

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.045

基于工业机器人运动学的自动制孔离线编程研究

杨帆¹, 田威², 戴家隆^{2,3}, 叶明露³

(1. 陕西飞机工业有限责任公司, 陕西 汉中 723213;

2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

3. 江苏航鼎智能装备有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要:针对目前飞机制造生产中采用机器人进行制孔时,存在对人工依赖性强、编程一致性较差的问题,基于机器人运动学构建制孔离线编程系统,对虚拟环境下的机器人运动机构进行仿真验证,对机器人制孔过程中的加工姿态进行分析和优化。利用 Automation 技术针对 DELMIA 进行二次开发,用户通过设定加载数据库中的工艺信息,可批量化处理并生成加工孔位、加工轨迹及加工程序,有效地缩减产品离线编程周期,提高离线编程自动化程度和质量。

关键词:离线编程;自动制孔;二次开发;运动学分析

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0240-04

Research on Off-line Programming of Automatic Hole Making Based on Kinematics of Industrial Robots

YANG Fan¹, TIAN Wei², DAI Jialong^{2,3}, YE Minglu³

(1. Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd., Hanzhong 723213, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Jiangsu Hangding Intelligent Equipment Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Concerning the strong artificial dependence and poor programming consistency in hole-making by robot in aircraft manufacturing, an off-line programming system for hole making was constructed based on robot kinematics, and the robot motion mechanism in virtual environment was simulated and verified to analyze and optimize the machining attitude in the process of robot hole making. Automation technology was used for secondary development of DELMIA, the process information in the database was loaded and processed by batch, generating processing holes, processing tracks and processing programs, which effectively reduces the product offline programming cycle, and improves the degree of automation and quality of offline programming.

Keywords: off-line programming; automatic hole-making; secondary development; kinematic analysis

0 引言

近年来随着航空技术的迅猛发展,对飞机的装配质量和寿命提出了更高的要求。而飞机连接孔的一致性和垂直度作为影响疲劳寿命和安全性的关键,通过传统的制孔加工技术逐渐难以满足其高质量的需求。因此航空制造业通过采用自动钻铆设备来提高装配质量,减少人为因素和成本,同时提高生产效率^[1]。自动钻铆系统配置专用末端执行器的数控机床或机器人,涉及结构布局优化、多功能末端执行器设计、数字化辅助测量、自动压铆控制、离线编程与仿真等多种关键技术。工业机器人作为高端制造业数字化、智能化

的载体,由于其高度的灵活性、适应性以及低成本、易集成的特点,在飞机部件的自动制孔领域得到越来越广泛的应用^[2]。例如国外飞机制造商在 C130 飞机的梁腹板以及 F35 飞机机翼的上壁板上都应用了机器人自动制孔技术^[3]。

通过早期的技术积累和应用,机器人自动制孔技术被国外发达国家所垄断,其中较为著名的有美国 EI 公司研发的 ONCE 机器人自动制孔系统, GEMCOR 公司 G2000 自动钻铆设备^[4]和德国保捷研发的 RACe 自动制孔系统^[5]。而国内对于飞机自动化制孔技术的研究及应用起步较晚,以北京航空航天大学、南京航空航天大学、浙江大学等高校为首分别对部分机器人自动制孔关键技术

基金项目:江苏省产业前瞻与关键核心技术竞争项目(BE2022078)

第一作者简介:杨帆(1987—),男,陕西汉中人,工程师,本科,研究方向为飞机数字化装配工作,yangfan@163.com。

如误差补偿、末端执行器设计和离线编程等开展了研究,并取得了较大的进展^[6]。北航基于上位机和 PLC 研发的机器人自动制孔系统,制孔效率相对于人工提高了 50%以上,制孔精度完全符合飞机的装配要求^[7]。南航自主设计了自动钻铆末端执行器并通过有限元软件进行了静力学、动力学分析及验证,以离线编程为基础对加工孔的法矢和姿态进行了修正,然后构建了 TSP 数学模型来优化制孔加工轨迹,保证了飞机制孔的质量和精度^[8]。浙江大学对双机器人制孔系统、加工孔路径规划的蚁群优化算法、自动制孔换刀技术和孔位非接触测量技术进行了研究,机器人的定位精度达到了 0.05 mm^[9]。

离线编程技术作为机器人自动制孔系统的关键组成部分,直接影响着制孔加工精度、效率和后续装配质量,国内外均有学者采用离线编程的方式对自动钻铆进行研究^[10-12]。目前离线编程通常是利用产品数模特征生成初步的制孔加工信息,然后对加工点逐个进行调节和二次规划,工作量巨大且精度易受编程人员影响,难以保证一致有

