

# 大飞机翼盒机器人制孔系统 集成技术研究

张云志, 蒋倩

(中国航空制造技术研究院数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024)

**[摘要]** 机翼装配是飞机制造中的一个重要环节,其中翼盒装配制孔数量多、质量要求高、工作强度大,因此各种自动化制孔装备陆续登场,活跃在国内外航空制造业的舞台。由于机器人具有高度灵活性,利用机器人对机翼蒙皮壁板装配实施数字化制孔作业,成为现代飞机机翼装配的一个发展方向。本文介绍了一种基于AGV搭载机器人的可移动机翼装配数字化制孔系统,并对这种复合式机器人制孔系统集成技术进行了探索,通过机械系统集成、电控系统集成、软件控制集成实现总体系统集成,从而实现大飞机翼盒机器人制孔系统的自动化、精确化制孔作业。

**关键词:** 大飞机装配; 机器人制孔; 制孔末端执行器; 集成控制; 法向测量

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.016



张云志

工学博士、高级工程师,从事机器人应用环境和自动控制技术以及飞机数字化柔性装配技术研究。

大飞机产业肩负着一个国家的政治、经济、军事、工业等多重使命,是体现一个国家综合实力和大地

位的战略性支柱产业<sup>[1]</sup>。近年,我国迅猛发展的航空科技为大飞机产业的发展奠定了坚实基础。大型客机C919的成功首飞,标志着我国已跻身于世界大型客机生产国的行列。

机翼作为飞机的重要组成部分,其制造装配质量在整个飞机制造环节中有着极其重要的地位。鉴于翼盒装配制孔数量多、质量要求高、工作强度大这一现实<sup>[2]</sup>,国内外航空制造领域均在大力发展数字化柔性装配技术,各种数字化、自动化装备陆续登场,展现在国内外航空制造业的舞台。由于机器人具有高度灵活性,利用工业机器人对机翼蒙皮壁板实施数字化自动制孔作业,已成为现代飞机机翼装配的一个发展方向。

传统的手工制孔存在工序多、工人劳动强度大、精度差、效率低、制造成本高等问题,不能满足现代飞机生产制造需要<sup>[3]</sup>。大型数控自动化制孔装备的导入,实现了装配制孔的自

动化作业,有效解决了质量、效率低及劳动强度高的问题。但从智能制造层面上看,在多样性和定制化产品制造方面很难灵活对应。

本文以C919翼盒装配自动制孔为目标,介绍了一种基于AGV搭载机器人的可移动机翼数字化制孔系统,并对该系统集成技术进行了探索,对机器人制孔系统集成技术进行了分析讨论。

## 翼盒机器人制孔系统

大飞机翼盒机器人制孔系统是一种基于AGV搭载机器人的移动机翼数字化制孔系统,如图1所示。该系统是针对大型客机机翼翼盒壁板与骨架机械连接孔位的数字化制孔要求,利用柔性工装夹持定位翼盒工件,以AGV搭载机器人的复合方式,在iGPS引导下,按事先规划好的制孔作业区域,实施多站位移动,分区域制孔作业。

大飞机翼盒机器人制孔系统主要由工业机器人、多功能末端执行器、AGV 以及用于导航的 iGPS、集成控制台、柔性定位工装 6 部分构成。

### 1 机械系统结构集成

大飞机翼盒机器人制孔系统是根据机翼翼盒装配制孔作业要求,将工业机器人、多功能末端执行器、AGV、iGPS 等多个独立单元进行集成,使各参与集成的子系统间相互关联、协调,进而实现大飞机翼盒的机器人制孔系统自动化、精确化制孔作业。为便于系统集成,对整个系统的机械结构进行了模块化设计,各独立子系统集成于一体,构成本机器人制孔系统。

#### 1.1 工业机器人

综合机翼制孔精度、负载及制孔反力等因素,合理选定机器人。这里采用了库卡 KR500L340-2 型 6 自由度机器人,制孔末端执行器通过快速装卡机构安装在机器人末端法兰上,通过机器人各关节的运动来使制孔末端执行器上的制孔刀具中心点(TCP)到达指定偏置位置,TCP 沿机翼翼壁板孔位法线方向进给及过切,由制孔末端执行器上主轴的进给单元完成。

#### 1.2 制孔末端执行器

末端执行器是机器人制孔系统中不可缺少的核心部件<sup>[4]</sup>,本翼盒机器人制孔系统中的末端执行器采用了模块化、轻量化设计技术,主要由压脚、进给单元、制孔单元、制孔/插钉工位转换单元、视觉测量单元、法向测量单元、排屑装置等多个机械单元构成,如图 2 所示。其主要功能如下:

- (1) 基准孔位置测量;
- (2) 孔位曲面法向测量;
- (3) 刀具冷却;
- (4) 吸尘排屑;
- (5) 制孔、镗窝;
- (6) 插钉功能;
- (7) 制孔/插钉双工位切换。

