

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.008

材料与硬度对浮动花键磨损影响的试验研究

尹伟杰¹, 蒋燕英¹, 李发家¹, 吴学深², 倪德¹, 鲍和云³

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

2. 陆装驻株洲地区航空军代表室, 湖南 株洲 412002;

3. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;)

摘 要:浮动渐开线花键是直升机减速器中典型传动结构。由于浮动花键一般采用齿侧定心, 存在内外花键轴线不同心的现象, 传扭过程中齿面会出现一定的相对滑移, 花键齿面提前发生磨损, 从而降低直升机减速器的寿命。以直升机减速器中典型的浮动渐开线花键为研究对象, 针对花键的磨损损伤, 设计典型直升机减速器浮动花键结构, 搭建浮动花键磨损试验台; 针对不同材料及硬度下的浮动花键开展了摩擦磨损对比试验, 研究不同材料及硬度下浮动花键的抗磨损能力并分析了其磨损机理, 为后续直升机减速器中浮动花键抗磨损设计奠定了基础。

关键词:直升机减速器; 浮动花键; 材料; 硬度; 磨损试验

中图分类号:TH132 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)02-0042-05

Experimental Study of Material and Hardness Effect on Wear of Floating Splines

YIN Weijie¹, JIANG Yanying¹, LI Fajia¹, WU Xueshen², NI De¹, BAO Heyun³

(1. Aero Engine Corporation of China Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;

2. Aviation Representative Zhuzhou Office of Army Equipment Department, Zhuzhou 412002, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Floating involute splines are typical transmission structure in helicopter gear boxes. As the floating splines are generally centered on the tooth side, there is a difference between the internal and external spline axis, and the tooth surface has a certain relative slip in the transmission of torque, which makes it easy to wear out the spline tooth surface and reduce the life of the helicopter gearbox. Taking the typical floating involute splines in helicopter reducer as the research subject and focusing on the wear damage of the splines, designs a typical helicopter gearbox floating spline structure and sets up a floating spline wear test bench. Wear tests on floating splines with different material and hardness are carried out, the wear resistance of floating splines with different material and hardness is compared, and its wear mechanism is analyzed, which lays the foundation for follow-up wear designing of floating spline in helicopter reducer.

Keywords: helicopter reducer; floating spline; material; hardness; wear test

0 引言

花键连接因具有导向性及对中性好、受力匀称、多键齿接触承载能力大、齿根应力集中较小等优点, 在直升机减速器及液压泵、交流电机等附件中得到广泛使用^[1]。为了保持花键的对中性, 直升机减速器与附件中多采用浮动花键, 但其轴向窜动和偏心较大, 润滑不充分, 磨损颗粒易堆积, 使得齿面磨损严重。据统计, 直升机减速器的失效中, 花键副引起的失效约占 10%~20%, 而其中由磨损导致的花键失效要占 90% 以上。直升机传动系统在役机型中因浮动花键过度磨损导致零部件提前失效的问题已发生多起, 浮动花键的磨

损问题是制约直升机减速器寿命和可靠性提高的关键之一。微振动引起的微动磨损^[2]会降低花键连接和整个传动系统的可靠性, 大大缩短花键副的使用寿命。

目前国内外学者针对花键磨损问题开展了不同涂层、润滑条件、材料及轴偏置对花键副磨损影响的实验研究, 并对如何降低花键副磨损的设计与润滑参数进行了讨论, 从物理和化学两方面提出了减缓磨损的方法。在 20 世纪 80 年代, 美国麻省理工学院 (MIT) 和海军航空发展中心 (NADC) 针对航空渐开线花键副的磨损机理进行了长达 9 年的系统实验研究, 在不同的涂层、表面粗糙度和硬度等条件下做了大量的试验, 并利用

基金项目:国家自然科学基金面上项目 (51975274)

