

齿数差对面齿轮传动啮合性能影响的实验研究

何 瑛^{1*} 何国旗² 郭怀仲³

1. 湖南理工职业技术学院智能制造学院, 湖南 411104

2. 湖南工业大学机械工程学院, 湖南 412007

3. 湘潭三峰数控机床有限公司, 湖南 411000

摘要: 为了避免面齿轮传动时出现偏载, 而导致齿面接触区集中于轮齿边缘的现象, 面齿轮啮合一般采用齿面点接触。根据面齿轮加工原理, 齿面点啮合是采用比加工面齿轮的刀具齿轮齿数大于与面齿轮相啮合的圆柱小齿轮齿数的1~3个齿, 即通过 $D=1\sim 3$ 的齿数差来实现。在输入转速和负载等外部条件相同的情况下, 对不同齿数差的面齿轮传动进行啮合实验, 得到不同齿数差的面齿轮传动啮合时域图和频谱图, 并对所得的时域图和频谱图进行相关分析, 发现齿数差 $D=2$ 时, 面齿轮啮合性能表现最好。

关键词: 面齿轮啮合; 齿数差; 时域分析; 频谱分析

一、前言

面齿轮传动是一种特殊的齿轮传动, 由一个圆柱小齿轮与圆锥大齿轮相啮合演变而来的, 如图1所示, 面齿轮传动适用于传递存在一定轴交角的运动。武装直升机的主减装置中的分流—汇流结构(如图2所示)采用面齿轮传动后, 其总成质量减轻了40%左右, 而承载能力却提高了35%左右^[1], 面齿轮传动在分流—汇流传动方面表现出的独特特性, 使其较其他齿轮传动在武装直升机主减装置中的应用表现出了明显的优势^[2]。国内外学者相继对面齿轮传动展开了相关研究, 尤其是在啮合原理、齿轮弯曲强度、齿面接触强度、切齿及磨齿加工等方面做了相关的研究工作^[3-4]。齿轮传动系统的啮合特性将直接影响到传动系统的稳定性和可靠性, 鲍和云等^[5]对某型变转速直升机传动系统动力学特性进行了分析, 利用集中质量法建立该型变转速直升机传动系统的动力学模型, 模型中考虑时变啮合刚度、齿面摩擦、行星轮系的啮合相位以及各级齿轮副的综合传递误差等因素, 推导系统的动力学微分方程。靳广虎等^[6]对扭转刚度对功率分流传动系统均载特性的影响进行了研究, 考虑齿侧间隙、齿轮副间的时变啮合刚度、齿轮偏心误差、轴的扭转以及支撑刚度等, 构建了面齿轮-圆柱齿轮两次功率分流传动的动力学模型。齿轮啮合产生的振动、噪声是齿轮啮合性能的重要指标, 很多学者使用振动和噪声来进行齿轮啮合的故障诊断等^[7-10]。

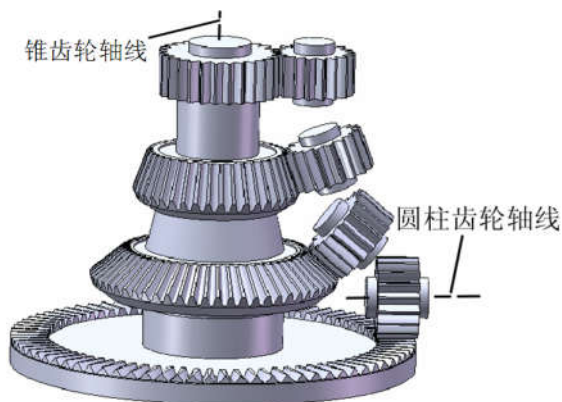


图1 面齿轮传动的演变过程

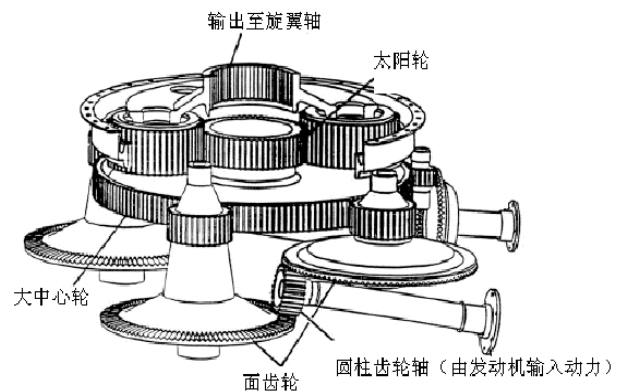


图2 武装直升机的主减装置

由于面齿轮传动的齿面处于线接触状态时, 实际工作时齿面接触容易出现偏载现象, 导致齿面接触区出现集中于

*通讯作者: 何瑛, 1969年3月, 女, 汉族, 湖南湘潭人, 现任职湖南理工职业技术学院智能制造学院院长, 教授, 硕士。研究方向: 数字化制造理论与技术研究。

