

塑料齿轮加速疲劳寿命试验机研制及试验研究

石照耀¹ 王伟¹ 于渤¹ 李平² 辛栋²

(1 北京工业大学 材料与制造学部 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

(2 深圳市兆威机电股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 基于恒定应力加速疲劳寿命测试原理, 研制了针对塑料齿轮的试验机, 进行疲劳寿命的快速测试。重点研究了试验机的工作原理、结构以及核心零部件的设计。整体上采用卧式结构, 设计了专用的齿轮工装来保证测试精度, 由温控箱对测试环境温度进行调节控制。该试验装置可以准确测量塑料齿轮的转速、转矩、温度以及循环次数对传动效率的影响。试验结果表明, 转矩越大, 塑料齿轮在稳定磨损阶段的平均效率越低; 平均温度越高, 循环次数越少。为塑料齿轮寿命预测和失效形式的研究提供了一种高效可行的方法与装置, 具有理论价值与实际应用价值。

关键词 塑料齿轮 疲劳寿命 温度控制 传动效率

Design and Experiment Research of Accelerated Fatigue Life Tester for Plastic Gear

Shi Zhaoyao¹ Wang Wei¹ Yu Bo¹ Li Ping² Xin Dong²

(1 Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2 Shenzhen Zhaowei Machinery & Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract Based on the principle of constant stress accelerated fatigue life test, a testing machine for plastic gears is developed to test the fatigue life quickly. The working principle, structure composition and the design of core parts of the testing machine are mainly studied. On the whole, the horizontal structure is adopted, the special gear tooling is designed to ensure the test accuracy, and the temperature control box is used to adjust and control the test environment temperature. The experimental device can accurately measure the influence of speed, torque, temperature and cycle times of plastic gear on transmission efficiency. The experimental results show that the higher the torque is, the smaller the average efficiency, the higher the average temperature and the smaller the number of cycles are. It provides an efficient and feasible method and device for the life prediction and failure form research of plastic gear, which has theoretical value and practical application value.

Key words Plastic gear Fatigue life Temperature control Transmission efficiency

0 引言

塑料齿轮通常采用注射成型加工工艺, 具有生产效率高、成本低、质量轻、传动噪声低等优点。然而, 由于塑料本身的高热敏感性和低弹性模量, 在热和力的作用下更易于变形和断裂, 使用寿命不如金属齿轮^[1], 直接影响齿轮传动系统的可靠性。导致塑料齿轮失效的形式有很多, 其中, 齿轮轮齿断裂最为常见, 主要有齿根附近处断裂和节点附近处断裂两大类^[2]。齿轮的材料、齿面硬度、润滑情况、齿面摩擦力的大小, 工作环境温度等都是导致塑料齿

轮失效的因素, 并直接影响使用寿命。因此, 对塑料齿轮进行加速疲劳寿命测试尤为重要^[3]。

为了预测齿轮的使用寿命, 国内外开发了形式多样的齿轮寿命试验设备, 但主要针对金属齿轮。中机生产力促进中心与英国纽卡斯尔大学齿轮技术中心合作, 研发出一台背对背齿轮疲劳测试台, 可以测试齿轮接触、弯曲疲劳寿命及胶合特性。闫清东等研制了一种可用于动态加载的功率封闭式齿轮寿命测试台^[4]。卢玉明等研制了航空发动机减速器的加速寿命试验台, 加速试验可代替常规试验, 缩短了试验周期^[5]。李国云等研制了风力发电机齿轮箱的

加速寿命试验台，基于齿轮箱实际使用时的载荷谱，采用线性强化的方法，设计了齿轮箱加速寿命的载荷谱^[6]。对于齿轮加速疲劳寿命试验方法的研究始于恒定应力加速寿命试验方法。Nelson 对恒定应力加速寿命试验进行了开创性的研究，首次在寿命试验的数据分析中运用最小二乘法、极大似然估计等多种统计分析方法^[7]。后来，又出现了步进应力试验方法。1980 年，Nelson 首次提出累积失效模型，解决了步进应力加速寿命试验提取寿命信息难的问题^[8]。梁建等比较了恒定应力和步进应力加载方法对加速寿命试验的影响，基于 Miner 疲劳累积损伤法则，分析了减速器加速寿命试验的原理和方法^[9]。曾雨田等基于 S-N 疲劳曲线和 Miner 疲劳累积损伤理论，进行了风电齿轮箱的加速疲劳试验原理的研究^[10]。潘冬等建立了考虑齿轮转速和负载转矩的渐开线直齿圆柱齿轮的齿轮疲劳寿命预测数学模型^[11]。上述研究主要围绕金属齿轮和齿轮传动系统的疲劳寿命测试展开，对塑料齿轮的疲劳寿命测试研究国内鲜有报道。

