

# 数字化导管加工与常规导管加工对比浅析

## Analysis on Comparison of Digital Tube Manufacturing With Conventional Tube Manufacturing

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 王 玲 付冬雪

**[摘要]** 通过数字化导管加工与常规导管加工在协调方法、工艺过程、检测方法等方面对比分析,得出数字化导管制造可以缩短制造周期、降低生产成本的结论,能够适应现代飞机快速研制及改型需求,形成现代飞机导管制造核心竞争力。

**关键词:** 数字化导管加工 常规导管加工 标准实样 协调方法

**[ABSTRACT]** By comparison and analysis of the digital tube manufacturing and conventional tube manufacturing in terms of coordination approaches, technological process and inspection methods and so on, a conclusion that the digital tube manufacturing may shorten the manufacturing cycle time and reduce the production cost is drawn, which can adapt to demands for rapid development and modification of the aircraft so as to form the core competence on the tube manufacturing for the modern aircraft.

**Keywords:** Digital tube manufacturing Conventional tube manufacturing Master sample Coordination approach

飞机导管零件设计的数字化必然要求飞机导管零件制造的数字化,采用常规机械弯管工艺已经不能满足飞机数字化设计的要求,利用数控弯管机、测量机来进行数字化导管加工正不断发展。

数字化导管加工依托于数字化导管设计,包含数控弯管加工和测量两方面含义。数控弯管有着自己的优点,如重复精度高、弯曲质量好、弯曲过程自动化等,也有着“不足”,如参数的选配较难、测量效率低等。而常规导管加工对于直径小、精度要求不高的导管而言有着加工方便、灵活易检测等优点。数字化导管弯曲与常规的机械弯管,在工艺性、加工精度、检测方法等方面具备各自的优点和缺点,我们应该扬长避短,选择最优的工艺方法。本文就这些问题进行论述,为更好地选择导管加工的方法指出方向。

### 1 概述

数字化导管加工指通过三维建模并提取导管数据

表的数据,将数据输入数控弯管机形成数控弯管程序,利用数控弯管机弯管,并用数控测量机检测的制造过程。数字化导管加工要求数字化导管设计参数与工艺参数相匹配。

常规导管加工指利用常规机床按照钢丝样板走向弯曲出导管零件的空间形状的导管制造过程。

任何飞机都离不开导管零件,尤其是在重要的功能系统。如:液压系统、燃油系统等,导管零件单机约为1000~3000项,但其规格和材料的牌号却多达100多种,飞机狭窄的空间要求导管零件几何形状非常复杂,这些特点决定了导管加工的难度非常大。如何保证导管零件严格地符合制造依据,保证严格的质量要求(椭圆度、变薄量、皱纹高度)是导管零件加工的关键。

常规弯管工艺都是按标准实样和钢丝样板进行验收的。由于导管的弯曲角度、两相邻弯平面间的空间夹角以及2个弯之间的直线距离都不能进行直接测量或很难测量准确,再加上弯管过程中的回弹等一系列工艺和操作问题,因此,每根导管在验收之前,大都要进行手工校正,难免会出现“反复”弯曲、“串弯”等现象。弯管质量不易控制,生产效率低,劳动强度大,而且需要相当数量的导管标准样件、弯曲夹具和钢丝样板。

数字化弯管是一个全新的过程,在流程上摒弃了导管按实样制造的过程,从制造上实现操作自动化、精准化。数字化的检测技术更容易控制产品的质量。

### 2 对导管的设计要求

(1)常规加工的导管,设计时只需要发出二维图纸,图纸中规定导管按标准实样制造,可以不用标注具体零件参数,零件形状在飞机装配时通过现场弯曲实样制造。这样设计发图简单而快捷。

(2)数控加工的导管,采用CATIA绘图软件的管路模块设计,需要建立导管的几何模型,之后生成导管加工的数据表。为适应数控弯管设备及工装需求,对导管设计提出了更高的要求,如:两圆弧段之间的直线段不小于导管外径的3倍;对一根导管,其弯曲半径应统一,一般不小于导管外径的2.5倍,并成0.5倍数量上升等。在有限的飞机空间内铺设有形的导管,考虑导管数控加

