

# 柔性组合夹具在飞机导管数字化快速制造中的应用

## Application of Flexible Combine-Clamp in Digital Rapid Production for Aircraft Tube

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 李光俊 兰 勇 孙 林 陈 忠



李光俊

研究员级高级工程师,中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司主任工艺师。长期从事飞机钣金、导管零件数字化制造技术研究。

犹如人体的血管一样,导管是现代军机、民机上最重要生命线,它将各种介质输送到发动机、起落架、座舱等各部位,满足飞机燃油、液压、环境控制等系统的各种需求。以一架配置两台发动机的军机为例,导管的数量超过 2000 项,其中有 25%~35% 为焊接导管,导管制造技术已经成为现代飞机研制的关键技术之一。

采用专用焊接夹具生产焊接导管的工艺方法已经无法满足现代飞机在研制阶段高精度、多品种、短周期的制造需求。考虑到柔性组合夹具的通用性、可反复拆卸、可重复使用的特点,可用柔性组合夹具代替专用焊接夹具实现飞机导管数字化快速制造。

对于由支管、管接头、法兰盘组成的焊接导管,导管的尺寸除了涉及支管、管接头、法兰盘本身的数据外,还涉及每项支管、管接头、法兰盘之间的相对位置,很难用数据直接表述。为保证支管、管接头、法兰盘之间的相对位置关系,专用焊接夹具是焊接导管生产过程中必需的工艺装备。虽然每项焊接导管需要配置一套专用焊接夹具,而且专用焊接夹具的设计/制造周期长、成本高,但是该方法满足了现代飞机研制过程中生产效率高、质量一致性好的要求,在飞机焊接导管批量生产中应用广泛<sup>[1]</sup>。

随着计算机技术的飞速发展以及三维数字化定义在飞机产品设计、工艺设计中的广泛应用,各种军用和民用飞机试制速度加快,研制周期更

短,制造精度要求更高。特别是在新机研制阶段,导管的走向处于反复叠代、不断优化过程中,飞机导管普遍呈现多品种、单件生产的趋势。在这种情况下,采用专用焊接夹具生产焊接导管的工艺方法已经无法满足现代飞机在研制阶段高精度、多品种、短周期的制造需求。考虑到柔性组合夹具的通用性、可反复拆卸、可重复使用的特点,可用柔性组合夹具代替专用焊接夹具实现飞机导管数字化快速制造。

### 柔性组合夹具的特点

柔性组合夹具通常简称组合夹具,是工装柔性化的典型代表。柔性组合夹具是一种标准化、系列化、通用化程度很高的工艺装备,它是由一套预先制造好的各种不同形状、不同

规格、不同尺寸、具有完全互换性的标准元件和组合件,按工件的加工要求组装而成的柔性夹具。它可以拆卸、清洗,可重新组装成新的夹具,其应用非常普遍,尤其适合于多品种、小批量的生产。由于柔性组合夹具的平均设计和组装时间是专用夹具所花时间的5%~20%,可以认为柔性组合夹具就是柔性夹具的代名词<sup>[2]</sup>。柔性组合夹具的特点主要有:

(1) 精度高。柔性组合夹具的元件具有较高的尺寸精度、几何精度、较高的硬度和耐磨性,这种精度将会反映在用户所制造的产品中。对于2m左右见方的大型工件,在采用合理的方案夹持后,夹具的平面度、直线度、平行度、垂直度可以控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内。

(2) 通用性强,可重复利用。柔性组合夹具是在夹具元件高度标准化的前提下发展起来的,具有完全互换性。元件的平均使用寿命可达15年以上。柔性组合夹具的组装如同搭积木一样,由于它拼装起来变化多,夹具结构型式变化多种多样,能满足各种零部件的加工要求。

(3) 适用范围广。柔性组合夹具适用于机械制造业中的车、铣、刨、磨、镗、钻等工种,在划线、检验、装配、焊接等工种也得到广泛应用。

(4) 生产成本低,生产效率高。柔性组合夹具用后拆散,元件可以继续使用,这样不但能减少夹具库存和夹具报废导致的浪费,而且能节省夹具制造的时间和费用,从而降低生产成本,提高劳动效率。

