

依据实物样件的火箭小直径导管数字化制造技术

王露子^{1,2} 刘胜兰¹ 宋建岭² 王成² 武浩男² 韩磊²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)



摘要: 针对目前运载火箭小直径导管依据实物样件进行手工弯制生产效率低、制造精度差、产品一致性难以保证等缺点, 开展了依据实物样件的导管数字化制造技术研究。首先借助三维扫描仪对实物样件进行外形扫描, 获取样件的点云数据; 然后依据点云数据进行逆向建模并提取模型中各折弯点的空间三维坐标, 实现导管实物样件到数字化样件的转化, 形成导管数字样件库, 再根据数字化模型进行导管数控弯制; 最后, 对弯制的产品进行外形扫描, 将产品的点云数据与实物样件的点云数据比对, 分析依据实物样件数字化制造的偏差。实例结果显示, 实物样件和产品的点云模型形状的最大偏差为 0.99mm, 能够满足工程要求。

关键词: 实物样件; 外形扫描; 逆向建模; 数字化样件; 数字化检测

中图分类号: V46 **文献标识码:** B

Digital Manufacturing Technology of Small Diameter Tube of Launch Vehicle Based on Physical Sample

Wang Luyi^{1,2} Liu Shenglan¹ Song Jianling² Wang Cheng² Wu Haonan² Han Lei²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing 210016;

2. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462)

Abstract: In view of the disadvantages of low production efficiency, poor manufacturing accuracy and difficult to guarantee product consistency, the digital manufacturing technology of small diameter tube of launch vehicle based on real samples was studied. Firstly, the physical samples were scanned by 3D scanner, and the point cloud data of the samples were obtained. Then, according to the point cloud data, the reverse modeling is carried out and the 3D coordinates of each bending point in the model are extracted to realize the transformation from the physical sample of the catheter to the digital sample, forming the database of the number of vessels, and then the numerical control bending of the catheter is carried out according to the digital model. Finally, the shape of the bent product is scanned, the point cloud data of the product is compared with the point cloud data of the physical sample, and the deviation of digital manufacturing based on the physical sample is analyzed. The results show that the maximum deviation of the point cloud model shape between the physical sample and the product is 0.99mm, which can meet the engineering requirements.

Key words: physical samples; shape scanning; reverse modeling; digital sample; digital detection

1 引言

导管是运载火箭的重要组成部分, 主要起到燃料输送、贮箱增压和舱段吹除等作用, 因数量较多且遍布于火箭的各个部分, 因此被称之为火箭的“血管”。

导管按直径可分为小直径导管(外径 6~24mm)、中直径导管(外径 25~100mm)和大直径导管(外径 100mm 以上)。其中小直径导管数量占全箭导管数量的 80%以上, 且通常在其他零部件装配完成后安装, 因而常发生安装不协调的情况。为保证小直径导管的

作者简介: 王露子(1990), 硕士在读, 航空宇航制造工程专业; 研究方向: 数字化检测和运载火箭管路数字化制造。

收稿日期: 2022-02-16

安装协调,通常根据其在箭体环境中的实际安装位置取样、弯制和冷弯校形,获得实物样件,经试装合格和设计部门确认并签署样件证明书后,作为导管生产和检验的依据,是导管设计的组成部分及导管图样的补充^[1]。一个完整的实物样件由导管、铝丝样板、铭牌组成,如图1所示。铝丝样板是模拟样件空间走向的一根铝丝,是手工弯管时标注起弯线的工具,它可以标注出每一个弯的起弯线,使手工弯管的精度更高。

