

轮式拖拉机动力输出总成的振动特性研究

黄景山¹, 宋世毅², 杨文娟², 姚斌¹

(1. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005; 2. 中国一拖集团有限公司, 河南 洛阳 471004)

摘要: 通过对大功率轮式拖拉机动力输出总成系统的激励分析、振动模态分析以及对系统固有特性的研究, 分析了轴不平行度几何因素对总成系统的振动影响, 研究了轴承游隙、轴承预紧力等物理因素对总成系统的固有特性影响。通过将轴承游隙、轴承预紧力控制在一个合理范围内, 降低了系统的固有频率, 减小了动力输出总成系统的振动。

关键词: 大功率轮式拖拉机; 动力输出总成; 固有特性; 振动

中图分类号: S219.032

文献标志码: B

文章编号: 1006-0006(2017)06-0011-07

Study on Vibration Characteristics of Wheeled Tractor Power Output Assembly

HUANG Jingshan¹, SONG Shiyi², YANG Wenjuan², YAO Bin¹

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. YTO Group Corporation, Luoyang 471004, China)

Abstract: Based on the excitation analysis and vibration modal analysis of a large power wheeled tractor power output assembly system and study of the system intrinsic characteristics, the influence of shaft nonparallelism on assembly system vibration is analyzed. In addition, the influence of physical factors such as bearing clearance and bearing preload on inherent characteristics of the assembly system is studied. By controlling the bearing clearance and bearing preload within a reasonable range, the natural frequency of the system is reduced, and the vibration of the assembly system is also reduced.

Key words: Large power wheeled tractor; Power output assembly; Natural characteristics; Vibration

动力输出总成是大功率轮式拖拉机的重要组成部分, 可将发动机动力输出给后挂的农机具, 起到调整农机具工作速度和牵引力的作用。后动力输出总成由齿轮、传动轴、轴承及总成箱体等组成, 动力输出总成的振动特性对拖拉机整车的振动与噪声有着重要的影响。由于存在着制造误差、装配误差以及外部载荷等因素的影响作用, 动力输出总成在工作状态下将产生机械振动和辐射噪声, 这将降低轮式拖拉机的工作寿命, 同时影响了驾驶员的舒适感, 对周边环境造成噪声污染。因此, 对大功率轮式拖拉机动力输出总成系统的振动分析, 对系统的设计优化、减振降噪具有重要的意义。

目前, 国内外一些学者对齿轮传动系统的振动特性都进行了一定的研究。Saxena A 等人研究了齿轮裂纹和齿轮啮合刚度对齿轮传动系统的模态及频

率响应特性的影响^[1]; 肖会芳等人通过建立起齿轮-轴-轴承壳系统的八自由度动力学模型, 研究了齿轮故障引起的冲击力下的系统振动传递与能量耗散特性^[2]; 何畅然等人建立了变速箱啸叫综合分析模型, 系统分析了传动链上各零部件变形叠加及齿轮宏观、微观参数与齿轮传递误差、变速箱啸叫的关系^[3]; 赵腊月等人以某齿轮传动系统为研究对象, 建立了该齿轮传动系统动态分析模型, 对该传动系统进行动力学分析, 得出了齿轮传动系统的固有特性和传动系统轴承处轴心的振动响应分析结果^[4]。以上研究都对齿轮变速箱系统的振动特性进行了一定研究。大功率轮式拖拉机工作时的动力输出总成具有大扭矩、齿轮之间冲击力大的特点。

笔者以某大功率轮式拖拉机后动力输出总成系统为研究对象, 基于机械动力学理论建立了该总成

收稿日期: 2017-08-08

基金项目: 工信部智能制造专项“新型轮式拖拉机智能制造新模式应用”(豫洛工业制造 [2016]07744)

齿轮传动系统动态分析模型,综合分析了传动系中轴不平行度、轴承预紧力和轴承游隙与系统振动特性的关系。

1 动力学模型的建立

动力输出总成系统是由结构件(壳体)和内部传动件组成的,传动件包括传动齿轮、传动轴、轴承等零部件。以大功率轮式拖拉机手动2挡动力输出总成传动系统为研究对象,忽略壳体上倒角、凸台等对计算影响较小的特征,基于结构参数,在UG中建立起总成系统三维箱体模型,并在ANSYS有限元软件中,以轴承孔内圆柱面凝聚为节点,提取壳体的刚度矩阵、质量矩阵及节点信息,将其导入至MASTA平台中,建立起多自由度的动力输出总成系统动态分析模型,如图1所示。

