第50卷第2期
2010年3月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 50, No. 2
Mar. 2010

文章编号：1000-8608(2010)02-0198-04

复合材料薄壁回转体零件锥度在机测量系统研究

王永青*，林　盛，于　雷，贾振元

（大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室，辽宁 大连　116024）

摘要： 复合材料薄壁回转体零件(例如套筒类零件)是航天工程中的大型重要零件，几何参数的在机测量技术是保证这一类零件加工精度的有效手段. 研究了一种复合材料薄壁回转体零件锥度的在机测量方法，以高精度长度计和高速计数卡作为测量和采集设备，对加工后未拆卸工件的 X 和 Z 轴坐标及径向误差在机测量，提出了一种基于最小二乘法拟合与多母线均值的锥度计算方法；揭示了锥度误差产生的机理，并对锥度算法做了合理补偿. 测量结果表明，在机测量的锥度值与三坐标测量机测量结果相比在允许误差范围内，充分验证了测量方法的可行性和有效性.

关键词： 复合材料；薄壁；锥度；在机测量

中图分类号： TP29　　**文献标志码：** A

0　引　言

有机纤维增强树脂基体复合材料薄壁回转体零件(例如航天飞行器头锥类套筒零件)是航天工程中的大型重要零件，其成本高、制造周期长、产品合格率要求高. 该类零件刚度差、易变形，加工后难以保证其几何精度. 与其他套筒零件的配合安装时，不仅要求有较高的加工精度，其锥度也是影响配合精度的重要指标之一.

在机测量是保证零件锥度的有效手段，实际生产中，大多数大型复合材料薄壁回转体零件加工机床尚无在机锥度测量设备，主要依赖专用测量设备(如三坐标测量机)脱机测量其锥度误差，测量成本高，周期较长，且一旦测出不合格品，返回再修复带来装夹误差，很难再得到合格产品，因此，对大型复合材料薄壁回转体零件在机锥度测量设备的开发十分必要.

目前常用的在线几何参数测量方法有接触式测量和非接触式测量[1]两种. 非接触式测量包括基于激光位移检测技术[2]、基于双目成像检测技术[3]和基于超声波测量法[4]等；接触式测量包括基于触发式测量[5]等. 非接触式测量影响因素较多，且精度不高，根据现场加工环境和测量要求，选用接触式测量技术可保证锥度测量精度.

本文从实际生产需要的角度出发，开发研制复合材料薄壁回转体锥度在机测量系统，以实现零件加工后在机锥度测量；并将测量结果与三坐标测量机测量结果进行分析比较.

1　测量系统的总体方案

测量控制系统总体构成如图 1 所示.

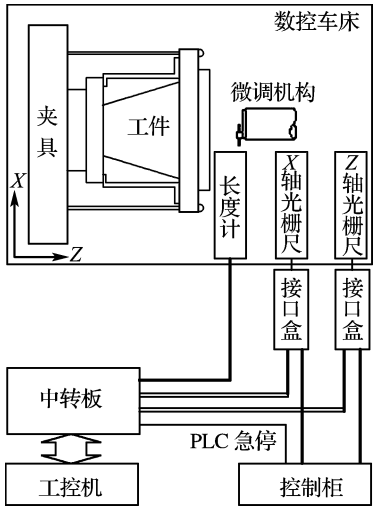


图 1　测量控制系统总体构成图

Fig. 1　Composing of measurement and control system

收稿日期： 2008-01-20；　**修回日期：** 2010-01-25.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(50575035).
作者简介： 王永青*(1969-)，男，教授，博士生导师.

系统以现有加工设备 CKW61125 型数控车床为基础，在刀杆端增加可拆卸高精度长度计、长度计专用夹具及微调机构，测量精度较高，经倍频之后分辨率可达到 1 μm.