在塑料齿轮加速疲劳寿命测试中，部分参数和模型可以借鉴金属齿轮和齿轮传动系统，但是工况相异和环境温度对塑料齿轮加速疲劳寿命试验的影响较大。因此，需要开发一种塑料齿轮加速疲劳寿命试验机，为塑料齿轮加速疲劳寿命测试提供合适的转速、转矩和测试环境温度，最终实现对塑料齿轮疲劳寿命的快速测量。

1 加速疲劳寿命试验原理

加速寿命试验是指利用与物理故障规则相关的数学统计模型，在高于正常应力的加速条件下得到被测物在额定应力条件下的可靠性信息的一种寿命试验方法。加速寿命试验根据负载端加载方式的不同可分为恒定应力加速寿命试验、序进应力加速寿命试验和步进应力加速寿命试验。恒定应力加速寿命试验是指对被测物加载的加速应力保持不变，直到被测物完全失效。恒定应力加速寿命试验数学模型成熟，数据处理难度较小。因此，本文中采用恒定应力加速寿命试验方法。

如图 1 所示，温度传感器实时测量齿轮啮合部分表面温度，同时在不改变塑料齿轮失效机理的基础上，增大输出端负载转矩 T_2 、提升输入端转速 n_1 或者提高测试环境温度，可以缩短疲劳寿命试验测试周期^[12]。温度传感器的布置方式如图 2 所示，温度传感器通过支架固定在支撑平台的侧面，被测齿轮及壳体放置在支撑平台上面，在壳体合适位置开孔，

方便温度传感器测量齿轮啮合部位表面温度。加速疲劳寿命试验步骤计算尚无标准可依，仅仅是业内普遍的做法。根据塑料齿轮材料的热性能和机械性能，防止塑料齿轮的失效形式发生改变，施加于塑料齿轮的负载转矩 T_2 不能超过 $45\text{ N}\cdot\text{m}$ ，输入转速 n_1 不能超过 $1\,000\text{ r/min}$ ，测试环境温度不能超过 $100\text{ }^\circ\text{C}$ ，齿轮表面温度不能超过 $105\text{ }^\circ\text{C}$ ^[13]。通过比较齿轮的传动效率 η 和塑料齿轮啮合部分的表面温度大小与试验开始前设定的参数来判断塑料齿轮是否失效。传动效率计算公式为

$$\eta = \frac{T_2}{T_1 i} \tag{1}$$

式中， i 为理论传动比； T_1 为主动齿轮转矩。

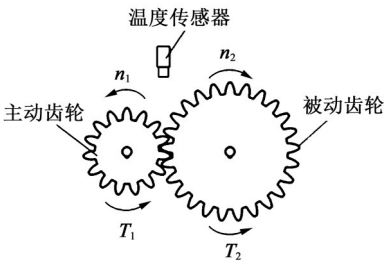


图 1 试验原理
Fig. 1 Principle of test

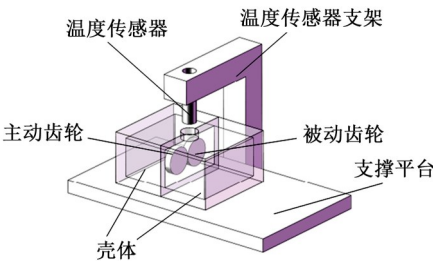


图 2 温度传感器布置方式
Fig. 2 Arrangement of temperature sensor

2 试验机工作原理及构成

2.1 试验机参数

试验机主要兼容中心距在 $0\sim60\text{ mm}$ 的塑料齿轮副，主要技术参数指标如表 1 所示。

表 1 试验机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of tester

参数	数值	参数	数值
最大输入功率/kW	2.91	最大输出转速/(r/min)	1 000
最大输入转矩/(N·m)	18.5	转速测量精度/(′)	±1
最大输入转速/(r/min)	1 500	转矩测量精度 FS/(N·m)	±0.1%
最大输出功率/kW	5.12	测试环境温度/℃	20~150
最大输出转矩/(N·m)	48.9	温度测量精度/℃	±1

