

弧齿锥齿轮铣齿机传动误差检测系统研究*

彭东林 戴政远 郑连清 郭晓东 (重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要 本文就弧齿锥齿轮铣齿机传动误差检测的特点、难点、数学模型和关键技术进行了分析,并介绍了作者研制的测试系统的实测效果。

关键词 铣齿机 传动误差 检测

Study on The Measuring System for Transmission Error of Hypoid Generator

Peng Donglin Dai Zhengyuan Zheng Lianqin Guo Xiaodong

(State Key Lab. of Mechanical Transmission Chongqing University Chongqing 400044)

Abstract In this paper, the character, difficulty, mathematical model and key technique of the measurement for transmission error of hypoid generator are discussed, and the measuring result of the measuring system developed by the authors is presented.

Key words Hypoid generator Transmission error Measurement

1 引 言

据长期调研和大量文献检索,目前国内外关于传动误差、简称 TE(Transmission Error)的测量仍限于对连续运动的连续测量,在测试过程中,试件的公称转速、传动比和转向不变,运动过程不间断,例如对滚齿机等机床范成传动链的测试。而锥齿轮铣齿机被认为是齿轮加工机床中结构最复杂的一种,其传动链两端即摇台和工件的运动,为非连续、变速度、变传动比和非完整周期运动的复杂组合。因此这种机床的动态测试仪器从设计方案到实现都有很多困难,尚属空白,这与生产实践中的迫切需求形成强烈反差^[1]。

2 数学模型

若齿轮加工过程是连续不断的,如滚齿机、插齿机和磨齿机,则测试过程和测试曲线也是连续不断的,如图 1(a)所示,对应的测量公式为^[2]:

$$TE = \sum_{i=1}^k \frac{N_k}{N_i} A_i \sin\left(\frac{N_i}{N_k} \theta_k + \Phi_i\right) \quad (1)$$

式中 N_k ——末端传动件转速

θ_k ——末端传动件转角

N_i —— i 传动件转速

Φ_i —— i 传动件误差初相角

A_i —— i 传动件传动误差模值

注意,这里是对各频率分量误差曲线求和。

如果采用计算机化的 TE 测试仪作离散化的采样,其曲线如图 1(b)所示,其测量公式为^[3]:

$$TE_r = \sum_{k=1}^i \Delta TE_k \quad (2)$$

这里的求和是对单次位移比较结果 ΔTE_k 作积分。

若齿轮加工过程是间断的,但是逐齿的,换言之,在时间上是间断的,在空间上是连续的,如锥形砂轮磨齿机或跳齿数 $Z_r=1$ 的铣齿机,测得的曲线如图 1(c)所示,它应与(b)一样。(因为 TE 是位移同步比较而与时间无关,这里为了有所区别,每齿间留了间隔)此时对应的计算公式为:

$$TE_r = \sum_{j=1}^Z \sum_{i=1}^i \Delta TE_{jk} \quad (3)$$

式中 Z ——加工齿数

i ——单齿采样点数, $i = \text{总采样点}/Z$

j ——齿轮齿序, $j = 1, 2, 3, \dots, Z$

* 国家自然科学基金资助项目(批准号 59575075) 本文于 1997 年 11 月收到。

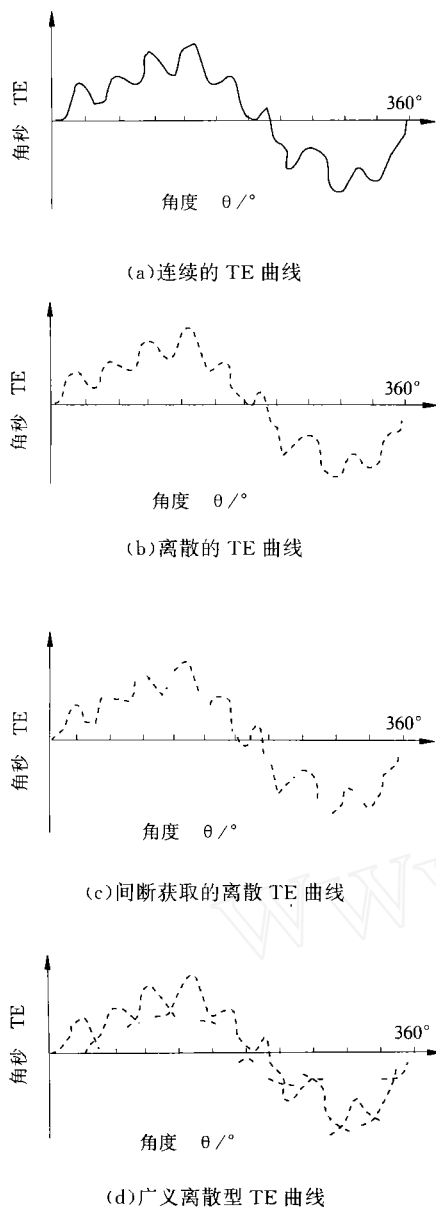


图 1 广义离散型传动误差曲线的演绎

若加工过程既是间断的,又是跳齿进行的,如前述工作于滚切法的铣齿机,则测量过程和加工过程一样,在时间上和空间上都是间断的,就只能间断地在工件回转的若干周内完成。以加工齿数 $Z=11$,跳齿数 $Z_t=3$ 为例,第一周测量(加工)的齿依次为 1、4、7、10 齿;进入第二周为 2、5、8、11 齿;最后在第三周内完成第 3、6、9 齿,最后得到的传动误差曲线如图 1(d)所示,剔除交叉重迭部份后,其形状与(b)和(c)一样,只是获取的方式和顺序不一样。对应的计算公式为:

$$TE_{i,j} = \sum_{i=1}^Z \sum_{k=1}^i \Delta TE_{i,k} \quad (4)$$

式中 $i = \begin{cases} 1+nZ_t & 1+nZ_t \leq Z \\ 1+nZ_t-Z & 1+nZ_t > Z \end{cases}$
 $n=1,2,3,\dots$

这里①为加工齿序,由加工跳齿数 Z_t 决定,如上例①=1,4,7,10,2……

图 1(c)可视为(d)的特例(加工齿序等于齿轮齿序),而(b)又可视为(c)的特例(不间断连续采样),因此图 1(d)覆盖了各种可能出现的离散型传动误差采样顺序,于是可以认为(4)式为广义的离散型传动误差曲线数学模型^[1]。

传统的非计算机化 TE 测量仪器只能测得图 1(a)所示曲线,现代计算机化的 TE 测量仪器已能得到如(b)或(c)所示曲线,但是要按(4)式得到如(d)所示曲线还要解决一些关键技术问题。

3 关键技术

3.1 连续曲线的非连续获取

如上所述,对于切削过程间断的铣齿机而言,为了最后得到一条连续的反映范成运动的传动误差曲线,只能按加工顺序间断地获取。容易引起误解的是,在上例中以为只要间断地测得相应段曲线,最后连接起来就行了。问题在于(图 2)当测完第 1 齿后,在尚未测第 2、3 齿的情况下即开始测第 4 齿,我们根本不知道第 4 段曲线的起点纵坐标在哪里。

另一个问题是总采样点数和每一颗齿对应的量程采样点数之间的矛盾。弧齿锥齿轮的特点在于啮合系数大,齿长,而“每齿代表的角度”有两种含意,一是 $360^\circ/Z$,二是每齿的全齿长对应的角度,显然后者远大于前者。研究者希望测量结果能充分反映每齿全齿长范围内的误差情况,这就要求单齿测量角度足够大。但总采样点数按传统 TE 曲线定义又是与一个整圆周期 360° 对应的,分给每齿的采样点数 A 只能是总采样点数除以总齿数。

为了解决这两个问题,本文设计的测试方案是:实时测试和事后显示的是“单齿传动误差曲线”,每齿曲线的起点纵坐标全部从零开始计算,曲线长度即单齿测量角度大于 $360^\circ/Z$,小于全齿长对应角度,在此范围内任意设定。在测试完成后,再将各齿曲线按齿序根据前一段线的尾点纵坐标进行首尾搭接构成图 1(d)所示曲线,剔除交叉部份(重复测试部份),即构成图 1(b)和(c)所示的传统 TE 曲线,每一齿保留点数为 A 。全过程由计算机完成,新增加的单齿传动误差曲线如图 3 所示。

