

高效节能型地毯植绒机研发与性能分析

张秀慧

金华市汇晨织造有限公司 321015

【摘要】地毯植绒工艺是提升地毯质感与功能性的关键环节，传统植绒设备存在能耗高、绒毛利用率低、自动化程度不足等问题，难以满足现代绿色制造与高效生产的需求。本文针对地毯植绒机的节能与效率提升目标，提出一种融合机械结构优化、伺服动力系统与智能控制算法的高效节能型植绒机设计方案。通过创新绒毛输送机构、改进植绒针床运动轨迹、集成能量回收技术与自适应控制策略，实现了绒毛植入效率与能源利用效率的双重提升。文中详细阐述了设备的总体设计思路、关键技术创新及性能分析方法，重点讨论了机械系统动力学优化、动力配置与智能控制的协同机制。理论分析与仿真验证表明，该植绒机较传统机型节能25%以上，绒毛利用率提升至95%，生产效率提高30%，为地毯植绒行业的绿色化、智能化升级提供了技术支撑。

【关键词】高效节能；地毯植绒机；机械优化；智能控制；性能分析

Research and performance analysis of high efficiency and energy saving carpet flocking machine

Zhang Xiuhui

Jinhua Huichen Weaving Co., LTD 321015

【Abstract】The carpet flocking process is a critical step in enhancing the texture and functionality of carpets. Traditional flocking equipment suffers from high energy consumption, low utilization rate of fibers, and insufficient automation, making it difficult to meet the demands of modern green manufacturing and efficient production. This paper proposes an energy-efficient and highly effective flocking machine design that integrates mechanical structure optimization, servo power systems, and intelligent control algorithms. By innovating the fiber conveying mechanism, improving the motion trajectory of the flocking needle bed, and incorporating energy recovery technology and adaptive control strategies, this design achieves dual improvements in fiber implantation efficiency and energy utilization efficiency. The paper provides a detailed explanation of the overall design concept, key technological innovations, and performance analysis methods, with a focus on the synergistic mechanisms of mechanical system dynamics optimization, power configuration, and intelligent control. Theoretical analysis and simulation validation show that this flocking machine saves over 25% energy compared to traditional models, increases fiber utilization to 95%, and boosts production efficiency by 30%, providing technical support for the greening and intelligent upgrading of the carpet flocking industry.

【Key words】high efficiency and energy saving; carpet flocking machine; mechanical optimization; intelligent control; performance analysis

一、引言

地毯植绒是通过机械或静电方式将短纤维固定在基布表面，形成具有立体质感与舒适触感的工艺过程，广泛应用于家居、汽车内饰等领域。植绒机作为核心设备，其性能直接影响产品质量、生产效率及能耗水平。传统植绒机主要采用工频电机驱动，依赖机械凸轮或连杆机构控制植绒针床运动，存在多方面问题：动力系统能效较低，电机运行时长期处于非满负荷状态，能量浪费严重，实测平均效率仅70%左右且无能量回收机制；机械结构刚性大，运动过程中振动与噪声显著，噪声峰值可达90分贝，导致绒毛输送不稳定、植入精度波动，位置误差达 ± 0.5 毫米；控制方式简单，依赖人工经验调节参数，难以适应不同基布材质与绒毛规格的

工艺需求，常因参数匹配不当造成绒毛浪费率高达15%至20%。随着“双碳”目标的推进与制造业智能化转型，研发兼具高效生产与节能降耗的新型植绒设备成为行业迫切需求。

高效节能型地毯植绒机的设计需突破传统设备的技术瓶颈，从机械结构、动力系统、控制策略三方面协同优化。在机械层面，通过轻量化设计与柔性传动机构降低运动阻力，提升绒毛输送的均匀性；在动力层面，采用伺服电机替代传统异步电机，结合能量回收技术减少能耗；在控制层面，利用传感器实时采集工艺参数，通过智能算法动态调整植绒频率、针床行程等关键变量，实现精准化生产。本文围绕上述核心问题，系统阐述新型植绒机的研发思路、关键技术及性能分析方法，为相关设备的工程化应用提供理论参考。

二、高效节能型植绒机总体设计思路

地毯植绒过程主要包括绒毛投放、静电吸附、基布传送与绒毛固结等环节,其中植绒针床的往复运动与绒毛输送的协调性是影响效率与能耗的关键因素。新型植绒机采用“机械-动力-控制”一体化设计理念,构建三层次优化体系:

(一) 机械系统轻量化与柔性化

传统植绒机的针床与传动机构多采用铸铁等刚性材料,运动部件重量大,单组针床重量可达80千克,导致启停时惯性力矩高,约为12牛·米,能耗浪费严重。新型设计引入6061-T6铝合金框架与碳纤维增强复合材料,这类材料密度仅为铸铁的四分之一,强度却提升30%,将运动部件重量减轻至50千克以下,惯性力矩降至7牛·米,启停能耗降低40%。传动机构摒弃传统刚性连杆,采用伺服电动缸与高刚性滚珠丝杠组合,配合直线导轨,使针床运动摩擦阻力从50牛降至20牛以下,机械效率提升至92%。绒毛输送系统创新设计“振动流化-气流稳流”复合结构:底部振动料斗采用变幅振动电机,频率可在0至50赫兹范围内调节,通过有限元分析优化料斗倾角至15度,使绒毛在料斗内形成均匀流化状态;上方配置文丘里式气流管道,利用负压风机形成稳定输送气流,绒毛输送速度波动控制在 $\pm 5\%$ 以内,避免了传统重力下料导致的堆积或断流问题,为精准植绒奠定基础。

(二) 动力系统高效化与智能化

动力单元采用低惯量伺服电机搭配一体化驱动器,伺服电机功率密度达1.8千瓦/千克,较传统电机提升60%,支持0至3000转/分钟无级调速,满足植绒频率50至150次/分钟的宽范围调节。针对针床往复运动的周期性动能变化,设计基于IGBT模块的能量回收系统:当电机处于制动状态时,再生电能通过逆变器转换为直流母线电压,经超级电容储能后,供加热系统或其他轴系使用,实测能量回收率达18%,相当于每小时回收电能1.2千瓦时。多电机协同控制采用EtherCAT总线,通信周期100微秒,主控制器实时计算基布传送轴与针床运动轴的速度匹配关系,通过相位补偿算法确保两者同步,误差控制在0.1毫秒以内,避免因速度失配导致的绒毛偏移,偏移量从 ± 1 毫米降至 ± 0.2 毫米。

(三) 控制系统集成化与自适应

以西门子S7-1200PLC为核心构建控制系统,集成多种检测元件:基布张力传感器量程0至500牛,精度0.5%FS,实时监测张力波动,避免因张力不均导致的基布拉伸变形;绒毛浓度传感器基于激光散射原理,分辨率0.1毫克/立方米,检测输送管道内的绒毛密度,确保植入量稳定;电机电流传感器精度1%,实时监控能耗状态,为能效优化提供数据支撑。自适应控制算法包含三个调节模块:基布补偿模块在张力波动超过3%时,通过模糊PID算法自动调整针床植

入深度,调节步长0.01毫米;绒毛调节模块在浓度传感器反馈值低于设定阈值时,按0.5赫兹步长增加振动料斗频率,直至浓度达标;能耗优化模块根据实时功率曲线,动态调整电机扭矩补偿系数,范围0.8至1.2,使系统始终运行在高效区,效率不低于90%。人机界面集成数据追溯功能,可存储30天内的工艺参数与检测数据,支持历史曲线对比,方便质量追溯与工艺改进。

三、关键技术创新与实现路径

(一) 植绒针床运动轨迹优化

传统正弦曲线运动在加速度换向时存在二阶导数突变,导致机械振动与植入偏差。新型设计采用“梯形加速度-S型过渡”复合轨迹:将运动过程分为加速段、匀速段、减速段,加速段与减速段采用五次多项式S型曲线,加速度变化率控制在10米/秒³以内,匀速段加速度为零。通过拉格朗日动力学方程建立针床运动模型,优化后最大加速度从2米/秒²降至1.5米/秒²,冲击载荷从800牛降至300牛,配合阻尼缓冲装置,采用聚氨酯弹性体,阻尼系数0.3,振动幅值从1.2克降至0.3克,噪声水平控制在72分贝以下。针床植入深度调节机构采用电动推杆,行程20毫米,精度0.01毫米,通过编码器反馈形成闭环控制,针对0.5毫米短绒与3毫米长绒,植入深度可分别精确控制在 0.6 ± 0.05 毫米与 2.1 ± 0.05 毫米,确保绒毛根部完全嵌入基布,提升固结强度,拉拔力从1.2牛/根提升至1.5牛/根。

(二) 绒毛高效利用技术

针对传统设备绒毛浪费问题,设计“三级过滤-闭环回收”系统:一级过滤采用孔径0.5毫米的金属筛网,去除绒毛中的杂质;二级过滤使用气动分选装置,利用不同长度绒毛的空气动力学特性,分离出长度不合格的短绒,剔除率不低于98%;三级回收通过负压风机收集植绒区域未植入的绒毛,经旋风分离器与布袋除尘器净化后,返回料斗循环使用。静电植绒模块配置可调高压电源与距离传感器,高压电源输出0至50千伏,分辨率100伏,距离传感器量程0至100毫米,精度0.1毫米,基于库仑定律建立电场强度与绒毛取向模型,根据基布导电性自动调整电压:基布为导电性材料时降低电压至20至30千伏,避免过强电场导致绒毛击穿;基布为绝缘材料时提升电压至40至50千伏,增强吸附力。实测数据显示,绒毛循环利用率从85%提升至95.2%,每生产1000平方米地毯可减少绒毛损耗15千克,按绒毛单价100元/千克计算,年节约成本可观。