2.2 试验机工作原理

试验机的工作原理如图 3 所示。驱动电机、磁栅

传感器和转矩传感器等安装在输入端径向移动平台上。输入端由驱动电机提供动力,输出端由负载电机提供负载转矩。电气系统中的运动控制模块实现对驱动电机和负载电机的控制。驱动电机带动被测齿轮副的输入轴旋转,被测齿轮副的输出轴连接负载电机,负载电机为其提供负载转矩。疲劳寿命测试时,将温控箱打开,等待测试环境温度稳定在设定值,输入端的驱动电机设定为转速模式,输出端的负载电机设定为转矩模式,两个塑料齿轮的旋转方向相反,随着试验的进行,塑料齿轮啮合部分表面温度将升高,塑料齿轮强度较低的部分将发生形变直至断裂。试验过程中,转矩传感器负责测量齿轮副两端转矩值,电机编码器负责测量电机转速,温度传感器负责测量塑料齿轮啮合部分表面的温度。电气系统中的数据采集模块负责采集转矩信号、角度信号、温度信号、输入端移动平台移动距离信号,并传递给工控机处理。测量软件对采集到的数据进行处理、统计和分析,即可得到任意时刻齿轮副输入端和输出端的转矩值和转速值、齿轮啮合部分表面温度值及输入端移动平台移动的距离。对处理后的数据进行绘图,得到齿轮效率曲线和齿轮温度曲线^[14]。

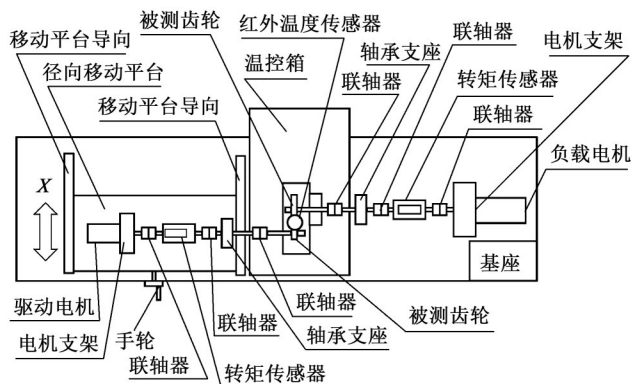


图3 齿轮试验机工作原理

Fig. 3 Working principle of gear tester

2.3 试验机构成

塑料齿轮加速疲劳寿命试验机结构简单、安装方便,主要由机械系统、测控系统、环境温度调控系统及数据处理系统等构成^[15]。机械系统误差是影响试验机测量精度的关键因素,可靠稳定的机械系统是试验机的必备条件。环境温度调控系统负责控制塑料齿轮测试环境温度。

3 机械系统设计

如图4所示,试验机机械系统由驱动电机、转矩传感器、温控箱、负载电机、大理石平台、大理石支架、塑料齿轮工装等部分组成。驱动电机、输入

转矩传感器等安装在大理石平台底座左边的输入端径向移动平台上,负载电机、输出转矩传感器等安装在大理石平台基座右边,温控箱放置在大理石平台底座中间凹槽部分,塑料齿轮工装放置在温控箱中。试验机输入端、温控箱、输出端结构及各部分组件如图4所示。

