

在线检测技术在飞机结构件检测中的应用

Application of online inspecting system in aircraft structures

(1.清华大学;2.上海大学;3.成都飞机工业集团有限公司) 鲍 晟^{1,2} 冯平法¹ 崔雅文³ 李卫东³

BAO Sheng FENG Ping-fa CUI Ya-wen LI Wei-dong

摘要: 本文根据飞机结构件在线检测的工程实际应用特点,提出了基于触发式测头的在线检测系统构建方案,针对在线检测中存在的主要问题,对测量后置处理程序的设计、测头标定方法、测头误差补偿方法等关键技术进行了研究,并在五轴机床上实现了飞机结构件的在线检测,验证了方案的可行性。

关键词: 在线检测;数控机床;误差补偿

中图分类号: TG68 **文献标识码:** B

Abstract: According to the characters of the aircraft structures, an online inspecting system by using touch trigger probe is proposed in this paper. And some technical problems are discussed, such as software framework for NC programs, probe calibration, and error compensation, etc. Finally, the online inspecting system is achieved on a five-axis machine tool to verify the scheme.

Key words: Online inspecting system; CNC machine; Error compensation

1 引言

在线检测方法是根据测量机的原理,以测头作为传感器,利用数控机床作为运动部件控制测头进行测量,并将被测点的坐标信息传输到计算机上,通过数据处理获得工件的加工余量和几何尺寸信息。由于成本和应用环境限制,现机床上一般采用触发式测头。

在飞机制造行业中,结构件占有很大比例,以新一代战斗机为例大概能占到75%以上。飞机结构件以筋、槽、壁板、平面为主,具有尺寸大、壁薄、易变形的特点,并且批量小、品种繁多,目前常规采用离线测量,即完成一道加工工序后将工件拆下移至测量机上检测,合格后再移至机床进行下一道工序。上述过程存在大量拆装操作,容易使得产品变形和积压。针对上述问题,在机床上直接进行检测的在线检测方法被提出,该方法具有如下优点:1.避免二次装夹误差,提高加工精度;2.避免工件重新安装所花费的时间,缩短生产周期;3.减少昂贵的离线测量设备(如三坐标测量机)费用,节省生产成本。由于上述优势,飞机结构件以及相似产品生产领域对于在线检测有越来越迫切的应用需求。

2 基于触发式测头的在线检测系统构成

在线检测系统主体由三部分构成,触发式测头系统、数控系统和上位PC机,如图1所示。图中,包括:1)测头系统,包括测头本体、信号输出单元、信号接收单元以及信号处理单元。2)数控系统,已是成熟的工业产品,现今主流的数控系统(如Sinumerik、Fidia等)均提供参数编程环境,可以方便实现对数控机床的智能化控制。3)上位PC机,计算和数据存储功能强大,可进行大量的数据运算处理工作。

图1中以Renishaw公司的测头MP16(收发信号为无线电信号)为例,测头工作过程如下:数控机床带动触发式测头根据测量规划路径移动,碰触工件时测头的测杆偏摆到一定程度,使得

鲍 晟: 博士后 博士

测头的电路触点断开,发出触发信号,经接收器接收,通过转换器整形、消抖,传入数控系统触发中断,数控系统处理中断事件,锁存机床当前坐标,即生成测量原始数据。测量原始数据可以通过通讯上传上位PC机,在上位PC机中进行测头误差补偿处理,生成真正的测量数据。测量数据通过与理论测量值进行比对,最终生成检测报告,完成整个检测过程。

