

舰船齿轮传动轴模拟试验件设计方法研究

杨子龙,张 朵,何新党,董思辰

(西北工业大学 力学与土木建筑学院,陕西 西安 710072)

摘 要:在实际的试验实施过程中,受到试验场地、试验成本以及试验载荷等条件的制约,大型重载传动装置试验实施难度极大。为了简化试验条件并降低试验成本,以大型重载传动装置的齿轮轴为研究对象,基于相似理论中的量纲分析法推导出齿轮轴最大应力和变形的相似准则。采用 KISSsoft 和 ABAQUS 仿真软件对其物理性能的等效性进行了验证。分析结果表明:将模型尺寸按照 1.5:1 的比例缩小时,缩比后的模型应力集中部位和最大应力与原模型一致、最大变形缩小 1.5 倍的相似准则为:原模型所受集中力缩小 1.5^2 ,扭矩和弯矩缩小 1.5^3 。

关 键 词:大型重载传动装置;齿轮传动轴;相似性原理;模型试验

中图分类号:TH132.41 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.05.009

[引用本文格式]杨子龙,张 朵,何新党,等.舰船齿轮传动轴模拟试验件设计方法研究[J].热能动力工程,2021,36(5):55-60. YANG Zi-long, ZHANG Duo, HE Xin-dang, et al. Design method for the simulation parts of ship gear drive shaft[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(5): 55-60.

Design Method for the Simulation Parts of Ship Gear Drive Shaft

YANG Zi-long, ZHANG Duo, HE Xin-dang, DONG Si-chen

(School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072)

Abstract: In the actual test implementation process, subject to conditions such as test site, test cost, and test load, it is extremely difficult to implement large-scale heavy-duty transmission test. In order to simplify the test conditions and reduce the test cost, this paper uses the gear shaft of a large heavy-duty transmission device as the research object. Based on the dimensional analysis method of similarity theory, the similarity criterion of the maximum stress and deformation of the gear shaft is derived. KISSsoft and ABAQUS simulation software are used to verify the equivalence of its physical properties. The analysis results show that when the model size is scaled according to 1.5:1, the similarity criteria for the stress concentration and the maximum stress of the model after scaling are consistent with the original model, and the maximum deformation scaling is 1.5 times as follows: the concentrated force on the original model is scaled by 1.5^2 , and the torque and bending moment are scaled by 1.5^3 .

Key words: large-scale heavy-duty transmission, gear drive shaft, similarity principle, model test

收稿日期:2021-02-02; 修订日期:2021-02-20

基金项目:中国博士后科学基金(190525);国家自然科学基金(11902259);博士后创新人才支持计划(BX20190285);中央高校基本科研业务费(G2020KY05406)

Fund-supported Project: China Postdoctoral Science Foundation(190525), National Natural Science Foundation of China(11902259); Innovation Foundation for the Postdoctoral Talents(BX20190285); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(G2020KY05406)

作者简介:杨子龙(1978-),男,山东招阳人,西北工业大学博士研究生。

通讯作者:何新党(1985-),男,陕西咸阳人,西北工业大学副研究员。

引 言

齿轮轴作为传动装置向外传递动力的关键部件,承受着振动、冲击、扭转和弯曲等多种载荷的作用,其疲劳可靠性设计一直是设计者非常重视的问题^[1-4]。但是在早期设计过程中,受到试验场地、试验成本以及试验载荷等条件的制约,原模型试验实施难度极大。因此,有必要利用相似理论建立相似模型,实现所需参数的缩比,通过建立相似工况获得的数据,间接得到原模型在实际载荷下的传动性能参数。

