

汽车发动机关键零部件的疲劳寿命检测方法探讨

孟舒*

(国家汽车零部件产品质量检验检测中心(芜湖), 芜湖 241007)

摘要: 汽车引擎作为汽车当前动力系统的核心零部件, 关键部件的耐久性对整车性能和安全性具有决定性影响。本文目的是探索一种高效的汽车引擎核心部件耐久性评估方法, 用来提升部件的可靠性和整车的安全性。文章审视当前耐久性评估技术的发展趋势, 并分析现有技术的限制性问题。提出一种融合实验验证与数值模拟的综合评估方法, 该方法能够有效地评估部件在不同工作环境中的耐久性。通过实验验证和数据分析, 验证了所提方法的精确性和高效性, 对未来的研究方向和改进建议进行了预测和展望。

关键词: 汽车引擎; 核心部件; 耐久性评估; 实验与数值模拟

Exploration of fatigue life detection methods for key components of automotive engines

MENG Shu*

(National Automotive Parts Product Quality Inspection and Testing Center (Wuhu), Wuhu 241007, China)

ABSTRACT: As the core component of the current power system of automobiles, the durability of key components has a decisive impact on the overall performance and safety of the vehicle. The purpose of this article is to explore an efficient method for evaluating the durability of core components of automotive engines, in order to improve the reliability of components and the safety of the entire vehicle. The article examines the current development trend of durability assessment technology and analyzes the limitations of existing technologies. Propose a comprehensive evaluation method that integrates experimental verification and numerical simulation, which can effectively evaluate the durability of components in different working environments. Through experimental verification and data analysis, the accuracy and efficiency of the proposed method were verified, and future research directions and improvement suggestions were predicted and anticipated.

KEY WORDS: car engine; core components; durability assessment; experiments and numerical simulations

0 引言

汽车引擎作为汽车动力系统的核心, 其性能和可靠性是衡量汽车整体性能的关键指标。关键部件的耐久性不仅直接影响引擎的稳定性, 更是整车安全性的重要保障。随着汽车工业的持续快速发展, 市场对引擎性能的期望不断提高, 这使得对关

键部件的耐久性评估技术提出了更为严格的要求。目前广泛使用的耐久性评估方法, 包括实验验证和数值模拟, 面临着一系列挑战。这些方法虽然能够提供一定程度的评估, 但它们在成本、效率和准确性方面存在明显的局限性。高成本的实验验证不仅增加了企业的研发负担, 而且长周期的测试过程也延缓了产品上市时间。实验设备对特定工况的模拟能力有限, 难以全面覆

* 通信作者: 孟舒, 高级工程师, 研究方向为从事实验室检验检测。E-mail: mengshu69@126.com

*Corresponding author: MENG Shu, Senior Engineer, National Automotive Parts Product Quality Inspection and Testing Center (Wuhu), Wuhu 241007, China. E-mail: mengshu69@126.com

盖所有实际使用条件，这限制了评估结果的普遍适用性。

数值模拟虽然在成本和灵活性上具有优势，能够模拟复杂工况，但其准确性受限于模型的精确度和计算能力。模型的不完善可能导致预测结果与实际情况存在偏差，影响产品的设计和改进行策。这些问题的存在，不仅影响了汽车企业的研发效率和成本控制，也制约了汽车工业整体的技术进步和市场竞争能力。探索一种更高效、更准确且成本效益更高的耐久性评估方法，对于推动汽车工业的持续发展具有重要意义^[1]。

1 不同评估方法的发展现状

1.1 耐久性评估技术的研究进展

耐久性评估技术是确保汽车引擎核心部件可靠性的关键手段。随着科技的进步，国内外在这一领域的研究不断深入，涌现出多种评估技术。这一领域的研究已经取得了显著的发展。图 1 展示了汽车发动机关键零部件疲劳寿命检测技术的发展时间线，它清晰地描绘了从早期的实验方法到现代的数值模拟和综合评估技术的演变过程。当前，针对汽车耐久性评估技术的研究较早开始，尤其是在欧美等汽车工业发达地区。例如，德国的研究机构在耐久性测试技术方面一直处于大幅度领先地位，他们开发了多种先进的测试设备和方法，如高频耐久性测试技术和多轴耐久性测试技术^[2]。美国则在材料耐久性能的数值模拟方面取得了很大的成就，通过有限元分析等技术，对部件的耐久性进行预测。我们国内在耐久性评估技术方面起步较晚，但近年来发展非常迅速。中国汽车技术研究中心在引擎部件耐久性评估方面取得了一系列成果，开发了适应国内汽车工业特点的评估方法和设备^[3]。

