

飞机装配型架骨架的关联设计原理及算法

Principle and Algorithm of Associated Frame Design for Aircraft Assembly Fixtures

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 周 婷 曹 巍 郑国磊 邱 益

[摘要] 为了解决飞机装配工装设计过程交互繁琐、效率低等问题,提出了一种基于装配件三维包围盒的型架骨架关联设计原理和算法。首先根据型架骨架的结构特点及其与装配件尺寸的关联性对骨架结构进行了分类;其次研究了骨架关联结构的设计原理并给出了相应的算法流程;最后以 CATIA 系统为平台在 VC++ 开发环境下基于 CAA 开发和实现了该算法。通过实例测试验证了所建立的骨架关联设计技术是可行的。该技术可用于实现装配型架的结构及其尺寸随产品结构的修改而自适应更改,从而提高装配型架的设计效率和确保装配型架的设计质量。

关键词: 机装配工装 骨架 关联设计

[ABSTRACT] To solve the complicated-interaction and low-efficiency problem in the aircraft assembly fixture design process, an approach of the frame associated design based on assembly 3D bounding box is presented. Firstly, the classification of frame structure is made according to its characteristics and the association with assembly size. Secondly, a research on associated frame design is made, and its principle and algorithm are presented. Finally, the algorithm is implemented in CATIA with the VC++ environment and CAA. An example is given to validate the approach. The approach can be applied to modify assembly fixture automatically and adaptively with assembly model. Therefore the efficiency and quality of the assembly fixture design can be improved.

Keywords: Aircraft assembly fixture Frame design Associated design

飞机装配型架是指在完成飞机产品从零组件到部件装配以及总装配过程中用以控制其几何参数且具有定位功能的专用工艺装备^[1]。目前,国内各主机厂同时承担着多种型号飞机的研制任务,工装难以满足装配需求,已成为飞机生产的瓶颈。主要体现在:为了尽可能缩短新机研制周期,要求产品及其制造工装实行并行设计;装配型架与飞机结构密切相关,而飞机从预发到定型之间修改频繁,导致型架设计修改工作量大,质量

难以保证。为了减少工装结构人工修改工作量,提高工装设计的质量和效率,研究基于产品三维模型的工装结构关联设计技术将具有重要意义。

骨架作为装配型架的基体结构,起着固定和支撑型架中的工作元件并保持其位置准确度及稳定性的作用。目前,骨架的专业化设计技术研究主要集中在骨架结构布局、骨架结构造型、骨架接头处理等方面^[1-3]。对骨架结构造型、骨架接头处理的研究较多,而且已经有成熟的功能实现。但是,在骨架结构布局方面仍主要靠设计人员在 CAD 平台上通过最基本的功能交互完成,过程繁琐、效率低,且最终的设计结果与飞机装配件模型、装配姿态等产品数据间不具备直接关联性,不能支持骨架随产品数据的修改而自适应更改,从而导致骨架与飞机装配件结构间的不协调等潜在问题。本文拟探讨这一问题的有效解决方法,即在深入分析骨架结构及其设计过程的基础上,提出一种基于飞机装配件三维包围盒的骨架关联设计原理和算法,并以 CATIA 系统为平台,开发和实现这一算法。

1 型架骨架结构

型架骨架结构一般由型材构成,其沿自身轴线为等截面形状,可抽象为轴线模型,如图 1 (a)、(b)所示。根据是否直接依赖装配件尺寸,将骨架结构分为直接关联和间接关联等两部分结构,如图 1 (c)所示。