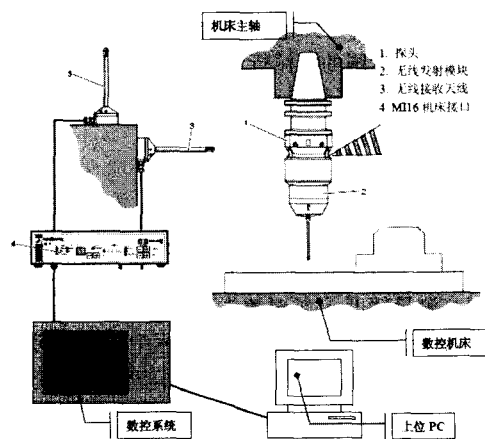


图1 在线检测系统构成示意图

3 关键技术

在线检测系统在飞机结构件检测应用中需要解决的关键技术如下:测量后置处理程序的设计、测头标定方法和测头误差补偿方法。

3.1 测量后置处理程序设计

测量后置处理程序用于将测点信息和测量路径规划信息转化为数控机床可直接执行的数控测量程序。由于触发式测头系统的测量情况比刀具加工时复杂,同时由于不同厂家的数控机床所采用的系统差异性大,加上数控系统本身具有很大封闭性,完全采用CAM后处理模式,可将执行程序分解为最基本的数控指令会存在一定的问题,因此采用上位框架结合下位参数

程序的混合模式较为合理。后置处理程序的结构设计示意图如图2所示。

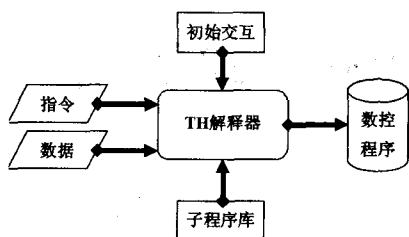


图2 后置处理程序的总体结构设计示意图

后置处理程序的核心是自行开发的TH编译器，它在初始交互阶段由每台机床的配置文件读入机床和测头的基本信息，测量时接收包含测量路径规划信息和测点信息的指令和数据，并调用测量子程序库中的参数化子程序，生成该数控机床可执行的数控测量程序。数控机床配置文件 THP_Lite.ini 包含机床的类型、各轴运动范围、数控系统类型、测头的类型、测头的几何参数等信息，在线检测系统使用前，由技术人员针对每台机床独立配置生成。可执行的数控测量程序由解释框架程序和数控系统参数程序共同实现，增加程序通用性和可移植性。程序处理流程如下：

1. 读取包含机床和测头参数信息的当前数控机床配置文件 THP_Lite.ini;
2. 读取指令和数据文件，根据被测点理论位置，计算生成测量起始点和终止点位置信息;
3. 从子程序库中调用相应参数程序;
4. 程序合成，生成当前数控机床可执行的数控测量程序。

上位 PC 软件基于 VC++ 平台实现。下位参数程序由于各数控系统之间差异明显，主要基于基本指令系统实现，即以 ISO 1056-1975(E) 以及我国的机械行业标准 JB3208-83 中所定义 G 指令实现，此外根据现场情况增加少量行业标准 JB-3082-83 规定的 M00-M99 功能。

3.2 测头标定方法

检测系统的测量误差主要来源于测头，测头的综合误差包括测头的几何半径、测头运动产生的误差、时间延迟带来的误差以及其它因素带来的误差，上述误差的总和即为测头半径误差。为了提高测量精度，必须对测头半径误差进行补偿。通过标定获得测头半径误差值，在实际测量过程中根据不同的测点进行补偿，可以减小测量误差。实际中使用的标定方法很多，如采用环规、标定球和标定块等。飞机结构件的加工主要采用五轴机床，并且具有很多斜面特征，考虑到测量斜面、轮廓等特征时测头需要摆角，因此选用标定球进行标定，通过对球体上不同点测量，可获得不同法矢方向的测量数据。采用标定球的标定过程示意图如下图3所示。

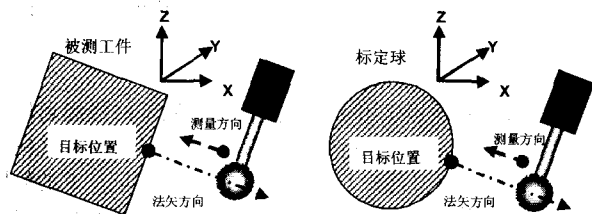


图3 标定过程示意图

如图所示，采用标定球的优点在于：对于实际工件上的任意

点，都可以在标定球上找到具有相同法矢方向的测点位置。不考虑环境因素限制，测头测量的最佳方式为沿法矢方向逼近，采用该方法测量获得的数据随机误差较小。因此，测量与标定过程应遵循下述原则：

