

民用飞机结构的面向可制造性设计

张鹏飞* 邵星翔 何周理

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要: 优秀的飞机结构设计是民用飞机取得商业成功的必备条件,需要通过结构的可制造性设计来实现。面向可制造性设计可以大幅度降低民用飞机结构的成本、提高质量和可靠性,并缩短研发周期。越早启动面向可制造性设计收益就越大,在设计初始阶段就考虑可制造性,可以降低在制造阶段进行大量修改的时间和费用。飞机结构设计在满足功能和强度性能设计要求的情况下,还要考虑其他几个可制造性关键因素:简单的设计、材料的选择、合适的公差、灵活的备选制造方案以及技术数据的清晰和简洁。零件可制造性设计中材料和工艺的最佳组合可以通过一个程序性的方法对设计目标的三个方面进行权衡分析来获得。还提供了可制造性检查单,可以用来对零件和装配设计的可制造性进行评估。

关键词: 可制造性;关键因素;权衡分析;检查单

中图分类号: V22

文献标识码: A

OSID:



0 引言

民用飞机要取得商业成功,离不开优秀的飞机结构设计。为提供有竞争力的成本、效率和质量,需要通过可制造性设计来实现。可制造性是指在保证产品使用质量的前提下,按规定的产量和生产率,以最低的费用、最短的时间将产品制造出来的结构应具备的综合性^[1]。面向可制造性设计是一种设计方法,指导思想是产品设计时不仅要考虑功能和性能要求,还要同时考虑制造的便利性、高效性和经济性^[2-3],即产品的可制造性。面向可制造性设计可以大幅度降低产品成本、提高产品质量和可靠性,并缩短产品设计研发周期^[4]。本文研究了飞机结构设计可制造性关键因素、材料工艺组合权衡分析以及零件和装配的可制造性检查,使飞机结构设计以尽可能少的成本和工时进行零件生产和装配。

1 可制造性的关键因素

结构设计最基本的目标是满足特定功能和强度性能的要求。在这些限制下,结构设计必须通过考

虑以下关键因素来最大化可制造性。

1.1 尽早考虑可制造性设计

在产品设计中越早启动可制造性设计收益就越大^[5],在设计初始阶段就考虑可制造性,可以降低在制造阶段进行大量修改的费用,节省时间和金钱,如图 1 所示。

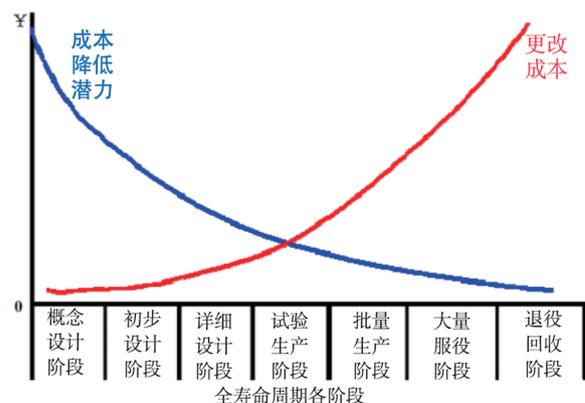


图 1 设计对成本影响示意图

1.2 简单的设计

复杂的设计会导致制造、维护和维修成本的增

* 通信作者. E-mail: zhangpengfei1@comac.cc

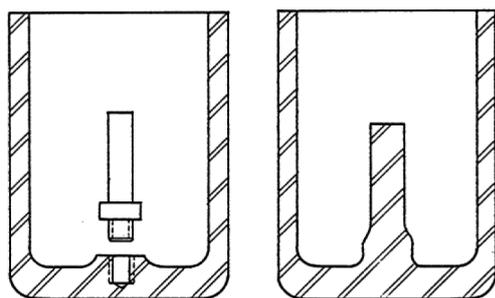
引用格式: 张鹏飞,邵星翔,何周理. 民用飞机结构的面向可制造性设计[J]. 民用飞机设计与研究,2022(2):57-61. ZHANG P F, SHAO X X, HE Z L. Design for producibility of civil aircraft structures[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022 (2):57-61(in Chinese).

