

文章编号 1004-924X(2016)06-1335-10

安装距可调的锥齿轮副传动误差测量

汤洁*, 王冰鹤, 石照耀

(北京工业大学北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 由于在齿轮副的最佳啮合位置处测量齿轮副的单面啮合可精确得到锥齿轮副的传动误差, 本文研究了锥齿轮副最佳安装距的调整方法, 并开发了相应的传动误差测控软件。介绍了在最佳安装距位置对锥齿轮副进行单面啮合测量的原理, 描述了通过传动误差分析、频谱分析和精度等级评定对传动误差进行评定的方法。利用统计过程控制(SPC)法对锥齿轮副的切向综合总偏差和一齿切向综合偏差进行了工艺评定和过程监控。然后, 设计了基于最佳安装距的锥齿轮副传动误差测控软件, 完成了对传动误差的实时采集、数据处理和曲线显示, 最佳安装距的寻优调整以及测量结果的SPC统计分析。给出了测控软件的类图、顺序图、测试用例和软件界面。最后, 实验测量了一对齿轮副在安装距寻优调整前后的传动误差。结果显示, 提出的方法和传动误差测控软件可应用于锥齿轮副或面齿轮副的测量。

关键词: 锥齿轮副; 传动误差; 单面啮合; 安装距; 统计过程控制(SPC); 测控软件

中图分类号: TH132.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1335

Transmission error measurement of bevel gear pair under mounting distance adjustment

TANG Jie*, WANG Bing-he, SHI Zhao-yao

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology & Instrument,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

* Corresponding author, E-mail: tangjie@bjut.ed.cn

Abstract: The transmission error of a bevel gear pair can be obtained when its single flank engagement is measured at the best mounting position. This paper explores an algorithm for adjustment of the best mounting distance of the bevel gear pair and develops a measuring and control software of the transmission error. The measuring principle of the single flank engagement of bevel gear pair based on the best mounting position was introduced and the evaluation method for the transmission error was described based on the transmission error analysis, frequency spectrum analysis and precision grade evaluations. Statistical Process Control (SPC) is used to evaluate and monitor the computation process of tangential composite error and the tooth to tooth tangential composite error. Then the measurement and control software was developed based on the best mounting position to implement data acquisition and processing, graphic display, the optimizing search of best mounting position and SPC statistical analysis. The class diagram, sequence diagram, test case diagram and the main interface of the soft-

收稿日期: 2016-02-13; 修订日期: 2016-04-07.

基金项目: 国家重大仪器设备开发专项资助项目“齿轮传动形性测试仪的开发和应用(No. 2013YQ590395)”。

ware were designed. Finally, the transmission errors of a gear pair before and after optimizing search of best mounting position were measured and the different transmission errors of a gear pair at different mounting positions were given. Experiment results show that the method and software mentioned in this paper is suitable for the measurement of bevel gear pairs or face gear pairs.

Key words: Bevel gear pair; Transmission Error; single flank engagement; Mounting Distance; Statistical Process Control (SPC); Measurement and Control Software

1 引言

锥齿轮传动因其传动效率高,传动比稳定,承载能力高、传动平稳等优点被广泛应用于航空、航天、汽车及机床等领域^[1]。

传动误差是衡量齿轮副传动质量的重要指标,是用来评价传动平稳性的参数,齿轮的振动、噪声与传动平稳性相关。测量锥齿轮副的传动误差或振动、噪声可以对锥齿轮副的传动质量进行定量评价^[2-4]。标准 GB11365-89^[5]和 DIN3965-1986^[6]中都针对锥齿轮副的传动误差给出了相应的定义和精度等级评定方法。

文献[7]指出,在安装一对锥齿轮副时,通常需要调节两个参数:①调节小轮安装距来调整接触区位置;②调节大轮安装距以保证侧隙。在最佳啮合位置安装锥齿轮副,锥齿轮副具有最佳传动质量,其传动误差或振动噪声具有最佳测量结果。

国内外学者对锥齿轮副的传动误差测量和振动、噪声检测进行了大量研究。重庆大学研究开发了锥齿轮传动质量智能检测系统^[8-9],研究分析了切齿参数和安装调整参数变化对锥齿轮运动误差曲线的影响及锥齿轮噪声产生的影响;中南大学研究开发了螺旋锥齿轮数控检验机^[10-11],实现了锥齿轮的单面啮合检测、结构噪声检测、自动搜索最佳啮合点等功能。美国 Gleason 公司的 600HTT 锥齿轮滚动检查机和德国 Klingelnberg 的 T60 螺旋锥齿轮检查机已实现锥齿轮副单面啮合测量、振动噪声检测以及最佳安装距的功能^[12-13],而国内还没有基于最佳安装距的锥齿轮副传动误差测量方面的研究。本文主要研究了锥齿轮副测量中的最佳安装距调整方法以及传动误差测控软件开发。通过实验给出了一对齿轮副在安装距寻优调整前后传动误差的测量结果。证明本文方法和传动误差测控软件可被用于锥齿轮副或面齿轮副的测量。