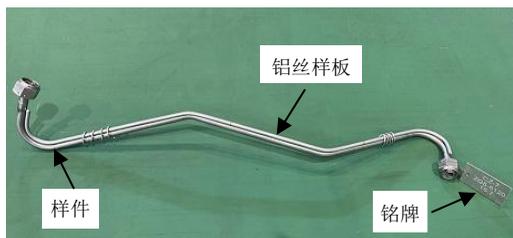


图1 实物样件

2 导管手工弯制

获得小直径导管实物样件后,采取模拟量模式的手工弯制制造工艺。

2.1 调试手工弯管机

手动弯管机如图2所示,主要由轮模、夹模和压模组成。调试弯管机把三个模具的中心线调成同一高度。如果遇到三个模具的相对高度不一致的情况,需要更换轮模下面的垫片进行调节,手动弯管机配了很多种厚度不一的垫片以满足高度调节的需求。



图2 手动弯管机实物图

2.2 下料

领取与样件相同直径的直管为毛坯。下料长度一般比样件长200mm,用于试弯。

2.3 试弯

在正式弯制产品之前进行试弯,一般试弯 90° 。试弯后测量折弯处的椭圆度和减薄量^[2]是否满足要求。

2.4 弯制

首先把毛坯料夹在模具中间,在首个直线段上以轮模的端面为基准画起弯线。按照样件首个弯头的角度弯制产品的第一个弯头,以产品的第一个弯头作为基准弯头,在铝丝样板上引出每一个弯头的起弯线,在每一个弯头弯制之前需要把铝丝样板的起弯线引到产品上,如图3所示。然后从弯制第二个弯头开始,需要用样件比对产品的旋转角度;将样件与产品并排并将待弯的弯头贴在滚轮上面,与滚轮保持平行,调整产品的角度,使产品上的每一个直线段部分与样件平行,如图4所示。手动弯管时由于夹模和压模都依靠手动夹紧,夹紧力无法量化,因此依靠经验控制弯管回弹量;弯管时把样件与产品靠在一起,弯曲产品至与样件平行,弯曲角度自然回弹后角度出现差值,把差值补偿进去再次弯曲至产品与样件平行。最后把样件上的切割线引到铝丝样板上,再把铝丝样板上的切割线引到产品上,切掉余料,产品两端进行平端口处理。

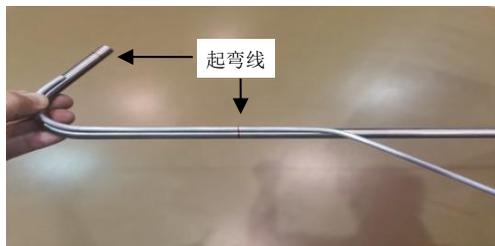


图3 在产品上引出起弯线



图4 用样件比对产品旋转角度

由于手工弯管是依靠手工画线确定起弯线,靠目视判断两个弯头之间的扭转角和弯曲角度,因此弯曲精度不高,测量样件和产品后对比得出:实物样件和产品点云模型的最大偏差为2mm。并且可以得出手动弯制制造模式的缺点是:生产效率低,制造精度差,产品一致性难以保证。

3 导管数字化制造

从 20 世纪 80 年代开始, 导管的数字化制造技术已经在国内外航空航天制造领域取得了明显的成效。例如, 美国波音公司在 1986 年就开始将三维数字化制造技术应用在波音 747-400 液压管路的设计中。随后, 波音 777 飞机成为世界上第一个采用全数字化定义和无图纸生产技术的大飞机项目, 一次试飞成功, 成为 20 世纪 90 年代制造业应用信息技术的标志性进展^[3]。在国外飞机三维数字化技术的带动下, 近年来, 国内飞机数字化制造技术也得到了快速的发展, 导管三维快速建模^[4]、导管数控弯曲过程建模与有限元仿真技术在各大飞机制造厂开始应用, 配合现有的数控弯管机、激光矢量测量机, 不仅大大缩短了工艺准备时间, 还优化了工艺参数, 提高了产品质量^[5-6]。

