

# 连续多弯导管成形仿真系统 开发与应用\*

李光俊<sup>1</sup>, 罗 铮<sup>1</sup>, 袁 胜<sup>1</sup>, 魏战冲<sup>2</sup>

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092;

2. 航发伊萨(北京)科技发展有限公司, 北京 100094)

**[摘要]** 介绍国内外仿真技术发展现状, 针对空间连续多弯导管数字化精确成形的需求, 提出了以知识工程为核心, 建立导管仿真工艺知识库, 通过参数化驱动开发导管弯曲成形运动仿真系统。通过在飞机连续多弯导管研制中的应用, 自动实现了模型数据提取、工艺参数确定、创建仿真模型、弯曲过程仿真、回弹过程仿真、干涉检查, 获得了干涉情况, 自动生成仿真报告和数控代码, 降低了技术人员的劳动强度, 提高了飞机导管零件工艺设计工作效率。

**关键词:** 多弯导管; 弯曲仿真; 回弹仿真; 干涉检查; 数控代码

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.18.043



李光俊

研究员、高级工艺师, 国家科技发明奖获得者, 长期从事飞机导管数字化制造工艺研究, 多次获得省部级、国防科技进步奖。

为满足现代航空工业的快速发展需求, 现代飞机更新换代频率越来越快, 研制周期越来越短, 飞机产品设计与工艺设计高度交叉并行, 已经从简单的三维模型设计过渡到全方位三维产品数字化定义模式, 产品三维模型信息不再仅仅限于传统几何模型, 还包含大量制造信息。制造信息的承载载体、存放方式、获取途径也由此发生了本质改变, 并从以二维纸质为主, 初步过渡到三维模型为主, 以产品三维模型为依据进行数字化工艺设计、制造与装配已成为当前飞机研制的主流。

以飞机导管加工为例, 三维建模、有限元弯曲仿真、三维 CAPP、工艺数据库等软件开始大量应用在工艺方案确定、加工文件编制、成形模具设计中, 辅助技术人员进行三维工艺设计, 大大提高了导管工艺设计的准确性、可靠性。特别是通过应用有限元仿真软件, 可分析导管每个弯曲段的弯曲质量情况, 如回弹、起皱、变

薄、截面椭圆等, 优化弯曲速度、助推速度、芯轴提前量等工艺参数。但是, 导管一般由多个空间连续的“直线段-弯曲段”组成, 弯曲过程涉及多个弯曲段与模具、机床的重复运动, 其相对位置在不断变化, 仅仅考虑单个弯曲段的成形质量还远不能满足数字化精确成形的需要, 还需要考虑多个弯曲段之间、导管与模具之间的相互影响因素。

因此, 有必要构建连续多弯导管成形仿真模型, 明确导管、模具、机床、地面之间的运动关系, 开发专用的导管成形仿真系统, 进行空间连续多弯导管弯曲成形仿真, 获得导管与模具、机床、地面的干涉情况, 实现空间连续多弯导管精确成形。

## 国内外技术现状

### 1 国外运动仿真发展状况

导管成形仿真主要分有限元成形仿真、运动仿真。有限元成形仿真主要从细微方面分析单个弯曲段的

\* 基金项目: 民机项目(MJ-2016-G-64)。

成形缺陷,运动仿真主要宏观方面分析各弯曲段与工艺装备之间的干涉情况。考虑导管弯曲涉及多模具之间的耦合关系,重点分析导管弯曲成形运动仿真。

运动仿真起源于机械制造行业的自动控制。1980年左右,美国开始提出运动仿真的概念。鉴于各行业自动控制的逻辑关系差异极大,最初的运动仿真基本由自行开发的专用仿真程序完成,主要验证系统能否实现预期的功能<sup>[1-3]</sup>。21世纪后,伴随计算机技术的高速发展,一些商品化的三维建模软件 CATIA、UG、SolidWorks、Pro/E 开始应用,运动仿真分析软件逐步与三维建模软件集成,并扩展应用到装配仿真和生产线仿真。例如,CATIA的碰撞分析模块,不仅仅能进行运动仿真,而且能计算干涉量<sup>[4-5]</sup>。目前,运动仿真已经成为国外大型复杂结构系统研制过程中不可缺少的技术手段。