2 系统测量原理

传动误差为输出端齿轮实际位置与理论位置的角度之差^[14-15]。理想的齿轮副传动是共扼的,即输入端齿轮与输出端齿轮按固定传动比 Z_1/Z_2 连续平稳传动。当输入轴转过角位移为 θ_1 时,理论上,输出轴转过的角位移为 θ_2 。则按照传动比可以计算出输出端齿轮理想角位移为:

$$\theta_2' = \frac{Z_1}{Z_2} \theta_1, \quad (1)$$

其中: Z_1, Z_2 分别为输入端和输出端齿轮的齿数; θ_1 为输入端实际角位移; θ_2 为输出端理论角位移; θ_2' 为输出端实际角位移。

但实际上由于多种因素的影响,齿轮副通常不能按此规律传动,因此出现了传动误差。根据传动误差的定义以及锥齿轮副的特点,锥齿轮副传动误差的测量原理如图 1 所示,输入端为主动轮,输出端为从动轮。当主动轮转过某一角度时,从动轮转过角度与理想位置角度之差。可表示为:

$$TE_0 = \theta_2 - \theta_2' = \theta_2 - \frac{Z_1}{Z_2} \theta_1 = \theta_2 - \frac{\theta_1}{I}, \quad (2)$$

其中: TE_0 为传动误差; I 为输入端与输出端之间的理论传动比。

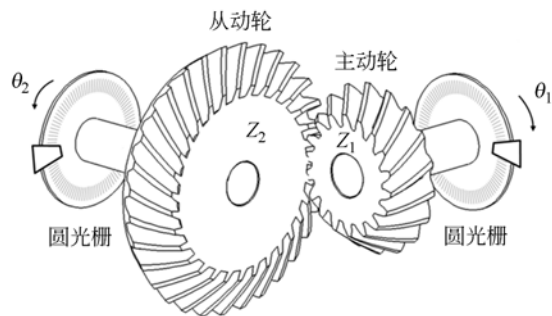


图 1 锥齿轮副单面啮合测量原理

Fig. 1 Single flank measurement principle of bevel gear pair

2.1 最佳安装距调整方法

2.1.1 质量因数

对得到的传动误差信号或振动信号进行快速傅里叶变换^[17],得到信号的前三次啮合谐波幅值来计算该安装距下齿轮副传动的质量因数 F 。质量因数 F 最小的位置处的安装距即为锥齿轮副的最佳安装距。质量因数为:

$$F = (H_1/T_1) \times Q_1 + (H_2/T_2) \times Q_2 + (H_3/T_3) \times Q_3, \quad (3)$$

其中: H_1 、 H_2 、 H_3 分别表示一次、二次、三次谐波幅值,单位为 μm ; T_1 、 T_2 、 T_3 分别表示一次、二次、三次谐波的谐波公差值,单位为 μm ; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别表示一次、二次、三次谐波的影响因子。

2.1.2 安装距寻优流程

为确定锥齿轮副的最佳安装距,需进行安装距的搜索式查找。寻优流程如图 2 所示。首先在理论安装距位置安装锥齿轮副,然后设置安装距查找的点数及步距,开始安装距的寻优调整,从中点(理论安装距位置)开始,逐点进行传动误差测量或振动测试,通过圆光栅获取锥齿轮副在该位置的传动误差信号、或通过加速度传感器获得振动信号。在寻优调整中,若小轮安装距减小 ΔH ,为保持侧隙不变,调整大轮安装距增大 $\Delta H \cdot \text{tg} \delta_1$, δ_1 为小轮的分度圆锥角。安装距查找的点顺序如图 3 所示,正负方向上交替进行。

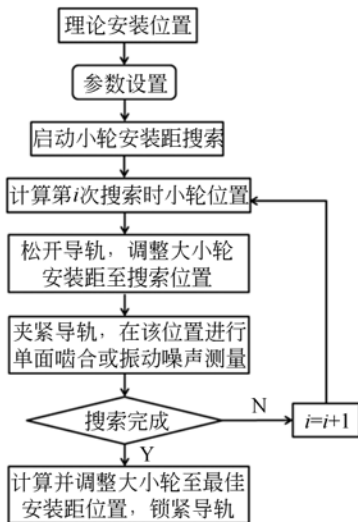


图 2 安装距寻优流程

Fig. 2 Searching process of mounting distance

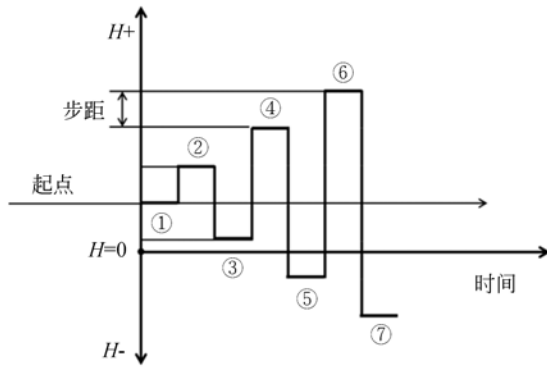


图 3 安装距查找位置顺序

Fig. 3 Sequence of position searching

2.2 传动误差评定方法

2.2.1 传动误差分析

根据 GB11365-89 标准^[5],可以从锥齿轮副传动误差曲线上分离出 4 项单项偏差^[18-19],如图 4 所示,分别为齿轮副切向综合总偏差 F'_{is} 、齿轮副一齿切向综合偏差 f'_{is} 、齿轮副工作累积齿距偏差 F_p 、齿轮副工作单个齿距偏差 f_{pt} 。

