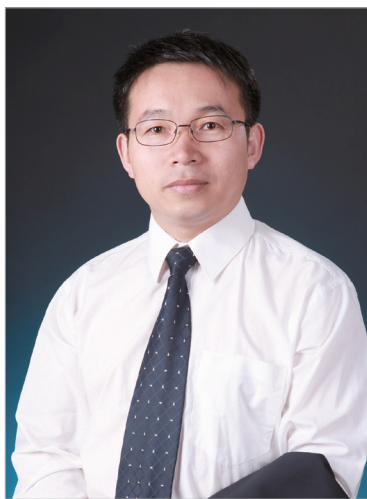


# 数控机床在线测量技术研究

## Online Inspection Technology Integrated With NC Machine Tools

哈尔滨工业大学机电工程学院 李建广 张利 王扬  
上海卫星工程研究所 李志慧



李建广

工学博士,教授。主要从事 CAD/CAM、加工过程仿真及优化、数字化制造技术等方面的研究,参加“863”、国防基础科研、总装备部、省市项目等多个课题的研究工作。获国家级教学成果奖二等奖 1 项,黑龙江省教学成果奖一等奖 2 项,发表论文 80 余篇。

随着航空、航天以及汽车等制造工业的快速发展,高精度、复杂大型零件的加工与精度评价成为业内关注的突出问题,通常这类工件产品需经过多次的加工—测量—修整,才能满足设计要求。数控机床作为一种高效、高精度的制造装备在制造企业中得到了广泛应用,而且正朝着高精度、高效率、开放化、智能化、复合化的方向发展。复合化的目标是尽可能地在—台机床上利用—次装卡完

数控机床在线测量技术是加工测量—体化技术的重要组成部分,可扩展数控机床的功能,有效地提高现有机床的使用价值,保证零件的加工质量。

成全部或大部分的加工任务,以保证工件位置精度,提高生产效率<sup>[1]</sup>。加之人们对工件加工的高精度、高效率的不断追求,与数控机床集成的在线测量技术在实际生产中受到广泛关注。

传统的离线测量方式,即采用拆卸移动工件的检测方式,涉及二次装夹定位问题,使得加工结果和测量结果的一致性差,导致生产周期延长、生产效率降低。拆卸移动工件的检测方式是阻碍数字化制造整体效率提高的主要原因<sup>[2]</sup>。在线测量,即加工与测量过程均在—设备上实施的检测方式<sup>[3]</sup>,工件经过—次装卡便可完成加工与测量工作,避免了二次装夹定位误差,可降低测量成本,减少生产辅助时间,提高生产效率和加工精度。数控机床在线测量技术具有采样速度快、精度高的特点,实现了工件的数字化数据采集和精度评价<sup>[4]</sup>。

与三坐标测量机(Coordinate Measuring Machining)相比,由于数控机床在线测量环境复杂,误差影响因素较多,但三坐标测量机价格昂贵,性价比与应用的广泛程度远不如数控机床<sup>[5]</sup>。因此在精度要求不是很高时,数控机床在线测量技术更具优势。

数控机床在线测量技术是加工测量—体化技术的重要组成部分,可以扩展数控机床的功能,有效地提高现有机床的使用价值,保证零件的加工质量<sup>[1,6,7]</sup>。因此,数控机床在线测量得到现代制造企业的重视和应用,具有重要的研究和应用价值,国内外研究人员针对此方面进行了大量的研究工作,并在实际中进行了推广和应用<sup>[8]</sup>。

### 机床在线测量组成结构

现代数控机床较之以前在开放性方面有了很大的提升,现代数控系

统良好的扩展性和兼容性使得一台数控机床兼具一定精度的三维坐标测量功能成为可能<sup>[6,9-10]</sup>。如果把机床与测量系统有机地集成起来,在零件加工的同时,又可以实现工件的在线测量。

数控在线测量系统组成主要包括硬件和软件两部分。类似数控加工系统,其硬件系统主要包括数控机床系统和测头系统;软件系统则是利用二次开发技术,实现类似于数控加工编程的在线测量编程,得到驱动数控机床实现测量的 NC 代码<sup>[11]</sup>。数控机床在线测量系统的原理示意图如图 1 所示。

数控机床在线测量系统(如图 2 所示)主要分为 2 种:一种为直接调用基本宏程序,而不用计算机辅助;另一种则根据机床数控系统提供的数控指令,用户开发编制应用系统随时生成检测程序,然后传输至数控系统中<sup>[8]</sup>。

