

基于特征的飞机结构件装夹方案设计方法^{*}

Feature-Based Fixture Design Method in Aircraft Structural Parts

成都飞机工业(集团)有限责任公司数控加工厂 林 勇 汤立民
南京航空航天大学机电学院 李迎光 刘长青

[摘要] 针对飞机结构件的结构特点及其装夹难点,本文提出了基于特征的飞机结构件装夹方案设计方法。该方法首先提出了装夹面槽腹板特征相对刚度的概念,并对腹板的相对刚度进行评价;根据腹板的相对刚度,初步确定装夹方案,然后结合腹板以及筋特征的结构及其刚性综合设计飞机结构件的装夹定位面。实例表明,基于该方法可以提高飞机结构件装夹方案设计的效率,保证飞机结构件加工过程中的刚度需要,减少变形,同时降低了生产成本。

关键词: 飞机结构件 装夹 特征 刚度 设计

[ABSTRACT] A feature-based fixture scenario design method is proposed to address the problem considering the structural characteristics of the aircraft structural parts and the difficulty of the fixture. In this paper, the relative stiffness of the pocket bottom feature which is used as clamping face is proposed, and the relative stiffness of bottom is analyzed. The preliminary fixture scenario is completed according to the stiffness of bottom. Then the general fixture design scenario of aircraft structural parts is decided by combing the structural of pockets and rib features and their stiffness. The case study shows that this method can improve the efficiency of the design of fixture scenario of aircraft structural parts, and it meets the needs of stiffness of aircraft structural parts in their machining process, and it can also reduce the cost of production.

Keywords: Aircraft structural parts Fixture Feature Stiffness Design

随着新一代飞机性能的不不断提高以及数控加工技术的快速发展,整体结构件和薄壁零件被广泛使用,并且其结构日趋复杂,精度要求也越来越高,这导致其制造难度越来越大,可加工性越来越差,因此零件的装夹方案在保证其加工可靠性和精度方面的作用日益突出。然而,与数控机床及数控工艺技术的发展相比,零件装夹方案的研究却相对滞后。

目前,对零件装夹方案的研究主要有2种方法。第一种是运用有限元分析的方法。贾新杰等^[1]采用有限元分析方法,研究了夹紧力及位置对工件变形的影响;陈华等^[2]针对多种装夹方案分别建立了有限元模型,并通过比较零件变形,选出最优的装夹方案;董辉跃等^[3]通过对各种装夹方案的夹紧力位置、加载顺序以及加载方式进行模拟分析,确定了最佳方案;金秋等^[4]针对薄壁件的铣削加工过程,建立了考虑瞬态铣削力的工件变形有限元模型,并通过优化夹紧点的位置来减少工件变形;董辉跃等^[5]研究了装夹位置分布、装夹顺序对残余应力、应变的影响,进而对装夹方案进行优化选择,使残余应力的分布有利于减少对工件的加工变形的影响。第二种是运用算法设计装夹方案或者对已有装夹方案进行评价。郑联语等^[6]提出了一种基于模糊理论评价装夹方案的方法,该方法综合考虑了精度、变形、稳定性和干涉因素,建立了装夹方案综合评价体系;秦国华等^[7]提出了一种全新的夹具定位方案计算方法,建立了描述加工尺寸与应限制自由度之间关系的自由度约束原理,并提出了定位合理性的判定定理;易红等^[8]针对箱体零件的问题,采用人工神经网络技术,实现了自动装夹方案设计;高翔等^[9]综合考虑了夹紧力、接触力、切削力、摩擦力等对工件变形的影响,采用遗传算法和有限元方法相结合的方法实现了夹具布局和夹紧力的同步优化。

以上方法虽然都在一定程度上对装夹设计提供了技术支持,但是对工艺人员的素质要求较高,分析效率低,工程实用性较弱,加之目前工艺员的分析方法对经验依赖性强,因此,针对以上问题,本文提出了基于特征的飞机结构件装夹方案设计方法。

1 飞机结构件装夹方案分析

飞机结构件主要包括框、梁、肋、壁板等类型,其中框类和梁零件是尺寸最大、所占比例最多的飞机结构件,其装夹也相对复杂。按照加工面的不同,飞机结构件包含双面零件和单面零件。由于双面零件需要两面加工,其装夹也比较复杂。以典型的双面零件为例分析飞机结构件的装夹特点:在加工第一面时,由于第二面

