

IV. Технологии, материаловедение, энергоэффективность

For citation: Ai Di. Optimization design of brush rollers for potato peeling machines // Grand Altai Research & Education — Выпуск 1 (26)'2026 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2026.01) — EDN: <https://elibrary.ru/JPTQJU>

UDK 62.231

OPTIMIZATION DESIGN OF BRUSH ROLLERS FOR POTATO PEELING MACHINES

Ai Di¹

¹ Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430073, China

E-mail: 2904525894@qq.com

Abstract. Aiming at the problems existing in the practical application of potato peeling machines, such as low peeling efficiency, high damage rate and severe wear of key components, this study takes the brush roller, the core component of the peeling machine, as the optimization object. Combined with mechanical analysis and material properties, a corresponding optimal design scheme is proposed. According to the design requirements, lightweight design is carried out for the brush roller to reduce its mass, and a mathematical model for optimal design is established. Various constraints include speed limit, stiffness condition, power limit, torsional strength limit and boundary condition limit. The optimal dimensions are obtained by running the corresponding program in MATLAB software. Then, the optimal design is carried out based on the optimal design theory, and finite element analysis is performed on the brush roller.

Keywords: Brush Roller; Optimal Design; Finite Element Analysis (FEA); Lightweight Design

马铃薯去皮机毛刷辊的优化设计与模拟仿真

艾迪¹

¹ 武汉纺织大学, 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 中国武汉 430073

E-mail: 2904525894@qq.com

摘要: 针对马铃薯去皮机在实际应用中存在的去皮效率低, 损伤率高及关键零件磨损严重等问题, 本研究以去皮机的核心部件毛辊刷为优化对象, 结合力学分析与材料特性, 提出对应优化设计方案. 根据设计要求, 对毛辊进行轻量化设计, 减轻质量, 建立优化设计数学模型, 各种约束条件包括转速限制, 刚度条件, 功率限制, 抗扭强度限制以及边界条件限制等, 通过 MATLAB 软件运行相应程序得到最佳尺寸, 再利用优化设计理论进行优化设计, 并对毛辊开展有限元分析

关键词: 毛辊刷; 优化设计; 有限元分析; 轻量化设计

0 引言

马铃薯去皮机关键零件的优化设计与模拟仿真研究对提升设备性能, 降低成本和促进行业发展具有重要意义, 具有广阔的应用前景 [1]. 计算机模拟仿真技术通过虚拟样机测试和性能预测, 显著缩短开发周期, 降低式样成本 [2]. 通过文献查阅和分析, 寻求马铃薯去皮机机械部分优化设计和有限元模拟分析的方案, 运用所学专业知识对已有设计方案进行分析比较, 并根据分析比较结果提出自己的优化设计方案, 用于弥补已有方案的缺陷和不足.

本文根据原结构毛辊刷基本参数设计优化相应毛辊刷, 增强设备耐用性与安全性 [3]. 通过已经给出的以及参考文献中得出相关参数对毛辊刷进行轻量化设计, 将其毛辊刷直径减少或者空心设计以此来降低设备成本和重量; 在保证去皮

效率与质量的前提下进行材料优化, 采用耐磨尼龙线绳或加硬刷丝, 经过强度刚度等约束条件下选择更合理的材料; 再对受力最重的毛辊刷进行运用. 用 MATLAB 进行验算得出最优解; 最后将优化后的毛辊刷进行有限元模态分析, 静力学分析等检验是否合理.

1 毛辊刷的轻量化设计

1.1 设计参数与目标

已知参数: 外径 $D=80\text{mm}$ 跨径 $L=910\text{mm}$ 材料为 不锈钢 (E 为 193GPa , ρ 为 7930kg/m^3 , 屈服强度为 205MPa , 泊松比为 0.3) 工作转速 $n=150\text{rpm}$ 深沟球轴承 6205 (内径 25mm , 需确保轴径 $\geq 25\text{mm}$) 每次投入量为 $30\sim 40$ 千克.

优化目标: 最小化质量 m 满足刚度 (最大挠度 $\delta_{\max} \leq L/500 \approx 1.82\text{mm}$), 满足轴承负载约束.

1.2 轻量化设计方案选择

优化变量: 直径 d (该工况下大多数直径在 $40\sim 80\text{mm}$ 间) 或者空心化设计. 材料选择: 增强原有材料保证其满足约束条件. 优化方法: 使用 MATLAB 求解最小质量 m 下的最优直径.

