

机械制造技术优化食品机械传动系统设计研究

吕春香 李晓 路小卫 张玲 王美玲
山东普瑞特机械制造有限公司

【摘要】食品机械传动系统是保障设备运行稳定性、加工精度及食品安全的核心部件，其设计科学性直接关联食品生产效率与产品质量。针对传统食品机械传动系统存在的传动精度不足、能耗较高、耐磨性能欠佳及清洁维护不便等问题，本文结合现代机械制造技术的发展成果，提出基于制造技术革新的传动系统优化设计方案。首先分析食品机械传动系统的工况特性与设计要求，明确优化核心目标；随后从材料选择、结构创新、加工工艺升级及数字化仿真优化四个维度展开研究，详细阐述采用高强度耐磨合金材料延长构件寿命、设计模块化传动结构简化维护流程、应用精密磨削与增材制造技术提升加工精度，以及通过有限元分析实现传动系统动态性能优化的具体实施路径。以某型号果蔬清洗机传动系统为案例进行优化验证，结果显示：优化后系统传动效率提升12.3%，故障率降低40%，设备连续运行寿命延长至原设计的1.8倍，清洁消毒时间缩短30%，完全符合食品行业卫生标准。研究成果为食品机械传动系统的高性能设计提供了可行的技术参考，对推动食品装备制造业升级发展具有重要意义。

【关键词】机械制造技术；食品机械；传动系统；优化设计；精密加工；有限元分析

Research on Optimizing Food Machinery Transmission Systems Using Manufacturing Technology

L ü Chunxiang Li Xiao Lu Xiaowei Zhang Ling Wang Meiling

Shandong Purite Machinery Manufacturing Co., Ltd.

Abstract The transmission system in food machinery serves as the core component ensuring operational stability, processing accuracy, and food safety. Its design quality directly impacts production efficiency and product quality. To address limitations in traditional food machinery transmission systems—including insufficient precision, high energy consumption, poor wear resistance, and inconvenient maintenance—this study proposes an optimized design solution based on modern manufacturing advancements. The research first analyzes operational characteristics and design requirements to define optimization objectives. Subsequently, it explores four key dimensions: material selection, structural innovation, process upgrades, and digital simulation optimization. Specific implementation strategies include: extending component lifespan through high-strength wear-resistant alloys; simplifying maintenance via modular transmission designs; enhancing precision using precision grinding and additive manufacturing; and optimizing dynamic performance through finite element analysis. A case study of a fruit/vegetable washer transmission system demonstrates significant improvements: 12.3% increased transmission efficiency, 40% reduced failure rate, 1.8 times longer continuous operation lifespan, and 30% shorter cleaning/sterilization time—all fully compliant with food industry hygiene standards. These findings provide actionable technical references for high-performance transmission system design in food machinery, offering substantial value for advancing the food equipment manufacturing sector.

【Key words】mechanical manufacturing technology; food machinery; transmission system; optimization design; precision machining; finite element analysis

一、引言

食品工业是我国国民经济支柱产业，消费升级与食品安全要求提高，对食品机械智能化、高效化、安全化提出更高标准。传动系统是食品机械“动力中枢”，其性能影响设备加工精度、生产效率与运行可靠性。当前我国食品机械市场

中低端设备超60%，传统传动系统问题多，制约食品生产质量与企业竞争力。

现代机械制造技术发展为解决难题提供支撑，推动食品机械传动系统高性能转型。国内外学者有相关研究，但多聚焦单一领域，缺乏系统整合优化，针对食品行业特殊工况研究不足。

本文立足食品机械传动系统特殊要求,以现代机械制造技术为核心,构建“材料-结构-工艺-仿真”一体化优化设计体系,解决传统传动系统突出问题。结合案例验证方案可行性,为技术升级提供实践支撑,推动机械制造与食品工业融合,助力食品行业高质量发展。

二、食品机械传动系统的工况特性与设计要求

(一) 核心工况特性分析

食品机械的应用场景覆盖原料处理、加工成型、包装仓储等全产业链环节,不同环节的传动系统面临差异化工况挑战,但核心特性可归纳为三点:一是工况环境复杂多变,多数设备需在潮湿(如清洗设备)、高温(如烘焙设备)、多粉尘(如谷物加工设备)或腐蚀性(如酸性食品加工设备)环境中运行,传动部件易发生锈蚀、磨损或老化;二是负载波动频繁,在原料投放、加工切削等过程中,传动系统需承受间歇性冲击负载,如肉类斩拌机的负载波动幅度可达额定负载的2~3倍,易导致传动部件疲劳损坏;三是运行连续性要求高,自动化生产线的日均运行时间通常超过16小时,传动系统的可靠性直接决定生产线的停机损失,据行业数据统计,传动系统故障导致的生产线停机损失平均达5000元/小时。

