

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211803

基于应力分布的直升机传动齿轮故障辨识实验

马亚平 蒋红娜

(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要: 直升机设计定型试飞过程中,减速器作为直升机传动系统中非常重要的部件,其性能的优劣对于直升机的安全性有很大的影响。减速器的齿轮传动系统通常是工作在高速、高温、重载等恶劣环境,同时由于传动齿轮本身结构复杂性,易导致齿轮结构会出现断齿、剥落等故障,严重影响直升机传动系统的稳定性和可靠性。本文通过对减速器传动齿轮典型故障辨识,结合有限元分析、齿轮啮合等理论,建立直升机中减速器齿轮传动有限元模型,分析传动齿轮典型故障下应力分布和变化,为直升机传动系统故障监控测试技术提供一种新思路。

关键词: 直升机;齿轮机构;有限元分析;应力分布

中图分类号: V241.01;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Fault identification experiment of helicopter transmission gear based on stress distribution

Ma Yaping Jiang Hongna

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In the process of helicopter design finalization flight test, the reducer is a very important component in the helicopter transmission system, and its performance has a great impact on the safety of the helicopter. The gear transmission system of the reducer usually works in high speed, high temperature, heavy load and other harsh environments. At the same time, due to the complexity of the transmission gear itself, it is easy to cause gear tooth structure to break, peel and other failures, which seriously affects the stability and reliability of the helicopter transmission system. In this paper, through the identification of typical faults of the transmission gear of the reducer, combined with the theory of finite element analysis and gear meshing, the finite element model of the reducer gear transmission in the helicopter is established, and the stress distribution and change under the typical fault of the transmission gear are analyzed, which provides a new idea for the fault monitoring and testing technology of the helicopter transmission system.

Keywords: helicopter; gear unit; finite element analysis; stress distribution

0 引言

伴随应对自然灾害和军事冲突的广泛需求,直升机因具有垂直起降、悬停、高机动性等特点,在军民工作场合中广泛使用。传动系统作为直升机动力传输的主要系统,采用不可冗余的结构设计,其工作状态和可靠性直接决定动力系统的稳定性和直升机飞行的安全性能。减速器是直升机传动系统的关键部件,其特点是传递的功率大和减速比大。减速器利用齿轮传动来降低输入轴转速,增大输出轴的扭矩,并改变传动方向。对于锥齿轮构成的中间减速器定轴轮系,不仅能够实现变速运动,还能改变传动的方向,使齿轮轴改变一定的角度^[1]。

在飞行过程中,直升机减速器的齿轮传动系统往往是工作在高速、高温、重载等恶劣环境下。由于减速器的齿轮传动系统结构复杂,运行过程中会出现断齿、剥落等故障,严重影响齿轮传动的稳定性和可靠性。针对齿轮传动系统,开展典型齿轮故障下轮齿间啮合力变化规律的研究,可以实现地对齿轮传动系统的性能变化进行评估。由于齿轮啮合时轮齿处于高速旋转运动状态,且啮合力波动幅度大,故啮合力的实际测量需要借助有限元软件完成。通过有限元分析方法建立齿轮传动系统的动力学模型,利用 ANSYS 动力学仿真技术,在静态分析基础上可以进行齿轮动态分析。同时,通过对仿真结果以及提取相应位置的应力数据进行分析,可以得到减速器的应力场分布,为减速器齿轮应

收稿日期:2022-10-24

力动态测量应变传感器安装选择提供技术支持^[2]。

1 减速器齿轮传动系统结构和典型故障

直升机减速器一般由机匣、齿轮传动机构、传动轴、磁塞、滑油温度传感器等组成。以中间减速器为例,其结构由一对锥齿轮组成,实现改变方向和减速。齿轮传动机构主要由主动齿轮、从动齿轮、结合盘/轴承套筒以及支撑轴承组成。主动齿轮和从动齿轮分别通过两个轴承支撑在轴承套筒和机匣内部隔板内。箱体结构机匣在整个系统中起支撑与密封作用。中间减速器典型结构如图 1 所示^[3]。

