

面向自动钻铆离线编程的工艺信息提取与校验技术*

刘连圣, 王 珉, 丁力平, 徐庆贺

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 钻铆点工艺信息的获取是自动钻铆离线编程系统的基础。针对具有 MBD 规范定义的工件数模, 在 CATIA 二次开发平台上自动提取待加工孔位的坐标、法矢、名称、紧固件牌号等工艺信息。为确保法矢方向满足系统和工艺需求, 通过创建法向参考线, 开发了异常法矢的校验和修正模块。最后以某飞机壁板类 MBD 模型为例, 对该信息提取平台进行了验证。结果表明: 系统可快速提取钻铆工艺信息, 并能准确识别方向异常法矢, 为系统的准确性和可靠性提供了保障。

关键词: 钻铆; 飞机装配; 离线编程; 工艺信息提取; CAA

Process Information Extraction and Self-Checking Technology for Automatic Drilling and Riveting off-Line Programming System

LIU Liansheng, WANG Min, DING Liping, XU Qinghe

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The extraction of drilling and riveting point's process information is the basic of off-line programming system. On the CATIA/CAA platform, the MBD digital model's coordinates, vector, symbol, mark were extracted. For the purpose of the correction of vector's direction, vector calibration and correction module was developed, by creating a reference line. In the end, an example of aircraft panel part was given to demonstrate the feasibility of this system. The results indicate that it can effectively extract corresponding process information from MBD model and distinguish abnormal vector and correct it.

Keywords: Drilling; Aircraft assembly; Off-line programming; Process information extraction; CAA

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.21.078

飞机自动装配技术是保证飞机制造高效率、高精度的关键技术之一。现代高性能飞机对机体结构的疲劳寿命要求越来越高, 据统计约 70% 的疲劳损坏发生在机械连接部位^[1], 因此, 先进机械连接技术如自动钻铆技术代替传统手工钻孔、铆接的趋势愈加明显。由于飞机机体连接件数量巨大, 如自动钻铆机床采用在线示教编程不仅费时费力, 随着工作量的增加工艺人员发生失误的概率也会增大, 基于此自动钻铆离线编程技术应运而生^[2]。自动钻铆离线编程是指在已有机床、工件等数模的基础上, 在软件环境中获取钻铆点工艺信息, 通过相应运动学反解算法以及路径规划算法明确机床运动路径, 驱动机床运动并做干涉检验, 最终输出加工代码传送给自动钻铆机。

在离线编程系统中, 钻铆点工艺参数信息的获取是后续运动仿真及加工代码输出的先决条件, 工艺信息的获取主要是在软件环境中对工件数模进行交互操作。基于模型的数字化定义 (Model Based Definition, MBD) 技术在航空工业的普及应用^[3-4], 为自动钻铆工艺信息的提取带来了极大的方便。MBD 技术将产品整个生命周期的工程信息全集中在一个三维模型中, 实现了真正的单一数据源, 保证了设计数据的唯一性, 同时也避免了传统基于图纸检查模型的繁琐工作。近年来, 学者们对基于 MBD 模型的工艺信息提取技术进行了深入研究。Huang 等^[5]介绍了一种从整体模型中提取相似子部件的方法, 达到了制造工艺信息再利用的目的; 苗凤金等^[6]提出一种基于改进递归深度优先遍历算法的 MBD 模型工艺信息的提取方法; 彭江涛等^[7]在其钻铆机器人离线编程系统中介绍了钻铆工艺信息的提取

* 基金项目: 辽宁省航空联合基金 (2014028030)。

方法,并依据此信息规划了机器人的加工站位和加工路径。已有文献中较少有自动钻铆离线编程系统钻铆工艺信息的提取技术,彭江涛在文献 [7] 中提到了钻铆工艺信息的提取方法,但其并没有对提取的信息加以验证和管理,而且对钻铆机器人运动学反解需要的坐标和法矢所在坐标系也未作具体说明。