其中,基准孔位置测量由安装在末端执行器上的照相机完成,孔位曲面法向测量由末端执行器前端的 4 个激光测距传感器来完成。

#### 1.3 智能移动平台AGV

因机翼的翼展尺寸较大,且上、下翼面均需制孔,在一般情况下,机器人自身的工作空间难以覆盖整个机翼制孔作业区,这就需要依据机器人工作空间将机翼制孔作业区合理规划若干个适合机器人制孔的作业区域(虚拟站位),采用机器人移动方式,方能完成整个机翼上、下翼面的制孔工作。AGV 作为一种全向智能移动平台,具有全向移动、自主导航、自动避障、支撑定位等功能,为机器

人的精准移动提供了理想的解决方案。AGV 在翼盒机器人制孔系统中的作用就是搭载工业机器人在 iGPS 系统的引导下完成虚拟站位间的移动。本系统中的全向智能移动平台 AGV 的构成,如图 3 所示。

#### 1.4 iGPS 导航系统

iGPS (indoor GPS),也称为室内 GPS,由硬件和软件两部分构成,是一种新兴的光电扫描测量系统。硬件有激光发射器、光电接收器和信号处理器,如图 4 所示。

iGPS 系统工作时,激光发射器的旋转头带动两个光平面一同旋转,并向测量场持续发射扫描光束,旋转头每次转到某一定位置,触发同步脉

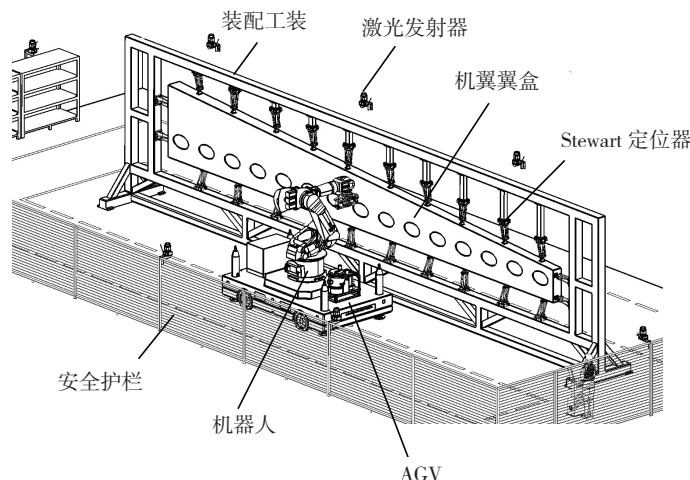


图1 大飞机翼盒机器人制孔系统  
Fig.1 Aircraft wing box robot drilling system

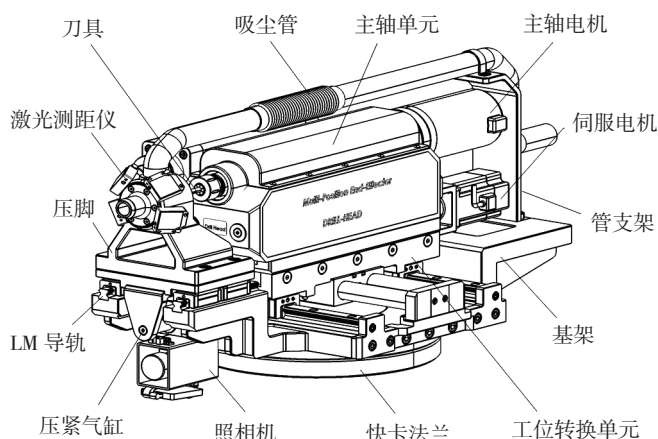


图2 制孔末端执行器  
Fig.2 Drilling end effector

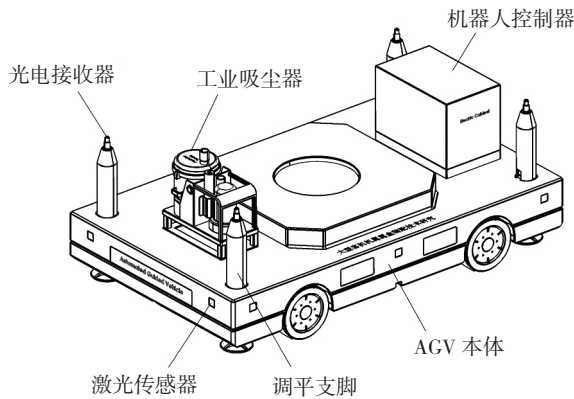


图3 全向智能移动平台系统  
Fig.3 Intelligent movement platform

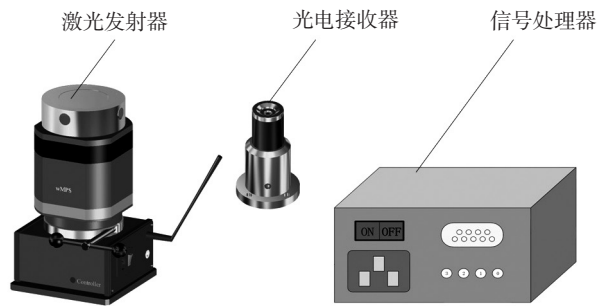


图4 iGPS的硬件构成  
Fig.4 Hardware composition of iGPS

冲激光电路,处理器采集该信号作为计时起点,当两束扫描激光信号扫过接收器时分别记录光束扫描时刻,根据旋转头的转速、测得的扫描时间以及激光发射器的位置,即可计算出光电接收器在测量场的位置<sup>[5]</sup>。