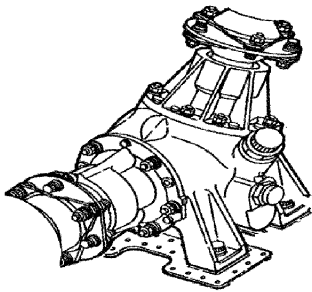


图 1 中间减速器典型结构

传动系统减速器齿轮传动机构中,锥齿轮是传递相交轴之间旋转运动和改变力矩传递方向的最有效的方法。常用锥齿轮采用直齿锥齿轮。直齿锥齿轮设计与安装方便,在飞行器设计中得到广泛应用。直齿锥齿轮在进行输入轴与输出轴之间的传动时,其轮齿啮合传动过程都是在其齿宽上进行,齿轮机构在传动中同时啮合的齿数相对较少。在飞行过程中,中间减速器齿轮传动机构持续运转,传动齿轮频繁重复的应力集中与冲击载荷作用会引起齿轮组产生疲劳而引起齿轮的失效。

根据减速器结构特点,典型的减速器故障包括齿轮故障、轴承故障、轴系故障、箱体故障等。据统计,减速器 60% 的故障是齿轮的故障引起,其原因是齿轮在制造过程中材料和工艺要求严格、复杂,在面临冲击和振动等复杂环境交叉作用下容易发生故障。其中齿轮故障通常是是由于齿轮材料、热处理、安装和运转状态等因素造成,其表现形式为剥落、裂纹和断齿等。常见的轮齿故障的现象与原因如表 1 所示^[4]。

表 1 齿轮故障的现象与成因

类别	形式	原因
齿面剥落	齿面磨损造成齿面剥落	设计不合理、润滑不充分或异物混入
齿面裂纹	毛坯裂纹、硬化处理裂纹和疲劳裂纹	冲击、过载和啮合不良等
齿面断齿	轮齿折断	超载、润滑不充分

跟据齿轮损伤的部位和损伤机理,损伤形式中最常发

生的是疲劳损伤。齿面疲劳是齿轮啮合过程中,在交叉接触应作用力的反复作用下致使齿轮表层产生疲劳裂纹,进而扩展成表层损伤和断裂。飞行试验中,传动系统传动齿轮啮合时轮齿被封闭在齿轮箱内,且处于高速旋转运动状态,啮合力波动幅度大。为实现飞行过程中齿轮啮合应力的实时测量,需要对应力测量方案优化,最大化减少设备测试改装对齿轮传动机构的工作影响。通过有限元分析方法建立齿轮传动系统的动力学模型,利用 ANSYS 动力学仿真技术,在静态分析基础上可以进行齿轮动态分析(瞬态、冲击和碰撞等),得到减速器的应力场分布,以获取不同故障轮齿间啮合力的变化规律,为应变传感器测点选择提供技术支持^[5]。

2 基于有限元仿真分析的传动系统齿轮机构建模

2.1 设计原则

本文以某型直升机中间减速器锥齿轮的主要尺寸参数为例,如表 2 所示,进行传动系统齿轮机构有限元建模。

表 2 锥齿轮主要尺寸参数

齿轮参数	符号	主动轮	从动轮
大端模数	m	4.233	
齿数	z	18	36
压力角/(°)	α	20	
顶隙系数	c	0.2	
齿全高	h	9.3	
齿形		直伞	
分度圆弦齿厚	s	6.64	
切线方向	χ	0	
精密等级		7C-GB11336-89	
齿侧间隙		0.1~0.19	

传动系统锥齿轮其结构复杂,为保证锥齿轮几何模型参数准确,需要借助于专业锥齿轮建模软件与三维建模软件相结合,建立含有轴、键等零件的直齿圆锥齿轮三维装配模型。完成实体建模后通过专用接口将模型信息导入有限元仿真软件环境中,为确定锥齿轮的相对位置并实现预期的运转,需使用转动副、驱动等约束条件对主动轮(小锥齿轮)与大锥齿轮的位置进行约束。为了得到锥齿轮在啮合传动过程中应变分布,需要借助有限元分析软件完成动力学仿真。通过有限元软件 ANSYS Workbench 中动力学模块的瞬态分析功能,完成锥齿轮传动构建模与仿真分析^[6]。