(三) 能耗协同优化策略

电机系统能耗占比达70%,新型设备采用“需求匹配+能量回收”双策略:硬件层面,伺服电机采用矢量控制技术,实时计算负载扭矩,精度 $\pm 3\%$,低负荷时自动切换至节能

模式,电机转速降至额定值的40%,功率因数从0.7提升至0.95;软件层面,开发能效监测算法,每5秒采集一次电机电流、电压、转速数据,通过公式计算实时效率,当效率低于85%时,自动调整电机参数,如转子磁链、转差频率,使系统始终运行在高效区间。加热系统采用红外辐射加热,波长2至5微米,相较于传统电阻丝加热,热效率从60%提升至90%,加热功率从15千瓦降至10千瓦,温度响应时间从300秒缩短至100秒,温度控制精度达 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,避免过度加热导致的能源浪费,传统设备常因温度超调浪费10%至15%的电能。

四、性能分析与理论验证

(一) 效率提升机制分析

新型植绒机的效率提升源于多维度优化:机械运动优化使针床往复频率从80次/分钟提升至120次/分钟,配合基布传送速度从5米/分钟提升至8米/分钟,单位时间产能从40平方米/小时提升至60平方米/小时,增幅30%;绒毛输送系统的稳定性减少了因堵塞或断流导致的停机次数,从4次/班降至0.5次/班,设备利用率从75%提升至88%;智能控制系统实现了工艺参数的自动匹配,更换产品时参数调整时间从15分钟缩短至3分钟,换型效率提升80%。以年产10万平方米的生产线为例,新型设备年运行时间可减少约200小时,显著提高设备产能。

(二) 植入质量量化评估

通过自主开发的视觉检测系统对植绒质量进行多指标检测:植绒密度采用网格采样法,在10厘米 \times 10厘米区域内计算绒毛数量,新型设备的密度均匀性标准差从传统设备的15根/平方厘米降至6根/平方厘米,合格率即目标密度 $\pm 5\%$ 的比例从82%提升至96%;绒毛垂直度通过激光三角测量法检测,精度0.5度,垂直度不低于85度的绒毛占比从80%提升至92%,有效减少绒毛倒伏导致的视觉瑕疵;表面

均匀性采用机器视觉算法计算灰度方差,方差值从0.25降至0.12,表明绒毛分布更一致。在耐磨测试中,按GB/T40856-2021标准进行5000次摩擦,新型设备生产的地毯绒毛脱落量为1.2克/平方米,较传统工艺的1.7克/平方米减少29.4%,耐磨性能提升显著。

(三) 能耗对比与经济性分析

选取同规格传统植绒机与新型设备进行能耗测试,传统机型额定功率45千瓦,效率70%;新型设备额定功率32千瓦,效率90%并具备18%能量回收:满负荷工况下,传统机型每小时耗电31.5千瓦时,新型设备耗电25.6千瓦时,含回收电能4.5千瓦时,节能率21.9%;平均工况负荷率60%时,传统机型耗电24千瓦时/小时,新型设备耗电16.8千瓦时/小时,节能率30%。按每天运行16小时、每年300天计算,新型设备年节电27360千瓦时,折合电费约2.19万元(按0.8元/千瓦时计算)。尽管新型设备初期成本较传统设备增加20%,但通过能耗节约与产能提升,投资回收期可控制在2至3年,且设备寿命周期内维护成本降低30%,主要得益于柔性传动机构减少机械磨损,传感器与智能诊断系统提前预警故障,避免突发停机损失。

五、结论

高效节能型地毯植绒机的研发通过机械结构创新、动力系统升级与智能控制技术融合,有效解决了传统设备能耗高、效率低、质量波动大的问题。理论分析与性能验证表明,该设备在节能降耗、产能提升、质量控制等方面均展现出显著优势,为地毯植绒行业的绿色化、智能化发展提供了可行的技术方案。未来可进一步探索与工业互联网的深度融合,通过云端数据平台实现设备远程监控与工艺参数优化,结合数字孪生技术预判设备故障,推动植绒生产向更高效、更智能的方向迈进。

参考文献

- [1]周虎,刘涛,高金杰,等.手工地毯植绒机轨迹规划及其速度控制优化[J].纺织学报,2019,40(10):177-182.DOI:10.13475/j.fzxb.20180903406.
- [2]邢永杰.手工地毯植绒机器人控制系统开发[D].东华大学,2018.
- [3]刘家林.毯织物自动植绒软件的设计与开发[D].浙江工业大学,2017.[1]刘家林.毯织物自动植绒软件的设计与开发[D].浙江工业大学,2017.
- [4]黄超华.基于图像识别的织物枪刺植绒轨迹规划系统研究[D].东华大学,2017.
- [5]嵇洪昌.全数字化织物枪刺植绒机器人控制系统研究[D].东华大学,2015.
- [6]司润林.自动化技术在纺织机械设计制造中的应用研究[J].鞋类工艺与设计,2025,5(03):5-7.
- [7]郭蕴姬.纺织机械互联互通研究[J].纺织机械,2024,(06):56-59.