

引文格式: 刘宝明, 李卓丞, 尹海军, 等. 航空导管焊接工装快速设计[J]. 航空制造技术, 2025, 68(14): 86-91.

LIU Baoming, LI Zhuocheng, YIN Haijun, et al. Rapid design of welding tooling for aviation conduit[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(14): 86-91.

航空导管焊接工装快速设计*

刘宝明¹, 李卓丞², 尹海军³, 韩志仁²

(1. 沈阳航空航天大学工程训练中心, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136;

3. 中航工业沈阳飞机工业(集团)有限责任公司, 沈阳 110850)

[摘要] 针对航空导管焊接工装设计复杂、制造效率低等问题,研究了航空导管焊接工装快速设计方案,建立了标准定位组件库,提出了定位组件和导管之间的约束算法及非标准支撑件参数化构建的关键算法。基于CATIA软件开发出了航空导管焊接工装快速设计软件,实现了航空导管焊接工装快速设计及标准件的快速装配。经实际应用验证,与传统方法相比,采用该软件的设计时间缩短了97%,为企业降低成本、提高效率提供了一种方法,具有一定的工程实际应用意义。

关键词: 航空导管; 数字化; 焊接工装设计; 参数化设计; CATIA; 二次开发

中图分类号: V261

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.14.086

Rapid Design of Welding Tooling for Aviation Conduit

LIU Baoming¹, LI Zhuocheng², YIN Haijun³, HAN Zhiren²

(1. Engineering Training Center, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

3. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] Aiming at the problems of complicated design and low manufacturing efficiency of aviation catheter welding tooling, this paper studied the rapid design scheme of aviation catheter welding tooling, established the standard positioning component library, and proposed the constraint algorithm between positioning component and catheter and the key algorithm of parametric construction of non-standard support. Based on CATIA, the rapid design software of aviation conduit welding tooling was developed to realize the rapid design of aviation conduit welding tooling and the rapid assembly of standard parts. The fast design algorithm studied in this paper is applied to the software, and the results show that the software design time is reduced by 97% compared with the traditional design method, which provides a method for enterprises to reduce costs and improve efficiency, and has certain engineering practical application significance.

Keywords: Aerial conduit; Digitization; Welding tooling design; Parametrization design; CATIA; Secondary development

近年来,针对非焊接类导管,我国已基本实现了数字化制造^[1]。通过采用单一导管的三维快速建模技术及有限元仿真技术,缩短了导管和工艺准备时间的制造周期^[2]。焊接类航空导管结构形式复杂,由多个经过弯

曲、扩孔等操作的单一导管焊接组成^[3]。传统航空导管工装设计中,设计人员通过分析航空导管数字化模型特点,确定工装定位位置,设计定位及支撑元件,进行约束定位^[4]。然而,由于焊接类航空导管的形状各异,结构

* 基金项目: 国家自然科学基金(52001217); 辽宁省教育厅科学基金(JYT2020005)。

复杂,工装定位位置没有统一标准,不同导管都需要依据设计经验重复设计定位与支撑等结构元件,在工装结构元件设计上浪费了大量的时间,导致设计效率低。此外,设计人员的设计水平也参差不齐,难以保证焊接类导管焊接工装的设计质量^[5]。

裴宇飞等^[6]发现,传统导管工装设计繁琐,可通过应用柔性工装克服以往一导管一型架的加工制造模式。罗敏等^[7]发现,导管焊接工装各模块中,同种功能的元件有不同的类型,可通过设计一套标准工装模块来提高设计效率。刘洪^[8]发现,我国航空导管工装主要沿袭苏联的工装设计制造方法,与西方先进航空企业相比,存在工装制造周期长、成本居高不下的问题,而柔性装配技术的应用能给航空导管制造业带来巨大效益,正逐步成为航空制造领域不可或缺的先进技术。张平^[9]发现,工装数据规范化管理,有助于下游用户开展工作,可以提高工装设计效率。

针对传统航空导管焊接工装的种种问题,本文提出了快速设计算法,并基于 CAA 对 CATIA 软件进行二次开发,实现了航空导管焊接工装的快速设计,减轻了设计人员工装设计压力,提高设计效率和设计质量。