加,组合零件功能可以减少装配的需求。表 1 是分散零件的测试检查单,根据 Boothroyd 提出的最少零件数原则^[6],如果对所有四个问题的回答均为“否”,表明这些零件和配合部分可以合并在一起的可能。

表 1 分散零件的测试检查单

序号	问 题	是	否
1	这些零件是否需要相互移动	是	否
2	这些零件是否必须由其他材料制造	是	否
3	是否有其他装配步骤防止零件合并	是	否
4	维修时是否需要拆卸这些零件	是	否

图 2 中的组件最初是两件式结构,重新设计后将两个零件合二为一,消除了组装成本。



(a) 两件式

(b) 组合式

图 2 零件组合设计示意图

1.3 材料的选择

选择材料的一个重要的决策准则就是材料可以促进或限制后续制造工艺。设计时应考虑尽可能多的备选材料,设计出最高效的制造/装配工艺。使用标准化的材料和零件可以降低单位生产成本以及开发成本,还可以利用相似材料将零件组合起来。

1.4 合适的公差

公差和表面粗糙度要求越严格或越精细,越需要特殊且昂贵的制造工序^[7]。

应使用满足设计要求的最大公差。公差范围应针对所需的区域制定,并且可以被检查。比如在图 2 中,中间插销的高公差要求将使设计退回到两个零件。

概念设计之后,装配公差应尽快确定。结合制造设备和工艺的能力进行尺寸控制,可以制定出符合实际的公差。如果需要更严格的公差,需要联系制造商。运用仿真软件结合制造商的工艺控制统计

数据进行模拟分析,可以预测变形、装配方法或装配顺序导致的装配公差问题,将有助于减少设计返工的成本。

两个或两个以上的零件装配在一起会导致公差的累积。结构设计必须确定所有组件按照制造计划装配完成后符合整体公差的要求。解决公差累积问题的一种方法是使用装配级别的尺寸公差要求,而不是零件的详细公差。用一维尺寸来定位特征,而不是两个或多个的组合尺寸。比如两个孔位都在各自图纸上标注详细公差要求,然后进行装配。这就需要在装配图纸中给出垫片补偿。要消除对垫片的需求及其相关的安装人工成本,可以更改设计和装配工艺。零件状态下不制孔,然后在装配时根据规定的公差钻孔安装。由于有限的安装空间或通道,这种过分简化的方法可能是无法实现的,也可能影响互换性,需要对制造工艺进行整体考虑。

由于制造工装的公差通常是指定的制造图纸公差的三分之一,放宽零件公差可以降低工装公差要求制造的成本。确认关键的尺寸和公差,然后将可以比通用公差更宽松的要求在图纸中标注出来。

1.5 灵活的备选制造方案

灵活的备选材料和工艺方案可提高可制造性。材料、公差、倒角和弯曲半径等对制造工艺的选择有直接影响。在图 2 中,如果插销和外壳之间要求严格的同轴度,而插销是普通公差要求,就可以用一体机加成形的单个零件设计。

1.6 技术数据的清晰和简洁

不清楚或含糊的设计信息对可制造性的影响与错误的信息一样有害。因此,对关键的数据要进行明确和简化。

2 材料和工艺组合的权衡分析

结构设计要实现单个零件的最佳可制造性,关键是要正确选择材料和制造工艺。

零件的设计目标可以分为时间、成本和性能三个方面,如图 3 所示,时间或成本超出计划,或是性能超标,都将延伸三角形相应的边,这个三角形将无法闭合。因此需要通过通过对这三个目标进行适当的平衡来优化设计。

用一种平衡设计目标的程序化的方法,将这三个目标分为更详细的设计要求,可以用参数和公差

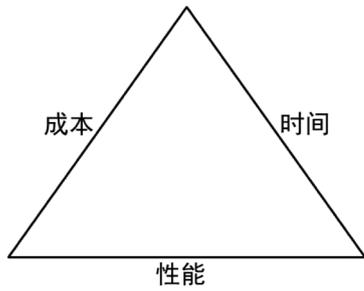


图3 设计目标的三个方面

的目标值来表示工程和制造的变量。目标值可用于筛选不同的材料和工艺,找到最佳设计组合。这个评估过程如图4所示。为了缩短设计研发过程以及加强工程和制造之间的协调沟通,步骤1-4、步骤5-7和步骤9应该同时执行。

