

# 齿轮箱系统动态特性分析及优化

## Dynamic Characteristics Analysis and Optimization of Gearbox

李锦花 史妍妍 孔祥锋 / 航空发动机动力传输航空科技重点实验室

**摘要:** 为了进一步提高航空发动机传动系统的可靠性, 本文采用MASTA和ANSYS软件, 通过分析齿轮传递误差, 分析机匣箱体振动特性, 在设计阶段对机匣箱体振动的预测, 并进行了箱体结构的优化与分析。结果表明, 该优化方法对机械系统箱体结构设计和改进具有一定的指导意义。

**关键词:** 附件机匣; 传递误差; 动态特性; 有限元; 结构优化

**Keywords:** accessory gearbox; transmission error; dynamic characteristics; finite element; structure optimization

### 0 引言

齿轮传动是机械传动中应用最广泛的一种传动形式, 而振动问题是传动系统的关键问题之一。实际中可能存在的共振现象不仅会导致巨大的噪声, 也可能令某些部件产生高于静力分析结果几十倍甚至几百倍的应力和变形, 造成系统疲劳寿命缩短甚至出现危险性的破坏。

附件机匣早期的动态分析是指产品制成后在时域内测定有关结构的振动量, 即选择某个测点测定其加速度随时间的变化, 这种方法不能直接了解系统的动态特性以及响应与结构之间的关系, 因此既找不出产生某种响应的原因, 也不能在设计阶段就预见其动态特性, 更谈不上修改设计以改善其动态特性。但随着航空发动机推重比的提高, 附件机匣必须向高速、重载、轻重量方向发展, 因此进一步改善其结构的可靠性和性能非常重要<sup>[1-4]</sup>。本文使用传动系统分析软件(MASTA)对附件机匣进行齿轮系动态分析, 并进行结构改进分析, 评价结构对附件机匣动态特性的影响。

### 1 振动理论

齿轮系统的主要激振源是轮齿啮合的动态激励, 动态激励分为内部激励和外部激励两大类, 内部激励是指在齿轮副轮齿啮合过程中所产生的动态激励。内部激励包括刚度激励、误差激励和啮合冲击激励。本文主要分析由刚度激励所产生的振动。

刚度激励的产生是由于啮合过程中单、双齿对啮合交替出现导致轮齿综合啮合刚度和轮齿载荷周期性变化, 进而引起的对齿轮系统的动态激励。其激励力可表示为,

$$F=D \times \delta \quad (1)$$

$$D=(C_p+C_w)^{-1} \quad (2)$$

式中 $F$ 为啮合力;  $D$ 为动态啮合刚度;  $\delta$ 为静态传递误差;  $C_p$ 为小轮柔度;  $C_w$ 为大轮柔度。

传动系统包括齿轮副、传动轴、支承轴承和箱体<sup>[5]</sup>。当分析由齿轮传递误差引起的振动如何传递到齿轮箱时, 其系统分析模型可以按图1所示建立。

把轮齿的啮合刚度简化为作用在节点 $P$ 上的直线弹簧, 将齿轮简化为质量

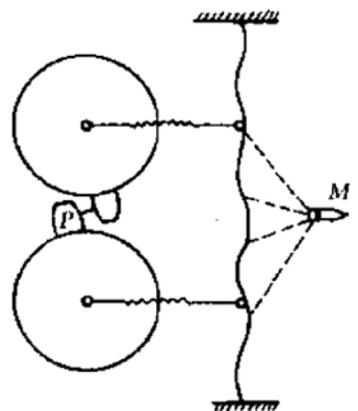


图1 系统变形分析模型

(转动惯量), 齿轮和箱体连接起来的轴承座等简化为直线弹簧, 箱壁简化为两端固结的板簧。这样即可模拟齿轮振动产生和传播的过程。由于传递误差在节点 $P$ 上产生相对位移使齿轮振动, 其所引起的支座反力的变化经轴承传递到箱体上。齿轮传动系统主要有以下几个特点:

1) 由于齿轮轮齿的啮合刚度随时间变化, 因此齿轮传动系统是一个时变的动态系统;

2) 齿轮传动一般具有多个啮合传动副, 因此是一个多级传动系统;



图2 ANSYS模型



图3 MASTA模型

3) 齿轮总是安装在弹性的传动轴上,而传动轴又支承在弹性的轴承上,因此是一个具有扭转振动、横向振动和轴向振动的相互耦合的动态系统<sup>[6]</sup>。

## 2 有限元模型的建立

首先在MASTA软件中进行参数化建模,建立附件机匣齿轮箱内部的齿轮、轴、轴承、花键等模型;建立机匣壳体和齿轮轴UG模型,并将其导入ANSYS,划分网格<sup>[7]</sup>(见图2),提取壳体和齿轮轴的刚度矩阵;将刚度矩阵和节点位置信息导入MASTA,与基本模型关联<sup>[8]</sup>,附件机匣完整模型见图3。