相似试验因其具有试验经济性好、试验载荷小及试验过程可设计性强等优点,在大型建筑、桥梁的抗震测试、飞机风洞试验等大型工程问题中得到了广泛应用^[5-8]。随着相似理论和模型试验的发展,机械领域的相似试验研究越来越多。吴晓朋^[9]研究了大功率风电制动器惯性试验台缩比设计,完成了缩比试验台机械结构的设计校核和信号的采集测量。周昕毅等人^[10]开展了船舶柴油机比例模型试验研究,分析了燃烧相似性的三种单值条件相似法则,并进行了初步试验验证。王延忠^[11]针对高能流密度面齿轮设计了传动相似试验,推导出面齿轮齿根弯曲应力和振动加速度的相似准则,通过了试验验证。宋川^[12]设计了列车轴的缩比模型,证明了原模型与相似模型应力集中系数的相似性,完成了缩比件旋转弯曲工况下的试验验证。目前,专门针对齿轮轴开展的模型试验研究较少,且大型传动装置齿轮轴受力复杂,仅仅采用仿真分析方法进行结构设计难以完全掌握结构在实际运行中的失效状态。因此,有必要针对传动轴缩比件进行相似法则推导,开展模拟件试验方法的研究。

本文运用相似理论中的量纲分析法,通过缩小大型传动装置齿轮轴模型尺寸,推导出齿轮轴最大应力和变形的相似准则,完成试验载荷设计。然后分别用齿轮专用软件 KISSsoft 以及有限元软件 ABAQUS 对本文设计的缩比模型和原模型物理性能的等效性进行了验证分析。分析结果证明了本文所提方法的正确性和有效性。

1 传动装置齿轮轴原模型受力情况分析

传动装置由齿轮箱、离合器及联轴器等传动部件组成,其运行正朝着高速重载、低振低噪、长寿命和高可靠性的方向发展。传动装置的虚拟样机如图 1 所示。

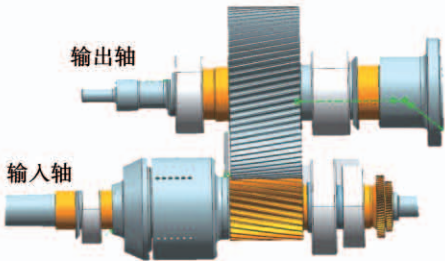


图 1 减速器示意图
Fig. 1 Reducer diagram

传动装置的零件众多、复杂,且长期承受复杂的载荷工况,容易导致齿轮轴、齿轮及轴承等关键部件出现磨损和疲劳等失效的情况。而目前缺乏完整的材料数据库和完备的失效模式分析,因此传动装置相似试验的研究很有必要。

1.1 斜齿轮和齿轮轴受力

以图 1 中的输入轴为例,对轴上斜齿轮的受力情况进行分析,为传动轴相似试验的物理模型等效性分析奠定基础。图 2 为斜齿圆柱齿轮传动的受力情况。可以看到,法向力 F_n 最终可以分解为 3 个互相垂直的空间分力:圆周力 F_t ,轴向力 F_a ,径向力 F_r 。 F'_n 为 F_n 的法向分力。

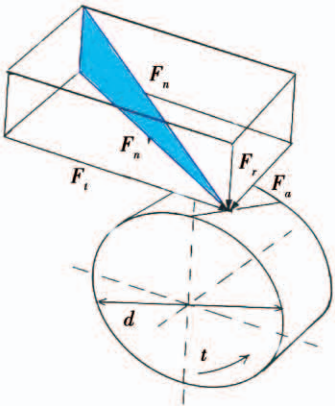


图 2 斜齿轮受力分析图

Fig. 2 Force analysis diagram of helical gear

齿轮轴同时承受扭矩和弯矩作用,如图3所示。其中 T 为齿轮轴所承受扭矩, F_{NH1} 、 F_{NH2} 为 XOZ 平面的支反力, F_{NV1} 、 F_{NV2} 为 XOY 平面的支反力。 M_a 为 F_a 平移后的等效弯矩。 l_1 和 l_2 分别为齿轮受力点到左右支座的水平距离。