^{*} 基金项目: 国家科技重大专项(NO.2012ZX04010041)。

未被加工,刚性较好,其与单面零件的装夹方案基本一致,都是采用未加工的毛坯面和工装表面或者机床工作台面贴合,利用螺钉压紧凸台的方式进行装夹;但是在加工第二面时,则要根据零件腹板刚性的不同,采取不同的装夹方案。下面列出了不同腹板特征的装夹方案:

(1)若零件的腹板面为平面,并且刚性很好,一般将零件上第一面加工出的部分腹板面和工装表面贴合,并使部分腹板面悬空,然后采用螺钉压紧凸台的方式装夹。特别地,如果零件的整体刚性及腹板的刚性足够好,则可以悬空所有腹板面,只需用螺钉压紧凸台。

(2)若零件的腹板面为平面,但刚性一般,则需要使第一面加工出的所有腹板面与工装表面完全贴合,然后采用螺钉压紧凸台的方式装夹。

(3)若零件的腹板面为平面,但刚性较差,除了必须使第一面加工出的所有腹板面与工装完全贴合之外,还需要在零件腹板面区域内加真空吸附,同时采用螺钉压紧的装夹方式。

(4)若零件的腹板面为曲面,且刚性较好,则需要制出与零件曲面相配合的工装型面,使零件腹板面与工装型面贴合,然后采用螺钉压紧凸台的方式装夹。

(5)若零件的腹板面为曲面,且刚性一般,除了要制造相应的工装型面之外,还需要在腹板区域内使用真空吸附,同时采用螺钉压紧凸台的方式装夹。

从零件装夹的可靠性和加工的稳定性的角度来看,采用零件的腹板面与工装表面完全贴合,同时采用真空吸附、螺钉压紧凸台的方式无疑是最可靠的;但是从零件的制造成本来看,自然是工装越简单成本越低,工装越复杂成本越高,尤其是真空工装,成本更高。因此在进行装夹方案设计时,必须有一个参照标准以平衡零件的制造成本与加工可靠性这一对矛盾。

通过以上分析可知,飞机结构件的装夹方案主要取决于零件的刚性,尤其是腹板特征的刚性。

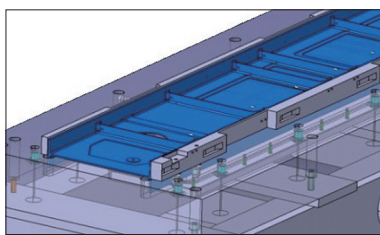


图1 飞机结构件典型装夹方案

Fig.1 Typical fixture scenario for aircraft structural parts

2 腹板相对刚度的评价方法

对于结构复杂的飞机结构件来说,刚性难以量化。因此,要实现零件装夹方案的合理化,首先必须根据飞

机结构件的结构特点建立一套腹板刚性的评价体系。本文通过分析飞机结构件的结构特点和加工工艺特点,提出了基于腹板特征的相对刚度评价方法:腹板的刚性跟腹板的厚度 δ 、腹板的跨度 L_F 以及结构有关。总体来说,刚性与厚度成正比,而与跨度成反比,而不同的腹板结构对刚性影响也很大(腹板结构主要指腹板是否有开口、腹板内部是否有加强凸台或加强筋结构等)。基于以上分析,腹板的相对刚度 K_H 可以用腹板的厚度 δ 、腹板的跨度 L_F 以及结构因子 α 表示,即

$$K_H = \frac{\delta}{L_F}(1 + \alpha), \quad (1)$$

式中,腹板的厚度 δ 可以通过三维模型测量得到。在本文中,腹板的跨度 L_F 的计算方法为:首先在腹板上按照一定的精度离散出一系列的离散点,然后求出每个离散点到腹板硬边界的最长距离 dm ,最后求出所有 dm 中最小的一个。用数学公式描述为:

$$dm_i = \text{Max}(\text{Dis}(P_i, L_j)) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m), \quad (2)$$

$$L_F = \text{Min}(dm_i) \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

其中, $\text{Dis}()$ 表示点到线的函数, P_i 表示腹板上的点, n 表示腹板上离散点的个数, L_j 表示硬边界, m 表示硬边界的个数。腹板上点的离散个数跟腹板面积成正比

