

# 齿面早期复合故障诊断\*

王彦刚<sup>1</sup>, 崔彦平<sup>2</sup>, 郑海起<sup>3</sup>

(1. 工程兵学院工程装备系 徐州, 221004) (2. 河北科技大学机械工程学院 石家庄, 050054)

(3. 军械工程学院火炮工程系 石家庄, 050003)

**摘要** 针对齿轮系统在复杂工况下轮齿表面早期复合故障难诊断的问题, 分析了轮齿齿面不同故障引起的瞬时传动误差变化的规律, 建立了含不同齿面故障的齿轮系统传动误差模型。根据齿轮系统传动误差信号的阶次特征, 采用改进陷波滤波的方法, 从传动误差信号中分离出轮齿故障引起的传动误差分量信号。经齿轮传动系统实验台实测传动误差信号实验验证, 结果证明: 传动误差信号信噪比高, 轻载变速工况下, 经陷波滤波分离的故障传动误差分量信号能够准确反映不同类型的齿面早期故障。

**关键词** 齿面故障; 传动误差; 陷波滤波; 早期故障

**中图分类号** TH132

## 引言

齿轮系统是机械系统的重要部件, 常在复杂结构复杂工况下运行, 当轮齿存在突起的点蚀故障或齿面磨损故障时, 都将导致啮合轮齿齿廓偏离理想的齿廓, 造成啮合过程中的冲击和局部齿面所承受的接触载荷增大。对于局部性的突起点蚀故障, 在突起部分参与啮合时, 由于其承载较大而导致强烈点蚀, 但局部突起部分点蚀的结果会使原来不参加啮合的其他表面也参与啮合, 因而使突起表面上接触应力下降, 局部点蚀现象也会逐步停止发展。而对于齿面磨损, 由于在啮合过程中会严重削弱齿轮接触强度, 从而引起齿面的进一步破坏, 最终导致严重的事故发生。从齿面故障的发展过程来看, 不同的齿面故障引起的后果也不相同, 及早地诊断和识别出轮齿齿面的不同故障, 对提高生产效率、防止事故发生具有重大意义。

传动误差是指齿轮系统在传动过程中, 理论位置与实际位置之间的误差值<sup>[1]</sup>。从其定义可知, 传动误差能够反映齿轮啮合过程中轮齿的齿廓凸、凹偏差引起的系统转角的偏差。因此, 笔者从齿轮系统传动误差模型出发, 分析不同的齿面故障引起的传动误差的变化, 进而在二级齿轮系统传动实验台上实验验证了该方法在诊断齿面早期复合故障中的

的实用性。

## 1 齿轮系统传动误差模型

定传动比渐开线齿轮系统的传动比是由齿轮系统的设计参数计算得到的, 而在实际的齿轮传动系统中, 由于齿轮系统各部件存在的加工误差使得齿轮系统并不能严格按照设计传动比进行定比传动。

### 1.1 单个齿轮的传动误差

单个齿轮的加工误差约占齿轮传动误差的 70% 以上, 主要是由齿轮的几何偏心、运动偏心、齿距极限误差和齿形误差产生的, 可用检测切向综合误差  $\Delta F'_i$  和一齿切向综合误差  $\Delta f'_i$  来评定。其计算公式<sup>[2]</sup>为

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2}(\Delta F'_i - \Delta f'_i) \sin\theta + \frac{1}{2}\Delta f'_i \sin\theta(z\theta) \quad (1)$$

其中:  $\Delta E_1$  为齿轮加工误差;  $\theta$  为齿轮相位转角;  $z$  为齿轮齿数;  $\frac{1}{2}(\Delta F'_i - \Delta f'_i) \sin\theta$  和  $\frac{1}{2}\Delta f'_i \sin\theta(z\theta)$  分别为齿轮固有加工误差中的长、短周期部分。

### 1.2 齿轮系统的传动误差模型

一对齿轮副的传动误差是齿轮副中两个齿轮

\* 国家自然科学基金资助项目(50775219)