1. 测头球心位于被测点指向工件外的法矢方向延长线上;
2. 测量方向沿法矢方向反向;
3. 标定与测量过程保持测量距离与测量速度一致，根据测头半径 r 设定固定距离 $r+\Delta$ (Δ 根据经验选择为 5~15mm) 作为测头起始位置。

3.3 测头误差补偿方法

标定过程中，将标定球按角度划分为一定数量的网格，测点记为 P_{ij} , $i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m$, n 和 m 分别为纬向划分点数和经向划分点数，对这 $m \times n$ 个点分别测量并记录其等效半径 R_e 。根据矢量方向存储等效半径 R_e 序列，即生成标定文件。在检测开始前，标定应预先进行，生成相应的标定文件。在测量过程中，根据被测点的法矢方向在标定文件中查找相邻的等效半径 R_e 值，并进行线性插补，即可获得该点相应的等效半径 R_e 值。

记被测点 P_x ，法矢向量在 XY 平面上的投影与 X 轴夹角为 α ，法矢向量与 Z 轴夹角为 β ，上述夹角必然满足某个区间范围，记为 $\alpha_1 \leq \alpha < \alpha_2, \beta_1 \leq \beta < \beta_2$ ，根据标定文件，可以查找到相应的等效半径值，记为 $R_1(r_1, \alpha_1, \beta_1), R_2(r_2, \alpha_2, \beta_1), R_3(r_3, \alpha_1, \beta_2), R_4(r_4, \alpha_2, \beta_2)$ ，其中 r_1, r_2, r_3, r_4 分别为对应角度的等效半径 R_e 值，则补偿值可以通过两次直线插补得到，首先分别对 R_1 和 R_2, R_3 和 R_4 根据 α 值直线插补，得到中间补偿值 $R_5(r_5, \alpha, \beta_1)$ 和 $R_6(r_6, \alpha, \beta_2)$ 如下：

$$r_5 = \frac{(\alpha - \alpha_1)(r_2 - r_1)}{\alpha_2 - \alpha_1} + r_1 \quad (1)$$

$$r_6 = \frac{(\alpha - \alpha_1)(r_4 - r_3)}{\alpha_2 - \alpha_1} + r_3 \quad (2)$$

然后对 $R_5(r_5, \alpha, \beta_1)$ 和 $R_6(r_6, \alpha, \beta_2)$ 根据 β 值进行直线插补，得到最终补偿值 $R_x(r_x, \alpha, \beta)$ 如下：

$$r_x = \frac{(\beta - \beta_1)(r_6 - r_5)}{\beta_2 - \beta_1} + r_5 \quad (3)$$

则 P_x 点的等效半径 R_e 值 r_x 由式 3 计算可得。

4 实验验证

以实际的飞机结构件测量数据为例进行验证，实际测量结果由测量机(测量机精度 $\leq 0.005\text{mm/m}$)给出，测量精度指标为 $\leq 0.020\text{mm}$ 。部分测量值结果见下表 1:

表 1 测量数据

	测量机测量结果			在线检测系统测量结果			综合误差
	x_0	y_0	z_0	x	y	z	
1	156.9980	54.6641	-8.6791	156.9986	54.6445	-8.6808	0.0197
2	156.9984	55.4237	-17.5395	156.9988	55.4040	-17.5412	0.0198
3	156.9987	56.1858	-26.3995	156.9989	56.1769	-26.4003	0.0089
4	256.9986	57.8931	-26.4256	256.9987	57.8880	-26.4257	0.0051
5	256.9983	57.6705	-17.5727	256.9986	57.6575	-17.5730	0.0130
6	256.9979	57.4543	-8.7196	256.9983	57.4401	-8.7200	0.0142
7	356.9989	60.2049	-8.7592	356.9993	60.1905	-8.7584	0.0144
8	356.9991	59.8801	-17.6049	356.9993	59.8688	-17.6045	0.0113

