

民用飞机登机门铰链臂结构优化 设计方法研究

张文斌* 马大卫

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要:

民用飞机登机门为了满足应急逃生需求,舱门开关需平稳,不能出现明显晃动。登机门铰链臂作为舱门开关过程中的重要连接结构,刚度要求很高,同时作为多个机构的连接界面,载荷工况种类繁多。针对登机门铰链臂结构的设计,提出了较为全面的设计优化流程方法,包含设计空间的定义、载荷及约束、几何重构步骤和强度校核。结合工程经验、拓扑优化以及厚度尺寸优化,能在少量的设计迭代次数下确定铰链臂的外形及尺寸,减少了铰链臂设计周期,实现铰链臂的轻量化设计,同时结构满足强度、刚度、功能性的要求。对于设计中的关键参数的定义和设置,结合工程经验给出建议,形成的通用方法可以推广至多功能,高刚度要求结构,为类似结构的设计提供了参考模板。

关键词: 铰链臂;优化设计;拓扑优化;尺寸优化

中图分类号: V223.9

文献标识码: A

OSID:



0 引言

民用飞机登机门的开门方式有很多种,包括旋转开启式(波音 737^[1]),提升侧开式(A320^[2],波音 777^[3]),门梯一体式(湾流 G200^[4])等。不同舱门的开启方式各有利弊。当前新机型的主流设计采用提升-侧移的开关门方式。民用飞机登机门铰链臂结构连接机身与舱门,在舱门开关过程中用于承受舱门重力及人员操纵力,铰链臂不能发生大变形,影响开关。通常登机门铰链臂上还会连接作动器机构、阵风锁机构等各类机构。

铰链臂对扭转刚度要求很高,设计时不光要考虑功能需求,还需考虑铰链臂变形的影响。近年来随着商业拓扑优化软件的普及,已经出现针对铰链臂结构变形的优化设计。如张风格^[5]利用 Altair OptiStruct 对铰链臂进行拓扑优化并进行了位移、应力分析。Altair 公司也采用旗下软件 Inspire 对某型

飞机铰链臂进行拓扑优化^[6]。但都过于依赖拓扑优化软件,而忽略了最基本的传力路径分析和工程经验对优化参数设置的判断。本文对典型的登机门铰链臂结构设计进行了全面的说明,包含载荷来源、严重工况筛选、拓扑优化、厚度尺寸优化、针对制造的细节优化及强度校核。此优化流程方法适用于大多数薄壁结构零件。

1 载荷

1.1 舱门载荷

登机门铰链臂在飞机飞行过程中基本不承受荷载,载荷通常来自舱门开关过程中受到的外力,主要考虑以下几个方面:

舱门重力:舱门开启过程中的 1 倍重力,此为限制载荷,用于铰链臂刚度校核。

随机载荷:作用在舱门任意位置上的向下 1 335 N(300 lb)并叠加 1.5 倍舱门自重,其余方向

* 通信作者. E-mail: zhangwenbin@comac.cc

引用格式: 张文斌,马大卫. 民用飞机登机门铰链臂结构优化设计方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2020(1):6-11.

ZHANG W B, MA D W. Research on optimization design method of hinge arm for civil aircraft boarding door[J]. Civil Aircraft Design and Research,2020(1):6-11(in Chinese).

667 N(150 lb) 并叠加 1.5 倍舱门自重,此为极限载荷。

操纵载荷:作用在手柄上的开启或关闭方向 1 335 N(300 lb) 并叠加 1.5 倍舱门自重,此为极限载荷。

突风载荷:舱门完全开启状态下:65 节突风载荷叠加舱门自重;舱门开启或关闭过程中:40 节突风载荷叠加舱门自重,安全系数取 1.5。

作动筒载荷:应急开门过程中考虑作动筒最大载荷,安全系数取 1.5。

作动筒误开启载荷:舱门关闭,作动筒误触发的最大载荷,由于此载荷为故障工况、安全系数取 1.15。

其中安全系数 1.5 取自《中国民用航空规章》(以下简称 CCAR) 25.303 条^[7],操纵载荷 1 335 N(300 lb) 参照 CCAR 25.783 中的对人为最大操纵力的说明,突风载荷大小参照 CCAR 25.415 中对地面突风载荷的说明。

