

Torsional Vibration Simulation and Fatigue Optimization Study of Key Parts in Engine Crankshaft System

Cong Liang Yinghao Li Liang Dong

Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

As the core component of power transmission, the engine crankshaft system's dynamic response characteristics directly influence the operational stability and reliability of the entire engine. Torque vibration, a common dynamic issue in crankshaft systems, not only generates noise and vibration but may also lead to fatigue damage or even failure in critical components. Addressing torque vibration challenges in crankshaft systems, this study establishes a simulation model based on multi-body dynamics theory and finite element analysis methods, systematically examining inherent characteristics and response patterns. By integrating fatigue life assessment techniques, stress analysis and life prediction were conducted for critical hazardous areas of the crankshaft, followed by targeted structural optimization strategies. Results demonstrate that rational adjustment of structural parameters and optimized damping configurations can effectively reduce torque vibration amplitudes while enhancing system fatigue life and operational stability. This research provides theoretical foundations and engineering references for crankshaft system design optimization in engine applications.

Keywords

crankshaft system; torsional vibration; dynamic simulation; fatigue analysis; structural optimization

发动机曲轴系统扭振仿真及关键部位疲劳优化研究

梁聪 李英豪 董亮

长城汽车股份有限公司, 中国·河北保定 071000

摘要

发动机曲轴系统作为动力传递的核心部件,其动态响应特性直接影响整机运行的平稳性与可靠性。扭转振动作为曲轴系统常见的动力学问题,不仅会引发噪声与振动,还可能导致关键部位的疲劳损伤甚至失效。围绕曲轴系统扭振问题,本文基于多体动力学理论与有限元分析方法,构建曲轴系统扭振仿真模型,对其固有特性与响应规律进行系统分析。在此基础上,结合疲劳寿命评估方法,对曲轴关键危险部位进行应力分析与寿命预测,并提出针对性的结构优化策略。研究结果表明,通过合理调整结构参数与优化阻尼配置,可以有效降低扭振幅值,提高系统的疲劳寿命与运行稳定性。本文的研究为发动机曲轴系统设计优化提供了理论依据与工程参考。

关键词

曲轴系统; 扭转振动; 动力学仿真; 疲劳分析; 结构优化

1 引言

随着发动机性能指标的不断提升,对动力系统的可靠性与耐久性提出了更高要求。曲轴作为发动机动力输出的重要构件,其在复杂工况下承受周期性扭转载荷与冲击载荷,容易产生扭转振动现象。若振动频率与系统固有频率接近,可能引发共振,导致应力集中加剧,从而缩短零部件的使用寿命。传统设计方法多依赖经验与试验验证,难以在设计阶段全面评估系统的动态特性。近年来,随着计算仿真技术的发展,多体动力学与有限元分析被广泛应用于发动机结构设

计与性能优化中。通过建立高精度模型,可以在虚拟环境中预测曲轴系统的动态响应,识别潜在风险部位,并指导结构改进。本文以曲轴系统为研究对象,围绕扭振仿真与疲劳优化展开系统研究,旨在提升发动机运行的安全性与稳定性。

2 曲轴系统扭振特性分析基础

2.1 曲轴系统结构与动力学特征

曲轴系统作为往复动力机械中的核心传动单元,其结构由曲轴本体、飞轮、扭振减振器及多种连接构件共同组成,呈现出典型的多质量、多自由度特征。由于各组成部分在空间分布及质量配置上的差异,系统整体惯量分布具有明显的不均匀性,这一特征直接影响其动力学响应形式。在实际运行过程中,气缸内燃烧产生的气体压力经连杆机构周期

【作者简介】梁聪(1989-),男,硕士,工程师,从事车辆工程研究。

性作用于曲轴,使其承受交变扭矩载荷。不同气缸的点火间隔与燃烧强度存在差异,使输入激励呈现出多频叠加与非均匀分布特征,从而使系统响应具有显著的非线性与时变性。飞轮的引入在一定程度上平衡了转速波动,但同时也改变了系统的惯量匹配关系,对振动特性产生耦合影响。复杂结构与多源激励共同作用,使曲轴系统在动力学行为上表现出较强的耦合性与敏感性,这为后续振动分析与控制提出了更高要求。

2.2 扭转振动机理与影响因素

曲轴系统的扭转振动本质上是周期性激励与结构动力学特性相互作用的结果,其形成机制可归结为外部激励力矩与系统等效刚度及惯量之间的动态耦合。当激励频率与系统固有频率接近时,系统会出现共振现象,振幅显著放大,并可能引发结构疲劳损伤甚至失效。曲轴各段的刚度分布决定了扭转变形的空间分布特征,而转动惯量的配置则影响系统对激励的响应敏感性,两者共同决定固有频率的分布状态。阻尼特性在振动衰减过程中发挥关键作用,其大小直接影响能量耗散效率与振动持续时间。运行工况的变化,如负载波动与转速调整,会改变激励频谱结构,从而引起振动响应的动态变化。通过对这些因素的系统分析,可以识别振动放大的关键条件及结构薄弱区域,为后续优化设计与控制策略制定提供依据。