## 2 国内运动仿真发展状况

在国外汽车行业的影响下,国内汽车行业首先应用仿真技术模拟汽车覆盖件成形、装配过程,并逐步推广应用到航空、航天、兵器、电子、冶金等行业。由于国产仿真软件在计算精度、准确性方面无法与国外仿真软件相媲美,国内各行业主要根据各自的专业特点选择国外相应的仿真软件进行成形仿真,并按需进行了补充开发。

北京航空航天大学针对蒙皮拉形机构开展了运动仿真分析<sup>[6-7]</sup>。西北工业大学、北京理工大学进行了铝、钢、钛合金导管弯曲过程仿真研究<sup>[8-10]</sup>,这些研究主要针对结构简单的导管,未考虑空间多弯导管连续弯曲过程中弯曲回弹可能导致的干涉问题。沈阳航空工业学院基于CATIA开展了多弯导管数控弯管工艺仿真技术研究<sup>[11-12]</sup>,建立了连续多弯导管与模具、机床的三维模型,进行了弯曲过程几何仿真,重点分析了

弯曲过程的干涉问题,但没有考虑弯曲回弹因素,导致仿真结果与实际情况还存在比较大的差异。

## 技术方案

针对空间连续多弯导管数字化精确成形的需求,以知识工程技术为核心,建立导管仿真知识库,基于CATIA环境开发导管成形仿真系统。通过自动提取模型数据、选择工艺参数、参数驱动依次构建导管在不同弯曲阶段的运动仿真模型;通过弯曲过程仿真、回弹过程仿真、动态干涉检查,自动生成仿真分析报告、数控代码,实现空间连续多弯导管成形仿真。图1为连续多弯导管成形仿真系统信息流程图。

## 技术途径

### 1 构建仿真知识库

仿真知识库是导管成形仿真系统的核心,决定了仿真结果的正确性与可靠性。仿真知识库主要由参数化的标准模型、参数数据、文件模版组成。

标准模型包含导管模型、机床模

型、模具模型、地面模型、弯曲仿真模型;参数数据包含材料参数、成形工艺参数以及特征路径、特征内容;文件模版包含仿真报告模版、数控代码规则。通过收集典型导管的建模要求、模型格式、弯曲工艺、仿真报告、加工代码等规范性要求和技术人员的个人经验,进行规范化、参数化表达,形成导管仿真知识库。仿真知识库不仅仅是简单的数据库,还包含了决策机制,明确了每条知识的使用条件,在软件调用知识时首先查看是否满足使用条件。

### 2 提取模型数据

利用知识库的决策机制,通过特征路径关键字、特征内容关键字两级决策,依次从导管模型参数、几何体中提取导管图号、材料牌号、材料规格、空间坐标、弯曲半径信息,计算理论展开长度与端头夹持余量,并对提取的信息进行规范化处理,为后续成形仿真提供必要的输入条件。典型导管模型数据提取如图2所示。

### 3 选择工艺参数

以材料牌号、材料规格、弯曲半径、展开长度为条件,通过工艺知识的

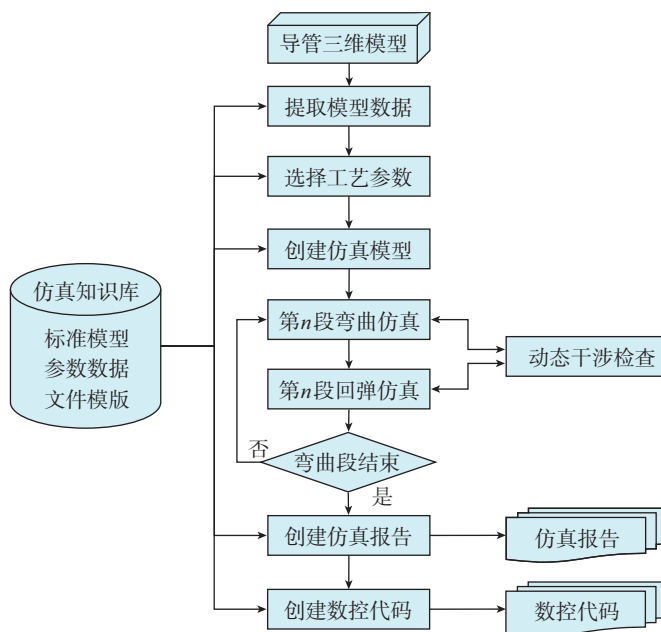


图1 连续多弯导管成形仿真系统信息流程

Fig.1 Information flow of simulation system for continuously multi-bent tube

推理决策,自动选择弯曲设备、弯曲模具、弯曲仿真参数。一套完整的导管模具由弯曲模、夹模、压力模、防皱模、芯球/棒5个模具组成,模具相互之间协调与配合也是重点分析决策的环节。弯曲仿真参数主要有管材弯曲性能参数(弯曲固定回弹角、弯曲回弹系数、弯曲伸长系数)以及弯曲起止顺序、进退速度系数、仿真背景颜色、干涉判定阈值等。典型导管弯曲仿真参数的选择如图3所示。