1 传统航空导管焊接工装结构

航空导管焊接工装结构(图1)根据各自作用的不同可以分为:底板、定位组件、支撑组件3部分,各元件相互连接配合^[10-11]。

(1)底板。底板是航空导管焊接工装中的基础元件,作为焊接工装中各元件的连接板,其上面分布着各定位元件的垫板。

(2)定位组件。定位组件是对航空导管位置姿态进行固定的结构件,依据定位的位置及作用包含水平定位组件、竖直定位组件、卡箍式定位组件和V型定位组件等。

(3)支撑组件。支撑组件是定位元件和底板的连接件,用于保证整体工装的稳定性^[12-13]。

设计人员依据导管的三维数模,并结合自身设计经验,确定需要的工装元件种类、数量及位置,完成各工装元件的建模,最后通过约束关系确定各工装元件的定位和姿态。传统航空导管焊接工装缺乏标准设计规则,不同的导管均需重新设计工装结构件,并手动定位工装结构件位置及调整工装结构件姿态。由于设计流程复杂,涉及较多手动操作且缺乏标准规则,导致焊接工装设计质量不稳定。

2 导管焊接工装快速设计方案

在传统航空导管焊接工装设计过程中,底板及定位

组件需根据导管结构进行重复设计。为了提高设计效率、降低制造成本,可将定位件和底板定义为标准件,提前完成设计和制造,以便在具体的导管焊接工装的设计和制造中引用。具体而言,采用标准形式的基础板代替传统工装中的底板,将定位组件设计成标准件,建立标准定位组件库,并制定基础板及定位组件的定位规则,从而省去底板及定位组件的设计过程。通过分析导管、基础板及定位组件的位置关系,建立非标准支撑组件的设计规则,实现非标准件的参数化、标准化设计,提高航空导管焊接工装设计效率及质量。航空导管焊接工装设计流程如下:

(1)导入导管数模并获取导管直径和轴线,根据导管直径和轴线调用适用基础板并定位;

(2)遍历标准件库,调用所需定位组件;

(3)定位标准定位组件;

(4)参数化设计非标准定位件,完成工装设计。

2.1 标准件构建方案

航空导管焊接工装的标准形式元件包括基础板和定位组件。

标准形式的基础板作为所有航空导管工装元件的支撑底座,为达到工装快速设计的目的,其结构一定要能适用于各种形式的导管焊接工装,所以将基础板设计成标准为 1000 mm × 1000 mm × 30 mm、2000 mm × 1000 mm × 30 mm、3000 mm × 1000 mm × 30 mm 等多种规格的刚性板子,在基础板上等距离均匀分布孔径为 10 的销钉孔,这样的基础板具有较高的稳定性、刚性及普适性。基础板如图 2 所示。

定位组件用于对导管端头焊接部位的精准定位,以及确定整个导管的空间位置,根据定位组件的应用位置,可将定位元件分为端头定位组件和导管主体定位组件两类标准定位元件。

端头定位组件根据导管端头姿态分为水平定位组件和竖直定位组件。水平定位组件中含有三角支撑元

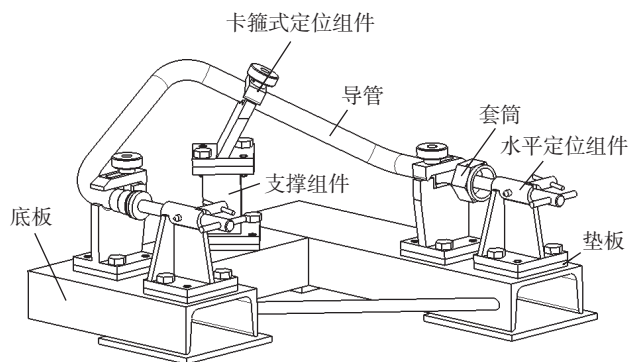


图1 航空导管焊接工装结构

Fig.1 Structure of welding tool for aviation conduit

件、套筒、顶杆、顶盖、插销、定位销。顶杆插在三角支撑元件中依赖定位销定位,顶杆尾部插有插销方便转动顶杆找到顶杆定位孔与三角支撑元件定位孔的配合位置,顶杆前端有顶盖、顶盖前有用于配合导管端头的套筒,如图3所示。竖直定位组件中包含T型支撑架、弯架、顶杆、顶盖、套筒、插销、定位销。T型支撑架和弯架通过两个定位销连接,顶杆插在弯杆套内,通过定位销连接,其前端连接顶盖,顶盖前有用于配合导管端头的套筒,如图4所示。

