

doi: 10.7690/bgzdh.2019.09.007

一种基于数控弯管仿真的管路刻线方法

王 成¹, 任杰轩², 邓琳蔚¹, 李大威¹, 王 静¹, 王 治², 张 旭², 刘少丽²

(1. 北京卫星制造厂有限公司条件保障部, 北京 100094;

2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 为解决现有管路刻线技术过程操作繁琐、焊装精度不易保证、生产效率低的问题, 提出一种基于数控弯管仿真的管路自动化刻线技术。采用基于 PROE 二次开发技术, 通过对管路组件 3 维模型中的特征信息提取以及 NC 代码的解析, 根据获取的零件特征信息及导管的 YBC 信息, 计算出单根管路以及相关连接件的刻线位姿, 并进行实验验证及算法精度分析。验证结果表明: 该方法操作简单, 通用性较好, 有效地提高了管路的刻线效率及焊装精度。

关键词: 管路组件; 数控弯管; 管路刻线; 仿真

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

A Method of Pipeline Engraving Based on Numerical Control Simulation of Pipe Bending

Wang Cheng¹, Ren Jiexuan², Deng Linwei¹, Li Dawei¹, Wang Jing¹, Wang Zhi², Zhang Xu², Liu Shaoli²

(1. Bureau of Facility Support, Beijing Spacecrafts Factory, Beijing 100094, China;

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the problems of complicated operation, the difficulty of welding precision, and the low production efficiency, this paper presented a new pipeline engraving technology based on numerical control simulation of pipeline bending. The secondary development technology based on PROE was adopted to extract the characteristic information in the 3D model of pipeline components and analyzed the NC code. According to the obtained part characteristic information and the YBC information of the pipeline, the engraving post of the single pipe and related connecting parts was calculated. And the experimental verification and algorithm precision analysis were carried out. The experimental results show that the method is simple in operation and good at generality, which effectively improves the pipeline engraving efficiency and welding precision.

Keywords: pipeline components; NC pipe line bending; pipeline engraving; simulation

0 引言

管路广泛应用于航空、航天和汽车等行业, 是产品的重要组成部分, 其使用性能直接影响产品的运行功能、可靠性和使用寿命。目前, 工程中多数仍然依靠工人将管路放置在搭建好的组合夹具上, 确定管路的焊装姿态后, 通过人工手动在需要焊装的方位进行刻线, 然后根据刻线的位置对管路进行焊装。该过程操作繁琐, 不易保证装配精度, 使得管路焊装过程生产效率低下, 产品生产周期长^[1]。随着复杂航空航天产品轻量化、小型化、集成化的方向发展, 对管路空间形状复杂度及成型精度要求大幅提高; 因此, 提高管路的焊装效率及精度具有重要的意义, 数控弯管几何加工过程及管路焊装的仿真技术的需求也日益迫切^[2,3]。目前, 国外主流的 UG、Pro/E、CATIA 等 CAD 软件都有加工仿真功能, 但是仅能进行切削类加工过程的模拟, 不涉及

管路组件刻线技术的仿真^[4]。意大利 BLM 集团、英国 Addision 公司^[5]开发专门的数控弯管仿真软件, 但是此类仿真软件仅专机使用, 不具备通用性。国内方面: 李峰等^[6]基于 3ds Max 与 OpenGL 平台, 研发了数控弯管仿真系统, 以几何坐标的转换实现加工过程仿真, 同时获取导管的 YBC 信息, 但是其几何坐标转换过程比较繁琐, 效率较低; 吕波等^[7]利用导管加工工艺知识库, 通过定义导管加工过程的相关约束, 实现 YBC 信息的自动生成, 但是未涉及管路组件刻线及焊装过程的仿真; 陈安明等^[8]利用 SolidWorks 2008, 基于第三方软件平台开发了一款数控弯管及管路组件焊装的仿真软件, 但是成本较高, 普及度较低。

