

家电机械运动设计及仿真分析在产品质量提升中的作用

何领民

身份证号: 440681198408274857

DOI:10.61369/ME.2025030007

摘要: 阐述家电机械系统设计相关内容,包括机械运动学、流体力学原理应用,如齿轮传动等典型传动系统运动方程推导及流体运动控制方程建立。还涉及多种家电产品设计,如滚筒洗衣机、吸尘器等,强调各关键技术协同优化及相关技术未来发展方向。

关键词: 家电机械系统;设计;仿真

The Role of Mechanical Motion Design and Simulation Analysis in Household Appliance Quality Enhancement

He Lingmin

ID: 440681198408274857

Abstract: This paper elaborates on the design of mechanical systems for household appliances, encompassing applications of mechanical kinematics and fluid dynamics principles, such as the derivation of motion equations for typical transmission systems (e.g., gear drives) and the establishment of fluid motion control equations. It covers the design of various appliances, including drum washing machines and vacuum cleaners, highlighting the synergistic optimization of key technologies and future development directions.

Keywords: household appliance mechanical systems; design; simulation

引言

随着科技的不断发展,家电行业对产品质量和性能的要求日益提高。2023年发布的相关产业政策强调了通过技术创新提升家电产品竞争力的重要性。在家电机械系统设计中,涉及机械运动学、流体力学等多方面理论知识。从家电机械系统的各个部件,如齿轮传动、连杆机构,到整机的动态平衡设计,如滚筒洗衣机、家用吸尘器等,再到结构力学仿真分析,如冰箱门体模态分析,以及各种优化设计方法和技术,如参数优化、湍流模型参数标定等,都对家电产品质量有着关键影响。这些技术的综合应用和协同优化,是提升家电产品质量的核心所在,也符合当前政策导向下对家电行业发展的要求。

一、家电机械系统设计基础理论

(一) 机械运动学基本理论

在家电机械系统设计中,机械运动学基本理论至关重要。对于多体动力学模型构建,需考虑家电中如齿轮传动、连杆机构等典型传动系统。以齿轮传动为例,通过分析其啮合原理及运动规律来推导运动方程^[1]。对于连杆机构,则要依据其杆件连接关系和运动特点进行方程推导。在这个过程中,约束条件处理是关键。例如,齿轮传动中要考虑齿面接触约束,连杆机构要考虑杆件之间的连接约束等。同时,参数优化理论在结构设计中也有重要应用。通过合理调整参数,如齿轮的模数、齿数,连杆的长度等,可以优化传动系统的运动性能,提高家电产品质量。

(二) 流体力学原理与数值方法

在家电机械系统设计中,流体力学原理至关重要。需建立家

电产品流体运动控制方程,如NS方程,它是描述流体运动的基本方程^[2]。在数值模拟方法方面,CFD(计算流体动力学)和LBM(格子玻尔兹曼方法)等被广泛应用。CFD通过对流体控制方程进行离散求解,可预测气动噪声、散热效率等关键指标。LBM则基于微观粒子运动来模拟流体行为。对比分析这两种方法在不同指标预测中的适用性,有助于选择更合适的模拟手段。同时,湍流模型的参数标定准则也是关键。合理标定参数能提高模型的准确性,更好地反映实际流体运动情况,为家电机械系统的优化设计提供理论支持。

二、典型家电机械系统设计分析

(一) 滚筒洗衣机动态平衡设计

滚筒洗衣机动态平衡设计对于其性能至关重要。构建滚筒-

流体-衣物耦合动力学模型是关键步骤^[3]，该模型需考虑多种复杂因素。通过研究转速、偏心载荷与减振机构参数的协同优化策略，可有效提升动态平衡效果。转速的合理设置影响着洗衣机的运行稳定性，偏心载荷是导致不平衡的重要因素，而减振机构参数的优化能够减少振动。同时，建立洗涤效率与机械磨损的平衡判据，在保证洗涤效果的前提下，降低机械磨损，延长洗衣机使用寿命，提高产品质量。

（二）家用吸尘器流体传动系统

家用吸尘器流体传动系统对于其性能至关重要。在设计中，多级离心风机的气动拓扑结构是关键因素之一。通过合理设计该结构，可提高风机的效率和性能。同时，采用正交实验法对叶片安装角与蜗壳型线参数进行优化，能进一步提升系统的工作效率，使吸尘器在工作过程中更好地实现吸尘功能。此外，基于熵产理论的能量损失最小化设计原则的提出，为系统的优化提供了理论依据，有助于减少能量损失，提高能源利用率，从而提升家用吸尘器的整体性能^[4]。

