

# 柔性装配制孔设备运动学分析及仿真研究\*

## Kinematics Analysis and Simulation of Flexible Assembly Automatic Drilling Machine

王巍<sup>1</sup> 梁涛<sup>1</sup> 刘中文<sup>2</sup> 陈军<sup>2</sup> / 1 沈阳航空航天大学 2 解放军95503部队

**摘要:** 柔性装配制孔设备的应用显著提高了飞机的装配效率, 减少了制造时间和成本。为了对制孔设备进行精确控制, 运用D-H参数法建立了制孔设备的运动学模型, 采用基于CAA的CATIA二次开发技术开发了柔性装配自动制孔设备离线编程与仿真系统, 实现了在数字化环境下描述该设备的合理运动方案和有效控制算法, 从而解决了其设计、制造以及加工过程中可能出现的问题。

**关键词:** 制孔设备; 运动学; 仿真; 二次开发

**Keywords:** drilling machine; kinematics; simulation; secondary development

### 0 引言

柔性装配系统制孔设备是一种为满足飞机机身、机翼等大部件柔性装配的自动化制孔需求, 安装在柔性导轨上的具备五轴数控加工能力的制孔设备。该设备主要由移动定位平台和末端执行器组成, 具有结构简单、造价低、承载能力强、精度高和易于控制等特点, 是国内外飞机数字化装配技术研究的重要组成部分。运动学分析作为描述制孔设备各运动关节与组成设备各构件之间运动关系的方法, 有助于研究其末端执行器相对于参考基准的位置、姿态和速度以及与各运动关节之间的位置和速度关系, 是进行制孔设备加工仿真和离线编程等任务的基础, 其求解算法将直接影响制孔设备加工仿真和离线编程的精度和速度。

### 1 制孔设备及数学模型的建立

#### 1.1 制孔设备的结构

柔性装配制孔设备结构上包括移

动定位平台和末端执行器, 工作时, 制孔设备通过柔性导轨安装器直接定位在飞机机身或机翼部件上, 如图1所示。移动定位平台可由车架上安装的电机驱动, 沿导轨方向(X向)和垂直于导轨方向(Y向)移动; 末端执行器由摆角单元、主轴箱以及辅助照相检测设备组成, 可绕A轴进行摆动(A向)、沿主轴方向(Z向)垂直移动。从结构设计上看, 该设备只具备四坐标数控加工功能, 但由于其吸附安装在可拼接延长的柔性弯曲导轨上, 相当于增加了一个转动自由度, 因此可认为其具备五轴数控加工功能。

#### 1.2 制孔设备运动学数学模型的建立

上述制孔设备可以看成是一个由一系列连杆通过转动或移动关节串联而成的开式运动链, 其中一端固定, 另一端自由, 安装着末端执行器以完成制孔作业。为研究制孔设备各连杆之间的位姿关系, 采用运动学分析常

用的方法——D-H参数法来进行分析, 其基本思想<sup>[1]</sup>是: 为运动链中的每一个连杆建立附加坐标系, 采用齐次坐标来描述各连杆相对于参考坐标系的空间几何关系, 用 $4 \times 4$ 的齐次变换矩阵来描述相邻两连杆的空间几何关系, 从而推导出末端执行器坐标系相对于参考坐标系的空间位姿关系, 建立制孔设备的运动学方程。

该制孔设备可以简化为由4个连杆和4个运动关节组成的机器手臂, 根据D-H坐标系的规则和各杆件参数的求取规则, 建立了制孔设备处于零点位置时的连杆坐标系, 如图2所示, 表1为制孔设备的D-H参数。