表 1 各部位毛刷受力参数

Table 1 Stress Parameters of Brushes in Each Part

毛辊位置	静态受力 (30~40k 负总载)	动态受力 (含摩擦)
底层 1 根	15-24kg	18-31kg
单侧 2 根	2-3.3kg/根	2.5-4kg/根
距底层较近一根	10-12kg	12-15kg

由上表参数设底层毛辊刷受重 250N , 旁边较近侧边毛辊刷受重约为 150N , 剩下侧边毛辊刷受力较轻受重约为 50N .

表 2 原毛刷设计参数检验

Table 2 Inspection of Original Brush Design Parameters

约束条件	要求值	实际值	验证结果
刚度 (挠度)	$\leq 1.82\text{mm}$	0.049mm	满足
强度 (弯曲应力)	$\leq 205\text{MPa}$	1.13MPa	满足
抗扭强度	$\leq 102.5\text{MPa}$	1.39MPa	满足
临界转速	$\geq 225\text{rpm}$	1120rpm	满足
轴承负载	$\leq 14\text{kN}$ (6205 轴承)	250N	满足

由此可得材料利用率不足, 当前设计的安全裕度过高, 导致材料有一定浪费. 选择减少直径轻量化设计.

1.3 毛刷辊减少直径轻量化设计

去皮机买刷辊工作转速设置根据使用量为每小时 200 千克设定为 150rpm .

在 U 型马铃薯去皮机中, 7 根毛辊刷采用 U 型对称排列 (最底层 1 根, 两侧各 3 根对称分布) 对不同位置买刷辊分别进行轻量化优化, 输入原始参数和约束, 用 MATLAB 代码进行运行得到最优的直径.

表 3 直径优化结果

Table 3 Diameter Optimization Results

毛辊位置	受力	最优直径
最底层毛刷辊	200N	72.5mm
侧边毛刷辊	150N	68.3mm
受力最轻毛刷辊	50N	62.4mm

2 毛辊刷的刷丝优化设计

2.1 毛辊刷刷丝长度的选择

在 U 型毛辊刷马铃薯去皮机中, 刷丝的参数设置直接影响去皮效率, 清洁效果和马铃薯损伤率. 刷丝长度与直径有关, 刷丝的长度设置不宜过长, 过长会高速旋转易导致刷丝倒伏, 降低摩擦效率; 增加电机负载, 能耗上升. 也不宜过短, 过短会导致土豆去皮不均, 效率低. 所以当减少直径时, 刷丝长度也随之改变.

刷丝尖端最小间距=中心距-毛辊直径-2×刷丝伸出长度.

当直径为 75 毫米时, 刷丝总长度为 18 到 20 毫米, 植入长度为 8 毫米, 伸出长度 12 到 14 毫米. 当直径为 70 毫米时, 刷丝总长度为 22 到 25 毫米, 植入长度 8 毫米, 伸出长度为 14 到 17 毫米. 当直径为 65 毫米时, 刷丝总长度为 27 到 30 毫米, 植入长度为 8 毫米.

表 4 常规刷丝长度参考表

Table 4 Reference Table of Conventional Brush Filament Lengths

毛辊刷直径 (mm)	刷丝长度 (mm)	适用场景
40-60	20-40	小型去皮机, 轻柔处理
60-80	30-50	标准马铃薯去皮机
80-100	40-70	大型去皮机

2.2 刷丝的排列分布方式

马铃薯表面常有不规则凹陷和芽眼, 在马铃薯去皮机中使用波浪型毛辊刷 (而非传统的直毛辊刷) 能显著提升去皮率, 降低损耗, 并适应不同形状的马铃薯. 通过增强摩擦接触, 波浪型刷毛的起伏结构能更紧密地贴合马铃薯表面, 提升摩擦去皮的均匀性, 减少未去皮斑块. 动态清洁效果好, 刷毛的波浪排列在旋转时产生微振动, 更容易松动并剥离马铃薯皮, 尤其适合表皮较厚或带泥土的品种. 毛刷辊波浪形毛刷局部建模如图 1.

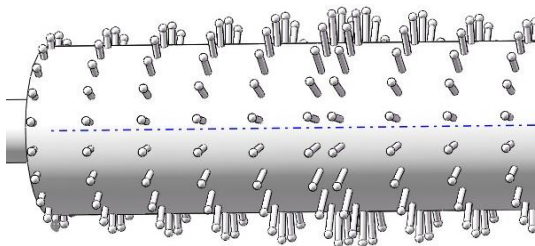


图 1 毛刷辊建模局部图
Figure 1. Partial view of brush roll modeling

3 毛辊刷的有限元分析

3.1 毛刷辊静态结构分析

以底层毛刷辊为例, 直径为 75 毫米, 载荷为 250N 的毛刷刷, 电机产生的力矩为 140000N.mm, 压力 P 为 0.034MPa 接触宽度为 10mm, 接触长度取跨径的 80%, 即 $L=728\text{mm}$. 将载荷与约束参数施加与毛刷辊的建模上如图 2, 用 ANSYS 静力学分析底层毛刷辊静态结构分析的结果如图 3 和图 4 所示.

