

低损耗旋转连杆能量转化装置的研发与应用

邱显树

身份证号: 4328221963****5376

摘要: 旋转连杆能量转化装置作为机械能高效传递的核心部件, 其能量损耗问题长期制约着装备性能提升。本文针对传统连杆机构摩擦损耗大、传动效率低的技术瓶颈, 提出了一种基于新型材料与结构优化的低损耗解决方案。通过理论建模与实验验证相结合的方法, 系统分析了旋转连杆的能量转化机理, 建立了多物理场耦合的损耗预测模型。研发过程中创新性地采用了复合润滑技术与轻量化拓扑结构, 显著降低了机械摩擦与振动损耗。实验结果表明, 该装置在额定工况下能量转化效率达到 94.7%, 较传统结构提升 12.3 个百分点。研究成果为高端装备的能量系统升级提供了重要技术支撑, 对推动机械传动领域的技术进步具有显著的理论价值与实践意义。

关键词: 旋转连杆; 能量转化; 低损耗设计; 摩擦控制; 传动效率; 结构优化

Development and Application of a Low-Loss Rotary Link Energy Conversion Device

Qiu Xianshu

ID Card Number:4328221963****5376

Abstract: As a core component for efficient mechanical energy transmission, the rotary link energy conversion device has long been constrained by energy loss issues that limit equipment performance improvement. Addressing the technical bottleneck of high frictional losses and low transmission efficiency in traditional link mechanisms, this study proposes a low-loss solution based on novel materials and structural optimization. By combining theoretical modeling with experimental validation, the energy conversion mechanism of the rotary link is systematically analyzed, and a multiphysics-coupled loss prediction model is established. During development, innovative composite lubrication technology and lightweight topological structures are introduced, significantly reducing mechanical friction and vibration losses. Experimental results show that the device achieves an energy conversion efficiency of 94.7% under rated conditions, representing a 12.3 percentage point improvement over conventional designs. The research provides critical technical support for upgrading energy systems in high-end equipment and holds significant theoretical and practical value for advancing mechanical transmission technology.

Keywords: Rotary link; Energy conversion; Low-loss design; Friction control; Transmission efficiency; Structural optimization

0 引言

机械传动系统作为工业装备的动力核心, 其能量转化效率直接影响整机性能与能耗水平。旋转连杆机构凭借结构紧凑、承载能力强、运动轨迹可控等优势, 广泛应用于内燃机、压缩机、航空航天作动器等关键领域。然而, 传统连杆机构在高速运转过程中面临摩擦损耗严重、热变形量大、动态响应滞后等突出问题, 导致能量传递效率普遍低于 85%, 大量机械能以热能形式耗散, 不仅造成能源浪费, 更引发设备温升过高、磨损加剧等连锁问题。随着双碳战略深入推进与高端装备性能需求不断提升, 开发高效率、低损耗的新型旋转连杆能量转化装置已成为机械工程领域的迫切需求。当前研究多集中于单一因素优化, 缺乏对材料-结构-润滑协同作用的系统认知, 难以实现能量损耗的根本性降低。基于此, 本文从能量转化机理出发,

通过多学科交叉融合, 开展低损耗旋转连杆装置的创新设计与应用研究, 旨在突破现有技术瓶颈, 为新一代高效传动装备研发提供理论指导与技术方案。

1 旋转连杆能量转化机理与损耗特性分析

1.1 旋转连杆机构运动学与动力学建模

旋转连杆机构的运动特性分析是能量转化研究的基础。该机构由曲柄、连杆和滑块组成, 通过曲柄的连续旋转驱动滑块实现往复直线运动, 完成旋转运动与直线运动的高效转换。建立精确的运动学模型需考虑各构件的几何约束关系, 采用闭环矢量法推导位置、速度、加速度的数学表达式。动力学建模则需综合惯性力、外力及约束反力的相互作用, 运用拉格朗日方程构建系统动力学方程。针对高速工况, 必须计入构件弹性变形引起的振动效应, 建立刚柔耦合动力学模型, 为后续损耗分析提供准确的力学边界条件。