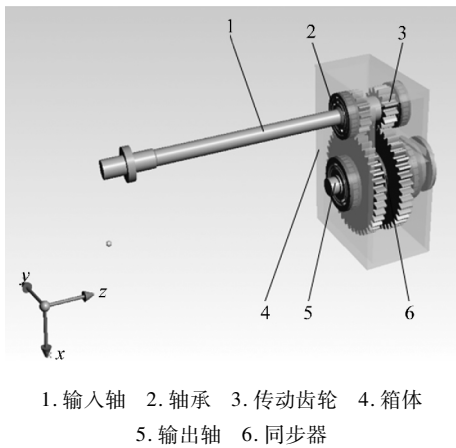
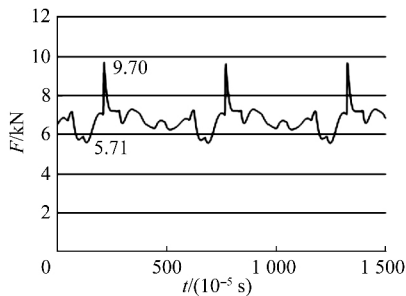


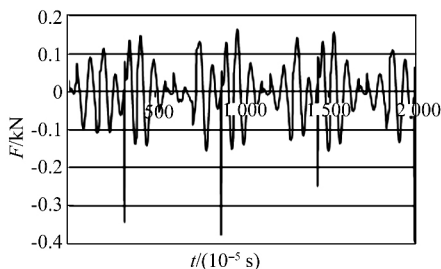
图1 动力输出总成系统分析模型

Fig.1 Analysis Model of Power Output Assembly System

应用于轮式拖拉机上的该型输出总成,输入轴连接柴油发动机后面的变速箱,输出轴连接农具。



无安装误差时的齿轮径向接触力图



存在0.02°同面轴不平行度时的齿轮径向接触力差值时域图

齿轮所用材料为20CrMnMo。本文的动力输出总成系统的工况为:720 r/min,1 200 N·m。

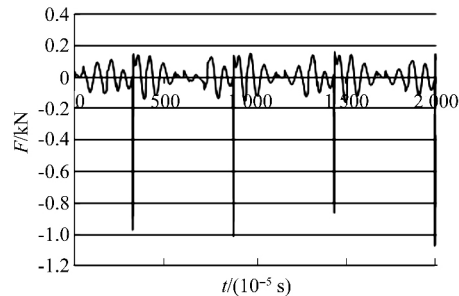
2 轴不平行度对系统的振动影响分析

多种零部件结构及互相连接的关系构建起的大功率轮式拖拉机动力输出总成系统,引起系统振动的因素主要包括零部件的几何制造误差、装配误差等。其中,箱体的轴承孔平行度误差影响传动精度,传动轴之间存在过大的轴不平行度时,会造成齿轮啮合过程中产生冲击,啮合冲击将导致更大的传递误差,从而激励传动系统产生振动,对外辐射出噪声。

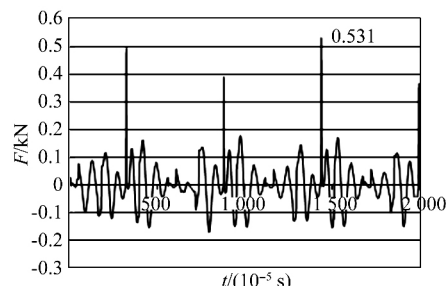
由于后动力输出总成在未连接农机具装备时就有振动与噪声发生,所以在此不考虑轴承孔轴线与安装平面的垂直度影响。对总成系统上输入轴及输出轴之间设置平行度误差,运用ADAMS多体动力学分析模块进行计算,研究后输出总成壳体轴承孔加工的几何平行度误差对于系统振动响应的影响。设置的箱体轴承孔几何平行度误差分别为:同面轴不平行度0.01°、0.02°、0.03°、0.04°、0.05°;异面轴不平行度0.01°、0.02°、0.03°、0.04°、0.05°(设计图要求轴不平行度≤0.04°)。

以720 r/min齿轮副的大齿轮为研究对象,取齿轮质心位置进行振动数据的提取。首先,进行同面轴不平行度对齿轮径向接触力冲击的对比分析。

动力输出总成的主动轴与从动轴间存在同面轴不平行度时,接触力差值曲线在时域上出现周期性峰值,如图2所示,这给齿轮啮合过程带来了周期性冲击。并且,随着同面轴不平行度的增加,周期性冲击的大小在变大,如图3所示。