在工业发达国家,测头基本上和刀具一样已成为数控机床不可或缺的基本备件,在机械制造领域中得到越来越广泛的应用。数控机床采用的测头主要分为 2 种:一种是以加工工件为测量对象,使用时安装在机床主轴上的工件测量测头;另一种是以刀具为测量对象,处于机床固定位置的刀具测量测头。通常,机床在线测量采用是工件测量测头,可手动测量或根据测量(宏)程序对工件进行自动测量<sup>[12]</sup>。数控在线测量系统是基于数控机床系统开发并集成测量系统实现的,其测量过程和加工过程十分相似。

尽管数控机床在线测量具有诸多优点,但现有的在线测量系统,大都是专用的,测量功能单一,不能满足加工零件的复杂性、多样性需求。在机床在线测量系统基础上,将其与 CAD 系统进行集成,经过 CAD 系统的二次开发,实现测量编程和仿

真验证,增大了数控机床在线测量的灵活性及工作范围,实现了设计 + 加工 + 测量(Design-Manufacturing-Inspection,简称 D-M-I)的集成。数控加工、测量与设计三者在不同阶段的集成示意图如图 3 所示。

## 机床在线测量过程

### 1 工作原理

在线检测系统中直接影响精度的关键部件是测头<sup>[6]</sup>,具有搜索前进的能力的触发式测头最为常用<sup>[7,13-14]</sup>,向数控系统提供触发信号以获得触发点的坐标<sup>[9,13]</sup>。测头系统最关键的一个功能是可生成程序中断指令,当测头测端与被测工件接触时,测头系统向数控机床发送一外部中断请求(该中断请求由测头触发信号提供)。当机床控制系统接收到中断后,便通过定位系统锁存此时测端球心的坐标值,以此来确定测端与被测工件接触点的坐标值。测头系统检测