齿轮轴同时承受扭矩和弯矩作用,如图3所示。

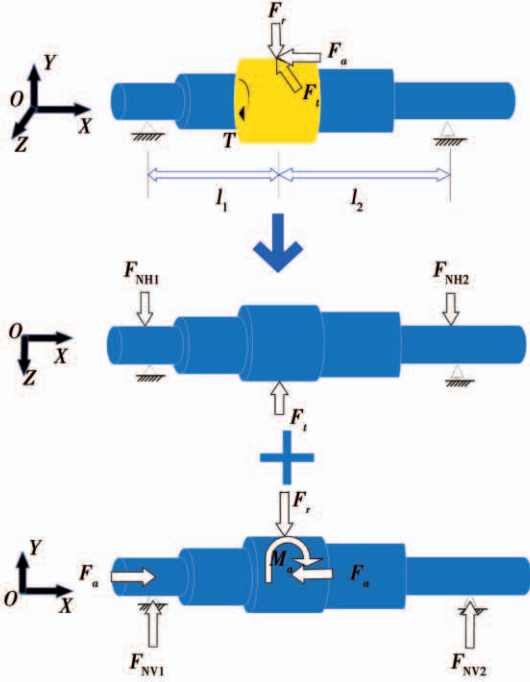


图3 齿轮轴的空间力系图

Fig.3 Spatial force system diagram of gear shaft

1.2 齿轮轴的强度和刚度校核

弯扭组合强度条件校核轴的强度:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{(M^2 + T^2)}}{\frac{\pi}{32}d^3} = 196.68 < [\sigma] \quad (1)$$

式中: σ_e —危险截面应力, MPa; M —危险截面上的弯矩, N·m; T —危险截面上的扭矩, N·m; d —分度圆直径, mm; $[\sigma]$ —材料许用应力, MPa。

齿轮轴在弯扭组合受力情况下的变形(忽略轴向力), 扭转角 φ 及扭转变形 x 为:

$$\varphi = \frac{T \cdot l}{G \cdot I_p} \times \frac{180}{\pi} = 0.01 \quad (2)$$

$$x = \varphi \times \frac{d}{2} = 0.9 \quad (3)$$

式中: φ —圆轴单位长度扭转角, $(^\circ)/m$; l —轴长, m; G —材料的切变模量, GPa; I_p —截面二次极矩, m^3 ;

x —扭转变形, mm; d —分度圆直径, mm。

弯曲变形 y :

$$y = y_t + y_r = \frac{F_t l^3}{48EI} + \frac{F_r l^3}{48EI} = 2.3 \quad (4)$$

式中: y_t —圆周力导致的弯曲变形, mm; y_r —径向力导致的弯曲变形, mm; EI —抗弯刚度。

轴选用材料 42CrMoA, 抗拉强度为 1 080 MPa, 屈服强度为 930 MPa。按照理论计算, 轴的强度满足设计要求。齿轮轴绕轴旋转了 0.9 mm, 径向力导致变形 2.3 mm, 从轴刚度条件进行分析, 轴的抗变形能力满足要求。

2 齿轮轴缩比模型设计方法

2.1 模型的相似性原理

模型试验^[13]是对模型中的力学参数进行测量、记录和分析, 并根据相似关系换算到原型中, 从而达到研究原型力学过程的目的。而模型试验的理论基础就是结构相似理论。其中, 相似第二定理(即 π 定理)可以表述为:“设一物理系统有 n 个物理量, 其中 k 个物理量的量纲是相互独立的, 那么这 n 个物理量可表示成是相似准则 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k}$ 之间的函数关系”。

2.2 基于量纲分析法的相似准则数求解及相似模型设计

2.2.1 求相似准则数目

根据轴的受力分析, 采用矩阵法导出相似准则。根据图3和已有的力学知识, 影响应力的参数有应力 σ , 变形 y , 转角 ϕ , 集中载荷 F , 扭矩 T , 弯矩 W , 轴的横截面积 A , 截面模数 ω , 转动惯量 J , 几何量 L 和弹性模数 E 。

各参数方程可以写作:

$$f(\sigma, y, \phi, F, T, M, A, \omega, J, L, E) = 0 \quad (5)$$

用矩阵法求准则方程, 列矩阵表1。

表1中 $a, b, \dots, k$ 分别为基本量纲 $\sigma, y, \dots, E$ 的因次量。从表1可以看出, 本系统共有 11 个设计变量, 其中 9 个为独立变量, 则相似准则数函数可表达为:

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_9) = 0. \quad (6)$$

经推演得出准则方程:

$$F\left(\frac{\sigma}{E}, \frac{y}{L}, \varphi, \frac{F}{EL^2}, \frac{T}{EL^3}, \frac{M}{EL^3}, \frac{A}{L^2}, \frac{\omega}{L^3}, \frac{J}{L^4}\right) = 0 \quad (7)$$

