

文章编号:1000-582X(2002)05-0001-04

误差补偿技术在直廓环面蜗杆 高精度加工中的应用

秦大同, 贾陈平, 杨长祺

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对如何在普通滚齿机上低成本地提高直廓环面蜗杆加工精度的问题,通过采用三坐标测量机对实际齿面进行坐标测量,由所得的测量结果与理论的蜗杆齿面进行比较分析,找出机床加工参数的调整误差,根据所得机床调整参数误差并基于误差补偿原理修正机床调整参数,从而明显地提高了直廓环面蜗杆的加工精度。同时,在保证有充足测点的条件下,只需沿着工件表面的一条螺旋线进行测量,便可较为准确地诊断出机床加工参数的调整误差,从而提高了蜗杆的检测效率。

关键词:直廓环面蜗杆;齿面偏差;坐标测量;精密加工

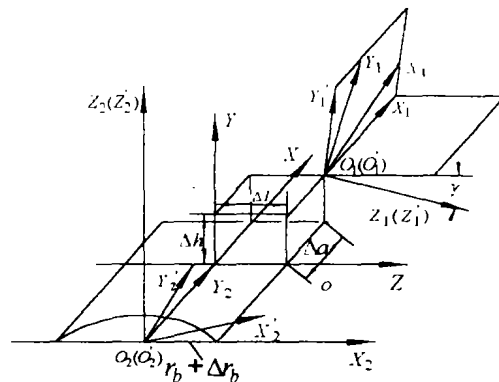
中图分类号:TH161.1

文献标识码:A

直廓环面蜗杆传动是一种在起重、冶金、造船等行业中得到广泛应用的传动装置,这种传动由于其多齿啮合的特点具有较高的承载能力,同时其啮合性能对制造误差十分敏感,当存在加工误差时,齿面啮合性能急剧变坏。因此,如何提高齿面的加工精度成为生产中亟需解决的问题之一。引起齿面加工误差的因素中,由于机床加工参数调整不准确,或由于失修而造成的机床位置误差是重要因素。这两种误差由于特征相似,可统一视为机床调整参数误差,文中所讨论的机床误差就是指的这类误差。作者提出了提高直廓环面蜗杆齿面加工精度的一种方法,即在蜗杆齿面加工完成后,通过坐标测量,获取齿面加工误差的信息,然后对测量数据进行处理,进而诊断出机床加工参数的调整误差,并通过对机床调整误差的补偿修正来降低齿面偏差,从而经济地加工出具有较高精度的直廓环面蜗杆。

1 齿面坐标测量的方法

坐标测量的原理是将被测物体在被测点的坐标值与标准物体在相应点的坐标值进行比较,从而得出被测物体的偏差值。测量的标准物体,是理论计算得到的蜗杆齿面。为了能够由坐标测量的结果诊断机床工具的调整参数误差,在建立蜗杆齿面方程时,根据机床工具的调整原理引入了如图1所示的调整参数误差。



Δr_b - 基圆半径误差; Δa - 机床中心距误差; Δh - 刀台平面的高精度误差; γ - 蜗杆轴向货斜角误差; z_1, z_2 - 分别为蜗杆和蜗轮的回转轴线

图1 机床加工参数的调整误差示意图

考虑制造误差后的蜗杆齿面方程可表示为:

$$r_1 = r_1(u, \varphi_2; \Delta P)$$

式中: r_1 ——蜗杆齿面在某点的径矢; u, φ_2 ——齿面的曲面坐标; ΔP —— $\{\Delta r_b, \Delta a, \Delta l, \Delta h, \gamma\}$ 代表加工参数的调整误差。当 $\Delta P = 0$ 时, 式(1)表示没有制造误差的蜗杆齿面方程。

实际测量所用的测头是一个半径为 ρ 的球, 由测

· 收稿日期:2002-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59675006)

作者简介:秦大同(1956-),男,重庆人,重庆大学教授,博士生导师,主要从事机械传动和车辆工程方面的研究。

量机上的读出的测头球心坐标而非接触点处的坐标值,为此需进行坐标点的转换,我们以齿面外法线方向上齿面相距为 ρ 的等距齿面上的一点为对象来分析,如图 2 所示。

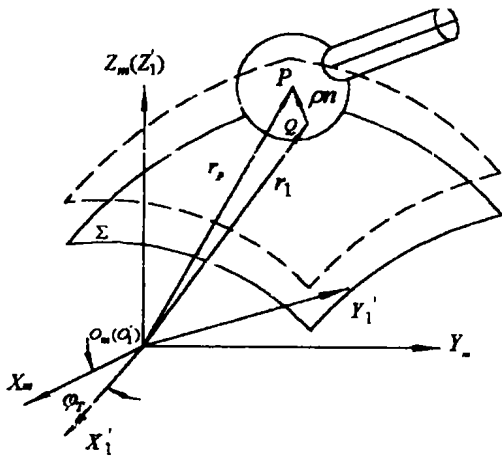


图 2 测头的影响情况

在与蜗杆固结的坐标系 $S_1: O'_1 - X'_1 Y'_1 Z'_1$ 中,与蜗杆齿面相距为 ρ 的等距面的方程为:

$$\mathbf{r}_p = \mathbf{r}_1 + \rho \mathbf{n}_1 = \mathbf{r}_p(u, \varphi_2, \Delta P, \rho) \quad (2)$$