3.2 测量起点的确定

温度变化、阿贝误差和断续测量的首点值确定被

认为是几何量动态测量中影响精度的3个关键因素^[4]。对圆周运动而言,由于圆周封闭,温度变化影响

可忽略不计,阿贝误差也不存在,于是测量起点值的确定就成为一个关键问题。

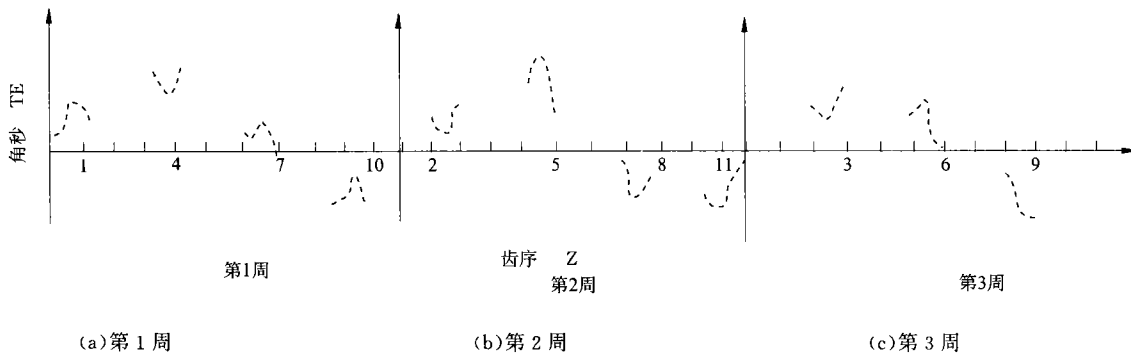


图2 折散的传动误差曲线

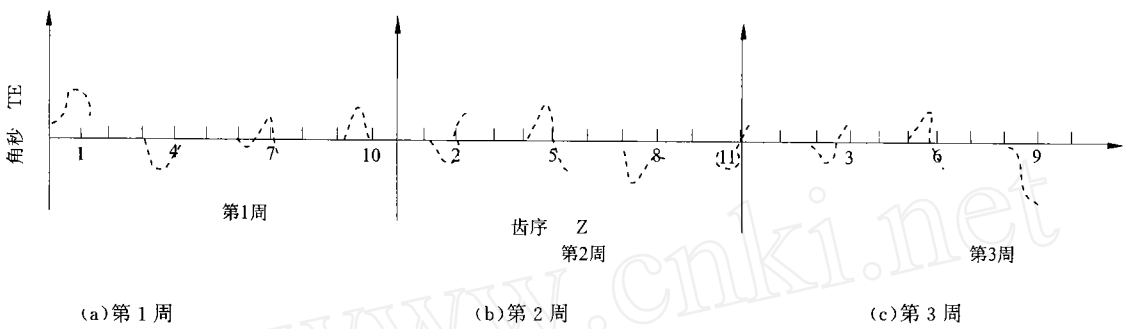


图3 搭接前的单齿传动误差曲线

传动误差的测量是传动链两端运动的同步位移比较,这种比较是靠两端传感器的电信号相位比较实现。由于圆周运动的测试起点往往是随机的,刚开始比较的第一个采样值所反应的两路信号的初相位也是随机

的,不符合*i*倍传动比关系,反映到实测曲线上,就是曲线的起点为一突跳值,可能正跳,也可能负跳,也可能不跳,可大可小,完全是随机的。

对于滚齿机、插齿机等连续切削的齿轮加工机床的连续测试曲线而言,首点突跳给结果分析带来影响不大。如图4所示,突跳只有一次,一旦首点确定,后面的测试采样以此为基准展开。考核机床误差时,评判标准是曲线的峰—峰值,二者显然一样。对频谱分析而言,频谱中代表突跳的零次谐波分量将会比较大,它类似于电量分析中的直流分量,反映的是整条曲线上下平移的程度,可以不加理会,对环节误差分析无碍。