比起激光雷达、激光跟踪仪等测量手段, iGPS可在测量空间内布置多个互联的激光发射器和光电接收器,在装配工装、桁架林立的飞机装配现场,可有效规避测量光束遮挡问题,综合其测量精度( $\pm 1\text{mm}$ )和经济性,比较适合在大测量场中对移动的目标如AGV等进行位姿测定。

### 1.5 柔性定位工装

柔性定位工装由装配桁架和多个 Stewart 并联定位器组成,它是以机翼蒙皮外表面为基准的定位夹具,同时利用 Stewart 并联定位单元的6自由度调整特性,对组成机翼的肋、梁和壁板等零件进行定位夹持。由于 Stewart 并联定位单元具有结构轻、刚性好、调整灵活等特点,因此可对不同尺寸、不同交点的翼盒类产品进行有效夹持定位,这使得装配工装具有一定的柔性。

## 2 系统的电气控制集成

机翼翼盒机器人制孔系统的电控是由机器人控制系统、末端执行器控制系统、AGV控制系统、光电扫描测量系统4部分集成而成,集成控制

系统构成情况,如图5所示。

集成控制台通过通信接口和以太网与各子系统进行数据通信,由集成控制软件来统一调度、指挥,实现机器人的自动化制孔作业。此外,通过 Wi-Fi 通讯,实时获取 AGV 路径信息,并将规划的路径文件发送给 AGV 执行,实现 AGV 的自主导航和制孔站位间的精准移动。

机器人制孔末端执行器利用多轴运动控制器和 SynqNet 总线来控制其中的各执行元件,运动控制器通过 PCI 总线与集成控制台通信,使得集成控制台可实时获得末端执行器上各单元的运动状态,并发出对各执行元件运动控制指令。

视觉测量系统由千兆以太网卡和照相机组成,千兆以太网卡将照相机采集的图像数据信息进行实时图像处理,由 PCI 总线传输给集成控制台。

机器人由控制器控制,与集成控制台之间采用基于 Socket 的通信方式,由以太网传输信息,集成控制台可获取机器人的位姿信息,并将机器人的操作及运动指令下发给机器人控制器。

## 3 系统控制软件的集成

机器人制孔系统集成控制软件,由以下功能模块构成:机器人控制模块、末端执行器控制模块、制孔程序处理模块、计算机视觉模块、法

向测量模块和管理模块,如图6所示。

制孔末端执行器和视觉测量系统的状态和信号通过网络通信和电气控制,传递给集成控制台,用系统集成控制软件和模块化的人机交互操作界面,有效地组织和管理这些信息。操作者可通过软件操作界面监视底层设备状态,设置工艺参数和控制参数,发出对设备的控制指令,还可导入离线编程系统输出的 xml 格式制孔文件,实现机器人自动制孔和作业过程中的安全防护。机器人控制模块负责实现对机器人的协同集成控制;制孔末端执行器控制模块实现主轴及进给伺服轴的运动控制;制孔程序处理模块负责管理和调度制孔程序文件,通过指令分解提取控制参数、位姿信息并进行坐标变换,实现制孔程序顺序执行;计算机视觉模块通过对基准孔的照相测量,修正孔位偏差,提高机器人制孔位置精度;法向测量模块负责采集法向传感器测量信号,实现工件表面法矢检测功能,修正法矢偏差,提高机器人制孔姿态精度;管理功能模块负责程序管理、坐标系管理、基准孔管理、刀具管理以及安全防护等。通过集成控制软件调用各软件模块功能,协调机器人制孔动作,实现面向程序驱动的机器人制孔过程的全自动化。

