



基于虚实结合的高速高温摩擦磨损测试实验设计

王琳^{1,2,3}, 李鹏鹏¹, 鲁如焯¹, 苏华^{1,2,3}, 陈国定^{1,2,3}

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072; 2. 西北工业大学机械基础国家级实验教学示范中心, 西安 710072;
3. 西北工业大学机械基础与航空制造国家级虚拟仿真实验教学中心, 西安 710072)

摘要: 航空发动机机械基础零部件材料的高速高温摩擦磨损测试具有实验周期长、实验过程复杂、安全风险多等特点, 为了降低学习者使用实物测试装置时的风险因素、实验周期与教学成本, 设计了一种用于航空发动机中轴承、齿轮、密封等关键机械基础零部件材料的高速高温摩擦磨损测试装置, 以及与此实物装置高度一致的虚拟仿真实验系统。通过虚拟仿真实验和实物操作训练相结合的方式, 辅助熟练掌握高速高温摩擦磨损测试的基础知识、操作步骤、实验过程、结果展示等, 并实现不受时空条件限制和实验设备限制的实践训练。在完成虚拟仿真实验后再开展线下实物操作训练, 让学习者对高速高温摩擦磨损测试装置的结构组成和操作流程形成实感认知, 教师则对学生的虚拟仿真实验、实际操作实验、最终实验报告等分别进行过程性和结果性综合评价, 以提升摩擦磨损的测试效率和实践效果。

关键词: 航空发动机; 摩擦磨损; 高速; 高温; 虚实结合

中图分类号: TP117.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230600

Experimental Design of Friction and Wear under the High-Speed and High-Temperature Conditions Based on the Combination of Virtuality and Reality

WANG Lin^{1,2,3}, LI Pengpeng¹, LU Ruyue¹, SU Hua^{1,2,3}, CHEN Guoding^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Mechanical-Fundamentals Education, Northwestern Polytechnical University,

Xi'an 710072, China; 3. National Center for Virtual Simulation Experimental Education of Mechanical-Fundamentals and

Aeronautical Manufacturing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The material test of friction and wear under the high-speed and high-temperature conditions has some difficulties, such as long experimental period, high experimental complexity and security risks. In order to lower the risks, periods, and costs during operating, the testing device and corresponding virtual simulation system are developed. The testing device can be used to conduct the material experiments of tribology characteristics for bearings, gears, seals in aero-engines. The combination of virtuality simulations and reality operations is helpful for students to promote the understanding of the knowledge of basic theory, operating steps, experimental processes, results presentations of high-speed and high-temperature friction and wear testing, and students can receive practical training without the restrictions of time and space. After completing the virtual simulation experiment, offline physical operation training is carried out. In this way, students can form a realistic understanding of the structural composition and operation process of the high-speed and high-temperature friction and wear testing device. Finally, the study performance of different learners are evaluated based on virtuality simulations, reality operations, and experiment reports by the ways of process assessment and outcome assessment.

Key words: aero-engine; friction and wear; high-speed; high-temperature; combination of virtuality and reality

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51975475, 52375265); 西北工业大学教育教学改革研究项目(2023JGY11); 陕西高等教育教学改革研究项目(23BG006)。

作者简介: 王琳, 博士, 副研究员, 主要从事航空发动机动力传输系统关键基础件摩擦学设计、机械基础件极端摩擦学性能的机电液集成测试技术与装备的研究。E-mail: wanglin@nwpu.edu.cn

“摩擦、磨损、润滑”是机械类专业的本科生和研究生核心课程的重要教学内容,而摩擦磨损实验则是“摩擦、磨损、润滑”这一内容的关键实践环节^[1-4]。目前无论教学还是科研中的摩擦磨损实验,往往因实验设备昂贵、实验周期长、实验成本高等问题,难以大量用于本科生教学和研究生科研过程中^[5]。这导致现有为数不多的摩擦磨损实验教学方式多为演示性教学,形式枯燥,无法达到应用效果,亟需引进更先进和更有效的教学手段。

与此同时,随着我国航空航天等领域的迅速发展,轴承、齿轮、密封等关键机械基础零部件的摩擦磨损问题成为先进航空发动机动力传输系统近年来的研究热点^[6-8]。航空发动机特有的高速高温工况特征也给轴承、齿轮、密封等关键机械基础件设计和材料摩擦学实验带来了一系列的挑战^[9]。