表 1 矩阵表
Tab.1 Matrix table

参数因次	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>
基本参数	σ	γ	ϕ	F	T	M	A	ω	J	L	E
力 K	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1
几何量 L	0	1	0	0	1	1	2	3	4	1	2
π_1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
π_2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
π_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
π_4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	1
π_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1
π_6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	1
π_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0
π_8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0
π_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0

2.2.2 模型设计计算

首先需要确定几何缩比 C_l , 综合考虑轴承、齿轮缩小比例及轴本身尺寸, 取 $C_l = 1.5$ 。

由准则 $\pi_1 = \frac{\sigma}{E}$ 可得 $\frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma'}{E'}$, 若模型所用材料与原型相同, 即 $E = E'$, $\sigma' = \sigma$ 。

模型上量测的应力值等于原型上对应处的应力值。

由准则 $\pi_2 = \frac{\gamma}{L}$ 可知 $\frac{\gamma}{L} = \frac{\gamma'}{L'}$, $\frac{L}{L'} = 1.5$, $\gamma' = \frac{\gamma}{1.5}$ 。

由准则 $\pi_4 = \frac{F}{EL^2}$ 可知: $\frac{F}{EL^2} = \frac{F'}{E'(L')^2}$, 即 $F' = \frac{F}{1.5^2}$ 。

由准则 $\pi_5 = \frac{T}{EL^3}$ 可得: $\frac{T}{EL^3} = \frac{T'}{E'(L')^3}$, 即 $T' = \frac{T}{1.5^3}$ 。

式中: σ 、 E 、 γ 、 L 、 F 、 T —原型对应参数, σ' 、 E' 、 γ' 、 L' 、 F' 、 T' —模型对应参数。

准则 π_6 的分析同准则 π_5 , 故不再赘述。

当几何尺寸按比例缩小后, 轴的转角 ϕ , 横截面积 A , 截面模数 ω 和转动惯量 J 就自动满足了 π_3 、

π_7 、 π_8 、 π_9 4 个准则的要求。
通过上述分析, 可以得到缩比后轴受力情况, 如表 2 所示。

表 2 原模型与缩比模型受力情况对比
Tab.2 Comparison of stress between the original model and the scaled model

受力类型	轴原件	轴模拟件
周向力/N	110 861	49 271.55
径向力/N	46 592	20 707.55
轴向力/N	25 594	11 375.1
弯矩/N·m	6 231.9	2 848.62
扭矩/N·m	9 614.2	657.66

3 相似性模型与原模型的等效性验证

3.1 采用 KISSsoft 软件进行模型的等效性验证

KISSsoft 是一款专业的机械传动设计分析计算软件, 针对各类圆柱齿轮、齿条、双曲面齿轮、蜗轮和交叉轴斜齿轮等零件提供了计算方法, 从而完成强度和寿命校核。其依赖国际上比较通用的机械零部件标准, 并依据参数化的形式生成 3D 图形和详细报告^[14-15]。

为了验证通过相似模型建立的相似关系, 将齿轮按照 1.5 倍同比缩小, 使用 KISSsoft 软件的轴计算模块分别计算输入轴原型及相似模型的应力和变形。计算模型如图 4 和图 5 所示。

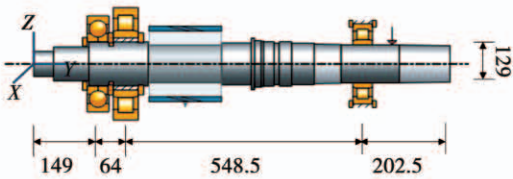


图 4 传动轴原件建模 (mm)
Fig.4 Original drive shaft modeling (mm)

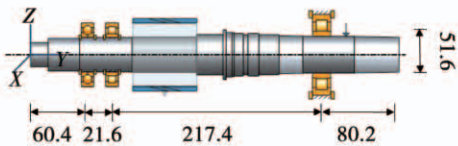


图 5 传动轴模拟件建模 (mm)
Fig.5 Drive shaft simulation component modeling (mm)