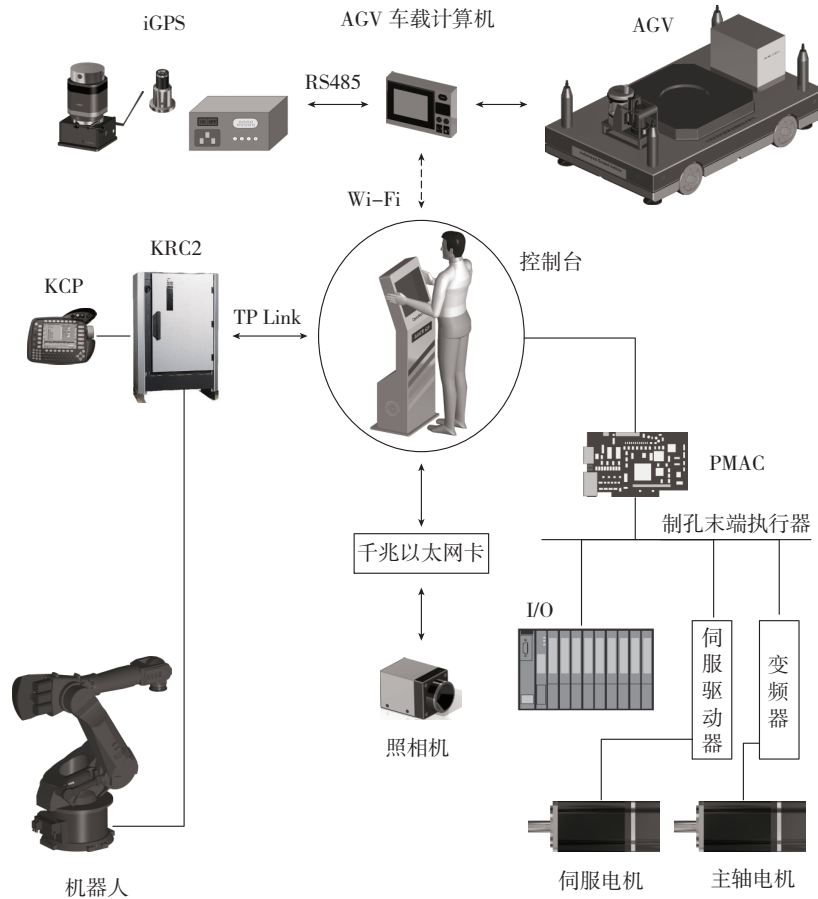


图5 集成控制系统构成  
Fig.5 Integrated control system structure

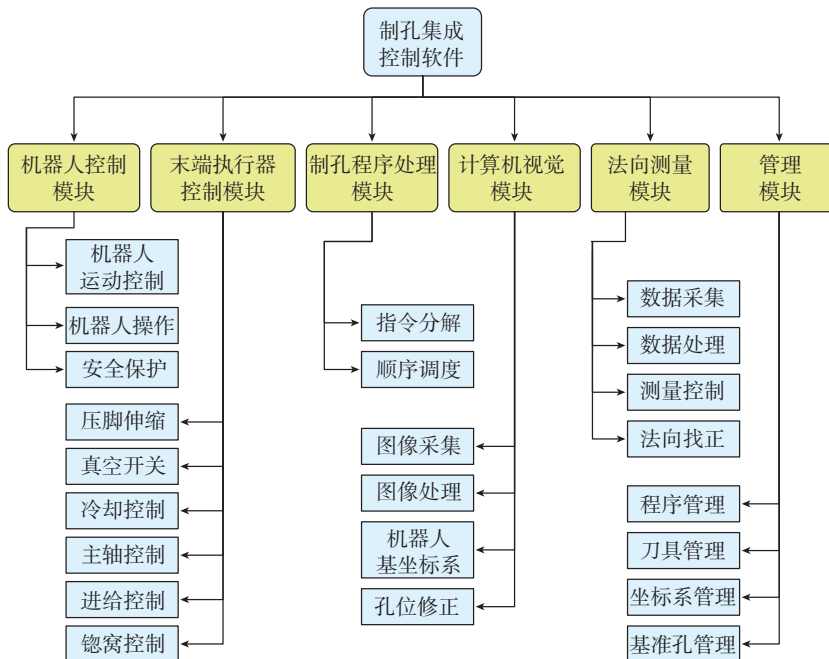


图6 系统集成控制软件设计架构  
Fig.6 Integrated control software structure

## 系统集成控制软件

### 1 基于Socket通信技术

系统集成控制软件作为 Socket 服务端,是在 TCP/IP 协议和 Socket 通信技术的基础上开发的,机器人控制软件作为 Socket 客户端<sup>[6]</sup>。首先,建立控制台 Socket 服务端与 Socket 客户端的通讯,控制台集成控制软件制孔程序处理模块将制孔程序文件以 xml 格式下发给机器人控制器,实现集成控制软件对机器人的控制。

另一方面,机器人控制器定时将各轴位置信息传送到 Socket 服务端,通过集成控制软件向制孔末端执行器发出制孔或照相指令,完成对末端执行器制孔的协同调度和集成控制。

### 2 基于视觉测量的机器人基坐标系标定

视觉测量建站的主要目的在于对机器人基坐标系的快速标定。在翼盒制孔作业时,机器人每到一个站位,均须确定翼盒与机器人的相对位置关系,利用末端执行器上的照相机,对翼盒上的多个预制基准孔照相,因事先标定了机器人基坐标系下的照相机坐标系,用视觉测量,测得机器人基坐标系下基准孔的实际位置,对基准孔点群的机器人基坐标系实测值和产品坐标系理论值进行最佳匹配,运用奇异值分解算法,构建翼盒在机器人基坐标系下的位姿。

具体方法:设  $e_i$  为翼盒上第  $i$  个基准孔在产品坐标系中的理论坐标值,  $E_i$  为第  $i$  个基准孔在机器人基坐标系的实测坐标值。最佳匹配的方法是寻找一组位姿参数  $[R_s, T_s]$ ,使  $e_i$  经过旋转变换  $R_s$  和平移变换  $T_s$  后的坐标值与  $E_i$  偏差的平方和最小。构建目标函数<sup>[7]</sup>:

$$J = \min \sum_{i=1}^m \|E_i - (R_s e_i + T_s)\|^2 \quad (1)$$

因为满足目标函数最小值时,两组点群的形心重合,故对目标函数作如下变换。

$$\text{令 } \mu_A = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m e_i, \mu_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_i$$