针对以上问题, 笔者提出了一种基于数控弯管仿真的管路刻线方法。首先, 通过对管路组件 CAD 模型中各零件的几何特征进行分析, 提取各零件的

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-04-24

作者简介: 王 成(1977—), 男, 北京人, 学士, 工程师, 从事工业装备数字化系统集成技术及管理研究。E-mail: citynoble@sina.com。

特征点，利用特征点的坐标值及坐标系之间的转换关系，实现了导管与连接件之间相对空间位姿的自动获取；然后，利用数控弯管仿真技术获得导管 YBC 信息，并计算得到导管首末端刻线夹角；最后，根据导管首末端刻线夹角，确定刻线位置，从而确定了导管与连接件之间的位姿关系。实例验证结果表明：该方法操作简便，有效地提高了管路组件焊装效率及焊装精度，满足工业应用需求。

1 管路刻线技术的总体流程

图 1 为工程中常见的管路组件。管路系统装配时，数控成形后的导管与连接件、以及管路之间需进行焊装，管路组件焊装过程决定了管路系统的最终空间形态，而管路刻线技术是保证管路焊装效率及精度的关键。

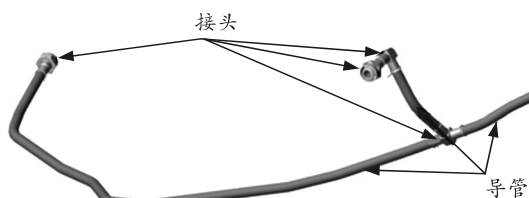


图 1 典型管路组件

笔者将基于数控弯管仿真的管路刻线技术分为管路组件特征信息的提取、导管 YBC 信息的获取以及管路刻线位姿的确定。总体流程如图 2 所示。

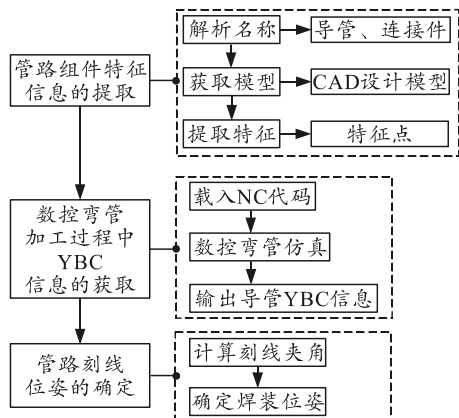


图 2 管路刻线技术的总体流程

具体流程为：

1) 管路组件特征信息的提取。采用基于 PROE 二次开发的技术，通过解析 3 维模型中管路组件的名称，识别组件的类别及装配关系，自动提取出管路组件，并对各个零部件进行特征提取，如端点、圆心等特征点。

2) 数控弯管加工过程中 YBC 信息的获取。通过数控弯管加工过程仿真系统，对弯管加工过程中

导管与弯管机零部件的运动规律进行模拟，检查弯管过程中导管与机床是否发生干涉，校准 NC 代码，获取数控弯管加工过程中的 YBC 信息。

3) 管路刻线位姿的确定。根据获取的管路组件各零部件的特征信息，以及数控弯管加工过程中的 YBC 信息，计算导管及其零部件的刻线位置，确定最终的焊装位姿，并根据焊装位姿对焊缝进行标识。

2 管路组件特征信息的提取

管路信息提取及输出模块采用基于 PROE 二次开发的技术实现，通过解析 2 维模型中管路组件的名称，识别组件的类别和装配关系，从 3 维模型中自动提取管路组件。管路组件可以为包含多根导管、二通连接件及三通连接件的装配体，也可以为单根导管。管路信息提取流程如图 3 所示。