#### 4 创建仿真模型

仿真模型由仿真组件模型与导管、设备、模具零件模型组成。用参数化驱动实现不同空间结构导管、设备、模具零件模型的构建。由于仿真组件模型中各零件模型之间的装配约束关系没有变化,更新零件模型即可实现不同仿真组件模型的创建。典型导管弯曲仿真模型如图4所示。

#### 5 弯曲仿真与回弹仿真

空间连续多弯导管由 $n$ 个弯曲段组成,而每个弯曲段的弯曲过程由“夹模上升-夹模夹持-压力模侧压-弯曲模弯曲-弯曲后回弹-夹模后退-夹模下降-压力模松开-小车进给-弯曲模复位”10个弯曲工步组成。在每个弯曲工步内,通过参数驱动、模型更新的方式改变每个物体的相对位置。由于每次参数驱动间隔时间短,用户看见是一个连续运动过程。因此,通过10个弯曲工步、 $n$ 个弯曲段的反复循环,实现整个连续多弯导管的弯曲仿真。

导管弯曲回弹与弯曲角、弯曲半径以及管材性能密切相关,导管弯曲回弹计算相对复杂。通过不同材料、弯曲角度、弯曲半径的弯曲工艺试验与数据回归分析,建立弯曲回弹逻辑关系,用于计算每个弯曲段的弯曲回弹补偿量、长度进给补偿量。通过精确补偿每个弯曲段的弯曲角、长度进给量,保证每个弯曲段弯曲回弹后的角度、长度与理论值相同,进而实现整管连续多弯导管回弹仿真。典型

连续多弯导管弯曲与回弹仿真过程如图5所示。

#### 6 动态干涉检查

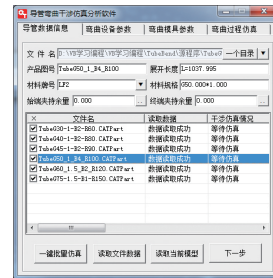


图2 导管模型数据提取

Fig.2 Extraction data of tube model

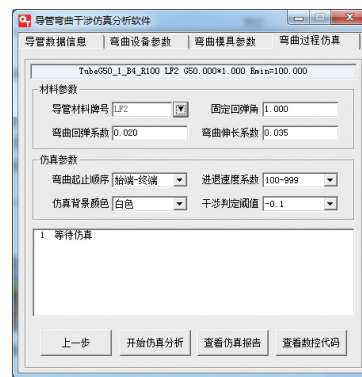


图3 导管弯曲仿真参数选择

Fig.3 Selection of simulation parameters for bending tube

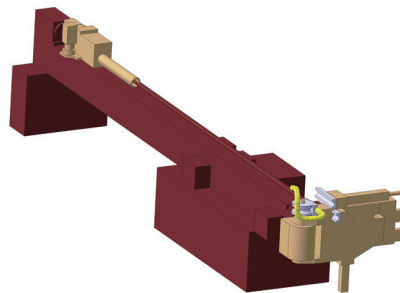


图4 导管弯曲仿真模型

Fig.4 Simulation model for bending tube

设置	零件	开始	结束	位移	速度	加速度
001	导管	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
002	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
003	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
004	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
005	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
006	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
007	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
008	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
009	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
010	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
011	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
012	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
013	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
014	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
015	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
016	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
017	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
018	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
019	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
020	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
021	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
022	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
023	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
024	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
025	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
026	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
027	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
028	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
029	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
030	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
031	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
032	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
033	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
034	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
035	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
036	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
037	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
038	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
039	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
040	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
041	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
042	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
043	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
044	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
045	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
046	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
047	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
048	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
049	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
050	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
051	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
052	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
053	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
054	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
055	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
056	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
057	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
058	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
059	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
060	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
061	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
062	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
063	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
064	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
065	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
066	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
067	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
068	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
069	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
070	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
071	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
072	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
073	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
074	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
075	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
076	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
077	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
078	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
079	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
080	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
081	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
082	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
083	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
084	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
085	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
086	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
087	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
088	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
089	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
090	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
091	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
092	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
093	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
094	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
095	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
096	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
097	芯球	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
098	夹模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
099	压力模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
100	防皱模	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