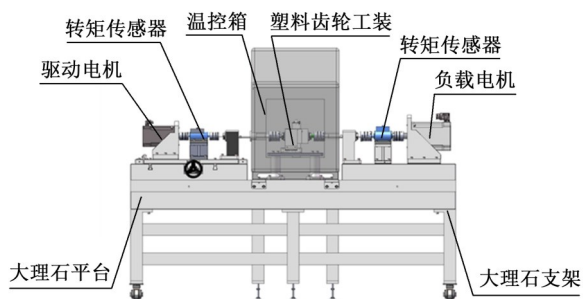


图4 试验机主机结构

Fig. 4 Mainframe structure of tester

3.1 塑料齿轮工装设计

为了减小齿轮轴系的径向跳动、轴向跳动及轴系安装倾角等带来的误差,提高试验机的测量精度,试验机设计了塑料齿轮工装,结构如图5所示,包括输入轴、输出轴、壳体、锁紧螺母等。轴系系统采用与地面平行的结构,主动齿轮安装于输入轴,从动齿轮安装于输出轴,在齿轮两侧都有主轴轴系负责支撑,主轴中安装有一对角接触轴承,安装方式是背对背安装,可以承载一定的轴向力,在旋转时可以有效地减少径向跳动。壳体内部的两个角接触轴承通过内隔套隔开,加长了轴承支座的支撑距离,可提高主轴末端的回转精度。塑料齿轮工装直接安装到温控箱里的支撑平台上。

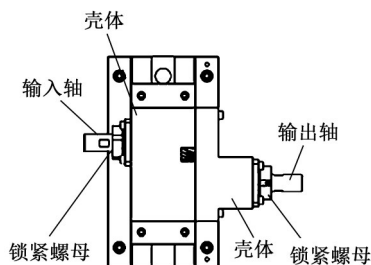


图5 塑料齿轮工装

Fig. 5 Plastic gear tooling

3.2 转矩加载系统设计

转矩加载系统采用伺服电机提供负载转矩,输出端的转矩传感器通过联轴器和输出端伺服电机连接。伺服电机产生的负载转矩经转矩传感器和两个联轴器,传递到输出轴上,最后传递到塑料齿轮上。输出端伺服电机被设置成转矩模式。试验开始前,在上位机界面输入设定的负载转矩值 T ,此时,伺服电机将产生大小为 T 的转矩,塑料齿轮上的转矩 $T_2=T$ 。

4 试验机测控系统

试验机测控系统如图 6 所示, 由运动控制模块、转矩采集模块、温度采集模块、距离采集模块及各传感器等组成。工控机通过运动控制模块将信号传递给伺服电机驱动器, 再由伺服电机驱动器对驱动电机和负载电机进行驱动。转矩传感器测量输入端和输出端的转矩值, 温度传感器采集塑料齿轮啮合部分表面温度值, 磁栅传感器采集长度信号, 经相应的采集模块采集记录到工控机的测量软件中, 由测量软件处理后得出试验结果。测量软件界面如图 7 所示, 输入参数有传动比、输入速度、输出转矩、效率下限等, 输出参数有输入转矩、输出转矩、传动效率、齿轮温度、测试周期等。

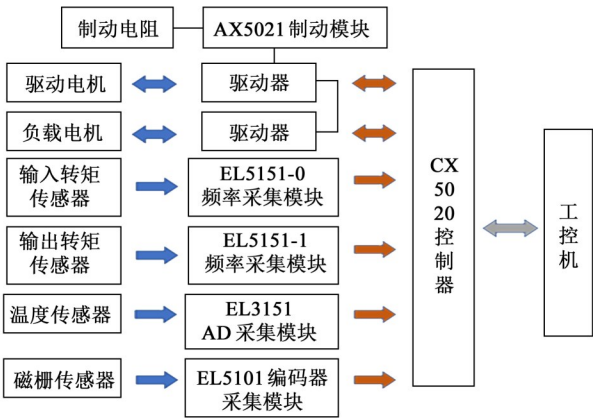


图 6 测控系统框图

Fig. 6 Block diagram of the measurement and control system



图 7 测量软件界面

Fig. 7 Measurement software interface

5 测试试验

为验证试验机的各项功能是否符合设计要求, 在试验机上进行了寿命试验。塑料齿轮加速疲劳寿命试验机如图 8 所示。本次寿命试验, 采用塑料小齿轮和塑料大齿轮, 测量对象技术参数如表 2 所示。

表 2 塑料齿轮主要规格

Tab. 2 Main specification of plastic gear

齿轮名称	小齿轮	大齿轮
材料	塑料	塑料
模数	1.8	1.8
齿数	14	39
齿宽/mm	17	19
压力角/(°)	20	20
中心距/mm	52.30	

测试开始前, 先对被测齿轮进行预加热两小时左右, 当被测齿轮温度稳定在 87.8 ℃左右时, 开始测试。选取 36 N·m、32.4 N·m 和 28.8 N·m 3 种负载转矩分别进行试验。齿轮温度及效率曲线分别如图 9 和图 10 所示, 测量数据如表 3 所示。