依据导管实物样件生产的手工制造模式, 已经无法满足目前运载火箭导管高效率、高质量、批量化的生产需求。针对运载火箭导管, 开展依据实物样件的数字化制造技术, 将导管实物样件转化为数字样件, 解决导管按照实物样件制造效率低、精度差、一致性难以保证的难题, 同时避免了实物样件因储存不当引起变形, 导致导管无法安装的现象, 提高导管的生产效率, 提升导管的可靠性, 满足导管批量化的生产需求。

导管数字化制造的基本步骤是: 采用三维扫描仪(扫描精度 0.03mm)对实物样件进行扫描, 获取实物样件的点云模型。通过逆向软件对点云模型建模, 提取导管两端面中心以及相邻两个直线段相交点的空间坐标 (X, Y, Z) , 把空间坐标输入到数控弯管机, 进行产品弯制; 再通过对产品扫描, 获得产品的点云模型; 用检测软件分析实物样件和产品点云模型的偏差。

3.1 实物样件扫描

对实物样件进行外形数据采集是数字化样件创建的第一步, 扫描时为了提高精度将实物样件的铝丝样板、两端的零件和铭牌拆掉, 仅扫描实物样件的导管部分。采用三维扫描仪扫描需要贴标记点, 由于导管直径较小, 需要把标记点贴在一个平台面上。扫描时采用背景模式, 扫描标记点后, 选中标记点将其设置为背景, 扫描仪只扫描背景以上的数据, 开始扫描导管。扫描得到点云模型如图 5 所示。

扫描时注意事项: 标记点避免呈规律分布, 也要避免过密或者过疏, 一般两个标记点之间的距离保持 30~100mm 之间; 在过渡面的边缘可以适当增加标记

点的数量。扫描时, 如果遇到样件的两个垂直面, 要将扫描仪两个相机的空间连线, 平行于两个垂直面的相交线, 进行扫描时的过渡拼接(这是为了让扫描仪的两个相机能够同时识别到位于两个垂直面上的标记点, 便于标记点的过渡拼接)。



图 5 实物样件的点云模型

3.2 点云数据逆向建模

获得样件的点云数据后, 就可进行实物样件的逆向建模, 步骤如下:

- a. 创建样件首末端两个平面 1 和 2;
- b. 分析从 A 端到 B 端的直线段数量 n , 分别建立 n 个直线段的轴线: 线 1、线 2、...、线 n ;
- c. 从 A 端开始创建 A 端的中心点, 通过线 1 与平面 1 相交得到 A 端平面的中心点, 即点 1;
- d. 通过线 1 和线 2 两条直线相交得到点 2, 依次得到: 点 3、点 4、...、点 n ;
- e. 最后创建 B 端的中心点, 通过线 n 与平面 2 相交得到 B 端平面的中心点, 即点 $n+1$;
- f. “样条曲线”是通过插入控制点, 创建一条过控制点的自由的 3D 空间, 将点 1 至点 $n+1$ 连接起来得到样条曲线, 再进行倒圆角处理, 即可获得实物样件的 3D 模型, 如图 6 所示;

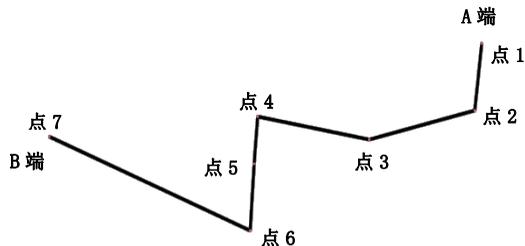


图 6 实物样件的 3D 草图模型

g. 在 A 端平面 1 建立草图, 然后根据样件的直径画圆, 以该圆为对象, 沿着样件模型的路径做扫描处理, 即可获得实物样件的三维模型, 如图 7 所示;

h. 提取实物样件模型中折弯点的空间三维坐标;

