

复合材料共固化构件位置偏差对数控制孔的影响 及其补偿方法*

Influence of Position Error of Composite Co-curing Structure on NC Drilling and Error Compensation

大连理工大学机械工程学院 高航 张松鹏

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 冯子明 刘宏博

[摘要] 针对带工字梁结构的飞机某复合材料构件在共固化成型后不可避免产生位置随机偏差以及定位基准位置偏差引起安装定位误差,并由此给工字梁上的铆接孔和单曲面蒙皮法向孔采用数控程序制孔带来困难甚至无法进行的问题,提出了通过在位测量构件特征点位置偏差并据此修正已有数控制孔程序实现其自动制孔的工艺方法,给出了特征点位置偏差测量原理、误差数学模型和数控程序修正策略,为实现某复合材料构件的数字化加工奠定了良好的技术基础。

关键词: 复合材料 数控制孔 位置偏差 在线测量 误差补偿

[ABSTRACT] During the co-curing process of composite aircraft structure, random position error of I-beams is difficult to be avoided, besides, position error exists during installation. As a result, both rivet holes on the I-beams and holes on single-surface curve skin are difficult even impossible to be drilled automatically. To realize the process of NC drilling, on-line inspecting position error of structure feature points and amending existing NC programs are proposed. The principle of position error measurement of feature points, the numerical error model and the strategy for amending the NC programs are presented. This work provides a solid foundation for the NC machining of certain composite structures on aircraft.

Keywords: Composite NC drilling Position error On-line inspection Error compensation

复合材料是由两种或两种以上异质、异形、异性的材料复合形成的新型材料,其强度高、刚度大、质量轻,并具有抗疲劳、耐高温、可设计等一系列优点^[1],在航空航天、战略性武器等领域已有广泛的应用^[2]。

在复合材料构件的制造过程中,二次机械加工尤其

是在与其他零部件装配时,通常需要进行大量的铆接孔/螺接孔加工,传统的制孔工艺多为手工制孔作业^[3]。随着复合材料应用的日益广泛和产量的不断扩大,采用数字化装备进行数控自动制孔替代手工制孔已经成为飞机制造技术发展的重要趋势之一^[4]。然而由于复合材料构件制备工艺的特点,特别是共固化成型构件存在的构型位置随机偏差、形变,以及定位基准位置偏差等,在很大程度上限制了复合材料构件采用数控制孔工艺。例如,对于图1所示的某复合材料构件,拟在共固化的工字梁结构上、单曲面蒙皮上加工出铆接孔。由于共固化成型工艺和材料结构特点,成型后的工字梁结构不可避免地存在位置随机偏差,加工时又存在装夹定位误差;工字梁长达1400mm,以上述2项误差引起的工字梁与机床X轴平行度误差为 0.1° 为例,Y向累积误差可达2.5mm。若采用事先编制的制孔程序,则必然导致铆接孔中心线的连线相对工字梁边缘产生严重的平行度误差。此外由于共固化成型产生的形变误差,导致该构件上的单曲面蒙皮结构法向孔位置精度也很难保证。

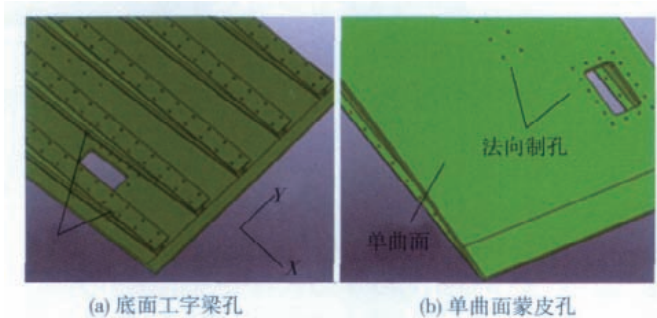


图1 某复合材料构件结构示意图
Fig.1 Diagram of certain composite structure

为解决上述难题,本课题针对某复合材料构件数控制孔需求,构建了在线测量系统,研制了专用数控夹具,进行了集测量和加工一体化的数控制孔技术研究。

1 加工测量系统的构建

为保证图1所示复合材料构件工字梁和单曲面上

* 国家自然科学基金项目(50875034)、高技术研究发展计划(863计划,2009AA044304)、辽宁省教育厅高等学校科技研究项目资助。

制孔位置精度,实现在机床上的“歪装歪加工”,即在工件存在位置偏差和安装定位误差情况下的加工,在该复合材料构件专用数控机床上配备了 Renishaw OMP 60 测头,建立在线测量系统,对加工前已经安装在机床上的复合材料构件上的工字梁特征点位置偏差值、单曲面孔法向位置等进行检测。