导管主体定位组件根据管径大小分为卡箍式定位组件和V型定位组件。卡箍式定位组件中包括卡箍卡座、紧固螺栓、卡箍3部分。卡箍与卡箍卡座中的U型槽相配合,通过卡箍卡座上的紧固螺栓调整卡箍的松紧,如图5所示。V型定位组件的中部是一个夹角为60°的V字形凹槽,在凹槽中间面上建立对角线*l*,两侧为加强肋,如图6所示。

根据导管直径设计多套定位组件,将设计好的定位组件保存在固定路径下形成标准件库。

2.2 标准件约束方案

首先导入基础板,并根据导管的位置姿态手动确定基础板的位置。

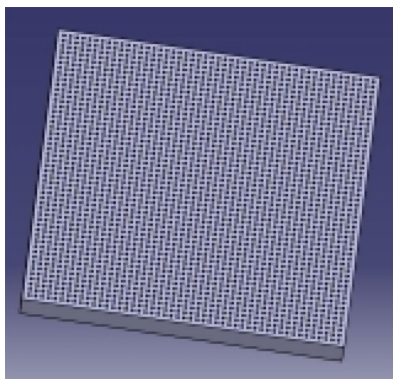


图2 基础板
Fig.2 Soleplate

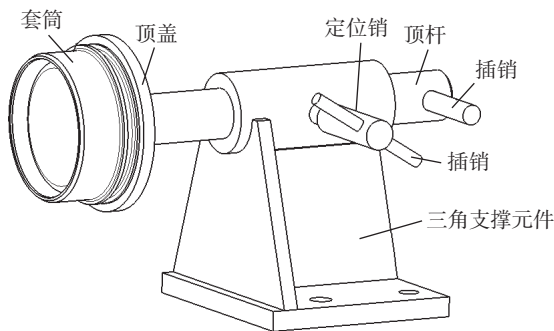


图3 水平定位组件
Fig.3 Horizontal positioning component

4类标准定位组件的使用规则如下:

规则1: 确定导管外径*D*,依据*D*值确定标准件型号。

规则2: 在导管基准坐标系下,依据式(1)确定导管端头轴线与基础板平面夹角。

$$\begin{cases} \mu = f(x, y, z) \\ P_1(x_1, y_1, z_1) \\ P_2(x_2, y_2, z_2) \\ \alpha = \arcsin \frac{P_1 P_2 \cdot \bar{\mu}}{|P_1 P_2| \cdot |\bar{\mu}|} \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ 为基准坐标系下的基础板平面; P_1 、 P_2 分别为导管端头轴线的两端点; $\bar{\mu}$ 为平面 μ 的法向量; α 为导管端

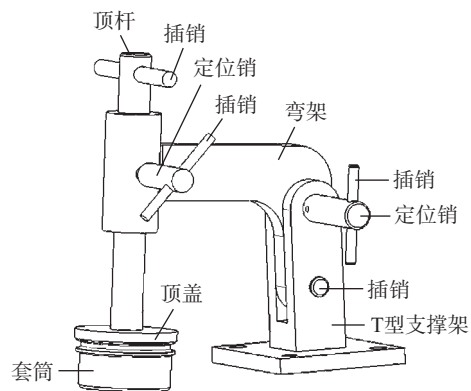


图4 竖直定位组件
Fig.4 Vertical positioning component

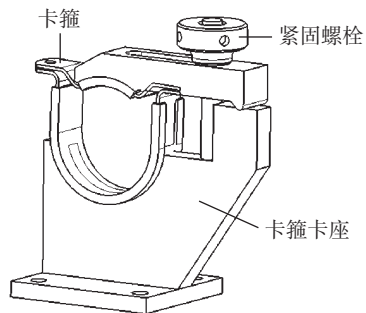


图5 卡箍式定位组件
Fig.5 Clamp positioning component

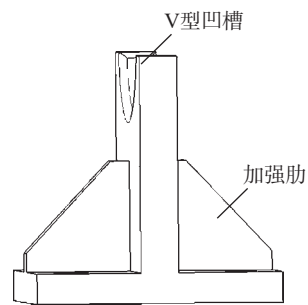


图6 V型定位组件
Fig.6 V-type positioning component

头轴线与基础板平面夹角。当 α 在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 或 $135^\circ \sim 180^\circ$ 区间时,调用水平定位组件;当 α 在 $45^\circ \sim 135^\circ$ 区间内时,调用竖直定位组件。