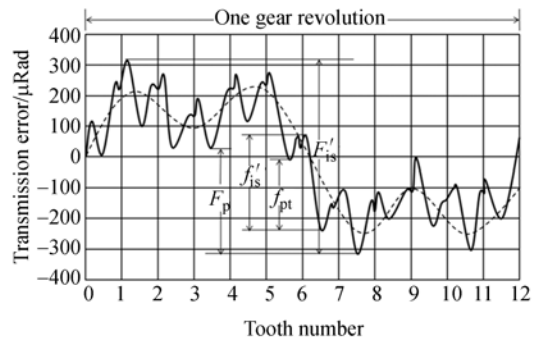


图 4 传动误差曲线

Fig. 4 Transmission error curve

齿轮副切向综合总偏差 F'_{is} 是传动误差曲线最高点与最低点间的距离,也就是单面啮合测量结果的最大值减去最小值所得结果,见式(4):

$$F'_{is} = \text{Max}(\varphi[i]) - \text{Min}(\varphi[i]), i=1, \dots, N, \quad (4)$$

其中: N 为采样点数; $\varphi[i]$ 为第 i 个采样点的传动误差采样值,单位为 μm 。

齿轮副一齿切向综合偏差 f'_{is} 是指一个啮合区间内的传动误差的最大值与最小值的差值:

$$f'_{is} = \text{Max}(\varphi[k]), i=1, \dots, N, (\mu\text{m}), \quad (5)$$

$$\varphi[k] = \text{Max}(\varphi[k_i]) - \text{Min}(\varphi[k_i])$$

其中: $\varphi[k]$ 为第 k 个啮合区间的圆周位移变动量,

单位为 μm 。

齿轮副工作累积齿距偏差 F_p 是将每个齿距角内的中点幅值构成一个数组,此数组的最大值与最小值之差就是齿距累积偏差:

$$F_p = \text{Max}(\varphi[m]) - \text{Min}(\varphi[m]), m=1, \dots, Z, \quad (6)$$

其中: $\varphi[m]$ 为每个齿距角的中点误差采样值,单位为 μm 。

齿轮副工作单个齿距偏差 f_{p1} 的计算是基于计算累积齿距偏差所得到的数组,将此数组各相邻数值相减并求绝对值,可以得到新的数组,此数组的最大值就是所求的单个齿距偏差:

$$f_{p1} = \text{Max}(\varphi[n]) - \text{Min}(\varphi[n]), m=1, \dots, Z-1, \quad (7)$$

2.2.2 频谱分析

测量得到传动误差曲线后,通过快速傅里叶变换得到传动误差的频谱图,频谱图可以揭示出一些时域图中不明显的特征,如毛刺信息等高频成分^[20]。在对传动误差进行频谱分析时,为方便读取齿轮空间上的信息,假设大轮齿数为 Z ,大轮旋转一周采样点数为 N 。将傅里叶变换的采样频率设定为 N ,可以更容易地读取到齿轮副的转频和啮频信息。例如图 5 所示的传动误差频谱图中,大轮的转频谐波在 1 Hz 处,一次、二次、三次啮合谐波分别在 35 Hz、70 Hz、105 Hz 处,便于在进行安装距寻优时确定在转频和啮频处的各次谐波幅值。

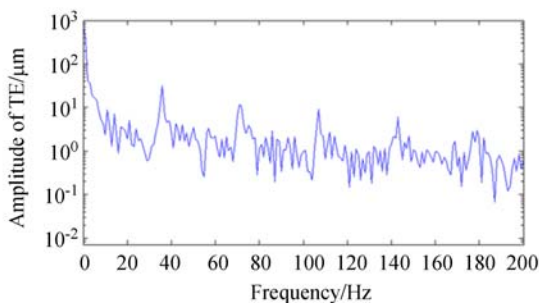


图 5 传动误差频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum of transmission error

2.2.3 精度等级评定

锥齿轮副的精度等级评定方法与单个齿轮的评定方法不同,中华人民共和国国家标准《锥齿

和准双曲面齿轮 精度》GB11365-89 和德国标准《锥齿轮公差》DIN3965-1986 中都针对锥齿轮副给出了精度等级评定的公差表与计算式。

(1) GB11365-89

根据 GB11365-89 给出的公差计算式,小轮和大轮的公差按单个齿轮的公差按式(8)~(11)计算:

$$F_{i1}' = F_{p1} + 1.15 f_{c1}, \quad (8)$$

$$F_{i2}' = F_{p2} + 1.15 f_{c2}, \quad (9)$$

$$f_{i1}' = 0.8(f_{p1} + 1.15 f_{c1}), \quad (10)$$

$$f_{i2}' = 0.8(f_{p2} + 1.15 f_{c2}), \quad (11)$$

其中: F_{i1}' , F_{i2}' 分别为小轮和大轮的切向综合公差,单位为 μm ; f_{i1}' , f_{i2}' 分别为小轮和大轮的一齿切向综合公差,单位为 μm ; F_{p1} , F_{p2} 分别为小轮和大轮的齿距累积公差,单位为 μm ; f_{p1} , f_{p2} 分别为小轮和大轮的单个齿距公差,单位为 μm ; f_{c1} , f_{c2} 分别为小轮和大轮的齿形相对公差,单位为 μm 。