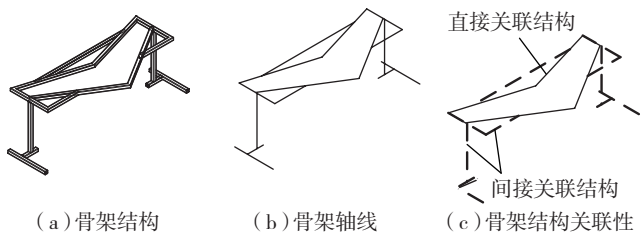


图1 飞机尾翼装配型架骨架
Fig.1 Assembly fixture frame of tail wing

(1) 直接关联结构是指骨架中由装配件的尺寸直接决定的结构。直接关联结构的设计尺寸称为直接关联尺寸,影响直接关联尺寸的因素包括装配件大小、装配姿态等装配工艺因素。

(2)间接关联结构是指骨架中不是由装配件尺寸直接决定的结构。间接关联结构的设计尺寸称为间接关联尺寸,影响间接关联尺寸的因素主要包括结构件的稳定性、刚度、强度以及人机工程等。间接关联结构设计随意性较大,形式多样,其设计员的经验为最主要的主导因素。

对骨架这些部分的结构进一步细分,如图2所示。可见骨架结构具有一些常用典型形式,而且每一种典型结构与产品装配件外形具有某种相似性。这些结构特点为后续提出和建立骨架关联设计原理奠定了主要的基础。

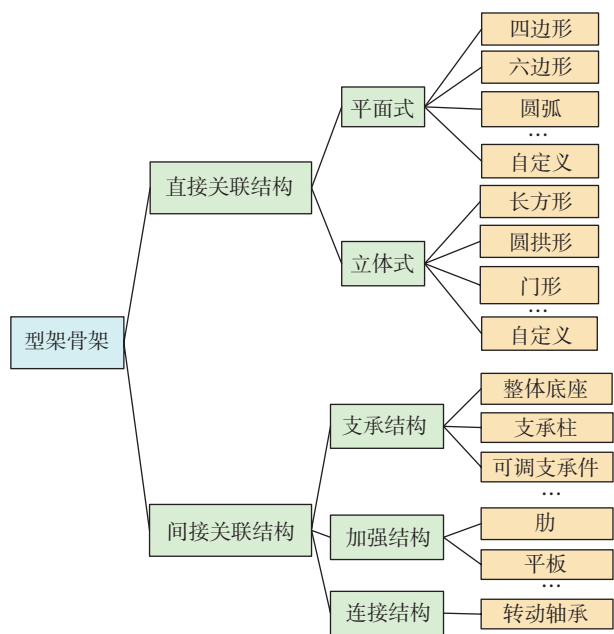


Fig.2 Classification of aircraft assembly fixture frame structure

2 关联设计原理及算法

骨架结构与产品装配件间除了上述提及的关系外,还具有以下关系:(1)骨架结构与产品装配件轮廓间有一定的间距,以安放定位夹紧件和满足装配工艺要求,其间存在直接的结构尺寸约束;(2)骨架结构上安装的定位夹紧件与产品装配件上的定位面、交点孔等工艺结构直接接触,因此,骨架与产品装配件的定位夹紧方位和外形还存在间接约束关系。考虑到装配件轮廓的获取方式,提出一种基于

装配件三维包围盒的骨架关联设计原理和算法,其设计过程如图3所示。

2.1 关联设计原理

2.1.1 术语

(1)装配件大小与扁平度。根据工装设计经验,平面框架式骨架结构形式主要用于框、肋、梁等平面形状的组合件、壁板件及小部件;立体框架式骨架结构形式主要用于大型组合件、中小型部件及大型壁板件^[4]。不同结构形式的骨架与装配件轮廓间的关系也不同。为此,提出装配件的大小及其扁平度的评价指标:

①装配件大小是指装配件在工装轴系下所生成包围盒的最长边的长度,用 L_a 表示。 L_a 越小,说明装配件整体上的方形空间越小。

②装配件扁平度是指装配件在工装轴系下所生成包围盒的最短边与最长边长度的比值,用 P_a 表示。 P_a 越小,说明装配件越扁平。

(2)骨架截面和引导面。根据文献[3]中提出的骨架轴线模型及结构设计过程模型,骨架结构的关联设计主要是建立骨架轴线与装配件间的关联,亦即建立轴线模型中线链与装配件间的关联。装配工装中存在大量的相似骨架结构形式,许多甚至是重复性的,通过建立骨架轴线模型中线链间的关联可以进一步简化骨架的设计。为了建立相似结构的关联设计算法,给出以下几个概念:

①骨架截面用一个线链定义,用于表示骨架直接关联结构的典型结构形式,如四边形、拱形等。

②骨架截面级数是指一个骨架轴线模型中相互平行的相同骨架截面的个数,简称级数,用 N 表示。平面骨架 $N=1$ 。

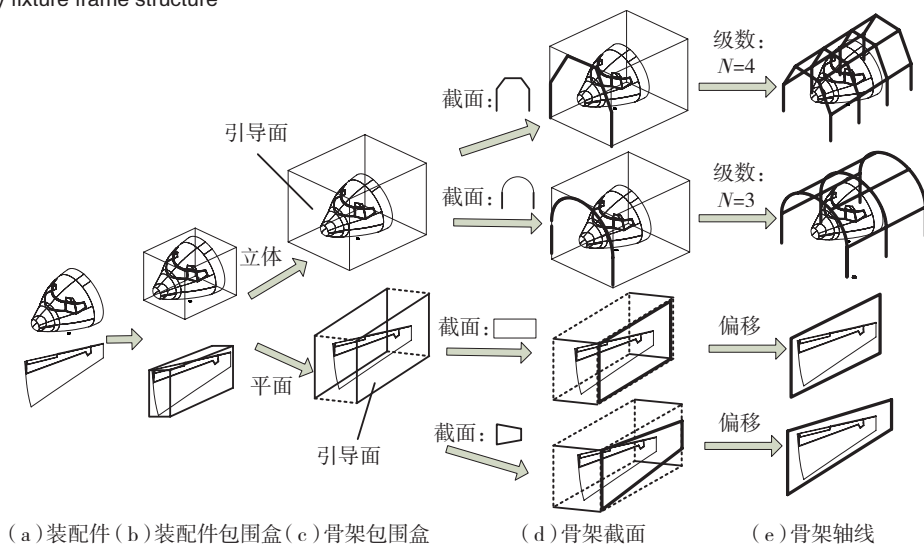


图3 骨架轴线关联设计过程示意图

Fig.3 Diagram of associated frame sketch design

③ 引导面指骨架包围盒上与骨架截面平行的平面。

④ 引导线链指在引导面上生成的骨架截面。

⑤ 引导点指引导线链中线段的端点。

2.1.2 关联设计过程

基于装配件包围盒的骨架轴线关联设计的具体过程如图 3 所示。其中,装配件包围盒是装配件在工装设计空间中生成的包围盒,骨架包围盒是装配件考虑其定位夹紧空间后的包围盒^[5]。根据骨架结构形式的不同包围盒引导面的选取也不相同。根据不同的骨架截面形式,建立截面与引导面间的尺寸关系,生成引导线链,通过对引导线链的操作进而获取骨架轴线模型。在后续的骨架结构建模过程中,可利用轴线模型中线段的连接关系,自动处理骨架元件的接头。

2.2 算法流程

飞机装配型架骨架结构关联设计算法流程如图 4 所示。

(1) 创建装配件包围盒与骨架包围盒。根据装配件的装配姿态创建工装轴系,即定义了工装的设计空间,并在其中创建装配件包围盒。根据交互指定的定位夹紧空间大小创建骨架包围盒。如图 5 所示为包围盒某一个平面的创建过程,其中, ΔA 为定位夹紧空间大小。包围盒的另外两个平面的创建过程类似。

(2) 判断骨架结构形式。根据装配件包围盒的长、宽、高(分别用 l, w, h 表示)判断并选择骨架的结构形式。其过程为:

① l, w, h 的值按降序排序,结果令 $l > w > h$;

② 计算装配件扁平度 P_a 和装配件大小 L_a :

$$P_a = h / l \quad (1)$$

$$L_a = l \quad (2)$$

③ 选择骨架结构形式:若 $L_a < L$ 或 $P_a > P$,即为小部件或平面结构,则选择平面形式;否则选择立体形式。其中: L 和 P 分别为装配件的临界大小和临界扁平度。

(3) 获取引导面。平面骨架引导面的方向 β 与骨架包围盒最短边的方向一致,立体骨架引导面的方向与骨架包围盒水平面内的最长边一致,如图 6 所示。

(4) 创建引导线链。根据选取的典型截面形式(如图 7 所示),在引导面上创建引导线链。

其中,建立如下比例关系: $\alpha = a_1/W, \beta = a_2/W, \gamma = a_3/L$ 。通过交互指定 α, β 和 γ ,从而实现不同尺寸的相似截面与包围盒之间的关联(如图 8 所示)。

(5) 创建平面骨架轴线。对于平面骨架结构形式,其直接关联结构只有一个线链,通过指定平面骨架的偏心距对引导线链进行平移即可。

(6) 创建立体骨架轴线。对于立体骨架结构形式,

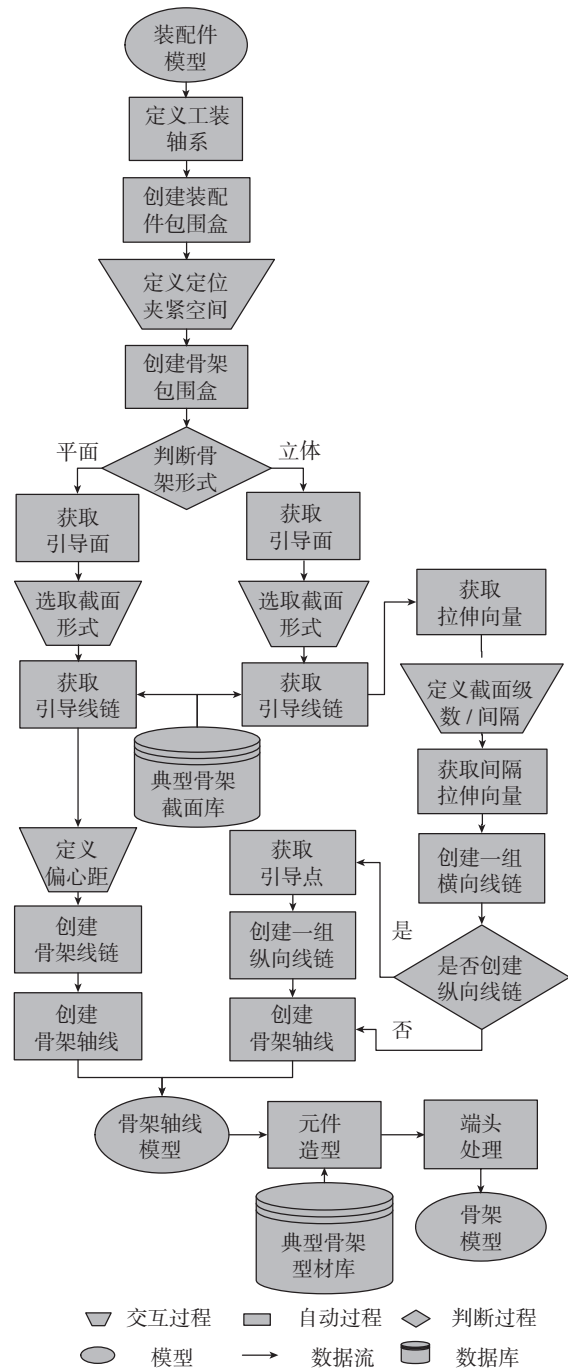


图4 骨架结构关联设计算法流程
Fig.4 Algorithm process of associated frame design

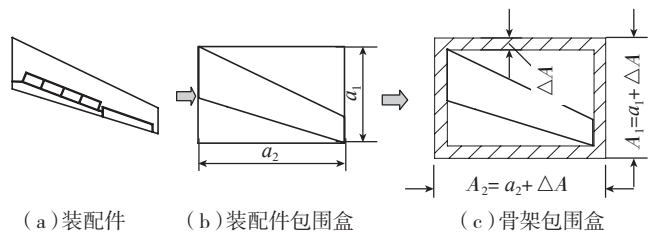