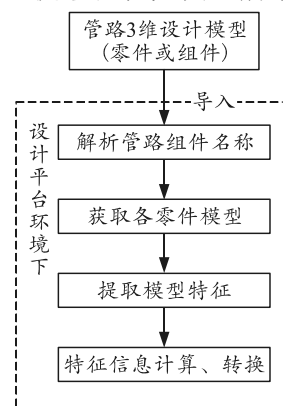


图 3 管路组件信息提取流程

2.1 管路组件几何特征信息的提取

笔者根据管路组件中各零件的名称，获取该零件的几何结构特征。PROE 二次开发工具提供了丰富的函数库，对管路组件的 CAD 模型进行访问和操作，获得零件的特征信息。

对于导管的几何特征信息，通过对导管模型拓扑结构的遍历，可以获得导管的段数、圆柱段截面的中心点、各直线段的长度、导管内外径以及各圆环段的弯曲半径等几何信息。如图 4 所示，在得到所有圆柱段截面的中心点和截面的法矢量后，即得到了导管圆柱段的轴线；把导管轴线的两两相邻直线段中心线延长相交，形成交点，即控制点，其坐标标记为 (X, Y, Z) ，各控制点与弯曲半径可以完全确定导管的形状，则导管的轴线可用 $\text{Tube} = (X_i, Y_i, Z_i, R_j) (i=1, 2, \dots, n; j=i+1, \dots, n-1)$ 来描述。其中：n 为导管的直线段交点的个数； R_j 导管在第 j 个控制点处的弯曲半径。

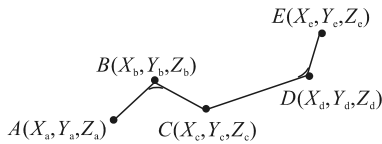


图 4 导管的控制点坐标描述

获取三通和三通连接件的几何特征信息。在管路装配模型的结构树中，根据结构树中管路组件的名称，判断组件为三通或者三通，并识别其编号。例如，管路装配模型结构树中，三通的名称通常为 STXXX，二通的名称通常为 ETXXX；若为三通，则提取 4 个特征点坐标，包括 3 个连接头端点和 1 个质心。根据每 2 个特征点之间形成的向量夹角，分辨出三通质心，其他 3 个特征点即为 3 个连接端点。同理，若为三通，则提取 3 个特征点坐标，包含 2 个连接头端点和一个质心。根据每 2 个特征点之间形成的向量夹角，分辨出三通质心即连接端点。如图 5 所示，三通连接件的特征点包括 3 个连接头端点和 1 个质心，记为 (A_1, B_1, C_1, O_1) 三通连接件的特征点包括 2 个连接头端点和 1 个质心，记为 (A_2, B_2, O_2) 。

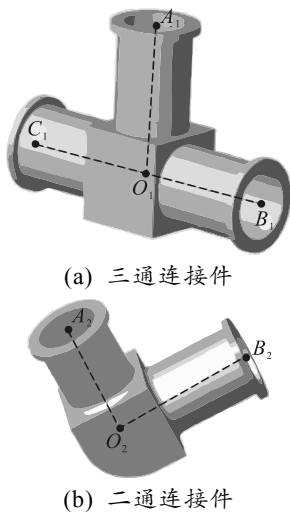


图 5 连接件特征点的提取

2.2 数控弯管加工过程中 YBC 信息的提取

导管的 YBC 信息是由导管数控弯曲过程仿真获得。实际的导管数控弯曲加工是由 NC 代码指令经过解析，驱动机床工作的过程，而 NC 驱动的导管数控弯曲加工过程仿真就是对实际导管加工过程的模拟。通过导管数控弯曲加工过程仿真获得 YBC 信息的主要步骤是：

1) 数控指令的提取。数控指令是仿真分析的驱动数据，主要包含导管的基本信息、加工指令信息和机床设置信息。NC 指令解析就是建立上述三方

面信息与机床、导管以及模胎等仿真环境之间的关联，从而为数据驱动的仿真模型的建立奠定基础。

2) 仿真建模技术。通过仿真建模技术尽可能逼真地模拟实际加工环境，确保仿真过程的实时性、连续性并准确地预测加工过程中可能出现的问题，从而在实际加工中对其有所防范或消除，主要包括数控弯管机的几何建模、运动关系建模、外模胎的参数化建模及导管毛坯建模。