由表 1 可见，在线检测系统测量结果与测量机检测结果的综合误差 $< 0.02\text{mm}$ ，满足精度要求。

本文作者创新点：提出了基于触发式测头的飞机结构件在线检测方案，给出了通用的测量后置处理程序框架和用于五轴数控机床的测头标定、补偿方法，并在五轴机床上进行了实验验证。

(下转第 5 页)

节点的能量状态,如果节点处于睡眠状态,则丢弃 packet,否则调用 sendData()和 sendRTS()来生成 Data 帧和 RTS 控制帧,然后通过 mhBackOff 计时器判断节点是否正在退避,如果是则继续等待 backoff timer,否则判断信道是否空闲,如果空闲,则判断节点是否已经在等待 defer timer,如果是,则节点继续等待 defer timer,否则节点将等待一个 DIFS 和一个随机时间,然后发送 RTS;如果信道忙,则启动 backoff timer,节点进入退避。当 defer timer 延时完成,则调用 deferHandler()方法,然后调用 check_pktRTS()发送相应的 packets,最后调用 transmit()完成发送。

发送完 RTS 后,节点必须等待 CTS。同样是从 recv()进入,收到发往上层的 packets 后执行 mhRecv_start(txtime(p)),在整个 packet 完全接收后调用 recvHandler(),而 recvHandler()就会再调用 recv_timer (),若是判断所收到的 packet 是 CTS,则调用 recvCTS()。在 recvCTS()中,节点设置为相应的状态,然后调用 tx_resume()。根据 802.11DCF,节点需等待 SIFS 才可进行数据发送。利用 deffertimer 延时 SIFS 后,调用 deferHandler(),进而调用 check_pktTx(),进行数据发送,此时如果信道忙,则增加退避窗口,执行退避,否则调用 transmit()函数发送数据。

发送完数据帧即等待接收 ACK,此过程和接收 CTS 类似,在 recv_timer()中调用 recvACK(),然后调用 tx_resume(),此函数最后调用 callback_这样,节点数据发送过程结束。MAC 层完成数据收发后,将传递给逻辑链路层或物理层进行数据的进一步处理。

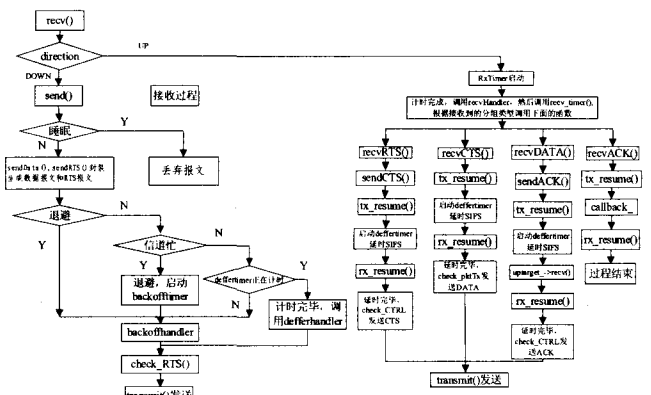


图3 IEEE802.11 节点发送接收过程

3 结束语

NS 是进行网络仿真的重要工具,并且在不断的完善和发展,网络组件也越来越丰富。本文对 NS 的仿真机制进行了研究,结合 Ad hoc MAC 层协议代码着重分析了分裂对象机制和离散事件调度。然后结合 IEEE802.11DCF 的仿真实现研究了 MAC 层仿真的关键技术。所做的工作对利用 NS 进行 Ad hoc 的网络 MAC 层协议研究有积极的启发作用。

本文作者创新点: 本文结合 Ad hoc 网络 MAC 层具体协议的仿真实现对 NS 仿真机制进行了分析,并且研究了 MAC 层协议仿真的关键技术。

参考文献

[1]邓雍琰,施荣华.一个缩短延迟的 AODV 改进协议[C]. Young Computer Scientists, 2008.ICYCS 2008. The 9th International Conference.
 [2]马强,宋玲,陈凤. Ad Hoc 网络中基于蚁群的多路径路由算法[J].微计算机信息,2009.1.
 [3]Stefano Basagni,Marco Conti. Mobile Ad hoc Networking [M].