效的制孔加工^[13]。因此本文基于运动学搭建机器人自动制孔离线编程系统,通过分析机器人姿态对制孔加工质量的影响作为二次开发的理论依据,旨在提高机器人自动制孔的质量和效率。

1 机器人制孔系统设计和姿态优化

机器人自动制孔系统是以六轴机器人为核心,集成制孔末端执行器、工装、产品的自动化控制系统。通过 DELMIA 搭建虚拟机器人自动制孔系统,对机器人制孔进行仿真和加工任务规划。DELMIA 作为法国达索公司的一款数字化制造平台系统,具有较强的机器人仿真作业功能,其核心是集成了工艺、产品、资源的 PPR 系统,从而实现由工艺设计到产品加工的完整生命周期^[14-15]。

1.1 机器人运动学分析

制孔机器人型号为 KUKA KR210R2700,根据运动学理论建立机器人各关节坐标系和运动机构。对机器人各关节坐标系进行标定,如图 1 所示,为了保证机器人运动机构的准确性,建立机器人的正运动学方程进行验证。

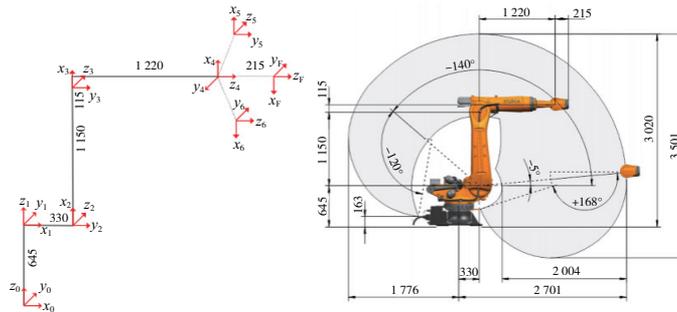


图 1 KR210 R2700 机器人关节坐标系标定

机器人运动学研究的是机器人运动特性,现采用改进型 D-H 参数法来描述机器人各关节连杆空间结构几何关系,其中涉及到 $a_i, \alpha_i, \theta_i, d_i$ 4 个运动参数: a_i, α_i 为常数(取决于实际使用机器人几何参数), θ_i 为转动关节变量, d_i 为移动关节变量。针对该机器人建立的 MDH 参数如表 1 所示。

表 1 KR210 R2700 机器人改进 D-H 参数

关节 i	$\theta/(\circ)$	d/mm	a/mm	$\alpha/(\circ)$	关节范围/ (\circ)
1	0	645	0	0	-185~185
2	-90	0	330	-90	-140~-5
3	0	0	1 150	0	-120~168
4	0	1 220	115	-90	-350~350
5	0	0	0	90	-125~125
6	-180	0	0	-90	-350~350

坐标系的变换是由 4 个连杆参数构成的函数即 $\text{Rot}(x, \alpha_{i-1})$ 、 $\text{Trans}(x, a_{i-1})$ 、 $\text{Rot}(z, \theta_i)$ 、 $\text{Trans}(z, d_i)$ 。建立坐标系后,可以通过 4 步标准运动使得坐标系 x_{i-1} 与 x_i 重合,把 $\text{Rot}(x, \alpha_{i-1})$ 、 $\text{Trans}(x, a_{i-1})$ 、 $\text{Rot}(z, \theta_i)$ 、 $\text{Trans}(z, d_i)$ 按从左到右的原则相乘得到

$${}^{i-1}T = \text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(x, a_{i-1}) \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(z, d_i) \quad (1)$$

依次带入变换得到:

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & \alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i \sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i \sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i \cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过将相邻两关节的齐次变换矩阵连乘建立机器人的正运动学方程,则机器人腕部相对于基坐标系的位姿即可表示为

$${}^0_6T = {}^0_1T_1 {}^1_2T_2 {}^2_3T_3 {}^3_4T_4 {}^4_5T_5 {}^5_6T_6 T \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.2 机器人姿态优化分析

在 DELMIA 中根据机器人三维模型和坐标系标定,采用菱形约束分别为各关节模型建立坐标系及旋转运动副,通过 Device Task Definition 模块中的示教功能,调节机器人各关节角度得到笛卡儿空间中末端位姿,如图 2 所示。将当前关节角度带入机器人正运动学方程,通过给定任意关节值计算机器人末端位姿矩阵,然后将表示姿态的旋转矩阵转换为欧拉角,通过 MATLAB 进行计算可以得到一致的机器人末端位置和角度,保证了建立机器人运动机构的准确性,使后续离线编程系统的任务规划满足实际加工需求。