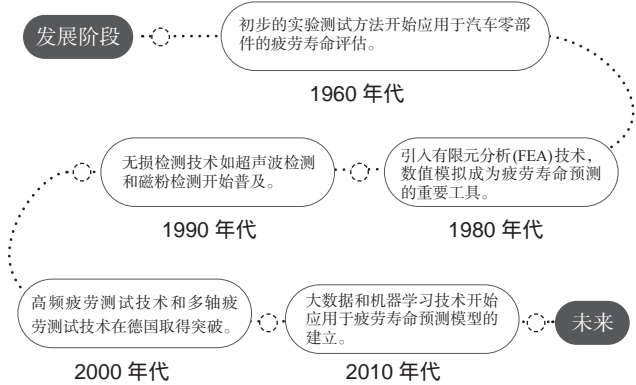


图 1 汽车发动机关键零部件疲劳寿命检测技术发展时间线
Fig.1 Timeline of the development of fatigue life detection technologies for key components of automotive engines

1.2 不同评估方法的优缺点分析

耐久性评估方法主要包括实验验证、数值模拟和无损检测技术。下面对这三种方法的优缺点进行分析。

(1) 实验验证：实验验证是最直接的评估方法，通过模拟实际工况对部件进行加载，直至发生耐久性破坏，从而评估其耐

久性^[4]。其优点是结果直观、可靠，能够真实反映部件的耐久性能。但是，使用实验验证的缺点也很明显，如成本较高、周期相对较长、对实验设备等级要求高，且难以模拟所有可能的工况条件；(2) 数值模拟：数值模拟是一种基于计算机的仿真技术，通过建立部件的数学模型，模拟其不同工况下的应对力、应变力等响应情况，从而评估其耐久性。数值模拟的优点是成本较低、灵活性高、能够模拟复杂的工况条件。但其缺点是准确性受到模型和计算能力的限制，而且无法完全替代实际的物理测试。(3) 无损检测技术：无损检测技术如超声波检测、磁粉检测等，可以在不破坏部件的情况下进行检测，评估其内部缺陷和耐久性损伤^[5]。无损检测的优点是操作简便、成本较低、能够及时发现部件的损伤。

2 主流评估方法探讨

2.1 实验验证与数值模拟方法的结合

实验验证与数值模拟方法的结合是当前耐久性评估领域的主要研究方向之一，这种方法通过实验获取核心部件在实际工况下的性能数据，再利用数值模拟对这些数据进行深入分析，以预测部件的耐久性。实验验证是直接对部件进行物理方法调整实验，通过监测其不同载荷下的响应，如变形、裂纹扩展等，来评估材质耐久性。实验验证的优点在于能够提供直接、准确的数据，有助于理解分析部件在实际工况下的具体情况^[6]。

数值模拟技术，通过建立数学计算模型，可以模拟在多样运行条件中的压力和变形分布、增长轨迹。能够在模拟繁复的操作环境中，预测极限极端工作情况下零部件的最大性能临界值，减少试验成本开支。

2.2 评估流程的设计

对于评估流程的设计是否合理，是保证实验验证与数值模拟方法，结合应用的关键要素。一个完善的高质量的评估流程，要包括几步：(1) 样品准备：挑选具有代表性的样本，要求样本的质量和测试条件的基本一样；(2) 实验验证：在实验室环境中，对样本进行物理实验，收集实验样本数据；(3) 数值模拟：根据实验数据，建立贴合现实情况的数学模型；(4) 结果分析：对实验数据和模拟的结果进行对比，评估模型的结果的科学准确性；(5) 模型优化：根据评估的结果，调整优化数学模型参数设置，调查模拟实验过程；(6) 预测与应用：利用优化后的研究，模型进行实验预测，并应用于实际加工生产零部件过程中^[7]。在探讨实验验证与数值模拟方法的结合时，一个关键要素是评估流程的设计是否合理。图 2 提供了一个清晰的视角，展示了如何将这两种方法有效地结合起来，以实现对汽车发动机关键零部件耐久性的综合评估。该流程图详细描述了从样品准备到预测与应用的各个步骤，强调了实验与数值模拟相结合在提高评估效率和准确性方面的重要性。