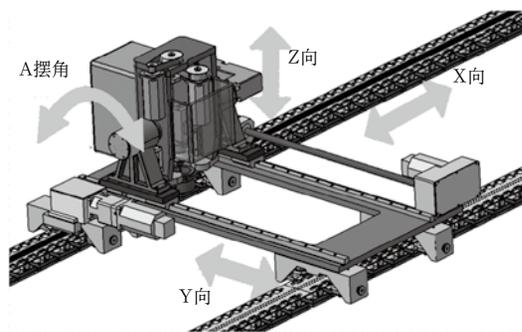


图1 制孔设备的实体模型

\* 基金项目: 航空科学基金(2009ZE54007)资助项目。

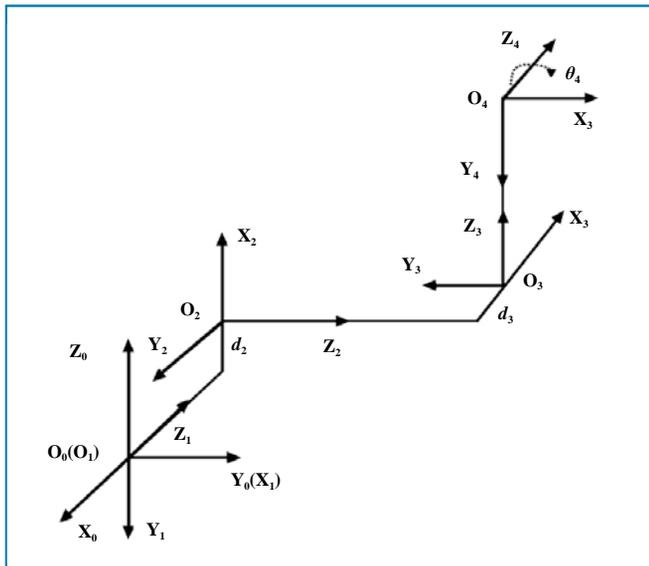


图2 制孔设备的连杆坐标系

表1 制孔设备的D-H参数

连杆 $i$	连杆长度 $a_{i-1}$ (mm)	扭角 $\alpha_{i-1}$ (度)	连杆偏置 $d$ (mm)	关节角 $\theta$ (度)
1	$L$	0	0	0
2	200	90	20	0
3	50	-90	40	0
4	0	90	0	10

 注: $L$ 为导轨长度

## 2 制孔设备的运动学方程

建立与求解制孔设备的运动学方程是对制孔设备进行控制与模拟仿真的关键技术。其实质是通过建立杆件的D-H坐标系,利用齐次变换矩阵表示系统中相邻运动部件之间的相对位姿和运动关系,将这些矩阵依次相乘便得到末端执行器的变换矩阵,计算出末端执行器相对于基坐标系的位姿,或根据末端执行器相对于基坐标系的位姿反解各运动部件的变换矩阵,从而实现对接孔设备末端执行器的控制和模拟<sup>[2]</sup>。其中相邻两连杆变换矩阵的表达式为:

$${}_{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & s\theta_i s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $c$ 表示 $\cos$ , $s$ 表示 $\sin$ , $i=1,2,3,4$ 。

相邻连杆之间的连杆长度、扭角、连杆偏置和关节角为已知,代入D-H参数可分别求出 ${}^0_1T$ 、 ${}^1_2T$ 、 ${}^2_3T$ 、 ${}^3_4T$ ,根据坐标变换理论可得到制孔设备的运动学方程正解,即通过制孔设

备各运动部件的坐标系之间的矩阵变换求解出末端执行器相对于基坐标系的坐标变换:

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} n_x & O_x & a_x & p_x \\ n_y & O_y & a_y & p_y \\ n_z & O_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$n_x = c_1 c_2 c_3 c_4; \quad n_y = s_1 c_2 c_3 c_4; \quad n_z = s_1 c_2 c_3 s_4;$$

$$O_x = c_1 c_2 s_3 s_4; \quad O_y = -s_1 c_2 c_3 s_4; \quad O_z = -s_1 c_2 c_3 c_4;$$

$$a_x = c_1 c_2 s_3; \quad a_y = s_1 c_2 s_3; \quad a_z = s_1 c_2 c_3;$$

$$p_x = c_1 c_2 (c_3 a_3 + s_3 d_4 + a_2) - c_1 s_2 d_3 + c_1 a_1 - s_1 d_2 + a_0;$$

$$p_y = s_1 c_2 (c_3 a_3 + s_3 d_4 + a_2) - c_1 s_2 d_3 + s_1 a_1 + s_1 d_2;$$

$$p_z = s_1 c_2 (c_3 a_3 + s_3 d_4 + a_2) + s_1 (a_1 - s_2 d_3 + d_2) + d_1;$$

其中, $c_i$ 表示 $\cos\theta_i$ , $s_i$ 表示 $\sin\theta_i$ , $[p_x \ p_y \ p_z]^T$ 为制孔设备末端执行器在基坐标系中的位置, $[n_x \ n_y \ n_z]^T$ 为末端执行器坐标系的X轴在基坐标系中的方向矢量, $[O_x \ O_y \ O_z]^T$ 为末端执行器坐标系的Y轴在基坐标系中的方向矢量, $[a_x \ a_y \ a_z]^T$ 为末端执行器坐标系的Z轴在基坐标系中的方向矢量。