3) 仿真实现技术。弯管过程主要包括平移 Y 、旋转角度 B 和弯折角度 C 。仿真规划是对导管数控弯曲加工过程仿真模型的实现与验证，其中包括机床零部件运动规划、导管动态成形与空间运动建模、加工过程动画显示技术以及碰撞干涉检测。根据过程仿真结果修改 NC 代码的工艺参数，最终得到数控弯管加工过程中 YBC 信息。

3 管路组件刻线位置的确定

根据第 2 章中管路组件中各零件的特征点以及数控弯管过程中的 YBC 信息，计算管路组件的刻线位置，主要步骤如下：

1) 将零件坐标系下的特征点坐标转换到世界坐标系下。零件坐标系和世界坐标系的变换过程是一个由平移和旋转组成的刚性变换，其转换矩阵记为 ${}^{PCS}H_{WCS}$ ，包括平移变换为 $Trans = (t_x, t_y, t_z)$ 和旋转变换为 $R = R(\alpha, \beta, \gamma)$ ，具体形式如下式：

$${}^{PCS}H_{WCS} = \begin{pmatrix} R & Trans \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

设某一特征点在零件坐标系中的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ，可通过式(2)计算其世界坐标系下的坐标 (x_w, y_w, z_w) 。

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = {}^{PCS}H_{WCS} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & Trans \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

2) 根据各零件特征点之间的方向向量，计算导管的首端、末端与连接件之间的夹角。在管路装配模型的结构树中，包括焊缝组件、导管及连接件，焊缝组件的中心点坐标和与之相连的导管端点坐标、三通或者三通连接件的端点坐标相同，利用三者重合，判断导管型号与三通或三通连接件型号的连接对应关系。当导管的首端、末端与连接件(三通或三通)连接时，根据导管首端、末端的平面法向量

和与连接件的平面法向量，计算导管的首端夹角 α_1 及末端夹角 α_2 。

图6为导管首端刻线夹角计算， π_1 表示三通连接件的上表面， π_2 表示导管首端相邻两直线段构成平面， a 和 b 为导管首端相邻两直线段中心线的矢量， n_1 和 n_2 表示2个平面的法向量，则导管的首端夹角 $\alpha_1 = \arccos((n_1 \cdot n_2) / (|n_1| \cdot |n_2|))$ ，同理可得导管末端夹角 α_2 。

3) 根据导管的首端、末端与连接件之间的夹角，计算首末端的刻线位置。导管的首端刻线位置为导管顺时针旋转 θ_1 时导管首端的最高点位置，其中 θ_1 由式(3)得到， $\sum B$ 为数控弯管时旋转角度的总和；导管的末端刻线位置为确定导管的首端的刻线位置后，导管顺时针旋转 θ_2 时导管末端的最高点位置，中 θ_2 由式(4)得到：

$$\theta_1 = \alpha_1 + \alpha_2 + \sum B - 180^\circ; \quad (3)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \alpha_2 - \sum B. \quad (4)$$

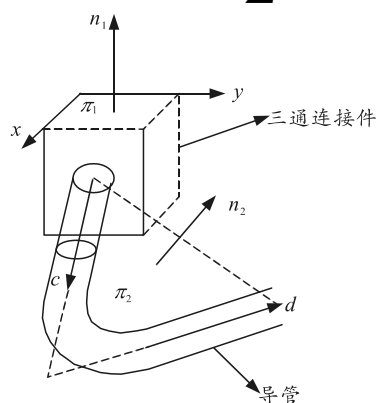


图6 导管首端刻线夹角计算

4) 根据导管首端、末端的刻线位置，确定管路组件的焊装位姿。刻线完成之后，根据YBC信息对导管进行数控弯管，当导管首末端刻线和与之相连的连接件的刻线设置在同一直线上时，确定导管与连接件当前的相对位姿为管路组件的焊装位姿。