## 3 齿轮箱系统分析

### 3.1 激励

由于齿轮传递误差产生的激励有明显的周期性,特别适于用频谱分析法研究。MASTA软件即通过齿轮传递误差描述周期性的内部激励,并对传递误差函数进行傅里叶变换,将其谱分解,从频谱图上确定影响激励源的主要因素。

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (3)$$

式中, $A$ 为振动量的幅值, $\varphi$ 为初相

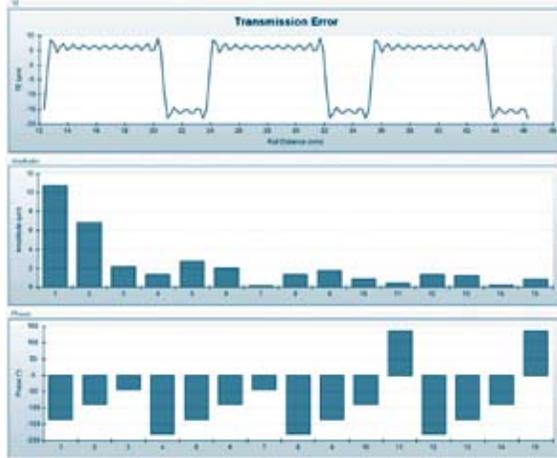


图4 齿轮副传递误差

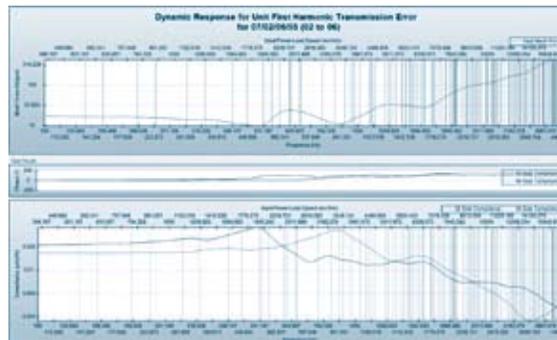


图5 齿轮副啮合力计算结果

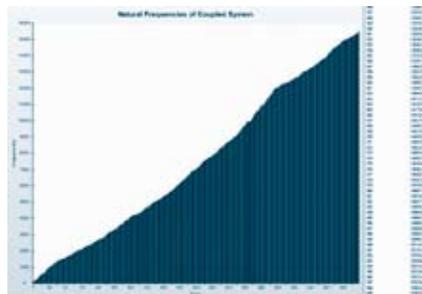


图6 固有频率

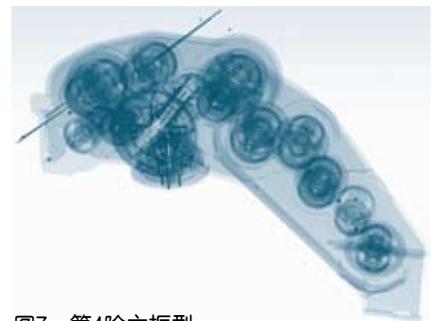


图7 第4阶主振型

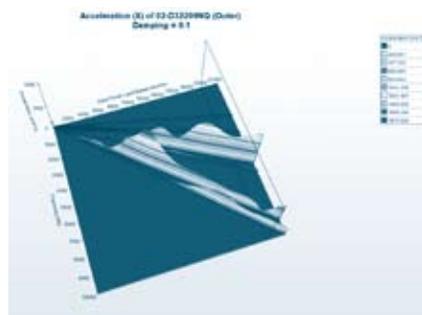


图8 轴承响应图

位, $\omega$ 为基频, $t$ 为时间, $a_0$ 为常数。

计算得到一对齿轮副的传递误差及其频谱图如图4所示。可见,该对齿轮一次谐波产生的振动量幅值最大。齿轮副啮合力计算结果如图5所示,啮合力为齿轮传动的内部激励,机匣系统在其激励下产生振动响应。