本文以某 MBD 规范定义的模型文件为研究对象,研究了自动钻铆离线编程系统的工艺信息提取与校验技术。根据离线编程系统的需求,将提取的信息作适当处理,为后续系统的开发提供条件,保证系统的整体性。目前, CATIA 满足客户个性化需求主要通过二次开发方法实现, CATIA 二次开发方法主要有自动化应用接口和组件应用架构。自动化应用接口 (Automation API) 入门容易但功能限制大,组件应用架构 (Component Application Architecture, CAA) 虽入门门槛较高但实现功能最为强大且开发程序效率高,能够满足用户深层次专业化需求^[8]。CAA 在结构树遍历、信息筛选、坐标转换等方面均提供了丰富的二次开发接口,考虑到程序开发效率和软件功能需求,选择 CAA 二次开发方式实现 MBD 数模钻铆工艺信息的提取。

1 自动钻铆工艺参数需求分析

在自动钻铆技术环境下,铆接质量主要取决于自动钻铆系统的运动和定位精度,不再受限于传统手工操作技工的经验和技术水平,而更多地依靠系统数控代码的编制^[9]。在此新技术环境下,许多原来在手工铆接技术环境下无法量化的工艺参数,在自动钻铆系统中可以通过数控系统实现量化,同时也新增不少工艺参数项。对于离线编程系统而言,还应包括运动学反解和离线代码所需要的信息,在其开发过程中,典型的主要工艺参数信息如表 1 所示^[10]。

由表 1 可以得出,自动钻铆离线编程系统所需主要工艺参数分为 4 大类,其中运动定位类参数信息主要是提供钻铆点的位置和法矢信息,为后续运动仿真模块的运动学反解算法提供依据;制孔和铆接类信息主要体现在 NC 离线编程代码输出模块,对自动钻铆设备的实际加工进行指令控制;其他参数类信息主要用以在软件环境下便于匹配识别、铆钉型号匹配等。

2 基于 CAA 的工艺参数提取与校验

2.1 面向 MBD 模型的工艺参数信息提取

典型的 MBD 数据集包括实体模型、尺寸与公差、工程注释、设计参考等信息,如图 1 所示。

如此全面且数量庞大的信息量确保了数字化的信息在产品整个设计制造周期中的精确传递,但是如此庞

大的数据量也为各环节的工艺人员合理快速提取所需要的工艺信息提出了要求。本文主要针对自动钻铆离线编程系统所需工艺参数信息进行快速准确提取,所涉及的工艺参数信息均是围绕连接件处钻孔和铆接任务所确定的。在 CATIA 环境下,某示意装配体的 MBD 数据集如图 2 所示,离线编程系统需求信息主要集中在连接件集合中。一般情况下,装配 MBD 数据集由若干组件 (Product) 或零件 (Part) 组成,连接件集合相关信息

表 1 自动钻铆离线编程系统主要工艺参数
Table 1 Main technical parameters of automatic drilling and riveting off-line programming system

| 参数类别 | 参数名称 |
|-------|--------------------------------|
| 运动定位类 | 钻铆点坐标值、法矢等 |
| 制孔类 | 主轴转速、进给速度、进给行程、镗窝深度等 |
| 铆接类 | 压铆力、双侧夹紧力、夹紧解除力、铆接过程时间、铆铆停留时间等 |
| 其他类参数 | 名称类信息、夹层厚度、铆钉牌号等 |

