大口径碳纤维复合材料天线反射器模具在位测量技术

倪爱晶　蔡子慧　于望竹　赵　婕　郭　庆
（北京卫星制造厂有限公司，北京　100094）

文　摘　针对碳纤维复合材料模具修形过程中的型面精度测量，研究一种基于机器人和激光跟踪三维测量系统的在位测量技术。通过测量轨迹规划、坐标系变换，关联在位测量系统中的各个单元，实现两个系统的运动-跟随-采样的连续动作，完成模具型面点云的自动高效采样。在此基础上，研究抛物面型面精度评价算法，实现实测点云和理论模型的最佳拟合，从而获得模具型面精度。结果表明：利用在位测量技术，测量效率大幅提高，型面精度的数值和图形结果能够辅助模具的高效修形。

关键词　复合材料模具，在位测量，机器人，型面精度
中图分类号：TH164　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2020.02.014

In-situ Measurement Technology for Large Diameter Carbon Fiber Reinforced Composite Reflector Mold

NI Aijing　CAI Zihui　YU Wangzhu　ZHAO Jie　GUO Qing
（Beijing Spacecraft，Beijing　100094）

Abstract　Aiming at precision measurement in the manufacture process of carbon fiber reinforced composite reflector mold，an in-situ measurement technology based on robot and laser tracking three-dimensional measurement system was studied. Each unit in the in-situ measurement system was correlated by measuring trajectory planning and coordinate frame transformation，the continuous motion of the two systems could be followed to complete the automatic and efficient sampling of point clouds on the mold surface. On this basis，the parabolic surface accuracy evaluation algorithm is studied，and the best fitting between the measurement points and the theoretical model was realized，thus the values of the mold surface accuracy were obtained. The results show that the measurement efficiency is greatly improved by using the in-situ measurement technology，and the numerical and graphic results of the surface accuracy can assist the efficient modification of the mold.

Key words　Carbon fiber reinforced composite mold，In-situ measurement，Robot，Surface accuracy

0　引言

随着大口径卫星天线系统对天线反射面型面精度要求的大幅度提高，对其成型模具的要求也相应提高[1]。复合材料模具与天线反射器产品的热物理性能一致，是大口径天线反射器成型的优选模具[2]。大口径复合材料模具的研制方法主要通过树脂母模翻模直接成型，精度达到0.05 mm（均方根）后很难进一步提高，因此需通过研抛加工进一步提高复合材料模具型面精度，即利用型面测量数据指导型面的分区域研抛加工，从而实现复合材料模具的高效修形。因此，模具加工过程中的型面精度测量至关重要。

目前，针对高精度复合材料模具型面的检测方法主要是基于三坐标测量机的离线检测或基于高精度加工机床检测系统的在线检测。基于三坐标测量机离线检测的测量原理为逐点触测，测量时间随着测点的增多而明显增加，且需要在研抛设备和测量机之间多次搬运模具，对加工精度、测量效率等均有较大影响。基于高精度加工机床检测系统的测量避免了复合材料模具的搬运及装夹问题，但测量精度

收稿日期：2019-08-06
第一作者简介：倪爱晶，1986年出生，高级工程师，主要从事数字化测量工作。E-mail：naj1986@126.com

受机床精度影响，对机床自身的运动精度要求较高，且测量和加工使用相同的评价标准，难以得到客观真实的加工效果评判。因此，需要探索一种独立于机床的在位测量方法[3]，实现模具加工过程中的型面数据的高效获取和分析，以提高复合材料模具型面的精密加工效率。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究了一种基于激光跟踪三维测量系统的非球面面形的方法，并利用试验对比验证了此方法的准确性[4]。北京航空航天大学研究了利用激光跟踪三维测量系统测量旋转抛物面的测球半径补偿方法[5]。中国科学技术大学提出了一种基于智能小车系统和激光跟踪三维测量系统的大型天线面形测量方法，既实现了激光跟踪三维测量系统高精度的优势，又提高了测量效率[6]。

本文研究一种针对大口径碳纤维复合材料模具的在位自动测量技术，包括两方面：一是基于机器人与激光跟踪三维测量系统的模具型面测点三维坐标的自动获取；二是基于模具型面测点坐标的型面RMS(Root Mean Square)精度计算。

1　大口径碳纤维复合材料模具

大口径碳纤维复合材料天线反射面模具口径约1.2 m，型面为抛物面。成型后RMS精度为0.05 mm，型面加工后RMS精度要求优于0.015 mm。模具型面测量难点包括以下几个方面：