2.2 锥齿轮传动有限元模型建立

根据锥齿轮的基本参数,选用专业的齿轮建模迈迪工具集与三维建模软件 SolidWorks 相结合,建立具有轴、键、锥齿轮的高精度锥齿轮传动系统装配体模型,如图 2 所示。锥齿轮的材料选择为 40 Cr。40 Cr 是我国 GB 的标准钢号,调质处理后具有良好的综合力学性能^[7]。

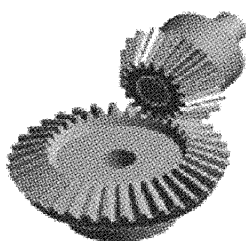


图 2 锥齿轮传动模型

对于建立的锥齿轮传动模型,采用 Solid185 单元进行网格划分;在齿轮的接触配合中,采用面-面接触单元 (Conta174 和 Target170) 仿真锥齿轮啮合;在主动轮中心建立一个节点,采用 Mass 21(6 自由度)单元划分。锥齿轮传动系统的实际运动过程,为保证齿轮传动系统中齿轮啮合准确,需要添加转动副以及负载约束,即主动轮需要在轴上添加转动副以提供转速;大齿轮-从动轮则需要添加与转速相反的负载扭矩,具体如图 3 所示。主动轮转速设置为 600 RPM,负载载荷设置为恒定负载 20.6 Nm^[8]。

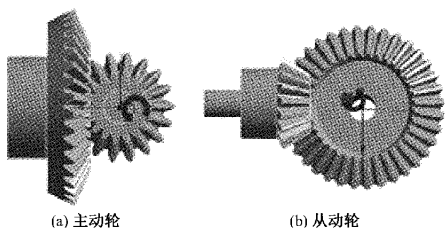


图 3 主动轮转速方向及从动轮负载方向

对于复杂齿轮传动系统,其由于零件数目较多,接触条件更为复杂,根据项目要求,需要得到齿轮在传动过程中在键槽附近的应变场分布,为实验过程中应变片安装位置提供支持,为此在齿轮啮合区域选择摩擦接触,摩擦系数设置为 0.2,具体设置如图 4 所示。

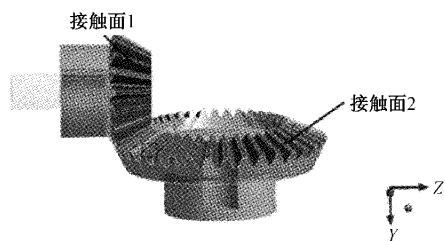


图 4 接触面设置

综上所述,通过 ANSYS 模拟 40 Cr 锥齿轮传动系统,划分网格后得到锥齿轮传动有限元模型,锥齿轮有限元模型和主动轮与从动轮载荷与约束。

3 典型故障植入和应力分析

3.1 典型故障植入

根据分析,将缺齿故障和表面剥落故障分别植入传动齿轮模型,逐一开展缺齿故障和表面剥落故障的传动齿轮应力响应分析,并与甲方提供的试验结果对比,验证缺齿故

障和表面剥落故障对齿轮模型的应力响应分布的影响。

1) 断齿故障

假设减速器传动齿轮出现典型故障-断齿,需要根据实际工作过程中断齿故障,为降低建模难度,假设轮齿断裂为规则断裂,建立直升机锥齿轮断齿故障模型,利用三维建模软件将故障植入到对应的齿轮模型,建立直升机中减锥齿轮断齿故障的时变啮合刚度模型,然后导入有限元分析软件 ANSYS Workbench,瞬态分析完成断齿故障的齿轮传动仿真。项目要求分别在主动轮植入缺齿 50% 与缺齿 100% 的齿轮断齿故障,具体故障植入如图 5 所示^[9]。