而当突跳反映到铣齿机测试时,问题变得比较复杂。因为是间断测试,加工齿数为*Z*,就会有*Z*次突跳,每次的突跳值又是随机的。这个问题不解决,前述整体曲线的“搭接”将无法实现。

本文分析测试曲线产生突跳而不能加以克服的本质,在于对电信号进行计算机采样的实时性达不到要求。对于首点信号,因为缺少一个参考点,计算机程序执行的滞后性将使其无法对信号的初相位作出修正。为此,本文针对计算机测控技术的实时性关键问题,专门提出一种“预处理循环控制流”的思想^[5],使计算机采样既保持可编程的柔性,又具有硬件电路的实时性,

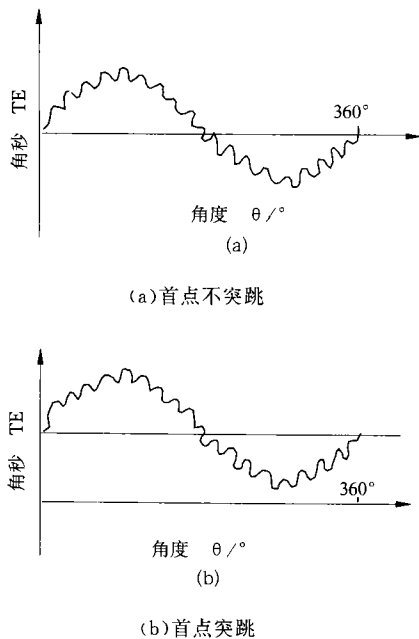


图4 首点值突跳与曲线平移

可以确保每次分段测试的起点值不再具有随机性,也就从根本上解决了首点突跳问题。

4 测试方案与系统

4.1 测试方案设计

测试分析的主要依据是传动链中各转动环节误差呈周期性变化而可用 FFT 进行分解。如(1)式所示,总的传动误差是由各环节误差迭加而成,误差曲线的变化规律由它们的共同作用而决定,但是各环节误差的

“贡献”差别很大,误差曲线的形状将主要取决于其中的大误差环节。大误差环节的形成原因有两点,一是自身的制造或装配误差大,二是在传动链中所处的位置由于“误差按传动比折算”的规律决定了其误差的权重大。对铣齿机而言,它有一个低速的非整圆周期运动环节即刀具摇台。由于处在低速环节,其误差得不到衰减;又由于是非圆周封闭的往复运动,其误差表现为单方向的,若其误差值相对较大,将导致整条误差曲线受其影响而斜向“漂移”如图 5(a)、(b)所示。