存在0.01°同面轴不平行度时的齿轮径向接触力差值时域图



存在0.03°同面轴不平行度时的齿轮径向接触力差值时域图

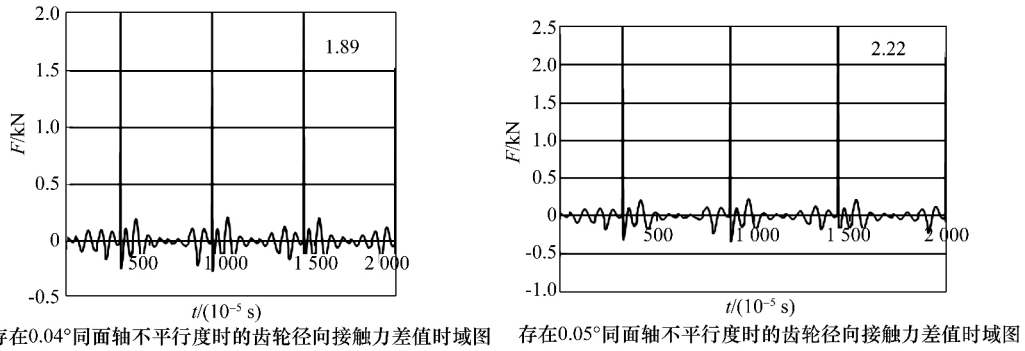


图2 同面轴不平行度对齿轮径向接触力冲击的对比分析
Fig.2 Analysis of Radial Contact Force Impact of Suprafacial Shaft-nonparallelism on Gears

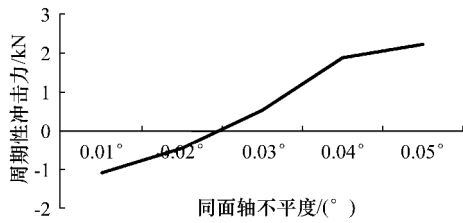


图3 同面轴不平行度与周期性冲击力
Fig.3 Suprafacial Shaft-nonparallelism Vs. Periodic Force

接着,探究异面轴不平行度对齿轮径向接触力冲击的对比分析。

当动力输出总成的主动轴与从动轴间存在异面轴不平行度时,接触力差值曲线在时域上出现周期性峰值,如图4所示。这给齿轮啮合过程带来了周期性冲击。并且,随着异面轴不平行度的增加,周期性冲击的大小在变大,如图5所示。