1.2 界面载荷及严重工况筛选

登机门门体、铰链臂本体及其连接通常需建立简化的有限元模型或刚度动力学模型,连接部位按实际情况约束自由度。对上述载荷情形建立相对应的载荷工况,进行仿真计算,得到铰链臂本体的界面载荷。

对于舱门重力、随机载荷和操纵载荷,铰链臂均受扭,通常载荷作用点位于舱门远端,1 335 N(300 lb) 向下的随机载荷最为严重。作动筒载荷在考虑安全系数后通常大于作动筒误开启载荷,铰链臂与门框连接耳片,铰链臂与作动筒连接耳片以及铰链臂与舱门连接耳片附近区域为危险部位。突风载荷通常在舱门完全开启状态下对铰链臂的影响最大,铰链臂机身防撞装置连接附近区域为危险部位。通过对界面载荷的筛选,铰链臂严重工况如下:

- 作用于舱门远端向下 1 335 N(300 lb) 并叠加 1.5 倍舱门自重;
- 舱门完全开启状态下 65 节突风载荷叠加舱门自重;
- 舱门初始开启状态下作动筒载荷。

2 结构设计

2.1 设计空间定义

由于登机门在开关过程中不能产生明显的晃动,导致舱门与门框磕碰,故铰链臂扭转刚度的设计

要求很高,体积较为庞大。

铰链臂一端通过两组耳片与门框相连,另一端通过另外两组耳片与登机门相连。由于铰链臂在登机门开关过程中不能与门框产生干涉,故通常设计为 L 型。

铰链臂结构上通常布置阵风锁机构,连接应急作动筒,铰链臂外形尺寸的确定需要综合考虑刚度要求、功能需求、机构布置、安装空间等多方面因素。登机门与铰链臂示意轮廓如图 1 所示。



图 1 登机门铰链臂轮廓示意

设计空间是进行拓扑优化时允许删除材料的区域,在满足设计要求的情况下通常尽可能放大空间,这样更有利于找到最佳传力路径。但对于载荷加载区域和约束端等不允许拓扑优化软件删减材料的区域,通常定义为非设计空间。铰链臂的设计空间定义如图 2 所示,为了优化结果更加光顺,减少复杂模型的优化时间,有限元建模采用六面体网格。由于铰链臂结构主要受扭,优化出来的结构趋于中空薄壁,故网格尺寸在表面厚度方向可以适当减小,中间单元可适量删除,确保安装阵风锁机构及操作空间

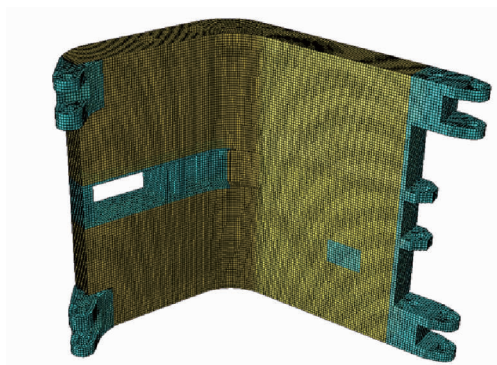


图 2 设计空间的定义

区域不存在单元,根据计算资源选择性的保留铰链臂表面 2 到 3 层单元,控制网格总数。

2.2 拓扑优化

拓扑优化通过设计区域内材料单元的布置,使其在满足位移、应力等约束的条件下寻求某种性能指标的最优^[8]。

目前主流商业有限元软件已经集成拓扑优化的功能,大多采用的是变密度法^[9],如 Altair 的 OptiStruct, Dassault 的 Tosca。此类方法无法完全删除单元,而是赋予单元不同的密度权重,优点是将原本离散的问题连续化,算法实现简单且效率高。也有学者采用双向渐进优化算法(BESO)^[10]。此方法每次迭代删除应力小的单元,在应力高的地方增加单元,迭代过程中的计算结果均真实有效,且可以加入屈曲计算。