为两组点群的形心坐标。

由坐标变换可得：

$$\mu_B = R_s \mu_A + T_s \quad (2)$$

将  $q_i = e_i - \mu_A, q'_i = E_i - \mu_B$  代入式(1)得：

$$J = \min \sum_{i=1}^m \Delta^2 p_i = \sum_{i=1}^m (q_i^T q'_i + q_i^T q_i - 2q_i^T R_s q'_i) \quad (3)$$

由于  $q'_i$  和  $q_i$  均为已知值，所以目标函数转化为求  $\max \sum_{i=1}^m q_i^T R_s q'_i$  的问题，即：

$$\max \sum_{i=1}^m q_i^T R_s q'_i = \text{trace}(R_s \sum_{i=1}^m q_i q_i^T) \quad (4)$$

令  $H = \sum_{i=1}^m q_i q_i^T$ ，对  $H$  进行奇异值分解，使得：

$$H = SDV^T \quad (5)$$

为求得  $\max(\text{trace}(R_s H))$ ，根据奇异值分解特点，令  $R_s = VS^T$ ， $R_s$  为正交矩阵。

$$\text{那么, } R_s H = VS^T SDV^T = VDV^T$$

当  $R_s = VS^T$  时， $\text{trace}(R_s H) \geq \text{trace}(BR_s H)$ ，

其中， $B$  为正交矩阵，如果  $|R_s| = 1$ ，

$R_s$  即为待求姿态矩阵；如果  $|R_s| = -1$ ，

$$\text{令 } V' = [v_1 \ v_2 \ v_3],$$

其中， $v_1, v_2, v_3$  为矩阵  $V$  的列元素，则  $R_s = V'S^T$ ，求得移动向量，即式(6)。

$$T_s = \mu_B - R_s \mu_A \quad (6)$$

上面求得的  $R_s$  为：

$$R_s = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中，式(7)矩阵中的各元素归纳如下：

$$\begin{aligned} d_{11} &= \cos \alpha \cos \beta \\ d_{12} &= \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ d_{13} &= \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ d_{21} &= \sin \alpha \cos \beta \\ d_{22} &= \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ d_{23} &= \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ d_{31} &= -\sin \beta \end{aligned}$$

$$d_{32} = \cos \beta \sin \gamma$$

$$d_{33} = \cos \beta \cos \gamma$$

于是，求得3个姿态角：

$$\alpha = \arctan(d_{21} / d_{11})$$

$$\beta = \arcsin(-d_{31})$$

$$\gamma = \arctan(d_{32} / d_{33})$$

利用视觉测量建站技术，提高了机器人制孔系统在大飞机翼盒制孔作业过程中的性能，改善了制孔效率。

### 3 孔位修正技术

在翼盒零件、装配工装及各坐标系的标定中，不可避免地存在着误差<sup>[7]</sup>，导致翼盒上基准孔的位置与理论数模上对应的孔位相比存在偏差，这就需要对这些偏差进行修正。孔位修正数学模型如图7所示。

这里用视觉测量孔位修正技术消除因这些偏差对制孔位置的影响，来达到提高制孔位置精度目的。图7中， $F_1, F_2, F_3, F_4$  代表基准孔的理论位置， $P$  为待修正孔位， $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3, \Delta F_4$  为基准孔实际位置与理论位置的偏差， $\Delta P$  为待修正孔偏移矢量，用双线性插值将待制孔位  $P$  参数化。

$$P(x, y) = (1 - y)[(1 - x)F_1 + xF_2] + y[(1 - x)F_3 + xF_4] \quad (8)$$

同理，偏移量  $\Delta P$  的参数化模型为：

$$\Delta P(x, y) = (1 - y)[(1 - x)\Delta F_1 + x\Delta F_2] + y[(1 - x)\Delta F_3 + x\Delta F_4] \quad (9)$$

利用双向线性插值，将待修正的孔位  $P$  在法矢方向的投影坐标  $(x', y')$  代入式(9)，求得偏移量  $\Delta P$  的表达式：

$$\Delta P = (1 - y')[(1 - x')\Delta F_1 + x'\Delta F_2] + y'[(1 - x')\Delta F_3 + x'\Delta F_4] \quad (10)$$

将式(10)得到的各点偏移量补偿到制孔文件的相对制孔点位，就可以形成实际制孔所需要的制孔程序文件。

### 4 孔位法向在线测量

为了实现在机翼壁板曲面并垂直于孔位所在的切平面(即孔位法线方向)制孔，必须对孔位法向在线测量。制孔末端执行器上安装的4个微型激光测距仪就是为实现这一目的而设置的传感元件。4个激光测距仪发光点在机器人工具坐标系下的位置  $(x_i, y_i, z_i)$  和方向  $(m_i, n_i, q_i)$ ， $i=1, 2, 3, 4$ 。孔位法向测量原理如图8所示。

