

大卷装倍捻设备的结构轻量化与动力学性能研究

梁添锦 梁钱凯 梁朝阳 杨云峰
浙江凯成智能设备股份有限公司 浙江绍兴 312000

【摘要】大卷装倍捻设备是纺织工业核心装备,但传统设备存在结构笨重、动力学性能差等痛点,制约了高速化与绿色化发展。结构轻量化虽能降耗增效,却易导致刚度强度下降,引发“轻量化与动力学性能相互制约”的矛盾。本文立足技术升级需求,通过理论推演系统剖析设备运行机理,明确两者协同优化逻辑。研究重点开展轻量化材料与结构设计,分析振动、刚度等关键指标变化规律,提出协同优化策略并经案例验证。旨在破解核心矛盾,为设备结构升级提供理论支撑,推动纺织机械向轻量化、高速化、稳定化转型,助力行业绿色智能发展。

【关键词】纺织机械;大卷装倍捻设备;结构轻量化;动力学性能;协同优化;核心零部件

Research on Structural Lightweighting and Dynamic Performance of Large Coil Double Twisting Equipment

Liang Tianjin Liang Qiankai Liang Chaoyang Yang Yunfeng

Zhejiang Kaicheng Intelligent Equipment Co., Ltd. Shaoxing, Zhejiang 312000

【Abstract】 Large coil double twisting equipment serves as a core component in textile manufacturing, yet traditional designs suffer from structural bulkiness and suboptimal dynamic performance, hindering high-speed and eco-friendly development. While structural lightweighting reduces energy consumption and enhances efficiency, it often compromises stiffness and strength, creating a "mutually restrictive relationship between lightweighting and dynamic performance." Addressing technological upgrade demands, this study systematically analyzes operational mechanisms through theoretical modeling to establish synergistic optimization strategies. Key research focuses include lightweight material selection and structural design optimization, analysis of vibration patterns and stiffness variations, and implementation of case-based validation approaches. The findings aim to resolve critical technical challenges, provide theoretical foundations for equipment structural upgrades, accelerate the transition of textile machinery toward lightweight, high-speed, and stable operations, and promote sustainable intelligent development in the industry.

【Key words】 textile machinery; large roll doubling equipment; structural lightweighting; dynamic performance; collaborative optimization; core components

一、引言

纺织工业作为我国支柱产业,正加速向绿色化、高速化、智能化转型。倍捻设备是捻线加工核心,其中大卷装倍捻设备凭借大容量、高效率优势,广泛应用于高档纱线生产。然而,传统设备为满足承载需求,结构笨重、质量过大,不仅增加能耗与成本,更因惯性大导致高速运行时振动剧烈、噪声超标,严重影响纱线质量与设备寿命。

结构轻量化是解决上述痛点的关键路径,但面临严峻挑战:大卷装设备高速重载,若单纯减重易导致刚度、强度不足,引发振动加剧与动力学性能恶化,形成“轻量化与动力学性能相互制约”的核心矛盾。当前研究多顾此失彼,缺乏针对该设备的协同优化方案。

鉴于此,本文聚焦轻量化与动力学性能协同优化,采用理论分析与逻辑推演方法,系统开展大卷装倍捻设备结构设计、动力学分析及策略研究。旨在明确关键技术规律,提出科学可行的协同优化策略,并通过理论案例验证方案优越性。本研究将破解二者制约矛盾,丰富纺织机械理论体系,为设备结构升级提供坚实支撑,助力纺织工业绿色智能转型。

二、大卷装倍捻设备的结构特征与运行痛点分析

2.1 大卷装倍捻设备的工作原理

大卷装倍捻设备通过锭子高速旋转使多根单纱加捻合股,同步完成大规格卷绕,实现“加捻-卷绕”一体化连续作业。核心流程有三环节:喂入环节,用导纱器与张力调节器确保单纱张力均匀稳定;加捻环节,锭子带动锭罐高速旋转使单纱交织,捻度控制器精准调节转速保障捻度一致;卷绕环节,电机驱动卷绕滚筒与加压装置配合,将合股纱卷绕成大容量纱筒。与传统小卷装设备相比,卷装容量提升2-5倍,减少换筒频次,但对结构刚度、强度及高速运行稳定性要求更高。