4 实例验证

根据笔者所提出的方法，在自主开发的虚拟装配工艺规划软件(VAPP)上，利用Hoops/ACIS工具包开发了管路刻线系统，主要包括管路信息提取及输出模块、数控弯管机仿真模块、刻线模块、以及管组件接头精度检测模块。

笔者以美国Eaton Leonard公司VB200HP数控

弯管机为例进行验证。实例验证过程为：

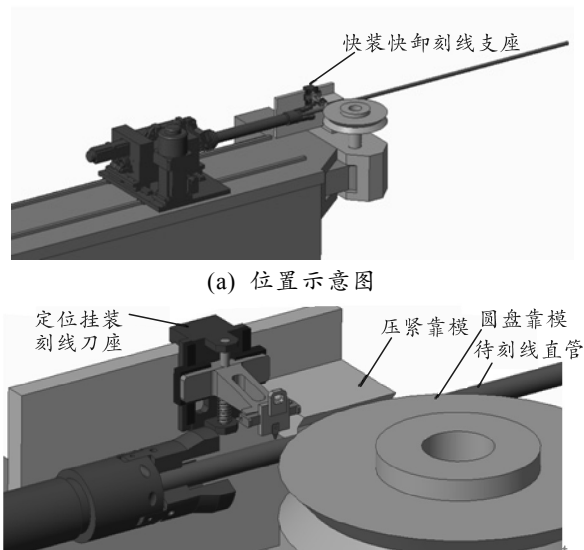
1) 通过专用的数据接口(系统采用SAT数据格式)将管路3维设计模型导入本系统中，解析3维模型中管路组件的名称，识别组件的类别和装配关系，获取各零部件的特征信息。

2) 调用数控弯管机仿真模块，载入弯管加工NC程序，根据数控弯管加工过程仿真结果修改NC代码的工艺参数，达到避免碰撞干涉的目的。此处验证NC程序所采用的导管的信息为：弯曲半径 $R = 80 \text{ mm}$ ，管径 $r = 20 \text{ mm}$ ，YBC信息如表1所示。

表1 生成的YBC信息

序号	Y/mm	B/(°)	C/(°)
1	210.00	0.00	90.00
2	450.00	-85.00	125.00
3	310.00	135.00	45.00
4	400.00	115.00	30.00
5	200.00	90.00	0.00

3) 根据生成的YBC信息，调用导管刻线模块，计算出刻线位置，并由操作人员进行刻线。图7为快卸快装刻线工装，刻线有效行程约20 mm。



(a) 位置示意图

(b) 布局示意图

图7 快卸快装刻线工装

4) 根据刻线的位置，确定管路组件的焊装位姿。在数控弯管机执行指令后，当导管首末端的刻线与连接件首末端刻线位于同一直线上时，则将当前的相对位姿作为管路组件的焊装位姿。

5) 根据刻线位置及焊装位姿，对导管及连接件进行焊接。如图8所示，笔者选取导管与柱塞头焊接而成的管路组件，利用激光扫描技术和点云拟合技术实现管路组件的精度检测。首先通过手持激光扫描仪设备采集管路组件接口的点云数据；然后导入管路组件的CAD模型，利用PCL工具库获得模

型点云数据；最后采用 ICP 算法对 2 组点云数据进行配准，实现对导管组件接口的精度检测。测量流程如图 9 所示。如图 10 所示，笔者将导管组件接口检测偏差值的均值作为管路刻线及焊装精度，对多个导管组件接口进行检测。实验结果表明：该方法操作简单，有效提高管路焊装效率，焊装精度为 0.38 mm，且与人工手动刻线相比，合格率有较大提升，满足工业应用需求。