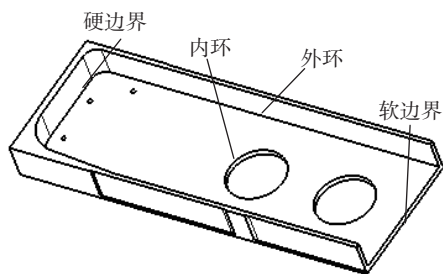


图2 开口槽特征腹板边界及环

Fig.2 Boundary and loop of bottom of open pocket feature

例,可根据需要设定。

结构因子 α 通过腹板的结构设定。如果是加强刚性的,则 α 值为正值;如果是弱刚性的,则 α 值为负值;如果不存在特殊结构,则 α 值为零;若存在多种特殊结构,则需要对各个分量进行叠加。针对不同的结构情况, α 值的计算方法为:

开口槽:

$$\alpha = -L_s / L, \quad (4)$$

其中, L_s 表示腹板软边界的长度, L 表示腹板外环和内环的总长度。

凸台槽:

$$\alpha = S_i / S, \quad (5)$$

其中, S_i 表示凸台的面积, S 表示腹板的总面积。

加强筋:

$$\alpha = 0.2 \times n, \quad (6)$$

其中, n 表示加强筋的个数。

通过式(1)可建立腹板刚性的相对刚度等级, 等级越高, 则腹板的刚性越好。按照前文的装夹方案分析, 本文确定了3种刚度等级: 第一级刚性最差, 腹板需要与工装贴合且需真空吸附; 第二级刚性较差, 腹板需要与工装贴合; 第三级刚性好, 腹板可以悬空, 能直接用工艺凸台定位装夹。根据经验确定每种刚度等级的 K_H 值, 可以指导装夹的设计。

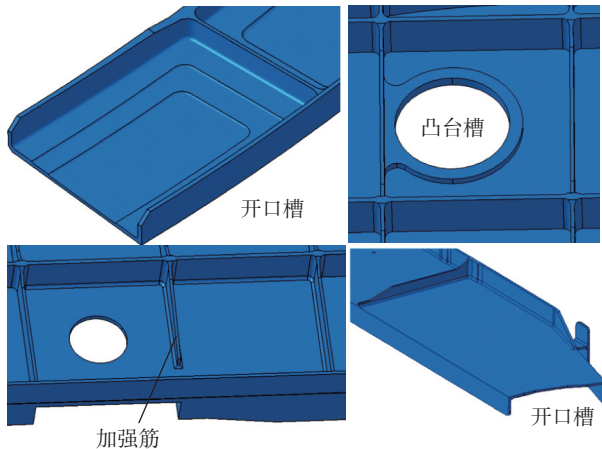


图3 几种典型槽特征的腹板结构
Fig.3 Bottom structural of some typical pockets

3 基于特征的装夹定位设计方法

基于式(1)对腹板的相对刚度进行评价, 若腹板的刚度等级比较低, 在设计零件的装夹方案时, 至少要保证零件的所有腹板面与工装定位面相贴合。这种装夹方案需要以腹板为定位面, 而腹板定位面的选取与零件的腹板特征和筋条特征关系密切, 主要从以下几个方面考虑:

(1) 考虑腹板特征时, 原则上应将所有槽的腹板面放在同一个平面内, 若两面的腹板面均不在同一平面内, 则选取腹板面变化范围小的一面作为定位面。首先定义在腹板法向方向上坐标值最小的面为零腹板面, 其余相对于该面的面在腹板法向方向上的坐标阶差定义为 x_i , 腹板在法向方向上坐标的变化率可以用腹板面阶差的标准偏差 σ 衡量, 如下所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{n}}, \quad (7)$$

其中, x 表示阶差的平均值, n 表示腹板的个数。 σ 值越小, 表示腹板面的阶差变化越小。

(2) 在考虑筋条特征时, 优先选择筋条较多且筋高尺寸较小的一面定位, 这样使得零件在加工第二面时, 质心较低, 有利于装夹的稳定。如果零件筋条数目和筋高尺寸相当, 则需要考虑筋条高度是否均匀。从工装制造的角度来看, 若筋条高度尺寸变化范围较大, 则不利于在工装上开筋条避让槽, 因此也可以用式(7)来评价筋条的变化范围。