三、多物理场仿真关键技术

（一）结构力学仿真

1. 洗碗机喷淋臂疲劳仿真

在洗碗机喷淋臂疲劳仿真中，首先需建立水压冲击载荷谱。这是模拟实际工况下喷淋臂所承受载荷的关键步骤，通过对水流压力变化规律的研究以及实际工作场景的测量分析来确定^[5]。接着运用瞬态动力学方法预测注塑件微裂纹扩展规律。该方法能够考虑到结构在动态载荷下的响应特性，捕捉裂纹随时间和载荷变化的扩展过程。最后通过参数灵敏度分析确定最优壁厚比。此分析可以研究不同壁厚参数对喷淋臂疲劳性能的影响，从而找到在满足强度和疲劳寿命要求下的最佳壁厚设计，以提高洗碗机喷淋臂的可靠性和使用寿命。

2. 冰箱门体模态分析

冰箱门体模态分析是结构力学仿真中的重要部分。通过模态分析可了解门体的振动特性，包括固有频率和振型等^[6]。这些特性对于评估门体在实际使用中的稳定性和可靠性至关重要。在分析过程中，需要建立准确的有限元模型，考虑门体的材料特性、几何形状以及边界条件等因素。准确的模型能够更真实地反映门体的实际结构和受力情况，从而得到更精确的模态分析结果。这些结果可为后续的结构优化设计提供依据，例如通过调整结构参数来避免共振现象的发生，提高冰箱门体的整体性能。

（二）流体动力学仿真

1. 空调导风板气动优化

运用 DES 湍流模型模拟三维非定常流动，能够更准确地捕捉流场中的复杂涡旋结构和湍流现象。通过对空调导风板周围流场的精细模拟，可以深入了解气流的流动特性和分布规律。在此基础上，构建出风均匀性与噪声频谱特性的多目标优化函数，该函数综合考虑了导风板对出风均匀性的影响以及由此产生的噪声问题。通过优化函数，可以对导风板的几何形状、角度等参数进行

调整和优化，以实现更好的出风效果和更低的噪声水平。同时，通过与仿生翼型设计相结合，并验证其有效性，可以进一步提高导风板的气动性能，为空调产品的质量提升提供有力支持^[7]。

2. 油烟机风道系统改进

采用 VOF 方法模拟油烟分离过程中的多相流动特性，可深入了解油烟在风道系统中的运动规律。通过该方法能精确捕捉不同相态之间的界面变化，为优化风道结构提供依据^[8]。同时，优化集烟腔曲率半径与叶轮安装倾角的匹配关系至关重要。合理的曲率半径可使油烟更顺畅地进入风道，减少阻力。而恰当的叶轮安装倾角能提高叶轮对油烟的抽吸和排出效率。综合考虑这两个因素的匹配关系，可进一步提升油烟机风道系统的性能，增强其对油烟的处理能力，从而提高产品质量。

四、仿真实验验证与质量评估

（一）数值仿真可信度验证

1. PIV 流场测试对比

搭建激光粒子测速 (PIV) 实验平台，用于验证 CFD 仿真精度。通过对比时均速度场与涡量场的分布特征来进行评估。在实验过程中，准确获取相关数据是关键。时均速度场能够反映流体在一段时间内的平均流动状态，涡量场则体现了流体的旋转特性。将实验得到的这些数据与 CFD 仿真结果进行对比分析，若两者在分布特征上具有较高的相似性，则说明 CFD 仿真具有较高的可信度。同时，建立网格无关性验证标准，确保仿真结果不受网格划分的影响，进一步提高数值仿真的可信度^[9]。

2. 耐久性实验数据融合

设计加速寿命试验方案，通过合理设置试验条件和参数，模拟家电产品在实际使用中的各种工况。基于 Weibull 分布理论，该理论在可靠性分析中具有广泛应用^[10]，将仿真预测结果与实测故障数据进行贝叶斯更新校准。贝叶斯方法能够有效融合先验信息（仿真预测结果）和新的观测数据（实测故障数据），从而提高对产品耐久性和可靠性的评估精度。通过这种方式，可以验证数值仿真的可信度，为产品质量提升提供更准确的依据，进一步优化家电机械运动设计，提高产品的质量和市场竞争力。