第一作者简介:尹伟杰 (1989—), 男, 湖南邵东人, 工程师, 硕士, 研究方向为直升机传动系统主减速器设计, 349843221@qq.com。

光学显微镜、扫描电子显微镜和铁谱技术确定了花键副的磨损机理,同时给出了软涂层减缓花键副磨损的方法^[3]。同时基于实验数据进一步建立了航空渐开线花键副磨损寿命分布的数学模型,为花键副磨损的可靠性预测提供了依据,提供了确定花键副轮齿在指定运行时间内的磨损分布和产生特定数量磨损所需时间的程序,并利用这些分布对具体花键副的可靠性和维修周期进行了预测。

GÜRER 和 KU 等^[4-5]研究了不同涂层、材料等对花键微动磨损的影响,从物理和化学角度提出了减少微动磨损的方法。XIAO 等^[6]分析了由于角度偏差造成花键的微动磨损机理。在接触磨损面出现大量的氧化铁磨屑附着在花键副的轮齿上。WU 等^[7]对航空花键的磨损进行了分析和试验,得到局部应力集中区域是花键磨损的主要区域,摩擦层中存在高密度位错层状结构和由马氏体形成的氧化物微小颗粒,马氏体在摩擦层中经历了强烈的塑性变形。

余媛媛^[8]利用有限元仿真分析与花键材料摩擦磨损实验相结合探究直升机尾传花键磨损的原因以及定量计算花键齿面磨损深度的方法,分析了不同因素对尾传花键磨损的影响。肖立等^[9-10]基于能量耗散理论,建立了花键副微动磨损预测模型,分析了转矩、载荷波动、花键材料、摩擦因数、轴向不对中以及角向偏心对浮动花键磨损的影响规律,并对其寿命进行了预测和分析。蒋理宽^[11]对浮动花键磨损计算公式进行推导,采用有限元法对渐开线花键副在不同载荷下进行了仿真分析,研究不同载荷对齿面磨损的影响。

国内外学者对花键的磨损进行了大量的研究,但是基于直升机真实工况的试验未见研究报告,同时花键配对材料与硬度是影响浮动花键磨损的重要因素之一,而针对不同的材料和硬度对花键造成的磨损形式研究较少。本文针对航空减速器常用的花键材料和硬度,设计典型直升机减速器浮动花键结构,搭建浮动花键磨损试验台,开展了常用不同材料匹配下浮动花键的磨损试验,对比不同材料匹配下浮动花键的抗磨损能力,并分析了其磨损机理,为直升机花键副设计提供选材和表面处理的依据。

1 浮动花键磨损试验研究

直升机减速器中浮动花键结构主要由内花键、外花键、法兰等组成,外花键为浮动弹性轴

花键。

1.1 花键材料匹配

选取直升机减速器中常用花键材料 9310、40CrNiMoA 以及 32Cr3MoVA 作为本次试验验证的材料,其材料配对方式如表 1 所示,6 对花键副共 5 种材料匹配方式。花键副均采用脂润滑。

表 1 不同材料花键配对组合形式

花键编号	花键类型	花键材料	表面处理
花键副 1	内花键	9310	氰化 HRC60~63
	外花键	9310	渗碳 HRC60~63
花键副 2	外花键	9310	渗碳 HRC60~63
	内花键	40CrNiMoA	硬度 HRC30~37
花键副 3	内花键	9310	氰化 HRC60~63
	外花键	32Cr3MoVA	氮化 $\geq$ HRC 65.9
花键副 4	外花键	32Cr3MoVA	氮化 $\geq$ HRC 65.9
	内花键	40CrNiMoA	硬度 HRC30~37
花键副 5	内花键	40CrNiMoA	硬度 HRC30~37
	外花键	40CrNiMoA	硬度 HRC30~37
花键副 6	外花键	40CrNiMoA	硬度 HRC30~37
	内花键	32Cr3MoVA	氮化 $\geq$ HRC 65.9

1.2 试验台搭建

参考典型直升机减速器中浮动花键结构,搭建直升机花键试验台。该试验台由内花键(试验件)、外花键(试验件)、法兰以及箱体组成,由 2 件内花键与 1 件外花键组成 2 对花键副,如图 1 所示。2 对花键副为浮动结构,外花键轴向未定位,外花键为典型直升机减速器中的浮动弹性轴,如图 2 所示。试验时将 3 台花键磨损试验箱连接,同时开展磨损验证试验,保证不同材料匹配下花键磨损的工况一致,如图 3 所示。