收稿日期: 2011-08-24; 修改稿收到日期: 2011-10-17

$z_1, z_2$  传动误差的合成,在实际齿轮传动误差测试中,由于测量结果为角度误差,因此需要将式(1)求出的线值误差转换为角度误差,以输出齿轮为读数齿轮,则一对齿轮副的传动误差为

$$TE_1 = \frac{\Delta E_1}{r_1} \frac{r_1}{r_2} + \frac{\Delta E_2}{r_2} = \frac{\Delta E_1 + \Delta E_2}{r_2} \quad (2)$$

其中:  $TE_1$  为齿轮副角传动误差;  $\Delta E_1, \Delta E_2$  为主、从动轮传动误差;  $r_1, r_2$  为主、从动轮分度圆半径。

对于多级齿轮系统来说,其系统传动链的传动误差是将各齿轮副的传动误差叠加到从动齿轮上测量得到的。多级齿轮系统的传动链传动误差模型可表示为

$$TE = k \sum_{j=1}^n \frac{TE_j}{i_{j+1,n}} \quad (3)$$

其中:  $TE$  为系统传动链角传动误差;  $TE_j$  为第  $j$  个齿轮副角传动误差;  $i_{j+1,n}$  为第  $j$  个齿轮副到传动链末端的传动比;  $k$  为修正系数。

由于影响齿轮系统传动精度的各项误差都是随机变量,且相互独立,分别服从正态分布和差值分布,一般不会同时达到极限偏差,因此由齿轮设计参数得到的齿轮系统传动误差的幅值应进行统计计算修正。

## 2 齿面故障分类及其引起的传动误差

### 2.1 齿面故障分类

齿面故障通常按其成因分为齿面磨损、齿轮疲劳(点蚀、剥落)和齿面擦伤 3 大类故障<sup>[3]</sup>。现在的振动检测方法并不能区分这 3 种齿面故障,常需要结合油液分析进行诊断。笔者结合传动误差的特点,根据齿面故障偏离理论齿廓线的方向将齿面故障分为两类,即齿面凸故障和齿面凹故障。例如:齿面突起、胶合现象引起的齿面附着物等故障属于齿面凸故障;齿面磨损、齿面沿齿宽方向的横截面剥落及沟痕等属于齿面凹故障。

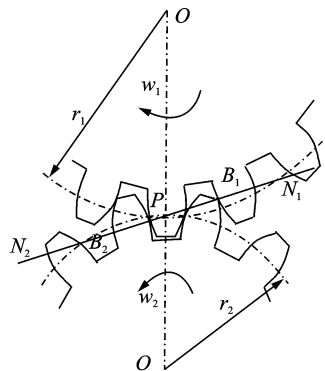
在轮齿啮合过程中,当轮齿齿廓面存在齿面凸故障和齿面凹故障时,实际轮廓线就会偏离轮齿的理论轮廓,引起齿轮副的啮合线偏离理论啮合线,从而导致齿轮副在故障齿处线外啮合,引起齿轮系统的瞬时传动比变化,使齿轮系统的瞬时传动误差增大。笔者以齿面磨损凹故障为例,对齿面故障引起的传动误差变化进行分析。

### 2.2 磨损齿啮合过程

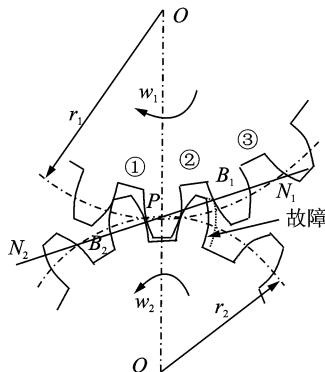
如图 1(a) 所示,一对理想齿轮啮合时,啮合齿

对由理论啮入点  $B_1$  进入啮合,啮合过程中齿对沿啮合线  $N_1N_2$  运行,最后到达理论啮出点  $B_2$  脱离啮合,传动过程中各齿对交替进行,保证系统的平稳运行。

