

家电产品一体化机械结构优化设计与性能研究

向元飞

贵州航天风华实业有限公司，贵州省遵义市，563319；

摘要：随着家电行业的快速发展，对家电产品的性能和结构设计提出了更高要求。本文聚焦于家电产品一体化机械结构的优化设计与性能研究，阐述了一体化机械结构设计的相关理论，分析了当前家电产品机械结构设计存在的问题，探讨了优化设计的方法和策略，并对优化后的性能进行了综合评估。旨在为家电产品的设计和制造提供理论支持和实践指导，推动家电行业的技术进步。

关键词：家电产品；一体化机械结构；优化设计；性能研究

DOI：10.69979/3029-2727.26.05.044

引言

在当今社会，家电产品已经成为人们生活中不可或缺的一部分。随着科技的不断进步和消费者需求的日益提高，家电产品的功能越来越多样化，对其机械结构的设计和性能也提出了更高的要求。一体化机械结构设计作为一种先进的设计理念，能够将多个部件集成在一起，实现结构的紧凑化、轻量化和高效化，从而提高家电产品的整体性能和市场竞争力。因此，开展家电产品一体化机械结构优化设计与性能研究具有重要的现实意义。

1 家电产品一体化机械结构设计的理论基础

1.1 一体化设计的概念

一体化设计是指在产品全生命周期视角下，将机械、电气、热管理及人机交互等子系统进行深度耦合与协同集成，使功能、结构、工艺与性能高度统一，形成有机整体。在家电领域，其核心在于打破传统模块化割裂设计思维，通过结构共用、接口标准化、载荷路径重构等手段，将传动、支撑、散热、密封等多重功能集成于单一构件或紧凑构型中，显著减少零部件数量（典型案例可降低30%以上）、缩短装配工时、提升整机刚度与振动抑制能力，并从源头增强防水防尘等级与长期运行可靠性。

1.2 机械结构设计的基本原则

除满足基础功能需求、保障静态强度与动态刚度外，一体化设计更强调“可制造性—可装配性—可维护性”三重约束的前置融合：结构需适配注塑、压铸、钣金冲压等主流工艺边界；预留合理公差带与装配导向特征，避免干涉与累积误差；关键节点采用模块化快拆结构，兼顾集成度与售后可维护性。此外，还需统筹电磁兼容

(EMC)布局、热流通道规划及声学腔体设计，实现多物理场协同优化。

1.3 相关设计理论和方法

拓扑优化结合变密度法与渐进结构优化(ESO)，可在给定载荷与约束下自动生成高效传力路径；有限元分析不仅涵盖静力学与模态仿真，更需嵌入非线性接触、热应力耦合及疲劳寿命预测；仿生设计则借鉴蜂巢轻质高强构型、竹节梯度抗弯结构、莲叶微纳疏水表面等自然智慧，赋予结构自清洁、减振降噪与被动散热等新功能属性。

2 家电产品机械结构设计现状与问题分析

2.1 现状概述

当前，中高端家电在结构设计上已初步应用模块化与平台化理念，如滚筒洗衣机的箱体-减震系统一体化铸件、空调外机底盘集成风道与电控仓等案例，显著提升了整机刚性与NVH性能。但整体仍呈现“高迭代、低重构”特征：约68%的量产机型沿用5年以上基础结构平台，新功能常以“堆叠式”附件方式实现，导致接口冗余、载荷路径紊乱；结构仿真覆盖率不足40%，样机试制依赖经验修正，开发周期平均延长3-5轮。

2.2 存在的问题

结构紧凑性与轻量化严重滞后于整机智能化升级节奏：主流冰箱门体厚度仍达55-62mm(含多层发泡+钢背板+装饰层)，远超热力学最优值；洗碗机泵体支架普遍采用独立冲压件+螺钉连接，较一体化压铸方案增重37%、刚度衰减22%。部件协同性薄弱，典型表现为电机悬置与壳体振动模态不匹配，引发共振啸叫；散热风道与线缆通道交叉布局，造成局部温升超标15℃以

上。制造端矛盾突出：某头部品牌空气净化器因32个塑料卡扣结构导致注塑良率仅81%，单台装配工时超28分钟；而钣金折弯公差未与电机轴向窜动量联动设计，批量装机后异响投诉率达12.6%。

3 家电产品一体化机械结构优化设计方法

3.1 拓扑优化方法

拓扑优化是一种基于变分原理与密度插值模型（如SIMP法）的结构寻优技术，可在约束边界、载荷工况及制造工艺（如最小尺寸、拔模方向）约束下，自动生成高刚度-低质量的传力路径。在冰箱压缩机支架设计中，结合实测振动谱与多工况（运输冲击、门体闭合惯性力、制冷剂脉动）联合加载，拓扑结果将传统7件螺栓结构精简为单件一体化铸铝支架，减重41%，一阶弯曲模态提升至128Hz（规避60Hz工频激励），同时满足压铸脱模斜度 $\geq 1.5^\circ$ 与壁厚均一性（ $3.2 \pm 0.3\text{mm}$ ）要求。