当机器人末端执行器按照制孔程序到达已经修正的待制孔位，激光测距仪将在机翼壁板表面留下4个光斑  $A, B, C, D$ ，调整制孔末端偏置距离并使四边形  $ABCD$  足够小。这里将各激光测距仪测得的距离用  $L_i$  表示，在机器人工具坐标系下，可得到这4个光斑坐标：

$$\begin{bmatrix} L_1 x_i \\ L_1 y_i \\ L_1 z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + L_1 m_i \\ y_i + L_1 n_i \\ z_i + L_1 q_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

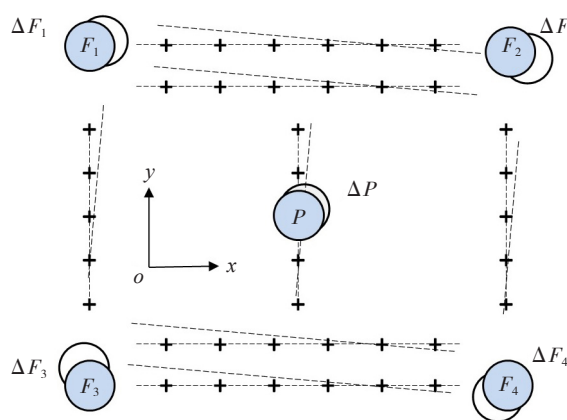


图7 视觉测量孔位修正数学模型  
Fig.7 Mathematical model of vision measuring

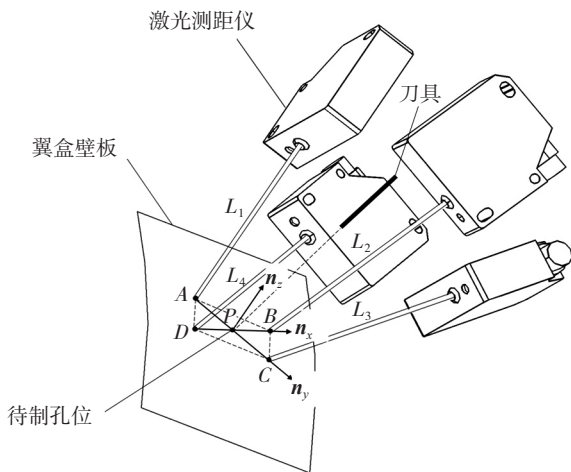


图8 法向测量原理图  
Fig.8 Normal measuring principle

其中,  $i=1,2,3,4$ 。

于是,得到四边形  $ABCD$  对角线向量:

$$n_x = AC$$

$$n_y = DB$$

对上面两向量进行叉乘,得到向量  $n_z$ ,即:

$$n_z = n_x \times n_y$$

向量  $n_z$  即视为孔位法向量,表示为以下形式:

$$n_z = (a, b, c)$$

这里,  $a, b, c$  分别表示法向量  $n_z$  在工具坐标系下的分量。

保持 TCP 不变,调整制孔末端执行器姿态,使刀具中心线与法向量  $n_z$  重合,其变换公式为:

$$[a, b, c]^T = R[0, 0, 1]^T \quad (12)$$

式中,  $R = Rot(y, \beta)Rot(x, \alpha)$

式(12)展开后可计算得到  $\alpha$  和  $\beta$  值:

$$\alpha = \arcsin(-b)$$

$$\beta = \arctan(a/c) \quad (13)$$

机器人调整末端执行器姿态时,先绕工具坐标系  $y$  轴旋转  $\beta$  角度,再绕工具坐标系  $x$  轴旋转  $\alpha$  角度,将调整后的机器人末端姿态存入制孔程序文件,完成法向找正。

## 翼盒机器人制孔系统验证

### 1 翼盒机器人移动定位作业流程

首先进行翼盒机器人制孔系统

中的工具坐标系、照相坐标系、iGPS 测量场坐标系的标定,并对翼盒制孔进行工艺分区,确定 AGV 移动站位。利用离线编程软件读取翼盒理论数模上的点位信息数据并进行处理,生成机器人可执行的 xml 制孔文件。用路径规划软件进行 AGV 到达第一工作站位的路径规划,将路径文件通过 Wi-Fi 发至 AGV 车载计算机,AGV 根据规划好的路径在 iGPS 的引导下,行驶至第一工作站位,AGV 定位后,开始第 1 个制孔区域的自动制孔,第 1 个加工区域的制孔工作完成后,AGV 行驶至下一个工作站位,重复自动制孔过程,以此类推,完成全机翼制孔作业,翼盒机器人系统的自动化制孔作业流程如图 9 所示。

### 2 末端执行器制孔作业流程

AGV 和机器人在整个翼盒机器人制孔系统中仅仅作为一个操作平台,用来操作末端执行器在整

个翼盒制孔工作空间内进行移动、调姿,以满足翼盒制孔工艺要求。真正完成对机翼壁板制孔作业的是装在机器人末端法兰上的制孔末端执行器,制孔末端执行器作为一个完整的制孔单元,拥有自己单独的控制系统和控制软件,可根据实际制孔工艺设定刀具运动参数<sup>[8]</sup>。其一个制孔周期工作流程如图 10 所示。