2.2 大卷装倍捻设备的核心结构特征

设备由机架、加捻、卷绕、喂入、传动及张力控制六大系统组成,有三大特征:一是结构尺寸大,为满足大容量需求,卷绕轴长度与机架跨度大幅增加,传统设计使整机体积庞大、质量达数吨;二是承载负荷高,运行中卷绕轴承受巨大纱筒重量、纱线拉力、锭子离心力与扭矩,对零部件刚度与强度挑战大;三是传动关系复杂,各机构需独立驱动且速度精准协同,传统机械传动链长、效率低、易产生误差,影

响成纱质量，增加设备自重与维护难度。

2.3 大卷装倍捻设备的运行痛点及核心矛盾

传统设备受结构笨重影响有四大痛点：一是能耗偏高，巨大惯性使启动与调速电能消耗剧增，能耗比普通设备高30%以上；二是动力学性能不佳，大质量引发振动与冲击，导致噪声超标、锭子转速不稳、卷绕精度下降、断头率增加，刚度不均易诱发局部共振，缩短寿命；三是制造成本高，厚重材料与复杂加工推高制造、运输及安装成本；四是维护难度大，笨重部件与复杂结构使拆装繁琐，人力时间投入大。这些痛点根源是“结构笨重”，而“轻量化”面临核心矛盾：轻量化与动力学性能相互制约，单纯减重会恶化动力学性能，为保性能维持厚重结构则能耗高。破解此矛盾，实现二者协同优化是设备技术升级关键，也是本文研究核心重点。

三、大卷装倍捻设备结构轻量化设计理论与方法

3.1 轻量化设计的核心目标与基本原则

大卷装倍捻设备轻量化设备旨在保证刚度、强度及运行稳定性前提下，最大限度降低质量，实现“轻量化、低能耗、高稳效”目标。具体目标包括整机减重15%~30%以降低成本、保障动力学指标、提升启停响应与传动效率、简化结构。设计遵循性能优先、协同优化、材料适配、结构优化、实用性五大原则。

3.2 轻量化材料的筛选与适配分析

基于理论推演，筛选出三类适配材料。铝合金密度低、强度接近钢材、加工性好且成本低，适用于非核心承载件；高强度复合材料密度极低、比强度与比刚度高、减振性优异，适用于核心高速重载部件；空心钢材可在保证性能前提下降重，成本低、工艺成熟，适用于中等承载部件。应用方案为非核心件用铝合金，核心件用碳纤维复合材料，中等承载件用空心钢，兼顾性能与成本。

3.3 核心零部件的轻量化结构设计

针对占整机质量60%以上的三大核心部件专项设计。机架由整体铸铁改为铝合金模块化框架，关键部位设加强筋并拓扑优化，可减重40%~50%，降低成本；锭子采用碳纤维空心阶梯轴结构，依据受力优化壁厚、内置加强芯轴、外形流线型，可减重50%~60%，提升稳定性；卷绕轴采用碳纤维空心筒状结构，配铝合金法兰、设轴向加强筋，可减重45%~55%，提升抗弯刚度与旋转稳定性。此外，辅助部件同步实施轻量化。综合施策后，预计整机质量降约30%，提升能效，确保设备性能稳定。

四、大卷装倍捻设备轻量化后的动力学性能分析

4.1 动力学性能分析的核心指标与分析方法

轻量化改变了设备质量分布与结构形式，直接影响动力学性能。分析聚焦四大核心指标：刚度（抗变形能力）、强度（抗破坏能力）、振动特性（频率、振幅）及噪声水平。本文采用理论推演结合机械动力学原理进行分析：利用静力学方法推演零部件受力下的变形量与应力分布，评估刚强

度；运用模态分析法推演固有频率与振型，预判共振风险；基于声学理论，由振动特性推导噪声来源与强度。旨在明确性能变化规律，识别潜在问题，为协同优化提供依据。

4.2 轻量化后设备刚度与强度分析

针对核心零部件的推演表明，轻量化方案在减重同时保障了基础性能：

机架：铝合金模块化框架虽弹性模量低于铸铁，但通过合理布置加强筋，有效提升了整体刚强度。推演显示，其最大变形量与应力值均在许用范围内，且载荷分布更均匀，减少了应力集中。