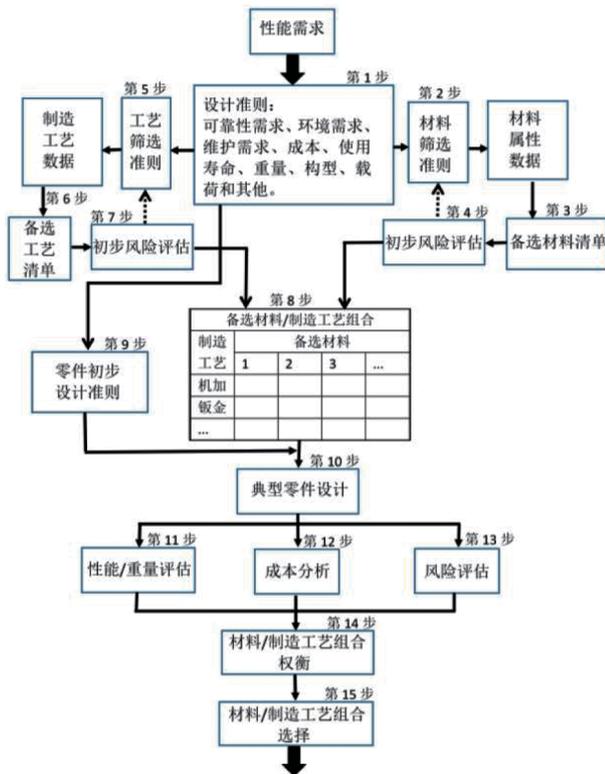


图4 材料/制造工艺组合选择流程图

其设计原则根据产品目的和性能需求发展而来,应做到尽可能完整和准确。将设计原则转换成可衡量材料属性的特定值,就形成了材料筛选的准则。将每一条筛选准则都分为三个级别,可以提高筛选的效率。工艺筛选准则是通过设计原则以及可能的外部影响(例如政府规章制度)而建立的工艺限制。根据对成本和进度的潜在影响进行风险分析,成本分析中的每一项都要以每年的成本来表示,

避免因产品寿命不同而引起差异。草图也要足够详细,以确定重量和制造成本。零件重量和固定到其他结构需要的重量(紧固件等)都要计算,从而预估整个结构的总重量。为每个备选组合准备重量、成本和风险评估表,对备选组合进行排序。根据所有项目需求,选出最佳组合。

3 零件与装配可制造性设计检查单

产品可制造性评价是一个典型的多指标、多层次的综合评价问题^[8-10]。结构设计要与制造工艺共同考虑,及时发现可能忽略的工艺问题,避免后续设计阶段的返工。通过进行可制造性评估,对多种设计方案权衡分析,能大幅降低产品成本,从而提高竞争力。本文根据飞机结构设计特点,制定了零件和装配设计可制造性检查单,可以用来对零件和装配的可制造性进行快速评估,以此来不断地迭代优化结构设计,从而实现最高效的可制造性。

3.1 零件设计可制造性检查单

表2和表3中的问题用于零件详细设计的可制造性分析,检查被忽略的改进可能。若选择加粗的“是或否”则表明零件设计的可制造性欠佳。为了实现最高效的可制造性,需要了解更多的信息或做更多的工作。

表2 材料可制造性检查单

序号	问题	判断
1	是否选择了超出性能需求的材料	是 否
2	是否所有可用的材料能满足所需的供货时间	是 否
3	设计准则是否不适当地限制或禁止使用新材料或替代材料	是 否
4	设计是否指定了需要大量加工或特殊加工的特殊形状	是 否
5	指定的材料很难或不可能进行经济的制造吗	是 否
6	可以使用其他更容易加工的材料吗	是 否
7	设计是否足够灵活,可以使用多种材料/工艺组合而最终产品没有任何功能下降	是 否
8	可以减少不同材料的数量吗	是 否
9	可以使用更轻规格的材料吗	是 否
10	特定材料是否达到必要的数量	是 否
11	是否可以避免使用稀缺材料	是 否
12	是否在可能的地方指定了替代材料	是 否
13	是否已确定所有特殊材料要求	是 否
14	材料上的取舍是否导致最低设计要求的降低	是 否
15	是否使用了正确的设计规范来明确制造后的材料性能	是 否

表 3 制造工艺可制造性检查单

序号	问题	判断
1	是否已完成所有的生产可行性风险分析	是 否
2	可以使用更简单的制造工艺吗	是 否
3	金属应力、平面度、转角半径、铸件类型、凸缘和其他特征是否使用了合适的设计准则	是 否
4	设计是否在锻造、铸造、机加和其他制造工艺上造成了不必要的难度	是 否
5	所有材料和数量是否与计划的工艺一致	是 否
6	制造工艺和人员是否可行	是 否
7	制造要求是否进行了协调	是 否
8	零件可以经济地装配吗	是 否
9	设计与正常的制造流程一致吗	是 否
10	是否已考虑生产过程中的测量困难	是 否
11	设计规范是否过度地将生产人员限制在一个制造流程中	是 否
12	终饰要求是否阻止了使用经济的生产速率和供应	是 否
13	公差和尺寸是否与制造工艺一致	是 否
14	在制造和处置中是否启用了特殊的处理设备或工艺来保护关键或敏感物品	是 否
15	设计是否引入了不必要的加工要求	是 否
16	是否使用了奇数尺寸的孔和半径	是 否
17	在使用带螺纹孔的紧固件之前,是否已经研究了所有其他选择	是 否
18	是否充分考虑了必要的工装(夹具和固定装置)	是 否
19	是否已对制造过程中固定或握持零件做出规定	是 否
20	特殊的工具或设备是决定性的吗	是 否
21	是否考虑过测试和评估	是 否
22	是否有测试和评估的设备	是 否
23	是否已确认特殊技能、设施和设备,并与所有受影响的组织单位进行了协调	是 否
24	是否有通道进行加工	是 否
25	是否避免了一个零件上有多种终饰要求	是 否
26	是否提供了要电镀或喷漆表面的面积标注,以缩短制造处理时间	是 否
27	零件上是否有影响工艺方案的开口	是 否
28	是否已检查类似零件历史上的拒收情况	是 否
29	是否已与质检一起审查了零件的检验	是 否