对工件特征位置在线测量,就是通过数控机床上配备测头及其相应的检测宏程序构成的在线测量系统,直接对零件相关特征点进行测量^[5]。复合材料构件特征位置在线测量系统主体由两部分构成:软件部分和硬件执行部分^[5]。硬件的主体是数控机床的机械系统和 Renishaw OMP 60 测头;软件系统包括对测量信息的数据处理、修改已有数控制孔 NC 代码程序等,驱动机械系统运动实现在工字梁、单曲面上既定位置处的数控制孔。

如图 2 所示, Renishaw OMP 60 测头安装在机床刀柄上,机床带动测头按规划路径运动。测头与工件碰触后前端测杆受力偏摆或移动到一定程度,内部的 3 个串接机械触点总会有 1 个先断开,电路输出由高电平变为低电平,发出触发中断红外信号^[6],经 OMI-2 无线光学接收器、转换器处理后传输到机床西门子 802DSL 数控系统和 PC 机,系统记录下机床当前坐标值,再通过 PC 机后处理,最终生成检测报告,包括工字梁位置偏差值、单曲面法向制孔位置坐标信息。

2 工字梁位置偏差数学模型的建立及自动制孔程序的修正

图 3 所示复合材料构件安装在一个专用数控摆动夹具上。加工时夹具装在机床工作台上,则工字梁上平面一直处于与机床工作台平行的状态,共固化成型后工字梁的位置偏差和在机床上装夹时的定位误差导致工

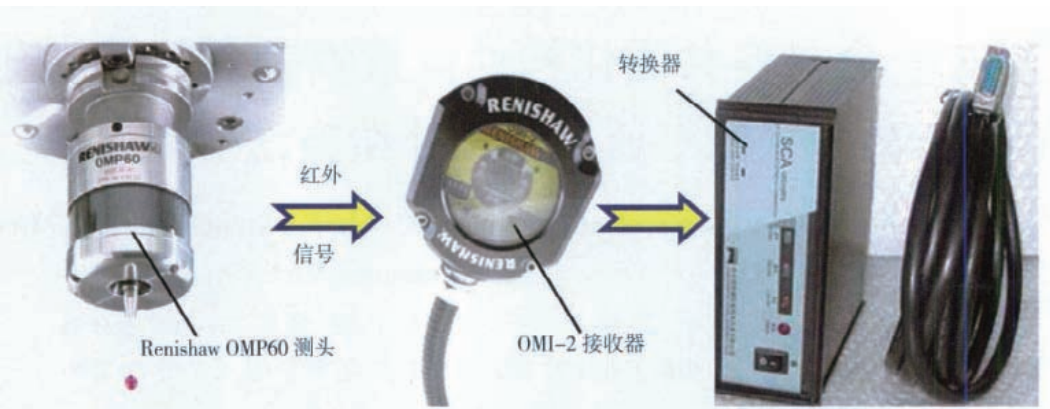


图2 在线测量测头系统
Fig.2 Probe system of on-line measurement

字梁会和机床 X 坐标轴产生一个夹角,此误差可简化为在平面(XY 平面)内一未知直线(工字梁的简化模型)与一已知直线(机床 X 坐标轴的简化模型)间的平行度误差,即两直线存在夹角 φ 。机床在线测量系统沿工字梁在同一高度位置测得一系列点的坐标信息,依据工字