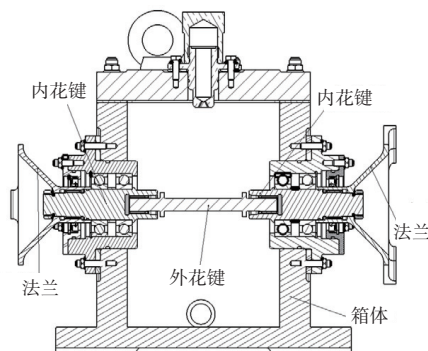


图 1 浮动花键磨损试验箱结构

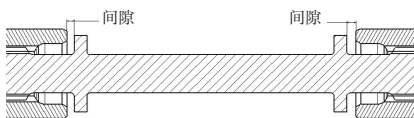


图2 浮动花键支撑方式

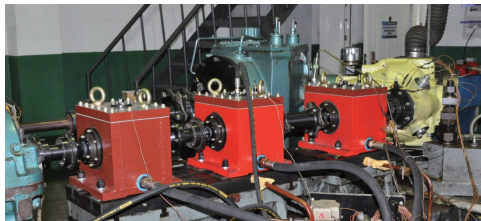


图3 花键磨损试验台

1.3 试验工况

根据直升机的实际工况,对花键进行载荷加载,花键的转速及花键齿面应力与真实直升机减速器的花键一致,具体工况数值如表2所示。

表2 浮动花键转矩试验加载表

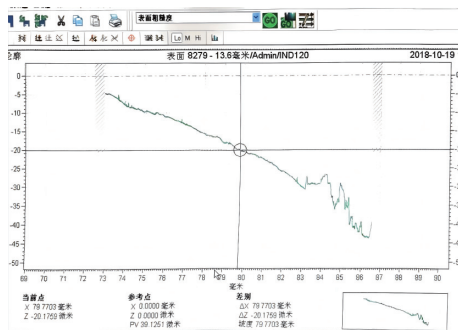
程序	功率/kW	输入转矩/Nm	输入转速/(r/min)	齿面应力/MPa	运转时间/min
1	10	20.6	4 644	19	10
2	50	102.8	4 644	96	12 000

试验过程中,按照表2中的程序2进行试验时,每运转60 min 卸载、加载1次,即输入转速保持4 644 r/min 不变,输入转矩由102.8 Nm 减小到0 Nm,再增加到102.8 Nm 进行线性卸载和加载,卸载与加载时间为30 s,加载与卸载时间不计入试验时间。

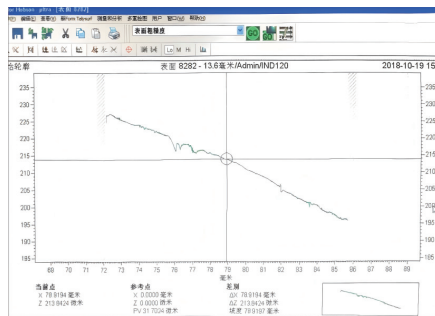
2 浮动花键磨损数据分析

2.1 磨损数据测量

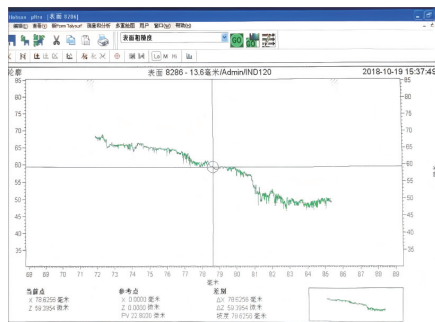
经200 h 试验后,对于外花键,本次试验采用轮廓仪对外花键齿廓的磨损进行测量。典型试验外花键齿面磨损形貌测量图如图4所示。