John Wiley&Sons Inc Publication,2004:20-30.
 [4]徐雷鸣,庞涛,赵耀.NS 与网络模拟[M].北京:人民邮电出版社,2003.
 [5]颜昕,李腊元.NS 仿真机制与协议扩展[J].武汉理工大学学报,2004,28(2):182-186.
 [6]David Wetherall, Christopher J. Lindblad.Extending Tcl for dynamic object-oriented programming[R]. Proceedings of the Tcl/Tk Workshop.1995,7.
 [7]John K. Ousterhout. Scripting: Higher Level Programming for the 21st Century[J].IEEE,Computer,1998,31(3):23-30.
 [8]Sandeep Bajaj, Lee Breslau, Deborah Estrin,et.al. Improving simulation for network research[J], USC/Information Sciences Institute,1999.3.
 [9]Kevin Fall,Kannan Varadhan.The NS Manual[R].2007.12.
 [10]IEEE Std.802.11-1999.Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S].IEEE,1999.

作者简介:施荣华(1964-),男,湖南安乡人,教授,从事计算机网络和信息安全方面的研究;廖勇超(通讯作者),男,硕士研究生。

Biography:SHI Rong-hua (1964-),male,Hunan,Central South University,professor,Reseach area:computer network and information security.

(410083 长沙 中南大学信息科学与工程学院) 施荣华 廖勇超
 (Dept. of Information Science and Information College,Central South Univesity,ChangSha 410083, China) SHI Rong-hua LIAO Yong-chao

通讯地址:(410075 中南大学铁道校区综合实验楼 306) 廖勇超
 (收稿日期:2009.03.30)(修稿日期:2009.06.30)

技术创新

(上接第 2 页)

参考文献

[1]韩立岩.国际先进航空企业数控技术的发展现状及趋势[J].机电新产品导报,2004,10:24-27.
 [2]汤立民.飞机结构零件数控加工技术研讨[J].世界制造技术与装备市场,2006,3:64-67.
 [3]郭旺,翟建军.飞机结构件的数控加工技术研究[J].机械制造与自动化,2005,1:52-55.
 [4]何超杰,高健,陈新.基于接触式测头的在线检测关键技术研究[J].机床与液压,2008,36:170-173.
 [5]陈明,王春海.基于三坐标测量机的曲面零件逆向设计研究[J].微计算机信息,2006,2-3:202-204.

作者简介:鲍 晟(1975-),女,清华大学精密仪器与机械学系博士后,博士,主要研究方向为机电系统集成与测控。

Biography:BAO Sheng(1975-),female, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, doctor, Research area: Electrical System Integrating and measuring.

(100084 北京 清华大学精密仪器与机械学系) 鲍 晟 冯平法
 (200072 上海 上海大学机电工程与自动化学院) 鲍 晟
 (610092 成都 成都飞机工业集团有限公司) 崔雅文 李卫东
 (Department of Precision Instruments and Mechanology,Tsinghua University, Beijing, 100084, China) BAO Sheng FENG Ping-fa

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai, 200072, China) BAO Sheng (Chengdu Aircraft Industrial (Group)Co.,Ltd.(CAC), Chengdu 610092, China) CUI Ya-wen LI Wei-dong

通讯地址:(100084 北京海淀区清华大学精仪系) 鲍 晟
 (收稿日期:2009.03.27)(修稿日期:2009.06.27)