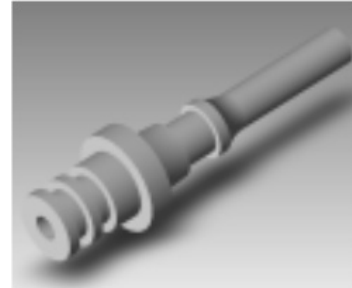


图 8 管路组件

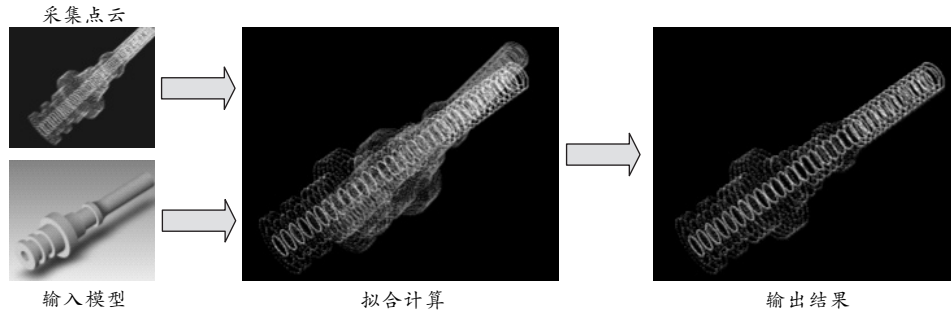


图 9 导管组件接口检测流程

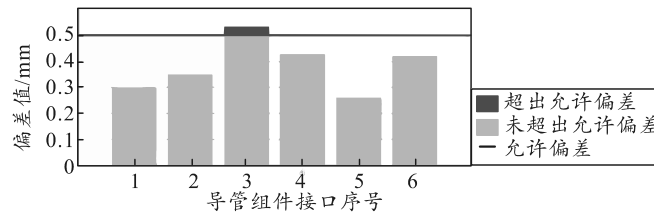


图 10 导管组件接口检测偏差直方图

5 结论

该方法通过解析 3 维模型中管路组件的名称，识别组件的类别和装配关系，从 3 维模型中自动提取管路组件的特征信息，计算出导管或连接件的刻线位置，确定管组件的焊装位姿。该方法能够高效地对管路刻线过程进行建模与仿真，有效地避免了人工搭建组合夹具、操作繁琐等问题，提高了管路的焊装效率，同时保证了焊装精度。验证结果表明：该方法支持对任意结构管路组件的仿真，通用性较好，已经在卫星管路生产中得到应用。

参考文献：

[1] 金鹏, 刘检华, 刘少丽, 等. 基于中心线的管路端点位置精确测量方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(10): 2284-2293.
 [2] 周杰文, 刘检华, 赵柏萱, 等. 数控弯管机机构运动学建模与加工过程仿真技术[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(2): 434-443.

[3] 刘军和, 石竖鲲, 赵宝群, 等. 数控弯管技术在航空发动机导管加工过程中的应用[J]. 航空制造技术, 2003, 28(4): 72-73.
 [4] 吕波, 唐承统, 宁汝新. 数控弯管加工过程仿真系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(10): 2323-2328.
 [5] GAO Z D, TANG C T, CHEN A M. Simulation technology for NC Tube Bending Process[C]. Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IEEM 2009. IEEE International Conference on IEEE, 2009: 1790-1794.
 [6] 何卫平, 钟夏娣, 余隋怀, 等. 数控弯管机弯管过程仿真系统—Tubemod 的研究[J]. 西北工业大学学报, 1997, 15(3): 360-364.
 [7] 吕波, 唐承统, 宁汝新. 基于知识的计算机辅助导管加工工艺设计[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(9): 1285-1290.
 [8] 陈安明, 唐承统, 高战地. 数控弯管加工仿真系统设计与开发[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2009, 2(10): 0015-0018.