

文章编号:1006-1355(2017)02-0158-05+167

## 某型发动机减速器齿轮毂裂纹故障研究

程 礼<sup>1,2</sup>, 李思路<sup>1</sup>, 郭 立<sup>1</sup>, 屈 轲<sup>1</sup>, 高君宇<sup>1</sup>, 巩孟林<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 西安 710038;  
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

**摘 要:**针对某型发动机减速器出现的齿轮毂裂纹故障,基于UG建立减速器齿轮传动系统的实体模型,对减速器一级齿轮毂进行柔性体仿真,采用弹簧模拟齿轮毂花键之间的弹性力作用,通过改变弹簧刚度的方法模拟一级齿轮毂存在故障时的状态,对比研究处于正常状态和带有裂纹齿轮毂故障状态的发动机减速器各部件的动态响应,发现故障状态下减速器各部件振动量明显增大,由此确立将振动量作为故障监测特征量的思想。利用所设计搭建的整机振动测试系统对10台发动机振动状态进行测试,对比研究两种状态下减速器在其特征频带上的振动量大小,结果表明故障状态下振动量明显大于正常状态,从而验证仿真计算的正确性。

**关键词:**振动与波;减速器;齿轮毂;弹簧刚度;动力学仿真;故障监测

中图分类号:TH113

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.02.032

## Crack Fault Analysis of the Decelerator Gear Hub of an Engine

CHENG Li<sup>1,2</sup>, LI Si-lu<sup>1</sup>, GUO Li<sup>1</sup>, QU Ke<sup>1</sup>,  
GAO Jun-yu<sup>1</sup>, Gong Meng-lin<sup>1</sup>

(1. Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University,  
Xi'an 710038, China;

2. Co-Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

**Abstract :** The crack fault of the decelerator gear hub of an engine is analyzed. The entity model of the decelerator gear transmission system is established based on UG. Flexible body simulation is performed for the decelerator gear hub of the first-stage. Springs are used to simulate the elastic effects among the splines of the gear hub. Fault condition of the first-stage gear hub is simulated by changing the spring stiffness. The dynamic responds of the decelerator components in the normal condition and the fault condition with the gear hub cracked are analyzed and compared. It is found that the vibration amplitude of the decelerator components rises significantly under the fault condition. Thus, the vibration amplitude of the decelerator components can be used as the characteristic index for fault detection. Then, a complete vibration detection system is designed and established and the vibration conditions of several engines are tested. The vibration amplitudes of the decelerators in the characteristic frequency band under the normal condition and fault condition is comparatively analyzed. The results indicate that the vibration amplitude of the decelerator under the fault condition is obviously greater than that under the normal condition. The correctness of the simulation calculation is verified.

**Key words :** vibration and wave; decelerator; gear hub; spring stiffness; dynamic simulation; fault monitoring

发动机的减速器经常处于高速、重载、高降速比的工作状态,同时由于飞机的启动、加速、减速等飞行动作使得减速器所载荷荷时常剧烈变化,这加剧了齿轮系统的齿侧间隙等因素带来的内部激励。啮

合轮齿间的相互接触-脱离-接触的重复激励,会使系统产生相当大的动态响应,并且在齿轮副中相互啮合的轮齿上产生极大的交变载荷,对系统的可靠性和工作寿命造成极为严重的影响<sup>[1]</sup>。

某型涡桨发动机减速器主要是由第一级行星齿轮传动系统和第二级星型齿轮传动系统构成的封闭齿轮传动系统<sup>[2]</sup>。在实际调研过程中发现,该型发动机减速器多次发生故障,均由一级齿轮毂出现裂纹所致,严重影响飞行安全。文中拟通过动力学分析寻找该齿轮系统的故障特征先验,指导实验数据处理。针对齿轮系统的动力学分析,诸多学者进行

收稿日期:2016-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175509)

作者简介:程礼(1963—),男,哈尔滨市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为发动机故障诊断、转子动力学。