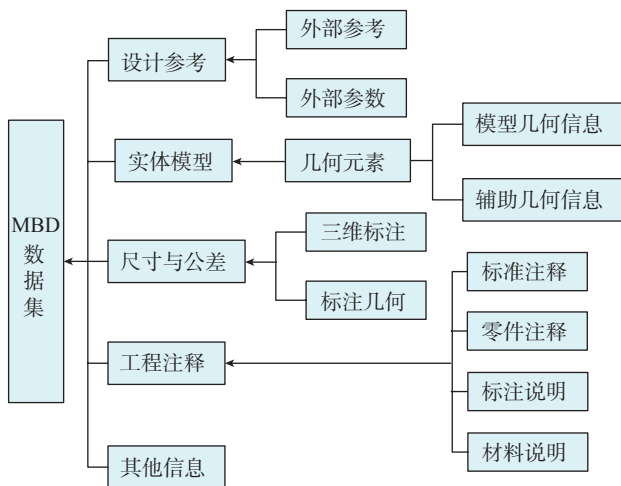


图 1 MBD数据集
Fig.1 MBD dataset

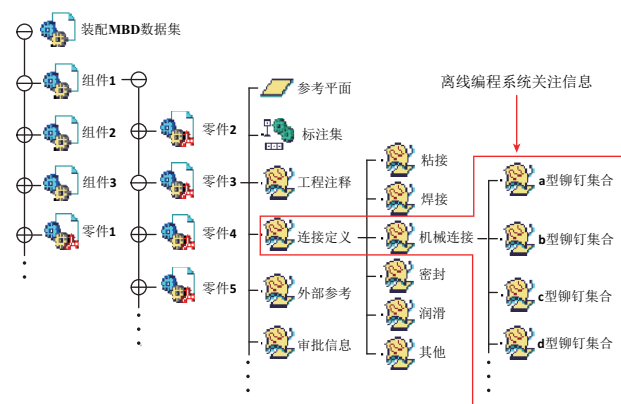


图 2 装配体 MBD 数据集在 CATIA 中的定义
Fig.2 Definition of assembly's MBD dataset in CATIA

以零件节点的形式作为特征树的一个分支,如图 2 中的“零件 3”节点包含了组件 1 中的所有连接件相关信息,铆接属于连接定义中的机械连接形式,每种铆钉类型都以几何图形集(GeometricalSet)的形式分类存储,包含了该类型铆钉的几何信息及技术要求。

以某 MBD 规范定义为数模为研究对象,该数模单个组件中的所有连接件以集合形式集中于“连接定义”数据集合中,如图 3(a)所示,该装配体采用机械连接的方式通过各种类型的铆钉将各零件连接起来,每种铆钉分别以集合形式从属于“机械连接”节点。在 MBD 模型中,连接件的几何信息一般采用点、线取代实体模型的轻量化表达方式^[11],如图 3(b)所示,其钻铆点的坐标值、法矢值、相关名称及牌号信息均可由开发的离线编程系统读出。

通过 CAA 二次开发交互代理机制,交互点选或框选轻量化模型中的钻铆特征点,获取点坐标值,由于所选特征点在 CATIA 特征树数据结构的底层,因此在获取如名称、牌号、矩阵等其他相关信息时需多次返回当前节点的父节点。从 CAA 的角度而言,系统初始获得的坐标和法矢数值都是相对于工件坐标系而言的,点在工件坐标系下的坐标值可通过 CATIMeasurablePoint 接口下的 GetPoint() 函数获取。由图 3(a)可知点和法矢线在特征树中属于同一父节点,特征法矢线需返回当前节点的父级通过 CATIDescendants 接口下的 GetAllChildren() 函数过滤得到。由图 3 可知,每个钻铆点对应两条特征线,如图 3(a)中的“HB6231-3x5”和“直线.226”,且两条特征线相互重合但长度不同,在本 MBD 规范定义为数模中第 2 条特征线的长度即为夹层厚度的数值,可通过获取该特征法矢线的起点和终点坐标,计算两点之间的距离得到夹层厚度信息,法矢值可通过 CATIMeasurableLine 接口下的 GetDirection() 函数获取,此处设钻铆点在工件坐标系下的坐标值和法矢值分别为:

$$P_p=(x_p \ y_p \ z_p)^T \quad (1)$$

$$N_p=(l_p \ m_p \ n_p)^T \quad (2)$$

而对于离线编程系统而言,坐标和法矢信息应当是机床坐标系下的,所以需要坐标和法矢的值从工件坐标系转换到机床坐标系下,而在转换过程中需要用到世界坐标系作为中间坐标系将二者联系起来,在 CATIA 软件环境中,零件或组件可视为一个整体,固连了一个坐标系,该坐标系在世界坐标系中的位姿矩阵即为点坐标或法矢从工件坐标系转换到世界坐标系的转换矩阵,此处设为 T_p^D 。在 CATIA 特征树中每一种特征都有一个类型与之对应,常见特征的类型如表 2 所示。

用于坐标转换的矩阵信息存在于零件或组件节点

下,因此,可通过从点特征逐层返回父级的方式获取该位姿矩阵,每返回一层父级获取该层级的类型,当前层级的类型为 MechanicalPart 时则表示已返回到零件或组件特征,此时即可通过 CATIMovable 接口下的 GetAbsPosition() 方法获取该位姿矩阵。通过该方法获得的位姿矩阵的形式为:

$$T_p^D = \begin{pmatrix} a_x & b_x & c_x & p_x \\ a_y & b_y & c_y & p_y \\ a_z & b_z & c_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, $(a_x \ a_y \ a_z)$ 为工件坐标系在世界坐标系中 X 轴单位向量; $(b_x \ b_y \ b_z)$ 为 Y 轴单位向量; $(c_x \ c_y \ c_z)$ 为 Z 轴单位向量; $(p_x \ p_y \ p_z)$ 为工件坐标系在世界坐标系中的原点坐标,矩阵最后一行是为构建齐次矩阵而设,为定值。