图5 连续多弯导管弯曲与回弹仿真

Fig.5 Simulation of bending and springback for continuously multi-bent tube

模块计算导管、模具、机床、地面之间的干涉量。如果出现干涉,系统显示干涉情况,提示用户是否对换弯曲顺序,重新进行弯曲仿真。典型连续多弯导管弯曲干涉检查如图6所示。

### 7 创建仿真报告与数控代码

根据整管连续弯曲仿真结果,将导管仿真状态、结果参数、图片信息填入仿真报告模版,从而实现自动创建仿真分析报告,典型连续多弯导管成形仿真报告见表1。根据数控弯管机各轴运动轨迹定义格式,以仿真结果为输入条件,自动建立导管弯曲的数控代码,数控代码的格式应根据不同的设备进行特殊定义,确保数控弯管机能识别。

### 8 批量处理

在新机研制阶段,导管数量多,弯曲仿真工作量很大,迫切需要软件具备批量自动仿真功能。通过提取模型数据、弯曲仿真、回弹仿真、生成仿真结果等步骤的自动循环,批量完成多项导管弯曲成形仿真。但是,批量处理涉及多个应用程序、多种模型之间的调用与转换,任何异常都可能导致软件无法正常运行。因此,批量处理建立良好的容错机制,采用过程进度监控手段确保软件能正常运行。当达到预定时间后仍未完成一项导管的弯曲仿真分析,则强制终止当前数据处理进程,转而进行下一项导管的弯曲仿真。

### 结论

通过导管弯曲工艺知识的收集整理和软件开发,已经建立导管仿真工艺知识库和连续多弯导管成形仿真系统。目前,连续多弯导管成形仿真系统已经应用在 ARJ21、C919 等民用飞机研制过程中,批量完成了100余项导管的成形仿真工作,获得了干涉情况,自动生成仿真报告和数控代码,降低了技术人员的劳动强度,提高了飞机导管零件工艺设计工作效率。

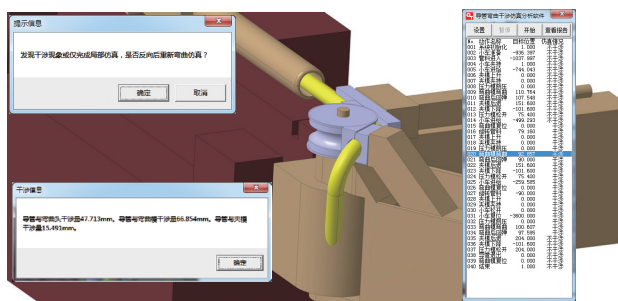


图6 连续多弯导管弯曲干涉检查

Fig.6 Interference check of bending for continuously multi-bent tube

表1 连续多弯导管成形仿真报告(节选)

Table 1 Simulation report on bending for continuously multi-bent tube (excerpt)

序号	仿真动作名称	仿真动作图片	仿真分析结果
1	系统初始化		无干涉现象
9	弯曲模弯曲		无干涉现象
10	弯曲后回弹		无干涉现象
16	旋转管料		导管与弯曲头干涉量 47.737mm; 导管与弯曲模干涉量 19.414mm
21	弯曲后回弹		导管与弯曲头干涉量 44.494mm; 导管与弯曲模干涉量 19.842mm; 导管与夹模干涉量 17.774mm
27	旋转管料		导管与弯曲模干涉量 5.457mm
33	弯曲模弯曲		导管与弯曲模干涉量 29.921mm; 导管与夹模干涉量 6.153mm
40	结束		无干涉现象