工的工艺性要求,并考虑安装、维护需要,对于导管的敷设有严格的要求,增加了导管设计的周期,与常规按实样为依据的导管相比,设计工作量提高 1.5 倍。

### 3 协调方法对比分析

从零件制造到装配成功,常规导管与数字化导管的全部生产流程如图 1 和图 2 所示。

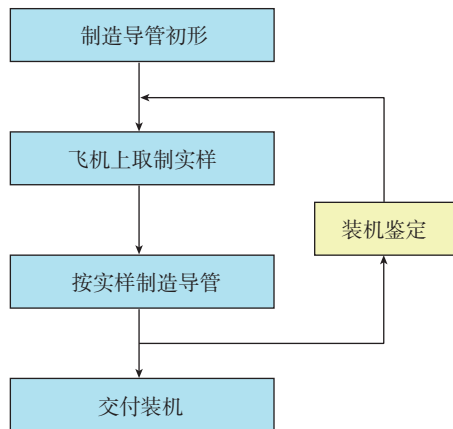


图1 按实样加工导管制造流程

Fig.1 Manufacturing process according to sample

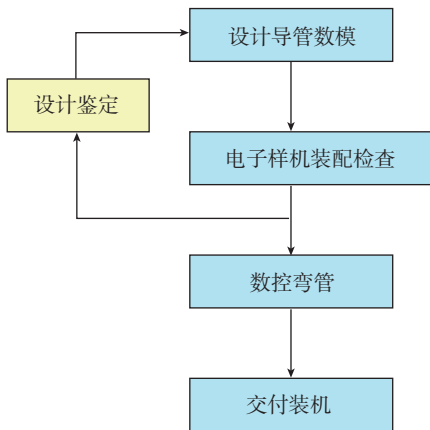


图2 数字化导管制造流程

Fig.2 Manufacturing process of digital tube

由于飞机导管零件的特殊性,在飞机结构设计完成后,当系统导管与飞机结构干涉、间距小或有其他问题时,通常采取更改导管形状来解决,这样可以尽量少地发生更改并解决问题。

图 1 是按常规加工导管的生产流程。通常导管的生产制造依据不是模线样板,而是导管标准实样。取制标准实样一般先用  $\phi 6\text{mm}$  的铝管,在装配现场按导管的走向弯出需要的外形,按此初形实样弯制成品管件,在飞机上进行试装。如果第一次试装不合格,再进行

修改、重制。反复多次,直至完全满足要求为止,这样得到的导管才是标准实样。实样的取制是在飞机装配并且条件具备的时候。鉴定后再生产零件,这种零件生产滞后于装配的工艺过程,非常影响飞机交付时间。鉴定时受装配空间、操作人员水平限制,一次鉴定合格的较少,经过几个循环,飞机装配周期加长,一般是数控弯管工作量的 4 倍,这是长期约束飞机生产周期的一个大问题。

图 2 是数字化导管设计制造生产流程。在设计阶段利用 CATIA 绘图软件的管路模块设计,建出导管的几何模型。当全部完成后,进行全机电子样机装配干涉检查,包括与结构和其他系统零部件的检查,发现不合格时,修改导管模型或重新敷设管路,直至合格后,生成用于导管加工的工艺参数即数据表。在部分航空产品制造中实现 80% 的数字化弯管,较大程度缩短了飞机的研制周期。

### 4 工艺过程分析

#### 4.1 常规弯管

##### 4.1.1 成形的准备

按标准实样准备弯曲所需的弯曲模、夹模、滑模、芯棒、防皱板等;根据导管外径、弯曲半径、壁厚、材料、弯曲模选择弯管机;在弯管机上安装弯曲模、滑模、夹模、芯棒、防皱板,并进行调整;按标准实样检查钢丝样板。

##### 4.1.2 弯曲

人工干预弯曲的每一个弧的起弯点及方向,每弯曲一个弧,应用钢丝样板检查弯曲角度和形状,检查导管内腔有无超过要求的划伤,外表面有无超过要求的压伤,因此常规导管加工制造精度不高,工人的劳动量也较大。

#### 4.2 数字化弯管

##### 4.2.1 成形的准备

回弹数据的测取。影响回弹的因素很多,不同的材料、不同的直径、不同的弯曲半径以及使用不同的工装和调整弯管机所用的工艺参数不同时,都会影响导管的回弹,这是一个比较复杂的问题。但在机床调整好以后,工艺参数(弯曲半径、弯曲速度、夹紧力等)不再变化,而且又是在弯制某批材料导管的情况下,测定弯曲角度与回弹的关系,可以简化一些影响回弹的因素,从而可把弯管机弯管臂的转角和导管的弯曲角度看成线性关系,这样测定的回弹比较接近理论值,并满足成形角度偏差要求。

测取回弹数据的步骤是:

- (1)调整好弯管机;
- (2)从被弯的管材中取一适当长度的试验管,按角

度 20°、120° 弯曲导管;

(3) 在数控测量机上测量管形, 计算回弹数据, 加入弯管程序。

通过以上论述可以看出数控弯管的优势: 修正回弹制造精度高、质量可靠适合大批量生产等。但数控弯管中间工序不能换工装, 不适合变弯曲半径导管的弯曲, 而且准备时间长, 只有成批量时才能高效生产。