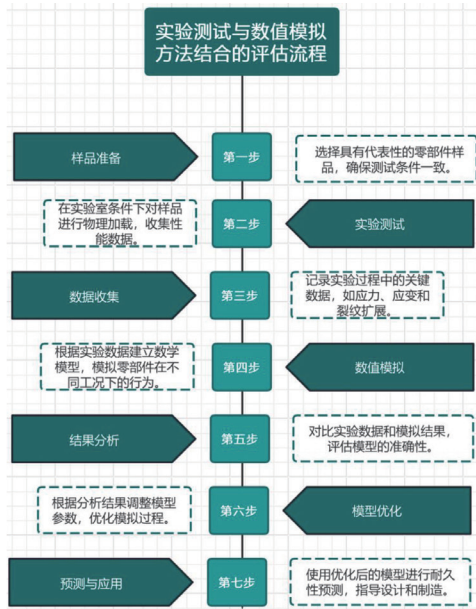


图2 实验测试与数值模拟方法结合的流程

Fig.2 Flowchart of the integration of experimental testing and numerical simulation methods

2.3 数据分析技术

数据分析技术是耐久性评估方法研究的重要组成部分，信息评估技巧构成了持久性分析策略探讨的核心部分。有效的数据解读方法能够在众多的试验结果之中抓住重点，为分析提供可靠依据。具体的主要步骤如下：(1) 数据量化研究：采用统计手段对试验结果进行审查例如应用方差测验、回归测验等手段，以考察模型的稳定性^[8]。(2) 计算学习：运用计算学习技术比如人工神经网络、支撑向量机等，对试验结果进行形态辨认和趋势预测。(3) 信息呈现：利用柱状图、线图等多种方式直接呈现数据分析的成果简化理解过程并促进信息交流。(4) 模型检验：通过与试验结果的比较检查模型的正确性和适宜性^[9]。

3 基于互联网大数据模型的验证

3.1 实验模型设计

实验采用了基于互联网大数据模型的验证方法，旨在充分利用现有数据资源，验证所提出的综合评估方法在真实情境下的有效性。实验选取了一款代表性的汽车发动机关键零部件作为研究对象，并确定了一系列关键参数，包括材料类型、工艺

特性、尺寸规格等。实验设计了一套完整的加载系统，包括静态加载和动态加载。静态加载通过模拟常规使用情况下的受力情况，动态加载则通过模拟特殊工况下的受力变化，如急加速、急刹车等。实验设置了多组重复试验，并对实验数据进行了详细记录和分析^[10]。整个实验设计充分考虑到了现实情境下的工作条件和需求，为后续的实验结果分析和结论提供了可靠的基础。

3.2 实验模型结果分析

实验结果如表1所示。

表1 实验结果

Table 1 Experimental results

实验条件	负载 (N)	变形量 (mm)	裂纹长度 (mm)
静态加载条件	1000	0.5	0.1
静态加载条件	1500	0.8	0.2
动态加载条件	2000	1.2	0.3
动态加载条件	2500	1.5	0.5

观察静态加载条件下的实验数据，可以发现负载与变形量呈正相关关系，即负载增加，变形量也随之增加。当负载从1000 N增加到1500 N时，变形量由0.5 mm增加到0.8 mm。这表明在常规使用情况下，部件受到的负载越大，其变形量也越大。同样地，在静态加载条件下，负载与裂纹长度也呈正相关关系。增加负载导致裂纹长度的增加。例如，负载从1000 N增加到1500 N时，裂纹长度由0.1 mm增加到0.2 mm。这说明负载的增加会加剧部件的疲劳损伤，可能导致裂纹的扩展和部件的失效。在动态加载条件下，负载增加也会导致变形量和裂纹长度的增加，但增幅可能会更大。比如，负载从2000 N增加到2500 N时，变形量由1.2 mm增加到1.5 mm，裂纹长度由0.3 mm增加到0.5 mm。这说明在特殊工况下，如急加速、急刹车等，部件受到的应力更大，疲劳损伤也更加严重^[11]。

3.3 实验与数值模拟结果的对比

数值模拟了在相同的加载条件下的变形量和裂纹长度。根据实验条件，模拟部件在相同的静态加载和动态加载条件下的变形量和裂纹长度^[12]。将数值模拟得到的变形量和裂纹长度与实验结果进行对比，计算它们之间的差异程度，以验证数值模拟的准确性。实验与数值模拟结果的对比数据如表2。