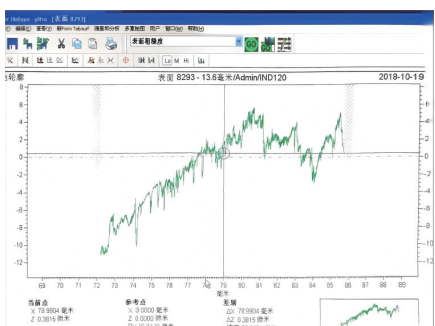
(a) 花键副1



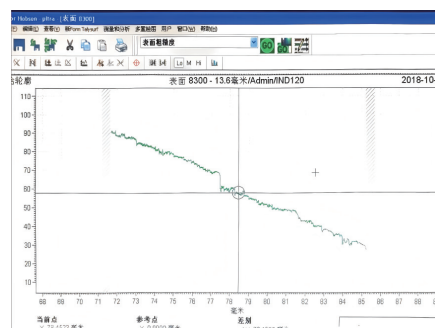
(b) 花键副2



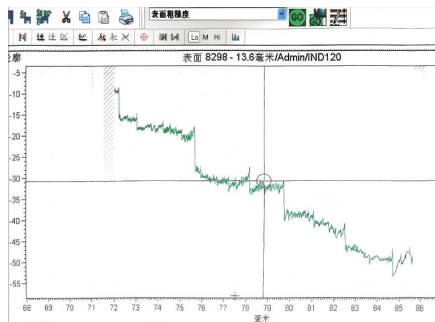
(c) 花键副3



(d) 花键副4



(e) 花键副5



(f) 花键副6

图4 花键副试验外花键齿面磨损区形貌测量图

对于内花键,由于受花键尺寸空间限制,采用三坐标测量仪对试验前后的花键齿形进行测量,对比试验前后的齿形,得出磨损量。测量花键齿形时,沿齿向测量3个截面的齿形,如图5所示。

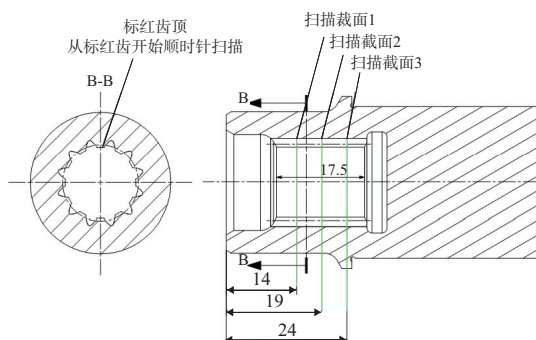


图5 内花键齿形扫描示意图

2.2 磨损数据分析

对所测量的花键微观形貌进行分析,得出磨损量。本次试验仅选取具有代表性的局部磨损值,并取其平均磨损值,图6为本次试验各花键的平均磨损对比图。

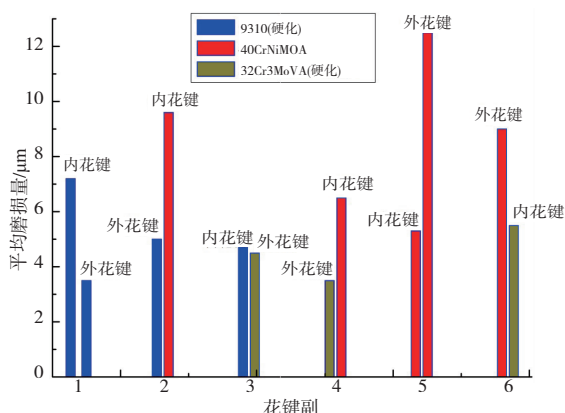


图6 不同材料匹配下花键平均磨损量对比

从图6可知,经过200h的试验,各花键表面的磨损量非常小,平均磨损量在4~12 μm之间,且其磨损具有较大的分散性。根据数据显示,将9310(硬化)与32Cr3MoVA(硬化)整体的磨损相比40CrNiMoA材料较小。各种材料配副之间,当内、外花键均为硬齿面时,其磨损相比其余硬—软、软—软配对较小。