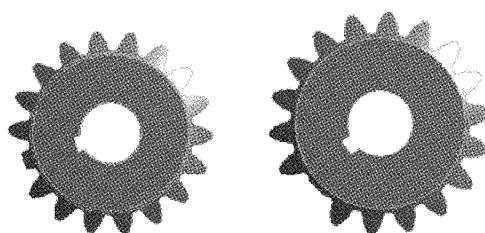


图 5 断齿齿轮故障

2) 齿面剥落故障

齿面剥落通常于轮齿啮合面出现,其剥落形式是复杂不规则的,但是在理论分析中将剥落形式简化为矩形,采用矩形剥落模型模拟齿面剥落,剥落区域位于锥齿轮分度圆,尺寸大小为 3 × 2 mm,齿轮大端表面的某一单元面到剥落区域的长为 14 mm。齿面剥落通常于轮齿啮合面出现,其剥落形式是复杂不规则的,在理论分析中将剥落形式简化为矩形,采用矩形剥落模型模拟齿面剥落,建立锥齿轮剥落故障模型,如图 6 所示^[10]。

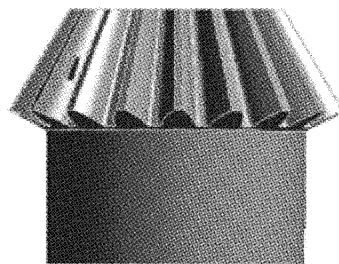


图 6 锥齿轮剥落故障模型

3.2 应力分析

瞬态分析计算完成后对仿真结果进行分析。提取锥齿轮传动系统在啮合过程成的应变分布,如图 7 所示,锥齿轮传动过程中,随着锥齿轮啮合该啮合区应变发生变化,另外,观察主动轮大端表面等效应变云图,当主动轮施加转速且方向为顺时针旋转,在键槽区域右端会出现应变集中区域,为提高应变片测量的精确度和信息的有效性,应变片需要安装在键槽的右侧区域^[11]。

设置仿真约束条件,对主动轮的中心节点处施加转动副约束,模拟以速度 1 200 RPM 转动,从动轮的中心点出

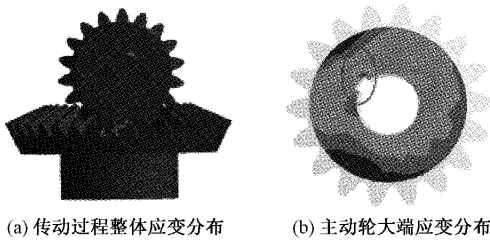


图 7 锥齿轮传动应变分布

同样施加转动副约束,以模拟器负载 20.6 Nm。通过直接法进行耦合计算,得到锥齿轮传动系统过程中齿轮应力分布。齿轮啮合区域只是轮齿表面的一部分椭圆区域,并不是全部齿面都进行啮合接触。齿轮传动过程中,啮合应力最大点也出现在啮合区域,并且随时间位置发生移动^[17]。

为了研究断齿、剥落等故障齿轮的特征机理,准确获得齿轮传动过程应变信息至关重要。若齿轮发生断齿、剥落等故障,应变测点位置如图 8 所示,主动轮顺时针,键槽右侧应变集中区域可粘贴应变片;对于故障齿轮,靠近齿根区粘贴应变片,断齿先进去发生啮合,采集到的应变数据也是断齿发生啮合位置应变值变化,故障特征更为明显^[13]。

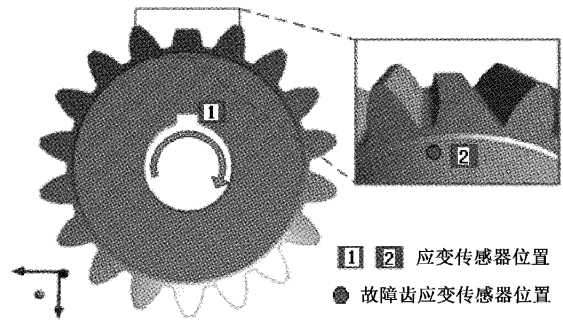


图 8 应变传感器测点位置

4 实验分析与验证

根据分析结果,建立实验室试验环境,对仿真对仿真结构进行实验室验证。当锥齿轮上出现 100%断齿故障时,有限元仿真的齿根应力波形和频谱如图 9(a)和(b)所示。时域波形中出现了明显的冲击,频谱中出现了以啮合频率 179.7 Hz 为中心,间距约为 10 Hz 的等间距调制边带。剥落故障锥齿轮齿根应力实验波形和频谱如图 9(c)和(d)所示。由于干扰的存在,使得实验的齿根应力波形更加复杂,