高速高温工况下的材料摩擦磨损性能测试对航空发动机中机械基础件的研究具有重要的意义。落实到高速高温条件下的摩擦学测试实施环节,现有的实验条件受多种因素影响,难以满足要求。因受限于高速高温摩擦磨损测试的特殊性,对设备资金和场地资源投入较大,且实验环境噪声大、实验周期长、环境恶劣、实验过程复杂、安全风险多等^[10-12],导致测试成本高、设备使用率低、学生参与意愿低等,应用效果难以令人满意。

基于虚拟现实技术的虚拟仿真实验是近年来随着计算机普及与其软硬件发展而兴起的一种实验技术手段,已在许多领域得到了应用,并取得了良好的效果^[13-16]。因此,可将虚拟仿真技术应用用于高速高温摩擦磨损测试教学和科学研究,搭建操作步骤严谨、交互性强、展示效果好的虚拟仿真实验系统,并与真实环境中高温高速摩擦磨损测试装置与测试结果相结合。

通过虚拟教学和实物操作相结合的方式,辅助学生熟悉掌握高速高温摩擦磨损测试基本操作过程,不仅可以降低初学者使用实物测试装置练习时的风险因素、实验周期与教学成本,而且能实现不受时空条件限制和实验设备限制的实验教学,以提升摩擦磨损的测试效率和教学效果。

本文设计了一种用于航空发动机中轴承、齿轮、密封等关键基础件材料的高速高温摩擦磨损测试装置,并结合该装置实验步骤复杂、组成模

块多、操作环境恶劣等难点,设计了与此真实装置高度一致的虚拟仿真实验系统。该虚拟仿真实验系统通过文字、图像、交互等方式,将高速高温摩擦磨损测试的基础知识、操作步骤、实验过程、结果展示等,进行动态化展示和智能化应用。

1 高温高速摩擦磨损测试装置设计

高速高温摩擦磨损测试装置由高速驱动、感应加热、加载与摩擦力测量、状态监测与控制、轴承油雾润滑及冷却润滑等模块组成,如图1所示。

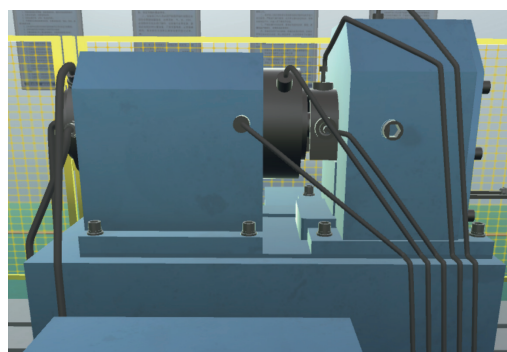
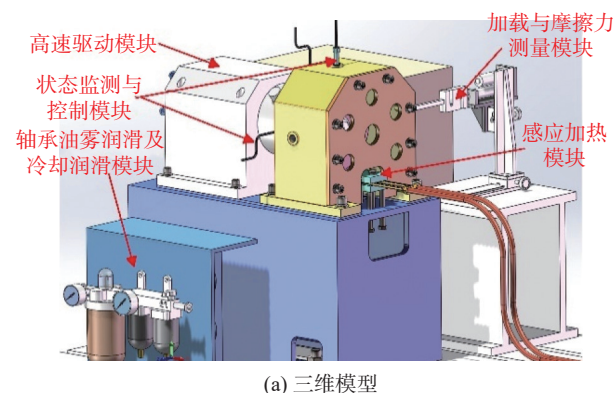