图 8 齿轮试验机原型

Fig. 8 Prototype of gear tester

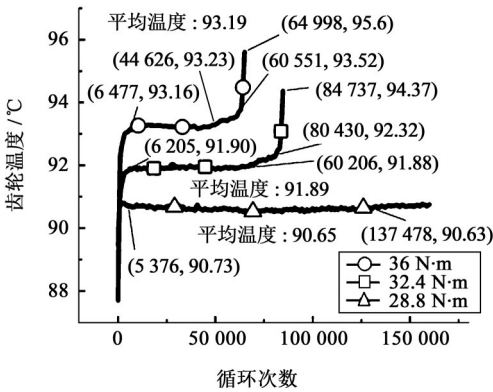


图 9 齿轮温度曲线

Fig. 9 Gear temperature curve

表 3 塑料齿轮加速寿命测试数据

Tab. 3 Accelerated life test data of plastic gear

样本	1	2	3
输入转速/(r/min)	90	90	90
输出转矩/(N·m)	36	32.4	28.8
环境温度/℃	90	90	90
平均温度/℃	93.19	91.89	90.65
测试周期 N	64 998	84 737	160 007

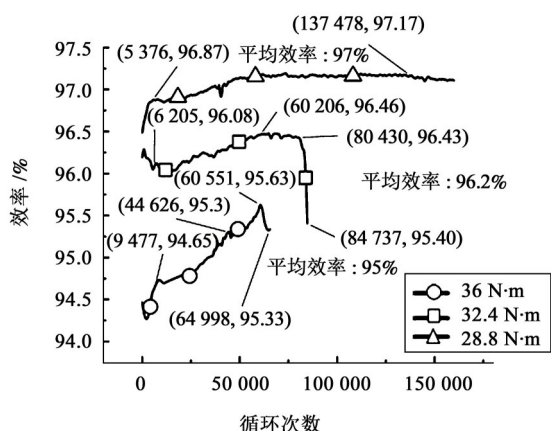


图10 齿轮效率曲线

Fig. 10 Gear efficiency curve

由齿轮温度曲线和测量数据可知,当输出转矩为 $36.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,齿轮在第6 477次循环后,随着齿轮副磨合磨损阶段结束,进入稳定磨损阶段,齿面啮合区温度稳定在 $93.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;在第44 626次循环后,进入剧烈磨损阶段,啮合区温度开始上升,6 477~44 626次循环内啮合区平均温度为 $93.19\text{ }^{\circ}\text{C}$;之后,温度缓慢升高,直到第60 551次循环后,啮合区温度急剧增大,在64 998次循环后,齿轮温度上升到 $95.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可以判断,在64 998次时,齿轮发生断裂。当输出转矩为 $32.4\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,齿轮在第6 205次循环后,随着齿轮副磨合磨损阶段结束,进入稳定磨损阶段,齿面啮合区温度稳定在 $91.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;在第60 206次循环后,进入剧烈磨损阶段,啮合区温度开始上升,6 205~60 206次循环内啮合区平均温度为 $91.89\text{ }^{\circ}\text{C}$;之后,温度缓慢升高,直到第80 430次循环,啮合区温度急剧增大,在第84 737次循环,齿轮温度上升到 $94.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可以判断,在84 737次循环时,齿轮发生断裂。当输出转矩为 $28.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,齿轮在第5 376次循环后,随着齿轮副磨合磨损阶段结束,进入稳定磨损阶段,温度稳定在 $90.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;在第137 478次循环后,齿轮温度无明显变化,5 114~137 478次循环内齿轮啮合区平均温度为 $91.65\text{ }^{\circ}\text{C}$,寿命已经符合齿轮副设计要求,因此,人为停止测试。由3条齿轮温度曲线可知,输出转矩越大,齿轮稳定时的平均温度越高。在达到断裂之前,塑料齿轮产生磨损,使得啮合区温度缓慢升高,当磨损达到一定程度,轮齿发生塑性形变,温度开始急剧上升,最终塑料齿轮完全失效,如图11所示。