B: 静态结构
静态结构
时间: 1 s

A 固定支撑
B 固定支撑 2
C 压力: $3.43\text{e-}002\text{ MPa}$
D 力矩: $1.4\text{e+}005\text{ N-mm}$

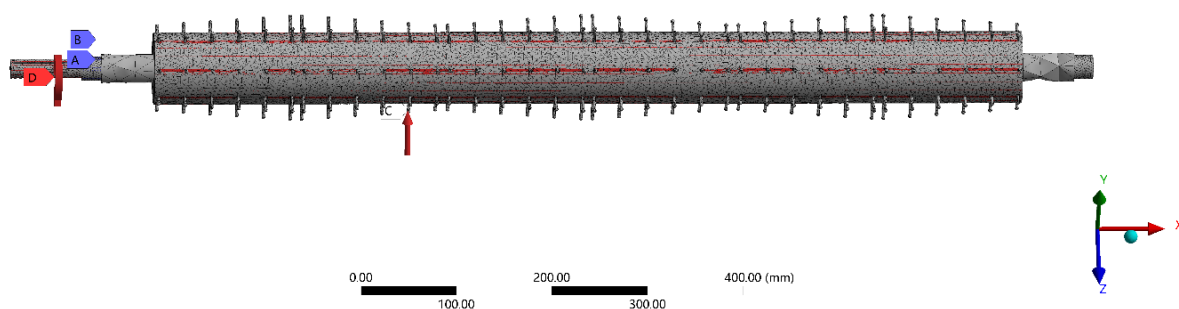


图 2 载荷与边界约束图

Figure 2. Load and boundary constraint diagram

B: 静态结构
等效弹性应变
类型: 等效弹性应变
单位: mm/mm
时间: 1 s

0.0010201 最大
0.00090679
0.00079344
0.00068009
0.00056674
0.0004534
0.00034005
0.0002267
0.00011335
1.2062e-12 最小



图 3 总变形图

Figure 3. Total deformation diagram

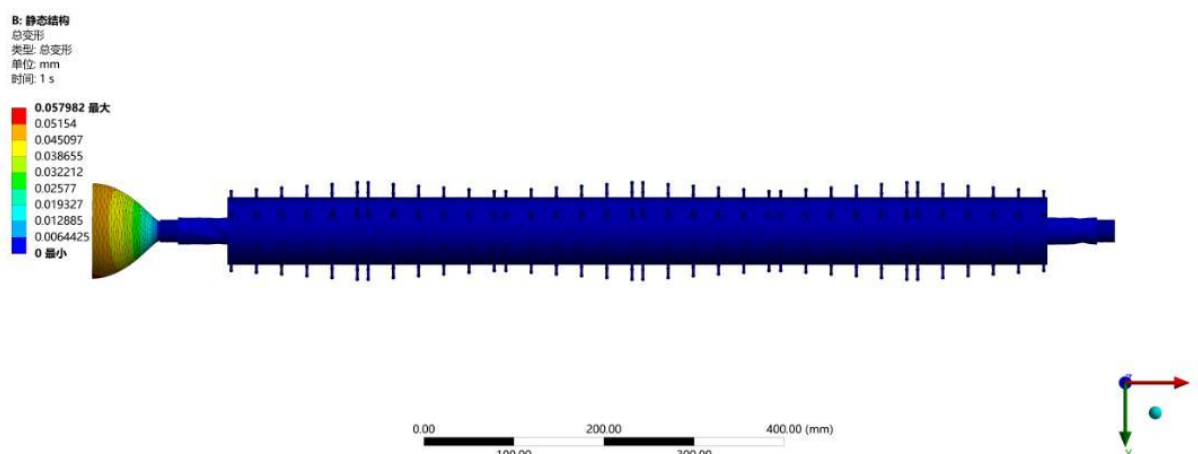


图 4 等效弹性应变图

Figure 4. Equivalent elastic strain diagram

结果评估: 最大应力为 201MPa 低于材料许用应力 205mpa, 结果符合要求, 设计合理. 其变形量满足设计要求. 另外两种直径的毛刷辊经过相同的静态分析均满足设计使用要求.