#### 4.2.2 数控弯管工艺

数控弯管与常规弯管相比成形过程相似, 导管的弯制主要可以归结为 3 个基本动作, 即直线送进、空间转角、弯曲。当然, 欲弯制一根导管, 还需要一些弯管辅助动作, 如夹模或压模的夹紧、松开, 弯模的复位等。全部弯管动作就是这些简单机械动作按一定顺序的组合。不同的是传统弯管是靠人来控制这些动作, 数控弯管是靠高精度的齿轮、电机来控制这些动作即矢量弯曲。从两矢量相等的定义出发就可以知道, 将一矢量平行移动后, 仍为与原来矢量相等。

所以矢量的起点可以放在空间任何一点。以矢量理论为基础, 把管形上的每个直线的中心线看成一系列的空间矢量, 利用矢量的基本概念和运算, 精确地计算出“增量弯管数据”, 以控制矢量弯管机。弯制出的导管还可以进行自动检验, 与标准管形数据相比较, 算出“差值”, 并用“差值”修正弯管程序, 得出新的弯管程序, 再去弯制下一根导管, 这就是矢量弯曲的基本特点。“增量弯管数据”包括两管间的送进距离、空间转角及弯曲角度。

管件的每一个弯都可以用这 3 个数据进行表示。某一个弯的数据是依据前一个弯的数据为基础而产生的, 所以叫“增量管形数据”。这种数据产生以后, 还要经回弹数据修正, 才成为弯管程序, 用以控制矢量弯管机, 进行弯管。

## 5 精度分析

导管的精度等级由产品实现功能实际需要确定, 不同的精度等级决定了导管制造精度。在导管精度等级相同的条件下, 对比常规弯曲与数控弯曲对导管制造精度的影响。

### 5.1 制造依据准确度

常规导管弯曲是以标准实样作为制造依据, 标准实样是在飞机装配场所, 根据装配关系、导管弯曲特性制造的, 在取制时存在一定的偏差。按其制造的钢丝样板, 在制造时也不可避免地存在偏差。两者叠加, 制造依据的偏差较大。

数控弯曲是以三维数据模型作为制造依据, 特别是将导管数据表转换为数控弯曲程序, 转换过程零偏差,

大大提高了制造依据准确度。

### 5.2 操作过程的精度控制

导管弯曲数据不规则、无法准确测量、导管弯曲后的回弹校正, 都要求操作者在按照传统方法弯曲导管时, 需要较多地依靠经验和熟练程度, 降低了导管的成形精度。

数控弯曲按照编制的弯曲程序, 有条不紊地完成成形过程, 数控弯管机床的定位精度高, 并且在弯曲前就测取回弹数据, 减少了返工率, 导管成形精度高。

## 6 检测方法

### 6.1 传统测量

按实样、钢丝样板制造的导管, 要根据导管的精度等级检查成形质量。导管分为 3 个精度等级: 一级、二级、三级, 因此检测方法也分为 3 种:

(1) 一级精度的导管用夹具进行检验, 即以端部托板为基准进行外形检验。在导管检验前按标准实样检查工装。轮流固定导管一端, 检查自由端相对于夹具定位器的位置, 以此法测量同轴度。用测量工具测量导管与定位器之间的间隙、检验过渡托架安装区的导管外形。

(2) 二级精度导管在有基准的工装上进行检验导管外形或按装配夹具检验对接点。被测量的导管外形应与夹具外形相符。按管端面同检验模、模型或导管弯曲样板端面的符合度来检查导管的长度。

(3) 三级精度的导管按导管弯曲样板检验, 方法为把导管放置在导管弯曲样板上, 检查外形的符合性。用夹具同被测量导管的重合和对比的方法来确定长度和外形的被检查参数。按导管端面(外套螺母)与夹具端面的重合度来确定长度偏差值。

以上可以看出, 常规导管加工检测需要检测工人依据检测工具进行, 测量误差较大, 并且需要大量样板与检验工装, 人力物力上都有较多的耗费。

### 6.2 数控弯管测量

数控弯曲导管的数据由矢量测量机检测得出, 它能够精密测量导管形状。测量机使用测量臂上的激光探头扫描导管直线段, 激光的优点在于, 它不会与导管接触, 因此测量时导管不会变形。当操作员用激光探头移过导管时, 测量臂的 5 个关节也移动。超高分辨率直接驱动编码器旋转记录下关节的移动。当导管形状的每个直线段都已经计算完毕, 计算机就决定相交点。这样导管的三维形状就建立了。测量得出的两管间的送进距离、空间转角、弯曲角度, 可作为真正数据或样件储存。可以用此数据检测导管, 建立弯管程序, 改正弯管程序。

(下转第 93 页)