或者写成分量式为:

$$\begin{aligned} X'_1 &= X'_1(u, \varphi_2, \Delta P, \rho) \\ Y'_1 &= Y'_1(u, \varphi_2, \Delta P, \rho) \\ Z'_1 &= Z'_1(u, \varphi_2, \Delta P, \rho) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \mathbf{r}_p —— 球心径矢; ρ —— 测头半径; \mathbf{n}_1 —— 被测点的单位法矢。

将 \mathbf{r}_p 变换至与坐标测量机固结的静坐标系 $S_m: O_m - X_m Y_m Z_m$ 中,有:

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{M} \cdot \mathbf{r}_p = \mathbf{R}_p(u, \varphi_2; \Delta P, \rho, \varphi_T) \quad (4)$$

式中, \mathbf{M} 为两个坐标系之间的坐标变换矩阵, φ_T 为从 X_m 轴到 X'_1 轴的角度。

为便于测量结果的处理,通常在测量开始时,要求蜗杆坐标系与测量机坐标系相重合,即要求 $\varphi_T = 0$,为将蜗杆调整到该位置,需要在齿面上选定一个测量基准点,这里,我们选取蜗杆分度螺旋线上位于喉部的点作为基准点,并假定该点的误差为 0。由于本文齿形偏差的测量目的是为了诊断机床参数的调整误差,上述假定对诊断结果影响很小^[1,2]。测量前,首先按(4)式令 $\varphi_T = 0, \Delta P = 0$ 求得对应于基准点的测头中心的各坐标,并将测头中心移动到该位置处,转动蜗杆,使得其齿面与测头接触,蜗杆上的该触点就是测量基准点,此时蜗杆所在的位置为测量起始位置,然后将各待测点依次转动到 $X_m O_m Z_m$ 平面内进行测量,如图 3 所示。

令 $\Delta P = 0$,就得到各待测点在测量机坐标中的理

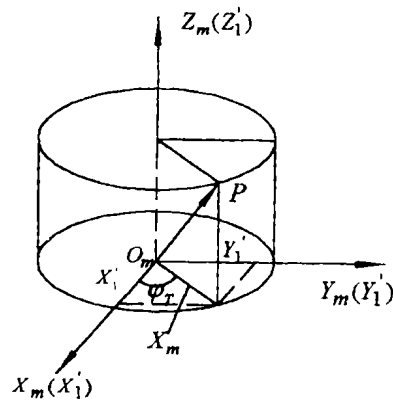


图 3 实测点在 S 种的坐标示意图

论坐标为:

$$X_m = \sqrt{X'^2_1 + Y'^2_1}; Z_m = Z'_1; Y_m = 0 \quad (5)$$

为此蜗杆需要转过的角度为(从起始位置沿顺时针方向):

$$\begin{aligned} \varphi_T &= \pi + 2 \cdot \arctg \frac{X_m - X'_1}{Y'_1} \\ \varphi_T &\in [0, 2\pi) \end{aligned} \quad (6)$$

测量时,保持测头球心在 $Y_m = 0$ 的平面内,沿 Z 向移动测头使得 $Z_m = Z'_1$,再沿 X 向移动测头使之与蜗杆齿面接触,读出球心的实际坐标值 $X_m^{(r)}$,则有各测点的偏差值:

$$\Delta X = X_m^{(r)} - X_m \quad (7)$$

2 测点的总数及其分布

从误差诊断的角度来看,希望有尽可能多的采样点,以获取更多的齿面偏差信息。但是测点的总数过多影响测量效率,考虑到最能反映蜗杆齿面的形状特征的,是构成其齿面的一条条螺旋线,每条螺旋线上均匀地选取 21 个点进行采样的办法^[3],对齿面进行坐标测量,如图 4 所示。根据这些测点处的齿面偏差,来诊断加工参数的调整误差。