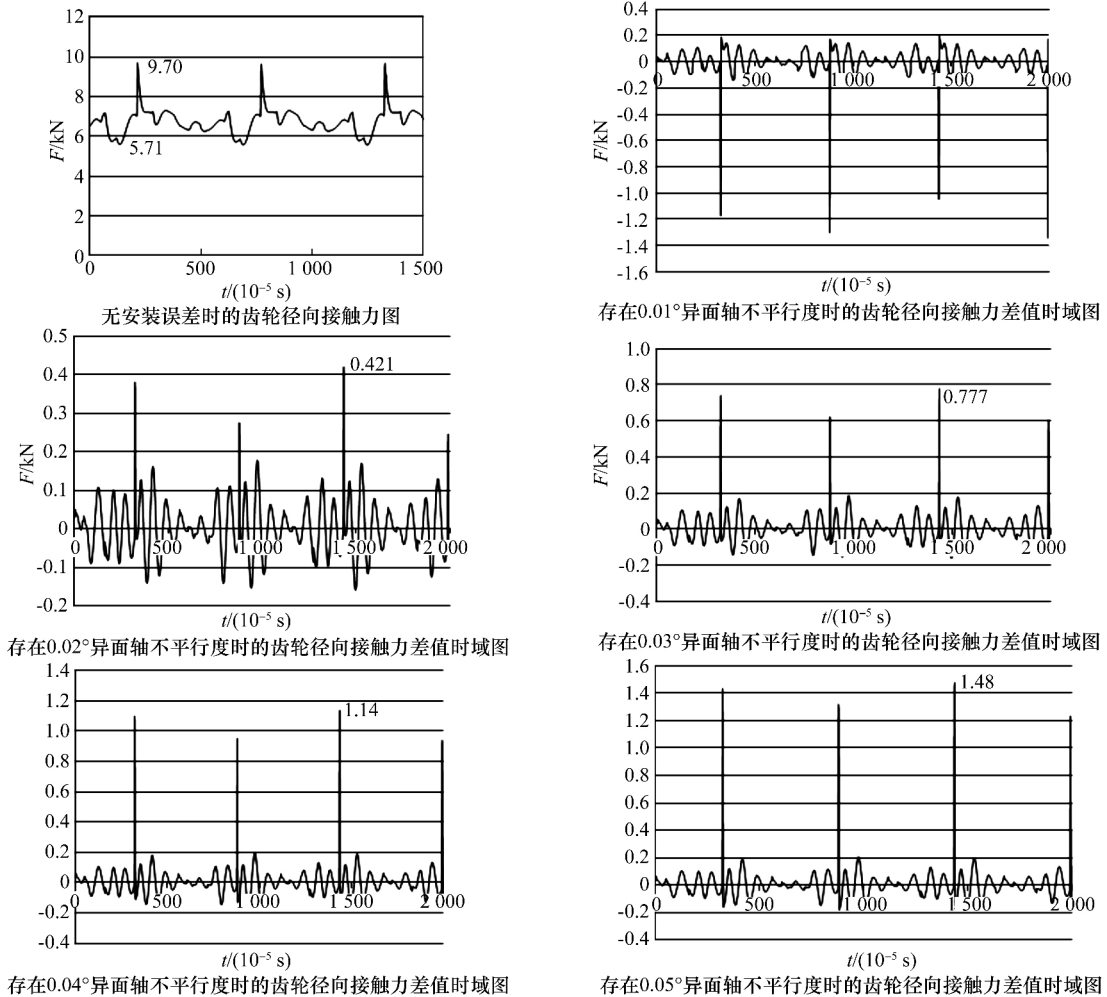


图4 异面轴不平行度对齿轮径向接触力冲击的对比分析
Fig.4 Analysis of Radial Contact Force Impact of Different-surface Shaft-nonparallelism on Gears

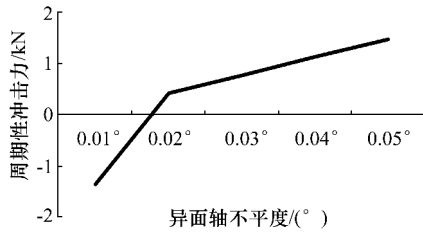


图5 异面轴不平行度与周期性冲击力

Fig.5 Different-surface Shaft-nonparallelism Vs. Periodic Force

同时,探究不同轴不平行度下振动加速度频谱的对比分析。

动力输出总成的主动轴与从动轴间存在同面或异面轴不平行度时,齿轮质心的振动加速度曲线傅里叶变换后的频谱图的分布发生了明显的变化,如图6、图7所示。同时轴平行度误差的存在使得频谱图中的峰值能量变大,并且随着轴不平行度的增加,峰值能量增加,如图8、图9所示。