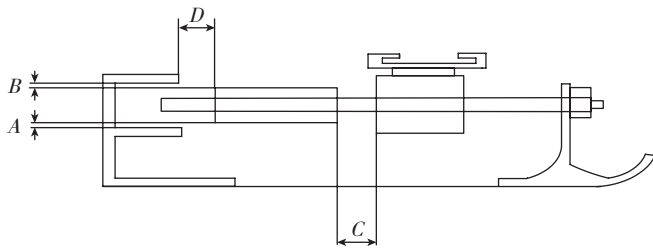


图4 后固定座的调整余量示意图

Fig.4 Diagram of back fixed seat margin for adjustment

余量  $B$  应不小于 7mm, 垂直向下的调整校靶余量  $A$  应不小于 7mm。在进行飞机航炮最终冷校靶之前(热校靶前), 后固定座沿水平和垂直方向调整余量不小于 4mm, 前支点沿水平和垂直方向调整余量不小于 5.5mm。(以上数据仅为参考)。

## 5 仿真对热校靶靶试的意义

通过仿真模拟热校靶射击单元的散布规律, 计算出 10 发炮弹平均弹着点偏差量, 在坐标系对应象限假设存在一个实际冷校点。通过仿真模型了解航炮调整及其实弹散布面机理, 运用数学解析法找出了一个可以满足要求的实际冷校点, 即适合地面热校靶时瞄准点在第三象限。

通过多架飞机航炮地面热校靶验证了航炮仿真理论方法的正确性, 在地面热校靶时将瞄准点在第三象限顺利地完靶试, 既满足了航炮热校靶靶试精度, 提高了航炮地面实弹校靶合格率, 又减少了弹药的消耗、延长了航炮的使用寿命, 最终达到了提高生产效率、降低成本和缩短靶试周期的目的。

## 参考文献

- [1] 许国晖, 杨宇航, 等. 基于虚拟样机技术的火炮维修仿真系统研究. 计算机仿真, 2002(3): 33-35.
- [2] 赵经成. 航空虚拟装备仿真平台的设计与研发 // 第三次全军院校实验室建设与发展学术研讨会论文集. 北京: 国防工业出版社, 2004: 121-124.
- [3] 毕红哲, 庄达民. 航空人机工程计算机仿真. 电子工业, 2010(2): 25-27.
- [4] 刘进成, 冯金富, 齐晓林. F III-301 航炮发射控制原理研究. 中国测试技术, 2002(2): 20-22.
- [5] 姚英学, 蔡颖. 计算机辅助设计与制造. 北京: 高等教育出版社, 2002: 12-15.
- [6] 刘应忠. 航空自动武器导论. 长春: 吉林科学技术出版社, 2002: 68.
- [7] 允来锋. 自行火炮发射动力学研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [8] 徐庚保, 曾莲芝. 数字仿真. 计算机仿真, 2009(9): 3-4.

(责编 夏宛)

(上接第 86 页)

## 7 实样保存

为便于飞机上导管零件的互换, 标准实样需要妥善保管, 作为每批生产时的依据和验收标准, 以便给飞机提供备件。有的导管还要保存弯管的夹具和检验夹具, 需要庞大的仓库或贮存间。而数控弯管制造技术则不需要保留导管实样。

## 8 结论

数字化导管加工在前期设计中耗费的时间较长, 而对飞机设计制造全过程而言, 取消了装配鉴定实样的过程, 大幅缩短了生产周期, 加快飞机研制进度, 更保证了产品质量。

常规导管加工比较适合单机专机专配生产, 在精度要求不高的情况下适合装机。

尽管数控弯管机只有在导管弯曲参数标准化的前提下, 才能得到充分利用, 但却能更好地节约资源, 减少模具制造量和降低生产成本, 加快飞机制造步伐, 这对现代飞机及其发动机不断改型和更新, 以及多机种同时生产的实际情况确实带来了极大的好处, 可以更多地应用此技术。

(责编 夏宛)

(上接第 38 页)

寿命分别为 128931 和 278294, 应力提高疲劳寿命 115%。因此, 疲劳试验说明应力波安装方法可以明显提高接头疲劳寿命。

## 5 结论

工艺试验表明, 目前生产中采用冷缩安装和强迫安装难以完成大直径、高干涉螺栓的安装。提出的应力波安装方法可以安装大直径、高干涉螺栓。安装结果表明应力波安装方法不仅可以解决大直径、高干涉螺栓安装难题, 并且安装质量好, 能较大幅度提高接头疲劳寿命。

## 参考文献

- [1] Duprat D, Campassens D, Balzano M, Boudet R. Fatigue life prediction of interference fit fastener and cold worked holes. Int. J. Fatigue 1996(18): 515-521.
- [2] 高彬, 曹增强. 干涉配合紧固件的安装. 航空制造技术, 2003(11): 25-26.
- [3] 徐进永. 对大过盈量连接用液氮冷装. 机械工艺师, 1995(1): 54-55.
- [4] Cao Zengqiang, Qin Qinghua. A study on driving interference-fit fastener using stress wave. Materials Science Forum, 532-533.

(责编 可岚)