测量时，卸下刀具，利用专用长度计微调机构将长度计固定在刀具的位置. 工件处于静止状态，长度计沿工件母线方向依次测得若干点. 以全闭环数控车床光栅尺（X 向型号 LS486C ML750，Z 向型号 LB382C ML5440）为坐标检测基准，位置计数接口电路实时读入光栅尺的数据和测头的位移量，通过中转板由工控机完成数据存储、数据转换与处理，并最终得到工件 X、Z 坐标.

圆台体上、下两底圆的直径差与锥体高度的比值，即为锥度. 理想条件下，利用光栅尺反馈数据，测得工件不在同一平面内的任意两点，即可求出工件锥度. 但实际测量中，包含工件变形、设备误差等诸多不利因素，为减小各种误差对测量结果的影响，测量单条母线上多点，利用最小二乘法拟合得到单母线斜率，并采用多母线取锥度均值的方法最终得到工件锥度.

2　测量方法与数据处理

2.1　测量方法

CKW61125 型数控车床光栅尺反馈数据仅能提供平面坐标，若利用 C 轴旋转角度建立空间坐标系，将重复引入安装误差和主轴旋转误差，对测量结果影响较大，故系统提出如下测量方法，并利用线性最小二乘法拟合测量数据. 如图 1 所示：

(1)测量一条母线上的多个点；

(2)用最小二乘法拟合多个测量点，求出理想母线方程；

(3)旋转长度计，按照(1)、(2)步骤测量多条母线；

(4)求多条母线锥度的均值，得到工件的实际锥度.

与其他评定方法相比，测量数据误差较小，试验结果证明可达到要求的测量精度.

2.2　数据处理

如图 2 中所示，设母线 L_1 小端一点 P_1 测得数据为 $(X_1, Z_1, \Delta X_1)$，同一条母线上按测量方向，每间隔 ΔZ 再测量一点 $(X_2, Z_2, \Delta X_2)$，…，$(X_i, Z_i, \Delta X_i)$. 设 L_1 母线方程为 $X = aZ + b$，其中 a 为母线的斜率（即锥度），利用最小二乘法拟合 L_1 母线锥度，得到

$$a_1 = \frac{n\sum(X_i + \Delta X_i)\cdot Z_i - \sum(X_i + \Delta X_i)\cdot\sum Z_i}{n\sum Z_i^{\,2} - (\sum Z_i)^2} \tag{1}$$

式中：n 为单条母线的测量点数. 分别测量多条母线 $L_1, L_2, \cdots, L_i$，求均值得到工件实际锥度

$$a = \frac{a_1 + a_2 + \cdots + a_i}{i} \tag{2}$$

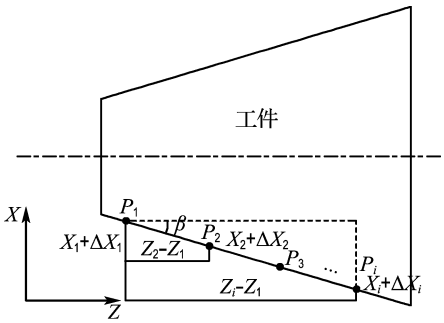


图 2　锥度的测量原理

Fig. 2　Principle of taper measurement

3　误差分析与补偿

测头测量过程中，来自数控机床内部的各种误差直接影响测量结果，包括 X 轴与 Z 轴的垂直度误差、导轨变形产生的误差、导轨的扭转误差、X 轴与 Z 轴比例控制系数不匹配造成的误差、测头安装误差、光栅尺误差、主轴回转误差和工件的安装误差等.

3.1　机床 X 轴和 Z 轴的垂直度误差

机床的 X 轴和 Z 轴的垂直度误差会影响工件加工后的锥度，若垂直度误差为 θ_1，则零件加工的锥度误差为

$$e_c = \arctan\left|\frac{X_2 - X_1}{Z_2 - Z_1}\right| - \arctan\left|\frac{X_2\cos\theta_1 - X_1\cos\theta_1}{Z_2 - Z_1}\right| \tag{3}$$

3.2　机床 Z 轴导轨扭转误差

数控车床 Z 轴导轨扭转会造成工件的锥度误差，如图 3 所示，若扭转角度为 θ，则引起径向误差值可以近似表示为

$$e_n = \theta\cdot L_h \tag{4}$$

其中 L_h 为工件中心轴线到导轨的平均距离. 导轨扭转误差是引起径向尺寸变化的主要因素，亦是影响锥度测量的主要误差之一.