如图 1(b) 所示,当从动轮存在齿面磨损时,其啮合过程经历 3 个阶段。第 1 阶段为故障齿对实际啮入前的线外啮合。由于故障齿对 2 在理论啮入点  $B_1$  不能进入啮合,导致其前一齿对 1 不能在理论啮出点脱离啮合,此时齿对 1 主动轮齿顶将沿从动轮齿根向齿腹刮行啮合,啮合线为主动轮齿顶圆,直至故障齿对 2 进入啮合。该阶段啮合特征表现为从动轮减速运行,传动比逐步增大,从动轮较理想啮合时滞后一定角度,滞后角度与齿面磨损量有关。第 2 阶段为故障齿对 2 实际啮合阶段。此时齿对 2 沿啮合线啮合,为正常啮合。第 3 阶段为故障齿对 2 提前啮出阶段。由于在第 1 阶段从动轮滞后一定角度,在故障齿对 2 未到达理论啮出点时,其后一齿对 3 的从动轮齿顶将提前进入啮合,啮合过程为从动轮齿顶沿主动轮齿腹向齿根刮行,啮合线为从动轮齿顶圆,直至故障齿对 3 进入正常啮合。该阶段啮合特征表现为从动轮加速运行,传动比由开始时忽然降低后逐步增大,从动轮由之前的滞后一定角度恢复到正常。



(a) 正常齿轮啮合示意图



(b) 故障齿轮啮合示意图

图 1 齿轮啮合示意图

### 2.3 磨损齿啮合时的瞬时传动误差

由传动误差的定义“从动齿轮的理论位置与实际位置之间的误差值”<sup>[1]</sup>,一对齿轮副中主动轮为驱动轮,则主动轮的转动量为理论输入位置,从动轮的转动量为实际输出位置。计算磨损齿对啮合时主动轮与从动轮的转动量就可求出故障齿对的瞬时传动误差。

图 2 所示为线外啮合分析得到的故障齿轮副的啮合线示意图,曲线  $CB_1B_2D$  为故障齿对啮合曲线,  $CB_1$  线段为从动轮的节圆线段,  $CB_1$  线段为主动轮的节圆线段。由齿轮副啮合的几何关系,计算在故障齿对啮合过程中,啮合点  $B$  从啮合曲线上  $C$  点啮合到  $D$  点过程中主、从动轮分别转过的角度,即可求出故障齿对的瞬时传动误差。

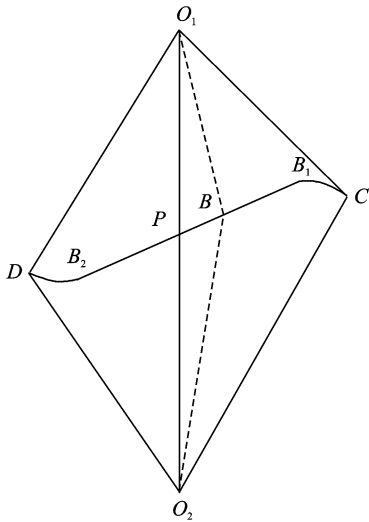


图 2 故障齿轮啮合线示意图

按照传动误差曲线值符号的规定:如果从动轮超前,则其产生的传动误差为正,如果从动轮滞后,则其产生的传动误差为负。即齿面凸故障时传动误差为正值,齿面凹故障时传动误差为负值。可得磨损凹故障齿对啮合过程的传动误差

$$\begin{cases} TE = \theta_2 - \frac{\theta_1}{i} \\ \theta_1 = \theta_{CO_1B} - \alpha_{1B} \\ \theta_2 = \theta_{CO_2B} - \alpha_{2B} \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $TE$  表示系统传动链角传动误差;  $i$  表示齿轮副的传动比;  $\theta_1, \theta_2$  表示主、从动轮转过的角度;  $\alpha_{1B}, \alpha_{2B}$  表示在  $B$  点时主、从动轮啮合轮齿的展角。

### 2.4 磨损齿传动误差故障模型

由于齿轮副传动为单双齿交替啮合,因此由式

(4)计算的反映磨损齿轮对的瞬时传动误差的变化只发生在故障齿对应的理论啮合区域。以二级齿轮传动系统实验台参数中的  $z_3, z_4$  齿轮对为例,设  $z_4$  单齿齿面含磨损故障,考虑齿轮副啮重合度,为计算方便,假设齿面磨损足够大,使故障齿啮合过程从第 1 阶段直接过渡到第 3 阶段,经仿真计算得故障齿对啮合的瞬时传动误差如图 3 所示。当磨损故障程度不大,不足以使故障齿啮合过程从第 1 阶段直接过渡到第 3 阶段,即啮合过程含第 2 阶段时,其瞬时传动误差图形为图 3 中所示尖峰脉冲信号的削顶脉冲信号,其脉冲幅值与磨损故障程度有关。