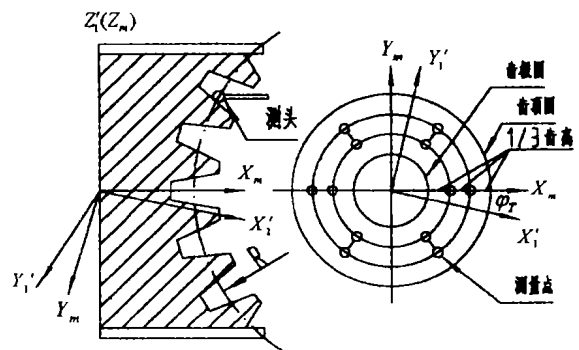


图 4 测点分布示意图

3 齿面偏差的评价准则与偏差模型的诊断求解

对于每一个测点 i , 存在一个偏差值 ΔX_i , 各测点 $|\Delta X_i|$ 的平均值越小, 则实际齿形与含参数误差的理论表达式代表的齿形就越接近, 此时得到的各参数误差就可视为加工时机床工具的调整误差, 于是有调整参数误差的诊断模型:

$$\min F = \min \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta X_i| \right), n \text{ 为测点总数} \quad (8)$$

由式(8), 可求得各调整参数误差的大小。

加工过程中所涉及的主要机床调整参数有 5 个, 这些参数对齿面形状的影响效果及影响程度是各不相同的, 有些参数的影响还彼此相关, 如果在机床调整参数误差修正补偿时, 对这些参数一一进行调整, 不仅会导

致操作过程十分繁琐, 而且事实上也没有必要^[4]。由于对齿面形状影响最大的因素是基圆半径和中心距的变动量^[5,6], 考虑到这 2 个参数与其它参数的相关性, 我们只选取这 2 个参数进行机床调整误差的诊断和补偿。

4 实验研究

实验所用的蜗杆为修型直廓环面蜗杆, 其几何参数如表 1 所示。各测点处的齿面偏差如表 2 所示。这里, 我们选用对称修型技术来对蜗杆进行修型加工, 目的是: 通过有意识地改变蜗杆加工时的中心距、传动比和基圆半径这 3 个参数, 使得蜗杆的齿厚变化情况与原始型蜗杆经充分跑合后的齿厚分布接近, 以达到改善啮合性能, 提高传动效率的目的。各修型参数的取值也列于表 1 中。

表 1 蜗杆的几何参数

中心距 A/mm	基圆半径 R_b/mm	头数 Z_1	蜗轮齿数 Z_2	模数 m	分度圆压力角 $\alpha/\text{度}$	蜗杆工作半角 φ_a	修形传动比 i'_{12}	修型中心距 $a + da/\text{mm}$	修型基圆半径 $r_b + dr_b/\text{mm}$
125	40	1	40	5.181	22.709	15.975°	42	130.548	42.142

表 2 误差补偿前的杆齿形偏差

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
第 1 线	0.080 1	0.072 0	0.081 0	0.082 0	0.076 0	0.070 8	0.077 1	0.074 7	0.076 3	
第 2 线	0.073 1	0.082 0	0.082 4	0.080 0	0.079 0	0.077 9	0.072 8	0.075 8	0.075 0	0.073 7
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0.070 5	0.073 3	0.070 4	0.076 0	0.066 0	0.066 7	0.068 1	0.078 5	0.768	0.830	0.070 7
0.072 5	0.071 3	0.068 7	0.073 6	0.067 9	0.066 8	0.070 2	0.064 4	0.063 3	0.072 1	0.061 2

根据坐标测量的结果, 分别采用 2 条螺旋线上的测点, 一条螺旋线上的测点以及第一条螺旋线上间隔取点所得到的测点对机床加工参数的调整误差进行诊断, 诊断结果如表 3 所示:

表 3 机床调整参数误差的诊断结果

被处理数据	测点数目	齿面偏差 /mm			机床工具误差 /mm	
		最大	最小	平均	Δr_b	Δa
两线测点	42	0.083 0	0.061 2	0.073 6	-0.039	0.059
单线测点(1)	21	0.083 0	0.066 0	0.074 7	-0.043	0.055
单线测点(2)	21	0.082 4	0.061 2	0.072 6	-0.042	0.056
单线间隔点	10	0.083 0	0.066 7	0.076 0	-0.029	0.062

对于 3 中的数据进行分析后我们可以得出以下几

个结论:

1) 单线测量与双线测量时机床工具调整参数误差的诊断结果相差不到 $5 \mu\text{m}$ 。对于常规机械加工而言, 这样的差别是很小的, 这说明在保证有足够测点的条件下, 需沿着工件表面的一条螺旋线进行测量, 便可以较为准确地诊断出机床加工参数的调整误差;