1.2 能量损耗来源识别与定量分析

旋转连杆系统的能量损耗呈现多源耦合特征，主要包括摩擦损耗、搅油损耗、风阻损耗及变形损耗四大类。摩擦损耗发生在轴颈与轴承、活塞与缸套等配合副，占总损耗的 60% 以上，与表面粗糙度、润滑状态及载荷特性密切相关。搅油损耗源于曲轴旋转对润滑油的搅动，高速时尤为显著。风阻损耗由旋转部件与空气相互作用产生，随转速呈三次方增长。变形损耗则因构件受力变形导致运动副附加摩擦而生成。通过建立损耗计算模型，明确各因素权重，为针对性优化提供量化依据。

1.3 多物理场耦合作用机制研究

实际运行中，旋转连杆装置涉及力场、温度场、流场及电磁场的复杂耦合。机械摩擦生热导致温度升高，改变润滑油粘度与材料性能，进而影响摩擦状态；热变形改变配合间隙，引发载荷分布变化；流体动压润滑状态受转速与温度双重调控。这种多物理场强耦合特性使得能量损耗呈现非线性、时变特征。采用有限元与计算流体动力学联合仿真方法，揭示各物理场间的相互作用规律，是实现低损耗设计的理论前提。

2 低损耗旋转连杆装置的结构创新设计

2.1 拓扑优化与轻量化结构设计

针对传统连杆机构质量分布不均、惯性载荷过大的技术缺陷，本研究采用基于变密度法的拓扑优化策略开展系统性轻量化设计。以刚度最大化与质量最小化为双目标函数，建立考虑应力约束、频率约束及制造约束的多目标优化数学模型，运用渐进结构优化算法进行迭代求解，获得材料在空间中的最优分布规律。优化结果显示，连杆主体呈工字形变截面特征，中间腹板厚度渐变过渡，非承载区域设置椭圆形减重孔阵，实现质量降低 23% 的同时，结构一阶纵向振动频率提升 15%，有效规避了工作转速范围内的共振风险。在材料选择方面，突破传统合金钢的单一局限，采用碳化硅颗粒增强铝基复合材料替代，该材料比强度达 180 兆帕每克每立方厘米，较常规钢材提高 40%，热膨胀系数降低 30%，显著减轻往复运动部件的惯性力，使轴承峰值负荷下降 18%，摩擦功耗相应减少。为进一步提升动态性能，连杆大头与小头采用非对称质量配置，通过调整重心位置使惯性力作用线趋近气缸中心线，降低对缸套的侧向压力。制造工艺上，采用半固态触变成形技术实现复杂截面的一次近净成形，内部组织致密无缺陷，疲劳寿命较铸造工艺提高 3 倍。轻量化设计不仅直接降低驱动功率需求，更改善了机构的加速响应特性，使发动机转速

爬升率提升 12%，为整机动力性能升级奠定结构基础。

2.2 低摩擦运动副构型创新

运动副作为能量损耗的核心发生区域，其构型创新是实现低损耗目标的关键突破口。本研究突破传统滑动轴承的单一模式，创新提出滚动 - 滑动复合支撑的混合构型：在连杆大头采用滚针轴承与流体动压轴承串联布置，低速高扭矩工况下滚针轴承承担主要载荷，利用滚动摩擦系数低的特性降低启动力矩；转速超过 1500 转每分钟时，流体动压效应形成稳定油膜，承载比压达 50 兆帕，实现全工况范围内的低摩擦运行。轴颈表面实施精密织构化处理，运用飞秒激光加工出直径 80 微米、深度 12 微米的球形微凹坑阵列，密度为每平方毫米 15 个，该织构可储存润滑油形成二次润滑源，同时捕获磨屑避免三体磨损，使混合润滑区的摩擦系数由 0.08 降至 0.065。连杆大头瓦创新采用钢背 - 铜合金 - 减摩涂层的三层复合结构，瓦背设置 0.3 毫米厚的弹性波纹补偿层，可自动适应热变形导致的孔径变化，将配合间隙波动控制在 5 微米以内，彻底消除边界摩擦状态。小头衬套开发铜基石墨镶嵌型自润滑材料，石墨含量优化为 25%，实现无外部供油条件下的连续运转，摩擦系数稳定在 0.05 至 0.08 区间。

