

数控成形砂轮磨齿机的在机测量方法研究*

高峰^{1,2}, 李艳¹, 田沙², 黄玉美¹, 郝来成², 王俊岭²

(1 西安理工大学机械与精密仪器学院 西安 710048;

2 陕西秦川机械发展股份有限公司 宝鸡 721009)

摘要: 在机测量技术可以在线检查工件的质量,一方面充分利用了良好的数控资源,另一方面避免了工件因检测而反复装夹、安装基准变化等因素对加工精度、效率、检测精度等的影响,保证了加工精度,提高了生产效率,节约了时间,以较低的成本及时地检测出现的误差,并迅速得以修正。为此,提出了利用数控成形砂轮磨齿机高精度数控轴实现齿轮精度检测的在机测量方法。基于数控磨齿机的回转运动(C 轴)和径向进给运动(X 轴)形成理论渐开线,建立了在机测量的数学模型,借助于高精度测头获取机床伺服轴的运动位置,最后经过综合解析得到测量结果,实现了各项齿轮误差的在机测量。测量实验结果同高精度齿轮测量仪进行对比后表明该方法有效可行。

关键词: 数控磨齿机; 齿轮误差; 在机测量; 高精度测头

中图分类号: TG659 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 460.35

Study on the on-machine measurement method of NC wheel gear form grinding machine

Gao Feng¹, Li Yan¹, Tian Sha², Huang Yumei¹, Hao Laicheng², Wang Junling²

(1 School of Mechanical and Instrumental Engineering, Xi'an, 710048, China;

2 Qinchuan Machine Tool Group Co., Ltd., Baoji 721009, China)

Abstract: On-machine measurement technology can on-line inspect the quality of workpieces. On the one hand, it can take full advantage of good NC resources, on the other hand it can eliminate the effects of inspection operation on processing accuracy, efficiency and inspection precision due to repeated fixing, variation of mounting reference. The technology can guarantee working accuracy, increase production efficiency, save time, timely detect occurred errors and modify the processing parameters with low cost. In order to utilize the NC motion axis with high accuracy adequately, an on-line gear measurement method was presented and its mathematic model was deduced based on theoretical involute formed from the rotatory motion (C axis) and radial feeding motion (X axis) of the CNC machine tool. The on-machine measurement of various errors of the gear is fulfilled and the detection data are acquired by a high precision probe; and the measurement results are obtained through synthetical analysis. Compared with high precision gear gauge, the experimental results are verified, which shows the feasibility and efficiency of the proposed method.

Key words: NC gear grinding machine; gear error; on-machine measurement; probe with high precision

1 引言

现今,信息技术已经成为推动科学技术和国民经济

高速发展的关键技术。如何利用先进的信息技术来提升、改造我国的传统制造业,实现生产力跨越式发展的战略结构调整,是装备制造业面临的一项紧迫任务。采用适度先进的信息化数字测量技术和产品来迅速提升装备

收稿日期:2007-01 Received Date: 2007-01

* 基金项目:国家科技攻关计划项目(2003BA214C)资助

制造业水平,是当前一个重要的发展方向。数控机床是机电一体化的数字控制自动化设备,三坐标测量机和三维扫描仪的发展和应用也日益广泛,虽其性价比不如数控机床,但两者的系统原理基本一致。由于数控机床的功能比三坐标测量机强大得多,且数控系统正朝着高精度、高速度、多功能、智能化及开放性方向发展,使数控机床具有一定精度的在机检测功能是可行的,从而在某种程度上可以取代三坐标测量机的功能。

本文针对数控成形砂轮磨齿机的在线测量方法进行了深入地研究,提出了利用数控机床的回转运动(C 轴)和径向进给运动(X 轴)形成理论渐开线,推导出了测量的数学模型,开发了具有良好人机界面的测量软件系统;利用磨齿机现有的运动轴,完成了对渐开线齿轮(包括直齿轮和斜齿轮)的齿形、齿向及齿距等各项误差的在机测量实验;利用测量数据对各项误差进行了综合分析后得到测量结果,并通过高精密的齿轮测量仪对实验结果进行了验证,对比结果表明本文所提出的齿轮在线测量方法有效可行。该技术在秦川机械发展股份有限公司的YK73125型数控成型砂轮磨齿机上得以实际应用,使该机床除了具有齿轮磨削功能外,还可以实现对齿轮各项误差的在机自动测量。