(1)模具精度高，且为在位测量，传统的高精度测量方法——三坐标测量不适用，如何利用现有的测量手段满足高精度模具型面的测量是难点；

(2)模具口径大，测点数量大，在模具型面的高效加工修形过程中，测点坐标的高效率获取和型面精度的快速解算是难点。

2　在位测量基本原理

大口径碳纤维复合材料模具的在位测量由硬件系统和软件系统两部分组成，硬件系统负责获取模具型面测点的三维坐标，软件系统则利用所有测点计算型面精度。

2.1　模具型面测点自动采集

在位测量硬件系统由KUKA机器人、末端夹持结构、激光跟踪三维测量系统、计算机四部分组成。其中，机器人通过末端夹持结构夹持测量用目标靶球按设定轨迹运动，激光跟踪三维测量系统采集目标棱镜中心位置，从而实现自动化采集测点。

由于激光跟踪三维测量系统需要靶球配合测量，且获得是靶球球心的三维坐标。为了保证机器人携带激光跟踪三维测量系统靶球沿着天线反射器复合材料模具表面运动，且整个测量过程靶球始终与天线反射器复合材料模具相切，需要进一步规划激光跟踪三维测量系统靶球球心的轨迹，规划过程如图1所示，将天线反射器复合材料模具表面上的待测轨迹线上任意一点沿着模具表面该点的切平面的法线方向平移一段距离，该距离等于激光跟踪三维测量系统靶球的半径，由此拟合出一个新的圆轨迹，即为激光跟踪三维测量系统靶球球心的轨迹。

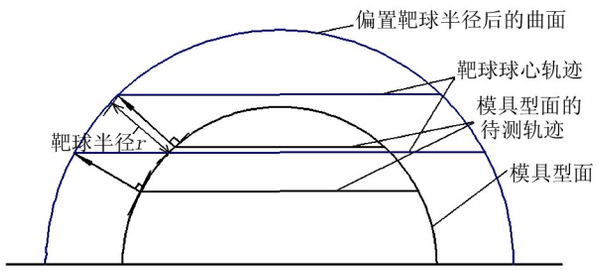


图1　机器人检测路径规划原理

Fig. 1　Principle of path planning for robot

为了将激光跟踪三维测量系统靶球球心的轨迹转化为机器人各个关节运动的角度值，首先采用由Denavit和Hartenberg提出的DH模型建立机器人正运动学模型，相邻关节坐标系之间的位姿转换关系如下：

$$ {}_{i}^{i-1}T = rot(z,\theta_i)trans(0,0,d_i)trans(a_i,0,0)rot(x,\alpha_i) $$

由此可得机器人末端法兰盘坐标系相对于机器人基坐标系的位置关系如下：

$$ {}_{6}^{0}\boldsymbol{T} = {}_{1}^{0}\boldsymbol{T}\left(\theta_1\right){}_{2}^{1}\boldsymbol{T}\left(\theta_2\right){}_{3}^{2}\boldsymbol{T}\left(\theta_3\right){}_{4}^{3}\boldsymbol{T}\left(\theta_4\right){}_{5}^{4}\boldsymbol{T}\left(\theta_5\right){}_{6}^{5}\boldsymbol{T}\left(\theta_6\right) $$

然后，基于机器人DH运动学模型，将激光跟踪三维测量系统靶球球心轨迹通过机器人逆运动算法解算机器人各个关节所需转动的角度，本文采用的KUKA机器人满足Pieper准则[7]，因此可以求出机器人关节角度值的封闭解。在此基础上，通过测量建立整个测量系统中机器人基坐标系W_r、机器人工具坐标系W_t和工件坐标系W_w的相互映射关系。具体步骤如下：

(1)将机器人运动至初始零位，激光跟踪三维测量系统靶球固定在机器人末端法兰盘中心位置；

(2)旋转机器人A1轴，通过激光跟踪三维测量系统获取靶球的轨迹后，拟合出圆C_1；

(3)机器人回到初始零位，旋转A2轴，通过激光跟踪三维测量系统获取靶球的轨迹后，拟合出圆C_2；

(4)使用激光跟踪三维测量系统测量机器人基座所在平台，拟合出平面Plane1；

(5)建立机器人基坐标系，以圆C_1的法线和平面Plane1的交点作为机器人坐标系原点，圆C_2所在平面与平面Plane1的交线为机器人坐标系X_r轴方向，平面Plane1法线方向为机器人坐标系Z_r轴方向，机器人坐标系Y_r轴方向满足右手定则；