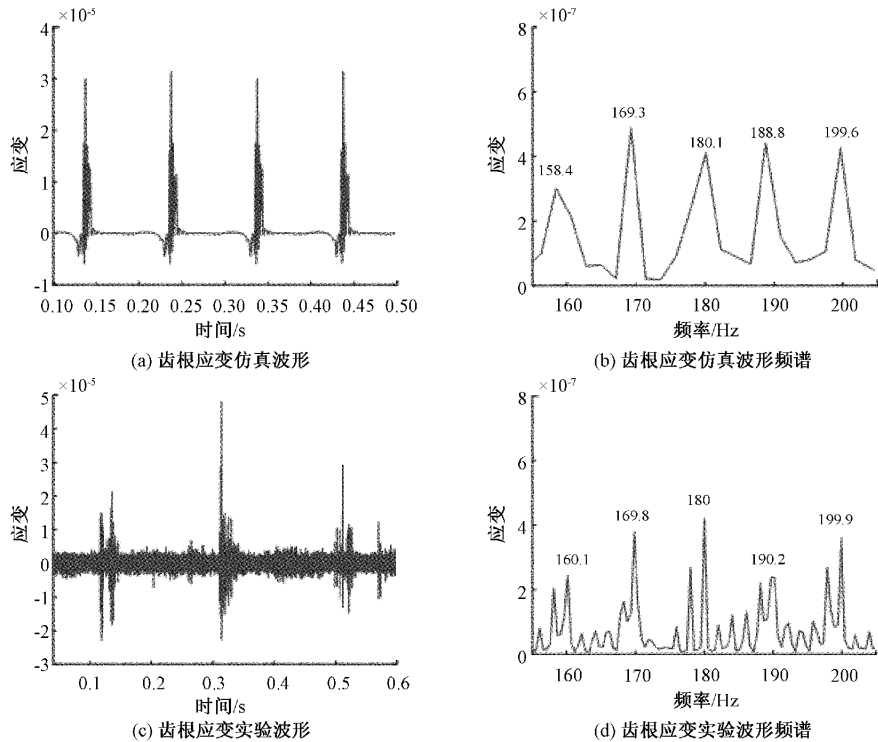


图 9 50%断齿故障齿根应变仿真和实验结果对比

但总体波形与仿真结果一致。且实验波形的频谱中同样存在以啮合频率 179.8 Hz 为中心,间距约为 10 Hz 的等间距调制边带,实验结果与仿真结果一致^[14]。

当锥齿轮上出现剥落故障时,有限元仿真的齿根应力波形和频谱如图 10(a)和(b)所示。时域波形中出现了明

显的冲击,频谱中出现了以啮合频率 180 Hz 为中心,间距约为 10 Hz 的等间距调制边带。剥落故障锥齿轮齿根应力实验波形和频谱如图 10(c)和(d)所示。由于干扰的存在,使得实验的齿根应力波形更加复杂,但总体波形与仿真结果一致。且实验波形的频谱中同样存在以啮合频率