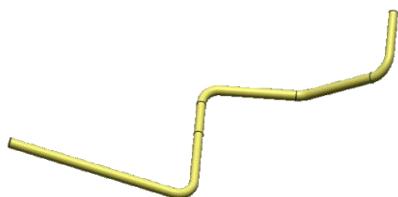


图7 导管实物样件的三维模型

i. 通过弯管机将各顶点 XYZ 坐标转化成 LRA (Length、Rotation、Angle) 数据。 L 是导管在弯管机 Y 轴方向上的直线运动； R 是弯管机 B 轴围绕 Y 轴旋转的转角； A 是弯管臂沿 C 轴方向旋转形成的角度；在弯管机系统中 LRA 数据始终作为真实数据，而且在实际操作和产品对比过程中， LRA 数据更加容易判断导管的走向。

3.3 建立导管数字样件库

将每一项实物样件扫描和逆向建模，获得导管数字样件，如表1所示。导管数字样件包含：产品图号、导管折弯半径、导管直径和导管 LRA 数据等信息，这些信息可以实现导管的数字化制造。将所有数字样件打印和装订，形成导管数字样件库，便于指导生产。

表1 导管数字样件

XXX-6830 导管折弯信息				
Tg Bn	L/mm	$R/(^\circ)$	$A/(^\circ)$	模具
01	65.37	0.0	90.7	01
02	124.64	-97.9	42	01
03	121.37	-72.4	84.8	01
04	52.07	91.4	4.6	01
05	90.66	82.4	94.5	01
06	268.81			
导管中心折弯半径：35.00mm				
导管直径：12.00mm				

3.4 实物样件逆向建模的关键技术

建立样件上每个直线段的轴线，再建立 A 端和 B 端的平面，通过相邻轴线相交和轴线与平面相交得到空间交点，从 A 端到 B 端将每一个空间交点连接起来，获得样件的路径。

3.5 实物样件逆向建模的难点

a. 样件上存在由于校形导致的不规则的圆弧，在建模时要充分分析，提取出圆弧两侧的直线段，用标准的折弯半径表达不规则的圆弧，因为弯管机只能弯制标准折弯半径的弯头，无法对不规则的圆弧进行弯制，如图8所示。

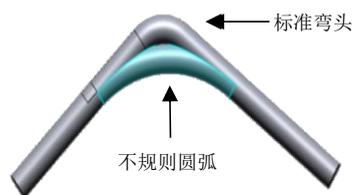


图8 不规则圆弧转成标准弯头

b. 由于实物样件直径和壁厚较小，样件两端的端口很难获得理想的扫描数据，在建模时创建平面会产生误差。扫描时可以在管子两端分别固定住一个带有平面的管夹套，建模时借助管子两端的夹套建立精准的平面，如图9所示。

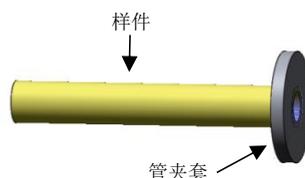


图9 管夹套安装示意图

4 数控弯制

数控弯管技术是导管数字化生产的核心，本文采用的数控弯管机可以基于 LRA 折弯信息实现常用导管的数控弯曲成形^[7]。弯管的精度主要受导管回弹影响，数控弯管机配备的管形测量机自带测量回弹的功能。测量回弹步骤：截取一段直管（材料为 $0Cr18Ni9$ ），两端进行平端口加工；用管形测量机测量导管的长度；把测量机既定测量回弹的弯管程序发送给弯管机，弯制两个连续弯，小弯角度 20° 和大弯角度 120° ；弯管后，再拿到测量机测量，得到两个连续弯的实际弯管角度和弯管后的导管总长；点击“计算回弹”，系统自动计算出回弹值。得出弯管回弹经验值如下：固定回弹=1.36，比率回弹=1.486%，延伸率=4.923%。将回弹数据以及导管的折弯信息输入数控弯管机进行产品弯制，切除尾料后得到导管产品。

5 数字化检测

用三维扫描仪扫描产品获得产品的点云模型，将实物样件和产品的点云模型导入检测软件，将实物样件的点云模型定义为参考数据，将产品的点云模型定义为测试数据；通过“对齐”的命令将参考数据和测

