

齿轮箱系统动力响应分析及其噪声预测

陈亮亮, 柴欢, 秦春节, 胡夏夏*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 齿轮箱系统的动力学特性对齿轮箱的工作性能、寿命、振动和噪声有着决定性的作用。为了更好地了解和掌握系统的动力学特性,首先采用ADAMS软件提取了齿轮副间的动态啮合力作为齿轮箱动力响应的激振源;再利用ANSYS Workbench软件对齿轮箱系统进行了谐响应分析,得到了动力响应曲线;最后对所得的动力响应曲线进行了1/3倍频处理以得到齿轮箱系统的噪声预估。仿真结果表明,采用该方法可获得较为理想的动力响应特性,可为齿轮箱设计改造、减小振动噪声提供参考依据。

关键词: 齿轮箱; 动力响应; ADAMS; ANSYS Workbench; 振动噪声

中图分类号: TH132.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)09-1039-03

Dynamic response analysis and noise prediction of gearbox

CHEN Liang-liang, CHAI Huan, QIN Chun-jie, HU Xia-xia

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The dynamic characteristics of the gearbox play important roles in working performance, lifetime, vibration and noise. In order to understand the dynamic characteristics of the gearbox, the dynamic force of a pair of teeth was extracted by ADAMS, which is regarded as a vibration source. Based on ANSYS Workbench, harmonic response of the gearbox was analyzed and the dynamic response curves were obtained. According to the dynamic response, noise was predicted through the method of one-third times frequency. Simulation results indicate that the method can get better dynamic characteristics, provide basis for gearbox design, reduction of vibration and noise.

Key words: gearbox; dynamic response; ADAMS; ANSYS Workbench; vibration and noise

0 引言

齿轮箱动力传动系统由齿轮副、传动轴、支撑轴承和箱体共同构成。各零部件结构及相互连接关系是一个复杂的弹性机械系统^[1]。齿轮箱作为机械传动零部件,具有传动比稳定、传动功率大、结构紧凑的优点,因此在各行各业中得到了广泛的应用。随着现代工业的发展,齿轮传动不断朝着高速、重载、大功率的方向发展,这必然带来更为严峻的齿轮箱振动和噪声问题。因此开展齿轮箱的动态特性研究有着重大实际意义^[2-5]。

本研究对齿轮箱进行动力学响应分析,得到动力响应曲线,并给出齿轮箱的噪声预估,为设计改造齿轮箱、减小振动噪声提供依据。

1 动态啮合力的仿真

在进行齿轮箱的动态响应分析之前,准确获得齿轮副的内部激励力是非常重要的。但由于齿轮传动受力过程复杂且难于测量,一直都是仿真中的难题。本研究首先利用ADAMS软件对齿轮箱的传动系统进行动力学分析,以确定齿轮箱在工作过程中的动态力,为以后齿轮箱动态响应分析以及结构噪声预测提供准确的激励源。

1.1 接触力定义及接触刚度系数

ADAMS对于接触力函数的定义有两种:其一为Impact函数;其二为Restitution函数。在这两种力的定义函数中,用的是最多的是前一种。Impact函数是利用阻尼系数和刚度系数来计算碰撞力的,其函数表达式为^[6]:

收稿日期: 2012-04-06

作者简介: 陈亮亮(1988-),男,江苏南通人,主要从事振动与噪声控制方面的研究. E-mail: tuhui96285@163.com

通信联系人: 胡夏夏,男,博士,教授,硕士生导师. E-mail: xxhu@zjut.edu.cn

$$Impact = \begin{cases} 0 & q \geq q_0 \\ K(q_0 - q)^e - C\left(\frac{dq}{dt}\right) & q < q_0 \end{cases} STEP(q, q_0 - d, 1, q_0, 0) \quad (1)$$

式中： q —两个接触物体的实际距离， dq/dt —两个物体随时间的变化率， q_0 —两个物体要接触的参考距离， K —刚度系数， e —碰撞指数， C —阻尼率， d —阻尼率达到最大所要经过的距离，用来防止碰撞过程中阻尼条件不连续。

参考文献[7]定义斜齿轮的接触刚度系数为：

$$K_{斜齿} = \frac{4}{3} R^{\frac{1}{2}} E^* = \frac{4}{3} \left[\frac{u d_1 \cos \alpha_t \tan \alpha_t}{2(1+u) \cos \beta_b} \right]^{\frac{1}{2}} E^* \quad (2)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1}{E_1} + \frac{1-\nu_2}{E_2}$$

式中： u —传动比， α_t —齿轮端面压力角， α_t' —端面啮合角， d_1 —齿轮分度圆直径， β_b —基圆螺旋角， E —弹性模量， ν —泊松比。