表 4 装配可制造性检查单

序号	问题	判断
1	可以将两个或多个部分合并为一个吗	是 否
2	由于空间不足或其他原因,安装和其他连接是否困难或不可能	是 否
3	装配尺寸的数量是否已经最小化	是 否
4	是否有新开发或不同的紧固件能加快装配速度	是 否
5	可以改进设计以最大程度地减少安装或维护问题吗	是 否
6	指定热连接工艺时,是否已考虑过热影响区域	是 否
7	需要冷加工的孔是否可以减少或消除	是 否
8	无需特殊设备或工装即可轻松地拆卸零件以及重新安装零件吗	是 否
9	装配检验操作可以轻松完成吗	是 否

4 结论

本文对民用飞机结构的面向可制造性设计进行了分析,得到以下结论:

1) 总结和分析了飞机结构可制造性设计需要考虑的多个关键因素,可以为飞机结构的面向可制造性设计提供指导;

2) 材料和工艺的最佳组合可以通过本文提出的程序化的方法进行筛选获得;

3) 可以通过本文制定的可制造性检查单对飞机结构零件和装配的可制造性进行评价,快速识别可制造性欠佳的设计,从而进行针对性优化。

参考文献:

[1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 第 10 册: 结构设计[M]. 北京:航空工业出版社,2000.

[2] CORBETT J, DOONER M, MELEKA J, et al. Design for manufacture: strategies, principles and techniques [M]. [S.l.]:Addison Wesley,1991.

[3] 吴玉光. 面向并行工程的零件可制造性评价方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.

[4] HEIDENREICH P. Designing for manufacturability[J]. Quality Progress,1988, 21(5): 41-44.

[5] TRUCKS H E. Designing for economical production [M]. 2nd ed. [S.l. :s. n.], 1987.

[6] BOOTHROYD G. Product design for manufacturability assembly[J]. CAD,1994,26(7):505-515.

[7] BRALLA J G. Handbook of product design for manufacturing[M]. New York:McGraw-Hill,1986.

3.2 装配设计可制造性检查单

表 4 检查单中的问题用于装配可制造性分析,以发现可能被忽略的改进。选择加粗的“是或否”则表明装配设计的可制造性欠佳。为了实现最高效的可制造性,需要了解更多的信息或做更多的工作。

- [8] SUH N P, RINDERLE J R. Qualitative and quantitative use of design and manufacturing axioms[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1982,31(1):333-338.
- [9] CHU X N, HOLM H. Product manufacturability control for concurrent engineering[J]. Computers in Industry, 1994,24(1):29-38.
- [10] 宋玉银,肖亦晖,成晔,等. 产品可制造性及评价方法的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),1998,38(7):110-114.

作者简介

张鹏飞 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构设计。E-mail: zhangpengfei@comac.cc

邵星翔 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:飞机结构设计。E-mail: shaoxingxiang@comac.cc

何周理 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机结构设计。E-mail: hezhouli@comac.cc

Design for producibility of civil aircraft structures

ZHANG Pengfei * SHAO Xingxiang HE Zhouli

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Excellent aircraft structural design is a requirement for the commercial success of civil aircraft, and it needs to be achieved through structural design for producibility. Design for producibility can significantly reduce the cost, improve quality and reliability of civil aircraft structure, and shorten the development cycle. The earlier design for producibility is initiated, the greater the benefits. Considering producibility at the initial design stage can reduce the time and cost of extensive modifications during the manufacturing phase. The design of aircraft structures meets functional and strength performance design requirements while considering several other key factors of producibility: simplicity of design, choice of materials, appropriate tolerances, flexible manufacturing alternatives, and clarity and conciseness of technical data. The optimal combination of materials and processes in a part's design for producibility can be obtained through a procedural approach to a trade-off analysis of the three aspects of the design goals. This paper also provides a producibility checklist, which can be used to evaluate the producibility of part and assembly designs.

Keywords: producibility; key elements; trade-off analysis; checklist

* Corresponding author. E-mail: zhangpengfei1@comac.cc