由图6可知,9310(硬化)与32Cr3MoVA(硬化)整体磨损量小于配对材料均为40CrNiMoA的磨损量,40CrNiMoA材料的磨损则相对严重。

1) 硬齿面比软齿面具有更好的耐磨损能力,齿面的硬度是磨损的关键性参数。

2) 当配对的花键材料为硬—软时,软齿面会出现更大的磨损情况,对应硬度差较大的配对材料会产生较大的磨损,在设计中应当避免。

3) 接触面的表面硬化可显著提高花键表面的抗磨损能力。

3 浮动花键磨损机理分析

对磨损位置的花键轮齿,采用电子显微镜观察花键齿面的磨损机理,分别对3种典型材料外花键磨损表面微观进行分析,判断其磨损类型和磨损产生的机理。

3.1 9310 钢材料花键磨损机理

图7为9310钢与9310钢相配表面磨损形貌,图8为9310钢与40CrNiMoA钢相配表面磨损形貌。由图7和图8磨损表面微观形貌可知,9310钢与上述两种材料相配时,磨损表面纹理平整,未出现明显的黏着凹坑或磨粒凹坑,表面磨损为轻微的沿着滑动方向的磨粒磨损。在齿轮啮合力作用下剪切破坏发生在接合面上,黏着啮合处强度比摩擦副的两基体金属都弱。此时切削为引起该处磨粒磨损的主要机制,表明9310钢材料具有良好的抗磨损性能。

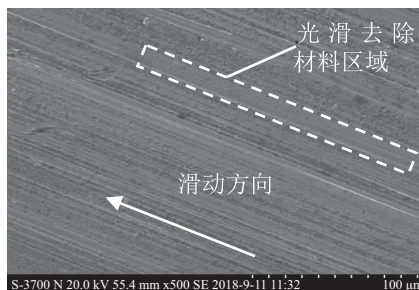


图7 9310钢磨损表面(与9310钢相配)

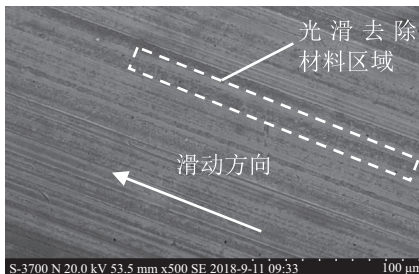


图8 9310钢磨损表面(与40CrNiMoA钢相配)

3.2 32Cr3MoVA 钢材料花键磨损机理

图9、图10为32Cr3MoVA钢表面微观形貌。与9310钢配合时,32Cr3MoVA钢表面不再平整,出现较多的磨损凹坑,且同一块区域分布比较集

中,表现为明显的黏着磨损;同样,与 40CrNiMoA 钢配合时,32Cr3MoVA 钢表面磨损坑变得更大,但深度上较浅,仍以黏着磨损为主,两对摩擦副在轮齿啮合力的作用下,剪切发生在接合面不远的较软金属层内,黏着结合处强度大于软金属的剪切强度,产生局部的固相“冷焊”或粘接,使材料从花键副表面发生了转移。由于相配的 9310 钢硬度比 40CrNiMoA 钢大,因此图 9 中凹坑较深,图 10 中则表现出较浅的“涂抹式”凹坑。

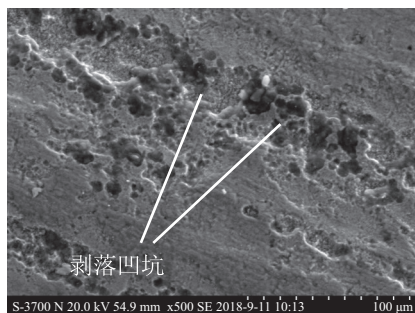


图 9 32Cr3MoVA 钢磨损表面(与 9310 钢相配)

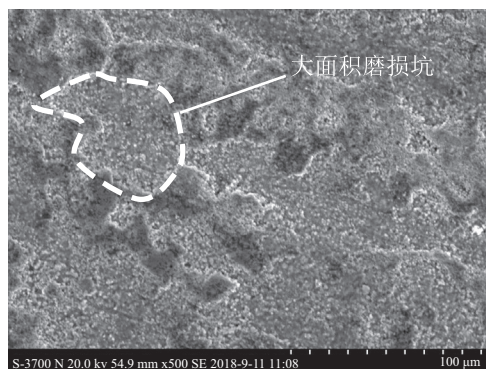


图 10 32Cr3MoVA 钢磨损表面(与 40CrNiMoA 钢相配)