1.2 仿真参数的确定

建立齿轮对啮合动力学仿真模型：齿轮轴添加旋转驱动，为了模拟齿轮的启动过程，使得施加旋转转速时不出现突变，本研究采用STEP函数（是一个过渡函数，用来描述驱动的上升或下降、打开或关闭）使转速在0.02 s内由0增加到520 r/min（3 120 °/s），所施加的函数为STEP(time, 0, 0 d, 0.02, 3 120 d)（time为时间的自变量）；在输出轴上输出恒定负载转矩 $7.3 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$ ，与输出轴的转动方向相反。本研究在齿对之间添加Impact函数，参考文献[8]的做法设置齿对间的接触刚度系数 $K = 5 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ ；碰撞指数 $e = 1.5$ ；阻尼系数 $C = 35 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{mm}$ ；阻尼力过渡区间 $d_{\max} = 0.1 \text{ mm}$ 。接触中笔者考虑齿对间的摩擦力，静摩擦系数取0.08，动摩擦系数取0.06，静态阻力滑移速度取0.000 1 m/s，动态阻力转换速度取0.01 m/s。

齿轮初始启动的啮合力幅值较大，将其纳入齿轮稳态啮合力会在后期的分析中产生较大的误差。因此，本研究截取稳态下的啮合力。齿轮总啮合力时域曲线如图1所示。

2 齿轮箱的谐响应分析

尽管齿轮箱由于其安装误差和基节的偏差在实际工作过程中存在大量的瞬态冲击，但从整体宏观的传动过程看属于稳态的周期性过程，同时考虑到对结构噪声的预测需要从频率的角度来分析，因此谐响应分析成为本研究进行动态响应的首选。

2.1 谐响应分析基础

谐响应分析是用于确定线性结构在承受一个或

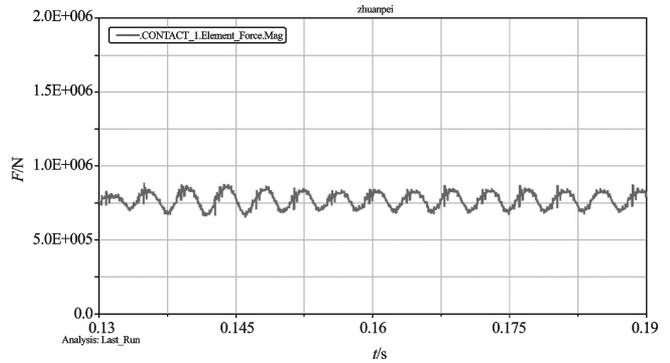


图1 齿轮总啮合力时域曲线

多个随时间按正弦（简谐）规律变化的载荷时稳态响应的一种技术。该分析的目的在于计算出结构在几种频率下的响应并得到一些响应值（通常是位移）对频率的曲线。本研究从该曲线上可以找到“峰值”响应，并进一步考察频率对应的应力。

对于谐响应分析，其控制方程为：

$$(-\omega^2[\mathbf{M}] + i\omega[\mathbf{C}] + [\mathbf{K}]) (\{\phi_1\} + i\{\phi_2\}) = (\{F_1\} + i\{F_2\}) \quad (3)$$

本研究假设刚度矩阵 $[\mathbf{K}]$ 、质量矩阵 $[\mathbf{M}]$ 是定值，要求材料是线弹性的、使用小位移理论（不包括非线性）、阻尼为 $[\mathbf{C}]$ 、激振力（简谐载荷）为 $[\mathbf{F}]$ 。

谐响应的求解方法共有3种：完全法，缩减法和模态叠加法。其中，完全法是一种最简单的方法，使用完全结构矩阵，允许非对称矩阵的计算，但是不能进行预应力的计算；而缩减法需要选择主自由度，根据主自由度得到结构近似的质量矩阵和阻尼矩阵；模态叠加法是基于模态分析的方法，是3种方法中计算最快的一种方法。而本研究采用最常用的完全法^[9]。

2.2 谐响应分析结果

本研究将前面ADAMS对齿轮啮合力仿真的结果作为谐响应分析施加的动态载荷。从图1可以看出：仿真所得到的激振力为随时间变化的载荷，而要作为谐响应的输入激振力，需将该激振力简化为单一频率影响下的载荷，因此本研究将图1仿真得到的时域啮合力曲线经傅里叶变换转化为如图2所示的频域响应载荷曲线，提取啮合力曲线的频域特征，以此作为激

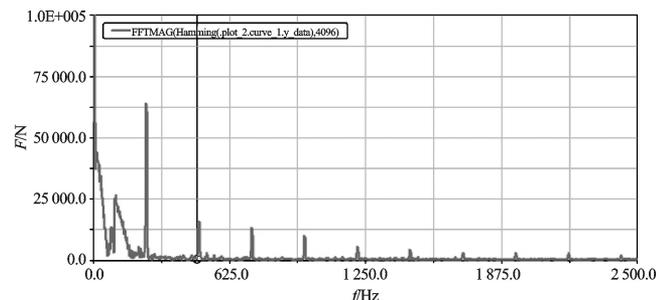


图2 齿轮总啮合力频域曲线

励载荷。

本研究对齿轮箱系统进行谐响应分析时采用完全法(Full),设置齿轮箱的激振频率范围为0~5 000 Hz,步长为12.5 Hz。所设置的激振频率包括了齿轮箱系统的前15阶固有频率,以及齿轮啮合频率的一倍频、二倍频和三倍频等等。在进行谐响应分析时,阻尼的影响很大,如果不定义阻尼,则在共振处的响应将无限大,本研究结合齿轮箱系统本身的特点定义系统响应的阻尼为不随频率变化的结构阻尼,阻尼比系数取0.04,选取齿轮箱上某点,得到加速度的频域响应曲线如图3所示。