基金项目: 湘潭市科技计划项目(项目编号: CG-YB20191012)。

轮齿边缘一侧现象^[1]。因此,在面齿轮传动设计过程中应尽量避免齿面接触出现线接触,而应该采用点接触。

为了让面齿轮传动实现点啮合,一般采用加工面齿轮的刀具齿轮齿数大于与面齿轮相啮合的圆柱小齿轮齿数的1~3个齿,即通过 $D=1\sim 3$ 的齿数差来实现面齿轮传动的局部点接触^[1]。然而,究竟齿数差为多少时,才有利于面齿轮啮合性能,这方面的研究目前还鲜有报道。本文将以实验的方法就齿数差对面齿轮啮合性能的影响进行研究,其研究结果将为面齿轮传动的参数设计提供指导。

二、实验方案

(一) 检测试验台所需硬件

齿数差对面齿轮传动啮合性能影响的检测试验台包括以下硬件^[1]:

1. 啮合检测所需的实验机

采用YD-9550型齿轮检测实验机进行面齿轮啮合性能检测实验,如图3(a)所示。

2. 加速度测定传感器

如图3(b)所示,一对相互啮合的齿轮分别安装在YD-9550型齿轮检测实验机的两轴上,在两轴的轴承座上,各安装一个传感器,该传感器能够对三个轴向的加速度分别进行检测。该传感器采用上海北智公司生产的J-13510型IEPE三轴向加速度传感器。

3. 噪声测定传感器

采用重庆泰测生产的TZ-2KA型噪声传感器。

4. 信号采集卡

采用北京优采公司生产的UA307Si型A/D采集卡。



(a)

(b)

图3 YD-9550齿轮检测实验机及齿轮安装

(二) 试验台软件

采用事件驱动的编程、动态链接库的调用、生产者/消费者模式、同步控制技术Queue、LabSQL访问Access数据库,以及数字信号分析处理等相关程序开发技术对软件进行设计,利用LabVIEW软件对面齿轮传动啮合性能检测系统进行相应的研究和开发,形成了一套多通道准同步的实时数据采集、分析与显示系统,对面齿轮啮合性能的进行定量检测与评判^[1]。

(三) 实验方案

1. 准备一个面齿轮和三个圆柱小齿轮,其参数如表1所示。

2. 在YD-9550型齿轮检测实验机上,调整面齿轮和圆柱小齿轮的安装位姿,并在相互啮合的齿面涂上红丹粉,进行齿轮副滚动检查实验,依据测得的数据验证系统评判的可行性。

3. 更改不同齿数的圆柱小齿轮,并改变施加在面齿轮上的负载,得到不同工况下面齿轮啮合的时域图和频谱图。

4. 对不同工况下获得的面齿轮啮合性能时域图和频谱图进行相关分析,总结出规律。

表1 实验用面齿轮啮合相关参数

类型	模数 (mm)	压力角 (°)	圆柱小齿轮的齿数			面齿轮的齿数
直齿	5	20°	17	18	19	40

三、面齿轮啮合性能测试实验

将齿面涂有红丹粉的相应配对面齿轮安装到检测实验机上，如图3所示。检测实验机上面齿轮传动的坐标系如图3(b)所示，设面齿轮轴向为坐标系的x轴，圆柱小齿轮轴向为坐标系的y，垂直径向为坐标系的z。则圆柱小齿轮的坐标系为 $S_1(x_1, y_1, z_1)$ ，面齿轮的坐标系为 $S_2(x_2, y_2, z_2)$ 。

调整检测实验机，使面齿轮传动正常啮合。启动检测实验机，使其输入轴的转速为1400 rpm，加载载荷为20 Ngm，经过一段时间的运行后，获得面齿轮传动齿面的接触精度、噪声和平稳性等相关参数。

由面齿轮的啮合原理可知，正交直齿面齿轮传动过程中，圆柱小齿轮是没有轴向力的，根据作用力与反作用力的关系，可以判断与之相啮合的面齿轮也就没有径向力。因此，在测试过程中，只需考虑面齿轮传动的x、z轴方向的信号。