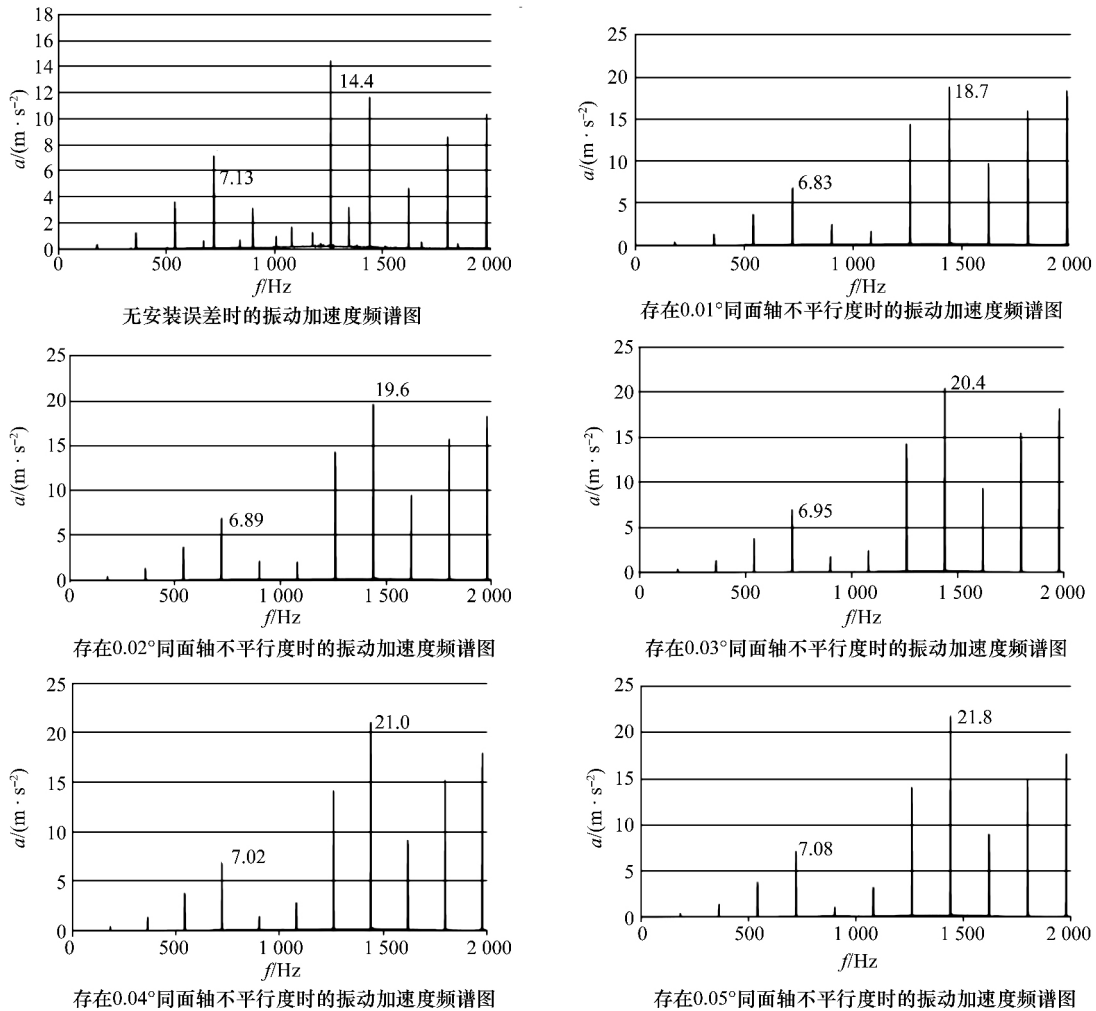
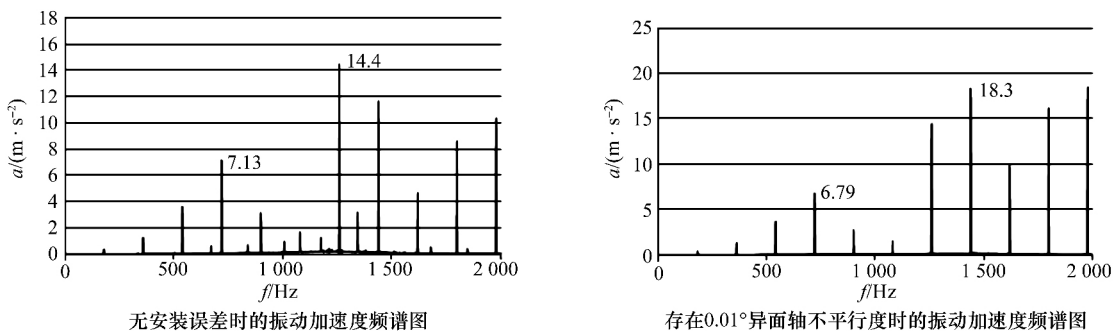


图6 不同同面轴不平行度的振动加速度频谱对比图

Fig.6 Vibration Acceleration Spectrums of Different Suprafacial Shaft-nonparallelism