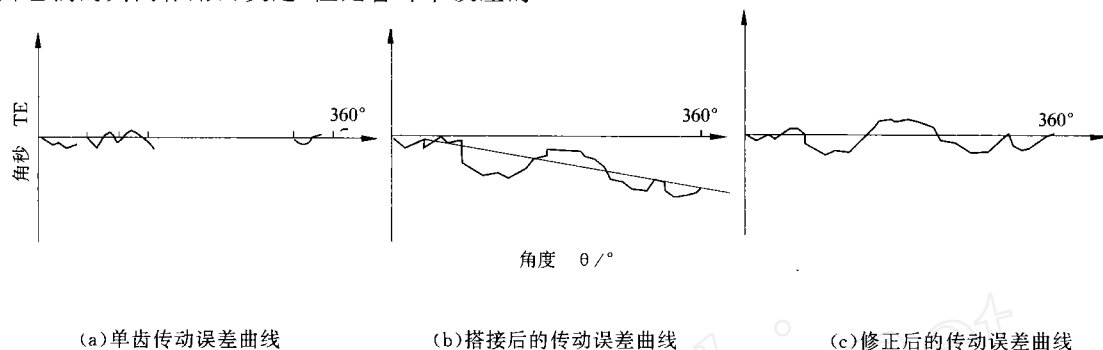


图 5 发生“漂移”的传动误差曲线

对这种曲线作频谱分析,由于其一次分量圆周不封闭,将导致整个频谱图低频分量太丰富,湮没了其它环节误差分量,频谱分析失败。

铣齿机的工作原理决定了其传动链的摇台端回转不封闭,为此,本文设计的测试方案有两种。

4.1.1 “用机床迁就仪器”的测试方案 为了测试而改变机床的运动状态,将传动链从某一合适的环节(如滚比挂轮)处断开,分别以摇台蜗轮副和工件蜗轮副为低速端对两条传动链进行测试,并且选择合适的滚比挂轮,使得摇台蜗轮副也能转动 360°以上。在这种工况下测试,可保证传动链的最低速环节运动圆周封闭,测试曲线也封闭,并且可以连续不断的方式测量,与测滚齿机等相似。这种方法适用于分析传动链各环节误差大小,查找故障环节,尤其是可以测出摇台蜗轮副的完整误差状况。不足之处在于测试状态与实际加工时的机床状态不符。

4.1.2 “用仪器迁就机床”的测试方案 保持机床为加工状态不变,测试过程与加工过程一样分 Z 段断续跳齿完成,测出如图 5(a)所示单齿传动误差曲线,再按前述方式搭接成如图 5(b)所示的完整传动误差曲线。为进行频谱分析,先对全体数据按最小二乘法拟合出曲线中线,算出其斜率后再将整个曲线修正为封闭曲线如图 5(c)所示。据此用 FFT 进行频谱分析,这时低频次谐波已无意义,并不能反映蜗轮副误差;但各高

次误差可以反映对应的各高速环节误差。这种方案的优点在于能如实反映加工状态下的机床精度状况,这主要从单齿传动误差曲线看出。缺点在于不能反映摇台蜗轮副误差,并且整条曲线是由 Z 段曲线搭接后修正而得到,频谱分析效果也不如连续测量的效果好,Z 次谐波分量较重。

4.2 测试系统

测试系统采用文献[3]所述“全微机化测试系统”结构形式。该系统由一对普通磁栅传感器,一台通用微机和插在微机内的采样卡组成,因结构简单而环节误差小,故障少,成本低,被国家科委列为国家级科技成果重点推广计划项目。现已在滚齿机、插齿机、磨齿机等机床上获得广泛应用。现用于铣齿机测量,硬件系统一样,改变的只是软件系统。软件系统包括:

参数输入模块:完成与机床加工状态对应的原始参数输入,包括加工齿数 Z_0 ,跳齿数 Z_1 ,传动滚比 I 和选用的每齿测量角度 θ_0 。

采样显示模块:完成实际测试过程中数据值的采集,包括读数、细分、累加等,并在屏幕上实时显示;完成预定测试点数后,自动提示转入后续处理程序。

数据处理模块:完成对已测传动误差曲线的数据处理工作,包括长、短周期误差的分离,FFT 计算、特征值计算、搭接、拟合、剔除等。

输出模块:完成将上述处理结果以文字、曲线和数

据的形式交由屏幕显示、计算机存盘和打印等工作。

系统全部采用中文人机对话形式进行操作。

4.3 测试实例

用上述测试系统对一台国产YT2250弧齿锥齿轮铣齿机进行了测试。首先调节刀盘中心与摇台中心重合,即偏心距 $e=0$;再切断切削速度换置机构,使切削转动不传至刀盘主轴;在刀盘主轴上安装一台磁栅传感器,并与摇台刚性连接,使之反映摇台公转情况而不反应刀盘自转情况;另在工件主轴上安装另一台磁栅传感器反映工件主轴运动情况;最后在摇台摆动起点附近安置一霍尔元件,其信号作为完成一次单齿测量循环的起点。在完成计算机参数输入后,开动机床,在其按加工一个完整齿轮的方式运行期间内,完成范成传动链传动误差和跳齿分度误差的测试工作。