规则 3: 根据导管外径 D 确定导管主体支撑夹紧定位元件类型。当 $D > 20 \text{ mm}$ 时,调用卡箍式定位组件;当 $D \leq 20 \text{ mm}$ 时,调用 V 型定位组件。

规则 4: 根据规则 2 选择出合适的端头外侧定位组件,按式 (2) 将定位组件进行位姿变换到基准坐标系下。当调用水平定位组件时,将定位组件和端头的对应点坐标、轴线及接触面相拟合,使定位组件底板底面距顶盖最近的边线与基础板平行,实现端头定位组件的工装定位;当调用竖直定位组件时,将定位组件和端头的对应点坐标、轴线及接触面相拟合, T 型支架轴线在导管对称面上。

$$T_B^A = \begin{bmatrix} R_B^A t_{A2B} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P_A = T_B^A \times P_B$$

式中, T 为位姿变换矩阵; P_A 和 P_B 分别为定位组件变换前后的位置坐标; R 分量为旋转分量 3×3 的矩阵; t 分量为平移分量 3×1 的向量。

规则 5: 根据式 (3) 确定端头内侧定位点的位置。获取导管轴线中除端头轴线段的所有直线段端点坐标,将获取到的每段轴线段端点坐标分别代入式 (3),计算出可供设计人员选择的定位点坐标,如图 7 所示,设计人员根据需求拾取定位点。

$$\begin{cases} D_{1x} = \frac{1}{3}(x_2 - x_1) + x_1 \\ D_{1y} = \frac{1}{3}(y_2 - y_1) + y_1 \\ D_{1z} = \frac{1}{3}(z_2 - z_1) + z_1 \\ D_{2x} = \frac{2}{3}(x_4 - x_3) + x_3 \\ D_{2y} = \frac{2}{3}(y_4 - y_3) + y_3 \\ D_{2z} = \frac{2}{3}(z_4 - z_3) + z_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 、 (x_2, y_2, z_2) 和 (x_3, y_3, z_3) 、 (x_4, y_4, z_4) 分别为导管端头轴线直线段端点; D_1 、 D_2 为端头内侧定位点坐标。

规则 6: 根据规则 3,当调用卡箍式定位元件时,先根据规则 5 确定调用数量和定位点坐标,再运用式 (2) 将卡箍式定位组件进行位姿变换到基准坐标系下,运用式 (4) 计算直线轴线段 $P_{n-1}P_n$ 与基础板平面夹角 β_n ,将卡箍式定位元件圆心点坐标和定位点坐标拟合、卡箍约

束面和导管约束面拟合,将卡箍式定位组件经过旋转变换到底板底面与基础板平面夹角为 β_n ,实现卡箍式定位元件定位。

$$\begin{cases} \mu = f(x, y, z) \\ P_{n-1}(x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}) \\ P_n(x_n, y_n, z_n) \\ \beta_n = \arcsin \frac{\overline{P_{n-1}P_n} \cdot \vec{\mu}}{|\overline{P_{n-1}P_n}| \cdot |\vec{\mu}|} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_{n-1} 、 P_n 分别为导管轴线的两端点。

当调用 V 型定位元件时,先根据规则 5 确定调用数量和定位点坐标,运用式 (4) 计算轴线段 $P_{n-1}P_n$ 与基础板平面夹角 β_n ,运用式 (5) 确定 V 型定位元件定位点坐标,再运用式 (2) 将 V 型定位元件进行位姿变换到基准坐标,将 V 型定位元件定位点坐标和导管定位点坐标相拟合,将 V 型定位元件特征面和导管特征面相拟合,将 V 型定位元件经过旋转变换到底板底面与基础板平面夹角为 β_n ,实现 V 型定位元件定位。

$$\begin{cases} V'_n(x'_n, y'_n, z'_n) \in l \\ V_n(x_n, y_n, z_n) \in l \\ (x'_n - x_n)^2 + (y'_n - y_n)^2 + (z'_n - z_n)^2 = D^2 \end{cases} \Rightarrow V'_n(x'_n, y'_n, z'_n) \quad (5)$$