3.3 40CrNiMoA 钢材料花键磨损机理

图 11、图 12 为 40CrNiMoA 钢表面微观形貌。与 32Cr3MoVA 钢以及 40CrNiMoA 钢相配时磨损区域均存在较大的撕裂剥落凹坑,此时剪切破坏发生在摩擦副界面的较深处,黏着结合处强度大于基体的剪切强度,切应力也高于黏着结合处强度。由于 32Cr3MoVA 钢硬度更高,与 32Cr3MoVA 钢相配时,磨损凹坑更大。该磨损为黏着与磨粒磨损的复合机理,对摩擦副破坏严重,应尽量避免。

4 结语

以直升机减速器中典型的浮动渐开线花键为

研究对象,针对花键的磨损损伤,设计了典型直升机减速器浮动花键结构,搭建浮动花键磨损试验台,开展了不同材料与硬度下浮动花键的磨损对比试验,研究了不同材料与硬度下浮动花键的抗磨损能力并分析了其磨损机理,为后续直升机减速器中浮动花键抗磨损设计及选材提供依据。

1) 经过 200 h 的试验,在某型直升机载荷工况下,不同材料与硬度的花键副磨损量较小,未出现较大的磨损情况,但是全部出现了磨损现象。

2) 材料配对对花键副之间磨损的影响不大,花键间的硬度差对磨损的影响较大。

3) 9310 钢表面硬化后,表面抗磨损能力较好,主要的磨损方式为磨粒磨损;32Cr3MoVA 钢表面硬化后,表面磨损方式为黏着磨损与磨粒磨损,表面微坑较多;40CrNiMoA 钢由于材料硬度相对较低,表面出现了较大的剥落撕裂凹坑,抗磨损能力较差。

通过本次试验,探究了典型航空花键材料的抗磨损能力以及磨损机理,可为后续直升机减速器花键选材及热处理提供设计指导。

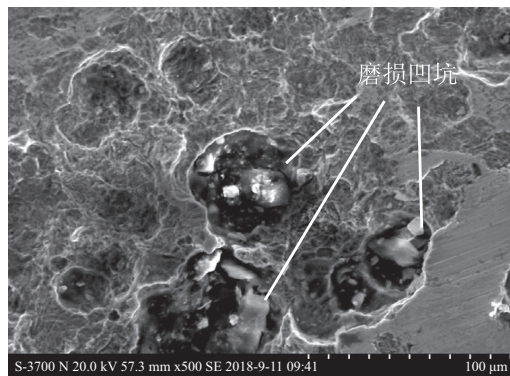


图 11 40CrNiMoA 钢磨损表面
(与 32Cr3MoVA 钢相配)

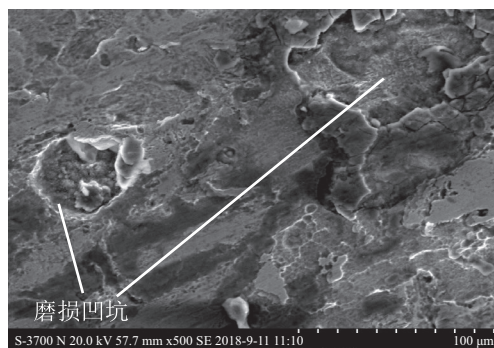


图 12 40CrNiMoA 钢磨损表面(与 40CrNiMoA 钢相配)

(下转第 56 页)

数值时,混沌区间较大,在混沌区域内,速度的变化急剧。若在此区域内长期运行,对惰轮系统特别不利,应尽量避免此类现象的发生。可优化系统参数使惰轮系统处于合理的工作状况,例如在设计和制造时适当调高惰轮系统的阻尼比。这样可以为惰轮系统的优化设计提供一定的理论参考。