如图6所示,在测量第 j 齿($j=1, 1+Z_t, 1+2Z_t, \dots, Z$)的单齿传动误差时,对应摇台的 YY' 区域且运动方向为 a 向,然后加速沿 b 向返回;对应工件端则为 $Z_j Z'_j$ 区域,然后加速跳齿到 Z_{jt} ,方向保持为 C 向。 $\theta_{jt} \geq 360^\circ/Z_t$ 人为确定。以工件端传感器脉冲(设为 P_2)作为基准对摇台端传感器脉冲(设为 P_1)进行采样。单齿传动误差的表达式为:

$$\begin{aligned} TE_i &= \sum_{k=1}^i \Delta TE_k \\ &= \sum_{k=1}^i (\sum P_1 - P_0)_k N_1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中 N_1 —— P_1 脉冲当量

P_0 ——无误差时每个 P_2 信号对应的 P_1 信号公称值

测量跳齿分度误差,是通过在上述一次切齿循环过程中对 P_2 的计数反应出跳齿后的实际转角与理论转角之差。见图6,在摇台端是从 Y 到 Y' ,再从 Y' 经 y' 和 y 回到 Y 。在工件端则从 Z_j 到 Z_{jt} ,其间经历 $Z_j Z'_j$ 低速加工段和 $Z'_j Z_{jt}$ 高速跳齿段。此时跳齿分度误差可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{jt} &= \theta_{jt} - \frac{360^\circ}{Z} Z_t \\ &= \sum P_2 N_2 - \frac{360^\circ}{Z} Z_t \end{aligned} \quad (6)$$

式中 N_2 —— P_2 脉冲当量

Z ——加工齿数

Z_t ——跳齿数

$jt=j+Z_t$

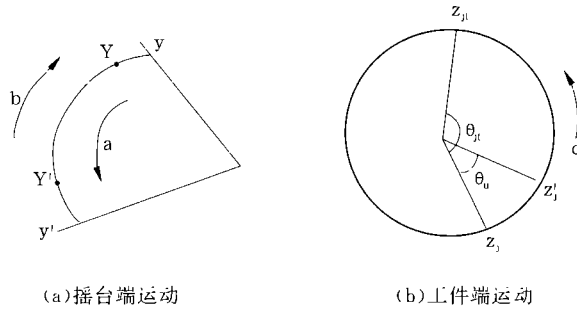


图6 动态测量时机床运动示意图

实测结果为:传动误差 $\Delta F_d=131.5''$,长周期误差 $\Delta f_{dL}=64.4''$,短周期误差 $\Delta f_{dK}=67.1''$,跳齿分度误差 $\Delta\theta_{max}=240''$ 。

5 小 结

通过本研究,对锥齿轮铣齿机传动误差测量系统实现了从无到有的初步突破。通过对系统的进一步完善,对其测试原理特殊性的进一步分析和认识,必将对传统的传动误差理论、测试方法和分析方法有所推进。

参 考 文 献

- 戴政远. 广义离散型传动误差理论与技术的研究. 重庆大学博士论文, 1997, 31~39.
- 和子康. 机床传动精度测量和提高. 中国计量出版社, 1987, 71~74.
- 彭东林等. 新型传动误差检测分析系统FTT的原理与实践. 仪器仪表学报, 1993, 14(3): 281~285.
- 黄潼年. 齿轮整体误差测量新技术. 四川省机械工程学会传动专委会优秀论文专辑, 1983, 4.
- 彭东林等. CAT和CNC的预处理循环控制流研究. 重庆大学学报, 1996, (2): 95~98.

(上接 270 页)

- T. Ricolfi. Radiation Pyrometry at IMGC. Lectures Given at the Chinese Institute of Metrology, Hang Zhou, April, 1988.
- Z. chu. J. Dai. Monte-Carlo Solution for the Directional Effective Emissivity of a Cylindro-innercenc. Temp. its Measure. and Contr. in Sci. and Ind., 1993, 6 Part2, 907.
- He Jin, Dai Jingmin, Chu Zaixiang. A Novel Multiwavelength Pyrometer with One Point Calibration Method. The 3rd Russian-China Symposium—the Actual Problems of the Scientific and Technological Progress of Far-eastern Rgeion, Xabapack, 1993, 87~92.