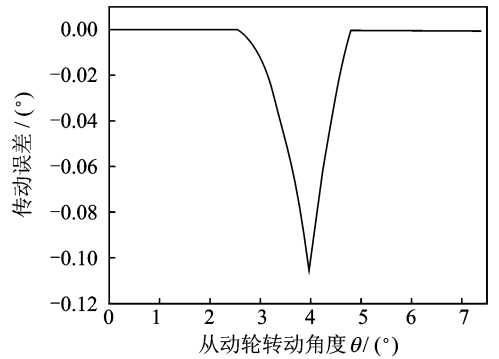


图 3 故障齿对啮合过程的瞬时传动误差曲线

由图 3 反映的故障齿对啮合的瞬时传动误差曲线特征,可用式(5)来简化表示故障齿对引起的瞬时传动误差项

$$TE_f = \begin{cases} a \frac{\theta_s^2}{n^2} & 0 \leq \theta_s \leq n \\ a \frac{(2n - \theta_s)^2}{n^2} & n < \theta_s \leq 2n \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $a$  为齿面磨损程度;  $\theta_s$  为故障齿对理论单齿啮合的转动角度。

### 2.5 不同齿面故障的传动误差特征

由齿面磨损故障分析可知,齿面凹故障引起的齿轮系统传动误差如图 3 和式(5)所示,其特征为:在故障齿啮合传动过程中,齿面凹故障会引起被动轮转角相对于主动轮产生滞后、修正的变化过程,其传动误差定义为负的冲击信号。对于齿面凸故障,其啮合过程与齿面凹故障啮合过程相反,在啮合过程中由于齿面的突起会导致主、从动轮先提前进入啮合再滞后脱离啮合的过程。其特征为:在故障齿啮合传动过程中,齿面凸故障会引起被动轮转角相对于主动轮产生超前、修正的变化过程,其传动误差定义为正的冲击信号,其故障齿对传动误差模型仍采用式(5),符号与齿面凹故障模型取反。

### 3 陷波滤波方法

通过对齿轮系统传动误差及齿面凸、凹故障的分析,可知存在齿面故障时,齿轮系统的传动误差信号可表示为谐波信号(正常传动误差)与脉冲信号(故障传动误差)的加性信号。含齿面故障的单级齿轮传动系统的传动误差仿真信号如图4所示。

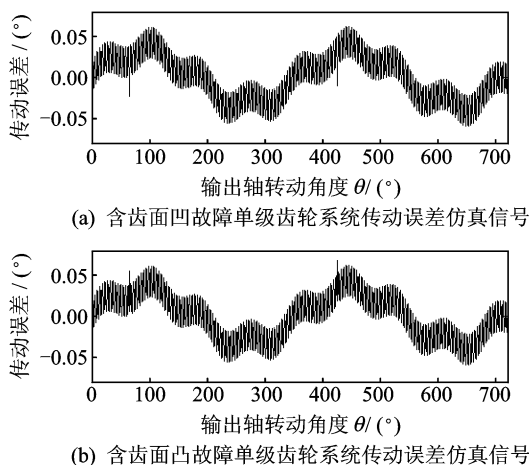


图4 含齿面故障的单级齿轮系统传动误差仿真信号

分析图中所示含齿面故障的单级齿轮系统传动误差仿真信号,由于齿面故障引起的脉冲故障信号叠加在正常系统的传动误差信号上,引起传动误差信号在故障处峰值的突变。突变点称为奇异点,因此含有奇异点的含齿面故障的单级齿轮系统传动误差信号是奇异信号,同平稳信号相比,奇异信号包含了更为丰富的故障信息。因此如何由系统的奇异传动误差信号得到故障引起的传动误差信号,是采用传动误差信号诊断齿轮故障的关键。