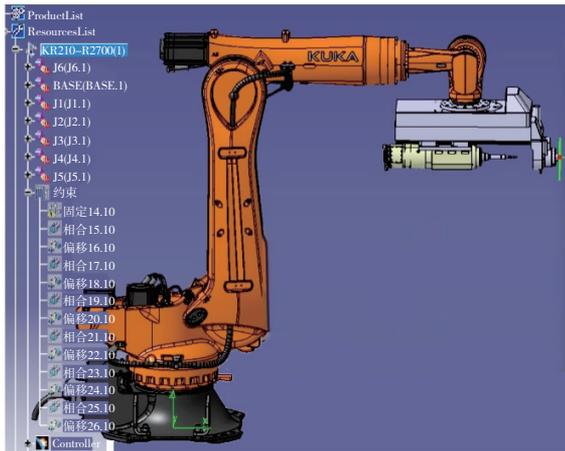


图 2 建立机器人运动机构

在 Jog 模块下可以选择机器人到达目标点位的不同姿态,即对应机器人的多组逆解。首先要保证逆解的存在性。逆解对应的各关节需要在关节限角空间以内,在灵巧工作空间内机器人各轴角度可以灵活调节,而在可达空间内机器人仅能以较少的姿态到达目标点。因此在进行运动规划时应尽量使机器人在灵活工作空间中进行制孔任务^[16-17]。在制孔加工过程中,机器人在绕刀具轴方向存在冗余自由度,当机器人法兰和制孔末端执行器背对地面时,机器人稳定性差同时容易发生干涉。而且在产品不同部位进行转换时会存在第五轴为零的情况,此时参考反变换法求运

动学逆解可以看出当 $\theta_5 = 0$ 时,机器人第四、第六轴的求解不符合逆解的唯一性,在该状态下机器人第四、第六轴共线缺失了 1 个自由度,此时机器人处于奇异状态,第四轴可以取任意值导致机器人进行瞬时自转。当机器人第二关节轴线、第三关节轴线、第四关节轴线共线时,机器人肘部仍出现奇异状态。因此机器人进行制孔任务规划时为了保证良好的加工姿态和质量,在调整姿态规避这些奇异点的同时优先选取路径最短的逆解。

2 离线编程系统开发

通常机器人自动制孔离线编程系统由产品数模生成 Taglist 的方式获得加工孔位置信息,然后规划机器人制孔的运动轨迹^[18]。然而通过该方式得到的 Tag 点存在法向 z 不准确,目标点框架的 x 方向、 y 方向不合理的情况,在生成点位后需要在离线环境下逐个进行调整,同时需要人工进行进退刀的点位插补,制孔质量受人工影响严重且效率低下。因此针对机器人制孔任务需要对 DELMIA 离线软件进行二次开发,通过识别产品的关键特征快速地提取加工孔位信息,然后由简洁的人机交互界面规划制孔加工任务、姿态和轨迹。

DELMIA 提供了基于 COM 的 Automation 和基于 CAA 组件的两种开发方式,其中 CAA 技术基于 C++ 编程语言,在国内相关资料较少,开发难度和成本较大同时会受版本影响。而 Automation 技术是在 COM 的基础上,面向对象和属性来获取及处理数据,完全能够满足机器人自动制孔的需求,同时上手简单且兼容性更好,因此选用 Automation 的方式对 DELMIA 进行二次开发。图 3 所示为开发的机器人自动制孔离线编程系统结构,主要包括工作站可视化模块、孔位信息提取模块、轨迹规划模块和制孔工艺数据库。首先考虑机器人的加工范围并进行站位布局,加载产品和末端制孔执行器建立自动制孔工作站,然后对产品的工艺信息进行提取。

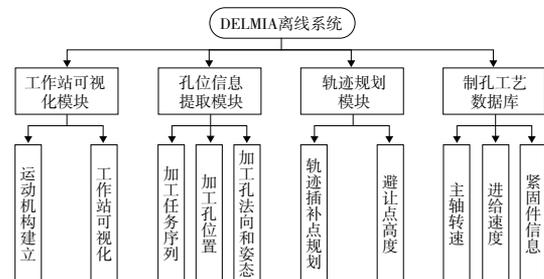


图 3 离线编程系统架构

对于制孔加工任务,最关键的步骤是提取加工孔的位置信息和法向信息。通过 Selection 对象实现程序对数模特征的交互,获得加工孔的点位,选取产品加工面并通过 Add new Line Normal 方法添加孔的法向量 \mathbf{a} 。确定法向量后为了保证机器人良好的加工姿态,防止出现制孔末端执行器和法兰背对地面影响制孔质量和精度,定义制孔目标点的 x 轴即向量 \mathbf{n} 与世界坐标系的 z 轴负方向一致。然后通过下式计算出目标点的 y 轴方向向量 \mathbf{o} ,得到表示机器人加工末端姿态的旋转矩阵。