3.2 采用 ABAQUS 有限元软件进行模型等效性验证

为了解传动轴由于轴径变化导致的应力集中情况,使用有限元软件 ABAQUS 对齿轮轴(输入轴)进行静力学分析,结果如图 6 和图 7 所示。

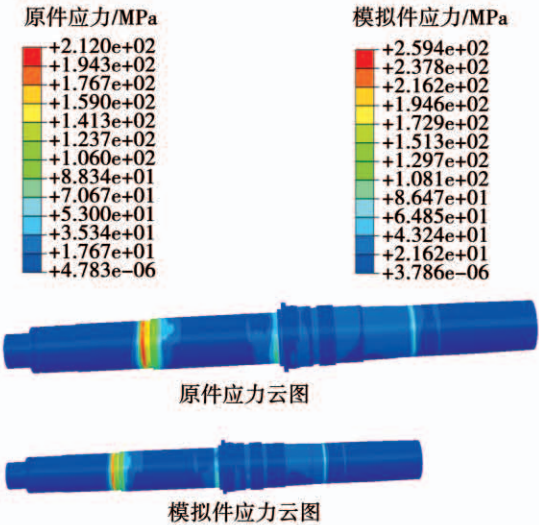


图 6 传动轴原件与模拟件应力结果

Fig. 6 Stress results of the original and simulation parts of the drive shaft

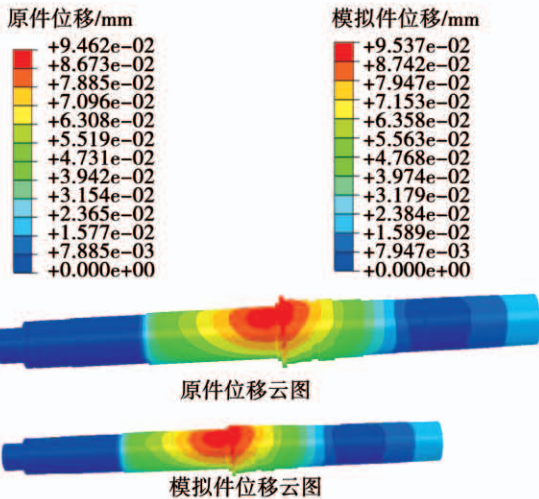


图 7 传动轴原件与模拟件位移结果

Fig. 7 Displacement results of the original and simulation parts of the drive shaft

3.3 相似模型与原模型验证结果分析

从 ABAQUS 结果图可以看到,齿轮轴最大应力出现在齿轮与轴装配位置靠近左侧处,且应力和位移分布形态相同。验证方法具体结果值对比如表 3

所示。

表 3 相似模型与原模型等效验证结果对比

Tab.3 Comparison of equivalent verification results between similar model and original model					
验证软件	计算模型	应力/MPa	应力比	位移/mm	位移比
KISSsoft	输入轴原件	168.29	1.05	0.208 7	1.45
	输入轴模拟件	160.66	1.05	0.143 7	1.45
ABAQUS	齿轮原件	310.1	0.99	0.143 6	1.51
	齿轮模拟件	313.9	0.99	0.095 4	1.51
	输入轴原件	212.0	0.82	0.094 6	1.50
	输入轴模拟件	259.4	0.82	0.062 9	1.50

对比计算结果,应力比值分别为 1.05,0.99 和 0.82,接近使用相似准则推导的应力相似比 1;变形比值分别为 1.45,1.51 和 1.50,接近使用相似准则推导的变形相似比 1.5。说明建立的相似模型可以用于传动轴相似模型性能试验。

4 结 论

(1) 由于传统基于理论简化分析和有限元仿真进行结构设计的方法不足以完全掌握结构的失效模式和失效特点,本文将相似理论应用到传动试验中,将大型重载传动装置的传动轴按照 1.5:1 的比例进行了缩小。利用量纲分析法推导出应力等效且位移比值为 1.5 的相似准则,得出基于此准则的外载荷缩比情况:集中力缩小 1.5^2 ,扭矩和弯矩缩小 1.5^3 。

(2) 分别用 KISSsoft 和 ABAQUS 软件进行了验证,依照理论分析得到的载荷对模拟件进行加载,其应力结果与原型基本一致,位移比在 1.5 左右。

本文设计的相似模型可以用于减速器缩比件性能试验,将原型简化为模拟件,实现模拟件与原型的相似性。其参数值与实际工况下参数值的关系可以用于试验数据处理,为大型传动装置模拟件试验提供了理论依据,具有一定的工程意义。