设钻铆点在世界坐标系下的坐标值和法矢值分别为:

$$P_D=(x_D \ y_D \ z_D)^T \quad (4)$$

$$N_D=(l_D \ m_D \ n_D)^T \quad (5)$$

由式(1)和(3)可得钻铆点在世界坐标系下的坐标值 P_D ,由式(2)和(3)可得钻铆点在世界坐标系下的法矢 N_D ,即:

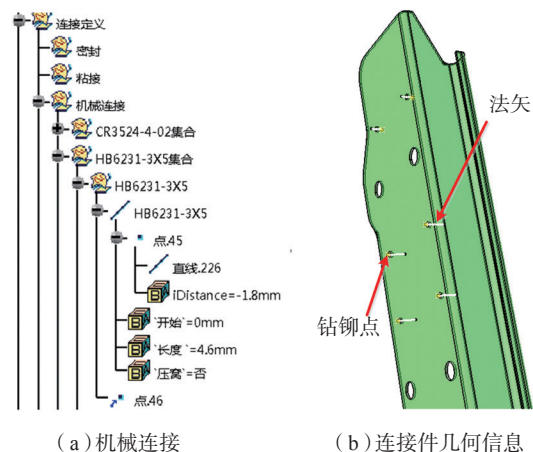


图3 某MBD规范模型特征树及轻量化表达形式
Fig.3 MBD feature tree and light weight expression

表2 常见特征对应的类型

Table 2 Corresponding type of common characteristics

| 特征名称 | 类型 |
|-------|----------------|
| 零件或组件 | MechanicalPart |
| 特征点 | GSMPoint |
| 特征线 | GSMLine |
| 几何图形集 | GSMTTool |

$$P_D = T_P^D \cdot P_P \quad (6)$$

$$N_D = T_P^D \cdot N_P \quad (7)$$

最后根据机床坐标系在世界坐标系中的位姿矩阵,以同样的方式将钻铆点的坐标值和法矢值从世界坐标系转换到机床坐标系下,即可作为自动钻铆离线编程代码输出的相关信息。在此 MBD 数模中,获得的特征法矢线的长度即为该钻铆点处的夹层厚度信息,可通过获取该特征法矢线的起点和终点坐标,计算两点之间的距离得到夹层厚度信息。

在层层返回父级求取当前零件或组件在世界坐标系的位姿矩阵的同时,每一层的名称信息可通过 CATIAAlias 接口下的 GetAlias() 函数获取当前特征的实例名称。根据图 3(a) 获得的每一层实例名称进行检索“集合”关键字操作,若检索到“集合”关键字则此名称信息即为连接件所属集合信息,再将“集合”作去除处理得到新的字符串,该字符串即为连接件牌号信息。以上信息获取方式的流程如图 4 所示。

由以上论述可知,面向某 MBD 规范定义的数模利用 CAA 的二次开发方式通过交互操作数模,点选或框选数模钻铆特征点并以此为出发点逐层返回父节点获取相关需求信息,在此过程中可获得钻铆点在各类定义坐标系下的坐标值和法矢值、铆钉牌号信息、所属集合信息、夹层厚度信息、点线名称信息等。