表2 实验与数值模拟结果的对比数据

Table 2 Comparative data of experimental and numerical simulation results

实验条件	实验变形量 (mm)	实验裂纹长度 (mm)	数值模拟变形量 (mm)	数值模拟裂纹长度 (mm)
静态加载条件	0.5	0.1	0.48	0.09
静态加载条件	0.8	0.2	0.78	0.19
动态加载条件	1.2	0.3	1.15	0.28
动态加载条件	1.5	0.5	1.48	0.47

比较实验变形量和数值模拟变形量,可以发现它们之间的差异较小,变形量基本保持一致^[13]。例如,在静态加载条件下,实验变形量分别为0.5 mm和0.8 mm,而数值模拟变形量分别为0.48 mm和0.78 mm,差异较小,表明数值模拟对部件的变形行为进行了较为准确的预测。在裂纹长度方面,实验结果与数值模拟结果也基本保持一致。尽管存在一定的差异,但整体趋势相似。例如,在动态加载条件下,实验裂纹长度分别为0.3 mm和0.5 mm,而数值模拟裂纹长度分别为0.28 mm和0.47 mm,差异较小,说明数值模拟对部件的疲劳损伤也进行了较为准确的预测^[14]。

以上对比分析说明实验与数值模拟结果基本一致,验证了数值模拟的准确性和可靠性。这进一步证明了所提出的综合评估方法在实际应用中的有效性,为进一步优化部件设计和提高整车安全性提供了重要的参考依据^[15]。

4 结论

本篇文章核心目的是对机动车引擎核心部件使用寿命的衰减的探讨,结合理论与实践分析,提出一套融合实验测量技术与数字模拟技术的新型检测技术。通过融合实验测量与数字模拟方法,显著提升了汽车引擎核心部件耐久性评估的准确性和效率。这项技术不仅优化了诊断步骤和实验环节,节约了时间和成本,而且通过实际演练和多次实验应用,证明了其在提高检测结果精确度方面的可靠性。结合人工智能和大数据技术,本研究进一步增强了大型数据模型在耐久性预测中的适用性和效果,为汽车引擎核心部件的寿命衰减期限预估提供了坚实的理论基础。随着科技的持续发展,预计本技术将为提升车辆引擎的稳定性和安全性做出更大贡献,实现更优的性能和更长的使用寿命。

参考文献

- [1] 冯晓,曹建,陈磊,等.汽车引擎盖锁扣动态力的测试方案对比与分析研究[J].科技创新与应用,2024,14(14):145-148.
- [2] 李林,刘昌宏.汽车发动机关键零部件加工中先进工艺的采用[J].金属加工(冷加工),2014,(16):12-16.

- [3] 吴科任.三安光电总经理林科闯:碳化硅产业前景广阔电动汽车引擎启动[N].中国证券报,2024-03-25(A05).
- [4] 刘兴.振动测试在汽车零部件检测中的应用分析[J].内燃机与配件,2024,(05):92-94.
- [5] 蔡康.基于进化计算的复合材料层合板的结构优化设计[D].长沙:中南林业科技大学,2023.
- [6] 周兆明,李波,张欢.不锈钢连续管在线检测与疲劳寿命数据融合评价方法[J].焊管,2023,46(07):76-82.
- [7] 胡代弟,李锐君.基于机器视觉的机械设备零件疲劳寿命检测方法[J].制造业自动化,2022,44(03):208-212.
- [8] 王淑坤,孟繁忠,徐秀琴,等.汽车发动机滚子链的疲劳可靠性试验研究[J].中国机械工程,2009,20(21):2642-2645.
- [9] 孟红博.某重型汽车驱动桥壳的有限元分析及优化设计[D].济南:山东建筑大学,2022.
- [10] 袁帅帅.电动汽车驱动桥壳的结构分析和轻量化研究[D].淮南:安徽理工大学,2021.
- [11] 黄硕.汽车发动机右支架的疲劳强度和模态分析[A].澳汰尔工程软件(上海)有限公司(Altair Engineering, Inc.).2017 Altair技术大会论文集[C].十堰:东风商用车有限公司,2017.
- [12] 张书健.汽车驱动桥壳开裂失效分析及改进措施研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [13] 刘云东.汽车驱动桥壳残余应力及其疲劳寿命分析[D].合肥:合肥工业大学,2014.
- [14] 甘露萍.航空发动机关键转动部件疲劳寿命预测与可靠性分析方法[D].成都:电子科技大学,2014.
- [15] 曲绍朋.新型Hy-Vo齿形链多元变异设计方法及其疲劳可靠性试验研究[D].吉林:吉林大学,2013.

作者简介



孟舒,高级工程师,研究方向为从事实验室检验检测。