腹板结构特征和筋条结构特征是零件装夹方案的两个最重要的因素。在有些情况下, 这两个因素是相互矛盾的, 需要从加工稳定性、定位可靠性、工装制造成本等方面综合考虑。

通过以上分析, 基于特征的工装设计方法流程如图4所示。

完成上述工装总体方案后, 还需根据零件腹板具体特征对工装做进一步处理。例如, 腹板特征与孔特征相

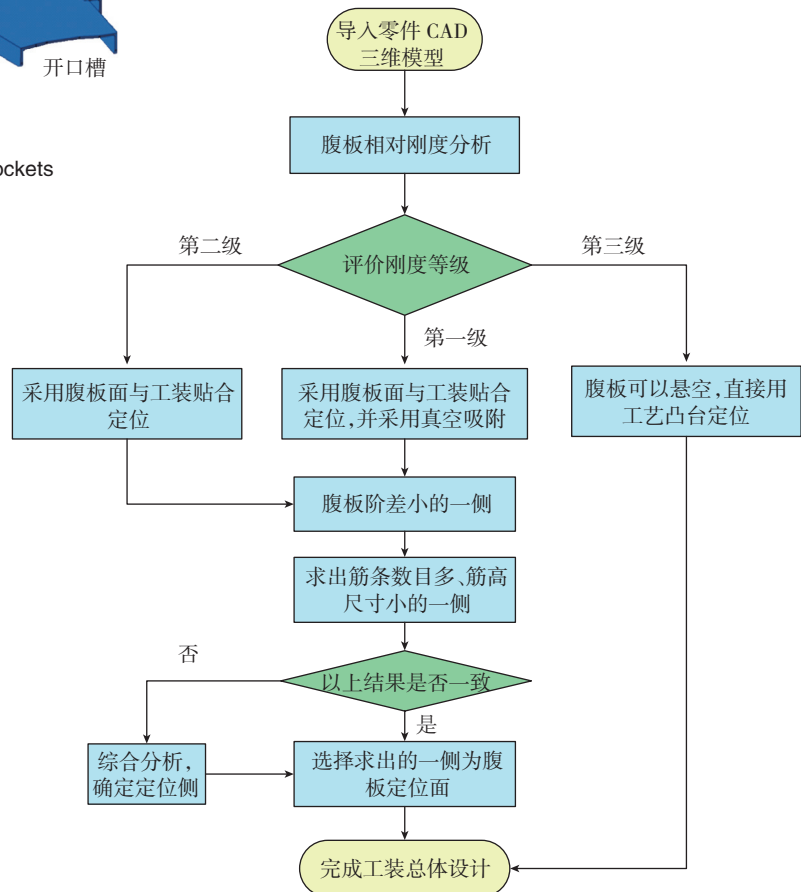


图4 飞机结构件工装总体方案设计流程
Fig.4 Fixture general design process of aircraft structural parts

交,即腹板上存在孔时,如果采用腹板定位,那么工装上需要开出避让孔;如果采用腹板定位真空吸附,那么除了工装上需要开避让孔之外,还需要在避让孔周边增加密封槽对该孔进行气密隔离。但是,如果采用腹板悬空方式装夹,由于制孔时腹板悬空,钻头不会与工装定位面干涉,故无需在工装上增加避让孔。