已知加工孔位置,为实现对设备的操作控制,驱动各运动部件,使末端执行器快速移动到工作位置进行加工,就需要对设备的运动学方程进行反解。即在已知制孔设备各运动部件的几何参数和末端执行器相对于基坐标系的位姿情况下,为使末端执行器相对基坐标系的位姿满足既定要求,需要反解计算出设备相应的关节变量,即各连杆的偏移长度 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 和连杆4的关节角 $\theta_4$ 。运动学方程的反解同时也是编制制孔设备运动控制与仿真系统软件的基础,由于运动学方程的反解具有存在性和非唯一性两个显著特点,因而决定了制孔设备工作可达性的验证和路径规划的合理选择。

根据制孔设备运动学的正解,使用矩阵逆乘的解析法求解该设备的运动学反解,根据式(2),将 ${}^0_4T$ 左乘 ${}^0_1T^{-1}$ 可得:

$${}^0_1T^{-1} {}^0_4T = {}^1_4T \quad (3)$$

式(3)左边只含一个关节变量,利用矩阵相等的性质从右边矩阵找到零元素或常量元素以求得关节变量 $a_0$ 。类似可得到:

$${}^1_2T^{-1} {}^1_4T = {}^2_4T \quad (4)$$

$${}^2_3T^{-1} {}^2_4T = {}^3_4T \quad (5)$$

在以上三个公式中,当后关节变量确定后,等式左边都只含一个变量,可利用等式右边的元素进行求解,依次求得关节变量 $a_1$ 、 $a_2$ ,将所求得的参数 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 再代入式(2)即可求得参数 $\theta_4$ 。所求得的反解由于其非唯一性,还需要进一步优化选择。常用的最优解原则包括距离最短原则和时

间最短原则,可在实际应用中根据不同的生产需要进行选择。前者是指各关节变量的绝对值之和最小,主要用于操作工序对时间没有特殊要求的情况;后者是指各运动部件达到目标的用时最少,此原则可保证较高的生产效率,但不能保证功耗最优<sup>[3]</sup>。

### 3 制孔设备的离线编程与仿真系统开发

针对柔性制孔设备的结构特点和实际生产需要,在对制孔设备的运动学分析基础上,采用基于CAA的CATIA二次开发技术研制了柔性导轨自动制孔设备离线编程与仿真系统,其操作界面如图3所示。该系统主要包括加工仿真与离线编程两大模块,以



图3 离线编程与仿真系统的工作界面

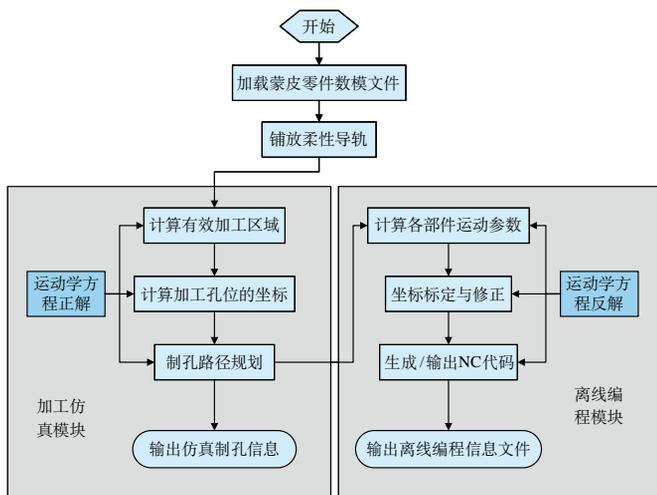


图4 离线编程与仿真系统原理

制孔设备的三维数字模型和待加工零件的数字模型为操作对象,在虚拟环境中对制孔设备进行加工模拟仿真与分析,实现了包括设备运动控制、制孔轨迹跟踪显示与路线规划、制孔NC代码的创建与输出等功能,系统原理如图4所示。

在对制孔设备进行加工仿真和控制之前,首先需在CATIA软件中对设备模型的各关节建立驱动命令。按照实际情况创建Z轴部件和A轴部件之间、W轴部件和Y轴部件之间、Y轴部件和X轴部件之间的三个棱形运动副,创建A轴部件和Y轴部件之间的旋转运动副。然后设置各运动副的下限和上限位置参数值、各运动关节参数的变化函数以进行计算机仿真模拟,

此函数即为各运动关节的运动学方程反解。在仿真程序的设计中采用C++面向对象的程序设计思想,封装出多种C++类,对制孔设备的运动机构数字模型进行操作访问和检测控制,通过调用派生于CAA基类的自定义类所提供的成员函数,驱动制孔设备数字模型的各个运动部件,按照制孔工艺的规定和 product 需求,产生基于CATIA工作空间的运动仿真效果,图5即为运动