通信作者:李思路,男,硕士研究生。

E-mail: slli2016@163.com

了大量研究<sup>[2-8]</sup>。K. Nakamura 为了分析齿轮系统的振动及噪音,首次针对齿轮系统建立考虑齿轮副间隙因素的非线性数学模型<sup>[6]</sup>。孙涛、沈允文等针对行星齿轮传动系统建立动力学模型,并求解运动微分方程,对系统参数激励对动态特性的影响机理进行深入研究,发现齿轮副间隙非线性动力学由倍周期分岔通向混沌的道路<sup>[7]</sup>。黄启林针对封闭式行星齿轮传动系统,建立系统的纯扭转模型和横向—扭转模型,研究系统的动态响应特性<sup>[8]</sup>。针对齿轮裂纹故障问题,张延超、刘莎等学者进行了相应研究<sup>[9-11]</sup>。针对发动机减速器的振动监控问题,陈卫等学者进行了大量实验研究<sup>[12]</sup>。

利用UG 软件建立减速器齿轮传动系统各部件的实体模型,通过约束条件进行装配,创建运动仿真方案,对一级齿轮副进行柔性体仿真,采用弹簧模拟齿轮花键之间的弹性力作用,通过改变弹簧刚度的方法模拟一级齿轮副存在故障时的状态,对比研究处于正常状态和带有裂纹齿轮副故障的发动机减速器各部件的动态响应,仿真计算结果表明故障状态下减速器振动量明显增大,确定以减速器齿轮传动系统的振动量大小作为故障监测的特征量,为故障监测提供故障特征先验。最后对发动机实测数据进行分析,对比研究两种状态下减速器在其特征频带上的振动量大小,结果表明故障状态下特征频带上的振动量明显大于正常状态,由此证明动力学仿真分析的正确性。

## 1 减速器齿轮传动系统实体建模及动力学仿真

### 1.1 减速器齿轮传动系统介绍

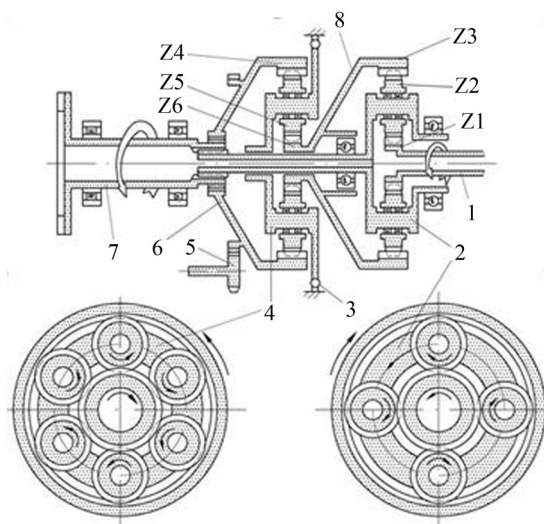
该减速器齿轮传动系统是由行星齿轮传动系统和星型齿轮传动系统组合而成的封闭式差动齿轮传动机构,如图1所示。

其中行星齿轮传动系统(包括太阳轮、四个行星轮、内齿圈)与星型齿轮传动系统(包括太阳轮、六个星轮、内齿圈)前后连接,行星轮系通过行星架与套筒相连。发动机输出的功率在行星轮系分流后,分别经行星架和星型轮系传递,最后汇聚到桨轴,输出给螺旋桨。该型减速器可以将发动机恒定转速 12 300 r/min(发动机输出转速)降低到 1 074 r/min(螺旋桨的转速),其减速比为 0.087 32。

### 1.2 实体建模及装配

利用UG 软件对减速器齿轮传动系统的各部件进行实体建模,图2所示为齿轮副的三维模型。

为了对该型减速器齿轮传动系统进行动力学仿



1. 弹性轴; 2. 游星架; 3. 测扭机构; 4. 中间齿轮架; 5. 测扭泵传动从动齿轮; 6. 第二级齿轮副; 7. 桨轴; 8. 第一级齿轮副; Z1. 第一级主动齿轮; Z2. 中间齿轮; Z6. 第二级内齿圈

图1 减速器齿轮传动系统

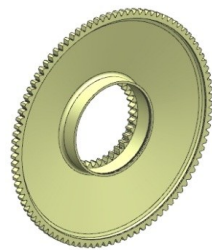
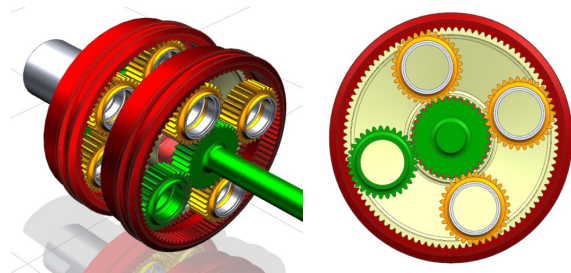