数字陷波滤波方法<sup>[4-5]</sup>是采用数值方法将信号中的某一特定频率成份完全剔除,而对其他频率成份影响较小的一种滤波方法。分析齿面故障仿真信号的传动误差阶次谱图如图5所示。含齿面故障单级齿轮系统传动误差仿真信号阶次谱图中所反映的阶次分量主要为正常齿轮系统传动误差仿真信号的长周期和短周期误差的谐波分量,由于长周期和短周期误差谐波分量是以齿轮轴回转周期为周期的信号,在阶次域中阶次谱稳定,因此可以采用陷波滤波的方法,按齿轮系统不同部件的特征阶次,对传动误差信号进行分解,得到不同部件的分解信号,剩余信号即为故障信号。

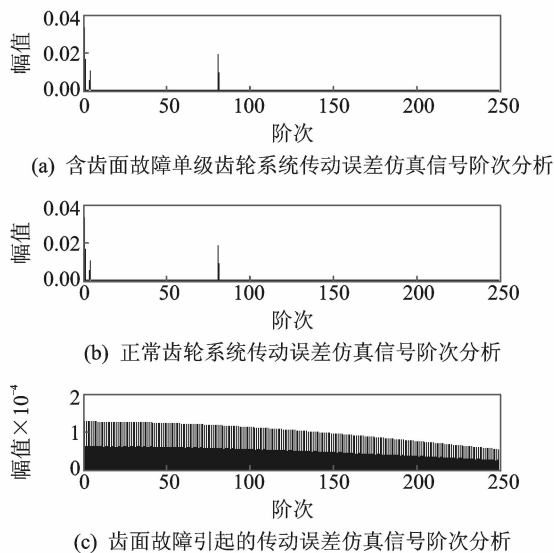


图5 齿面故障仿真信号阶次分析

### 4 诊断实例

在二级齿轮传动系统实验台上进行了试验验证,图6为传动结构框图,齿轮参数如表1所示。

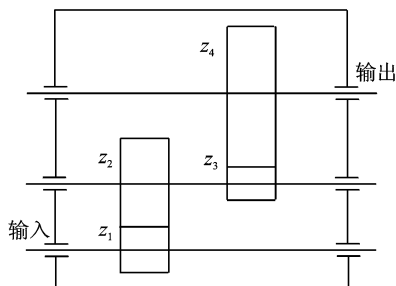


图6 二级齿轮传动示意框图

表1 齿轮系统实验台参数

参数	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$
齿数 $n$	25	50	19	81
模数 $m$	2	2	2.5	2.5

该实验台为二级齿轮传动,由电机带动输入轴,输出轴带动负载。在中间轴50齿齿轮的一个轮齿一侧用铁锤磕碰出一个微小突起,模拟齿面凸故障;在输出轴81齿齿轮的一个轮齿上用砂纸进行轻微打磨,模拟齿轮早期磨损凹故障。输入轴转速取200~800 r/min,采用在齿轮系统输入和输出端安装的角度编码器测量系统的传动误差。图7为实验台实测的转速信号、传动误差信号及传动误差信号的阶次谱图。

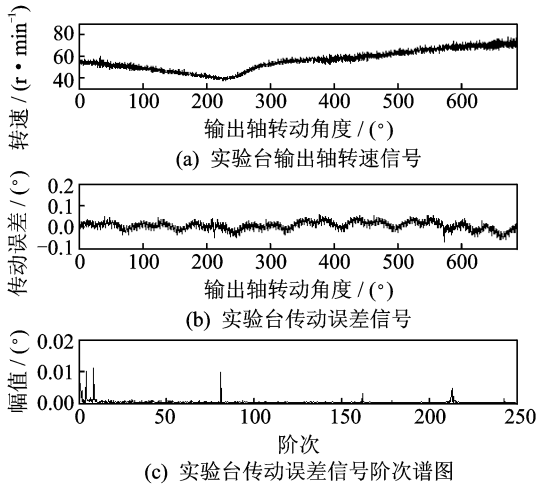


图 7 实验台实测信号

由图可知,在转速激烈变化的工况下,实验台传动误差信号在 0 值附近周期波动,其阶次谱图谱线单一,较明显的谱线分别为输入轴、中间轴、输出轴长周期误差阶次谱线及两对啮合齿轮对的短周期误差阶次谱线,与理论分析较为一致,可以认为实测齿轮系统中各部件的传动误差信号为谐波信号。因此,可采用陷波滤波方法对系统传动误差信号进行滤波分解,滤除齿轮系统的长、短周期误差分量后的剩余信号即为故障引起的传动误差信号,如图 8 所示。