其中: F_{p1} , F_{p2} , f_{p1} , f_{p2} , f_{c1} , f_{c2} 可由公差表得到,将每一精度等级对应的这 6 项公差值进行计算,得到单个锥齿轮每一精度等级对应的切向公差值。锥齿轮副的切向综合公差 F_{is}' 和一齿切向综合公差 f_{is}' 为:

$$F_{is}' = \sqrt{F_{i1}'^2 + F_{i2}'^2}, \quad (12)$$

$$f_{is}' = \sqrt{f_{i1}'^2 + f_{i2}'^2}. \quad (13)$$

(2) DIN3965-1986

DIN3965 中规定^[6],根据二次误差传播定理,可为锥齿轮副的切向综合公差 F_{is}' 和一齿切向综合公差 f_{is}' :

$$F_{is}' = \sqrt{F_{i1}'^2 + F_{i2}'^2}, \quad (14)$$

$$f_{is}' = \sqrt{f_{i1}'^2 + f_{i2}'^2}, \quad (15)$$

其中:单个齿轮的切向综合公差和一齿切向综合公差查表得到,可得到各精度等级对应的锥齿轮副的切向综合公差和锥齿轮副的一齿切向综合公差。

表 1 所示为 GB11365 和 DIN3965 中,一对锥齿轮副的公差值对照表,该齿轮副中小轮模数为 4,中点分度圆直径为 96 mm,大轮模数为 4,中点分度圆直径为 140 mm。由于 GB11365 中只给出相对齿形公差 4~8 级精度的公差值,因此通过公式仅能得到切向综合公差和一齿切向综合公差

的 4~8 级精度公差值。由表 1 中的数据可知,除 4 级精度的一齿切向综合公差外,GB11365 中的所有公差值的数值均大于 DIN3965 中同等级的公差值。

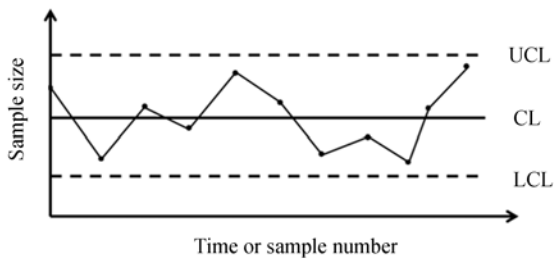
表 1 公差值对照表

Tab.1 Comparison of tolerance(μm)

精度等级	GB11365-89		DIN3965-1986	
	F_{is}'	f_{is}'	F_{is}'	f_{is}'
1	—	—	13.1	5.7
2	—	—	18.4	7.8
3	—	—	25.5	11.0
4	39.2	13.8	36.1	15.6
5	60.7	23.7	50.3	21.2
6	93.1	34.5	70.8	30.4
7	131.0	48.8	99.2	41.7
8	185.2	71.4	138.1	58.7
9	—	—	221.0	94.0
10	—	—	353.4	150.6
11	—	—	566.0	241.8
12	—	—	905.2	386.1

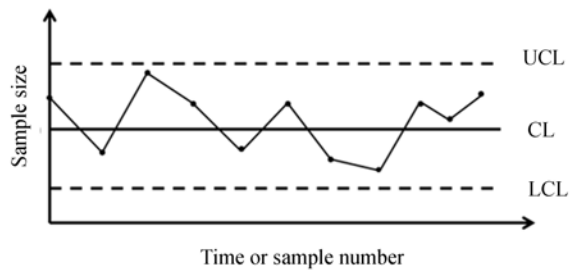
2.3 SPC 统计分析

SPC 的作用是定量地判断生产过程是否处于统计受控状态。进行 SPC 统计分析的关键工序为切齿工序,关键工艺参数为齿轮副的切向综合总偏差与齿轮副的一齿切向综合偏差。在进行分析时,所选的数据批数最少为 20 批,每一批中的样本个数至少为 5 个。定量分析工艺受控状态的基本工具是控制图,选择均值-标准差控制图对误差数据进行 SPC 分析,如图 6 所示。



(a) 均值控制图

(a) Control chart of mean value



(b) 标准差控制图

(b) Control chart of standard deviation

图 6 控制图示例

Fig. 6 Example of control chart

图中横坐标为工艺参数的批次,纵坐标为每批工艺参数的某种特征值。图中的 3 条标志线分别为 CL(Center Line; 中心线)、UCL(Upper Control Limit; 上控制限)、LCL(Low Control Limit; 下控制限)。控制限计算如式(16)~(17)所示^[21]:

均值控制图控制限:

$$\begin{cases} CL = \mu = (\bar{x}) \\ UCL = \mu + 3\sigma\sqrt{n} = (\bar{x}) + A_s \cdot \bar{s}, \\ LCL = \mu - 3\sigma\sqrt{n} = (\bar{x}) - A_s \cdot \bar{s} \end{cases} \quad (16)$$