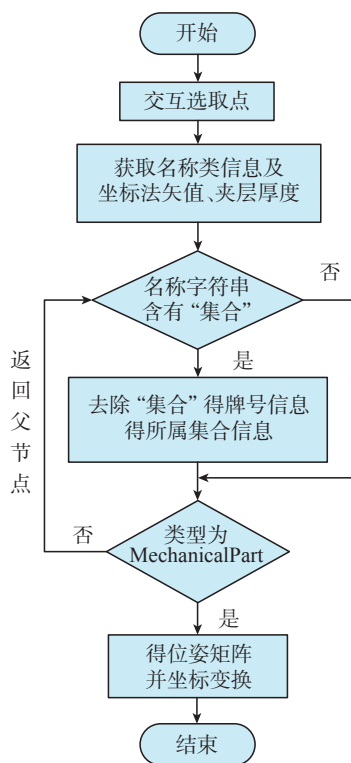


图4 获取工艺信息流程

Fig.4 Flow diagram of getting process information

2.2 孔位法矢方向校验

以上获取的工艺参数信息均是基于原始数模的,在实际应用过程中原始数模中的数据也不能保证完全准确,比如孔位法矢在数模中的具体数值可能会与实际需求法矢数值有些差别。数模中钻铆点法矢方向的正确性对后期运动学反解模块以及零件的加工有着直接或间接的影响,因此需要校验法矢方向的正确性。

法矢方向异常主要是因为设计人员和工艺人员缺乏交流,设计人员只注重数模图形化表达而忽略了法矢方向在数值上的差异,这种数值上的差异往往体现在法矢线的起点和终点顺序相反导致法矢方向相反。法矢方向异常主要有两种表现方式:某个工件个别钻铆点的法矢线方向出现异常,如图 5(a) 所示;某一排布线上的钻铆点的法矢方向均出现方向异常,如图 5(b) 所示。

自动钻铆离线编程系统需要的法矢方向信息要与实际末端执行器的钻孔下刀方向一致,因此系统识别出方向异常法矢之后需更改法矢方向为期望方向,然后输出到相应的模块。在异常法矢识别时,通过选取一条已知方向正确的法矢线作为参考线,然后通过计算钻铆点法矢线和参考法矢线的夹角数值判断法矢方向是否异常。

在选择方向正确法矢线作为参考线时,可以通过比较软件对话框输出的钻铆点工艺参数信息的具体法矢数值和软件环境中坐标系的坐标轴定义方向,此二者均为可视化表达方式,若对话框中某一钻铆点的法矢数值符合坐标轴方向定义,那么就可以选择该法矢线作为参考线。为便于观察,在参考线基础上输入相应

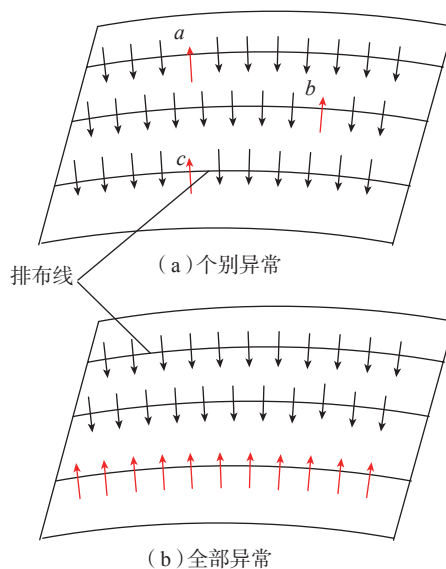


图5 法矢方向异常现象

Fig.5 Expression of abnormal vector

放大系数 K 延长该参考线,由面向 MBD 模型的工艺参数信息提取可知已获得的法矢值为 $N_p=(l_p \ m_p \ n_p)$,设参考延长线的起点和终点坐标分别为 $P_s=(x_s \ y_s \ z_s)$ 、 $P_E=(x_E \ y_E \ z_E)$,则三者之间的关系式为:

$$\begin{cases} x_E = x_s + K \cdot l_p \\ y_E = y_s + K \cdot m_p \\ z_E = z_s + K \cdot n_p \end{cases} \quad (8)$$

放大系数 K 的选择可以根据用户需求自主输入,系统默认的放大系数为 10,即是原有法矢线长度的 10 倍。然后利用 CATIGSMFactory 接口下的 CreateLine() 函数,通过起点和终点作该参考延长线。计算所选的任意钻铆点对应法矢线与该延长参考线的夹角数值。值得注意的是,在计算参考法矢线与钻铆点法矢夹角时,为确保所有法矢线具有可比性,需要将所有钻铆点法矢线(包括参考法矢线)统一转换到全局坐标系下,然后利用 CATMathVector 接口下的 GetAngleTo() 函数计算钻铆点法矢线与参考法矢线的夹角值,当角度大于一定阈值时表明当前法矢方向与期望法矢方向相反,此时需修正法矢方向的数值为期望方向的数值。上述异常法矢的识别和修正过程如图 6 所示。

