻最合适的加强筋设置方案，而拓扑改良则是站在材料分布的层面考量，找寻最理想的传力途径。改良进程要创建起涵盖质量，应力，变形以及频率等诸多目标限制的数学模型，依靠更新计算渐

渐趋近于理想答案,从而做到减重和性能兼顾。改良后的结构还要再度执行静动力学检测,保证各项指标符合设计标准。

5 关键部件强度与疲劳分析

5.1 关键连接部位强度校核

关键结合部位的强度会直接左右整机的安全性和可靠性,所以要执行细致的局部应力分析。重点校核的部分包含横梁与端梁的结合节点,立柱与基础的结合法兰以及各个运动部件之间的螺栓结合。分析的时候要创建细化模型,精确模拟接触关系,焊缝形状和螺栓预紧力等细微特点。施加载荷时应考虑最不利的受力状况,比如偏心载荷造成的额外弯矩和扭矩。应力评定要用合适的强度理论,第四强度理论适合由塑性材料构成的结构。针对焊接部分,要格外留意应力集中的影响,焊缝质量须要达到有关标准的要求。螺栓连接要核查螺栓自身的拉伸强度,也要考量接合面的抗滑移能力。分析结果应给出确切的安全系数,以保证关键部位有足够的强度余量。对于不符合要求的部位,需给出具体的改进方案。

5.2 疲劳寿命分析理论

疲劳分析对于考量结构在交变载荷作用下的耐久性十分关键,其理论依照在于材料的 S-N 曲线以及累积损伤理论。S-N 曲线显示了材料在给定应力比情形下,应力幅值与破坏循环次数之间的关联。而在实际结构当中,由于存在应力集中现象,所以会利用疲劳强度降低系数予以考虑。至于累积损伤理论,最常被用到的是 Miner 的线性累积损伤准则,此理论觉得处于不同应力水平所产生的损伤能够实施线性叠加运算。疲劳分析要先确定结构的载荷谱,可以经由实测或者仿真方法得到。按照载荷谱做应力统计,就能知道应力幅值的分布状况,再结合材料的 S - N 曲线来做寿命预测,大致估算一下结构在指定使用期限内的损伤程度。焊接结构时,还要注意焊缝处的疲劳特点,一般会用热点应力法或者有效缺口应力法来执行更为精准的评价。疲劳分析存在不少

不确定性,所以得要采用合适的安全系数。

5.3 基于疲劳寿命的优化建议

按照疲劳分析的结果,可以针对薄弱部分给出改良建议,从而延长其使用寿命。改良的方向包含改善结构细节设计以减小应力集中系数,可以采用平滑过渡,加大圆角半径等办法。在材料选择上,可以考虑选用疲劳性能较好的高强度钢或者铝合金,并借助恰当的热处理工艺提升表面硬度。制造工艺的改良同样关键,要提升焊接质量,去除残余拉应力,运用喷丸强化之类的表面处理技术。针对螺栓连接处,可以经由改善预紧力控制或者增添防松装置来加强连接的可靠性。改良之后还要再次执行疲劳寿命评定,以验证改良举措是否有效。

6 结语

本文系统地完成了轻型桁架机器人的结构设计,并对其性能展开了分析。通过明确设计目的与参数,创建起完整的三维数字化模型。从静力学角度来讲,结构在极限工况下符合强度与刚度的要求,而动力学分析则证实它具备优良的动态特性,而且达成了轻量化设计。对关键部件执行疲劳分析,为长期稳定运行提供了保障。综合结果表明,此设计方案是合理可行的,达到了预期的目标,可以为同类设备的研发提供宝贵的参照。

参考文献

- [1] 陈海霞,吴馥云.基于改进A*算法的仓储物流机器人路径规划研究[J].无线互联科技,2025,22(18):39-42.
- [2] 耿宾.仓储移动机器人导航定位技术专利分析[J].军民两用技术与产品,2025,(09):48-54.
- [3] 周鹏,韩笑.仓储物流搬运机器人多场景任务优化调度研究[J].自动化与仪器仪表,2025,(05):161-166.
- [4] 操蓉蓉,刘大勇,赵冠永,等.仓储物流搬运机器人接触力阻抗自动控制方法研究[J].工业仪表与自动化装置,2024,(06):63-68.
- [5] 魏彦飞,李景景.室内仓储物流机器人路径规划研究[J].物流科技,2024,47(20):149-151.