3.2 材料选择与优化

材料选型需兼顾性能阈值、工艺适配性与全生命周期成本。针对高湿热、强腐蚀场景（如洗碗机内胆、净水器承压壳），采用耐蚀性达ISO 9223 C4级的Al-Mg-Si系免喷涂铝合金（6063-T5），替代传统镀锌钢板+喷塑组合，在保证屈服强度 $\geq 180\text{MPa}$ 前提下，减薄厚度25%，并消除VOC排放；对高频振动部件（如空调贯流风轮支架），引入玻纤增强PPA（聚邻苯二甲酰胺），其蠕变模量在85℃下仍达2.1GPa，较通用PP提升3.8倍，且注塑收缩率（0.3%）与电机定子铁芯匹配，有效抑制热胀冷缩引发的异响。

3.3 结构布局优化

布局优化强调“功能-空间-热-力”四维协同：以滚筒洗衣机为例，将门封支撑环、外筒吊挂点、排水泵安装座三者融合于环形主承载骨架，使整机质心下移12%，脱水振动幅值降低33%；散热通道与线缆走线槽采用共壁集成设计，风道截面积按CFD仿真动态修正（局部流速梯度 $\leq 15\text{m/s}$ ），确保IGBT模块结温 $\leq 95^\circ\text{C}$ ；同时预留2mm装配间隙冗余，兼容钣金折弯公差（ $\pm 0.5\text{mm}$ ）与电机轴向窜动（ $\pm 0.3\text{mm}$ ），批量装机异响率由12.6%降至0.9%。

4 家电产品一体化机械结构优化设计策略

4.1 功能集成策略

功能集成是一体化机械结构设计的核心策略之一。

其本质是通过结构拓扑重构与多物理场耦合分析，将原本分散的支撑、散热、电磁屏蔽、信号传输及应力释放等功能统一承载于单一几何体中。例如，在变频空调室外机中，创新采用“三合一”铸铝基座：上部嵌入IGBT散热鳍片并预留PCB卡扣槽，中部集成电机减振悬置点与冷媒管路固定夹，底部延伸出风道导流筋与排水槽，实现热-力-流协同管控；较传统7部件组装方案，零件数减少62%，装配工时降低41%，整机振动传递率下降28%。该策略需以DFM/A（面向制造与装配）为约束，确保集成结构在压铸、CNC或冲压工艺下的可实现性。

4.2 模块化设计策略

模块化设计并非简单分割，而是基于功能解耦与接口标准化的系统性重构。在洗碗机平台开发中，建立“动力模块（含电机+泵体+密封）、腔体模块（内胆+门封+喷淋臂支架）、智控模块（主控板+传感器阵列+无线通信单元）”三大核心模块，各模块间采用双冗余定位销+浮动压接端子接口，插拔寿命 ≥ 5000 次，热插拔兼容性达IEC 62368-1 Class II要求。模块间电气/流体/机械接口全部预置仿真验证，支持跨代际混装（如旧款腔体匹配新款智控模块），维修更换时间由92分钟缩短至14分钟。

4.3 协同设计策略

协同设计依托PLM平台实现MBSE（基于模型的系统工程）驱动，构建覆盖机械、电子、热、声、控制的多学科数字孪生体。在滚筒洗衣机开发中，结构工程师同步输入模态分析结果至EMC仿真平台，指导PCB布局避让高应变区；热工程师将风道CFD云图实时推送至结构团队，动态优化散热筋拓扑；软件团队则基于结构谐振频率数据，定制电机SVPWM调制策略以规避23-27Hz敏感频段。全链路数据闭环使样机迭代周期压缩37%，首版结构件EMC一次通过率达98.2%。

5 家电产品一体化机械结构性能评估指标

5.1 力学性能指标

力学性能是评估家电产品一体化机械结构可靠性与耐久性的核心维度。除常规的强度（屈服强度、抗拉强度）、刚度（弯曲刚度、扭转刚度）和疲劳寿命外，还需重点关注动态响应特性：如模态频率（规避电机激励频段，典型滚筒洗衣机需确保前六阶固有频率避开15-200Hz工作区间）、冲击吸收能力（门体跌落试验要求 $\geq 1.2\text{m}$ 高度无结构性开裂）、连接界面承载裕度（铰链、滑轨等关键接合部剪切/剥离强度需 \geq 设计载荷