图5 骨架包围盒的创建过程
Fig.5 Creation process of frame bounding box

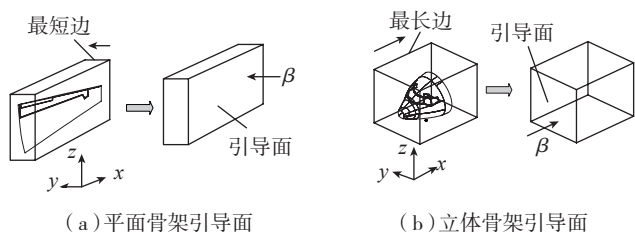


图6 引导面的定义
Fig.6 Definition of the guide surface

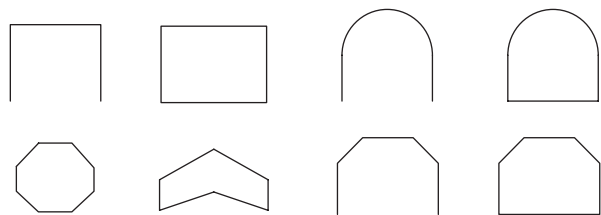


图7 典型结构形式(部分)
Fig.7 Typical structure form(part)

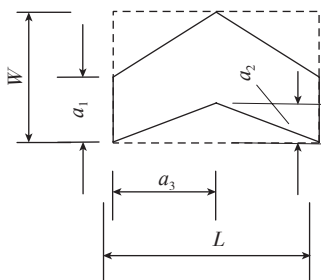


图8 引导线链的定义
Fig.8 Definition of the guide chain

其轴线的创建过程为:

① 获取拉伸向量 \vec{L} 及间隔拉伸向量 $\Delta\vec{L}$ 。拉伸向量 \vec{L} 的方向与引导面方向 β 一致,初始长度为骨架包围盒与 β 平行的边长度。拉伸向量 \vec{L} 、间隔拉伸向量 $\Delta\vec{L}$ 与级数 N 间的关系为:

给定 $\Delta\vec{L}$:

$$N = \left\lceil \frac{\vec{L}_0}{\Delta\vec{L}} \right\rceil, \quad (3)$$

$$\vec{L}_1 = N \cdot \Delta\vec{L}. \quad (4)$$

给定 N :