图2 齿轮副三维模型

真,按照各部件之间的实际运动关系进行装配,并利用UG 软件中提供的约束方式对各部件进行约束,最终整个齿轮传动系统的装配图如图3所示。



(a) 减速器装配示意图

(b) 齿轮装配示意图

图3 减速器齿轮传动系统实体建模图

### 1.3 动力学仿真

在对减速器齿轮传动系统进行动力学仿真之前,须创建其运动方案,实现系统的运动仿真。

首先定义机构中的连杆,连杆是机构中的运动部件,机构中所有运动部件都必须定义为连杆。根据单个部件的绝对运动不影响系统内其余部件的相对运动的原理,令星型齿轮传动系统星型架与地面固定,不对其创建连杆。对系统内其他部件分别创建连杆,由于系统内各部件均为对称结构,因此确定

连杆中心为部件几何中心,方向与端面垂直。

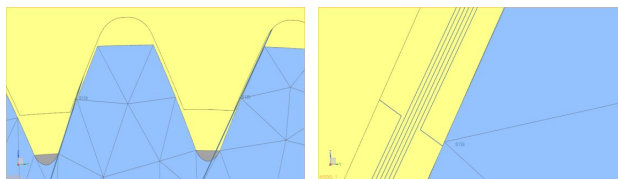
创建连杆之后,需要创建运动副赋予系统内各个连杆相互之间的运动关系,该减速器系统主要包含齿轮之间的相互啮合运动和部件的旋转运动,因此需要根据实际情况对减速器各连杆创建运动副。针对系统内各部件的旋转运动创建旋转副,由于各部件均为对称结构,因此所创建旋转副原点都为部件几何中心。针对齿轮之间的相互啮合运动,通过定义传动比的方法创建齿轮副,在创建齿轮副时必须保证其连接的两个旋转副包含公用连杆,使该齿轮副的自由度为0。

在对系统施加驱动时,文中选择常数驱动,对主动轴给定初始速度 1 500 r/min。进而对系统的装配效果进行干涉检查,确保各部件在运动过程中不会出现干涉现象,确保动力学仿真的顺利进行。

UG 软件的运动仿真单元提供了柔性体仿真模块,运用该模块可以模拟含有柔性体系统的运动状态。采用柔性体模块模拟当一级齿轮毂为柔性体、其余部件为刚体时减速器的运动状态。

因为一级齿轮毂、一级内齿圈和二级太阳轮之间的连接均为套齿结构,因此采用弹簧模拟齿轮毂花键之间的弹性力作用,在齿轮毂外花键和内齿圈花键的节圆上取接触的两点,对其施加弹簧作用。对其余 96 个接触面进行同样操作,且二级主动齿轮与其连接方式相同。图4为具体连接示意图。

采用弹簧刚度来模拟齿轮毂的健康状态,当齿轮毂没有故障时,97 个弹簧单元的弹簧刚度相同。当齿轮毂出现裂纹故障时,齿轮毂与齿圈的接触必然出现翘曲,因此采用从齿轮毂上一个齿面到其直径相对应的齿面上的弹簧刚度逐渐变小的弹簧阵列来模拟齿轮毂出现裂纹的状况。



(a) 连接示意图

(b) 局部放大图

图4 柔性体与刚体连接示意图

在输入端施加转矩,在输出端添加阻尼单元,对系统进行动力学仿真。

对处于正常状态和故障状态的减速器行星轮 P1 的中心位移进行比较,结果见图5。

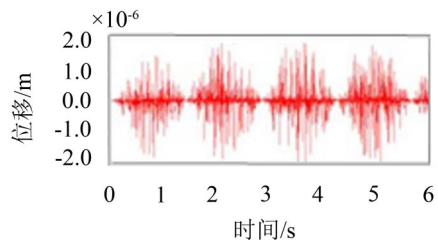
对处于正常状态和故障状态的减速器星轮 M1 的中心位移进行比较,结果见图6。

由图5、图6可以看出,在齿轮毂存在故障的状态下,减速器内行星轮与星轮的振动量明显增大,这是因为当一级齿轮毂出现故障时,与其相联结的一级内齿圈和二级太阳轮均发生翘曲,使行星齿轮传动系统和星型齿轮传动系统内部件非对称性增强,从而使得振动量增大。因此,可以将减速器内行星齿轮传动系统和星型齿轮传动系统的振动量作为减速器故障监测的特征量。对发动机减速器进行动力学仿真分析,可为后面的实验提供故障特征先验,为实验奠定理论基础。