4 实例分析

基于以上研究,本文以典型的飞机结构件双面框为例,验证基于特征的飞机结构件装夹方案设计方法。

对于图5所示的典型飞机结构件的正面,运用本文的相对刚度评价方法,计算得到的各槽腹板的相对刚度见表1,根据经验制定的各刚度等级对应的相对刚度见表2。

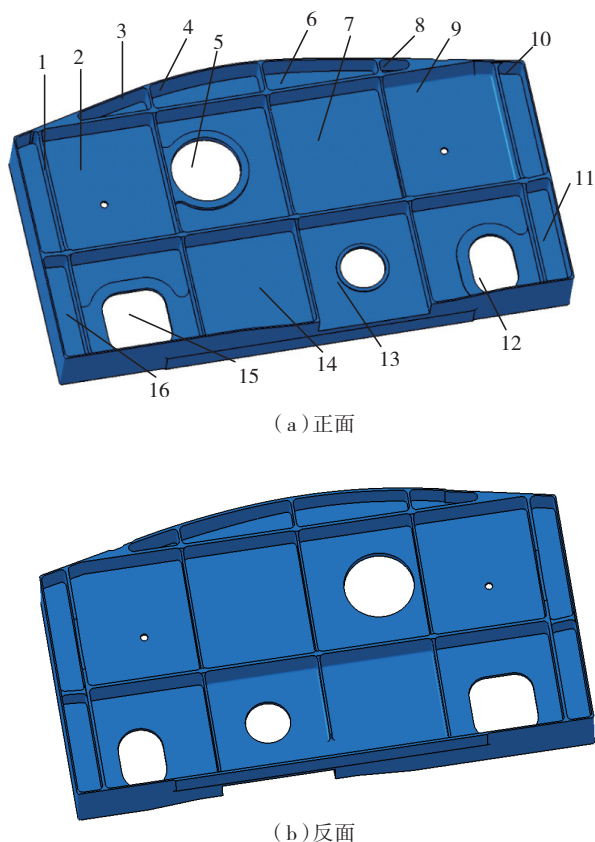


图5 典型飞机结构件

Fig.5 Typical aircraft structural parts

表1 腹板相对刚度计算结果

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
刚度	0.188	0.043	0.203	0.176	0.027	0.180	0.021	0.5
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
刚度	0.021	0.189	0.189	0.048	0.025	0.044	0.038	0.188

表2 相对刚度等级表

刚度等级	第一等级	第二等级	第三等级
相对刚度	<0.05	0.05~0.1	>0.1

分析表1和表2发现,有多个槽的刚度等级位于第一等级以内,所以该零件的装夹应该采用工装贴合腹板且真空装夹的方法。由图5可以看到,反面的腹板全部位于一个水平面,同时筋顶面也位于同一个水平面,所以选择由反面作为腹板的定位面。

5 结论

飞机结构件结构复杂,且大部分为弱刚性结构,对工人的经验依赖性强,而目前装夹的研究在工程应用中可行性不高。针对以上问题,本文提出了基于特征的飞机结构件装夹方案设计方法。本文主要做了以下工作:

- (1)通过分析飞机结构件的典型装夹方案,总结了装夹的影响因素以及特征在装夹方案决策中的作用;
- (2)提出了装夹面槽腹板特征相对刚度的概念,分析了腹板的刚度评价方法,定义了刚度等级,为飞机结构件的刚性评价提供了快捷的方法;
- (3)提出了结合腹板以及筋特征的结构及其刚性综合设计飞机结构件的装夹方案;
- (4)最后通过一个典型双面飞机结构件验证了本文所提出的方法,并证明了采用该方法的飞机结构件装夹方案设计的效率和可行性。

参考文献

- [1] 贾新杰,贾春德,张志军.一种弱刚度薄壁结构件装夹方案优化的有限元模拟.沈阳工业学院学报,2004,23(3): 58-60.
- [2] 陈华,陈蔚芳,郑会龙.薄壁件装夹方案优选的有限元模拟.工艺与装备,2008,3: 63-67.
- [3] 董辉跃,柯映林.铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟.浙江大学学报(工学版),2004,38(1): 18-21.
- [4] 金秋,刘少岗.薄壁弧形件铣削加工装夹方案的优化.工具技术,2007,12: 54-57.
- [5] 董辉跃,柯映林,吴群,许德.基于残余应力分布的框类零件装夹方案优选的有限元模拟.航空学报,2003,24(4): 382-384.
- [6] 郑联语,谢敏,汪叔淳.装夹方案的模糊综合评价方法.航空制造技术,2001,2: 31-33.
- [7] 秦国华,张卫红,李玉龙.一种全新的夹具定位方案计算方法.测试技术学报,2008,22(3): 236-240.
- [8] 易红,汤文成.应用人工神经网络技术实现装夹方案自动设计.工厂建设与设计,1994,6: 40-42.
- [9] 高翔,张连文,王勇.薄壁零件装夹方案设计与优化.设计与研究,2009,6: 9-12.

(责编 谷雨)