2.3 扭振分析方法与模型建立

对曲轴系统进行扭转振动分析,需要在合理抽象结构特性的基础上建立数学模型,以实现对其动力学行为的定量描述。集中参数模型通过将曲轴及附属部件离散为若干质量单元,并以等效刚度与阻尼连接,能够较为高效地反映系统的整体振动特性,适用于初步分析与参数研究。在此基础上,有限元模型通过对结构进行精细离散,可更准确地描述几何形状与材料属性对振动行为的影响,从而提高分析精度。模型建立过程中,通过构造质量矩阵、刚度矩阵及阻尼矩阵,并结合适当的边界条件与激励形式,可求解系统的固有频率与振型分布。这些基础动力学参数为识别共振区间及评估结构安全性提供了重要依据。通过模型计算与数值仿真相结合,可以进一步揭示复杂工况下的振动响应规律,为工程设计与振动控制提供可靠支撑。

3 曲轴系统扭振仿真方法与实现

3.1 多体动力学建模技术

多体动力学方法为刻画曲轴系统复杂运动与载荷传递关系提供了有效工具。在建模过程中,通过对各组成部件进行刚柔特性描述,并合理定义转动副、约束关系及激励输入,可构建反映实际运行状态的动力学模型。该模型能够在时域与频域内揭示系统响应特征,尤其是在分析扭转振动传播路径及能量分布方面具有优势。借助仿真平台对不同工况进行计算,可获得角位移、角速度及扭矩波动等关键响应参数,从而为识别共振区间及评估系统稳定性提供依据。模型的合

理性依赖于参数识别精度与边界条件设定的真实性,因此在建模过程中需充分考虑实际工况的复杂性,以提升分析结果的工程适用性。

3.2 有限元分析在扭振研究中的应用

有限元方法在曲轴扭振研究中主要用于精确刻画结构应力分布及局部变形特征。通过对曲轴复杂几何形状进行离散化处理,并引入材料本构关系与边界约束条件,可以获得在扭转载荷作用下的应力与应变响应。该方法能够识别应力集中区域及其变化趋势,为疲劳分析与结构优化提供基础数据。将有限元模型与多体动力学模型进行耦合,可实现结构响应与系统动力学行为的统一分析,从而提高仿真结果的精度与一致性。这种多尺度、多方法融合的分析框架,有助于揭示曲轴在复杂工况下的动力学特性,为高可靠性设计提供理论支撑。

3.3 仿真结果分析与验证

仿真结果的可信度需通过实验数据加以验证,以确保模型能够真实反映系统行为。通过对比仿真与试验所得的频率响应函数及振幅变化规律,可以评估模型在关键频段内的预测能力。若存在偏差,则需对模型参数或边界条件进行修正,以实现结果的收敛与一致。在验证基础上,对不同设计参数组合进行对比分析,可揭示结构变化对扭振特性的影响规律,从而筛选出性能更优的设计方案。通过仿真与实验的协同分析,不仅提高了研究结论的可靠性,也为工程实践中的优化设计提供了科学依据。

4 关键部位疲劳分析与寿命评估

4.1 曲轴危险截面的识别

在扭转载荷与弯扭耦合作用下,曲轴内部应力场呈现显著非均匀分布特征,局部几何不连续区域往往成为应力集中与疲劳损伤的主要萌生部位。曲柄臂与主轴颈、连杆颈之间的过渡圆角,由于截面突变与应力流线偏折,易形成较高的应力梯度,是典型的危险截面所在。此类区域在长期交变载荷作用下更易产生微裂纹,并逐步演化为宏观裂纹,最终导致结构失效。通过有限元分析方法对曲轴进行精细建模,可以获得不同工况下的应力分布云图,从而识别出高应力区域及其变化规律。结合实际工况中的载荷谱与边界条件,对关键截面进行局部细化分析,有助于提高识别结果的准确性。危险截面的判定不仅依赖于峰值应力水平,还需综合考虑应力集中系数、材料性能及工作循环特征,从而为后续疲劳评估与结构优化提供可靠依据。

4.2 疲劳寿命预测方法

曲轴在复杂交变载荷作用下的服役性能,通常以疲劳寿命作为核心评价指标,其预测方法需兼顾材料特性与实际载荷条件。基于应力-寿命关系的分析方法适用于高周疲劳情形,通过 S-N 曲线可建立应力幅值与寿命之间的对应关系;而在低周疲劳或存在明显塑性变形的情况下,应变-寿命方法更能反映材料的真实响应。将材料试验数据与实际工

况载荷谱相结合,可对曲轴在不同运行状态下的寿命进行分段计算。针对多工况交替作用的复杂环境,累积损伤理论提供了有效的分析框架,通过对各阶段损伤的线性或非线性叠加,可评估整体寿命消耗程度。数值仿真技术的引入,使得疲劳寿命预测能够在设计阶段完成,从而减少试验成本并提高预测精度。通过将理论模型与实验数据进行校核,可以进一步提升评估结果的可靠性,为结构优化与运行维护提供量化依据。