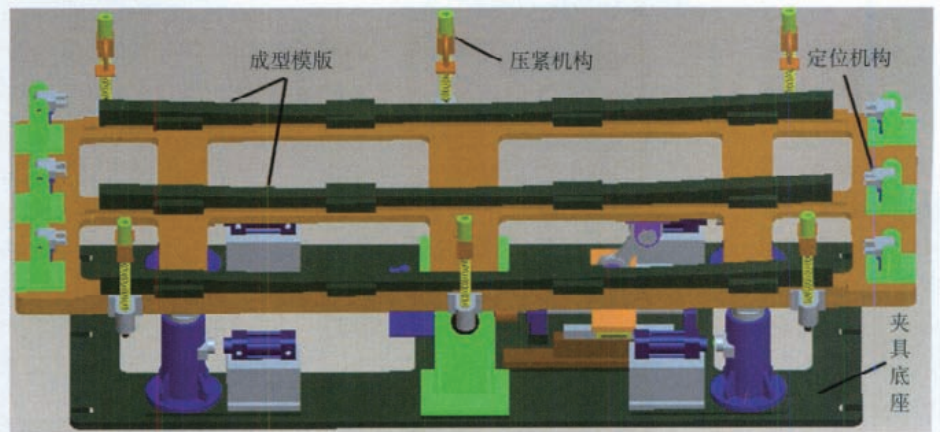


图3 工字梁上制孔工位去掉被加工样件
Fig.3 Drilling position on I-beam without sample

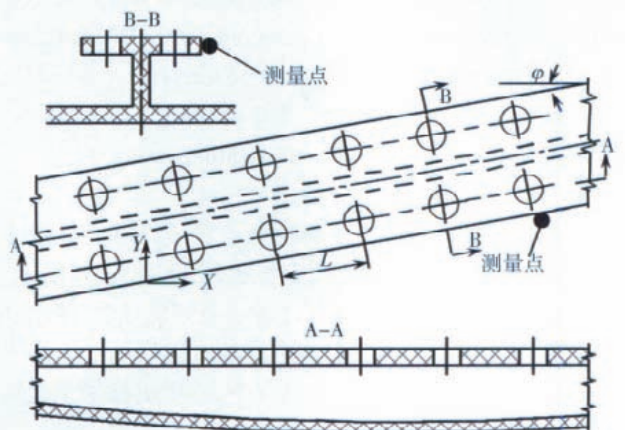


图4 工字梁位置偏差模型
Fig.4 Position error model of I-beam

梁位置偏差数学模型, PC 机对测量数据进行后处理,即可得到工字梁与机床 X 坐标轴间的夹角值,其误差模型如图 4 所示。

工字梁位置偏差数学模型推导如下:已知直线为机床 X 向坐标轴的简化,方程截距不影响夹角 φ 的大小,令直线方程为 $x=0$ 。假设

$$\left. \begin{array}{l} \text{未知直线 } l_1: a_1x + b_1y + c_1=0 \\ \text{已知直线 } l_2: x=0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

确定夹角 φ 对测量数据进行处理时应用最小二乘法,其原理是假定有一理想要素使得被测要素的各点到该理想要素的距离的平方和为最小,那么该理想要素的特征参数即为所求的被测要素的特征参数,其确定的被测要素具有唯一性,且适于计算机求解。令

$$F(a, b) = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + 1)^2 = \min \quad , \quad (2)$$

分别求对 a, b 的偏导数,并令其等于 0,得

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + 1)x_i = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + 1)y_i = 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

分解简化,得

$$\left. \begin{array}{l} a = \frac{\sum x_i \cdot \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \\ b = \frac{(\sum x_i)^2 \cdot y_i - \sum y_i \cdot \sum x_i^2}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2} \end{array} \right\} \quad (4)$$

将测得的采样点坐标值 (x_i, y_i, z_i) 代入上式,即可得出直线 l_1 未知参数 a_1, b_1 。

依据两直线夹角公式,代入求得的参数值,可得

$$\cos \varphi = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \quad (5)$$

则工字梁在数控机床上的位置偏差为

$$\varphi = \arccos \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}} \quad (6)$$

工字梁上制孔间距 L 是恒定的,则 XY 平面内孔与孔在 2 个坐标方向上的距离分别为:

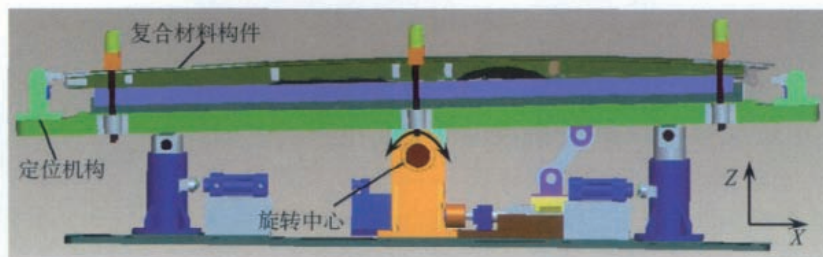
$$\left. \begin{array}{l} X \text{ 方向: } x=L\cos\varphi \\ Y \text{ 方向: } y=L\sin\varphi \end{array} \right\} \quad (7)$$

工字梁上制孔数量多且需要位置偏差补偿,为方便程序编制,使用子程序调用 M98 功能,其调用格式为 M98PxxxxxL_。P 后面的 5 位自然数是被条用子程序的编号,L 后面是调用次数。其子程序如下:

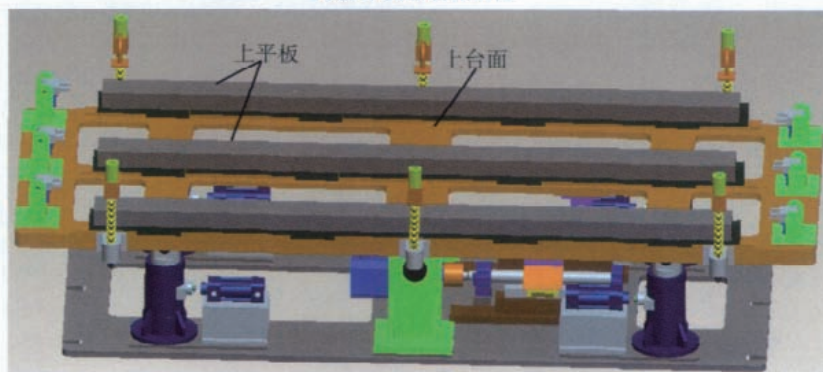
```

N005 G91 G01 Z-4 F100
N010 G01 Z-9 F25
N015 G01 Z13 F100
N020G91G01XLcosφYLsin F100
M99
单个工字梁上的制孔主程序为:
N005 M10
N010 M03 S9000
N015 G04 X10.0
N020 G01 X1 Y1 Z1 F100
N025 M98P00001L_
N030 G91 G00 Z 200 F200
N035 M05
N040 M11
N045 M2
    
```