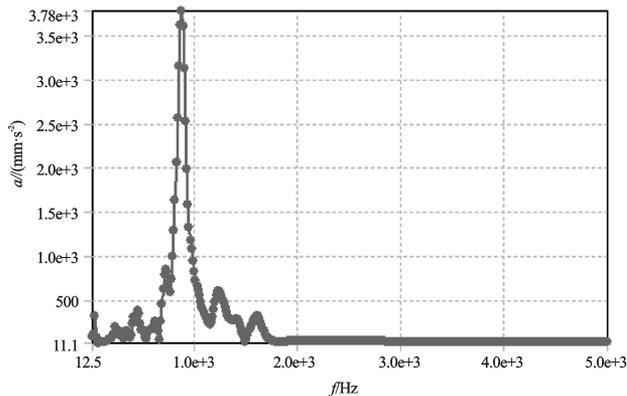


图3 节点z方向的加速度频域响应曲线

3 齿轮箱的结构噪声分析方法

齿轮箱运转噪声本质上属于冲击噪声,冲击噪声包括加速度噪声和自鸣噪声。所谓加速度噪声是指被撞击的物体产生瞬间加速度,从而在空气介质中产生速度势,产生声压。自鸣噪声则是冲击过后物体的自由衰减振动而产生的噪声^[10-12]。

本研究根据上述响应分析所得的结构加速度频域曲线图进行结构噪声的预测,所采用的方法是对上述某节点的加速度频域信号进行1/3倍频程的处理,得到该点加速度级1/3倍频程结构噪声值。

加速度级1/3倍频程结构噪声值定义为:

$$L_a = 10 \log \frac{a^2}{a_0^2} = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (4)$$

式中: L_a —加速度级1/3倍频程结构噪声, dB; a —以某一频率为中心频率的频率段的加速度有效值, m/s^2 ; a_0 —基准加速度, $a_0 = 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$ 。

齿轮箱箱体上某节点z方向的加速度级1/3倍频程如表1所示。

4 结束语

准确的激励是齿轮箱振动响应分析的前提。本研究将齿轮系统三维模型导入到ADAMS中建立了

表1 齿轮箱节点(z向)结构噪声值

频率 /Hz	噪声 /dB						
31.5	104.7	125	90.13	500	103.86	2 000	90.1
40	110.8	160	90.28	630	110	2 500	84.32
50	103.45	200	101.45	800	125.98	3 150	84.23
63	83.15	250	100.25	1 000	121.49	4 000	85.85
80	85.43	315	99.75	1 250	112.89	5 000	80.34
100	84.62	400	111	1 600	100		

齿轮传动系统的虚拟样机模型,并基于ADAMS进行了柔体动力学分析,得到了齿轮副间的动态啮合力,为下一步的谐响应分析打下坚实的基础。

本研究将齿对间的动态啮合力作为谐响应的激振源,利用ANSYS Workbench分析得到了齿轮箱的动力响应曲线,并利用1/3倍频数值方法进行了齿轮箱的噪声预测。

本研究将ADAMS和ANSYS Workbench进行联合仿真,可以较好地获得齿轮箱动态特性,为齿轮箱的振动与噪声控制及优化设计提供了依据。

参考文献(References):

- [1] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [2] 周立廷,李宏坤. 齿轮箱结构噪声预测[J]. 振动与噪声控制,2010,34(4):129-132.
- [3] 范江东. 齿轮箱箱体的有限元模态与试验模态分析[J]. 煤矿机械,2010,31(5):92-93.
- [4] WU Si-yan, ZUO M J, PAREY A. Simulation of spur gear dynamics and estimation of fault growth [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2008, 317(3-5): 608-624.
- [5] RAYNALD G. Nonlinear damping calculation in cylindrical gear dynamic modeling [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2012, 331(9): 2110-2118.
- [6] 刘广利. 单级斜齿轮减速器动态性能分析与优化研究 [D]. 兰州:兰州理工大学机械工程学院,2010.
- [7] 姚娟. 基于虚拟样机技术的减速器动力学仿真研究 [D]. 武汉:武汉理工大学机械工程学院,2008.
- [8] 李昌,韩兴,孙志礼. 基于Pro/E和ADAMS的齿轮啮合精确动力学仿真[J]. 机械与电子,2008(1):55-58.
- [9] 李范春. ANSYS Workbench设计建模与虚拟仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [10] 王旭东. 船用齿轮箱振动分析及结构噪声预估[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2005.
- [11] 魏协奔,郑文. 齿轮箱噪声测量及分析装置的设计[J]. 机电工程技术,2011,40(4):59-62.
- [12] 潘丁丁. 基于正交试验的间歇传动链动力学仿真研究[J]. 轻工机械,2011,29(1):36-39.

[编辑:张翔]