(6)建立机器人工具坐标系,机器人工具坐标系W_t的建立依据末端执行器、激光跟踪三维测量系统靶球、机器人末端的具体尺寸与相互装配关系确定;

(7)使用激光跟踪三维测量系统测量天线反射器复合材料模具的基准面和圆C_3;

(8)建立工件坐标系W_w,以基准面找正工件坐标系Z_w方向,工件坐标系X_w轴方向与机器人基坐标系X_r轴方向相同,工件坐标系Y_w轴方向满足右手定则。

根据上述步骤即可获得坐标系W_r、W_t和W_w之间的旋转平移矩阵,从而将规划好的测量路径与实际的工件建立联系,完成型面测点的自动采集。

2.2 模具型面精度计算

型面精度计算是模具在位加工及测量过程中的关键技术。型面精度计算的核心是在理论抛物面上搜寻与实测点最近的理论点,设抛物面方程为$x^2+z^2=4fy$,f为焦距,焦轴向量为(J_i,J_j,J_k),顶点坐标为(D_x,D_y,D_z)。搜寻过程如图2所示,具体如下:

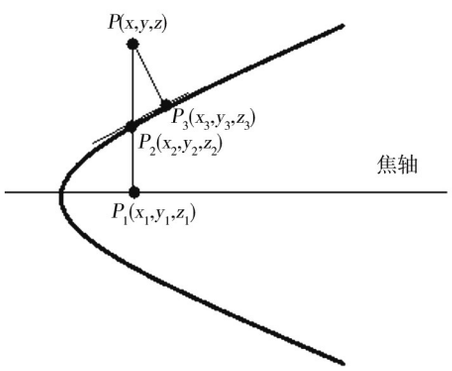


图2 抛物面型面精度计算

Fig. 2 Accuracy calculation of parabolic surface

(1)计算实测点$P(x,y,z)$到焦轴的投影点$P_1(x_1,y_1,z_1)$

根据两向量的平行、垂直性质,得到如下三个方程:

$$(x_1-D_x)*J_j=(y_1-D_y)*J_i$$

$$(x_1-D_x)*J_k=(z_1-D_z)*J_i$$

$$(x-x_1)*J_i+(y-y_1)*J_j+(z-z_1)*J_k=0$$

通过以上三个方程可以求得坐标投影点$P_1(x_1,y_1,z_1)$。

(2)计算点$P(x,y,z)$与点$P_1(x_1,y_1,z_1)$的连线与抛物面交点$P_2(x_2,y_2,z_2)$

根据两向量的平行、垂直性质及点在抛物面上等条件,得到以下三个方程:

$$(x-x_2)*(z-z_1)-(x-x_1)*(z-z_2)=0$$

$$x_2{}^2+z_2{}^2=4*f*y_2$$

$$(x_2-x_1)*J_i+(y_2-y_1)*J_j+(z_2-z_1)*J_k=0$$

通过以上三个方程可以求得点$P(x,y,z)$与点$P_1(x_1,y_1,z_1)$的连线与抛物面交点$P_2(x_2,y_2,z_2)$。

(3)计算$P(x,y,z)$到过$P_2(x_2,y_2,z_2)$的切平面的投影点$P_3(x_3,y_3,z_3)$

已知过$P_2(x_2,y_2,z_2)$的切平面法向量为$(2x_2,4f,2z_2)$,切平面方程为:

$$2*x_2*(x-x_2)+4*f*(y-y_2)+2*z_2*(z-z_2)=0$$

根据两向量的平行、垂直性质,则可得到以下三个方程:

$$(x-x_3)*2*z_2=(z-z_3)*2*x_2$$

$$2*x_2*(x_3-x_2)+4f*(y_3-y_2)+2*z_2*(z_3-z_2)=0$$

$$(x-x_3)*4*f=(y-y_3)*2*x_2$$

通过以上三个方程可求得$P_3(x_3,y_3,z_3)$。

(4)计算P点与P_3点距离

$$d=\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2}$$

将P_3点作为下一个P点,重复步骤(1)-(4),进行迭代,直到满足精度为止。

迭代的终止条件为:

$$d_{pp_3(n)}-d_{pp_3(n-1)}<0.001\,\text{mm}$$

式中,$d_{pp_3(n)}$为第n次迭代后实测点与P_3点的距离,$d_{pp_3(n-1)}$为第$n-1$次迭代后实测点与P_3点的距离。

按照上述步骤搜寻到任意一点在抛物面上对应的距离最小点后,则任一实测点与理论抛物面上对应点的距离如式(1):

$$d_i=\sqrt{(x_i-x_{\text{ni}})^2+(y_i-y_{\text{ni}})^2+(z_i-z_{\text{ni}})^2} \quad (1)$$