在式(7)中得到了工字梁上孔与孔在 XY 平面内的距离后,即可修正子程序中 N20 语句内容,对工字梁位置偏差进行补偿,实现数字化自动制孔。



(a) 单曲面制孔工位



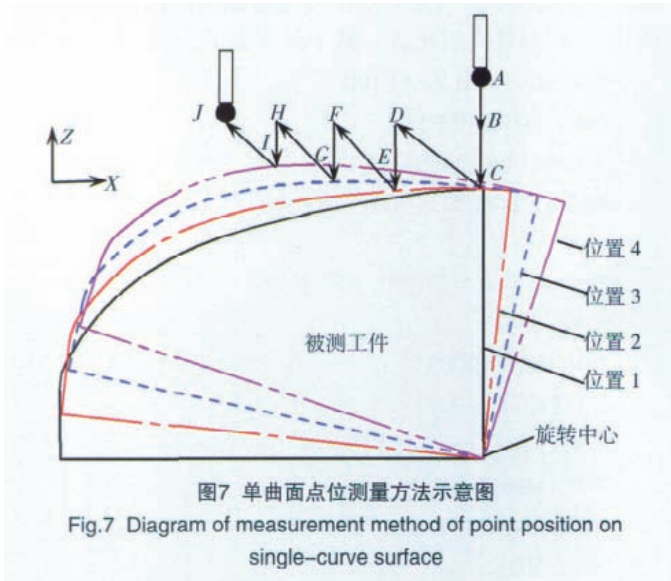
(b) 单曲面制孔工位去掉被加工样件

图5 单曲面制孔工位夹具装夹效果图

Fig.5 Diagram of structure installation during drilling on single-curve surface

3 单曲面构件法向孔位置测量原理

在该复合材料构件单曲面蒙皮上法向制孔时,其在专用夹具上装夹定位如图 5 所示。在单曲面不同位置处制孔时,夹具上台面需带动工件绕旋转中心有



$\pm 5^\circ$ 的摆动,数控摆动夹具和三轴联动机床本体构成一个四轴三联动的数控装备,以实现单曲面的法向制孔。

工件旋转点位测量方测量过程示意图如图 7 所示。曲面法向制孔位置的测量需和曲面法向制孔操作保持一致,只允许机床带动测头(刀具)沿 Z 向下做直线运动。在 2 个孔加工中间,工件需绕旋转中心转动将曲面转动到制孔处法矢沿 Z 轴方向。

单曲面法向制孔位置测量在于通过用微平面法求得曲面预制孔处法矢方向判断工件旋转是否到位,进而测量得到曲面制孔位置坐标信息。以图 7 中曲面制孔处 C 点为例,在测得 C 点坐标值后,再在测量点 C 周围附近再测量 2 个点,3 个点组成一个微平面,用其法矢来代替曲面上 C 点法矢^[7]。当求得法矢与 Z 轴正向夹角小于允许值时,即可记录下当前 C 点的坐标值;然后转动夹具,同理可求得一系列曲面制孔位置信息,将其传输到数控系统中,修改已有制孔 NC 代码程序。测量完成后将测头换成制孔刀具装在机床刀柄上,机床部件执行制孔程序沿规划好的刀具轨迹运动,即可完成曲面上一系列位置处的法向制孔。

4 结束语

本课题对飞机某复合材料构件共固化成型后工字梁存在的位置随机偏差和加工时存在的机床定位误差、单曲面法向制孔位置在线测量进行了研究,给出了

工字梁位置偏差测量原理、单曲面法向孔位置测量原理,建立了工字梁位置偏差数学模型,编制了数控制孔程序,初步试验结果验证了提出的制孔修正方法的正确性。

参考文献

- [1] Gibson R F . A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures . Composite Structures, 2010, 92(12): 2793-2810.
- [2] 杜善义 . 先进复合材料与航空航天 . 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
- [3] 鲍永杰 . C/E 复合材料制孔缺陷成因与高效制孔技术 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [4] 郭洪杰 . 大型飞机柔性装配技术 . 航空制造技术, 2010(18):52-54.
- [5] 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.
- [6] 唐文杰 . 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.
- [7] Duan X G, Xu Y, Wang X N, et al. Application of on-line inspection probe of machining center in free curve inspecting. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, 2008.

(责编 良辰)

(上接第 78 页)

主要参数选取如下:射线源到物体转轴中心距离 4310 mm,射线源到探测器中心距离 4350 mm,在 90° 角度范围内选取间隔为 1° 的投影数据进行重建。重建结果如图 3 所示。

5 结论

本文比较了两种新算法与经典的 ART 和 ASD-POCS 算法在有限角度下的重建结果,模拟数据表明,这两种算法均优于传统的 ART 与 ASD-POCS 算法。

参考文献

- [1] 敖波, 张小海, 李春阳, 等 . 疲劳裂纹扩展高分辨率 CT 分析新进展 . CT 理论与应用研究, 2010, 19(2): 35-41.
- [2] Deans S R. The Radon Transform and Some of Its Applications. New York: John Wiley, 1983.
- [3] Gordon R, Bender R, Herman G T. Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and x-ray photography. J Theor. Biol., 1970, 29:471-481.
- [4] Sidky E Y, Kao C M, Pan X C. Accurate image reconstruction from few-views and limited angle data in divergent beam CT . J.X-Ray Sci. Technol., 2006,14(6):119-139.
- [5] Lu Xiaoqiang, Sun Yi, Yuan Yuan. Image reconstruction by an alternating minimisation. Neurocomputing.2011(74):661-670.
- [6] Lu Xiaoqiang, Sun Yi, Yuan Yuan. Optimization for limited angle tomography in medical image processing. Pattern Recognition.2011(44):2427-2435.

(责编 三丰)