$$\Delta\vec{L} = \vec{L}_0 / (N - 1), \quad (5)$$

$$\vec{L}_1 = \vec{L}_0. \quad (6)$$

② 创建横向线链。通过间隔拉伸向量 $\Delta\vec{L}$ 对引导线链进行平移操作,即可得到一组横线线链。

③ 创建纵向线链。获取引导点,通过拉伸向量 \vec{L} 的作用获取线元,进而创建一组纵向线链。

④ 创建骨架轴线。获取如上横向线链和纵向线链,创建骨架轴线模型。

(7) 创建骨架结构。指定型材规格、方位角、扫掠中心,生成骨架元件,根据不同的接头类型自动进行接头处理,获取骨架结构模型。

3 实现与测试

以 CATIA 系统为平台,开发和实现了上面所建立的算法,交互界面如图 9 所示。

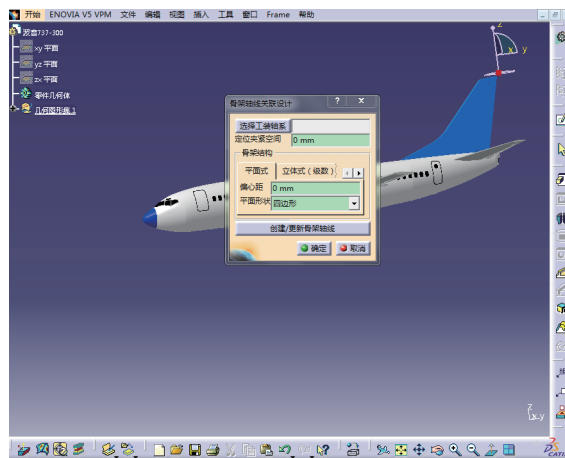


图9 骨架关联设计界面
Fig.9 Interface of associated frame design

以某一大型飞机壁板件为测试对象,首先获取其包围盒,如图 10 (a)所示。定义定位夹紧空间为 450mm,截面间隔为 2.5m,选取截面形状为六边形(边比例参数: $1, \frac{2}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}$),创建的骨架轴线如图 10 (b)所示,骨架结构如图 10 (c)所示。装配件的尺寸发生改变时,

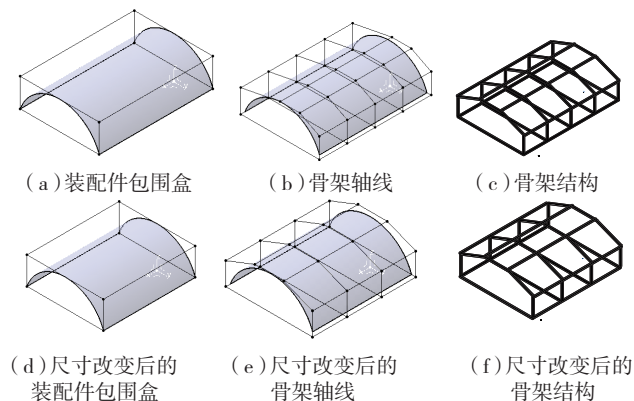


图10 壁板件装配型架骨架结构关联设计
Fig.10 Associated frame design of panel assembly fixture

(下转第 41 页)

$[S_i(1), S_i(2), \dots, S_i(18)]$ 。为了验证装配资源不到位对装配序列的影响,我们设计了两个不同时刻的装配资源矩阵:第一次装配资源全部到位,即 $RS_{i1}(P)=[1, 1, 1, 1]$ (所有元素均为 1)。而第二次,定义 Fix.6 缺失,零件 3、16、18 由于同时使用 Fix.6 而无法装配,即 $RS_{i2}(P)=[1, 1, 0, 1, \dots, 1, 0, 1, 0]$ (第 3、16、18 项元素为 0)。

(2) 干涉连接矩阵与稳定连接矩阵的获取。

按照 2.2 节所讲方法,分别得到产品的稳定连接矩阵 C 与干涉连接矩阵。其中稳定连接矩阵 C 如表 2 所示,而得到干涉连接矩阵共有 6 个(分别对应 $\pm x, \pm y, \pm z$, 展示从略)。

(3) 设定遗传算法的参数,调用算法进行计算。

a. 装配资源矩阵为 $RS_{i1}(P)$ 的情况,计算过程中选择的权重系数为 $\omega_2=0.5, \omega_3=0.5, \omega_1=0$ (因此时装配资源影响因子并不发挥作用)。种群大小 $N=60$,终止代数为 100,交叉概率 0.8,变异概率为 0.06。适应度函数最高的一条装配序列为:

1-15-16-18-2-17-12-11-13-14-9-3-10-8-7-6-5-4;

b. 装配资源矩阵为 $RS_{i2}(P)$ 的情况,计算过程中选择的权重系数为 $\omega_1=0.6, \omega_2=\omega_3=0.2$ 。其余参数不变。计算得到最优的一条装配序列为:

1-15-2-17-12-11-13-14-9-10-8-7-6-5-3-4-16-18;

结果(2)与结果(1)相对比,注意到零件 3、16、18 在装配序列中的位置普遍靠后了一些。可见,由于装配资源约束因子的影响,装配资源不充分的零件在装配序列中的位置会比较靠后,这样就能够装配现场中尽量避免由于装配等待而造成的效率降低。

5 结束语

任何零组件在装配时都需要装配资源的支持,尤其对航空、航天产品,对其进行装配序列规划必须考虑装配资源信息。本文提出了装配资源状态信息矩阵的概念,将装配资源信息作为影响因子添加到遗传算法的适应度函数中,进行了装配序列的动态规划。并以某型飞机壁板组件装配序列的规划为实例,验证了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001.
- [2] Dini G, Santochi M. Automated sequencing and subassembly detection in assembly planning. Annals of the CIRP, 1992, 42: 1-4.
- [3] Zhou P Y, Han D, Li H X, et al. A connector-based hierarchical

approach to assembly sequence planning for mechanical assemblies. Computer-Aided Design, 2003,35(1): 37-56.

[4] 曾聪文,古天龙. 求解装配序列规划的一种多智能体进化算法. 计算机集成制造系统, 2009,15(9):1803-1807.

[5] 张刚,李火生,邓克文. 基于特征的装配模型及装配序列规划研究. 机械设计, 2010,27(1):18-21.

[6] 刘诚,付宜利. 引入基因修复技术的产品装配序列规划方法. 哈尔滨工业大学学报, 2010,42(1):79-82.

[7] 李原,曹哲,张涛,等. 基于产品配合图的装配顺序自动规划. 工程设计, 2000,2:28-31.

[8] 周开俊,李东波,黄希. 基于遗传算法的装配序列规划研究. 机械设计, 2006,23(2):30-32.

(责编 小城)

(上接第 35 页)

相应的装配件包围盒也会发生变化,在给定截面间隔的情况下,只需进行刷新即可生成相应的骨架结构,如图 10 (d~f) 所示。

对于不同的装配件,根据其特点可以设置不同的截面形状,如图 11 所示为水平尾翼装配型架骨架,截面形状为翼形(边比例: $\alpha=0.5, \beta=0.3, \gamma=0.5$)。

4 结论

在对型架骨架结构及其设计过程进行深入分析的基础上,探讨了骨架结构与装配件模型间的关联性,并根据这种关联性对骨架结构进行了分类,在此基础上,提出了一种基于装配件包围盒的骨架关联设计原理及算法,并以 CATIA V5 系统为平台,在 VC++ 开发环境下基于 CAA 开发和实现了此算法。通过实例测试验证了本文所提出的骨架关联设计技术是可行的,实现了装配型架的结构及其尺寸随产品结构的修改而自适应更改,从而提高了工装骨架设计的自动化程度,对实现工装的三维数字化并行设计具有重要意义。下一步将研究间接关联结构的关联设计技术,以进一步提高骨架设计的智能化和自动化程度。

参考文献

- [1] 孟学军,王云渤. 框架结构 CAD 系统. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999,11(2):154-158.
- [2] 郑国磊,冯宗律,王云渤,等. 飞机装配型架 CAD 系统. 航空制造工程, 1996(9): 14-15.
- [3] 郑国磊,朱心雄,许德,等. 飞机装配型架中骨架的数字化设计原理及实现. 航空学报, 2005, 26(2): 229-233.
- [4] 王云渤,张关康,冯宗律,等. 飞机装配工艺学(修订本). 北京:国防工业出版社, 1990.
- [5] Millar A, Kihlman H. Reconfigurable flexible tooling for aerospace wing assembly. SAE International, 2009.

(责编 深蓝)