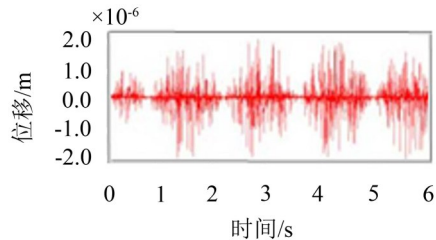
## 2 减速器整机振动试验与故障监测

为了验证仿真计算结果,完成对比实验,分别对6台发动机做十次整机振动测试实验,各次实验所使用发动机的状态如表1所示。

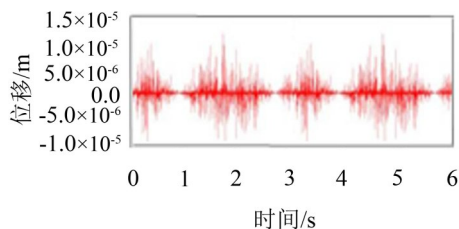
为了验证设计的整机振动测试系统的有效性、所选取的测点位置的正确性以及所测得的实验数据对一级齿轮毂故障诊断的针对性,对002号发动机



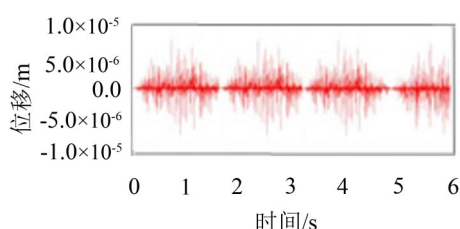
(a) 处于正常状态行星轮P1的横向位移



(b) 处于正常状态行星轮P1的切向位移



(c) 处于故障状态行星轮P1的横向位移



(d) 处于故障状态行星轮P1的切向位移

图5 行星轮P1位移对比



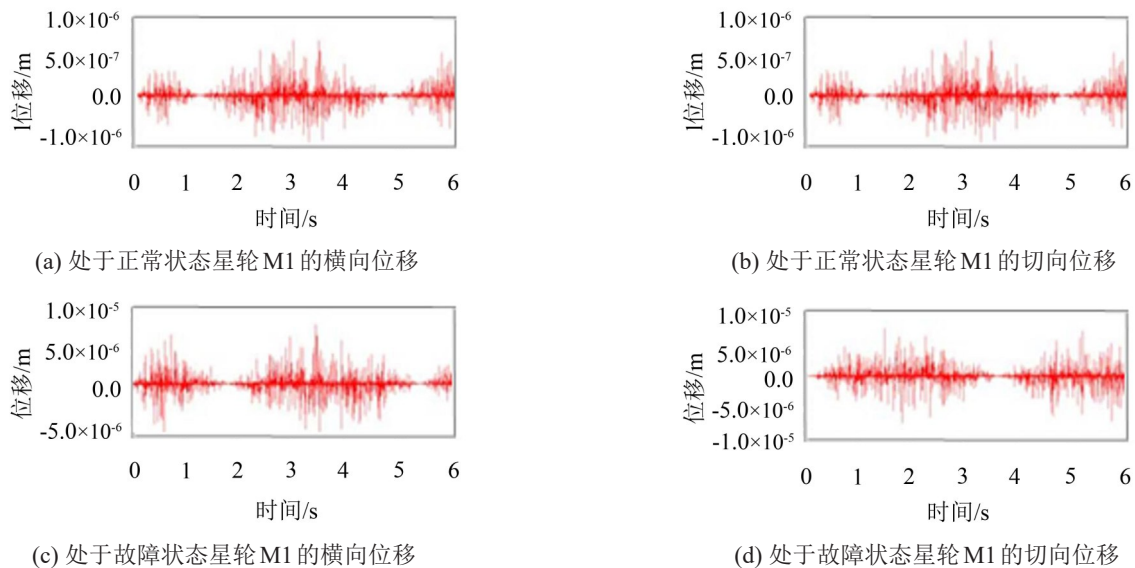


图6 星轮M1位移对比

在0.2额定状态下的振动信号进行频谱分析。

图7为002号发动机在0.2额定运行状态同一时间段三个通道的频谱。三个频谱图中的主要频率基本一致,而且都有明确的物理意义,说明了设计的整机振动测试系统是有效的,选取的传感器安装位置能有效地测得减速器内各部件的振动信号,三个通道测得的数据是准确的。其中1 772 Hz为减速器内星型齿轮传动系统各齿轮部件之间的啮合频率,3 543 Hz、5 424 Hz分别为1 738 Hz的2倍频、3倍频;6 567 Hz为减速器内行星齿轮传动系统各齿轮部件的啮合频率。

由于一级齿轮处于连接减速器内行星齿轮传