式中, V_n 为 V 型定位组件对角线 l 的射线顶点; V'_n 为所求定位点。

2.3 非标准件参数化构建关键算法

标准件定位完成后,定位组件的底面不一定全部与基础板平面平行,且高度不一,此时需要依赖非标准形式的支撑组件进行调整。因此建立以下非标准组件的参数化设计和定位规则。

规则 7: 根据式 (4) 计算得到的轴线与基础板平面的夹角 β_n ,根据式 (6) 计算定位组件底面中心点到基础板平面的最小距离。当 $L' \geq 50 \text{ mm}$ 时,运行规则 8;当 $L' < 50 \text{ mm}$,参数化调整 L 高度,使 L' 不小于 50,运行规则 8。

$$L' = L - S_1 \cos \beta_n \quad (6)$$

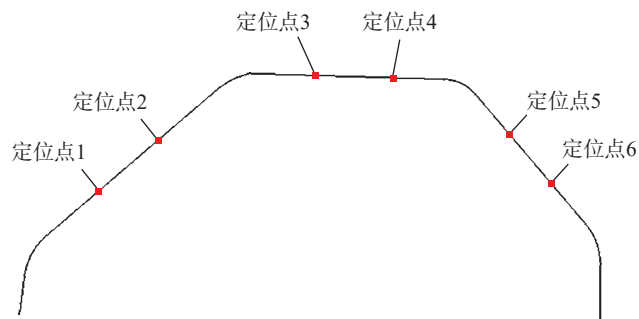


图 7 定位点图

Fig.7 Location map

式中, L 为组件底面中心点到基础板平面的距离; L' 为轴线约束点到基础板平面的距离; S_1 为约束点到定位组件底面的距离。

规则 8: 根据式 (7) 计算拉伸法线向量, 以 λ 为拉伸方向, 以定位组件底面为基准, L' 为支撑组件总高度, 生成工字形支撑组件, 令支撑组件上板和定位组件底面完全相合, 将上板面投影到基础板平面上得到的形状即为下板面底面, 在支撑座下板底面坐标系下应用式 (8) 确定定位孔圆心 K_1 、 K_2 的位置, 打销钉孔, 支撑组件如图 8 所示。

$$\bar{\lambda} = \frac{|\overrightarrow{P_{(n-1)}} \cdot \overrightarrow{P_n}| \cdot \cos(\beta_n + 90^\circ)}{P_{(n-1)} P_n} \quad (7)$$

$$\begin{cases} l_1: A_1x + B_1y + C_1 - 10\sqrt{2} = 0 \\ l_2: A_2x + B_2y + C_2 + 10\sqrt{2} = 0 \\ l_3: A_3x + B_3y + C_3 + 10\sqrt{2} = 0 \\ l_4: A_4x + B_4y + C_4 - 10\sqrt{2} = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$$U = \{(x, y) \mid A_1x + B_1y + C_1 - 10\sqrt{2} < 0, A_2x + B_2y + C_2 + 10\sqrt{2} > 0, A_3x + B_3y + C_3 + 10\sqrt{2} > 0, A_4x + B_4y + C_4 - 10\sqrt{2} < 0\}$$

$$Q = C \cap C_u A$$

$$k_1(x_{\max}, y) \in Q, k_2(x_{\min}, y) \in Q \quad (8)$$

式中, l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 分别为下板面 4 条边向内平移 10 mm 所在直线; 集合 U 为该四边形内的所有点的集合; 集合 A 为支撑组件立柱投影在该平面内围成的四边形内点的集合; 集合 C 为基础板孔的圆心点集合; K_1 、 K_2 分别为 x 坐标最大、最小值的点。