$$\mathbf{o} = \mathbf{a} \times \mathbf{n} \quad (4)$$

由于获取的孔位位置和法矢信息都是相对于产品即工件坐标系得到的, ${}^W_i \mathbf{T}$ 表示工件坐标系下的孔位位置和各方向向量组成的位姿矩阵, ${}^{\text{base}}_W \mathbf{T}$ 表示机器人基坐标系在工件坐标系下的位姿状态,则由式(5)将加工孔位信息通过齐次变换由产品坐标系转换为机器人基坐标系 Base 下:

$${}^{\text{base}}_i \mathbf{T} = {}^{\text{base}}_W \mathbf{T} {}^W_i \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于孔位的随机选取导致加工顺序随机排列,为了保证制孔质量和效率,需要对加工孔进行路径规划。通过逐个遍历加工孔位 x 或 y 在世界坐标系下的数值,按递增或递减进行点集排序。由于飞机制孔加工产品多为曲面结构,制孔机器人在从当前孔位移动到下一个加工孔时可能发生碰撞,因此为了防止制孔末端执行器与产品之间的干涉,需要在孔位加工前后分别添加过渡点来规避碰撞。通过设置插补点避让高度,机器人沿当前孔位法向进行偏移。

叠层材料和叠层厚度会影响制孔刀具在加工过程的进给速度和主轴转速,因此采用数组的方式将加工材料、厚度分别匹配合适的进给速度和转速,作为制孔加工的工艺数据库。在进行制孔加工任务规划时,仅需定义叠层材料和厚度,任务规划模块将自动调用数据库工艺信息,操作人员也可以根据经验来自行设定。开发的孔位信息提取模块 UI 界面如图 4 所示。

首先确定基准孔的数量,然后选择定位基准孔,同时根据各夹层的材料及厚度匹配工艺参数。在离线交互环境下选择定位基准孔,然后框选区域内或点选加工孔,即可自动获取并生成孔的中

心点位和轴向。图 5 所示为自动提取的孔位及法向信息。通过选取孔位排序方式对生成的孔位进行有序排列,通过压力角避让高度对孔位进行高度补偿,最终由过渡点避让高度添加进退刀插补点,生成制孔加工任务点位序列并输出上位机可识别的制孔加工程序。



图 4 制孔加工任务规划界面

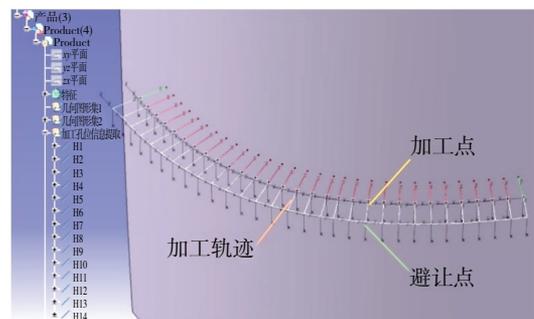


图 5 孔位信息提取及序列轨迹规划

3 结语

本文基于机器人运动学原理,利用 DELMIA 的 DMU 模块构建了机器人制孔离线编程系统,并对机器人运动学方程和运动机构进行了验证。根据机器人可达性和逆解对制孔加工姿态进行优化。以 DELMIA 作为开发平台,基于 MBD 技术利用 Automation 进行二次开发,实现了孔位几何信息的快速提取和加工轨迹自动规划,保证了离线编程的质量和一致性,对提升飞机制孔装配的质量和效率具有重要意义。

参考文献:

- [1] 田威,焦嘉琛,李波,等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2020,52(3):341-352.
- [2] 付鹏强,苗宇航,王义文,等. 航空领域机器人自动钻孔研究进展及关键技术综述[J]. 智能系统学报, 2022,17(5):874-885.