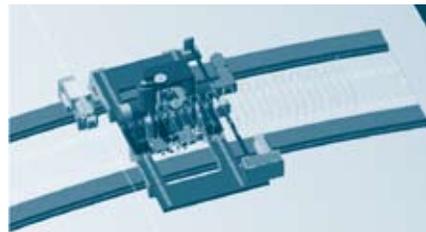


图5 制孔设备的运动仿真



图6 生成NC代码

仿真的基本状况。

通过该系统的离线编程功能,在虚拟环境中完成设备的加工模拟仿真,应用制孔设备运动学方程反解将加工仿真后获得的各运动部件位置和姿态数据换算成其对应的脉冲量,将待加工孔在制孔加工坐标系下的坐标值(X,Y)作为主轴定位指令参数写入制孔NC代码中,并将制孔加工NC代码输出到磁盘文件,得到在实际生产中对制孔设备进行数控操作的指令,如图6所示。

### 4 结束语

建立柔性装配制孔设备的运动学模型,从几何角度对设备的各运动部件进行运动学分析,是实现制孔设备的关节运动控制和整体运动规划的必要手段,也是对其进行仿真模拟和精确控制的重要理论基础。在制孔设备运动学分析的基础上所开发的离线



# 新型等离子体电扫描八木天线的关键技术研究\*

## Research on the Key Technology of Novel Plasma Electronic Scanning of Yagi Antenna

赵鑫<sup>1</sup> 戴钊阳<sup>2</sup> 孔祥鲲<sup>1</sup> 刘少斌<sup>1,3</sup>

1 南京航空航天大学电子信息工程学院 2 95826部队 3 东南大学毫米波国家重点实验室

**摘要:** 提出了一种新型等离子体电扫描八木天线, 研究了基于等离子体的电扫描八木天线的关键技术。通过对等离子体半波振子的仿真, 研究了等离子体半波振子天线的辐射性能、隐身性能和等离子体对电磁波的反射和吸收作用。通过实验测试了等离子体中电子密度, 制作了一款等离子体电扫描八木天线原理样机, 并进行了测试。

**关键词:** 等离子体; 八木天线; 电扫描

**Keywords:** plasma; Yagi antenna; electronic scanning

### 0 引言

现代高科技战争中, 掌握军事主动权的关键因素是控制电磁权, 保证整个通信系统的畅通无阻。天线作为通信系统的前端, 是系统的关键部件。天线性能的好坏, 直接影响通信系统的运行质量。在天线的设计上, 传统金属天线的尺寸一旦确定, 其工作的频段也就被

限定了, 也就是说, 为了达到不同的工作频率, 必须改变天线的尺寸或形状。同时天线中金属部件的雷达散射截面(RCS)很大, 在战场上极易被敌方雷达探测到, 成为首先被打击的目标, 战场上的生存性较弱。此外, 由于作战的需要, 往往将不同功能的电子设备集中到飞机、舰船等载体中, 这些电子设备相

互产生强烈的干扰, 各种天线之间存在着严重的近场耦合, 大大影响了载体的工作性能。

等离子体天线是一种与传统天线结构有较大差异的低雷达截面天线, 可利用等离子体的可开关特性实现天线的辐射与隐身状态的切换; 可利用控制外加磁场和等离子体激励电极,

编程与仿真系统软件, 通过在虚拟环境中进行加工过程的模拟仿真, 使其运动位置关系可视化, 及时显示干涉情况, 实现了无损式系统检查; 通过将计算机仿真控制语言转化输出为NC控制代码, 实现了对制孔设备的数字化精确控制, 从而有效提高了柔性装配制孔设备的制孔效率。 **AST**

### 参考文献

[1] 邢迪雄, 张琦. 基于CATIA V5的工业机器人运动学仿真研究[J]. 机械, 2011(38):57-61.

[2] 陈乐生, 王以伦. 多刚体动力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995.

[3] 减铁生. 装配机器人离线编程系统[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.

[4] 李庆龄, 刘加亮. 六自由度工业机器人运动学分析及仿真[J]. 机电工程技术, 2008(37):36-38.

[5] Richard M M, Li Z X, Shankar S S. A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.

[6] Hunt K H. Kinematic geometry

of mechanisms[M]. Oxford: Oxford University Press, 1978.

[7] 冯志友, 李永刚, 张策, 等. 并联机器人机构运动学与动力学分析研究现状与展望[J]. 中国机械工程, 2006, 17(9):979-984.

[8] 吴瑞祥. 机器人技术与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994.

### 作者简介

王巍, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数字化飞机制造技术、飞机装配工装的通用性及模块化设计。