2 测量原理及数学模型

2.1 测量方案

根据渐开线齿形的法向极坐标方程 $\rho = r_b\varphi$ 可以建立起渐开线齿形误差的法向极坐标测量数学模型,也可以根据渐开线齿形的直角坐标参数方程建立起渐开线齿形误差的直角坐标测量数学模型,所以渐开线齿轮齿形误差的测量主要有法向极坐标测量法和直角坐标测量法2种方式。

对于YK73125型数控成形砂轮磨齿机(结构布局示意图如图1所示),主要工作轴有 X 、 Y 、 Z 、 A 、 C 、 W 共6个数控轴:立柱径向运动轴 X ,砂轮齿向运动轴 Z ,滑座螺旋角旋转轴 A ,工件分度轴 C ,砂轮轴向进给轴 Y 和砂轮修正轴 W 。

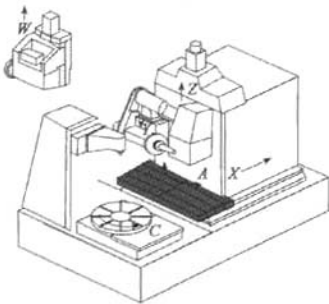


图1 机床结构布局示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the machine structure

在机测量系统中,采用三维触发式测头,测头安装在砂轮架上,如图2所示,随砂轮架可以沿机床的 X 、 Y 和 Z 轴运动。齿轮安装在工作台上,实现回转运动,即 C 轴的运动。 Y 轴和 W 轴是用于控制金刚滚轮和砂轮进行砂轮修形,运动范围较小。因此,在机测量方法不能采用直角坐标法进行测量,也不能采用法向极坐标方式进行测量。另外,由于利用机床的伺服运动轴进行测量,测量时机床的伺服运动误差会直接影响测量的精度,所以应尽可能利用最少的伺服运动轴完成测量以保证测量精度。

因此根据齿轮齿形误差的测量原理和YK73125的特点,如何利用机床的回转运动(C 轴)和径向进给运动(X 轴)形成理论渐开线并进行齿形误差的在机测量是本文的研究重点。

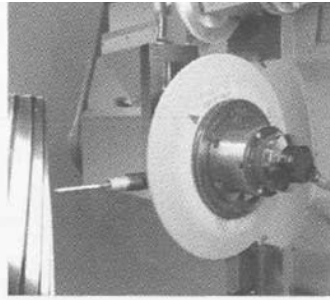


图2 测量传感器安装图
Fig. 2 Setting of the measurement sensor

2.2 测量系统的坐标系

根据YK73125机床的结构布局,建立其测量系统的坐标系如图3所示。

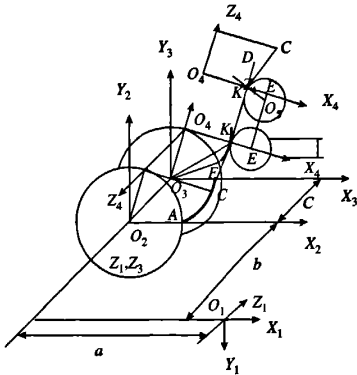


图3 测量系统的坐标系
Fig. 3 Coordinate system of the measurement system

图3中各坐标系定义如下:
 $\Sigma O_1(O_1 - X_1, Y_1, Z_1)$:机床坐标系,由于测头固定在机床的运动部件砂轮上,所以也是测头所在坐标系。
 $\Sigma O_2(O_2 - X_2, Y_2, Z_2)$:齿轮端面坐标系。原点 O_2

定义在齿轮的右侧面(安装后对操作者而言)基圆的中心。

$\Sigma O_3(O_3 - X_3, Y_3, Z_3)$: 距齿轮端面距离的为 c 的端截面坐标系, 也是要测量齿形误差所在的端截面。原点 O_3 定义在齿轮的端截面基圆的中心。

$\Sigma O_4(O_4 - X_4, Y_4, Z_4)$: 在 $X_3O_3Y_3$ 端截面内通过被测点 K 点的法平面坐标系。原点 O_4 定义在齿轮的端截面基圆与法平面的切点处。 Z_4 轴即为法平面与基圆柱的切线。

图3中各关键点说明如下:

A: 端面内渐开线 AC 的起始展开点。

B: 距端面距离为 c 的端截面内渐开线 BK 的起始展开点。

K: 在端截面内渐开线 BK 上的一被测点。

C: 过 K 点的法平面与渐开线 AC 的交点。

O_3 : 测头球心。

曲面 $ABKC$ 为齿轮的一个齿面, 即渐开面。

图3中各参数定义如下:

a : ΣO_1 与 ΣO_2 沿 X_1 方向的距离。

b : ΣO_1 与 ΣO_2 沿 Z_1 方向的距离。

c : ΣO_2 与 ΣO_3 沿 Z_2 方向的距离。

α_K : 为 $\angle KO_3O_4$, 也是齿面上 K 点的压力角。

θ_K : 为 $\angle KO_3B$, 即齿面上 K 点处的渐开角。

φ_K : 为 $\angle O_4O_3B$, 即齿面上 K 点处的展开角。

r_b : 基圆柱半径。 $r_b = O_3O_4 = O_2A$ 。

β_b : 基圆柱螺旋角。 $\beta_b = \angle CKD$ 。

2.3 齿形误差的测量方法

对于齿轮上任意端截面内给定的一个齿面渐开线 BK , 根据齿形误差的定义, K 点的齿形误差主要是由于加工过程中实际的 K 点的曲率半径(K 点沿渐开线的法线到基圆的切点 O_4 之间的距离)与理论上的曲率半径不相等造成的, 因此要测得任意点 K 点的齿形误差, 只要测得 K 点的实际曲率半径, 将其与理论上的曲率半径进行比较, 其差值即为 K 点的齿形误差。

根据齿形的法向极坐标方程, 任意点 K 点的齿形误差可以用下式表示:

$$\Delta\rho = r_b\Delta\varphi \quad (1)$$

由于测头为球形测头, 要测量 K 点的齿形误差, 测头与渐开面必须在 K 点相切, 为此需要将传感器测头的球心定位在渐开面上 K 点的法平面内。另外, 由渐开面的几何构成法及特点, 测头还须与 KC 在 K 点相切。因此测头球心 O_3 就在通过 K 点的法平面 $X_4O_4Z_4$ 内且在 KC 的垂线 KO_3 上, 如图3所示。

由于传感器安装在砂轮架上, 其沿 Y 轴的运动行程不能满足渐开线上任意点展开长度的要求, 所以只能利用 X 轴和 Z 轴的运动完成上述测头的定位要求。当测

量不同的 K 点时, 先通过 C 轴的运动使被测点 K 点的 Y 坐标转到与测头相切所要求的 Y 坐标处, 然后再计算出测头的球心的 X 坐标和 Z 坐标。

测量时将测头中心定位在 O_3 点, 绕机床的 C 轴转动齿面, 使 K 点与测头相接触并产生触发信号, 由数控系统记录下触发时刻的 C 轴转角, 并与理论渐开线展开角比较, 由式 $\Delta\rho = r_b\Delta\varphi$ 即可得测点 K 处的展开长度偏差, 即该点的齿形误差。

2.4 测量原理

从齿形误差的在机测量方案分析中得知, 要测得齿面上任意一点 K 点的齿形误差, 首先要使测头定位在如图3中所示的 O_3 点, 因此, 下面以齿轮的右齿面为对象对测头的定位进行解析计算。

2.4.1 测头在坐标系 ΣO_4 中的表示

被测点 K 点在齿轮的任意被测端截面 $X_3O_3Y_3$ 内, 过 K 点的齿面的法平面即为平面 $X_4O_4Z_4$ 内, 所以 K 点在坐标系 ΣO_4 中的坐标 4K 为:

$${}^4K = \begin{Bmatrix} {}^4K_x \\ {}^4K_y \\ {}^4K_z \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_b\varphi_K \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

由前述分析, 法平面与齿面的交线 KC 为一直线, 测头的中心应在法平面内且在过 K 点与直线 KC 的垂线上。所以, 测头中心 O_3 在坐标系 ΣO_4 中的坐标 4O_3 为:

$${}^4O_3 = \begin{Bmatrix} {}^4O_{3x} \\ {}^4O_{3y} \\ {}^4O_{3z} \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} {}^4K_x + r_0\cos\beta_b \\ 0 \\ \pm r_0\sin\beta_b \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_b\varphi_K + r_0\cos\beta_b \\ 0 \\ \pm r_0\sin\beta_b \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