图1 高速高温摩擦磨损测试装置图

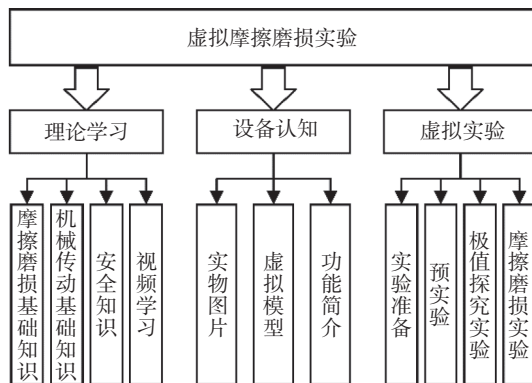
高速驱动模块采用高速电主轴作为驱动源，通过变频逆变系统控制电主轴转速，实验摩擦盘通过螺母固定到电主轴的一端，实验摩擦盘的最高速度达 250 m/s。感应加热模块主要由感应加热线圈和感应加热器等组成，利用电磁感应原理通过对固定在电主轴端部的摩擦盘外圆进行加热，以模拟航空发动机机械基础件所处最高 500 ℃ 的温度环境。实验件加载模块的加载力由电动缸施加，大小由拉压力传感器监测，并由加载杆传递到摩擦材料实验件，通过改变摩擦材料实验件的形状(如圆球、柱销、方块等)来实现与摩擦盘之间的点、线、面接触形式；而摩擦系数则是通过粘贴在加载杆上的应变片进行实时测量。状态监测与控制模块的计算机将实时监测采集的温度、振动、摩擦系数等信号进行处理，通过设置特定条件形成控制指令，并传输至变频逆变系统，以对电主轴转速等实时控制。轴承油雾润滑和冷却润滑模块的主要作用是对主轴、电机、轴承、高频感应加热器电源等进行润滑和冷却。

2 高速高温摩擦磨损测试虚拟仿真实验设计

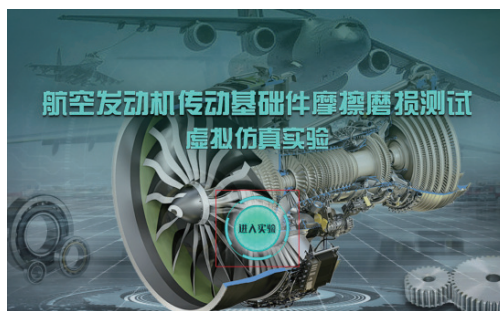
根据真实摩擦磨损测试的内容，确定了虚拟仿真实验的 3 大功能模块，分别是理论学习、设备认知和虚拟实验，如图 2 所示。其中理论学习模块分为摩擦磨损基础知识、机械传动基础知识、安全知识、视频学习子模块；设备认知模块中主要设备的认知学习通过实物图片、虚拟模型、功能简介完成；虚拟实验模块按照实际材料摩擦磨损实验的流程分为实验准备、预实验、极值探究实验、摩擦磨损实验 4 个子模块。

2.1 理论学习模块

理论学习模块的组成如图 3 所示。通过学习摩擦磨损基础知识、机械传动基础知识和观看教学视频等，使学生在实验开始前，对课上讲授的摩擦磨损和传动基础件相关理论知识、测试装置结构和工作原理等进行巩固学习，加深学生对实验中重点知识的理解，并对摩擦磨损测试装置的机械结构设计和组成有基本认识；通过视频学习熟悉实验原理和操作流程，对测试内容和过程形成具象认知；而安全知识部分展现了在实验时可能发生的危险以及应急处理办法，让学生在实验开始前对实验中可能发生危险时的应对措施情况有一定的了解。



(a) 摩擦磨损测试虚拟仿真实验功能组成框图



(b) 软件界面

图 2 摩擦磨损测试虚拟仿真实验系统组成界面



图 3 理论学习模块组成界面

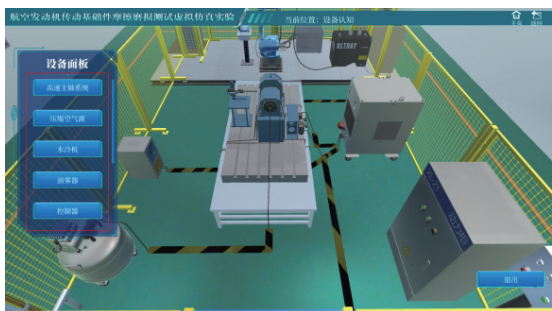
在完成理论学习后，要经过理论测试，如图 4 所示，合格后再进入下一阶段学习。



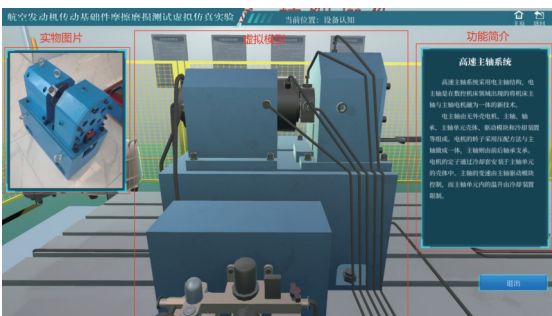
图 4 理论测试过程界面

2.2 设备认知模块

设备认知模块展示了摩擦磨损测试装置的主要组成, 即高速主轴系统、感应加热、加载与摩擦力测量、状态监测与控制等, 还有压缩空气泵、水冷机、油雾器、控制器等辅助设备。通过实物图片、虚拟模型、文字功能简介的方式, 使学生进一步理解和掌握高速高温摩擦磨损测试装置的工作原理和结构组成, 如图 5 所示。