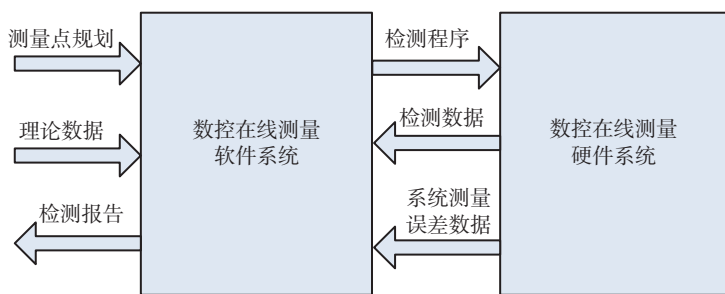


图1 数控机床在线测量原理图

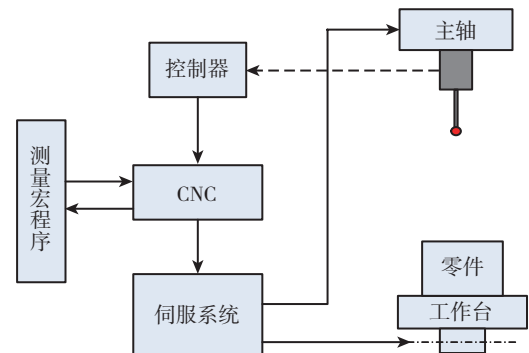


图2 数控机床在线测量系统<sup>[6]</sup>

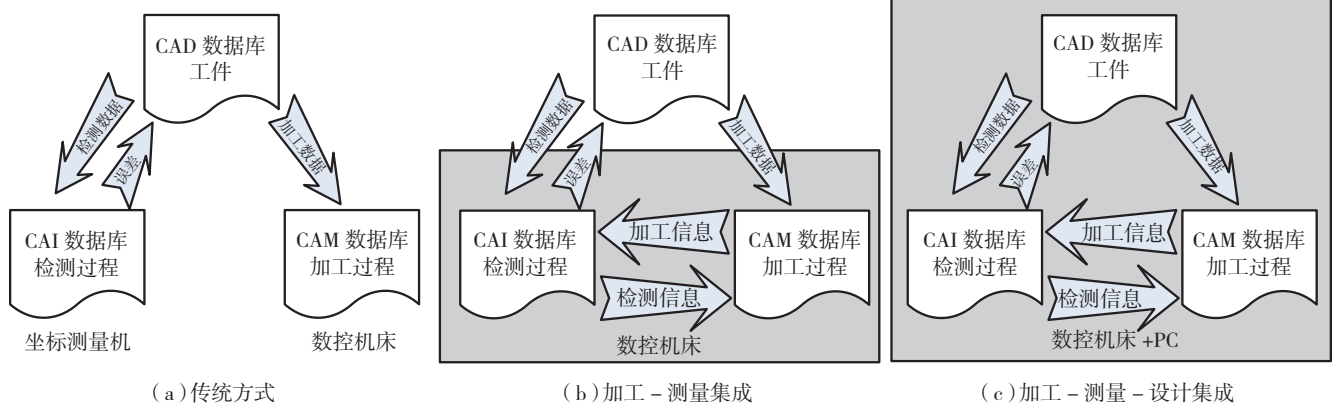


图3 数控加工、测量与设计关系示意图

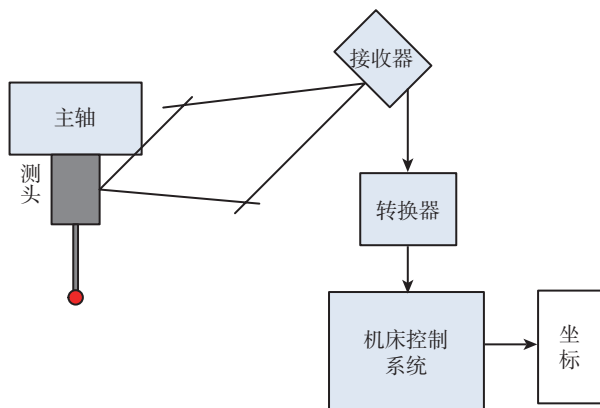


图4 测头系统检测过程简图

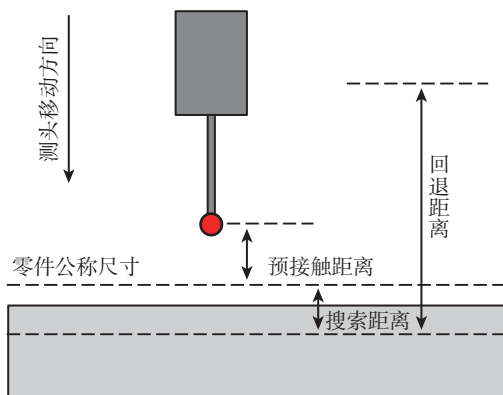


图5 测头运动关键点与工件关系

过程如图4所示。

接触式测头较其他测头拥有更高的测量精度,同时接触式测头由于结构简单、使用方便、制造成本低以及较高的触发精度等优点,在数控机床在线检测系统中被广泛应用。

在线检测运动是通过输入到数控系统中的数控检测程序的控制实现的。由于数控机床采用的数控系统不同,其控制方法和编程代码等有所差别。

## 2 测头定位

为使数控机床能够准确、高效、快速地完成每一次的在线测量,在一次测量任务中需多次测量触发。根据测头在一次测量过程中运动,需设定3种距离<sup>[15]</sup>,如图5所示。

(1) 预接触距离。该距离是指测头中心到被测工件表面公称尺寸上接触点的距离。在测头进入预接触距离前,测头快速运动。

(2) 搜索距离。该距离设定了测头从零件的公称尺寸开始沿进入被测零件材料内部方向的最大距离。如果测头在这段距离运动中触发,机床将锁定触发点的坐标。在搜索距离阶段,测头应以给定的测量速度运动。

(3) 回退距离。该距离是测头接触到被测表面后沿反方向回退的距离。测头接触被测表面后,为了避免移动过量而折断,测头需要反方向退出一段距离,同时回退距离必须足

够大,以保证测头能安全地到达下一个预接触点或定位点。在回退距离阶段,测头以回退速度退回。

为满足测头各个运动阶段的不同需求,在测量过程中对应了3种距离,包含3种速度,即定位速度、测量速度和回退速度。测量速度应取值较小,以减小测量值的误差,同时避免折断测杆。在测量过程中为提高测量效率,可以将定位速度和回退速度取值较大,从而保证以较快速度移动测头,减少测量时间。

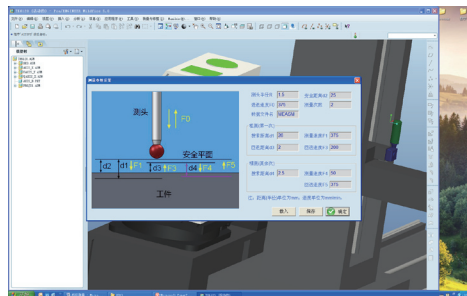
为避免测头在碰触到被测表面后仍向前运动而折断测杆,机床测量会在接收到触发信号之后将剩余行