表2-3所示为实验所测得的面齿轮啮合振动时域与频谱图。

表2 不同齿数的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时的时域图

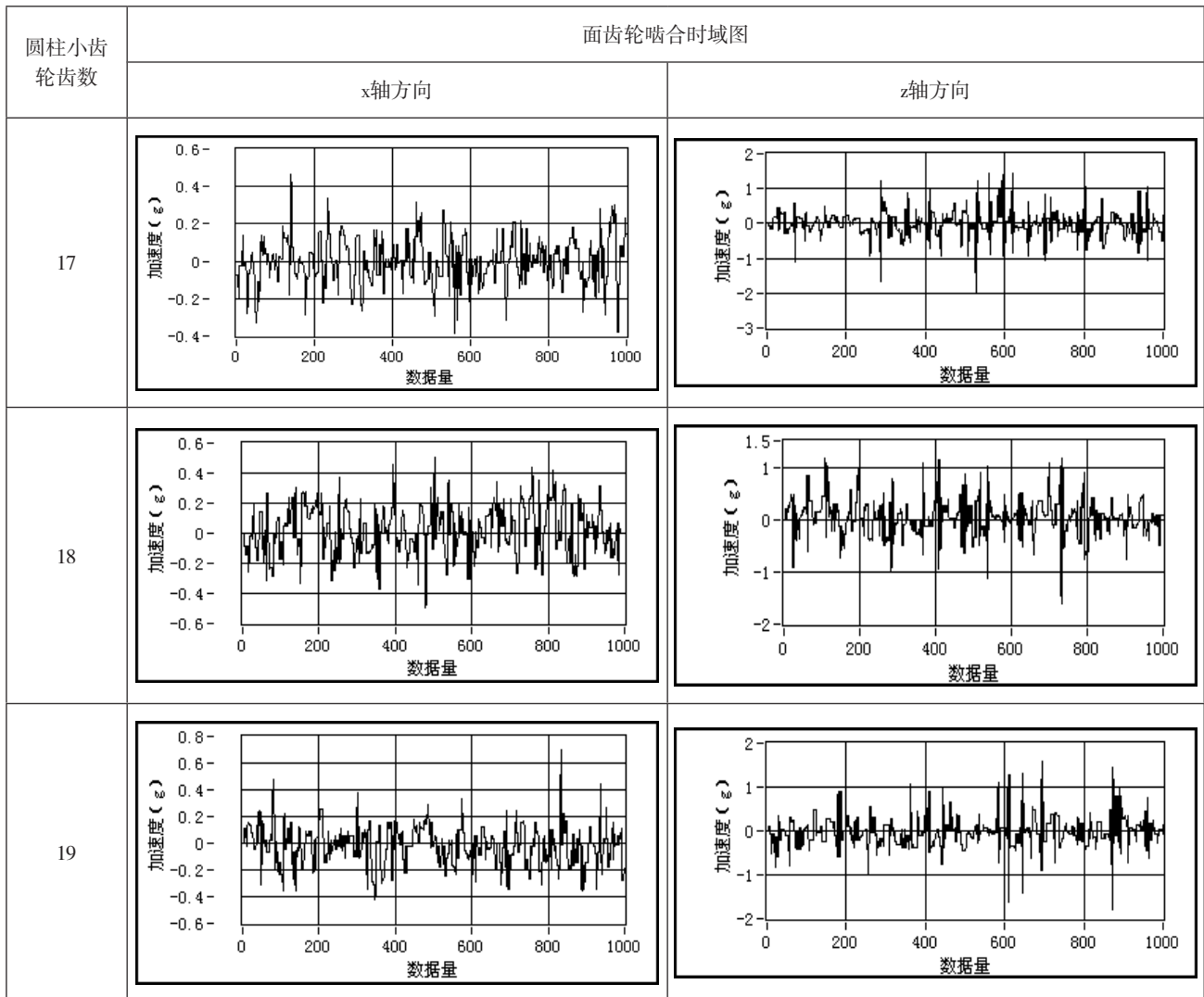


表3 不同齿数的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时的频谱图

面齿轮啮合频谱图			
圆柱齿轮齿数: 17; 面齿轮转频: 9.9167; 圆柱齿轮转频: 23.3334; 齿频: 396.6678; 检测基频: 398.1555			
x 轴 方 向		z 轴 方 向	
圆柱小齿轮齿数: 18; 面齿轮转频: 10.4999; 圆柱小齿轮转频: 23.3334; 齿频: 420; 检测基频: 508.6767			
x 轴 方 向		z 轴 方 向	
圆柱小齿轮齿数: 19; 面齿轮转频: 11.0834; 圆柱小齿轮转频: 23.3334; 齿频: 443.3334; 检测基频: 444.02			
x 轴 方 向		z 轴 方 向	

四、结果分析

(一) 时域分析

从图1中可以看出, 由于面齿轮及圆柱小齿轮的轴向为坐标系的x轴方向。因此, x轴方向的刚性较z轴大。z轴方向的调波幅值对面齿轮啮合性能影响较x轴方向的更大, 因此, z轴方向的调波幅值大小是面齿轮啮合性能的重要评价指标^[11]。