综上所述,可以得出如下结论:当动力输出总成内的主动轴与从动轴间存在轴不平行度时,将加剧

齿轮的振动加速度,并给齿轮啮合过程带来周期性冲击。长期性的齿轮振动加速度加剧以及周期性振



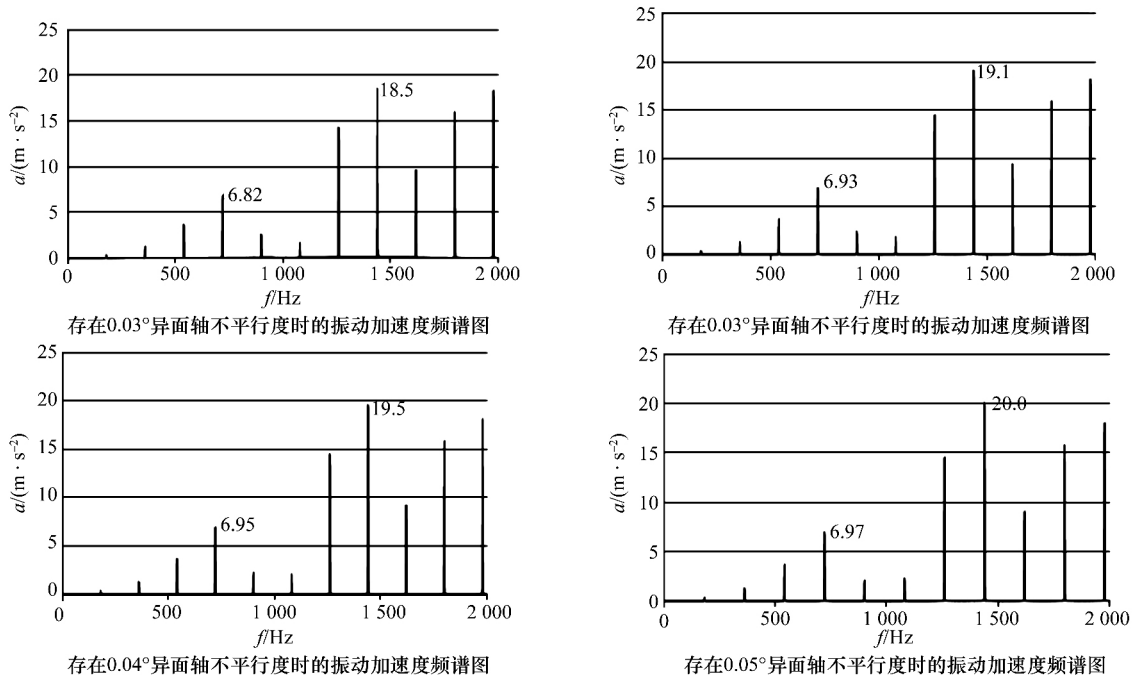


图7 不同异面轴不平行度的振动加速度频谱对比图
Fig.7 Vibration Acceleration Spectrums of Different Different-surface Shaft-nonparallelism

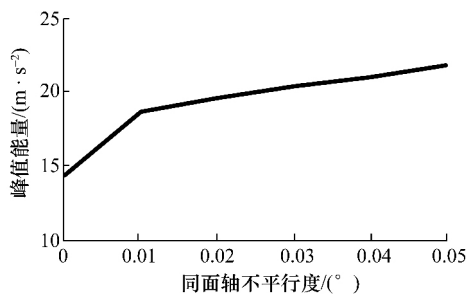


图8 同面轴不平行度与峰值能量
Fig.8 Suprafacial Shaft-nonparallelism Vs. Peak Energy

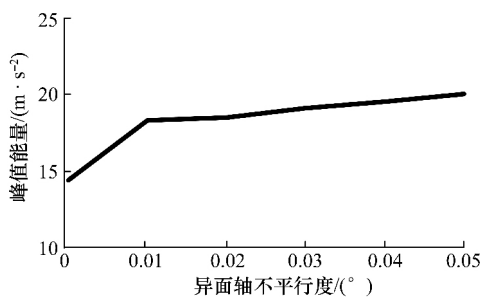


图9 异面轴不平行度与峰值能量
Fig.9 Non-coplanar Shaft-nonparallelism Vs. Peak Energy
动冲击,可能会导致齿面点蚀等失效形式,同时将影响系统运行的平稳性,这种不平稳可能是造成齿轮箱异常发声的重要原因之一。

3 动力输出总成系统的固有特性研究

3.1 总成系统固有特性计算结果

本研究在 MASTA 软件的 Dynamics(动态分析) 模块下,综合考虑各部件之间的耦合作用,获得整个动力输出总成传动系统的各阶固有频率及模态振型(本研究中的模态振型主要取前 6 阶)。

图 10 为齿轮传动系统的前 6 阶振型。表 1 为齿轮传动系统的前 20 阶固有频率。



图 10 动力输出总成前 6 阶模态振型示意图
Fig.10 First Six-order Vibration Modes of Assembly

3.2 轴承游隙大小对系统固有特性的影响分析

轴承游隙,指的是轴承尚未被装配时,固定内圈或外圈,使未被固定的外圈或内圈做轴向或径向的移动量。轴承工作运转时的游隙大小对轴承的疲劳寿命、温升、振动等性能有着重要影响。

本研究基于 MASTA 软件的动态分析模块,按照深沟球轴承的公差要求,对总成系统上输入轴及输出轴的深沟球轴承设置不同大小的游隙,分析研究轴承游隙对于系统振动响应的影响。

表1 动力输出总成前20阶固有频率
Tab.1 First 20-order Natural Frequencies of Assembly

阶数	传动系固有频率/Hz
1	1.70
2	81.03
3	82.32
4	216.67
5	515.69
6	529.42
7	550.37
8	575.50
9	674.40
10	683.30
11	723.05
12	784.35
13	1 026.39
14	1 045.74
15	1 417.52
16	1 483.32
17	1 488.20
18	1 510.38
19	1 837.90
20	1 886.79

对输出轴左轴承(6408深沟球轴承)施加游隙。经过分析可以发现:当轴承游隙在1~15 μm的时候,总成系统的4阶固有频率变化微小;当游隙在16 μm的时候,总成系统的4阶固有频率显著地下降(从216 Hz下降到167 Hz);游隙继续增大,4阶固有频率继续显著地下降,直到94 Hz。如图11所示。说明轴承游隙增大到16 μm以后,将使得总成系统达到共振状态的频率降低,系统的振动发响变大。