180 Hz 为中心,间距约为 10 Hz 的等间距调制边带,实验

结果与仿真同样保持一致性^[15]。

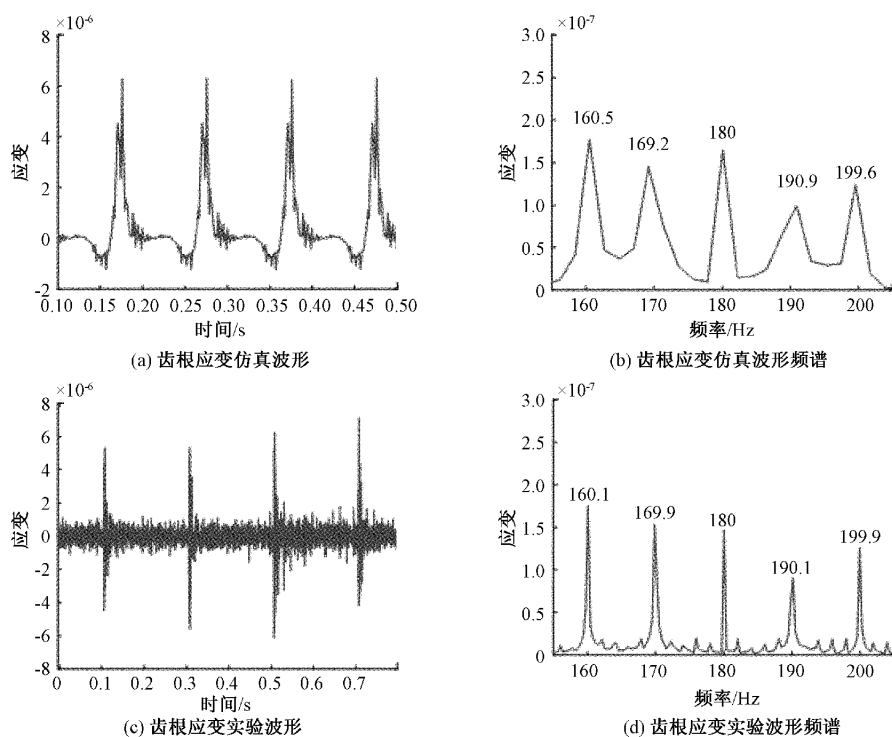


图 10 剥落故障齿根应变仿真和实验结果对比

5 结 论

本文详细阐述了采用有限元分析的方法对直升机传动系统锥齿轮的应力进行了分析,并依据应力分析结果设计了锥齿轮应力测量应变传感器的安装位置,在保证测量有效性和精度的前提下,减少了传感器的安装数量,提高了传动齿轮应力测量的可行性。该方法对飞行试验中传感器设计与安装的优化提供了一种解决思路,对未来飞行试验过程中传感器的设计与安装具有极高的借鉴作用。

参考文献

[1] 宋斌,齐永龙,李波. 机载天线伺服机构设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(3): 54-57.
 [2] 吴天舒,陈蜀宇,吴朋. 基于应力波分析的状态监控与故障预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3061-3070.
 [3] 蒋章雷,徐小力. 旋转机械传动系统运行稳定性劣化表征参数提取方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 155-160.
 [4] 陈仁祥,张勇,杨黎霞,等. 基于整周期数据和卷积神经网络的谐波减速器健康状态评估[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2).
 [5] 卓耀彬,周晓军,吕浩亮,等. 准双曲面齿轮准静态接触分析和试验研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5):

1285-1295.
 [6] 熊倪,王匀,郭玉琴,等. 基于 ADAMS 的动力钳齿轮传动系统动态载荷仿真分析[J]. 机械制造, 2016, 54(617): 11-13.
 [7] 魏秀业,程海吉,贺妍,等. 基于特征融合与 ResNet 的行星齿轮箱故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 213-222.
 [8] 邵勇,张钰婷,顾桂鹏,等. 基于最小凸包的直齿圆柱齿轮检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9): 1385-1393.
 [9] 闫梁,万本例,胡斌,等. 基于双轴 TMR 电磁传感器的裂纹检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 106-114.
 [10] 谭鸿创,杨大炼,蒋玲莉,等. 基于 MPE 局部保持投影与 ELM 的螺旋锥齿轮故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 44-52.
 [11] 雷亚国,罗希,刘宗尧,等. 行星轮系动力学新模型及其故障响应特性研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(13): 111-122.
 [12] 徐佳毅,李洪宇,谢子铭,等. 面向最优效率的潜标耦合电能传输系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 75-82.
 [13] 汪中厚,莫逗,李克松,等. 螺旋锥齿轮切齿仿真和虚拟

- 齿面误差检验[J]. 现代制造工程, 2012(1): 22-25, 59.
- [14] 励洪泽, 邬杨波, 孙伟达, 等. 基于 Halbach 结构的低场核磁共振主磁体的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 46-56.
- [15] 耿浩, 夏浩, 王国庆. 高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 70-78.

作者简介

马亚平, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机载测试技术。

E-mail: 19024286@qq.com

蒋红娜, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机载测试系统传感器研发及校准技术。

E-mail: jianghongna_2009@163.com