如表4所示, 对面齿轮啮合性能时域分析比较, 发现18齿的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时, 其各项指标都比17齿和19齿的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时的要小。因此, 从时域分析结果来看, 18齿的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时, 其啮合

性能较优越。

表4 不同齿数的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时的时域分析结果

圆柱小齿轮齿数	时域分析结果				
	面齿轮				
	坐标	均值	方差	最大	最小
17	x	0.0990	0.0155	0.5837	-0.5850
	z	0.2514	0.1415	3.5041	-3.0689
18	x	0.1226	0.0235	0.7021	-0.5511
	z	0.2273	0.0993	2.4185	-2.1818
19	x	0.1175	0.0218	0.7305	-0.5795
	z	0.2471	0.1275	2.8331	-2.7323

(二) 频谱分析

不同齿数的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时的频谱分析结果如表5所示。从表5的数据来看，19齿的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时，面齿轮Z轴方向的1次谐波调波幅值较17齿和18齿的都要大。17齿的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时，面齿轮X轴方向的1次谐波调波幅值较齿数为18和19的都要大。而18齿的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时，面齿轮X、Z轴方向的1次谐波调波幅值均最小。对于2次谐波而言，不同齿数的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时，对面齿轮调波幅值影响不大。3次谐波的产生则主要与相互啮合的齿轮的齿面粗糙度或干涉有关。因此，从频谱分析结果看，齿数为18的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时，其啮合性能表现较优越^[1]。

表5 不同齿数的圆柱小齿轮与面齿轮啮合时的频谱分析结果

圆柱齿轮齿数	频谱分析结果			
	面齿轮调波幅值			
	坐标	1次谐波	2次谐波	3次谐波
17	X	0.000043	0.000000	0.000000
	Z	0.000004	0.000002	0.000002
18	X	0.000001	0.000000	0.000000
	Z	0.000003	0.000002	0.000022
19	X	0.000004	0.000000	0.000001
	Z	0.000019	0.000003	0.000010

五、结论

分别对齿数为17、18及19时的圆柱小齿轮与齿数为40的面齿轮进行相关啮合性能测试实验，并对面齿轮啮合时域和频谱进行分析，不难得出如下结论：

(一) 面齿轮啮合振动的谐波幅值，反映了面齿轮副啮合性能的相关信息。齿数差对谐波幅值第1次谐波的影响较明显；

(二) 从时域分析结果来看，18齿圆柱小齿轮与面齿轮啮合过程中，面齿轮表现出来的啮合性能，较17齿和19齿圆柱小齿轮与面齿轮啮合的要优越。

(三) 从频谱分析结果来看，18齿圆柱小齿轮与面齿轮啮合过程中，面齿轮X、Z轴方向的1次谐波调波幅值较17齿和19齿圆柱小齿轮与之啮合的均要小。

由此可以判断,齿数差 $D=2$ 时,面齿轮啮合性能最好。

参考文献:

- [1]陈铭,徐冠峰,张磊.直升机传动系统和旋翼系统关键技术[J].航空制造技术. 2010.16:32-37.
- [2]刘志全,陈国定,沈允文.武装直升机传动系统的生存能力[J].机械科学与技术. 1998.11(1):44-48.
- [3]F.L.Litvin, Ignacio Gonzalez-Perez, Kenji Yukishima, et al. Design, Simulation of Meshing, and Contact Stresses for an Improved Worm Gear Drive. Mechanism and Machine Theory, 2007(42):940-959.
- [4]F.L.Litvin, Ignacio Gonzalez-Pei, Alfonso Fuentes, et al. Design of Mechanisms for Function Generation and Output. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008:1-16.
- [5]鲍和云,李丰波,陆凤霞,等.某型变转速直升机传动系统动力学特性分析[J].中南大学学报(自然科学版), 2019,50(10): 2403-2416.
- [6]靳广虎,任薇,朱如鹏.扭转刚度对功率分流传动系统均载特性的影响[J].航空动力学报, 2019,34(11):2478-2489.
- [7]冯正玖.直升机圆柱齿轮分扭传动系统的均载特性影响因素分析[D].南京航空航天大学, 2019.
- [8]秋朋园.修形圆柱齿轮传动振动分析与齿面最佳修形研究[D].西北工业大学, 2017年.
- [9]王俊.船式拖拉机传动系统动态特性分析[D].湖北工业大学, 2019年.
- [10]刘欣荣,汪中厚,久保爱三.基于混沌蚁群优化算法的齿轮传动误差研究[J].系统仿真学报, 2019,31(09):1942-1949.
- [11]何国旗.面齿轮齿面创成方法及啮合特性研究[D].中南大学, 2014年.