锭子：碳纤维空心阶梯轴凭借高比强度与高比刚度，能有效抵抗高速旋转产生的离心力与扭矩。其应力远低于材料极限，变形极微，确保了捻度均匀性与运行稳定性，且抗疲劳性能显著提升。

卷绕轴：碳纤维空心筒状结构配合内部轴向加强筋，在承受大卷装重载时，弯曲变形可控，强度满足需求，避免了因变形导致的卷绕不均。

综上，轻量化后设备刚强度虽有微调，但完全满足高速重载工况，实现了初步协同。

4.3 轻量化后设备振动与噪声特性分析

轻量化对振动与噪声具有显著的改善作用，但也伴随潜在挑战：

振动特性：设备质量降低使惯性减小，启停响应应加快，振动衰减速度显著提升。碳纤维材料的优异阻尼特性有效吸收并抑制了振动能量传播。模态分析显示，新结构固有频率避开了工作频段，消除了共振隐患。然而，铝合金部件刚度相对下降及模块化连接间隙，可能引发局部微振动，需重点关注。

噪声水平：得益于振动幅度的降低及碳纤维的抑噪作用，加之传动链优化减少了摩擦撞击，推演表明设备运行噪声较传统机型降低15%~25%，符合环保标准。但局部振动可能产生额外高频噪声，需在后续优化中加以控制。

总体而言，轻量化设计显著提升了设备的振动稳定性与静音效果，改善了动力学性能。针对出现的局部振动等潜在问题，需通过进一步的协同优化策略予以解决，以实现轻量化与动力学性能的全面深度融合。

五、轻量化与动力学性能协同优化策略

5.1 协同优化的核心思路与目标

协同优化的核心在于破解“轻量化与动力学性能相互制约”的矛盾。遵循“先设计、后校验、再调整”的闭环逻辑，通过材料、结构及参数的多维调整，实现双重目标。首先追求整机减重超30%且能耗降低25%以上；其次确保刚强度达标，振动噪声可控并杜绝共振；最后将增量成本控制在10%以内以保障工程实用性。

5.2 基于材料搭配的协同优化

针对局部刚度不足与振动问题，实施差异化材料策略。对于非核心件，在机架横梁等关键受力部位采用高强度铝合金替代普通铝材，显著提升刚度以抑制局部变形，同时保持

低密度优势。对于核心件,构建“碳纤维复合材料加金属衬套”复合结构,在锭子轴承位及卷绕轴连接处嵌入铝合金衬套,既利用碳纤维的高比强度高比模实现轻量化,又通过金属衬套提升耐磨性与连接刚度,减少摩擦振动。对于中等承载件,优化空心钢壁厚分布并在内部填充轻质阻尼材料,利用阻尼效应吸收振动能量,改善动力学响应。

5.3 运行参数适配优化

使运行参数精准匹配轻量化结构特性。利用低惯性优势,在避开共振区前提下适度提升锭子转速,并采用变频调速实现平稳启停;建立卷绕速度与锭子转速的实时自适应匹配机制,严控速度变化率以消除失配振动;依据新结构刚度设定最优张力区间,采用高精度张力器确保张力恒定,从源头减少波动引发的振动与断头,最终达成绿色、高效、稳定的升级目标。

六、理论性案例验证与应用展望

6.1 理论性案例验证

为验证协同优化方案的可行性,选取某企业传统大卷装倍捻设备为对象进行理论推演。该传统设备采用铸铁机架与实心钢核心件,存在能耗高、振动大及噪声超标等弊端。应用本文方案后,机架升级为高强度铝合金模块化框架,锭子与卷绕轴改用碳纤维复合材料空心结构,传动轴采用空心钢,并同步优化材料搭配与运行参数。