标准差控制图控制限:

$$\begin{cases} CL = \mu_s = (\bar{s}) \\ UCL = \mu_s + 3\sigma_s = B_U \bar{s}, \\ LCL = \mu_s - 3\sigma_s = B_L \bar{s} \end{cases} \quad (17)$$

式中:控制限计算参数 A_s, B_U, B_L 根据 GB/T4091-2001 中给出的参数对照表,依据样本量的大小确定。

3 系统框图

测控系统结构如图 7 所示。由雷尼绍 REXM

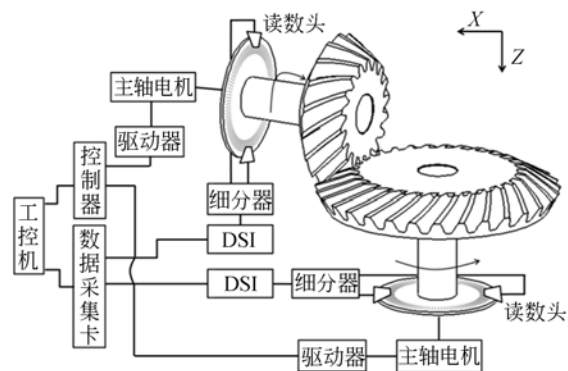


图 7 测控系统结构

Fig. 7 Structure of measuring and control system

系列圆光栅采集两齿轮的转角位移,康泰克数据采集卡将采集到的脉冲信号发送给上位机进行数据处理。该系统中主动轮一端由电机驱动,从动轮一端由同一型号的主轴电机加载。采用西门子 Simotion 系列控制器来控制各轴运动,并将系统的状态位信息发送给上位机。

4 测控软件设计

4.1 软件功能

对锥齿轮单面啮合测量的测控系统进行分 析,根据用户的需求,软件功能包括:①参数设置,包括被测工件的参数、测量的运动参数、精度标准、操作人员等信息的设置;②传动误差测量,采集传动误差数据并显示误差曲线;③误差分析和精度等级评定,对传动误差进行误差分离,得到齿轮副的切向综合总偏差等 4 项单项偏差,按不同的标准对这四 项偏差进行精度等级的评定,通过频谱分析等处理,可得到传动误差幅频谱等 10 条误差曲线;④最佳安装距调整,设置调整参数(点数和步距),在各点进行单面啮合测量,将每一点上的传动误差计算得到一个质量因数 F ,比较各点 F 值的大小, F 值最小的点处锥齿轮副的安装距即为最佳安装距;⑤ SPC 统计分析,设置 SPC 统计参数(数据组数和样本量),对齿轮副的切向综合总偏差和一齿切向综合偏差进行 SPC 统计分析,计算出控制限,绘制控制图;⑥参数文件和测量结果的保存、读取和调用;⑦控制测试,包括测量的动作控制和状态监控(系统状态位、限位开关);⑧报表打印。软件结构如图 8 所示。

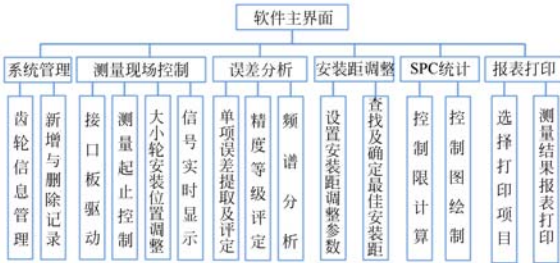


图 8 测控软件结构框图

Fig. 8 Block diagram of measurement and control software

4.2 类的设计

对象模型表示静态的、结构化的系统的“数据”性质,描述了系统的静态结构。通过对锥齿轮

副单面啮合测控系统需求的分析和理解,本系统中的静态类主要包括参数类 CParameter、误差处理类 CTransmission、精度评定类 CAccess、SPC 分析类 CTransmissionSPC、文件管理类 CFile、数据采集类 CRead 及运动控制类 CControl;界面类主要包括主界面类 CMainDialog、参数设置界面类 CParameterSettingDialog、传动误差测量界面类 CTEMeasurementDialog、安装距调整参数设置界面类 CAdjustSetDialog、SPC 统计分析界面类 CSPCDialog、控制测试界面类 CControlDialog、报表打印项目选择界面类 CPrintItemDialog。

以参数类 CParameter 为例,类 CParameter 封装了被测工件的基本参数信息,包括锥齿轮的工件图号 n 、中点法向模数 m_{mn} 、齿数 z 、中点螺旋角 β 、节锥角 δ 、齿宽 b 。图 9 所示为 CParameter 的类图。

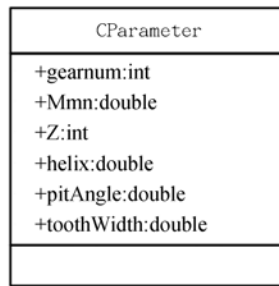


图 9 CParameter 类图

Fig. 9 Class diagram of CParameter

建立对象模型之后,就需要考察对象的动态行为。为了满足这方面的要求,就需要使用交互图。顺序图是交互图中应用最为广泛的,它主要描述系统各组成部分之间的交互次序。以添加被