## 国内外技术现状

1985年,国外制造业在专用夹具的基础上开始发展通用柔性组合夹具,并逐步出现专业化的企业,负责生产研制柔性组合夹具,并配套有知识库和智能专家系统<sup>[3]</sup>,广泛应用于各类制造业,如工程机械、压力容器、汽车工业、自行车、钣金加工、工

业管道(法兰)、设备装配等<sup>[4]</sup>。

从20世纪60年代起,国内制造企业开始将组合夹具应用在车、铣、刨、磨、镗、钻等工序加工中,主要依靠工人凭个人经验进行夹具的拼装与组合。20世纪80年代中期,中国航空技术进出口公司应欧洲客户要求,设计了一套二维计算机辅助组装软件,拉开了我国开发夹具数字化设计的帷幕<sup>[5]</sup>。1992年,中国航空标准化部门随后开展了导管焊接夹具的组合化和基础元件的标准化研究<sup>[6]</sup>,1999年,成都飞机工业公司成功将组合夹具应用于型号飞机焊接导管生产加工中<sup>[7]</sup>。此阶段,组合夹具的设计是二维的,提供被加工导管样件是组合夹具设计制造中不可缺少的一个环节。跨入21世纪,国内高校在Solid Work、Pro-E、UG等不同三维CAD平台上进行组合夹具标准元件建库和数字化设计系统研发,包括三维模型建库、模型装配、装配体分析、元件管理等<sup>[8-11]</sup>,为柔性组合夹具在飞机导管数字化快速制造中的应用奠定了基础。

## 技术方案与关键技术途径

针对飞机导管焊接夹具制造中存在的问题,充分考虑飞机研制阶段

多品种、单件生产的特点,以CATIA三维设计系统为平台,以知识工程技术为手段,开发标准元件参数化建模系统、计算机智能推理系统、标准元件替代系统、精度校核系统、标准元件管理系统,用导管的三维模型代替传统的标准实样,实现组合焊接夹具的数字化快速设计制造,从而满足新机研制高精度、多品种、短周期的制造需求。图1为柔性组合夹具三维数字化设计信息流程图。其中关键技术途径包含元件参数化建模、夹具方案知识库构建、夹具装配智能推理、精度校核与验证。

### 1 元件参数化建模

(1) 对现有基础板、支座、支架、压块、垫片、接头、销钉、钻套标准元件进行分析,按不同的使用功能、定位方式、安装要求进行分类统计,确定标准元件建模方式、建模基准、建模要求。

(2) 在CATIA平台上开发三维模型参数化建模系统,一种标准元件只需人工建立一个标准三维模型,模型中尺寸定义为参数变量,同时对应建立一个Excel文件,将模型中参数与Excel文件中参数实现关联,增加、修改、删除Excel文件中数据则实现标准元件三维模型参数化建模。