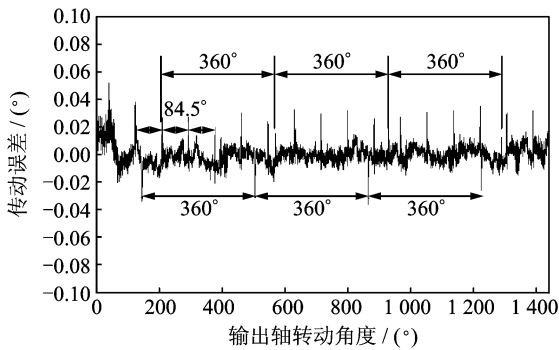


图 8 齿面故障引起的传动误差分量信号

从图 8 中可以明显看出实验中设置的齿面凸、凹故障。如图中所示,在 0 轴线下,指向负方向的脉冲信号为凹故障,其周期为 360°,为输出轴 81 齿齿轮上的模拟磨损凹故障;在 0 轴线上,指向正方向的脉冲信号为凸故障,谱线中周期为 84.5°的脉冲信号为中间轴 50 齿齿轮的齿面突起凸故障。从图中可以看出,除上述两种预设故障信号外,另有周期为 360°的周期脉冲信号。从其周期分析,应为输出轴 81 齿齿轮上的突起凸故障,该凸故障与 81 齿齿轮的齿面磨损凹故障相差相位为 65.8°,约为 15 个齿。经拆机检验,与 81 齿齿轮的预设磨损凹故障

相差 15 个齿的齿面一侧有轻微的突起,该突起应为由在安装过程中的磕碰引起的。

### 5 结 论

- 1) 在分析变速工况齿轮传动系统时,采用角度编码器测量的系统传动误差能够实现按角度测量信号,准确反映齿轮不同位置的齿形故障。
- 2) 陷波滤波方法能够有效提取系统中存在的齿面故障引起的传动误差。
- 3) 传动误差的定义计算方法能够实现对齿面凸、凹故障的判别。

### 参 考 文 献

[1] 张承瑞. 机床传动链误差实时建模与补偿控制研究[D]. 济南:山东工业大学,1995.

[2] 陈文华,朱海峰,樊晓燕. 齿轮传动误差的蒙特卡洛模拟分析[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):435-437. Chen Wenhua, Zhu Haifeng, Fan Xiaoyan. Monte-carlo simulation analysis of transmission error for gear drive systems[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 435-437. (in Chinese)

[3] 熊军,李凤英,沈玉娣. 齿轮诊断技术应用综述[J]. 机床与液压,2005(12):12-15. Xiong Jun, Li Fengying, Shen Yudi. Summarization of the application of gear fault diagnosis technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(12): 12-15. (in Chinese)

[4] 丁艳,谢松云,程西娜. 一种改进的基于陷波器的脑电消噪方法研究[J]. 计算机仿真,2010(2):312-315. Ding Yan, Xie Songyun, Cheng Xina. An improved research method of de-noising EEG signal based on notch filter[J]. Computer Simulation, 2010(2): 312-315. (in Chinese)

[5] 楚子林,伍丰林. 传动系统速度实际值信号的陷波滤波器及其仿真研究[J]. 电气传动,2008(8):14-16. Chu Zilin, Wu Fenglin. Simulation study on band stop filter of speed actual value of drive system[J]. Electric Drive, 2008(8): 14-16. (in Chinese)



**第一作者简介:**王彦刚,男,1976 年 4 月生,博士研究生、讲师。主要研究方向为故障诊断,测控系统与智能传感器。曾发表《时空坐标转换方法的增量式实现与增量式时栅位移传感器研究》(《中国机械工程》2007 年第 18 卷第 4 期)等论文。E-mail: cqdxyangang@163.com