### 3.2 动态特性

分析计算齿轮箱系统的各阶固有频率及各阶主振型,如图6和图7所示。

### 3.3 响应分析

计算结果显示各轴承位置的响应情况。通过分析每个轴承的响应,进行附件机匣整体的响应分析。以一个轴承为例进行分析,响应图如图8所示,

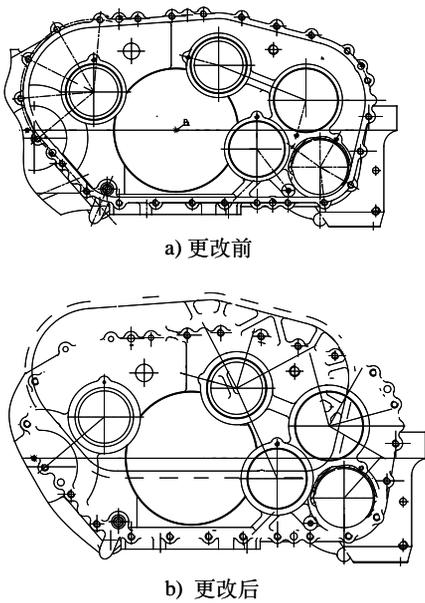


图9 箱体更改

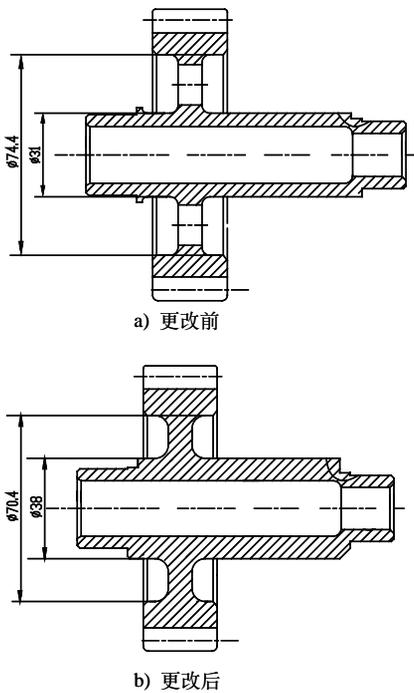


图10 齿轮轴更改

25齿齿频和23齿齿频在4000Hz附近激起的响应较大。其中25齿齿频激起的响应为 $1900\text{m/s}^2$ 。23齿齿频激起的响应为 $1550\text{m/s}^2$ ，对应转速在82%工作转速。

通过对每个轴承进行分析表明，

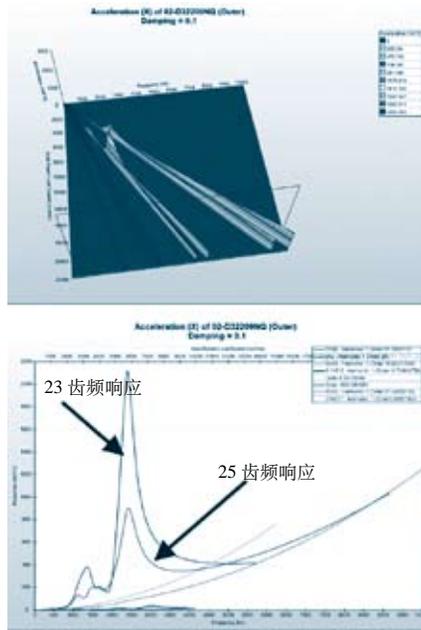


图11 轴承响应图

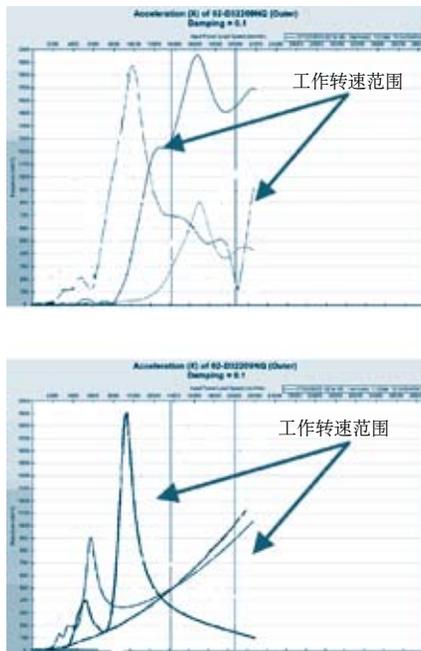


图12 两种结构轴承响应对比图

该机匣箱体在80%~84%工作转速各轴承位置的响应普遍较大，并且激振的齿轮主要集中在这两个齿频齿轮。

#### 4 齿轮箱结构优化<sup>[9]</sup>

齿轮系统的响应主要包括轮齿动

态啮合力和轮齿激励，以及传动系统中各零件和箱体结构的动态响应等。因此，改变系统的振动特性可开展以下两方面工作：一是对齿轮进行修形，减小传递误差，进而减小齿轮啮合力；二是改变系统刚性，减小动态激励的传递。

本文优化从提高刚性角度出发，将箱体壁厚增加1mm，在箱体内部增加加强筋(见图9)，同时，对齿轮轴进行优化，增大齿轴轴的轴径，取消幅板减重孔，增加轮缘厚度(见图10)。