动系统和星型齿轮传动系统的部件,因此,当其出现故障导致自身的刚度发生变化,会影响到行星齿轮传动系统和星型齿轮传动系统的啮合频率,使两者发生较大的变化。通过分析频谱图可知,减速器内行星系统和星型系统的啮合频率的幅值较大,因此可以将行星齿轮传动系统和星型齿轮传动系统的啮合频率作为特征频率,通过分析发动机整机振动信号中特征频率幅值的变化来监测减速器内齿轮的状态,振动幅值是针对齿轮啮合频率特征频带周边频率的振动幅值。因此,确定行星齿轮传动系统的啮合频率(6 548.5 Hz左右)和星型齿轮传动系统的啮合频率(1 736 Hz左右)分别为特征频率F1、F2。

表1 各次试车发动机状态

发动机编号	发动机状态
001、002、003、004	新机四台各一次
005	返厂大修发动机
006-1、006-2、006-3	装有正常齿轮的专用试车发动机三次
006-4(1)、006-4(2)	装有模拟故障齿轮的发动机两次

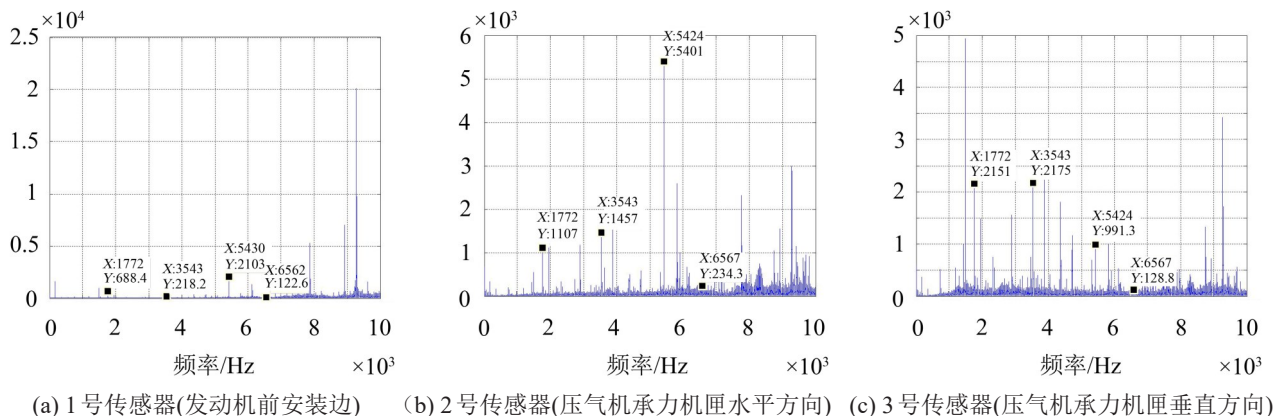


图7 0 832发动机信号频谱

利用 IIR 数字滤波器分别提取行星齿轮传动系统的啮合频率(F1)和星型齿轮系统啮合频率3倍频(3F2)。计算各特征频带的振动量有效值,得其分布曲线如图8所示。

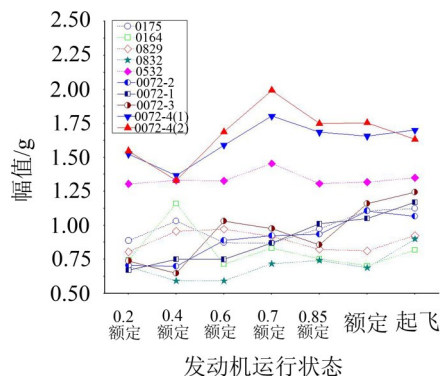
对 006 号发动机在不同状态下的特征频带振动量有效值进行计算,如图9所示。

由这些图可以看出,对于同一台发动机而言,当其减速器齿轮毂有裂纹时,整机振动特征频带振动量有效值会出现明显变化,大约是装有正常齿轮毂的发动机的结果的两倍,数据分析发现齿轮毂啮合频率特征频带在有、无裂纹情况下存在明显的振动量变化。这说明当影响发动机整机振动特征频带振动量的其他因素保持不变时,齿轮毂的健康状况会对发动机的整机振动特性产生巨大影响。