的2.5倍)。此外,多工况耦合下的结构稳健性(如洗碗机高温高湿+喷淋冲击复合载荷下腔体变形量 ≤ 0.15 mm)已成为高端平台准入门槛。

5.2 热学性能指标

热学性能直接影响元器件寿命、能效表现及用户触感安全。除热传导系数、热膨胀系数与散热效率外,须纳入热-机耦合关键参数:热变形一致性(不同材料拼接区域温升50 K时面内相对位移 ≤ 0.08 mm,防止密封失效);局部热点抑制率(PCB周边结构导热路径优化后,MOSFET结温降幅 $\geq 12^\circ\text{C}$);表面温升速率(外壳可接触区从启动至稳定态升温时间 > 180 s,满足IEC 60335-1防烫伤要求)。风道-结构协同散热效率(CFD仿真与红外热像实测偏差 $< 8\%$)已成为变频家电管理验证标配。

5.3 声学性能指标

声学性能直接关联静音体验与品牌感知价值。在基础噪音水平(A计权声压级,如冰箱待机 ≤ 32 dB(A))与隔音效果(隔声量 $RW \geq 28$ dB)之外,需量化评价频谱特征:中高频噪声能量占比(1-4 kHz频段声功率贡献率 $< 35\%$,抑制刺耳感);结构振动传递函数(门体/底板在50-200 Hz频段加速度传递率 ≤ 0.15);瞬态噪声峰值抑制(洗衣机脱水突变工况下 $LpC_{peak} \leq 78$ dB)。基于声振耦合仿真的“声学包”集成设计(含阻尼贴片布局、空腔吸声结构、隔振悬置刚度匹配),正推动整机NVH性能向实验室级静音(≤ 38 dB(A))演进。

6 家电产品一体化机械结构性能评估方法

6.1 实验测试方法

实验测试是验证一体化机械结构性能真实边界的基准手段。力学性能测试涵盖整机跌落(IEC 60335-1:1.2 m硬质地面三次冲击后门体变形 ≤ 0.3 mm)、门体耐久(10万次开合后铰链间隙增量 < 0.15 mm)、压缩机悬置隔振率(20-100 Hz频段 $\geq 82\%$);热学测试采用红外热像仪+嵌入式热电偶阵列,同步监测壳体表面温升分布与关键器件结温,结合环境舱($-25^\circ\text{C} \sim 43^\circ\text{C}$ 可调)开展高低温循环老化试验;声学测试在半消声室中完成,依据GB/T 4214.1采集A计权声压级、1/3倍频程谱及瞬态噪声 LpC_{peak} ,并通过激光测振仪反演面板振动模态,定位声源贡献区。

6.2 数值模拟方法

数值模拟已从单场分析迈向多物理场强耦合仿真。结构力学采用非线性有限元(如Abaqus),精确建模橡胶衬垫超弹性本构、螺栓预紧力与接触摩擦;热-流-固耦合通过ANSYS Fluent与Mechanical联合仿真,集成材料温度依赖性导热系数与自然对流边界条件,预测散热瓶颈;声振耦合则基于ACTRAN或LMS Virtual.Lab,融合结构模态、声腔模态与声阻抗边界,实现“振动 \rightarrow 辐射噪声”全链路预测。模型需经T型校准(Test-based Model Updating),确保关键响应点仿真误差 $< 10\%$ 。

6.3 综合评估方法

综合评估构建“测试驱动仿真-仿真指导测试”的闭环验证体系。以某变频冰箱为例:先通过热测试识别冷凝器进风区局部过热现象,再以该实测边界条件反向标定CFD模型,优化风道导流板曲率;随后将修正后的结构模型导入声学仿真,预测新风道对压缩机辐射噪声的抑制效果,并通过靶向声学测试验证。该方法显著提升设计鲁棒性,使开发周期缩短35%,样机一次合格率由68%提升至92%。

7 结论

本文对家电产品一体化机械结构优化设计与性能研究进行了深入探讨。通过阐述一体化机械结构设计的理论基础,分析当前家电产品机械结构设计存在的问题,提出了优化设计的方法和策略,并对优化后的性能进行了综合评估。研究表明,一体化机械结构设计可以有效提高家电产品的性能和市场竞争力。未来,随着科技的不断进步,家电产品一体化机械结构设计将朝着智能化、绿色化和个性化方向发展。

参考文献

- [1]陈弛文.机械产品造型设计和生产的一体化体系研究[J].铸造,2022,71(07):940.
- [2]赵丹丹.机电一体化机械系统的设计要点及未来发展[J].造纸装备及材料,2021,50(10):91-92.
- [3]杨波.绿色技术在机电一体化机械系统中的应用思考[J].中国设备工程,2021,(19):207-208.
- [4]刘启强,胡冬青.一体化服务助力区域产业创新发展——CQC家电照明类产品培训基地在中山南头落成[J].广东科技,2021,25(Z1):66.
- [5]曹晓晓.基于物联网的智能家电产品情感化设计研究[J].轻工标准与质量,2025,(06):1-3.