2.4.2 测头在坐标系 ΣO_3 中的表示

利用坐标转换, 将 4O_3 变换到坐标系 ΣO_3 中, 得 3O_3 :

$${}^3O_3 = \begin{Bmatrix} {}^3O_{3x} \\ {}^3O_{3y} \\ {}^3O_{3z} \\ 1 \end{Bmatrix} = {}^3T_4 \begin{Bmatrix} {}^4O_{3x} \\ {}^4O_{3y} \\ {}^4O_{3z} \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_b\varphi_K\cos\gamma_0 + r_0\cos\beta_b\cos\gamma_0 - r_b\sin\gamma_0 \\ r_b\varphi_K\sin\gamma_0 + r_0\cos\beta_b\sin\gamma_0 + r_b\cos\gamma_0 \\ \pm r_0\sin\beta_b \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

由于传感器安装在砂轮架上,所以传感器不能实现沿 Y_1 方向的运动,也就是说,传感器测头球心在机床坐标系中的 Y 轴坐标是固定的,设其中心离坐标系 ΣO_3 中 Y_3 轴方向的偏置量为 e ,为此,还需将齿轮连同测头作为一个整体绕坐标系 ΣO_3 的 Z 轴旋转一个角度 γ_0 ,最终使测头中心在坐标系 ΣO_3 的 Y 坐标等于偏置量 e 。即变换后的测头中心坐标 ${}^3O'_s$,满足下式:

$${}^3O'_{sy} = e \quad (5)$$

在该坐标变换过程中,由于坐标系 ΣO_4 是设置在齿轮上的,所以坐标系 ΣO_4 也一起作了旋转,因此上述的测头中心在坐标系 ΣO_4 中的位置不会发生变化。

变换后的测头中心在 ΣO_3 中坐标 ${}^3O'_s$ 为:

$${}^3O'_s = \begin{Bmatrix} {}^3O'_{sx} \\ {}^3O'_{sy} \\ {}^3O'_{sz} \\ 1 \end{Bmatrix} = {}^3T \cdot {}^3O_s = \begin{Bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} {}^3O_{sx} \\ {}^3O_{sy} \\ {}^3O_{sz} \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

由式5和式6的第2行方程,得:

$${}^3O_{sx} \cdot \sin \gamma + {}^3O_{sy} \cdot \cos \gamma = e \quad (7)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{e}{\sqrt{{}^3O_{sx}^2 + {}^3O_{sy}^2}} - \arctan \frac{{}^3O_{sy}}{{}^3O_{sx}} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6),可解得 ${}^3O'_s$ 。

2.4.3 测头在坐标系 ΣO_1 中的表示

将坐标系 ΣO_1 沿其 X 轴负方向移动距离 a ,再沿其 Z 轴的正方向移动距离 b ,然后绕其 X 轴旋转 180° 得坐标转换矩阵 1T_2 ;将坐标系 ΣO_2 沿其 Z 轴负方向移动距离 c 得坐标转换矩阵 2T_3 。将 ${}^3O'_s$ 按式(9)变换,可得到 ${}^1O'_s$ 在机床坐标系 ΣO_1 中的坐标,即 ${}^1O'_s$:

$${}^1O'_s = {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3O'_s \quad (9)$$

在齿形误差的测量中,利用 ${}^1O'_s$ 定位测头中心,转动齿轮,使其右齿面与测头接触,接触点即为齿面上的 K 点,通过齿轮实际转过的角度与其理论角度比较,由式 $\Delta p = r_s \Delta \varphi$ 即可得测点 K 处的展开长度偏差,即该点的齿形误差。

3 在机测量实验及结果

根据本文所提出的齿轮在机测量方法在数控成型砂轮磨齿机上一试磨后的斜齿轮进行了误差测量,并将该齿轮在PNC60齿轮测量仪上进行了验证,其结果如表1所示,数据报表如图4所示。

表1 斜齿轮测量精度对比

Table 1 Comparison of measurement accuracy for helical gear

		PNC60 测量结果			在机测量结果		
		1号齿	2号齿	3号齿	1号齿	2号齿	3号齿
左齿面	fH α	-0.7	3.3	0.4	1.7	5.7	0.7
	F α	4.9	6.5	5.3	6.8	12.8	7.5
	fH α	5.1	5.2	5.1	6.2	7.3	7.2
右齿面	fH α	8.2	10.4	8.7	8.4	11.6	9.8
	F α	7.9	10.2	8.6	9.6	13.7	11.5
	fH α	4.3	3.8	4.2	2.7	3.9	4.4