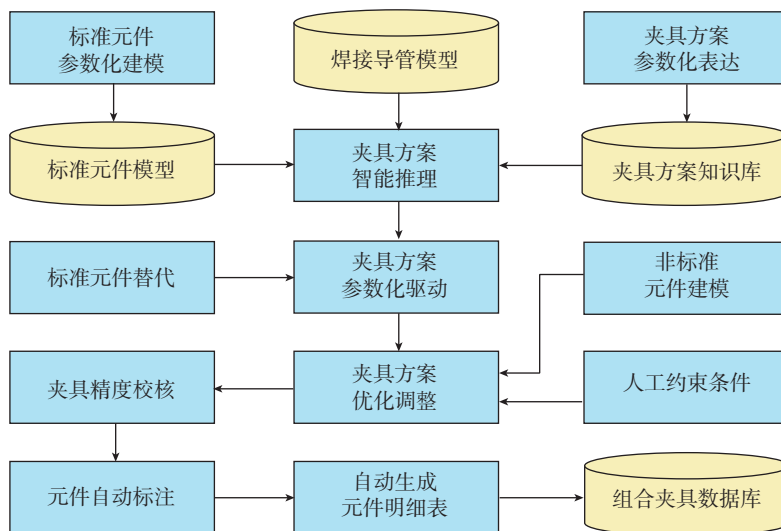


图1 柔性组合夹具三维数字化设计信息流程

(3) 考虑导管焊接夹具的特殊性,针对非标准的夹具元件(如导管端头定位器),需要单独建立三维模型,在人工进行组合夹具优化设计与调整时使用。

(4) 元件参数化建模时,需要根据装配要素建立多个参考坐标系,为后续夹具装配智能推理奠定基础。图2是组合夹具标准元件参数化建模界面。

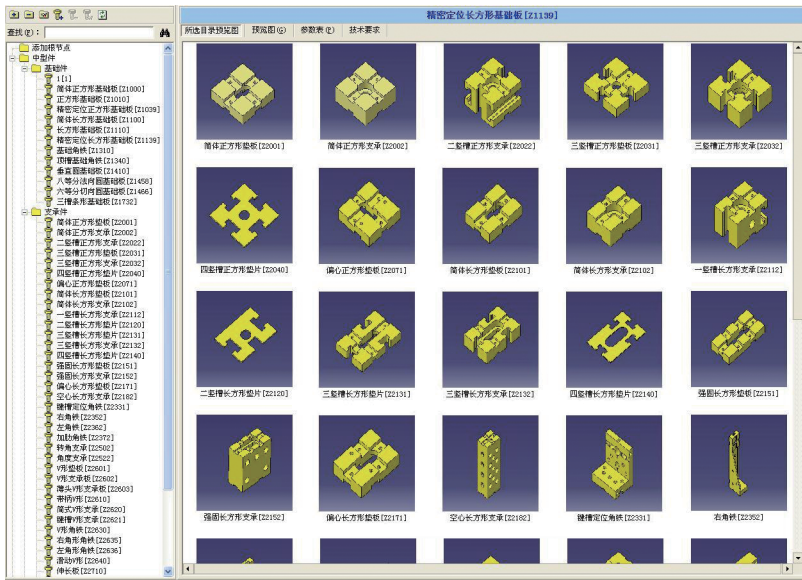


图2 组合夹具标准元件参数化建模

## 2 夹具方案知识库构建

(1) 收集和整理不同直径、不同材料焊接导管夹具方案,对夹具方案的典型特征、典型结构分析统计,提炼出典型结构要素和典型夹具方案。

(2) 对典型结构要素进行参数化表达,按尺寸大小、定位方式、几何

精度、工艺要求对典型结构要素赋予不同参数和逻辑关系,形成典型结构要素库。最典型结构要素有基础板、V型拖架、定位器、压块等。

(3) 根据焊接导管的特点,对典型夹具方案的结构形式、约束方式、先后顺序进行参数化表达,赋予不同参数和逻辑关系,形成典型夹具装配要素库。最典型夹具装配要素如表1所示。

(4) 对于特别通用、常见、典型夹具结构,由技术人员手工利用典型结构要素、装配要素设计出典型柔性夹具方案库。在最初阶段,应根据导管特征多建立典型夹具方案。夹具的典型结构要素库、装配要素库、方案库共同组成柔性夹具方案知识库。

表1 典型夹具装配要素

导管特征	特征类型	夹具装配要素
导管形状	平面直管、平面弯管、空间弯管	(1) 基础板轮廓必须大于导管轮廓尺寸 (2) 一根导管至少有一个V型拖架和压块 (3) V型拖架和压块应在导管直线部位
导管直径	6~100mm	V型拖架的规格与导管直径协调
两端形式	接头、接嘴、法兰扩口、柔性连接	(1) 一个端头必须有一个相同规格定位器 (2) 定位器必须与导管端头同轴,端面同面
中间支管	无、直管、弯管	(1) 一根支管必须有一个V型拖架和压块 (2) V型拖架和压块应在导管直线部位
中间接头	无、接头、接嘴法兰、扩口	(1) 一个端头必须有一个相同规格定位器 (2) 定位器必须与导管端头同轴,端面同面