式中,(x_i,y_i,z_i)为实测点,(x_{ni},y_{ni},z_{ni})为实测点对应的理论点坐标。

以上为实测点与抛物面最短距离求解,前提条件是实测点云和抛物面处于最佳匹配状态。实际测量中,尽管测量基准已经与理论抛物面基准建立方式相同,但由于实际工件与理论工件存在差异,坐标系对齐只能做到粗略对齐,因此需要通过最佳拟合计算将实测点与理论抛物面进行精确对齐。最佳拟合计算的过程是实测数据经过变换向理论轮廓逼近的过程,即优化迭代过程。假设实测点为P_i,对应的理论点为N_i,旋转平移矩阵为$T(\Delta x,\Delta y,\Delta z,\alpha_x,\alpha_y,\alpha_z)$。其中,$\Delta x$、$\Delta y$、$\Delta z$、$\alpha_x$、$\alpha_y$、$\alpha_z$分别为沿坐标系$x$、$y$、$z$轴的平移量和旋转量,测点数为$n$。

设坐标变换前的任一点为$P(x,y,z)$,则变换后的点$P'(x',y',z')$为:

$$x'=x*\cos(\alpha_y)*\cos(\alpha_z)-y*[\cos(\alpha_x)*\sin(\alpha_z)-\sin(\alpha_x)*\sin(\alpha_y)*\cos(\alpha_z)]+z*[\sin(\alpha_x)*\sin(\alpha_z)+\cos(\alpha_x)*\sin(\alpha_y)*\cos(\alpha_z)]+\Delta x$$

$y'=x*\sin(\alpha_z)*\cos(\alpha_y)+y*[\cos(\alpha_x)*\cos(\alpha_z)+\sin(\alpha_x)*\sin(\alpha_y)*\sin(\alpha_z)]+z*[\cos(\alpha_x)*\sin(\alpha_y)*\sin(\alpha_z)-\sin(\alpha_x)*\cos(\alpha_z)]+\Delta y$

$z'=-x*\sin(\alpha_y)+y*\cos(\alpha_y)*\sin(\alpha_x)+z*\cos(\alpha_x)*\cos(\alpha_y)+\Delta z$

则优化计算的目标函数如式(2)：

$$\min f = \min\left(\sum_{i=1}^{n}(P_i' - N_i)^2\right) \tag{2}$$

最佳拟合计算的核心是求解精确对齐时的旋转变换矩阵。为了求解旋转变换矩阵，使用群智能算法——粒子群优化算法(PSO)[8]。PSO初始化为一群粒子随机解，通过迭代找到最优解。每次迭代，粒子通过两个极值进行更新，分别是粒子自身找到的最优解和整个种群当前找到的最优解。运用粒子群算法求解旋转变换矩阵的流程如图3所示。

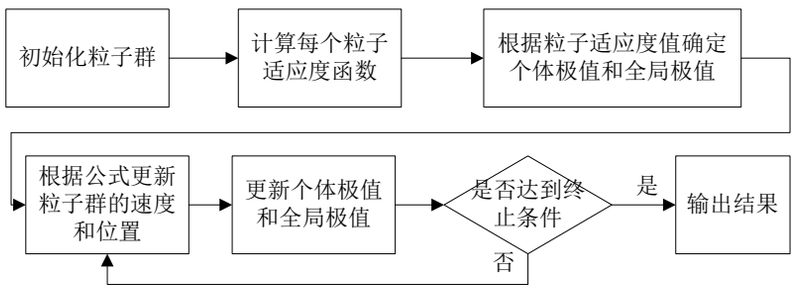


图3　粒子群算法流程

Fig. 3　The process of PSO

最佳拟和计算后，实测数据经过坐标变换与理论数据达到最佳匹配，均方根误差计算公式为：

$$d_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i^{\,2}}$$

由于型面精度计算算法复杂，因此使用具有强大矩阵运算功能的MATLAB程序实现上述算法，进行测量数据的处理和分析，从而获得抛物面天线的型面精度计算结果。

3　验证

以某个生产环节中的口径1.2 m模具为对象进行了测量试验。试验前，在型面上预设了63圈的圆周作为机器人的运动路径。通过机器人路径规划并利用测量获得的坐标系之间的关系矩阵，最终输出包含机器人各个关节的角度集合的运动程序，机器人执行此程序后，激光跟踪三维测量系统进行测量，40 min内获得了13 005个测点，可见，测量效率高于传统三坐标测量机。