3 应用实例

根据本文提出的信息提取方法及法矢方向校验算法,以全自动托架式五轴自动钻铆系统为实例,如图 7 所示,工件坐标系 $O_p-X_pY_pZ_p$ 、机床坐标系 $O_T-X_TY_TZ_T$ 和世界坐标系 $O_D-X_DY_DZ_D$ 的位置已定义,并以具有 MBD 规范定义的某飞机壁板类工件数模为研究对象,建立了

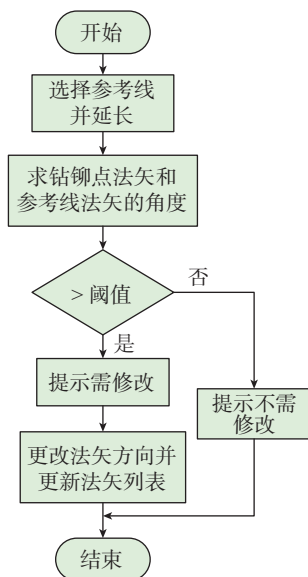


图6 异常法矢识别与修正流程图

Fig.6 Flow diagram of abnormal vector's recognition and modification

基于 MBD 的钻铆工艺信息提取平台。

该壁板类工件的 6 个长桁零件通过铆接的机械连接方式装配与平面壁板上,在进行自动钻铆加工任务之前该类工件都已经过预装配操作,通过工装系统固定夹紧在自动托架上,如图 8 所示,然后进入待钻铆阶段。

在软件环境中通过鼠标点选或框选工件数模中的若干钻铆点,选中点的钻铆工艺信息输出显示在工艺信息栏。为确认所选钻铆点的法矢方向的正确性,根据钻铆点在法矢线的位置信息(钻铆点即为法矢线的起点),选择一条已知法矢方向正确的参考线,输入放大系数,创建参考法矢线,如图 9 所示。

异常法矢检测时,数模中如若存异常法矢,系统会弹出警告对话框提示需要更改,如图 10 所示工艺信息平台所示,系统识别出序号 5 和序号 6 的法矢方向异常,正确法矢数值会显示在下方列表栏中,序号与上方列表栏中的保持一致。更新法矢信息选项会将上方序号 5 和序号 6 的错误法矢数值替换为下方正确的数值,为后期模块的准确性提供了保障。