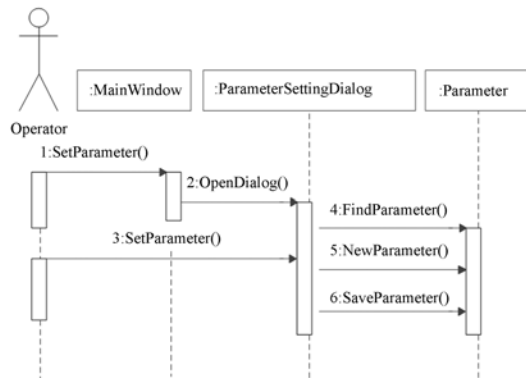


图 10 添加被测工件信息顺序图

Fig. 10 Sequence diagram of information of measured gear

测工件参数信息为例,其过程为:操作员选择菜单项“参数设置”,进入 ParameterSettingDialog 对话框界面。操作员在该对话框中输入被测工件的参数信息,并点击保存按钮提交系统保存。添加被测工件信息时顺序如图 10 所示。

4.3 测试用例

软件测试是使用人工操作或者软件自动运行的方式来检验它是否满足规定的需求或弄清预期结果与实际结果之间的差别的过程^[22]。锥齿轮单面啮合测控软件中的测试项目主要包括:菜单和界面显示功能的测试、伺服控制模块的测试、传感器和数据采集模块的测试、锥齿轮副传动误差测量功能的测试,以及测量数据调用和报表打印功能的测试。

在进行软件测试前,首先应编写测试用例。测试用例是一份关于具体测试步骤的文档,描述了测试的输入参数、条件及配置、预期的输出结果等,以判断被测软件的工作是否正常。为了对锥齿轮副单面啮合测控软件项目进行测试,首先编写了测试用例文档,为功能测试提供了使用案例及测试方法说明。文档中的测试项分为“必测”和“选测”两种。“必测”项又分为 A、B、C 三类,A 类项目中的内容必须全部通过,方能认定测试合格,符合用户需求。以菜单和界面显示功能测试为例,表 2 所示为该测试用例。

表 2 菜单和界面显示功能测试用例

Tab.2 Test case of menu and interface display

用例 ID	BG0001	测试级别	A
软件项目名称:	锥齿轮副单面啮合测控软件		
测试用例名称:	菜单和界面显示功能测试		
测试目的:	测试测控软件中菜单和界面是否正确显示		
预置条件:	测控软件源程序已经编译完成并可以运行		
测试项	测试方法与步骤	预期结果	
1	查看菜单和工具栏是否显示正常	菜单和工具栏显示正常	
2	点击菜单和工具栏中的选项,查看界面是否显示正常	界面显示正常	
3	在参数设置界面输入正确的参数,点击保存,查看保存是否成功,输入错误的参数,查看是否提示错误信息	输入正确参数,保存成果;输入错误参数,提示错误	
测试判断准则:	测试结果必须与预期结果相符,否则不符合要求		
测试结果:	通过/不通过		

4.4 软件界面

锥齿轮副单面啮合传动误差测控软件是在 Windows 7 操作系统下,采用 Visual Studio 2010 平台下 VisualC++ 开发环境中的 MFC 程序框