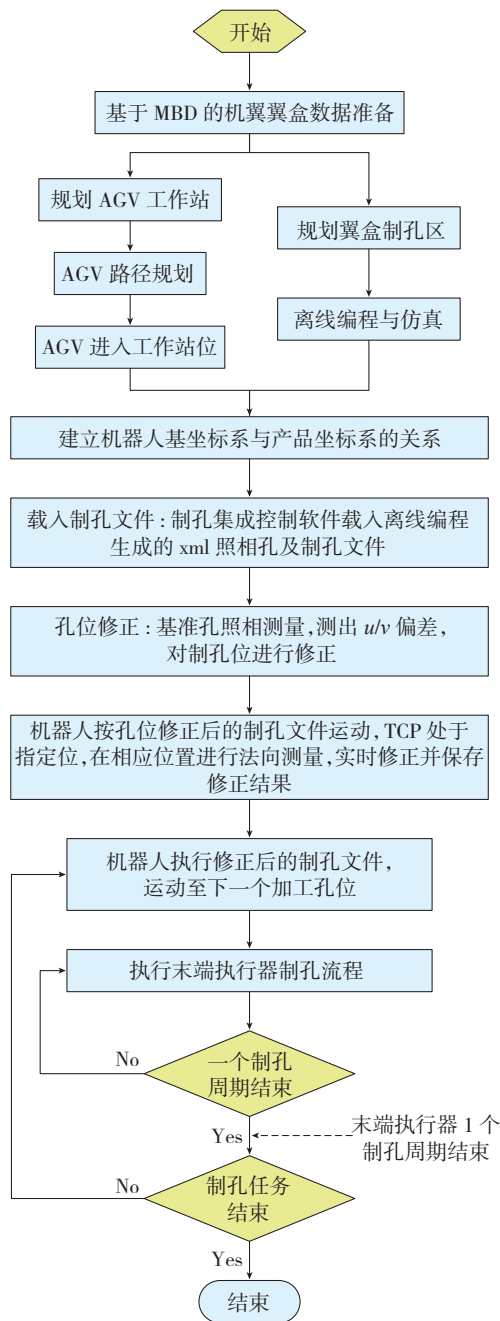


图9 机器人自动制孔流程图  
Fig.9 Flow chart of robot drilling system

### 3 翼盒机器人制孔系统模拟验证

验证件按 C919 翼盒结构, 取 9#~14# 肋 1:1 外翼盒段, 用本翼盒机器人制孔系统对验证件上下壁板进行了连续多站位机器人制孔, 完成两千余孔的制孔和镗窝工作。制孔中的翼盒机器人制孔系统如图 11 所示。

验证试验中, 机器人制孔系统对翼盒验证件的上、下壁板(材料:7050-T7451, 最大叠层厚度:16.8mm)进行孔径为  $\Phi 6.35$  制孔及镗窝。制孔完成后, 除对孔位置精度、孔几何精度检测外, 还进行了涂胶/装订、密封检测等验证工作。限于文章篇幅, 这里仅展示部分检测数据, 见表 1、表 2。

以上测量结果证明, 翼盒机器人制孔系统较人工制孔大大提高了制孔质量和效率, 能满足大飞机机翼装配自动制孔需求, 制孔精度、制孔效率满足设计要求。



图11 翼盒模拟件机器人制孔系统  
Fig.11 Verification of robot drilling system

展期, 实现大飞机部装、总装的自动化、智能化将是我国民机制造业提升制造水平和赶超西方航空巨头的重要标志。本文通过对大飞机翼盒机器人制孔系统集成技术研究, 完成了以机械系统、电控系统、iGPS 导航系

统以及控制软件为集成单元的复合机器人移动制孔系统的实机研制。在数字化制造技术航空科技重点实验室, 利用大飞机翼盒机器人制孔系统, 对 C919 机翼的 9~14# 肋盒段进行了制孔试验, 实现了 AGV 搭载工