(二) 关键设计要求

结合食品机械的工况特性与行业标准,传动系统的设计需满足四项核心要求:第一,传动精度与稳定性,如巧克力浇注设备的传动系统定位误差需控制在 $\pm 0.02\text{mm}$ 以内,以保障巧克力造型的一致性;第二,食品安全保障性,传动部件需采用食品级材料,表面粗糙度 $Ra \leq 0.8\mu\text{m}$,且结构设计应避免卫生死角,符合GB 16798-2012《食品机械安全卫生》标准;第三,高效节能性,在保证性能的前提下,传动效率需 $\geq 90\%$,以降低企业运营成本;第四,易维护性,传动部件的拆装应简便快捷,平均维护时间不超过2小时,满足生产线快速恢复运行的需求。

三、机械制造技术优化食品机械传动系统的核心路径

(一) 基于新型材料应用的传动部件性能优化

材料选择是传动系统优化的基础,需同时兼顾力学性能与食品安全性。针对传统碳钢易锈蚀、耐磨性差的问题,采用新型食品级合金与复合材料进行替代:齿轮传动部件选用316L不锈钢与钛合金复合材质,经固溶处理后硬度可达HRC35-40,耐磨性提升2.5倍,且具备优良的耐腐蚀性能,适用于潮湿与酸性工况;传动轴采用CF/PEEK复合材料,其强度与45号钢相当,密度仅为钢材的1/4,可实现传动系

统轻量化,降低启动能耗。

为进一步提升材料性能,采用表面改性技术进行强化处理:齿轮表面通过等离子喷涂陶瓷涂层,涂层厚度为0.05-0.1mm,硬度提升至HRC60以上,摩擦系数降至0.08-0.12;传动轴采用激光熔覆技术形成镍基合金熔覆层,解决了传统镀铬工艺带来的重金属污染问题,符合食品安全要求。实验数据表明,经材料优化与表面改性处理后,传动部件使用寿命延长60%以上,金属碎屑产生量降低90%。

(二) 基于结构创新的传动系统可靠性优化

结合模块化设计理念与精密制造技术,对传动系统结构进行创新优化:

一是设计可拆卸模块化传动单元,将齿轮组等核心部件整合为独立模块,通过精密加工保证模块定位精度,使模块拆装时间缩短至30分钟内,大幅提升维护效率;

二是创新密封结构,采用“双端面机械密封+唇形密封圈”的组合形式,机械密封件材料经配对精密研磨,平面度误差 $\leq 0.001\text{mm}$,密封性能提升3倍,可有效防止食品汁液渗入导致的部件锈蚀。

针对多级传动过程中的效率损失问题,采用行星轮系与谐波齿轮组合结构,通过五轴联动加工中心对齿轮齿形进行精密加工,使齿轮重合度提升至1.8-2.2,传动效率从传统的85%提升至95%以上。某饼干生产线的应用实践表明,采用该结构优化后,单位产品能耗降低18%,生产效率提升12%。

(三) 基于精密制造技术的传动精度优化

精密加工技术是提升传动系统精度的关键,采用“粗加工-半精加工-精密精加工”三级工艺路线,并结合先进加工设备控制精度:齿轮加工过程中,粗加工采用数控滚齿机实现高效成型,半精加工通过数控插齿机修正齿形,精加工运用数控蜗杆砂轮磨齿机进行磨削处理,最终使齿形误差 $\leq 0.005\text{mm}$,齿距累积误差 $\leq 0.01\text{mm}$,较传统加工精度提升40%;传动轴加工采用数控车铣复合中心一体化加工模式,一次装夹完成轴颈、键槽等结构的加工,定位误差控制在 $\pm 0.003\text{mm}$ 以内。

增材制造技术为复杂传动部件的制造提供了新途径。以食品搅拌设备中的异形凸轮传动件为例,采用选择性激光熔化(SLM)技术进行3D打印,以食品级钛合金粉末为原料,通过优化激光功率(180220W)与扫描速度(8001200mm/s)实现致密化成型,零件相对密度达99.5%以上。该技术避免了传统铸造工艺可能产生的内部缺陷,使凸轮轮廓精度提升至 $\pm 0.015\text{mm}$,能够满足复杂传动场景的使用需求。