## 3 夹具装配智能推理

夹具装配智能推理是一个CATIA环境下参数化驱动的算法流程。主要是利用柔性夹具方案知识库中的知识条件,对导管模型进行逐条分析对比,选择标准元件,实现参数化驱动与装配。

(1) 在CATIA中对导管三维模型自动(或人机互动)进行参数化提供。

(2) 根据导管模型参数从知识库中找到典型夹具方案,并根据导管模型参数调整典型夹具方案中标准元件的规格。由于标准元件采用参数化驱动,刷新CATIA界面时,原有的装配约束关系保持不变,系统自动用新规格标准元件的三维模型代替旧的三维模型,实现夹具装配智能推理。

以导管长度增加为例进行详细说明,如图3所示。夹具首次设计时,输入 $L_0$ 的值,选择合适长度的底座;将底座上表面与定位器下表面约束共面;将定位器上孔与导管端头中心线约束同轴;将定位器内表面与导管端头面约束共面,作为一种典型的夹具方案。如果下次导管变化,增加了 $L_0$ 的值,系统以本夹具方案为基础,首先由系统计算(或人工输入) $L_0$ 的增加量 $\Delta L$ ,从数据库中选择一种长度增加量大于且最接近 $\Delta L$ 的底座,进行参数化驱动,底座自动换用加长后的底座。当系统刷新CATIA界面时,由于定位器与导管端头同轴、共面,定位器只能沿导

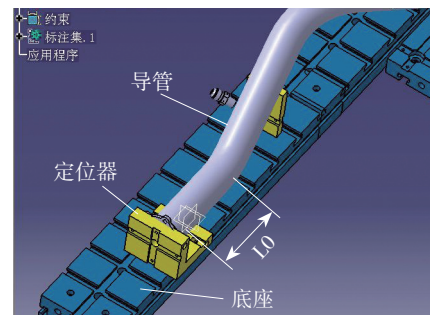


图3 夹具装配智能推理

管加长方向移动,移动的长度恰好为 $\Delta L$ ,从而实现夹具装配智能推理。

(3)如果没有典型夹具方案,根据导管模型参数,确定夹具的典型结构要素、装配要素,并选择对应标准元件的规格,在CATIA中将不同标准元件的参考坐标系重合,实现基本的结构要素装配。这种情况需要人机互动增加专用夹具元件、补充装配约束条,并对夹具进行优化与调整,实现夹具智能装配。

#### 4 精度校核与验证

(1)以用户指定的坐标点/系为基准,在CATIA环境下测量柔性组合夹具特定位置(如导管端头定位器)的理论精度,确定能否满足预期要求。柔性组合夹具精度校核界面如图4所示。

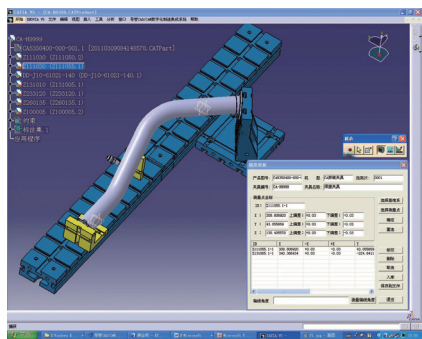


图4 柔性组合夹具精度校核

(2)工人依据柔性组合夹具方案,采用规定的标准元件与连接方式组装柔性组合夹具。

(3)采用数字化的测量设备,在柔性组合夹具上测量组合夹具特定位置(如导管端头定位器)的实际精度是否满足理论精度要求,确保实际的柔性组合夹具与理论的柔性组合夹具在位置、精度上的一致性。