4 结论

通过对 MBD 规范的工件数模信息提取技术的研

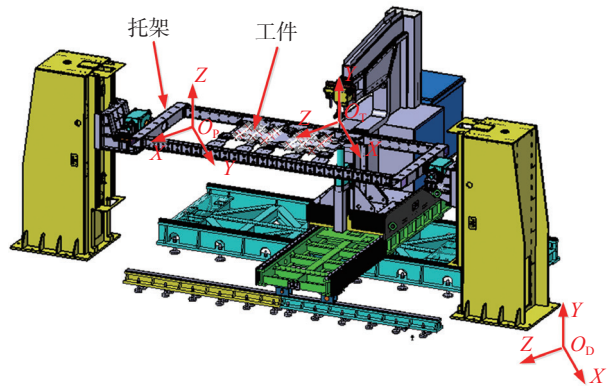


图7 五轴自动钻铆系统
Fig.7 Five-axis automatic riveting system

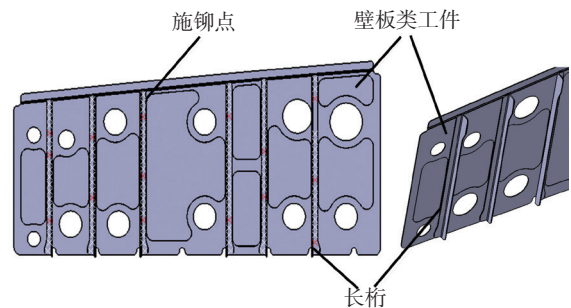


图8 测试工件模型图
Fig.8 Model of test workpieces

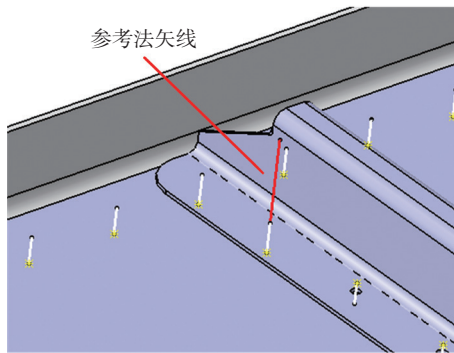


图9 参考法矢延长线

Fig.9 Reference extension line of normal vector



图10 工艺信息提取平台

Fig.10 Platform of extracting processing information

究,在CATIA/CAA平台上建立了面向自动钻铆离线编程系统的工艺信息提取平台,为离线编程后续模块的开发奠定了基础。根据离线编程的钻铆点信息输出为机床坐标系的需求,对提取钻铆点的坐标信息从工件坐标系转换到作为中间坐标系的世界坐标系下。为确保提取的法向量均满足系统和工艺需求,进行了法矢方向校验操作,检测出异常法矢并更改原法矢方向,提高了离线编程系统的准确性。

参考文献

- [1] 韦红余, 陈文亮, 蒋红宇, 等. 面向现代飞机装配的长寿命机械连接技术[J]. 航空制造技术, 2009, 42(17): 34-37.
WEI Hongyu, CHEN Wenliang, JIANG Hongyu, et al. Long-life mechanical connecting technology for modern aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 42(17): 34-37.
- [2] ZOU C, LIU J. An off-line programming system for flexible drilling of aircraft wing structures[J]. Assembly Automation, 2011, 31(2): 161-168.
- [3] 王煜, 吉卫喜, 钱德成, 等. MBD模式下机械产品的三维轻量化可视化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(5): 107-110.
WANG Yu, JI Weixi, QIAN Decheng, et al. Visualization of three-

dimensional mechanical products based MBD lightweight[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(5): 107-110.

[4] 郭喜锋, 高红, 詹有河, 等. 一种基于MBD的部件装配工艺设计辅助系统[J]. 航空制造技术, 2016, 59(6): 72-75.

GUO Xifeng, GAO Hong, ZHAN Youhe, et al. A component assembly process design support system based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(6): 72-75.

[5] HUANG R, ZHANG S S, BAI X L, et al. An effective subpart retrieval approach of 3D CAD models for manufacturing process reuse[J]. Computers in Industry, 2014, 67: 38-53.

[6] 苗凤金, 邵云鹏, 祝锡晶, 等. 基于改进算法的MBD模型信息提取方法与运用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(5): 85-87, 91.

MIAO Fengjin, SHAO Yunpeng, ZHU Xijing, et al. An information extraction method and application of MBD model based on improved algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(5): 85-87, 91.

[7] 彭江涛, 谭红, 石章虎, 等. 基于MBD的飞机钻铆机器人离线编程技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 55-59.

PENG Jiangtao, TAN Hong, SHI Zhanghu, et al. Research on the technique of MBD-based off-line programming for aircraft drilling and riveting robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 55-59.

[8] 梁岱春, 张为民, 隋立江, 等. 浅析基于CAA的CATIA二次开发[J]. 航空制造技术, 2012, 55(10): 65-68.

LIANG Daichun, ZHANG Weimin, SUI Lijiang, et al. Brief analysis on secondary development of CATIA based on CAA[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(10): 65-68.

[9] 殷俊清, 王仲奇, 康永刚, 等. 自动钻铆环境下铆接工艺研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(S1): 79-83.

YIN Junqing, WANG Zhongqi, KANG Yonggang, et al. Research on riveting process in automatic rivet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(S1): 79-83.

[10] 刘连喜, 李西宁, 王仲奇, 等. 无头铆钉自动钻铆工艺试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 77-82.

LIU Lianxi, LI Xining, WANG Zhongqi, et al. Semi-empirical research on automatic drilling and riveting process of headless rivet[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(1): 77-82

[11] 王煜, 吉卫喜, 钱德成, 等. MBD模式下机械产品的三维轻量化可视化研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(5): 107-110.

WANG Yu, JI Weixi, QIAN Decheng, et al. Visualization of three-dimensional mechanical products based MBD lightweight[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(5): 107-110.

通讯作者: 丁力平, 博士, 副教授, 研究方向为飞机自动钻铆设备、制孔机器人、壁板铣削设备、并联构型数控装备、选择性激光熔化数控设备, E-mail: lpding@nuaa.edu.cn.

(责编 大漠)