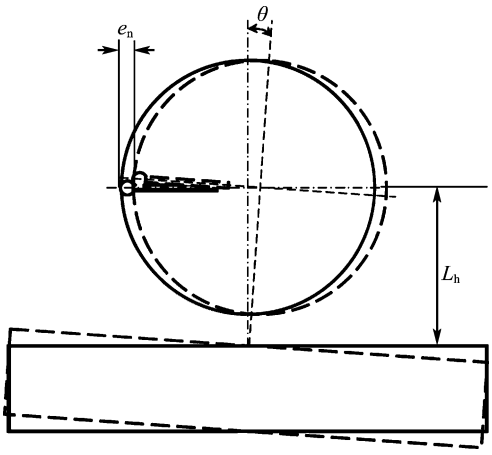


图 3 导轨扭转引起的误差分析

Fig. 3 Error analysis of guideway distortion

3.3 测头安装误差

若测头触点不在工件水平轴平面内，如图 4 所示，触点至工件中心轴线安装误差为 δ，则 δ 造成的半径测量误差为

$$e_1 = R - R' = R - \sqrt{R^2 - \delta^2} \tag{5}$$

该安装误差不会造成 Z 轴方向上的测量误差.

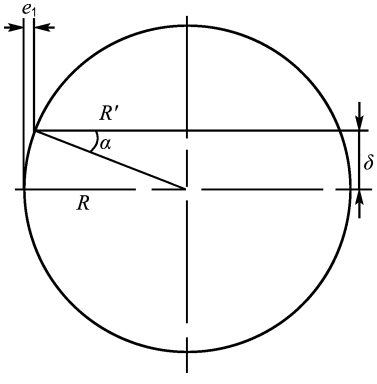


图 4 测头安装误差分析

Fig. 4 Error analysis of length gauge installation

若 P_1 点的 Z 坐标记为 Z_1，半径为 R_1，该项半径误差为 e_{11}；P_2 点的 Z 坐标记为 Z_2，半径为 R_2，该项半径误差为 e_{12}，则该项误差引入的锥度误差为

$$e_2 = \arctan\left|\frac{R_2 - R_1}{Z_2 - Z_1} - \frac{\sqrt{R_2^2 - \delta^2} - \sqrt{R_1^2 - \delta^2}}{Z_2 - Z_1}\right| = \arctan\left|\frac{e_{12} - e_{11}}{Z_2 - Z_1}\right| \tag{6}$$

导轨扭曲及变形产生的误差是影响测量精度的最主要因素[6]. 实际测量中，已通过离线检测上述各类误差，并利用软件予以补偿修正. 理论误差补偿公式：

$$e = e_c + e_n + e_1(e_2) \tag{7}$$

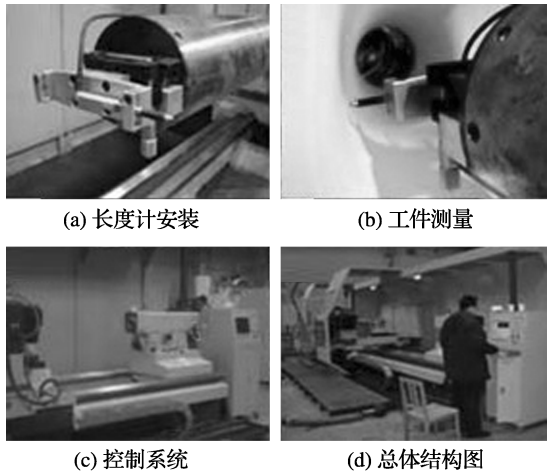
3.4 零件变形对测量精度的影响

薄壁回转体零件变形主要是在零件装夹过程中夹紧力产生的变形. 当零件处于在机状态(零件加工完成而未从夹具上拆卸下)时，零件的夹持固定状态与零件装配后的最终实际工作状态接近，不会在此状态下产生进一步的较大变形，因此，夹紧力产生的变形对测量结果影响较小，可以忽略.