#### 典型应用

目前,成飞公司开发了柔性组合夹具的三维数字化设计系统,并成功应用在飞机导管数字化快速制造中。对燃油、环控等系统100余项焊接导管,以导管三维模型为依据,实现制

准元件参数化建模、计算机智能推理、标准元件替代、精度校核,实现飞机导管CAD/CAM数字化制造。应用发现,用导管数模代替传统的导管样件进行柔性组合夹具三维数字化设计制造后,生产模式由“被动式”转为“主动式”,导管数模的利用率达100%,数字化制造的导管一次试装合格率达78%,缩短了飞机导管制

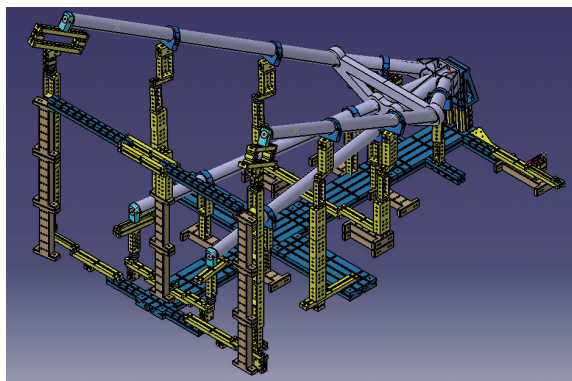


图5 柔性组合夹具数字化设计



图6 数字化拼装的大型柔性组合夹具

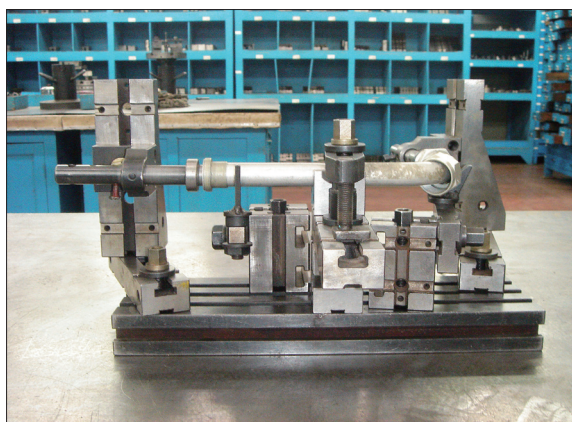


图7 典型焊接导管与柔性组合夹具

造周期2个月。图5是典型柔性组合夹具数字化设计情况,图6、图7是数字化制造的柔性组合夹具实物。

#### 参考文献

[1] 陈明生,廖文和,李迎光.航空件焊接夹具设计知识重用技术研究和实现.机械制造与自动化,2006(2): 11-14.

[2] 李娟,刘洪伟.柔性制造系统中组合夹具在制造业的应用.重型机械科技,2007(1): 51-52.

[3] Cecil J. Computer-aided fixture design—A review and future trends. The international Journal of Advanced Manufacturing Technology,2001(18): 790-793.

[4] 严海星.焊接工装的突破性变革—三维柔性焊接夹紧定位系统.现代制造,2002(18): 66-68.

[5] 蔡瑾,段过林,姚涛,等.计算机辅助夹具设计技术回顾与发展趋势综述.机械设计,2010(2): 1-6.

[6] 刘静华.导管焊接夹具的组化化和基础元件的标准化.航空标准化与质量,1992(6): 10-11.

[7] 屈航.组合夹具在型号飞机焊接导管加工中的作用.航空标准化与质量,1999(6): 12.

[8] 段国林,林建平,张满囤,等.组合夹具计算机三维智能组装系统.中国机械工程,2003(8): 684-686.

[9] 孙玲玲,王秀伦,马自勤.组合夹具管理及辅助设计系统.组合机床与自动化加工技术,2005(3): 105-107.

[10] 张茂鹏.基于Solid Works的组合夹具快速设计技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.

[11] 张三峰.组合夹具工艺信息系统及其智能化研究[D].西安:西北工业大学,2003.

(责编 良辰)