4.3 应力分布与损伤演化规律

在循环载荷持续作用下,曲轴材料内部会经历从微观缺陷萌生到宏观裂纹扩展的渐进演化过程,其本质是应力场与材料组织共同作用的结果。初始阶段,材料内部的微观不连续性在高应力区域逐渐积累损伤,形成微裂纹源;随着载荷循环次数增加,裂纹在最大主应力方向上稳定扩展,并伴随局部应力重分布现象。应力集中区域的存在加速了这一过程,使裂纹扩展速率呈现非线性增长特征。通过数值仿真与断裂力学方法,可以对裂纹扩展路径及其速度进行预测,从而揭示损伤演化的内在规律。实验观测结果表明,表面与次表层区域在疲劳损伤中具有不同的演化特征,这与残余应力分布及材料组织状态密切相关。对应力变化趋势与损伤演化过程的系统分析,有助于深化对疲劳破坏机理的认识,并为制定针对性的结构改进与防护措施提供理论支撑。

5 曲轴系统结构优化与疲劳性能提升策略

5.1 结构参数优化设计

曲轴作为动力系统的关键承载构件,其几何结构直接影响应力分布特征与疲劳寿命。通过对曲柄臂、主轴颈及连杆颈等关键部位的几何参数进行系统优化,可在源头上缓解应力集中问题。圆角过渡区域的半径设计对降低局部峰值应力具有显著作用,适当增大过渡圆角能够改善应力流线分布,但同时会对空间布局及装配关系产生约束,因此需在结构合理性与装配需求之间取得平衡。截面尺寸的调整不仅关系到构件的承载能力,也影响整体质量分布及转动惯量,进而改变系统动力学特性。在设计过程中,引入有限元分析与多体动力学模型,对关键参数开展敏感性分析,有助于识别影响疲劳性能的主导因素,从而提高优化设计的针对性与效率。通过多目标优化方法,将强度、刚度与轻量化需求纳入统一评价框架,可以实现结构性能的整体提升。这种以参数优化为核心的设计思路,有助于在满足工程约束的前提下提升曲轴的安全裕度与使用寿命。

5.2 减振装置与阻尼优化

曲轴在工作过程中不可避免地受到周期性激励作用,

易引发扭转振动问题,对整机稳定性与可靠性产生不利影响。通过合理配置扭振减振装置,可以有效调节系统固有频率分布,使其避开主要激励频率区间,从而降低共振风险。减振器的惯量参数与系统等效惯量之间存在耦合关系,合理匹配有助于实现振动能量的重新分配与耗散。阻尼参数的设定则直接影响振动衰减速率,过低的阻尼难以有效抑制振幅,而过高的阻尼可能引起能量损耗增加及系统响应迟滞。在工程实践中,通常结合试验数据与数值仿真,对减振器参数进行迭代优化,使其在不同工况下均能保持良好的减振效果。

5.3 材料与工艺改进措施

材料性能与制造工艺对曲轴的疲劳强度与服役寿命具有基础性影响。在材料选择方面,高强度合金钢因其良好的综合力学性能,被广泛应用于高负荷工况下的曲轴制造。通过优化材料成分与冶炼工艺,可以提高材料的纯净度与组织均匀性,从而降低内部缺陷对疲劳裂纹萌生的影响。表面强化技术在提升抗疲劳能力方面具有显著效果,例如通过滚压、喷丸等工艺在表层引入残余压应力,可有效延缓裂纹扩展过程。热处理工艺的优化同样关键,合理控制淬火与回火参数,有助于获得均衡的强度与韧性匹配,避免因组织不稳定引发早期失效。在制造过程中,精密加工与质量检测技术的提升也不可忽视,高精度加工能够减少表面粗糙度带来的应力集中,而无损检测技术则有助于及时识别潜在缺陷。

6 结语

曲轴系统的扭转振动问题直接关系到发动机的性能与可靠性。通过建立高精度仿真模型,可以深入分析系统的动态特性,并识别潜在风险部位。在此基础上,结合疲劳分析与结构优化方法,可以有效提升曲轴的耐久性能。未来,随着计算技术与材料技术的不断发展,曲轴系统的设计将更加精细化与智能化,为发动机性能提升提供有力支撑。

参考文献

- [1] 李学民.发动机曲轴扭振仿真及振动控制研究[D].中北大学,2016.
- [2] 沈连军,杨陈,袁爽,等.双质量飞轮与单质量飞轮曲轴系统动力学仿真对比[J].农业装备与车辆工程,2015,53(05):23-26.
- [3] 梁健.发动机曲轴断裂的仿真分析与探讨[J].车辆与动力技术,2006,(03):16-22.
- [4] 操英冬.基于缸平移法的汽车发动机曲轴扭振仿真研究[J].内燃机与配件,2019,(23):1-3.
- [5] 李静,王东方,缪小冬,等.发动机曲轴扭振仿真分析与研究[J].机械设计与制造工程,2017,46(05):41-45.