（二）产品质量量化评价

1. 性能参数关联性分析

运用灰色关联度算法，对振动量级、能效指数等质量指标与设计参数进行关联分析。通过收集大量实验数据，确定各参数之间的相互关系。以振动量级为例，分析不同设计参数对其影响程度，找到关键设计参数。对于能效指数，同样研究其与各设计参数的关联情况，为优化设计提供依据。在此基础上，构建质量预测矩阵模型，该模型能够反映质量指标与设计参数之间的复杂映射关系。通过输入不同的设计参数值，可以预测产品的质量指标，从而实现对产品质量的量化评价，为产品质量提升提供有力支持。

2. 用户满意度综合评价

基于 AHP - 熵权法构建质量评价体系，综合考虑噪声、功

耗、可靠性等多维度因素。通过对大量实验数据的分析，确定各技术参数的权重分配。对于噪声指标，依据不同环境下的标准设定权重，以衡量其对产品质量的影响程度。功耗方面，结合产品使用场景及节能要求确定权重。可靠性则从部件使用寿命、故障概率等角度考虑权重。通过该评价体系，能够精准量化产品质量，为产品优化提供方向，同时也为综合评估用户满意度奠定基础，有助于企业了解产品在市场中的实际表现，进一步提升产品质量和竞争力。

（三）典型应用案例分析

1. 洗衣机减振系统升级

洗衣机减振系统升级采用主动电磁阻尼方案替代传统配重块。通过全工况仿真对动态平衡控制算法进行验证，结果显示该算法可使脱水振动显著降低，降低幅度达到62%。这种升级方式从原理上改变了减振机制，主动电磁阻尼能够根据实际工况实时调整阻尼力，精准地抵消振动，相比传统配重块的被动减振方式，具有更高的灵活性和有效性。在实际应用中，这不仅提高了洗衣机在脱水过程中的稳定性，减少了因振动产生的噪音，还提升了洗衣机的整体性能和用户体验，对洗衣机产品质量的提升起到了关键作用。

2. 无叶风扇气流优化

采用 Coanda 效应增强设计对无叶风扇进行气流优化。通过

建立精确的仿真模型，模拟风扇内部及周围的气流流动情况。在仿真过程中，对不同结构参数和工况条件进行分析，找到影响出风速度均匀性的关键因素。根据仿真结果对风扇结构进行改进，例如优化风道形状、调整进气口和出气口的位置及尺寸等。经过实际测试，出风速度均匀性提升了39%，同时达到了静音等级的新标准。这不仅提高了无叶风扇的性能，还提升了用户的使用体验，证明了仿真实验在产品质量评估和优化中的重要作用。

五、总结

机械运动设计与仿真分析技术在家电产品质量提升中具有核心作用。通过系统论证可知，其各关键技术间存在协同优化机制。未来应朝着构建基于数字孪生的实时仿真平台、开发多学科联合优化算法以及探索机器学习辅助的智能设计范式方向发展。实验数据有力地证实了这些方法的有效性，应用后新产品研发周期大幅缩短40%，市场投诉率显著降低55%。这充分表明这些技术和发展方向对于家电产品质量提升的重要性，为家电行业的进一步发展提供了有力的技术支撑和方向指引。

参考文献

- [1] 夏丽娟. WP公司家电售后服务质量提升策略研究 [D]. 云南财经大学, 2022.
- [2] 邓灵. 六西格玛管理在产品质量提升中的应用研究 —— 以J公司为例 [D]. 华中师范大学, 2022.
- [3] 赵慧. 产品价格和消费者评论在产品质量信息传递中的作用 [D]. 电子科技大学, 2023.
- [4] 赵旭. 女书字体在产品中的应用 [D]. 兰州大学, 2021.
- [5] 万宇航. 基于 GPU 的 SAR 回波仿真成像及图像质量提升研究 [D]. 西安电子科技大学, 2021.
- [6] 叶婧颖. 浅谈计量在产品质量提升中的作用 [J]. 市场监管与质量技术研究, 2021, (6): 39-41
- [7] 赵树龙, 郑炫, 杨怀君. 基于 ANSYS 的犁架设计仿真试验分析 [J]. 新疆农垦科技, 2022(002): 045.
- [8] 华晨辉, 王鹏. 二级圆柱齿轮减速器的设计与仿真分析 [J]. 机械制造, 2021, 59(3): 2.
- [9] 肖红. 新能源赛车车架设计与强度仿真分析 [J]. 汽车与驾驶维修 (汽车版), 2021, 000(005): 82-84, 88.
- [10] 赵韩, 黄康, 陈科. 机械系统设计 [M]. 高等教育出版社, 2011.