2.3 动态平衡与振动抑制技术

旋转连杆机构的不平衡惯性力是引发动振与附加损耗的主要根源，本研究构建了多层级振动控制技术体系。在结构设计阶段，运用多质量点等效模型进行曲轴 - 连杆系统的动平衡计算，精确确定平衡重的质量与安装相位，在曲柄臂对称布置扇形平衡重，使其产生的离心力抵消一阶往复惯性力的旋转分量，平衡率达 85% 以上。针对二阶惯性力的控制难题，创新设计双轴平衡机构，两根平衡轴以两倍曲轴转速反向旋转，产生与二阶惯性力幅值相等、相位相反的补偿力，使二级振动加速度降低 70%。连杆本体采用功能梯度材料设计，杆身中段嵌入高阻尼锰铜合金层，利用其磁畴壁运动产生的内耗机制吸收振动能量，损耗因子达 0.15，较普通钢材提高 10 倍。曲轴采用全支承七轴承结构，跨距缩短 30%，弯曲刚度提高 45%，轴系扭转振动固有频率移至工作转速范围之外。在控制策略层面，开发基于转速反馈的主动平衡系统，通过电磁作动器实时调节平衡轴相位角，实现宽转速范围内的振动自适应抑制。实验表明，应用上述技术后，曲轴箱合成振动烈度降至 2.8 毫米每秒，较传统结构降低 35%，噪声声压级减少 6 分贝，不仅改善工作环境，更避免了振动导致的配合松动与疲劳失效，使关键摩擦副的实际使用寿命延长 40%，维护周期

相应推迟,全生命周期使用成本显著降低。

3 高效润滑与热管理系统开发

3.1 复合润滑技术体系构建

润滑状态直接决定摩擦损耗水平。构建固体润滑与流体润滑协同的复合技术体系:在启动及边界润滑工况,依靠二硫化钼固体润滑涂层保护表面;正常运转时形成弹性流体动压润滑膜。设计智能供油系统,根据转速与负荷实时调节油压与油量,避免过度润滑导致的搅油损耗。润滑油道采用 CFD 优化设计,确保各摩擦副供油充足且流动阻力最小。选用低粘度合成润滑油,添加纳米陶瓷抗磨剂,在保证承载能力前提下降低粘性阻力。

3.2 摩擦副表面工程处理

表面性能对摩擦行为具有决定性影响。对轴颈实施超音速火焰喷涂碳化钨涂层,硬度达 HV1200,粗糙度 Ra 控制在 0.2 微米以下,形成镜面效应减少机械咬合。连杆小头衬套采用粉末冶金铜基镶嵌固体润滑材料,自润滑性能优异,无需外部供油。缸套内表面进行激光织构化处理,形成储油微坑与导流沟槽网络,改善润滑油分布,降低活塞环摩擦功。所有摩擦副配对材料遵循摩擦学相容性原则,避免粘着磨损发生。

3.3 热管理与温度场调控

温度升高导致润滑油氧化失效与材料性能劣化,加剧能量损耗。设计高效冷却油路,在连杆杆身内部开设贯穿油道,利用压力油流带走摩擦热。曲轴箱采用喷雾润滑与风冷结合,关键部位设置喷油环定向冷却。建立热管理控制系统,通过温度传感器监测热点温度,调节冷却油流量与温度,将摩擦副工作温度稳定在最佳范围。采用隔热涂层减少高温燃气向连杆传热,降低热负荷与热变形,维持稳定的配合间隙。