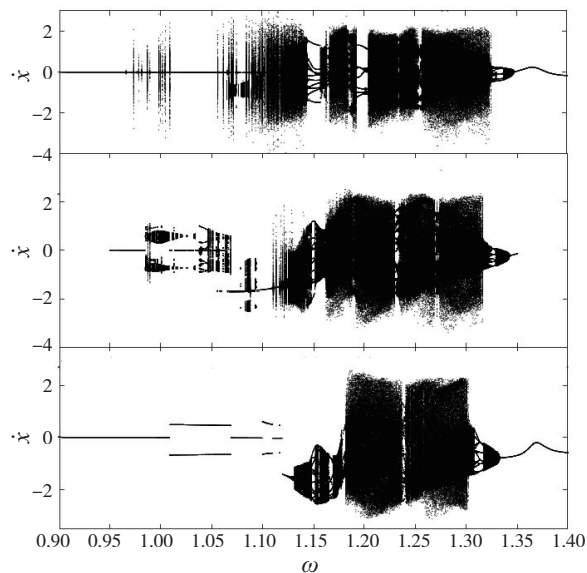


图6 分岔图

参考文献:

- [1] 孙桓,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 第8版. 北京:高等教育出版社,2013:237-239.
- [2] 郝志勇,陈志强,毛君. 采煤机摇臂惰轮轴疲劳寿命分析[J]. 机械设计与研究,2017,33(2):85-89.
- [3] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学:振动、冲击、噪声[M]. 北京:科学出版社,1997:259-264.
- [4] KAHRAMAN A, SINGH R. Non-linear dynamics of a spur gear pair[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990,142(1):49-75.
- [5] 李万祥,牛卫中. 一类含间隙系统的分岔与混沌的形成过程[J]. 振动与冲击,2005,24(3):47-49,133.
- [6] 李扬,朱佳博,李伟,等. 含动态齿侧间隙的齿轮系统稳定性研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):16-19,36.
- [7] 胡鹏. 非线性齿轮系统动力学与稳态可靠性及灵敏度分析[D]. 沈阳:东北大学,2019.
- [8] ARIAN G, TAGHVAEI S. Dynamic analysis and chaos control of spur gear transmission system with idler[J]. European Journal of Mechanics - A,2021,87:104229.
- [9] 杨富春,周晓军,胡宏伟. 两级齿轮减速器非线性振动特性研究[J]. 浙江大学学报(工学版),2009,43(7):1243-1248.

收稿日期:2023-08-02

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 布尔加科林夫. 航空齿轮传动和减速器手册[M]. 常春江,译. 北京:航空工业出版社,1988:199-203.
- [2] 况伟杰,苗倩. 镍基单晶高温合金微动摩擦磨损特性研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):21-24.
- [3] LU F, CHEN GD, SU H, et al. Progressive wear prediction of C/C composite finger seal based on ALE adaptive meshing strategy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology,2017,231(5):604-615.
- [4] GÜRER G, GÜR C H. Failure analysis of fretting fatigue initiation and growth on railway axle press-fits[J]. Engineering Failure Analysis,2018,84:151-166.
- [5] KU P M, VALTIERRA M L. Splinewear-effects of design and lubrication[J]. Journal of Engineering for Industry, 1975,97(4):1257-1263.
- [6] XIAO L, XU YQ, SUN X W, et al. Experimental investigation on the effect of misalignment on the wear

failure for spline couplings[J]. Engineering Failure Analysis,2022,131:105755.

- [7] WU Y Z, LIANG Y L, YIN C H, et al. Analysis of factors affecting the wear failure of an aeroengine spline pair and evolution mechanism of the tribolayer[J]. Engineering Failure Analysis,2023,146:107113.
- [8] 余媛媛. 直升机尾传花键微动磨损仿真分析研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
- [9] 肖立,徐颖强,陈智勇,等. 直升机浮动渐开线花键微动磨损影响因素分析[J]. 航空动力学报,2021,36(4):751-766.
- [10] 肖立,徐颖强,陈智勇,等. 浮动渐开线花键微动损伤及磨损疲劳预测[J]. 西北工业大学学报,2022,40(3):549-559.
- [11] 蒋理宽. 浮动渐开线花键副微动磨损研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2018.

收稿日期:2023-8-16