注:齿轮参数: $m_n = 5, Z = 65, \beta = 12^\circ 14' 20''$ 单位: μm

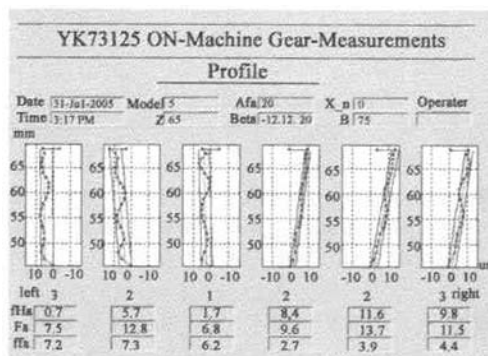


图4 在机测量结果报表

Fig. 4 Report of the on-machine measurement results

4 结 论

本文所提出的在线测量方法通过测量某一端截面内各齿的齿廓线,可以得到齿形误差。在某一端截面内探测出各齿齿廓线与分度圆交点的坐标值,就可以计算出周节偏差和周节累积误差。为了得出齿向误差的值,需要探测出各齿齿廓面与分度圆柱面的交线。

该在机测量方法使测量系统和数控机床集成为一体,不但可以充分利用数控机床的高精度运动功能,还可在工件试磨后马上进行在机检测,测量信息处理后能反馈至机床,及时修正加工参数。特别有利于大型、重型齿轮和大批量齿轮的成形磨削加工,有效地提高了生产率,节省了购置检测设备的费用。

参考文献

- [1] 陈欢,章青. 多轴数控机床在线检测软件包的开发[J]. 中国制造业信息化, 2003, 32(2): 97-99.
- CHEN H, ZHANG Q. Development of inspection system used for the multi-axis nc machine tools[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2003, 32(2): 97-99.

- [2] 王燕玲,李文龙,商向东. 大型齿轮在机测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 193-194.
WANG Y L, LI W L, SHANG X D. Research on on-machine measuring system of large gears[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4): 193-194.
- [3] 石照耀,叶勇. 广义极坐标法测量渐开线轮廓误差的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(2): 140-142.
SHI ZH Y, YE Y. Research on the generalized polar-coordinate method for measuring involute profile deviations[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(2): 140-142.
- [4] 李文龙,商向东. 大齿轮在机测量关键技术分析[J]. 工具技术, 1997, 31(11): 32-34.
LI W L, SHANG X D. Analysis on key techniques of measuring large gears in situ[J]. Tool Engineering, 1997, 31(11): 32-34.
- [5] 盛伯浩,杨晓军,华玉亮,等. 提高触发式测头在机检测精度[J]. 制造技术与机床, 1997(9): 21-23.
SHENG B H, YANG X J, HUA Y L, et al. Improving on-machine testing accuracy of probe[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1997(9): 21-23.
- [6] 李郝林,陈颀,华俭. 齿轮成型磨削齿形误差在线测量技术[J]. 计量学报, 2005, 26(2): 125-127.
LI H L, CHEN S, HUA J. On-line measuring technique for total profile error in gear molding milling[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(2): 125-127.
- [7] 刘彦臣,王彪. 利用数控设备进行在线测量的探讨[J]. 机械管理开发, 2004(3): 23-24.
LIU Y CH, WANG B. Research on online measurement with nc machine tool[J]. Mechanical Management and Development, 2004(3): 23-24.
- [8] MOU J, RICHARD L C. A method for enhancing the accuracy of cnc machine tools for on-line machine inspection[J]. Journal of Manufacturing System, 1992, 11(4): 11-18.

作者简介



高峰, 1992 年于西安理工大学获得学士学位, 1995 年于西安理工大学获得硕士学位, 2001 年于西安理工大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为数控装备控制及检测。

E-mail: gf2713@xaut.edu.cn

Gao Feng got his bachelor degree in 1992, master degree in 1995 and doctor degree in 2001 all from Xi'an University of Technology, he is now an associate professor in Xi'an University of Technology and majoring in control and inspection of NC equipment.

E-mail: gf2713@xaut.edu.cn