为了快速得到铰链臂的传力路径,本文采用较为成熟的变密度法。拓扑优化可以采用多工况,每个工况需给出权重因子,铰链臂拓扑优化中静强度严重工况与刚度工况共同计算,静强度严重工况都是局部高应力工况,权重因子过高会导致局部材料堆积外,其余区域材料消失的情况出现。由于铰链臂设计主要采用刚度控制,故将考虑重力的随机载荷工况下的权重因子设置为 1,其余严重工况的权重因子根据经验建议取 0.2 至 0.5 之间。

为了优化收敛,拓扑优化的目标建议设置为最小柔度(最大刚度)。约束设置为体积百分比,若网格质量高可以设置应力约束。但应力约束过于严苛可能导致结果不收敛。由于变密度法无法对稳定性进行约束,需要采用最小尺寸的约束来保证优化出来的结果不存在细长比过大的筋条。图 3 和图 4 为

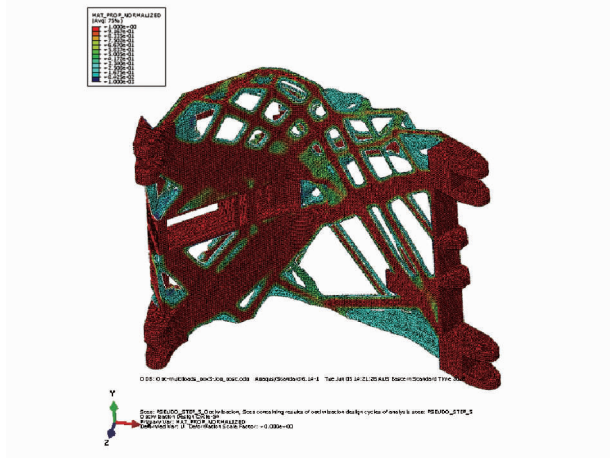


图 3 铰链臂拓扑优化结果单元密度示意(正面)

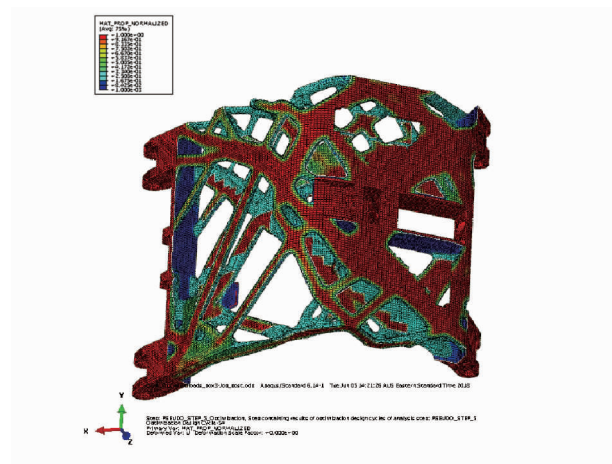


图 4 铰链臂拓扑优化结果单元密度示意(背面)

优化结果的单元密度示意云图,红色区域为主要传力路径,可以看到铰链臂表面剩余单元为红色,内部空腔剩余材料为绿色(密度约 0.5),其余内部材料基本被掏空,仅在接头连接区域有内部加筋,符合抗扭结构薄壁外壳的特点。外壳筋条方向主要沿正负 45°布置,连接对角线的耳片以及中间的作动筒接头,保证传力路径连续,在防碰装置连接区域背面有局部材料堆积,用于降低局部应力,优化结果与工程经验相符。