2.4 基于焊接导管工装快速设计方案的算法流程

本文将航空导管焊接工装的各基础元件分类为标准件和非标准件, 并制定了标准件的使用规则和非标准件的设计规则, 形成了一套全面完善的航空导管焊接工装设计流程。

以航空导管三维模型为基础, 调用基础板并确定位置, 根据规则 1、2、3 确定需要的标准件类型, 根据规则

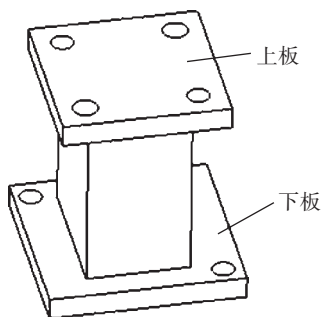


图 8 支撑组件

Fig.8 Support component

4 实现导管端头定位件定位, 根据规则 5 确定导管主体部分定位点及所需定位件数量, 根据规则 6 实现导管主体部分定位件定位, 根据规则 7 确定非标准件和标准件的参数关联, 根据规则 8 完成非标准件的生成。

3 航空导管焊接工装快速设计的应用

基于 CAA 开发出了航空导管焊接工装快速设计软件, 操作功能如下:

(1) 进入航空导管焊接工装快速设计模块 (图 9), 按导管数模存放路径导入, 以 40 mm 直径的导管为例, 导入后程序会对导管数模进行特征识别, 获取导管直径和导管轴线, 并根据导管直径及轴线特征计算出可添加定位组件的定位点坐标;

(2) 用户调用合适的基础板定位, 以 100 为例输入工装高度, 用于完善程序需求的数据;

(3) 用户可选择拾取定位点 (也可跳过此步骤), 实例中未进行拾取, 程序自动计算出定位组件类型及数量, 并显示在表格中, 然后根据算法自动调用并定位标准定位组件;

(4) 标准定位组件定位完毕后, 程序依据标准定位组件和基础板的数据计算出非标准定位组件的生成数据并完成创建;

(5) 导入并装配定位销和螺栓等标准件, 航空导管焊接工装模型生成完毕, 如图 10 所示。

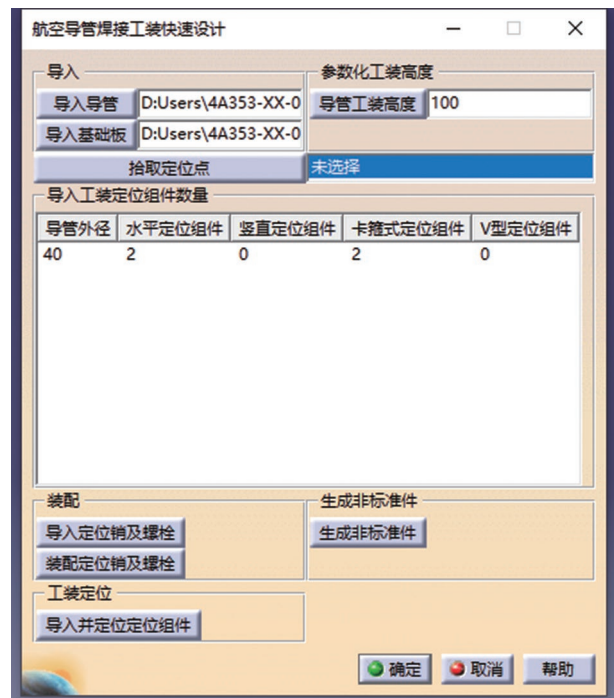


图 9 航空导管焊接工装快速设计软件界面

Fig.9 Rapid design software interface of aviation conduit welding tooling

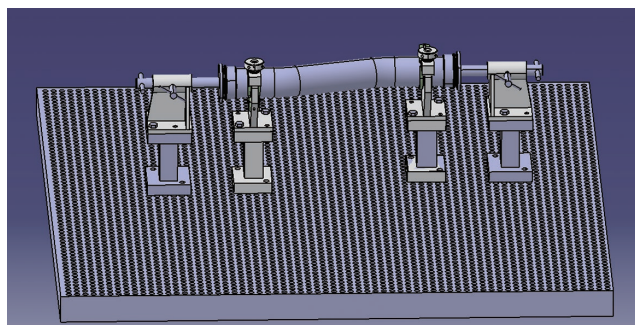


图 10 生成工装模型预览

Fig.10 Generated tooling model preview

4 结论

本文针对航空导管工装传统设计方法中存在的复杂、烦琐问题,提出了航空导管焊接工装快速设计方案。研究得出如下结论。

(1) 将航空导管焊接工装的各部件分类为标准件和非标准件;抛弃传统航空导管焊接工装中的底板结构,创新设计出标准形式的基础板作为航空导管焊接工装支撑底座,建立标准定位组件库,设计标准件选用及定位规则,提出非标准件参数化设计和定位算法,制定航空导管焊接工装快速设计方案。