程删除。剩余行程删除,即测头在已编程行程运动过程中接收到触发信号时,记下当前坐标值之后跳过未完成的动作,继续执行下一行代码。

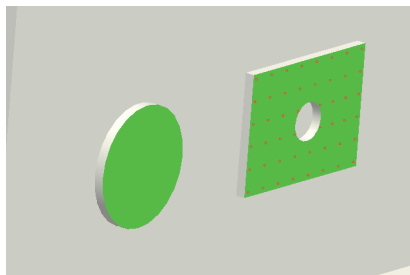
目前,数控系统一般均提供了基本的测量指令,或测量系统的开发单位或人员也会提供部分已封装好的测量指令供用户使用。

## 3 检测路径规划

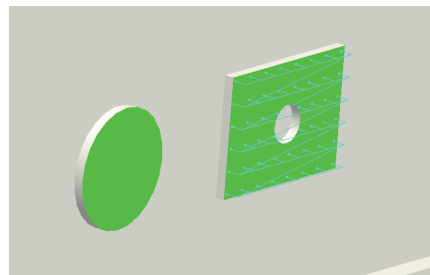
数控机床在线测量系统是一种通过采样来进行测量的系统<sup>[16]</sup>。因此采样点的数量和分布情况将直接影响测量结果,对自由曲面的测量尤为重要。对整个被测表面全部进行采样是不现实的,为提高测量结果可



(a) 测量参数设置



(b) 测量点规划



(c) 测量轨迹

图6 基于Pro/Engineer CAD环境的测量路径规划

信度,通常会采用增加检测点数目的方式,但获得高准确度的同时也会极大降低测量效率。因此如何规划高效、准确的检测路径成为关键所在。

机床在线测量在规划检测路径时,在满足测量精度要求的基础上尽可能提高测量效率,即在满足测量精度的前提下,以最短的测量路径检测最少的测量点。以圆柱面测量为例,把测头定位到型面的中心线上,采用四点测量方法便可以获得高精度的测量结果。该测量方法对内孔测量也同样适用,详细测量路径见文献[17]。

在路径规划要求的指导下,平面测量、凸台/凹槽测量以及角度测量等均已有的测量路径规划方案,详见文献[17]。

当进行复杂测量时,则编程人员需要对CAD系统进行二次开发,根据基本测量原理在CAD环境中进行人机交互测量路径规划和编程,图6为哈尔滨工业大学基于Pro/Engineer CAD环境进行二次开发进行人机交互所规划的测量点和测量路径。

## 测量误差分析

在任何一项测量中,由于各种因素的影响,所得到的测量值总会存在误差。为了使测量结果更精确地逼近真实值,需要对测量结果进行补偿,因此测量过程中影响测量精度的误差组成来源应当被仔细分析和考虑。

由于数控机床在线测量系统是以机床为母体,集成测量系统而生成的。所以数控机床加工过程中存在的误差在测量过程中也同样会影响测量精度。机床在线测量测量误差主要包括测头系统误差、机床运动部件定位误差、测量路径不合理造成的误差<sup>[16]</sup>,其中测头系统误差又分为测头静态误差、测头动态误差以及测头在机床上的安装误差等。

测头静态误差包括死区误差和

测头重复定位误差,它随着测杆长度、刚度以及接触压力的改变而改变。死区误差是指测头在接触工件后,测杆发生的弯曲变形量<sup>[18]</sup>。测头重复定位误差相对于死区误差相对较小,因此测头静态误差主要由死区误差决定。测头动态误差主要与测头检测时的接触速度以及数控系统采样间隔有关。

测头是通过与机床配套的刀柄安装机床主轴上,由于测头轴线与主轴轴线的不完全对中,存在测头的安装误差<sup>[3,19]</sup>,在多方向测量中造成测量误差。测头与主轴的不对中安装误差,可以通过测量前的测头偏心标定进行部分补偿。

由于数控机床零部件的制造、装配误差、伺服系统的跟踪误差以及间隙、摩擦等因素,机床各工作部件在进行测量运动时,会产生定位误差。

除此之外,测头的半径误差也是一个主要的误差来源,在数据处理时可通过测头半径补偿来消除<sup>[14]</sup>。但在实际测量中,情况较为复杂,测头半径误差将引入测量结果,在自由曲面的测量过程中,该项误差更为明显。