2.3 厚度尺寸优化

拓扑优化只能得到铰链臂主要传力路径,具体厚度需要通过尺寸优化来得到。厚度尺寸优化可以与拓扑优化同时进行,厚度尺寸优化的优点是建模简单、计算快,可以加入稳定性约束,缺点就是没有拓扑优化得到的外形自由度高,故尺寸优化通常与拓扑优化进行互补。根据铰链臂传力特点建立壳单元的铰链臂模型,内部空心,如图 5 所示。红色区域为设计空间,即厚度优化区域,蓝色区域为非设计空间。对于已经确定的开孔,同样可以将开孔区域单

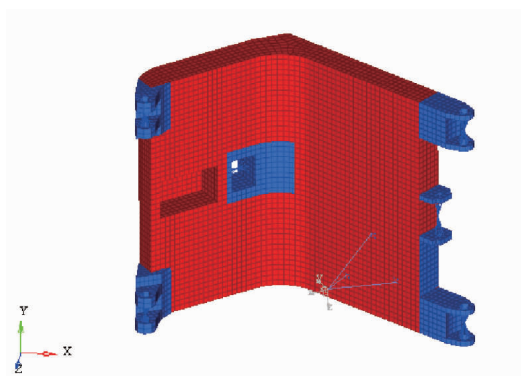


图 5 铰链臂厚度优化设计空间

元设置为非优化空间并定义极小的厚度。

设置厚度优化范围,优化目标为最小柔度(最大刚度),约束设置为体积百分比、最大应力、线性失稳系数。优化结果如图 6 和图 7 所示,其中蓝色区域优化厚度较小,为可开孔区域,红色区域优化厚度达到厚度约束上限,为需加强区域。

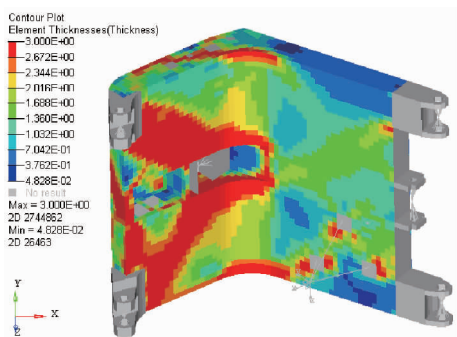


图 6 铰链臂厚度优化结果厚度示意(正面)

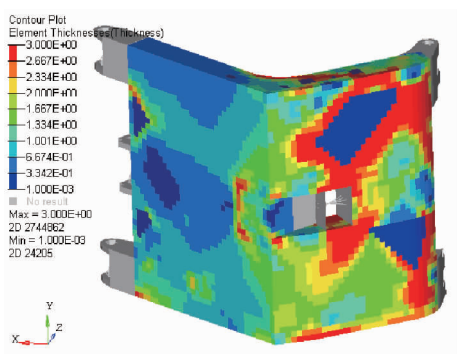


图 7 铰链臂厚度优化结果厚度示意(背面)

2.4 方案对比

综合拓扑优化以及厚度尺寸优化结果可以对壳单元模型进行简单的修改,在短时间内完成多个方案对比。如图 8 和图 9 所示,选取 2 种重量接近的开孔方案,将开孔部位厚度赋小值,计算多个工况下的位移、应力以及屈曲因子,确定具体开孔布置。

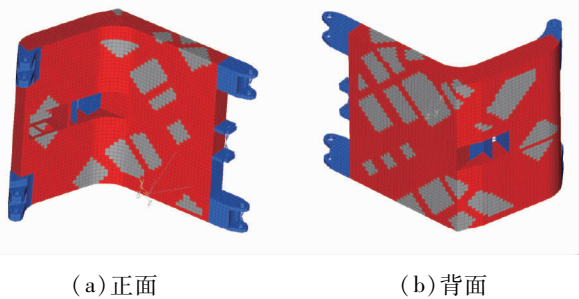
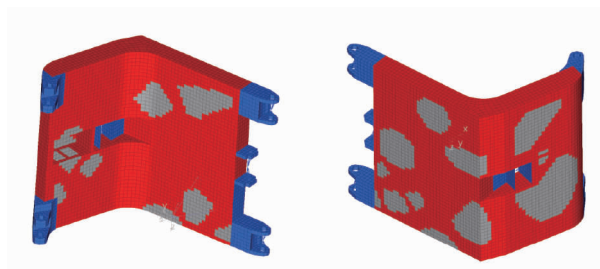