(2) 基于航空导管焊接工装快速设计方案,在 VC++ 中编写代码,开发了航空导管焊接工装快速设计软件,该软件在保证工装设计质量的前提下,实现了航空导管焊接工装的快速参数化建模、结构优化以及标准件的快速装配。

参考文献

- [1] 韩志仁, 马志友, 车剑昭, 等. 基于CATIA/CAA的数控弯管模具快速设计[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 107-113.
HAN Zhiren, MA Zhiyou, CHE Jianzhao, et al. Rapid design of CNC tube bending die based on CATIA/CAA[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 107-113.
- [2] 韩志仁, 梁文馨, 刘宝明, 等. 飞机导管工艺性审查技术研究[J]. 机械设计与制造, 2015(7): 261-263, 267.
HAN Zhiren, LIANG Wenxin, LIU Baoming, et al. Research on the examination technology for aircraft tube manufacturability[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(7): 261-263, 267.
- [3] 刘明星. 面向数字化制造的航空导管逆向建模技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.
LIU Mingxing. Research on reverse modeling technology of aviation duct for digital manufacturing[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2015.
- [4] 韩志仁, 吕彦盈, 刘宝明, 等. 飞机焊接导管数字化制造技术研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(8): 95-98.
HAN Zhiren, LÜ Yanying, LIU Baoming, et al. Research on the digital manufacturing technology of aircraft welding tube[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(8): 95-98.
- [5] 李西宁, 胡匡植, 李维亮, 等. 飞机数字化柔性装配工装技术[J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 40-43.
LI Xining, HU Kuangzhi, LI Weiliang, et al. Aircraft digital flexible assembly tooling technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(12): 40-43.
- [6] 裴宇飞, 宋子明. 发动机导管的柔性工装的设计制造[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(15): 102-103.
PEI Yufei, SONG Ziming. Design and manufacture of flexible tooling for engine duct[J]. Technology Innovation and Application, 2020, 10(15): 102-103.
- [7] 罗敏, 周京平. 柔性工装在导管数字化制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2014, 57(1/2): 158-161.
LUO Min, ZHOU Jingping. Application of flexible tooling in digital manufacturing of catheter[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(1/2): 158-161.
- [8] 刘洪. 飞机工装设计制造技术探讨[J]. 航空制造技术, 2006, 49(12): 69-71.
LIU Hong. Discussion on design and manufacturing technology of aircraft tooling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2006, 49(12): 69-71.
- [9] 张平. 基于CATIA的装配工装数字化设计制造技术[J]. 航空标准化与质量, 2003(6): 16-20.
ZHANG Ping. Digital design and manufacturing technology of assembly fixture based on CATIA[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2003(6): 16-20.
- [10] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装技术体系研究[J]. 航空制造技术, 2012, 55(7): 34-39.
WANG Liang, LI Dongsheng. Flexible tooling technology system for aircraft digital assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(7): 34-39.
- [11] 何丽红. 关于飞机数字化柔性装配工装技术的探索[J]. 科技资讯, 2015, 13(5): 79.
HE Lihong. Exploration of digital flexible assembly tooling technology for aircraft[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(5): 79.
- [12] 吴澄. 数控导管焊接夹具CAD系统研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
WU Cheng. Research and implementation of CAD system for NC catheter welding fixture[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [13] 宋健, 郑医, 徐磊, 等. 金属导管的工装设计与焊接[J]. 科技创新与应用, 2014, 4(14): 117.
SONG Jian, ZHENG Yi, XU Lei, et al. Tooling design and welding of metal conduit[J]. Technology Innovation and Application, 2014, 4(14): 117.

通信作者: 韩志仁, 教授, 博士, 研究方向为钣金成形和数字化制造技术。

(责编 阳光)