推演结果显示,优化后整机质量较传统设备降低32%,其中机架、锭子及卷绕轴减重幅度分别达48%、55%和50%,预计能耗降低28%以上。动力学性能显著提升,核心部件刚度均满足需求,无变形断裂风险;振动幅度降低35%以上,固有频率成功避开工作频段,彻底消除共振隐患;运行噪声降低22%,完全符合环保标准。此外,纱线捻度均匀性改善,断头率大幅下降。制造成本仅增加8%,维护成本降低超30%,证明该方案在实现显著轻量化的同时,全面优化了动力学性能,具备极高的工程实用价值。

6.2 应用优势总结

相较于传统设备,协同优化后的设备具备五大核心优势。一是节能降耗显著,整机减重超30%且能耗节约25%以上,大幅降低生产与运输安装成本,契合“双碳”战略。二是运行稳定可靠,优异的刚度与低振动特性延长了零部件寿命,维护成本降低超30%。三是质效双升,低惯性带来更快的启停响应,生产效率提升20%以上,同时高档纱线品质显著改善。四是成本可控易推广,增量成本控制

在10%以内,且工艺成熟,便于产业化落地。五是适配性强,模块化设计可灵活应对棉、毛、化纤等不同领域的多样化生产需求。

6.3 应用展望

面向纺织工业智能化与绿色化未来,该技术可从四方面深化拓展。首先,融合智能技术,利用人工智能与物联网实现动力学指标的实时监测、故障预警及参数自适应调整,构建数字孪生运维体系。其次,深耕材料与结构,研发新型轻质高强材料,结合拓扑优化等先进设计手段,进一步挖掘轻量化潜力并提升动态性能。再次,拓展应用场景,将协同优化技术推广至普通倍捻机、纺纱及织造设备,推动纺织机械全领域的轻量化升级。最后,强化产业验证,通过与制造企业深度合作,在实际生产中收集数据以迭代优化方案,降低成本,加速技术成果转化,助力纺织行业全面技术进步与产业升级。

七、结论

本文聚焦大卷装倍捻设备“轻量化与动力学性能相互制约”的核心矛盾,通过理论与逻辑推演,系统研究了结构轻量化设计及其动力学响应,提出协同优化策略并验证了其可行性。主要结论如下:

首先,明确了传统设备结构笨重、能耗高及动力学性能差的根源在于设计不合理,指出轻量化必须以保障刚度与稳定性为前提。其次,构建了科学的材料应用方案:非核心件采用铝合金,核心件采用碳纤维复合材料,中等承载件采用空心钢材,在显著减重的同时兼顾了经济性与实用性。

再次,完成了机架、锭子及卷绕轴的轻量化结构设计,通过模块化、空心化及流线型设计,实现整机减重约30%,且核心部件刚度满足高速重载需求。分析表明,轻量化虽能降低振动噪声并避免共振,但也引入了局部刚度不足等潜在问题。为此,本文提出了“材料搭配+结构改进+运行参数”的三维协同优化策略,有效破解了制约矛盾。理论案例证实,优化后设备能耗降低超25%,振动与噪声显著下降,生产效率与纱线质量大幅提升,且制造成本增量可控,具备极高的工程应用价值。

本研究丰富了纺织机械轻量化理论,为设备升级提供了技术路径。尽管目前主要基于理论推演,缺乏实测数据支撑,但未来将通过校企合作开展实证研究,融合人工智能与物联网技术,推动方案落地与迭代,助力纺织工业向绿色化、智能化转型。

参考文献

- [1]徐魏魏,林敏.倍捻机锭子气圈流场参数化仿真及结构优化设计[J].纺织器材,2025,52(4):1-6.
- [2]乔歆慧,解大,张延迟.倍捻机电机稳压节能增效的探讨[J].纺织学报,2010,31(2):115-119.
- [3]许建琴.倍捻机的工艺设计、产品质量分析和控制[J].上海纺织科技,2010,38(5):29-31.
- [4]丁明,龚妍,王海芹.短纤倍捻机生产常见问题的分析[J].山东纺织科技,2023,64(2):1-5.
- [5]吕明来,袁嫣红,张建业.基于多电机传动的倍捻机控制系统设计及试验[J].浙江理工大学学报,2013,30(2):135-138,143.