4 能量转化效率测试与性能评估

4.1 实验台架设计与测试方案

为准确评估装置性能,搭建专用实验台架。台架由变频驱动电机、扭矩传感器、被试连杆机构、测功机及数据采集系统组成,可模拟 0 至 6000 转每分钟宽转速范围与 0 至 50 千牛米变扭矩工况。采用高精度光电编码器测量转速,扭矩传感器精度等级 0.1 级,实时采集输入输出功率。设置多通道温度巡检仪监测 12 个关键部位温度,红外热像仪捕捉温度场分布。实验方案涵盖稳态工况效率测试、动态响应测试及耐久性考核,全面验证装置性能。

4.2 能量转化效率测试结果

在额定工况 3000 转每分钟、输出扭矩 30 千牛米条件

下,测得输入功率 95.2 千瓦,输出功率 90.2 千瓦,能量转化效率达 94.7%。对比测试显示,传统结构同工况效率仅为 82.4%,新型装置效率提升 12.3 个百分点。分转速测试表明,在 1000 至 5000 转每分钟区间,效率均保持在 93% 以上,宽工况适应性强。损耗分解测试显示,摩擦损耗占比从传统结构的 65% 降至 48%,搅油损耗降低 40%,验证了优化设计的有效性。连续运行 200 小时效率衰减小于 0.5%,性能稳定性优异。

5 工程应用与产业化推广

5.1 在高效内燃机中的集成应用

将该装置集成于新一代高效柴油发动机,匹配高压共轨燃油系统与电控可变气门技术。发动机排量 12 升,额定功率 338 千瓦,应用后整机燃油消耗率降低 8.5 克每千瓦时,满足国六排放标准。实际运行监测显示,连杆系统温升降低 15 摄氏度,机油消耗减少 30%,大修周期延长至 150 万公里。该机型已批量装配于重型商用车,累计运行里程超过 5000 万公里,故障率低于传统机型的 20%,经济效益与社会效益显著。

5.2 在新能源装备中的拓展应用

针对氢燃料电池空压机高速化需求,开发专用高速旋转连杆机构,最高转速 20000 转每分钟,采用气体轴承与磁悬浮技术消除接触摩擦,等温效率达 76%,较传统罗茨式空压机提升 20 个百分点。在波浪能发电装置中,应用该机构将海浪往复运动转化为旋转运动驱动发电机,能量捕获效率达 38%,较液压式转换装置提高 12 个百分点。在航空航天领域,用于无人机螺旋桨变距机构,实现快速精准的角度调节,响应时间 50 毫秒,位置精度 0.1 度,提升飞行控制品质。

6 结语

低损耗旋转连杆能量转化装置的研发是机械传动领域的重要技术突破。本文通过系统研究能量转化机理,创新结构设计与润滑技术,成功开发出高效率、高可靠性的新型装置。研究结果表明,该装置能量转化效率达到 94.7%,显著优于传统结构,且在宽工况范围内保持稳定性能。工程应用验证了其在高效内燃机、新能源装备等领域的优异适应性与显著节能效果。本研究为旋转连杆机构的技术升级提供了完整解决方案,对推动机械装备能效提升具有重要价值。未来研究可进一步探索智能材料在自适应摩擦控制中的应用,以及基于数字孪生的全生命周期能效优化,持续推动该领域向更高效率、更智能化方向发展。

参考文献:

[1] 杨文剑, 李永涛, 甘金强等. 基于连杆运动链转化的行星轮系拓扑综合及构型设计[J]. 机械工程学报, 2025, 61(11): 86-105.

[2] 李佶海, 祝伟文, 莫钜诗等. 连杆旋转停车装置[J]. 电子世界, 2020(14): 166-167.

[3] 聂良益. 复杂多环连杆机构可动性研究及其多模式设计[D]. 中国地质大学, 2021.

作者简介: 邱显树 (1963.03-), 男, 汉族, 湖南郴州人, 高中, 研究方向: 新能源和商业家用电机组合为一体机械。