3.2 毛刷辊模态分析

模态分析前期将原静态结构分析的模型和结果导入模态分析模块中. 确保模态分析能够基于准确的模型和数据进行, 从而提高了分析结果的可靠性. 在导入模型后, 设置参数包括模态提取方法, 求解频率范围, 模态阶数等.

经过模态分析, 从中获得了马铃薯去皮机底层毛刷辊的前六阶模态振型及其对应的固有频率. 这些模态振型能够反映毛刷辊在不同频率下的振动形态, 而固有频率则是毛刷辊在自由振动状态下的固有属性, 对于评估其动态性能具有重要意义. 马铃薯去皮机毛刷辊的前六阶模态分析结构如表 5. 由表可知其固有频率对应的转速 (频率 $\times 60$) 均大于或远离工作转速 150rpm, 所以不易发生共振.

表 5 模态分析结果

Table 5 Modal Analysis Results

振型	固有频率 (HZ)
一阶	164.91
二阶	165.17
三阶	449.32
四阶	575.37
五阶	575.83
六阶	1133.2

另外两中毛刷辊的模态分析采用一样的方法, 分析得所有毛刷辊的固有频率对应的转速均大于或远离工作转速 150rpm, 所以不易发生共振. 故在优化后的毛刷辊正常工作的条件下均不会发生共振.

4 结论

本文对马铃薯去皮机关键零件毛刷辊进行轻量化设计, 首先检验原结构毛刷辊的各约束条件, 看其是否符合, 发现安全裕度过高, 进行减少直径进行轻量化, 通过运用 MATLAB 优化设计流程, 有限元分析技术, 对马铃薯去皮机的关键零件 — 毛刷辊进行了全面而深入的研究. 通过运用 MATLAB 软件设计毛刷辊轻量化的最佳尺寸, 减少计算时间, 缩短开发周期, 降低人工成本. 通过 ANSYS 软件对毛刷辊进行了静态结构分析和模态分析, 发现优化后的毛刷辊基本符合

相关约束条件的限制 [4]. 通过在 SOLIDWORKS 构建毛辊刷的三维立体模型, 分析其不同工况下的应力, 应变和位移情况, 进行了较为全面的分析, 揭示了马铃薯去皮机毛辊刷在实际工作环境中的力学行为表现, 并准确识别了潜在的力学风险点 [5]. 此外, 本文还深入探讨了马铃薯去皮机毛辊刷的振动模态特性, 得到其前六阶振型, 获得了各阶振型对应的固有频率, 通过公式获得对应的转速, 与实际转速相比较, 得出在工况下很难发生共振现象的结论.

参考文献

- [1] 姚齐, 张影. 马铃薯去皮机简介 [J]. 现代化农业, 2010, (08):36.
- [2] 恽亚刚. 计算机模拟技术的发展及其应用 [J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(12):82-84.
- [3] Saxena C.A., Ganesan S., Singh D., et al. Production Refinement of Potato Peeler and Slicer for Ease of Manufacturing [J]. Agricultural Engineering Today, 2016, 40(2):17-23.
- [4] 徐同强, 司朝兵, 钱诗进. 基于 ANSYS 与 Solidworks Simulation 的轴承通用支撑结构设计方案与应力分布的对比研究 [J]. 纺织机械, 2024, (06):64-66.
- [5] 郭树君. 有限元分析在机械结构抗振性能提升中的应用 [J]. 中国机械, 2025, (09):113-116.

References

- [1] Yao Qi, Zhang Ying. Brief Introduction to Potato Peeling Machines [J]. Modernizing Agriculture, 2010, (08): 36.
- [2] Yun Yagang. Development and Application of Computer Simulation Technology [J]. Paper Manufacturing Equipment & Materials, 2021, 50(12): 82-84.
- [3] Saxena C.A., Ganesan S., Singh D., et al. Production Refinement of Potato Peeler and Slicer for Ease of Manufacturing [J]. Agricultural Engineering Today, 2016, 40(2): 17-23.
- [4] Xu Tongqiang, Si Chaobing, Qian Shijin. Comparative Study on Design Scheme and Stress Distribution of General Bearing Support Structure Based on ANSYS and Solidworks Simulation [J]. Textile Machinery, 2024, (06): 64-66.
- [5] Guo Shujun. Application of Finite Element Analysis in Improving Vibration Resistance Performance of Mechanical Structures [J]. China Machinery, 2025, (09): 113-116.