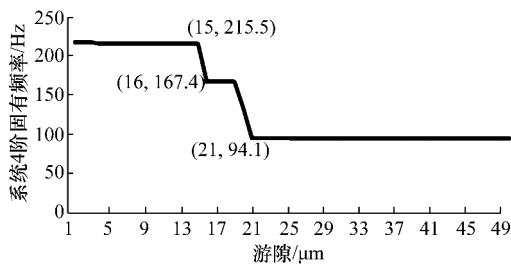


图11 输出轴左轴承(6408)游隙对系统固有频率f的影响
Fig.11 Effect of Left Bearing (6408) Clearance on f

对输出轴右轴承(6410深沟球轴承)施加游隙。经过分析可以发现:当轴承游隙在1~9 μm的时候,总成系统的4阶固有频率变化微小;当游隙在10 μm的时候,总成系统的4阶固有频率开始显著地下降(从217 Hz下降到206 Hz再到194 Hz);游隙继续增大,4阶固有频率继续显著地下降,如图12所示。说明轴承游隙增大到10 μm以后,将使得总成系统达到共振状态的频率降低,系统的振动发响变大。

通过以上结果分析,我们可以得到这样的结论:对于总成系统中的深沟球轴承来说,如果轴承游隙

过大,将会使得输出动力总成系统的4阶固有频率下降,使得总成系统的噪声发响变大。因此,要把深沟球轴承游隙控制在一个合理的范围内:6408深沟球轴承的游隙≤15 μm,6410深沟球轴承的游隙≤9 μm,才能使得总成系统的振动发响降低。

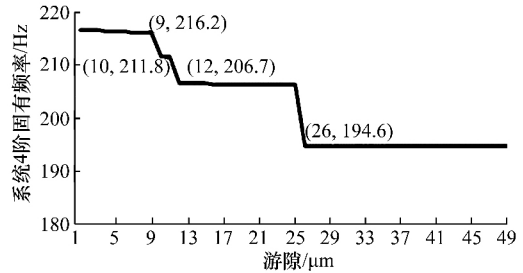


图12 输出轴右轴承(6410)游隙对系统固有频率f的影响
Fig.12 Effect of Right Bearing (6410) Clearance on f

3.3 轴承预紧力对系统固有特性的影响分析

滚动轴承在工作时如果存在较大间隙,将导致载荷分布不均匀,产生应力集中、加快轴承磨损等后果。滚动轴承的预紧,就是当把轴承调整到产生一定过盈量(负间隙)。预紧后轴承的滚动体与内外圈滚道接触处会产生一定弹性变形,使得接触面积变大,承载区逐渐扩大,各滚动体受力较均匀,抵抗变形的能力增大,寿命延长。但预紧过度,不但无法有效增加刚度,还会加大轴承的磨损和发热,同时影响系统的振动情况。

本研究对总成系统上输入轴及输出轴的深沟球轴承设置不同大小的轴向间隙预紧量,从物理因素分析研究轴承预紧力对于系统振动响应的影响。

对输出轴上的6408深沟球轴承施加预紧(其他3个轴承不加预紧),经过分析可以发现,对总成系统的4阶固有频率会有影响,但影响较小。每增加1 μm的轴承轴向间隙预紧,系统的振动频率大约会上升0.05 Hz。如图13所示。

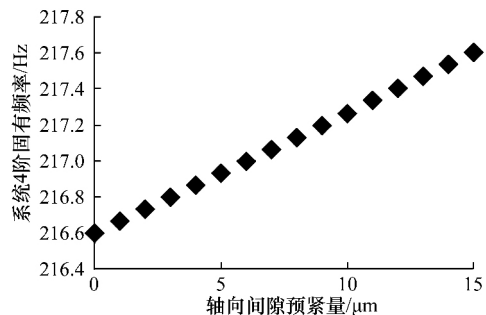


图13 输出轴左轴承(6408)轴向间隙预紧量对系统固有频率f的影响
Fig.13 Effect of Left Bearing (6408) Preload on f

对输出轴上的6410深沟球轴承施加预紧(其他3个轴承不加预紧),经过分析可以发现,对总成系统的4阶固有频率会有影响,但影响较小。每增加1 μm的轴承轴向间隙预紧,系统的振动频率大约会