(下转第 249 页)

- 制技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.
- [7] 王鑫,罗广旭,周玉璇,等. 空调永磁同步电机无位置传感器调速控制探究[J]. 制冷,2023,42(3):58-61.
- [8] LEE J, HONG J, NAM K, et al. Sensorless control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2):290-297.
- [9] 赵化勇,田伟,吉敬华. 基于L/F启动的PMSM无感复合控制方法[J]. 电子测量技术,2024,47(16):41-48.
- [10] 王一凡,石一馨,孙国强,等. 基于SVPWM的永磁同步电机矢量控制方法研究[J]. 微电机,2024,57(9):14-21.
- [11] 赵毅恒,宁博文,卢少武,等. 基于L/F启动和扩展卡尔曼滤波的永磁同步电机全速域无传感器控制方法[J]. 电机与控制应用,2022,49(2):1-7,19.
- [12] 陈再发,刘彦呈,卢亨宇. 船舶永磁同步电机全转速范围无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(5):58-67.
- [13] 王垚鑫,年珩,赵建勇,等. PMSM的L/F结合滑模控制的模型设计实现方法[J]. 实验技术与管理,2022,39(7):16-23.
- [14] 何志敏. 永磁同步电机开环控制问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2019.
- [15] 刘普,崔艺博,王聪,等. 基于双MPC与变斜率L/f的SPMSM快速启动控制策略研究[J]. 电机与控制学报,2024,28(9):151-161.
- [16] 王萌,杨家强,张翔,等. 一种表贴式永磁同步电机电流矢量闭环L/f控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2513-2521.
- [17] 尹泉,张馨月,罗慧,等. PMSM抑制L/f启动策略稳态速度波动的新型方法[J]. 电气传动,2020,50(6):3-9.
- [18] 陈鑫宇. 基于瞬时转矩理论的感应电机转矩控制及转速估计研究[D]. 南宁:广西大学,2023.
- [19] 张乘玮,沈汉林,唐其鹏,等. 一种高效的PMSM无位置传感器L/f控制方法[J]. 微特电机,2017,45(10):48-52.
- [20] 张翔,高岚. 船舶永磁同步推进电机的优化L/f启动控制方法[J]. 舰船科学技术,2024,46(4):109-115.
- [21] 梁波,尹华杰. PMSM的MP-MRAS无位置传感器控制[J]. 机械制造与自动化,2022,51(2):149-151,156.

收稿日期:2023-12-08

(上接第243页)

- [3] 袁培江,陶一宁,傅帅,等. 航空制孔机器人的现状与展望[J]. 航空制造技术,2022,65(13):38-47.
- [4] THOMPSON P, OBEROI H, DRAPER A. Development of a multi spindle flexible drilling system for circumferential splice drilling applications on the 777 airplane[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2008;01-2301.
- [5] LOGEMANN T. Mobile robot assembly cell (RACe) for drilling and fastening[C]//SAE Technical Paper Series. Warrendale: SAE International, 2016;01-2078.
- [6] 何凤涛,陈雪梅,熊衍龙,等. 曲面自动化制孔技术研究现状与发展趋势[J]. 科学技术与工程,2020,20(29):11834-11841.
- [7] 姚艳彬,毕树生,员俊峰,等. 飞机部件机器人自动制孔控制系统设计与分析[J]. 中国机械工程,2010,21(17):2021-2024.
- [8] 冯昌源. 机器人自动钻铆系统离线轨迹与姿态优化方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [9] 朱文杰. 飞机壁板机器人制孔系统换刀技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2020.
- [10] 盛王鼎,黎朝晖,周恩恩,等. 运载火箭短壳自动钻铆离线编程技术研究[J]. 航天制造技术,2021(5):40-45.
- [11] LEE ISAACS L, NELSON R, TRAPP S. Recreational therapists consider leisure motivation when evaluating virtual reality games [J]. Therapeutic Recreation Journal, 2021, 55(4):399-413.
- [12] LUO QUN, XUE HONG, LIU BOFENG, et al. Accurate data extraction technology for off-line programming of aircraft automatic drilling [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4):97-102.
- [13] 王巍,周星宇. 面向垂尾壁板的自动制孔离线编程模块设计及孔位误差分析[J]. 机械工程师,2021(3):17-20,23.
- [14] 陶鹏,王华兴,段代坤,等. 基于CAA的船舶工艺仿真环境搭建与LNS-SATSP排产优化[J]. 船海工程,2024,53(4):71-77.
- [15] 孙颖. 面向机身壁板的自动制孔系统应用研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2023.
- [16] ZHU W D, MEI B, KE Y L. Inverse kinematics solution of a new circumferential drilling machine for aircraft assembly[J]. Robotica, 2016, 34(1):98-117.
- [17] 刘国良,孙文磊. 复杂曲面随形打印变形机器人逆解算法与控制研究[J]. 机床与液压,2023,51(5):29-34.
- [18] 杨东浩,方维,许澍虹. 基于混合现实技术的民机驾驶舱仿真平台[J]. 民用飞机设计与研究,2022(4):13-20.

收稿日期:2024-05-27