以获得到的测点为输入，利用模具型面精度评价算法和通用商业测量软件Spatial Analyzer对此模具的型面精度进行计算，对比结果如表1所示。从表中数据可以看出，模具型面精度评价算法的计算结果与商业软件一致。

表1　两种算法结果

Tab. 1　Results of two algorithms

计算方法	RMS/mm	最大偏差/mm
模具型面精度评价算法	0.0893	0.2735
Spatial Analyzer	0.0893	0.2733

为了分析拟合计算后的面形偏差趋势，达到辅助模具加工修形的目的，创建实测点和理论模型的偏差矢量，规定矢量方向为理论曲面指向实测点，如图4所示。根据矢量图可以迅速定位面形超差区域，矢量方向和矢量大小可以辅助模具的加工修形。

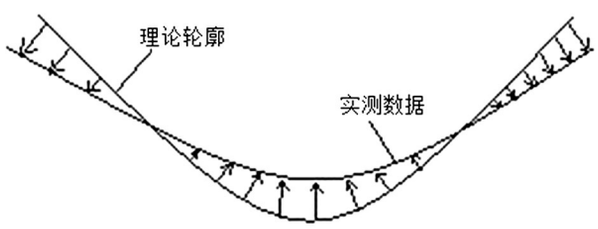


图4　偏差矢量

Fig. 4　Deviation vector

4　结论

(1)在位测量技术利用机器人系统的可编程、自动化特性和激光跟踪三维测量系统的测量优势，具有测量精度高、测量范围大、测量效率高的特点，能够实现大口径碳纤维复合材料天线反射器模具型面测点的高效获取，同时该方法也是其他高精度大型产品的有效测量方法；

(2)通过抛物面型面精度评价算法，获得了模具型面精度的最大偏差值和RMS值，并通过创建偏差矢量图，达到了辅助模具修形的目的；

(3)分别利用本文的模具型面精度评价算法和商业软件对模具型面精度进行计算，二者结果一致。

参考文献

[1] 何晓蓉,高建军. 复合材料副反射器模具的设计和制造[J]. 航天制造技术,2002(4):14-17.

HE X R, GAO J J. Design and manufacturing of composite vice reflector die[J]. Aerospace manufacturing technology, 2002(4):14-17.

[2] 袁正华,胡仲杰. 复合材料模具技术的进展[C]. 中国航空学会航空百年学术论坛复合材料分论坛暨第六届山东复合材料学术年会论文集. 济南:中国航空学会,2003:75-80.

YUAN Z H, HU Z J. Progress of composite die technology [C]. Proceedings of composite sub forum and the 6th Shandong composite annual conference of aviation Centennial academic forum of CSAA. Jinan:CSAA,2003:75-80.

[3] 董勇,李琳玲,杜江. 数控加工过程的在位测量技术探讨[J]. 机械,2017,44(10):55-58.

DONG Y, LI L L, DU J. A Study of on-machine measurement technology for NC manufacturing[J]. Machinery, 2017,44(10):55-58.

[4] 王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. 光子学报,2012,41(4):379-382.

WANG X K. Measurement of aspherical surfaces by laser tracker[J]. Acta Photonica Sinica,2012,41(4):379-382.

[5] 陈赐常,李晓星,王卫军等. 旋转抛物曲面测量中的测球半径补偿[J]. 制造技术研究,2010(5):16-19.

CHEN C C, LI X X, WANG W J, et al. Reflector radius compensation of rotating parabolic surface [J]. Aerospace Manufacturing Technology,2010(5):16-19.

[6] 胡静,顾永刚,翟超等. 基于激光跟踪仪的大型天线面形测量的辅助系统[J]. 机械与电子,2013(9):52-54.

HU J, GU Y G, ZHAI C, et al. A smart car for the surface shape measurement of large antenna based on laser tracker[J]. Machinery & Electronics,2013(9):52-54.

[7] CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 北京:机械工业出版社,2006:25.

CRAIG J J. Introduction to Robotics [M]. Beijing: China Machine Press,2006:25.

[8] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]. International Conference on Neural Network, 1995:1942-1948.