### 结论

我国大飞机产业正处在高速发

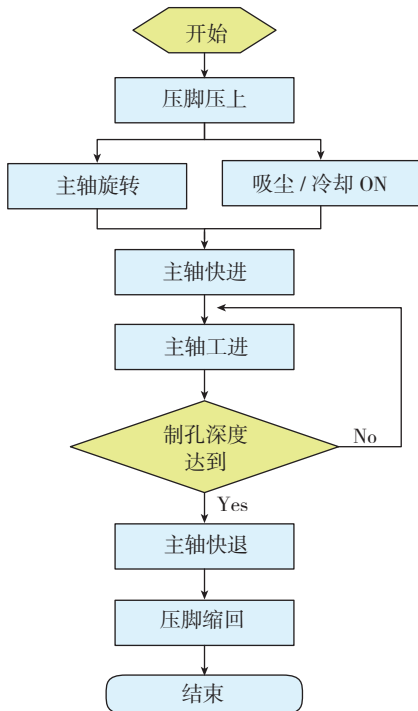


图10 末端执行器工作流程图  
Fig.10 Flow chart of robot end effector

表1 制孔位置精度检测结果

| 测量项目      | 标称值 | 正公差 | 负公差  | 实测值    |
|-----------|-----|-----|------|--------|
| 圆柱孔 01 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.178 |
| 圆柱孔 02 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.033 |
| 圆柱孔 03 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.850 |
| 圆柱孔 04 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.938 |
| 圆柱孔 05 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.080 |
| 圆柱孔 06 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.976 |
| 圆柱孔 07 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.134 |
| 圆柱孔 08 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.080 |
| 圆柱孔 09 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.088 |
| 圆柱孔 10 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.100 |
| 圆柱孔 11 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.997 |
| 圆柱孔 12 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.049 |
| 圆柱孔 13 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.099 |
| 圆柱孔 14 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.933 |
| 圆柱孔 15 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.945 |
| 圆柱孔 16 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.713 |
| 圆柱孔 17 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.158 |
| 圆柱孔 18 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 29.955 |
| 圆柱孔 19 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.004 |
| 圆柱孔 20 孔距 | 30  | 0.5 | -0.5 | 30.123 |

表2 制孔几何精度等检测结果

| 序号 | 检测项目     | 实测值                        | 备注     |
|----|----------|----------------------------|--------|
| 1  | 孔定位精度    | $\leq \pm 0.25\text{mm}$   | 行列精度   |
| 2  | 孔径精度     | $\leq 0.035\text{mm}$      | —      |
| 3  | 孔垂直度     | $90^\circ \pm 0.25^\circ$  | —      |
| 4  | 孔壁粗糙度    | $\leq R_a 1.6 \mu\text{m}$ | 40# 油雾 |
| 5  | 铤窝深度     | $\leq 0.05\text{mm}$       | —      |
| 6  | 制孔效率     | 3 个 /min                   | 平均统计   |
| 7  | AGV 定位精度 | 2mm                        | 站位行走   |

业机器人的复合式机器人自动制孔系统在航空制造中的初步应用,验证了该机器人制孔系统在大尺寸航空产品装配过程中,通过多站位移动式制孔的可行性。

### 参考文献

[1] 温家宝. 让中国的大飞机翱翔蓝天[J]. 航空工业经济研究, 2008(4): 7-10.

WEN Jiabao. Let China's large aircraft fly the blue sky[J]. Research on Economy of Aviation Industry, 2008(4): 7-10.

[2] 秦瑞祥, 邹冀华. 工业机器人在飞机数字化装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(23/24): 104-108.

QIN Ruixiang, ZOU Jihua. Application of

industrial robot in digital assembly of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(23/24): 104-108.

[3] 范玉青. 大型飞机总装配中的若干问题[J]. 航空制造技术, 2012, 55(1/2): 78-80.

FAN Yuqing. Problem on final assembly of large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(1/2): 78-80.

[4] 袁培江, 陈冬冬, 王田苗, 等. 航空制孔机器人末端执行器高精度制孔方法研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 81-86.

YUAN Peijiang, CHEN Dongdong, WANG Tianmiao, et al. Research on high precision drilling method of end-effector for aviation drilling robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 81-86.

[5] 张云志, 蒋倩, 邹方, 等. 一种基于

光电扫描的室内 AGV 位姿测定方法[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(6): 15-19, 35.

ZHANG Yunzhi, JIANG Qian, ZOU Fang, et al. A positioning omnidirectional AGV method based on photoelectric scanning[J]. Aeronautical Precision Manufacturing Technology, 2015, 51(6): 15-19, 35.

[6] 吕冬冬, 郑松. 工业机器人开放式控制系统研究综述[J]. 电气自动化, 2017, 39(1): 88-91.

LÜ Dongdong, ZHENG Song. A summary of researches on open-architecture control systems for industrial robots[J]. Electrical Automation, 2017, 39(1): 88-91.

[7] MEI B, ZHU W D. Robot base frame calibration with a 2D vision system for mobile robotic drilling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(9-12): 1903-1917.

[8] 刘顺涛, 陈雪梅, 郭喜锋, 等. 飞机蒙皮自动制孔工艺设计研究[J]. 制造业自动化, 2017(4): 87-90.

LIU Shuntao, CHEN Xuemei, GUO Xifeng, et al. Research on the process of automatic holing for airplane skin[J]. Manufacturing Automation, 2017(4): 87-90.

通讯作者: 张云志, E-mail: sfzhyz@vip.sina.com。

## Research on Integration Technology of Wing Box Robot Drilling System for Large Aircraft

ZHANG Yunzhi, JIANG Qian

(Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** It is believed that wing assembly is of great importance in aircraft manufacturing. With the change of market demands, such as the number of holes of wing box assembly, the requirements of high quality and high work intensity, various digital and automatic equipment appeared being popular both in international and domestic aviation manufacturing industry. Because of the high flexibility, robots are widely applied to implement digital drilling operation assembly of the wing skin panels, which leads a new trend in wing assembly of the modern aircraft. This paper introduced a mobile digitized drilling system for wing assembly based on AGV carrying robot. Besides, the author explored the integration technology of compound robot drilling system. The integration of the whole system was achieved through the mechanical structure integration, electrical control integration and software control integration, which could be the key point in achieving automatic and accurate drilling of the large aircraft wing box robot system.

**Keywords:** Large aircraft assembly; Robot drilling; Drilling end effector; Integrated control; Normal measuring

(责编 文竹)