由齿轮副效率曲线可知,当输出转矩为 $36.6\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,效率在第6 477次循环达到94.65%,在第44 626次循环达到95.3%,当到达60 551次循环时,效率达到最大值95.63%,6 477~44 626次循环内齿轮副

平均效率为95%;此后,效率开始急剧下降,当达到64 998次循环时,效率下降到95.33%;由此可以判断,在64 998次时,齿轮发生断裂。当输出转矩为 $32.2\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,效率在第6 205次循环达到96.08%,在第60 206次循环达到96.46%;当到达80 430次循环时,效率达到96.43%,6 205~80 430次循环内齿轮副平均效率是96.2%;此后,效率开始急剧下降,当达到84 737次循环时,效率下降到95.40%;由此可以判断,在84 737次循环时,齿轮发生断裂。当输出转矩为 $28.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 时,效率在5 376次循环达到96.87%,此后效率不再有明显的下降;当达到137 478次循环时,效率为97.17%,5 376~137 478次循环内齿轮副平均效率为97%,循环次数已达到设计要求,停止测试。由3条齿轮副效率曲线可知,输出转矩越大,测试开始时和稳定后的效率越小,在达到断裂之前,塑料齿轮产生磨损,当磨损达到一定程度,轮齿发生塑性形变,效率开始急剧下降,最终塑料齿轮完全失效。由图9和图10可知,效率曲线和温度曲线是完全对应的。

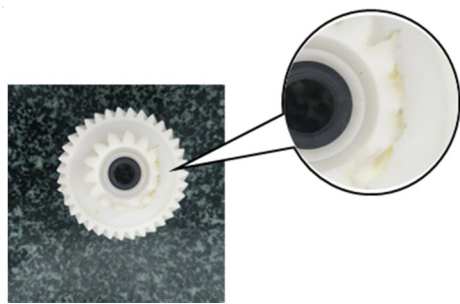


图11 测量结果

Fig. 11 Measurement results

6 结论

基于加速疲劳寿命测试原理,研制了塑料齿轮加速疲劳寿命试验机。

(1) 进行了3次不同负载转矩的加速寿命试验。基于对试验结果的分析可发现,负载转矩越大,塑料齿轮在稳定磨损阶段的平均效率越低,平均温度越高,总的循环次数越少。因此,可以通过提高负载转矩实现塑料齿轮的加速疲劳寿命试验。

(2) 试验机可以实现不同转速、负载及环境温度条件下的塑料齿轮加速疲劳寿命试验,测试环境温度控制精准,测试中心距可调。

参 考 文 献

- [1] TSUKAMOTO N, TERASHIMA K. Development of plastic gears for power transmission: various methods of lengthening the life of plastic gears and their effect [J]. Bulletin of JSME, 1986, 29 (247): 249-255.