参考文献:

[1] 柴 博. 太阳翼驱动机构故障模式分析及其轴疲劳可靠性评价[D]. 杭州:浙江理工大学,2020.
CHAI Bo. Failure mode analysis of solar wing drive mechanism and fatigue reliability evaluation of its shaft[D]. Hangzhou: Zhejiang

- University of Technology, 2020.
- [2] 陈文华, 贺青川, 潘 骏, 等. 机械产品可靠性试验技术研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 72-82.
CHEN Wen-hua, HE Qing-chuan, PAN Jun, et al. Research status and prospect of reliability test technology of mechanical products [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(1): 72-82.
- [3] 李亚超. RV 减速器疲劳寿命与可靠性技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
LI Ya-Chao. Research on fatigue life and reliability technology of RV reducer[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [4] 郑光泽, 彭俊祥, 黄修鹏. 齿轴参数对减速器中间轴承可靠性的影响分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(3): 29-34.
ZHENG Guang-ze, PENG Jun-xiang, HUANG Xiu-peng. Analysis of the influence of gear shaft parameters on the reliability of reducer intermediate bearings [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(3): 29-34.
- [5] GALINSKI C, BARTKIEWICZ P, LAMERS P, et al. Results of the J-5 Marco Dynamic Similar Model Flight Tests Program[C]. World Aviation Congress, Anaheim, 2013.
- [6] 林 皋. 研究拱坝震动的模型相似律[J]. 水利学报, 1958(1): 79-104.
LIN Gao. Study on the model similarity law of arch dam vibration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1958(1): 79-104.
- [7] 朱 彤. 结构动力模型相似问题及结构动力试验技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
ZHU Tong. Structural dynamic model similarity problem and structural dynamic test technology research[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [8] 陈常松, 颜东煌, 田仲初, 等. 岳阳洞庭湖大桥模型动力相似理论分析[J]. 桥梁建设, 2002(1): 48-51.
CHEN Chang-song, YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, et al. Dynamic similarity theory analysis of Yueyang Dongting Lake Bridge model[J]. Bridge Construction, 2002(1): 48-51.
- [9] 吴晓朋. 大兆瓦风电制动器缩比惯性试验台设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2018.
WU Xiao-peng. Design of scaled inertia test bench for large megawatt wind power brake[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2018.
- [10] 周昕毅, 李 铁, 依 平. 船舶柴油机比例模型实验的理论基础与技术挑战[J]. 推进技术, 2020, 41(11): 2408-2417.
ZHOU Xin-yi, LI Tie, YI Ping. Theoretical basis and technical challenges of scale model experiment of marine diesel engine[J]. Propulsion Technology, 2020, 41(11): 2408-2417.
- [11] 王延忠, 唐 文, 刘 畅, 等. 高能流密度面齿轮传动相似试验机理研究[J]. 机械传动, 2017, 41(3): 103-108.
WANG Yan-zhong, TANG Wen, LIU Yang, et al. Research on similar test mechanism of high-energy flux density surface gear transmission [J]. Mechanical Transmission, 2017, 41(3): 103-108.
- [12] 宋 川. 轴类部件旋转弯曲微动疲劳损伤分析及试验模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
SONG Chuan. Analysis and experimental simulation of fretting fatigue damage of rotating and bending shaft components [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [13] 徐 挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业出版社, 1982.
XU Ting. Similarity theory and model experiment [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1982.
- [14] 马海杰. 动力伺服刀架齿轮传动系统静动态特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
MA Hai-jie. Research on static and dynamic characteristics of power servo tool post gear transmission system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [15] 陈 爽, 李佳星, 高秀琴, 等. 基于 KISSsoft 齿面三维修形的某型电动汽车减速器噪声优化[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 16-22.
CHEN Shuang, LI Jia-xing, GAO Xiu-qin, et al. Noise optimization of a certain type of electric vehicle reducer based on KISSsoft tooth surface three-maintenance profile [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 16-22.

(刘 颖 编辑)