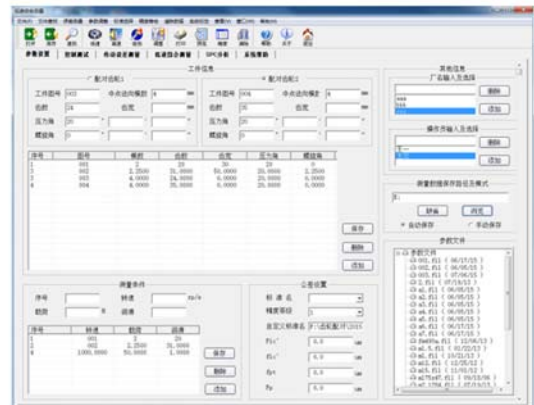


图 11 参数设置界面
Fig.11 Interface of parameter setting

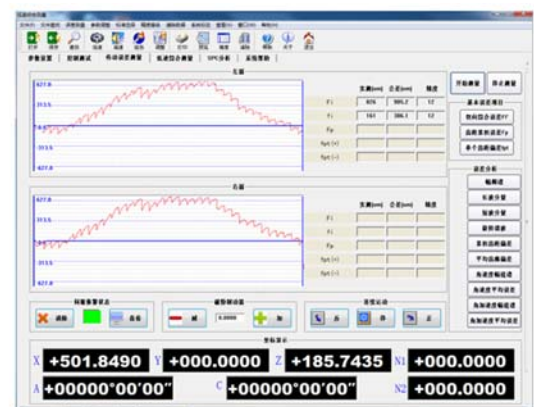


图 12 传动误差测量界面
Fig.12 Interface of measurement transmission error

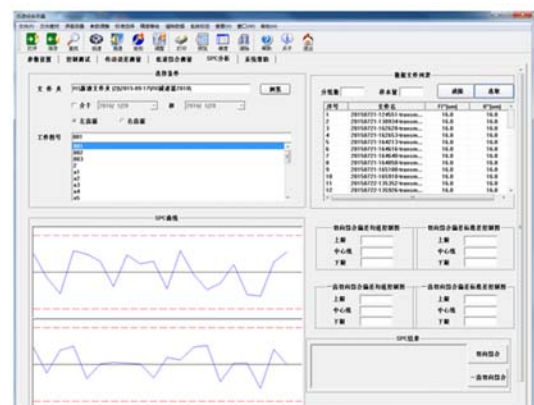


图 13 SPC 统计分析界面
Fig.13 Interface of SPC statistical analysis

架进行开发和调试的。按照软件的功能需求和架构设计中类的设计,对软件的各个功能模块进行编码实现。将编译好的各模块集成,形成锥齿轮副单面啮合测控软件。软件中的主要界面如下,图 10 所示为参数设置界面,图 11 所示为传动误差测量界面,图 12 所示为 SPC 统计分析界面。

5 试验结果

选取一对齿轮副进行安装距寻优测量。齿轮副参数如表 3 所示。小轮(主动轮)与大轮(从动轮)以理论安装距啮合,假设该位置为安装距寻优调整的零点,分别在 -0.4 mm , -0.2 mm , $+0.2\text{ mm}$, $+0.4\text{ mm}$ 处进行传动误差测量,对在各个点测量得到的传动误差进行傅里叶变换,在频谱上获取一次、二次、三次啮合谐波幅值,测量结果如表 4 所示, -0.4 mm 位置处的安装距为最佳安装距。图 14 所示分别为齿轮副在理论安装距(小轮安装距 102.9 mm ,大轮安装距 82.1 mm)位置与最佳安装距位置(小轮安装距 102.5 mm ,

表 3 被测齿轮副参数

Tab.3 Parameter of measured gear pair

参数	小轮	大轮
齿数	24	35
模数	4	4
压力角/ $^\circ$	20	20
安装距/mm	102.9	82.1
偏置距/mm	0	0
小轮转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	5	—

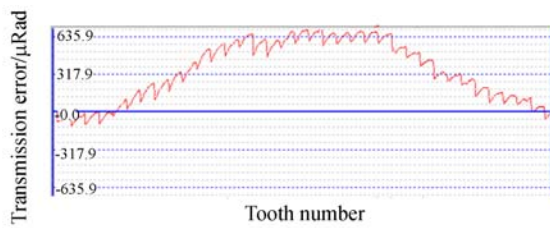
表 4 安装距寻优调整结果

Tab.4 Searching results of mounting distance

安装距追踪结果		ΔH 值/mm						
		-0.4	-0.2	0.00	0.2	0.4		
质量因数F		F	0.774	0.868	0.896	0.926	1.048	
谐波	Q因子	公差/ μm	各 ΔH 传动误差信号幅值/ μm					
1次谐波	0.80	T ₁ 35.00	H ₁	28.43	31.37	32.33	33.57	38.30
2次谐波	0.10	T ₂ 15.00	H ₂	10.04	13.24	10.95	11.09	14.47
3次谐波	0.10	T ₃ 10.00	H ₃	5.69	6.32	8.37	8.46	7.57

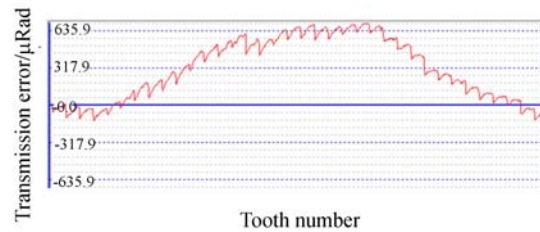
参考文献:

[1] 谢华锟,王志,石照耀,等. 锥齿轮测量技术的最新



(a) 理论安装距位置传动误差曲线

(a) Transmission error curve on theoretic mounting distance



(b) 最佳安装距位置传动误差曲线

(b) Transmission error curve on the best mounting distance

图 14 传动误差曲线

Fig.14 Transmission error curve

大轮安装距 82.1 mm) 啮合时的传动误差曲线,其测量结果如表 5 所示,可以看出两个位置下均为 DIN12 级,而最佳安装距位置下的各项偏差的数值较小。

表 5 传动误差测量结果

Tab.5 Results of transmission error

安装距位置	$F_{is}'/\mu\text{m}$	$f_{is}'/\mu\text{m}$
理论安装距位置	836	173
最佳安装距位置	826	161

6 结 论

本文给出了锥齿轮副单面啮合测量中的安装距调整方法、传动误差评定方法,并进行了 SPC 统计分析。基于 VC++ 设计的测控软件,实现了传动误差数据的采集和处理、单项偏差的提取和精度评定、最佳安装距调整、SPC 统计分析、数据存储和查询以及报表打印等功能。本文给出的方法和软件可用于锥齿轮副或面齿轮副的测量。

进展[J]. 工具技术,2005,37(10):48-51.