(a) 虚拟仿真实验系统中的摩擦磨损测试装置主要组成界面



(b) 虚拟仿真实验系统中的高速主轴界面

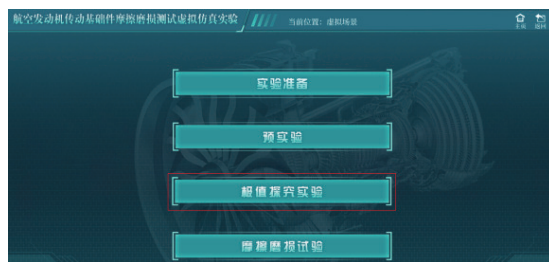
图 5 设备认知模块部分过程界面

2.3 虚拟实验模块

虚拟实验模块是按照实际摩擦磨损实验的流程进行设计的, 以其中的“极值探究实验”环节为例, 按照摩擦力测量系统标定、石墨材料(即摩擦磨损材料)准备、装夹试件、设备系统上电、摩擦磨损实验及摩擦力数据获取、关闭实验设备等步骤进行实施, 如图 6 所示。

虚拟实验子模块为学生提供模拟实际操作的机会, 其中实验准备子模块具有实验操作顺序提示, 能够提醒并展示给学生实验操作的正确步骤, 当学生未按照正确的实验操作步骤进行时, 实验无法继续进行。而当学生进入预实验、极值探究实验、摩擦磨损实验子模块时, 若学生操作顺序不当, 系统会出现警告提示框, 提示学生操作错误信息并及时更正实验操作。同时在后台记录操作错误, 扣除相应操作分数。虚拟实验的

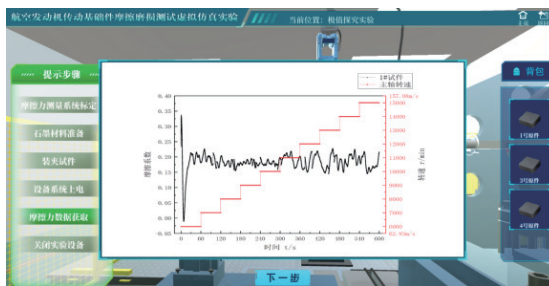
4 个子模块能够大幅度加深学生对实验操作顺序的记忆, 避免在实际操作的过程中产生危险。



(a) 实验选择界面



(b) 实验参数设置界面



(c) 实验结果展示界面

图 6 虚拟实验模块部分过程界面

最后通过实验数据处理和报告生成功能, 获得如图 7 所示的实验报告。实验报告内容包含实验人员信息、实验过程基本信息、实验结果、实验得分等, 学生将实验报告保存后, 作为虚实结合实验环节的一部分, 并纳入最终实验成绩中。

实验结果曲线则是以大量真实的高温高速摩擦磨损实验数据为基础, 通过神经网络方法拟合得到不同工况下的实验结果, 并绘制成曲线; 相关拟合结果又能反过来对真实实验形成一定的参考和指导。

3 虚实结合的摩擦磨损测试教学实践

虚拟仿真实验与实际操作实验相结合的教学模式, 不仅可以打破教学时间和空间上的限制, 还能利用实物操作的优势, 使学生形成对典型机械零部件摩擦磨损和真实机械传动系统的实感知。