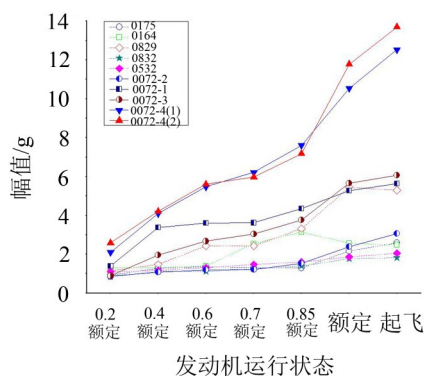
### 3 结语

针对某型发动机减速器出现的齿轮毂裂纹故障问题进行机理研究,得出以下结论:

(1) 利用 UG 软件对系统进行动力学仿真,采用弹簧模拟齿轮毂花键之间的弹性力作用,通过改变弹簧刚度的方法模拟一级齿轮毂存在故障时的状态,对比研究处于正常状态和带有裂纹齿轮毂故障状态的发动机减速器各部件的动态响应,发现处于故障状态时,减速器系统内各部件的振动幅值明显增大,验证了采用改变弹簧刚度模拟齿轮毂故障状态的方法的可行性,确定了减速器系统的振动量大小为故障监测的特征量,为故障监测提供了理论基础。

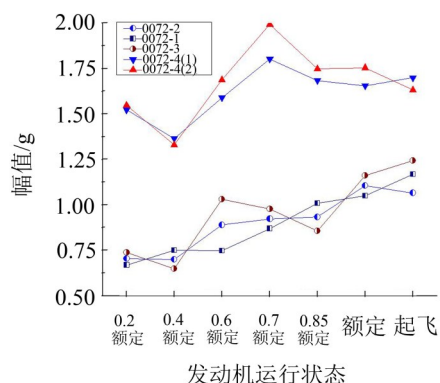


(a) 1号传感器3F2特征频带

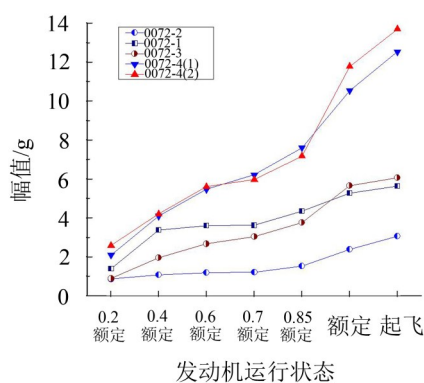


(b) 2号传感器F1特征频带

图8 厂内测试发动机振动量有效值幅值图



(a) 1号传感器3F2特征频带



(b) 2号传感器F1特征频带

图9 006号发动机振动量有效值幅值图

(2) 对实验信号进行分析,提取出与故障相关的特征频带,对比两种状态发现带故障发动机振动量有效值明显高于正常发动机,验证了仿真计算的正确性。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨富春,周晓军,郑津洋. 复式星型齿轮传动系统综合动力学模型及振动特性研究[J]. 振动与冲击,2011,30(8): 144-148.

- [3] 程勇,廖明夫,王俨凯. 航空发动机齿轮传动系统动力学研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(14):99-105.
- [4] 巫世晶,任辉,朱恩涌,等. 行星齿轮传动系统动力学研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版),2010,43(3):398-403.
- [5] 朱自冰,朱和鹏,鲍和云. 两级星型齿轮传动系统非线性动力学研究[J]. 航空动力学报,2007,22(11):1963-1970.
- [6] NAKAMURA K. Tooth separation and abnormal noise on power transmission gears[J]. Bulletin of the Japanese Society of Mechanical Engineers, 1967, 10: 846-854.

(下转第167页)