XIE H K, WANG ZH, SHI ZH Y, et al.. Development on technology of bevel gear measurement

- [J]. *Tool technology*, 2005, 37(10): 48-51. (in Chinese)
- [2] SMITH J D. The uses and limitations of transmission error [J]. *Gear Technology*, 1988(4): 34-39.
- [3] JIRÍ T. Simple gear set dynamic transmission error measurements [J]. *Production Engineering*, 2011, 5(3): 321-327.
- [4] MATS Å. Gear noise and vibration-A literature survey[J]. *Machine Design*, 2011:2-15.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. GB11365-89, 锥齿轮和准双曲面齿轮 精度[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- General administration of quality supervision, inspection and quarantine of China. GB11365-89, Bevel gear and hypoid gear Accuracy[S]. Beijing: Standards press of China, 1990.
- [6] DIN3965-1986, Tolerancing of bevel gears [S]. 1986:25-41.
- [7] HEINZ E, CHRISTIAN P. In roll testing technology of spiral bevel and hypoid gear sets [J]. *Gear Technology*, 2005(3):23-32.
- [8] 张明德. 锥齿轮传动智能综合检测系统研究与开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- ZHANG M D. *The Study and Development on Intelligent Cheeking System of Bevel Gear Transmission* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003. (in Chinese)
- [9] 米林, 李君, 冯文杰, 等. 新型数控锥齿轮滚动检查机闭环位置控制系统[J]. 现代制造工程, 2005(4): 103-105.
- MI L, LI J, FENG W J, *et al.*. The closed loop position control system of a new type NC bevel roll tester [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2005(4): 103-105. (in Chinese)
- [10] 张功发, 张修如, 邹文毅. 螺旋锥齿轮单面啮合检测系统的设计与实现[J]. 现代制造工程, 2010(9): 97-101.
- ZHANG G F, ZHANG X R, ZOU W Y. The design and realization of single flank test system for spiral bevel gear [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2010(9): 97-101. (in Chinese)
- [11] 张保松. 螺旋锥齿轮传动平稳性测试系统的设计与研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- ZHANG B S. *Design and research on gear transmission smoothness measurement system* [D]. Changsha: Central South University, 2006. (in Chinese)
- [12] HERMANN J. Single flank test, structure-borne noise analysis and roll testing with 600 HTT [J]. *Industrial Products Finder. Annual* 2011.
- [13] KLINGELNBERG. Spiral bevel gear tester Oerlikon T60[Z].
- [14] SMITH R E. Single flank testing of gears [J]. *Gear Technology*, 2004(3): 18-21.
- [15] 石照耀, 张旭. 齿轮单面啮合测量技术的发展及其应用[J]. 工具技术, 2008, 42(3): 10-15.
- SHI ZH Y, ZHANG X. Development and application of gear single-flank testing technology [J]. *Tool Technology*, 2008, 42(3): 10-15. (in Chinese)
- [16] The Gleason Works. *Gleason 600 HTT TURBO Tester Operating Instructions* [M]. Rochester, USA. 2000.
- [17] 陈昌鹤. 面齿轮单面啮合测量仪的测控系统研发[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- CHEN CH H. *Development of Control System for Face Gear Comprehensive Tester* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] SMITH R E. Single flank data analysis and interpretation [J]. *Gear Technology*, 1985(9), 20-34.
- [19] 林虎, 石照耀, 薛梓, 等. 基于正交距离回归齿面的齿轮误差评定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11): 3192-3198.
- LIN H, SHI ZH Y, X Z, *et al.*. Evaluation of gear errors based on orthogonal distance regression gear profile [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3192-3198. (in Chinese)
- [20] 石照耀. 齿轮传动误差理论与测量评述[J]. 工具技术, 1991, 2(25): 37-41.
- SHI ZH Y. Theory of gear transmission error and comment of measurement [J]. *Tool Technology*, 1991, 2(25): 37-41. (in Chinese)
- [21] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 4091-2001 常

规控制图[S], 2001: 1-9.

General administration of quality supervision, inspection and quarantine of China. GB/T4091-2001, Shewhart control charts[S]. Beijing: Standards press of China, 2001.

- [22] 石照耀, 张白, 林家春, 等. 特大型齿轮激光跟踪在位测量原理及关键技术[J]. 光学精密工程, 2013,

21(9):2340-2345.

SHI ZH Y, ZHANG B, LIN J CH, *et al.*. Principle and critical technology of in-site measurement system with laser tracker for mega gear [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9):2340-2345. (in Chinese)

作者简介:



汤洁(1975—), 女, 江苏射阳人, 博士, 讲师, 1998 年于东南大学获得学士学位, 2009 年于北京工业大学获得博士学位, 主要从事精密测试技术及仪器、齿轮测量技术及仪器方面的研究。E-mail: tangjie@bjut.edu.cn



王冰鹤(1990—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 2012 年于北京工业大学获得学士学位, 主要从事精密测试技术及仪器研究。E-mail: wangbinghe@emails.bjut.edu.cn



石照耀(1964—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 教育部长江学者特聘教授, 博士生导师, 1984 年于合肥工业大学获得学士学位, 1988 年于陕西机械学院获得硕士学位, 2001 年于合肥工业大学获得博士学位, 主要研究方向为齿轮工程及精密测试技术与仪器。E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)