上升 0.05 Hz。如图 14 所示。

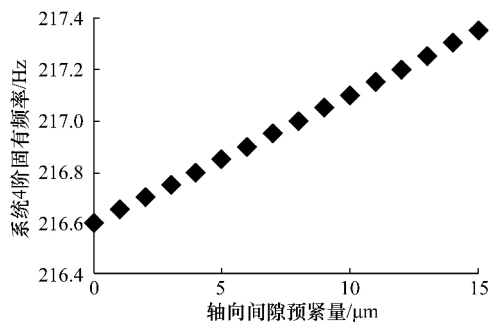


图 14 输出轴右轴承(6410)轴向间隙预紧量对系统固有频率 f 的影响

Fig. 14 Effect of Right Bearing (6410) Preload on f

通过图 13、图 14 的结果分析,我们可以得知:针对目前的动力输出总成系统上的 6408、6410 深沟球轴承,施加轴承预紧力,将会提高系统的四阶固有频率,但提高的程度并不显著,对于整个齿轮箱系统的振动频率影响不大,也就是说对于整个总成系统运行的振动情况影响不大。

4 结论

建立了某大功率轮式拖拉机后动力输出总成系统的动力学分析模型,通过分析计算获得了系统的模态振型和固有频率,并加入了箱体轴承孔轴不平行度及轴承游隙、轴承预紧力等因素,研究其对总成系统振动特性的影响。最后通过对总成系统的传动齿轮进行微观修形,优化总成系统的振动特性。最终得出以下结论:

- 1) 动力输出总成的主动轴与从动轴间存在轴不平行度(包括同面、异面)时,齿轮的振动加速度将会加剧。但随着轴不平行度的增加,齿轮振动加速度的振幅在减小。
- 2) 当动力输出总成内的主动轴与从动轴间存在

轴不平行度时,齿轮径向接触力差值曲线在时域上出现周期性峰值,给齿轮啮合过程带来周期性冲击,并且,随着轴不平行度的增加,周期性冲击在变大。长期性的齿轮振动加速度加剧以及周期性振动冲击,可能会导致齿面点蚀等失效形式,同时将影响系统运行的平稳性。

3) 对于总成系统中的深沟球轴承来说,如果轴承游隙过大,将会使得输出动力总成系统的 4 阶固有频率下降,使得总成系统的噪声发响变大。因此,要把深沟球轴承游隙控制在一个合理的范围内,才能使得总成系统的振动发响降低。

4) 对动力输出总成系统上的深沟球轴承施加预紧力时,随着预紧力的增加,对于动力输出总成系统的固有频率影响不大。

参考文献:

- [1] SAXENA A, CHOUKSEY M, PAREY A. Effect of mesh stiffness of healthy and cracked gear tooth on modal and frequency response characteristics of geared rotor system [J]. Mechanism & Machine Theory, 2017, 107: 261 - 273.
- [2] XIAO H, ZHOU X, LIU J, et al. Vibration transmission and energy dissipation through the gear-shaft-bearing-housing system subjected to impulse force on gear [J]. Measurement, 2017, 102: 64 - 79.
- [3] 何畅然, 贺敬良, 何渠. 基于 MASTA 的齿轮变速箱啸叫研究 [J]. 北京信息科技大学学报: 自然科学版, 2014(5): 87 - 91.
- [4] 赵腊月, 周广明, 杨阳, 等. 齿轮传动系统固有特性和动态响应分析 [J]. 车辆与动力技术, 2013(3): 26 - 30.

(编辑 姜洪君)

作者简介: 黄景山(1993 -), 福建省南安市人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械工程。

通信作者: 姚斌, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂曲面成形、智能制造装备技术。

(上接第 10 页)

整机技术先进, 这些整机总体设计特点使其在水田作业区域具有良好的适应性和使用性能。目前, 我国在水田中使用的轮式拖拉机以中功率段为主, 多以旱田作业为主的机型或者由水旱兼用型作业为主的机型通过局部改进而来, 这些改进后的机型对于水田作业的适应性和使用性较差。因此, 对我国轮式拖拉机水田地区使用情况与需求情况进行深入调研, 详细了解全国南北方水田的作业特点、地域特

点、水土特点、作物特点、农艺特点等, 深入探索水田轮式拖拉机的总体设计技术, 为下一步开发和改进能更加适应水田作业的机型是非常必要和有针对性的。

(编辑 刘红云)

作者简介: 李晨硕(1991 -), 男, 河南洛阳人, 研究方向为机械设计及及其自动化; 李继光(1963 -), 男, 河南洛阳人, 教授级高级工程师, 多年致力于拖拉机整机总体设计研究。

欢迎各企事业单位和个人洽谈业务、刊登广告!