4 实验验证与软件界面

以专用测量设备为基准，锥度测量误差不允许超过 ±18″. 该系统经过多次测量实验，修正参数与补偿数据，已完全达到实验要求的精度.

测量与设备结构示意图如图 5 所示；系统操作界面包括数据采集同步显示、数据存储、初始点设定和长度计报警等功能，如图 6 所示. 系统监测到测点压偏量超过额定值时会自动急停，以防止损坏工件或长度计，保障生产安全.



(a) 长度计安装 (b) 工件测量

(c) 控制系统 (d) 总体结构图

图 5 测量与设备结构示意图

Fig. 5 Diagram of equipment structure and measurement

图 6 软件操作界面

Fig. 6 Software operation interface

测量数据处理时，选择数据存储目录文件，可依次求出逐条母线的锥度，再求其均值. 系统数据处理软件界面如图 7 所示.

图 7　系统数据处理软件界面

Fig. 7　Software interface of data processing

5　结　论

(1)给出了最小二乘法拟合母线与多母线均值计算相结合的锥度测量方法，有效地消除了测量随机误差因素的影响.

(2)经过多次测量试验，测量结果与三坐标测量机测量结果进行对比，锥度测量误差在±18″之内，完全符合测量要求.

(3)解决了一类复合材料薄壁回转体内壁锥度精确和快速测量的难题，并为复合材料薄壁回转体外壁锥度测量等一系列相关问题的解决提供了重要参考.

参考文献：

[1] 丁　汉，朱利民，熊振华. 复杂曲面快速测量、建模及基于测量点云的 RP 和 NC 加工[J]. 机械工程学报，2003，**39**(11)：28-37

[2] 王世峰，赵　馨，佟守峰，等. 基于激光位移检测技术的螺纹检测仪研制[J]. 仪器仪表学报，2007，**28**(4)：755-759

[3] 张庆英，葛动元，岳卫宏，等. 基于会聚双目成像系统对圆锥类零件锥度测量的研究[J]. 武汉理工大学学报，2004，**28**(5)：698-701

[4] SHAWKY A M, ELBESTAWI M A. In-process evaluation of workpiece geometrical tolerances in bar turning [J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 1996, **36**(1): 33-46

[5] 盛贤君. 复杂型面天线罩精密测量与修磨控制技术研究[D]. 大连：大连理工大学，2003

[6] HEIMO I, KIMMO L K. Dynamic validation of on-line measurements: A probabilistic analysis [J]. **Measurement**, 2006, **39**: 335-351

Research on on-machine measurement system for taper of composite thin-walled revolution parts

WANG　Yong-qing*,　LIN　Sheng,　YU　Lei,　JIA　Zhen-yuan

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Large composite revolution parts (as jacket parts) are very important in aerospace engineering, so machining accuracy should be ensured by the technique of on-machine geometric parameters measurement. Then, an on-machine measurement method of the taper value is presented. Firstly, based on a high precision length gauge and a high speed counting-card, X coordinate, Z coordinate and radial error of the part are measured on-machine after processing. Secondly, a taper algorithm is proposed, in which least square and multi-generatrix mean value are used. Finally, the cause of taper error is revealed and all the errors are compensated to the taper value. Experimental results indicate that the taper value measured on the on-machine system agrees fairly well with the measured one on three-coordinate measuring machine, and the effectiveness and practicability of the method are fully verified.

Key words: composite; thin-walled; taper; on-machine measurement