结构优化后轴承响应图如图11所示，25齿齿频和23齿齿频在2500Hz附近激起的响应较大。其中，25齿齿频激起的响应为 $900\text{m/s}^2$ ，23齿齿频激起的响应为 $2100\text{m/s}^2$ ，对应转速都在50%工作转速以下。

两种结构的响应对比如图12所示，改进结构振动响应情况明显好于原结构，在工作转速范围内不存在振动响应峰值点，并且整体振动响应值小于原结构响应值。

#### 5 结论

1) 采用MASTA和ANSYS软件，通过分析齿轮传递误差，进行齿轮箱体振动特性分析，可实现在设计阶段对齿轮箱体的振动预测。

2) 优化后的齿轮箱体振动特性明显好于原结构。可见，在箱体结构设计中，对于较大面积的薄壁，应合理设置加强筋，适当增大壁厚，提高箱体结构刚性的同时减少动态激励的传递，减小系统的振动响应。

3) 齿轮轴结构的优化，改变了系统刚性和振动特性，可起到为齿轮箱体调频的作用。

4) 齿轮箱结构优化中存在质量增加的问题，为满足推重比要求，后续可通过开展齿轮修形的研究，减小齿轮传

# 基于SPH方法鸟撞航空发动机进气风扇的数值分析

## Numerical Analysis Based on the SPH for Bird Strike Aeroengine Intake Fan

杨瑞进 姜楠 池剑虹 孟宪国 邹宜勇 / 中航工业昌河飞机工业集团有限责任公司

**摘要:**目前鸟撞问题的数值分析方法主要以拉格朗日方法和欧拉方法为主。拉格朗日方法在计算时会遇到网格畸变和缠绕等问题,使计算无法进行。欧拉方法在确定模型的自由表面、变形边界和运动交界面时精确性较差。针对以上不足,本文创新性地应用一种无网格的SPH方法模拟鸟撞航空发动机进气风扇,旨在改善传统方法中网格畸形和精度不足的问题,并通过模拟数据和实验数据的对比,验证SPH方法对鸟撞问题分析的准确性。

**关键词:** 鸟撞; 航空发动机; SPH方法; 数值分析; 有限元

**Keywords:** bird strike; aeroengine; SPH method; numerical analysis; finite element

### 0 引言

随着越来越多的飞机投入商用和军用,鸟撞事件也随之增多。研究报告显示,仅在美国,鸟类及其他野生动物撞机事件造成的经济损失年均超过6亿美元,自1988年以来此类事故已造成至少219人死亡<sup>[1]</sup>。为了避免鸟撞事故的发生,降低鸟撞事故带来的损

失,许多国家都开展了鸟撞飞机的研究工作。各国对飞机抗鸟撞问题的研究主要包括合理的设计规范、鸟撞试验研究、结构鸟撞数值分析、结构材料抗撞击研究、设计结构对抗鸟撞能力的影响研究、提高结构抗鸟撞能力综合途径的研究、评价结构抗鸟撞能力方法的研究等<sup>[2]</sup>。航空发动机进

气风扇是飞机受鸟撞击次数最多的部位之一,所以对发动机进气风扇进行抗鸟撞方面的研究,对增强遭受鸟体撞击的发动机安全性、提高飞机的飞行安全、降低航空公司的财产损失、挽救旅客的生命等方面都具有重要的现实意义。

早期的鸟撞研究主要通过实验进

递误差等方法,将两者结合使用,降低齿轮箱体的振动响应。

AST

### 参考文献

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册(第12册)[M]. 北京:航空工业出版社.
- [2] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M].北京:航空工业出版社,2005.
- [3] Li Runfang, Yang Chengyun, Lin Tengjiao. Finite element simulation of the

dynamical behavior of a speed-increase gearbox[J].Journal of Materials Processing Technology,2004,150:170-174.

[4] 王建军,李润方. 齿轮系统参数振动问题研究综述[J].振动与冲击,1997(4):69-73.

[5] 王玉新,柳杨,王仪明. 考虑啮合时变刚度和传递误差的齿轮振动分析[J].机械传动,2002,26(1):5-8.

[6] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学[M].北京:科学出版社,1997.

[7] 王新敏. ANSYS工程结构数值

分析[M].北京:人民交通出版社,2007.

[8] SMT公司. Masta培训手册[Z].北京:SMT公司,2007.

[9] 薛延华. 齿轮箱箱体结构对其振动模态的影响研究[J].机械传动,2008,32(6):107-108.

### 作者简介

李锦花,硕士,工程师,主要研究方向是航空发动机动力传输技术。