针对测量过程中诸多的误差来源,高效、高精度的误差补偿算法是亟待解决的一个关键问题。在实际应用中,可采用多次测量、误差补偿等减小测量误差,提高测量精度。

## 机床测量系统与CAD的集成

数控机床在线测量作为M-I模式的典型代表,极大地缩短了生产周期。但在实际应用中,由于并未与零件的设计模型相衔接,导致测量路径交互规划时存在诸多不便。此外,根据测量结果进行再加工时,会造成误差的累积。在实现D-M-I模式集成

后,可针对该项误差进行补偿<sup>[20]</sup>,从而进一步提高测量精度。

鉴于D-M-I模式相对于M-I模式的数控机床在线测量系统具有更高的精度和灵活性,针对结构复杂零件的加工、测量与修整,我们采用了D-M-I模式的数控机床在线测量与加工,以提高测量、加工精度。将PC机与数控机床相连,在PC机上主要完成CAD系统与CAI软件系统的集成,在数控机床床上完成NC系统与CAI的硬件系统集成,从而实现CAD/NC/CAI的集成,系统结构如图7所示。

下面以实例针对具体测量系统的实现步骤进行介绍。根据用户的需求,选用Pro/Engineer作为D-M-I模式的数控机床在线测量系统的CAD系统。通过在Pro/Engineer环境中建立数控机床模型和工件模型来模拟实际的加工测量环境,在该环境中进行测量轨迹和加工轨迹的规划和仿真验证。相关功能通过Pro/Engineer的二次开发进行实现,在Pro/Engineer中添加开发新功能菜单如图8。

该机床在线测量系统的操作步

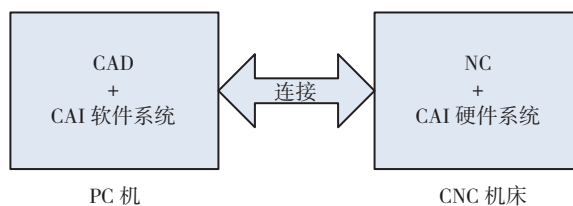


图7 D-M-I模式的测量系统结构

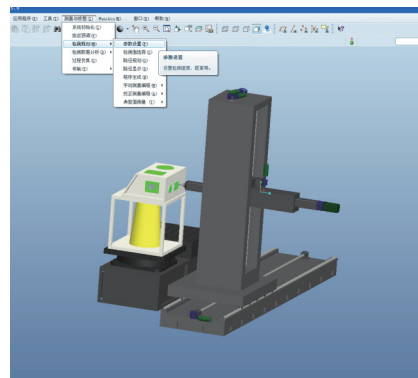


图8 基于Pro/Engineer的测量-加工轨迹规划环境

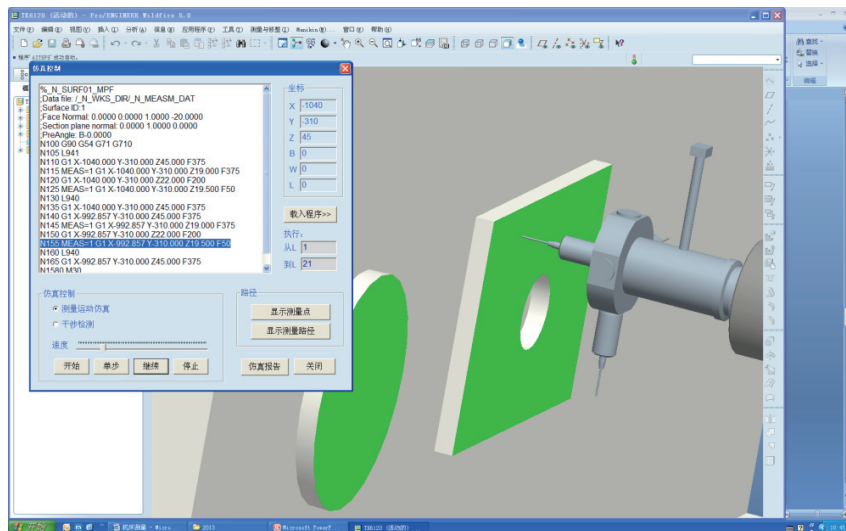


图11 测量过程仿真验证

骤为：操作者首先向虚拟数控操作环境中加载目标零件模型；随后进行虚拟操作环境初始化操作，其目的是建立虚拟操作环境下装配坐标系与实际机床坐标系之间的关系、各运动部件的变换矩阵；最后，操作人员根据功能菜单选择进行测量面选择、测量路径规划、测量过程仿真等操作。当需要修改被加工(测量)的零件时，只需将虚拟环境下的该零件激活，修改完成之后将整个虚拟环境重新激活，便可重新对其进行操作。该系统将 CAI 操作软件通过二次开发技术集成到 Pro/Engineer 环境下，使得 CAD 系统与 CAI 系统实现无缝连接。基于 Pro/Engineer 的虚拟测量环境构建，可实现实际操作过程的模拟，对测量或加工过程进行可靠性验证，如图 11 所示。