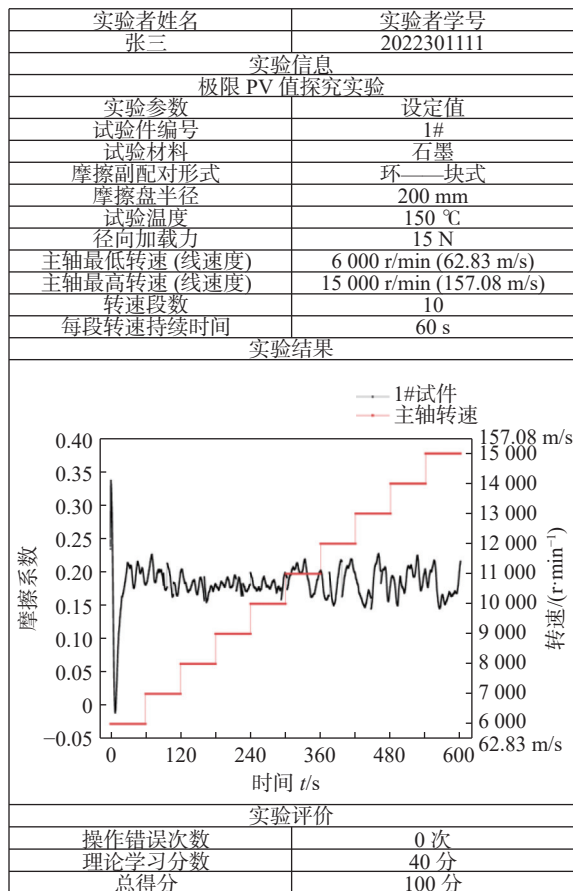


图 7 实验报告示意图

虚实结合摩擦磨损测试实验教学的流程如下。

1) 通过摩擦磨损测试虚拟仿真实验中的理论学习和设备认知功能, 熟悉并掌握摩擦磨损实验的基础知识, 并对摩擦磨损实验的安全知识进行学习, 随后在虚拟实验模块中进行模拟操作实践, 分别完成对测试装置结构和工作原理的深入了解, 完成实验过程和设备操作的虚拟练习。

2) 指导教师使用真实高速高温的摩擦磨损测试装置进行线下实物操作演示, 让学习者对摩擦磨损测试装置的结构组成和操作流程形成实感认知, 随后安排学习者按照线上实验的不同高速高温工况进行分组操作, 进一步加深对摩擦磨损测试过程和摩擦学知识的理解。

3) 将线上完成的摩擦磨损测试虚拟仿真实验中的实验报告和数据导出, 并将线下真实摩擦磨损实验的数据进行整理, 形成虚拟仿真和真实测试实验的数据对比和结果分析, 最终形成完整的实验报告。教师对学生虚拟仿真实验、实际操作实验、最终实验报告等分别进行过程性和结果性

综合评价。

4 结束语

基于虚实结合模式的高速高温摩擦磨损实验教学, 通过将虚拟仿真实验与实际操作实验相结合, 可以避免单一教学模式的不足, 并充分发挥各模式优势, 取长补短, 有利于教学信息的存储、统计以及资源共享等; 同时能解决线下场地实训人均设备受限、实验教学难度大和教学效果差等问题。

以虚实结合的实践项目为牵引, 充分调动学生的学习积极性, 强化学生的自主学习和自主攻关能力, 提高学生学习课程的主观能动性, 锻炼学生独立解决实际问题的能力, 形成以“学生为主体, 教师为主导”的高效混合式实验教学体系。

参考文献

- [1] 孙桓, 葛文杰. 机械原理[M]. 9 版. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [2] 濮良贵, 陈国定, 吴立言. 机械设计[M]. 10 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [3] 万志坚. 机械设计基础[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [4] 温诗铸, 黄平, 田煜, 等. 摩擦学原理[M]. 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [5] KHONSARI M M, BOOSER E R. Applied tribology: Bearing design and lubrication[M]. New York: John Wiley&Sons, 2001.
- [6] 高洁, 朱如鹏. 直升机传动系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [7] ZHAO H L, SU H, CHEN G D. Analysis of total leakage of finger seal with side leakage flow[J]. *Tribology International*, 2020, 150: 106371.
- [8] WANG L, DU Z K, WANG Y, et al. Temperature measurement and error analysis of the transverse plane of oil-jet-lubrication herringbone gear with infrared pyrometers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(2): 024902.
- [9] 邵天敏, 李永健. 面向航空发动机应用的表面涂层及其高温摩擦磨损性能专栏序言[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(3): 18.
- [10] ZHANG T, JIANG F, YAN L, et al. A novel ultrahigh-speed ball-on-disc tribometer[J]. *Tribology International*, 2021, 157: 106901.

(下转第 127 页)