图 8 铰链臂开孔方案 1



(a) 正面 (b) 背面

图 9 铰链臂开孔方案 2

3 结构数模

根据优化结果结合具体制造工艺进行几何重构,若采用铸件或增材制造,可以尽可能保留拓扑优化的薄壁外形。若采用机加工方案,由于在刀具进出方向不能有材料的阻挡,需要在拓扑优化阶段就定义几何约束,优化结果将不是中空薄壁结构,而是传统实体表面加强筋结构,相同抗扭刚度的情况下重量会有较大提高。图 10 ~ 图 12 为采用增材制造工艺成型的铰链臂数模示意。打印时摆放的高度方向沿 y 轴。铰链臂采用厚度渐变设计,在关键部位内部保留筋条,筋条及开孔均与打印摆放方向呈 45°,减少支撑体积。为方便内部支撑去除,上下面均设计开孔。

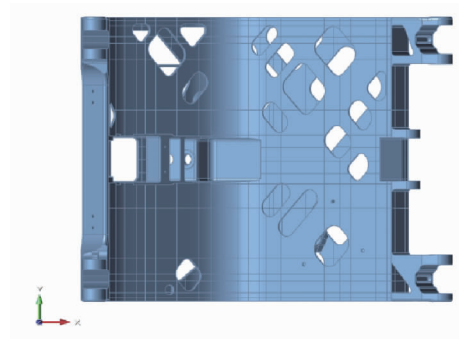


图 10 铰链臂几何重构示意(正面)

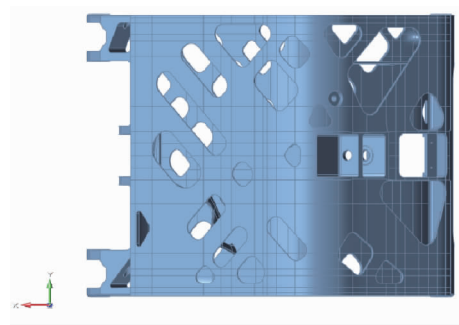


图 11 铰链臂几何重构示意(背面)

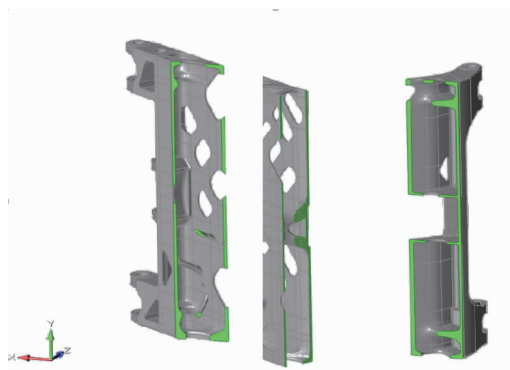


图 12 铰链臂几何重构示意(剖视图)

4 强度校核

为了验证结构在所有工况下满足强度、刚度要求,需要建立精细有限元模型对铰链臂进行位移及应力分析,舱门打开重力工况下位移云图如图 13 所示,多工况包络应力结果云图如图 14 所示。局部连接区域有应力集中,可能会引起疲劳问题,需要提取局部载荷用工程算法进行校核。对于薄壁结构通常还需要进行稳定性分析,可以采用有限元方法,也可以采用工程算法,由于方法成熟,此处不再阐述。