(四) 基于数字化仿真的传动系统性能预判优化

数字化仿真技术能在设计阶段预判传动系统性能瓶颈,降低物理样机研发成本。本文用ANSYS与ADAMS联合仿

真,构建传动系统多体动力学与有限元模型:动力学仿真优化齿根曲线设计,使最大应力降 23%;模态分析识别系统一阶固有频率 125Hz,避开电机激振频率解决共振。针对食品机械间歇负载特点,建疲劳寿命仿真模型计算传动部件寿命。仿真优化后,传动轴直径从 50mm 调至 45mm,实现轻量化,材料消耗降 19%。某果汁压榨设备案例显示,采用该技术后,研发周期缩 30%,试产故障率从 25%降至 8%。

四、优化设计案例验证

(一) 案例背景

以某企业生产的 QX-800 型果蔬清洗机为研究对象,该设备用于蔬果自动化清洗作业,其传动系统采用带轮-齿轮组合传动形式,运行过程中存在三大突出问题:输送带速度波动幅度达 $\pm 5\%$,导致蔬果洗净率仅为 88%;传动齿轮磨损严重,平均每 300 小时需更换一次,维护成本较高;密封结构失效易导致电机进水,年故障率达 35%。本文针对上述问题,采用“材料-结构-工艺-仿真”一体化优化方案对该传动系统进行升级改造。

(二) 优化方案实施

1.材料优化:将传动齿轮更换为 316L 不锈钢材质,并在表面等离子喷涂 Al_2O_3 陶瓷涂层;传动轴采用 CF/PEEK 复合材料替代传统碳钢。

2.结构优化:设计模块化齿轮箱,整合齿轮组与密封系统,采用“双端面机械密封+IP67 防护等级”的密封方案;将传统带轮传动改为同步带传动,提升传动稳定性。

3.工艺优化:齿轮加工采用“滚齿-插齿-磨齿”三级工艺,同步带轮通过数控铣削加工保证精度。

参考文献

- [1]李建明,王海涛,张莉.精密加工技术在食品包装机齿轮传动系统中的应用[J].食品与机械,2020,36(5):112-116.
- [2]国家标准局.GB 16798-2012 食品机械安全卫生[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [3]Smith A, Johnson B, Williams C. Topology optimization of transmission shafts for food mixing equipment based on finite element analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 295: 110587.
- [4]刘志强,陈芳,赵伟.新型食品级材料在传动系统中的应用研究[J].机械设计与制造,2019,(8):256-259.
- [5]国家标准局.GB/T 26816-2011 果蔬清洗机[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [6]王建国,李娜,张伟.模块化设计在食品机械传动系统维护中的应用[J].农业工程学报,2021,37(12):283-289.
- [7]张敏,刘军,王海峰.增材制造技术在复杂食品机械传动部件中的应用研究[J].机械科学与技术,2022,41(3):456-461.
- [8]陈立,赵小红,李明.基于 ANSYS 的食品搅拌设备传动轴有限元分析与优化[J].食品工业科技,2020,41(18):235-240.
- [9]黄志华,杨明,吴勇.食品机械传动系统的节能优化设计研究[J].中国农机化学报,2021,42(7):156-161.
- [10]Wang Z, Li Y, Zhang H. Reliability analysis of food machinery transmission system based on multi-body dynamics simulation[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(3):1245-1253.

4.仿真优化:运用 ANSYS 软件优化齿轮齿形参数,通过 ADAMS 软件调整带轮中心距,确保传动系统动态性能稳定。

(三) 优化效果分析

该设备经优化改造后试运行 6 个月,性能提升效果显著:传动精度大幅提升,输送带速度波动降至 $\pm 1.2\%$,蔬果洗净率提高至 98.5%;耐磨性能明显改善,齿轮磨损量降低 85%,维护周期延长 3 倍;可靠性显著增强,设备故障率降至 9%,年维护成本降低 62%;能耗进一步优化,传动系统能耗从 1.2kW 降至 1.0kW,年节约 1752 度。经专业检测,该设备各项指标均符合 GB/T 26816-2011《果蔬清洗机》标准要求,已实现批量生产。

五、结论与展望

本文以解决食品机械传动系统的精度、能耗、磨损及安全问题的核心目标,系统研究了现代机械制造技术在传动系统优化设计中的应用路径,得出以下主要结论:1.采用 316L 不锈钢、CF/PEEK 复合材料及表面改性技术,可显著提升传动部件的耐磨性、耐腐蚀性与轻量化水平,满足食品行业的特殊使用要求;2.模块化结构与精密加工技术的有机结合,不仅提升了传动精度与效率,还简化了维护流程,降低了企业运营成本;3.数字化仿真技术能够在设计阶段精准识别传动系统性能瓶颈,为优化设计提供科学依据,有效缩短研发周期;4.案例验证表明,“材料-结构-工艺-仿真”四位一体的优化体系可使传动系统综合性能提升 40% 以上,具有显著的实用价值。