- [2] 欧阳志喜,石照耀.塑料齿轮设计与制造[M].北京:化学工业出版社,2011:173-174.
OUYANG Zhixi, SHI Zhaoyao. Design and manufacture of plastic gear[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 173-174.
- [3] 谈伟,恽洪园.提升齿轮传动寿命的强度匹配方法[J].机械传动,2015,39(9):179-180.
TAN Wei, YUN Hongyuan. Strength matching method for improving the gear transmission life[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(9): 179-180.
- [4] 阎清东,项昌乐,冯永存.功率封闭机械式变速器齿轮寿命试验台[J].北京理工大学学报,1998(3):302-306.
YAN Qingdong, XIANG Changle, FENG Yongcun. Gear life test rig for power closed mechanical transmission[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 1998(3): 302-306.
- [5] 卢玉明,吴克坚,曹正康,等.航空发动机体内减速器的加速等效试验技术[J].中国机械工程,1994(2):46-48.
LU Yuming, WU Kejian, CAO Zhengkang, et al. Accelerated equivalent test technology for internal reducer of aeroengine[J]. China Mechanical Engineering, 1994(2): 46-48.
- [6] 李国云,秦大同.风力发电机齿轮箱加速疲劳试验技术分析[J].重庆大学学报,2009,32(11):1252-1256.
LI Guoyun, QIN Datong. Analysis of accelerated fatigue test technology for wind turbines gearbox[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1252-1256.
- [7] NELSON W. Accelerated testing: statistical models[J]. Test Plans & Data Analysis Wiley, 1990, 56(8): 50-52.
- [8] NELSON W. Accelerated life testing-step-stress models and data analyses[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1980, 29(2): 103-108.
- [9] 梁健,李凤言.齿轮减速器的加速可靠性试验[J].山西矿业学院学报,1997,15(4):344-349.
LIANG Jian, LI Fengyan. Accelerated reliability test of gear reducer[J]. Shanxi Mining Institute Learned Journal, 1997, 15(4): 344-349.
- [10] 曾雨田,李金库.风电齿轮箱加速疲劳寿命试验验证[J].机械工程师,2018(9):152-154.
ZENG Yutian, LI Jinku. Test verification of accelerated fatigue life about wind power gearbox[J]. Mechanical Engineer, 2018(9): 152-154.
- [11] 潘冬,赵阳,李娜,等.齿轮磨损寿命预测方法[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(9):29-33.
PAN Dong, ZHAO Yang, LI Na, et al. The wear life prediction method of gear system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(9): 29-33.
- [12] 余国达,刘怀举,朱才朝,等.基于摩擦热流-滞后热通量多热源的塑料齿轮啮合温度研究[J].机械传动,2021,45(2):6-15.
YU Guoda, LIU Huaiju, ZHU Caichao, et al. Analysis of meshing temperature of plastic gear based on the multi heat source of frictional heat flux and hysteresis heat flux[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(2): 6-15.
- [13] 徐然.商用车变速器加速疲劳寿命试验技术研究[D].重庆:重庆理工大学,2017:124-157.
XU Ran. A research on accelerated fatigue test method for commercial vehicle transmissions[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017: 124-157.
- [14] 石照耀,任新丽,于渤,等.塑料齿轮传动误差动态试验机的研制[J].机械传动,2019,43(9):144-147.
SHI Zhaoyao, REN Xinli, YU Bo, et al. Development of transmission error dynamic testing machine for plastic gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(9): 144-147.
- [15] 李传闪,梁栋,陈兵奎.塑料蜗杆与钢质斜齿轮啮合特性分析及实验研究[J].机械传动,2017,41(12):58-62.
LI Chuanshan, LIANG Dong, CHEN Bingkui. Analysis of the engagement characteristic between plastic worm and steel helical gear and its experimental research[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(12): 58-62.

收稿日期: 2021-05-19 修回日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51635001)

作者简介: 石照耀(1964—),男,湖南岳阳人,博士,教育部长江学者特聘教授,博士生导师;主要研究方向为齿轮工程、精密测试技术及仪器。

(上接第123页)

- [5] CHIHARA K. Development of miniature needle roller bearing for planetary gears with high speed rotation[J]. Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, 2011, 42: 897-901.
- [6] SAKAGUCHI T, NISHIKAWA M, KAZAMA S, et al. Dynamic analysis of cage stress needle roller bearings under planetary motions[J]. Journal of Tribology, 2007: 604-611.
- [7] JUNDAT P M, KULKAMI S G, SONAWANE S A. Optimization of needle roller bearing system by using finite element analysis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014: 71-85.
- [8] 李红涛,张文虎,邓四二,等.停止阶段圆柱滚子轴承保持架应力分析[J].机械科学与技术,2018,37(2):172-179.
Li Hongtao, Zhang Wenhui, Deng Sier, et al. Study on cage stress of cylindrical roller bearing at stop stage[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(2): 172-179.
- [9] 庞碧涛,乔淑香,邓四二.保持架的改进设计及其基于ANSYS的强度分析[J].机械传动,2010,34(6):76-78.
Pang Bitao, Qiao Shuxiang, Deng Sier. Improving design of cage and strength analysis based on ANSYS[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(6): 76-78.
- [10] CUI Y C, DENG S E, NI Y G, et al. Effect of roller dynamic unbalance on cage stress of high-speed cylindrical roller bearing[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(9): 1580-1589.
- [11] CHOUDHURY S, DHASON R, ROY S, et al. Stress analysis of different types of cages in cervical vertebrae: a finite element study[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME 2020). Bristol: IOP Publishing Ltd., 2020: 1-7.

收稿日期: 2021-01-01 修回日期: 2021-01-19

作者简介: 王玉波(1995—),男,河南禹州人,硕士;研究方向为滚动轴承设计及理论。