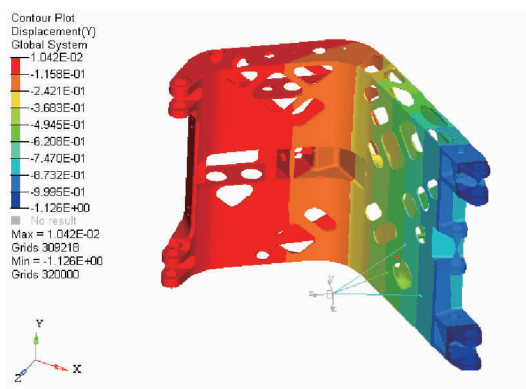


图 13 铰链臂重力工况下垂向位移示意

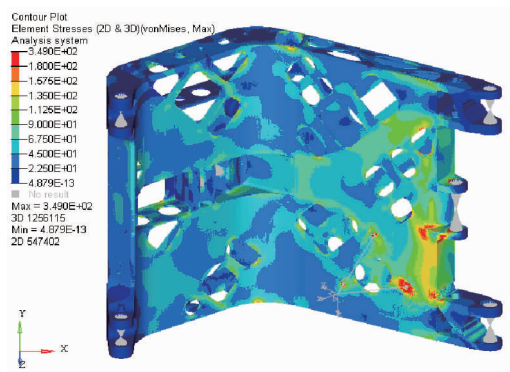


图 14 铰链臂危险工况应力示意(包络工况)

5 结论

本文针对民用飞机登机门铰链臂结构的优化设计进行了较为全面的阐述,给出了载荷来源,分析了传力,定义了设计空间,进行了拓扑优化及厚度尺寸优化,最终根据优化结果重构了数模并进行了强度分析。给民机登机门铰链臂优化设计提供了参考方法。

参考文献:

- [1] Boeing Company. Boeing 737-800 Aircraft Maintenance Manual, Chapter 52: Doors [M]. [S. l.]: Boeing Company, 2004.
- [2] Airbus Industries. Airbus A319/A320/A321 Aircraft Maintenance Manual, Chapter 52 Doors [M]. [S. l.]: Airbus Industries, 2005.
- [3] Boeing Company. Boeing 777-300 Aircraft Maintenance Manual, Chapter 52: Doors [M]. [S. l.]: Boeing Company, 2008.
- [4] Gulfstream Aerospace Corporation. Gulfstream G200 Aircraft Maintenance Manual Chapter 52: Doors [M]. [S. l.]: Gulfstream Aerospace Corporation, 2006.
- [5] 张风格,刘若斯. 基于 OptStruct 的登机门铰链臂结构优化设计[C/OL]// Altair 2011 HyperWorks 技术大会论文集. (2011-08-18) [2020-01-12]. <https://jz.docin.com/p-1395944675.html>.
- [6] NIMISHA S. Tutorial: Design of a Door Hinge[J/OL]. Altair University, (2018-11-1) [2019-12-5] https://altairuniversity.com/wp-content/uploads/2018/11/Door_Hinge_11_18.pdf.
- [7] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准:CCAR-25-R4[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [8] BENDSOE P M, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2):197-224.
- [9] BENDSOE P M, SIGMUND O. Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications [M]. [S. l.]: Springer, 2011.
- [10] XIE Y, HUANG X. Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures Methods and Applications[M]. [S. l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2010.

作者简介

张文斌 男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机舱门强度设计。E-mail: zhangwenbin@comac.cc

马大卫 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机舱

门结构设计。E-mail: madawei@comac.cc

Research on optimization design method of hinge arm for civil aircraft boarding door

ZHANG Wenbin * MA Dawei

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

Abstract: In order to meet the requirements of emergency escape, the door opening and closing process of civil aircraft needs to be stable and should not be significantly shaken. The boarding door hinge arm is an important connection structure in the process of door opening and closing, which requires high rigidity. As the connection interface of multiple mechanisms, there are many types of load conditions applied on it. For the design of the boarding door hinge arm structure, a more comprehensive optimization design process is proposed, including design space definition, loads and boundary conditions, geometric reconstruction and stress analysis. Combining engineering experience, topology optimization, and thickness size optimization, the shape and size of the hinge arm can be determined in a small number of design iterations, which reduces the design period of the hinge arm and achieves lightweight design of hinge arm, while meeting the requirements for strength, stiffness, and functionality. For the key parameter settings in the design, suggestions are given to provide a reference for the design of similar structures.

Keywords: hinge arm; optimization design; topology optimization; size optimization

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