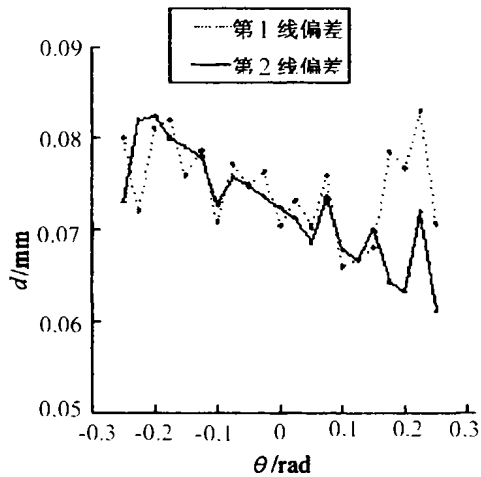
2) 为减少测量时间, 提高测量效率, 适当地减少测点是可以的, 但是, 随着测点数目的减少, 诊断结果变差。因此, 对于一般的中小型直廓环面蜗杆, 建议其测点数目不要小于 20 个。

按照单线测点(1) 的诊断结果, 将基圆半径增大 0.043 mm , 机床中心距减小 0.055 mm 后, 对蜗杆进行了修正加工。修正加工后各测点的齿面偏差见表 4。

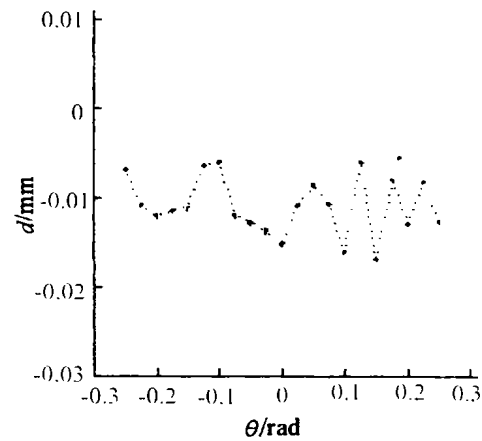
表 4 修正加工后的蜗杆齿形偏差

测点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔX_i	-0.006 8	-0.010 8	-0.012 0	-0.011 4	-0.01 1	-0.006 4	-0.005 9	-0.011 9	-0.012 7	-0.013 7
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
-0.015 1	-0.010 8	-0.008 5	-0.010 6	-0.016 0	-0.006 0	-0.016 8	-0.008 0	-0.128	-0.008 2	-0.012 6

可以看出,各测点的平均偏差由 $60 \sim 80 \mu\text{m}$ 降低到了 $10 \mu\text{m}$ 左右,蜗杆齿面的加工精度有了明显的提高,这说明用沿齿面特征线进行采点测量的方法来诊断蜗杆的加工误差是可行的。



(a) 修正前



(b) 修正后

图5 修正加工前后齿面偏差的分布情况

5 结论

利用误差补偿原理,由直廓环面蜗杆实际齿面坐标测量的结果,推断出机床加工参数的调整误差,通过同一台机床对蜗杆进行补偿调整误差后的修正加工,明显地降低了蜗杆的齿面偏差,在批量生产的条件下,低成本地提高了直廓环面蜗杆的加工精度,由于加工蜗轮所用的滚刀和蜗杆具有相同几何外形,因而本文所提出的方法也可以用于蜗轮滚刀的高精度加工。数据分析的结果还表明,在保证有充足测点的条件下,只需沿着工件表面的一条螺旋线进行测量,便可以较为准确地诊断出机床加工参数的调整误差,这对于提高蜗杆的检测效率是有意义的。

参考文献

- [1] 秦大同. 包络环面蜗杆基于坐标测量的高精度制造方法[J]. 机械工程学报, 1997, 33(1): 59-65.
- [2] F.L. LJTVIN. Identification and Minimization of Deviation of Real Gear Tooth Surface [J]. Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design, 1991, 113: 22-26.
- [3] 梅向明, 黄敬之. 微分几何[M]. 高等教育出版社, 1997.
- [4] 吴序堂. 齿轮啮合原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [5] 齐麟, 张亚雄. 蜗杆传动设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [6] 秦大同, 颜佳. 平面包络环面蜗杆加工误差诊断及提高制造精度的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1996.

Application of Error Compensation Methods in High Precision Machining of Globoid Worm

QIN Da-tong, JIA Chen-ping, YANG Chang-qi

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To the question how to improve the machining precision of globoid worm at an easy rate, a method that uses coordinate measurements of real tooth surface of globoid worm is proposed. It can determine the real applied machine tool settings. The deviation of the real tooth surface from the theoretical one, can be indentified by the method. The deviation can be minimized by correction of the machine tool settings, the machining precision of globoid worm be improved by the same machine. Validity of the method is verified by succeeding manufacturing experiment. On the other side, only one helix is needed to be measured, then the error of machine tool settings can be identified under the condition of adequate measured points, so the measured efficiency of worm is improved.

Key words: globoid worm; surface deviation; coordinate measurement; precision machining

(责任编辑 成孝义)