鉴于连续多弯导管成形仿真系统需要在 CATIA 环境下反复进行参数驱动、模型更新、干涉检查,对计算机硬件要求比较高,需要配置高性能的计算机才能满足仿真计算要求。

### 参考文献

- [1] POULIOT N A, NAHON M A, GOSSELIN CM. Motion simulation capabilities of three-degree-of-freedom flight simulators[J]. Journal of Aircraft, 1998, 35(1): 9-17.
- [2] TOMARO R F, STRANG W Z, WITZEMAN F C. Simulation of store separation for the F/A-18C using Cobalt60[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(3): 361-367.
- [3] MEESE E A, NORSTRUD H. Simulation of convective heat flux and heat penetration for a spacecraft at re-entry[J]. Aerospace Science & Technology, 2002, 6(3): 185-194.
- [4] 杜余刚, 张浩, 陆剑峰. CATIA V5 环境下的轿车车身冲压生产线仿真研究[J]. 机电一体化, 2006, 12(6): 32-35.
- DU Yugang, ZHANG Hao, LU Jianfeng. Research on simulation of automobile's body punch line under CATIA V5 environment[J]. Mechatronics, 2006, 12 (6): 32-35.
- [5] 赵文杰, 赵连玉. 基于 CATIA 的装载机数字化模型的建立及仿真[J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(3): 80-82.
- ZHAO Wenjie, ZHAO Lianyu. Modeling and simulation of the digital model of freight elevator based on CATIA [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2010, 26(3): 80-82.
- [6] 刘益成, 周贤宾. 蒙皮拉形机机构运动分析[J]. 航空制造技术, 2004, 47(1): 85-88.
- LIU Yicheng, ZHOU Xianbin. Mechanism motion analysis of the skin stretch-forming machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(1): 85-88.
- [7] 于成龙, 李东升, 李小强, 等. VTL1000 型数控蒙皮拉形机运动仿真系统[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(1): 87-92.
- YU Chenglong, LI Dongsheng, LI Xiaoqiang, et al. Motion simulation system for VTL1000 skin stretch forming machine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 87-92.
- [8] 吕波, 唐承统, 宁汝新. 数控弯管加工过程仿真中的碰撞检测研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 1004-1007.
- LÜ Bo, TANG Chengtong, NING Ruxin. Research on collision detection in tube bending simulation[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(4): 1004-1007.
- [9] 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(10): 15-18.
- CHEN Anming, TANG Chengtong, GAO Zhandi. Design and development of tube bending simulation system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009(10): 15-18.
- [10] 李锋, 王永军, 王俊彪. 数控弯管加工过程运动仿真系统的研究与开发[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2007(8): 74-77.
- LI Feng, WANG Yongjun, WANG Junbiao. Research and development of kinematic simulation system for NC bending tube machining process[J]. Intelligent Manufacturing CAD/CAM, 2007(8): 74-77.
- [11] 赵臻淞, 杨合, 林艳, 等. 数控弯管仿真系统的设计与开发[J]. 锻压技术, 2003, 28(1): 32-34.
- ZHAO Zhensong, YANG He, LIN Yan, et al. Design and development of tube bending simulation system[J]. Forging & Stamping Technology, 2003, 28 (1): 32-34.
- [12] 韩志仁, 梁文馨, 刘宝明, 等. 基于 CATIA 导管数控弯管工艺仿真技术研究[J]. 制造业自动化, 2015(17): 38-40.
- HAN Zhiren, LIANG Wenxin, LIU Baoming, et al. Research on the simulation technology for NC tube bending process based on CATIA [J]. Manufacturing Automation, 2015 (17): 38-40.

通讯作者: 李光俊, E-mail: lgjwcl@sina.com.

## Development and Application of Simulation System for Continuously Multi-Bent Tube

LI Guangjun<sup>1</sup>, LUO Zheng<sup>1</sup>, YUAN Sheng<sup>1</sup>, WEI Zhanchong<sup>2</sup>

- (1. AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;  
2. ACEE-ESI (Beijing) Technology Development Co., Ltd., Beijing 100094, China)

**[ABSTRACT]** Aiming at the demands for high precision forming of continuously multi-bent tube in space, this paper reviews the developments of simulation technologies at domestic and abroad. This work proposes simulation process knowledge for tube based on knowledge-engineering. A geometric motion simulation system about tube is established by parametric driving. The extraction of model data, selection of process parameters, creating simulation models, bending process simulation, simulation of springback process, generation of simulation reports and NC code can be automatically realized by applying this system in the continuously multi-bent tube of aircraft. This simulation system can reduce working intensity of technicians and improve work efficiency at process planning in tube of aircraft.

**Keywords:** Multi-bent tube; Bending simulation; Springback simulation; Interference check; NC code

(责编 大漠)