根据测量采集的坐标数据，按照评价被测量面的评价方法，可计算出评价指标，如图 12 所示。

## 结论

测头系统与数控机床集成构成的机床在线测量系统，可以明显缩减生产辅助时间，减轻工人劳动强度，提高生产效率，同时还缩减了由离线测量误差导致的废品率，充分发挥了数控机床的性能。机床测量的应用

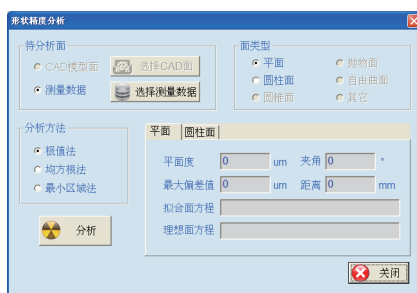


图12 形状精度分析

可以减少中间环节，保证加工精度，提高数控机床的加工能力；并可实现工件的数字化数据采集，后期还可借助计算机辅助设计系统可以实现工件表面三维重构。基于 D-M-I 模式的机床在线测量系统，通过对 CAD 的二次开发，可充分利用 CAD 强大的图形交互能力和设计功能，用户进行交互测量路径的规划，方便系统的应用。该方向的研究及应用系统的开发具有较大的应用价值，同时也提升了数控机床的应用水平。

## 参考文献

[1] 张英杰,韩庆瑶,贾桂红. 现代数控系统的特点和发展趋势. 中国制造业信息化: 学术版, 2005, 33(9):106-108.  
 [2] 唐文杰,吴志军. 数控加工精度在线检测技术研究与应用[D]. 北京: 清华大学, 2009.  
 [3] 张金晶. 数控机床在线测量技术与误差分析. 装备制造技术, 2009(9):82-83.

[4] 王春,于随然. 采用触发测头进行曲面自动跟踪测量. 大连理工大学学报, 1998, 38(1):47-49.

[5] 曹彦生,杜新华,李燕菊,等. 测头在数控加工中的应用及功能开发. 航天制造技术, 2007, 5:014.

[6] 刘彦臣,李战芬,李彩霞. 数控机床测量功能的研究. 机械制造, 2011, 49(4) :77-78.

[7] 刘彦臣,王彪. 利用数控设备进行在线测量的探讨. 机械管理开发, 2004(3):23-24.

[8] 王亚青. 五轴数控机床在线检测技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2003.

[9] Kwon Y, Tseng T L, Ertekin Y. Characterization of closed-loop measurement accuracy in precision CNC milling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2006, 22(4): 288-296.

[10] 靳宣强,姜秀丽,胡祯. 浅析数控机床在线检测技术. 现代制造技术与装备, 2009 (3):40-41.

[11] 隋少春,楚王伟,李卫东. 数控加工在线测量技术应用探讨. 航空制造技术, 2010, 22: 44-46.

[12] 鲍中美. 触发式测头自动检测系统在数控机床上的应用. 计量与测试技术, 2006, 2:4.

[13] 石照耀,韦志会. 精密测头技术的演变与发展趋势. 工具技术, 2007, 41(2):3-8.

[14] Fan K C. A non-contact automatic measurement for free-form surface profiles. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1997, 10(4): 277-285.

[15] 谢高伟. 卫星结构体安装面形位精度检测软件系统开发[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2008.

[16] 史文彬. 关于使用数控机床实现在线测量[D]. 山西: 中北大学, 2007.

[17] Probe software for machine tools-program features[EB/OL]. 2012[2014-05-22]. <http://www.docin.com/p-552084984.html>.

[18] 华玉亮,盛伯浩. 触发式测头全方位精密测量技术. 制造技术与机床, 1994(4) : 11-14.

[19] 晁华,薛凤举. 数控加工中在线测量的应用探析. 制造技术与机床, 2007(5) :96-98.

[20] Cho M W, Seo T I. Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on CAD/CAM/CAI integration. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(8): 607-617.

(责编 亿霖)