

基于系统工程方法的民用飞机维修性设计

王洁萱*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘 要: 维修性设计是民用飞机研制工作中的基础工作之一,维修性的好坏直接影响到民用飞机的经济性和市场竞争力。我国民用飞机维修性设计工作起步较晚,缺少系统的正向方法和技术指导资料。将系统工程实践应用于民用飞机设计过程中,进行正向设计,可以尽可能减少设计工作量,减少返工。将利益攸关方的维修性需求落实到系统设备的维修性设计中,对于民用飞机的维修性设计至关重要。以民用飞机电子电气舱的维修性设计为例,通过需求识别,以需求权重为基础计算得到维修性设计要求的相对重要度。再用关联矩阵法将维修性设计要求落实到民用飞机系统设备的设计上。该方法采用正向设计,为设计出满足用户需求且易于维修的民用飞机提供了设计思路。

关键词: 系统工程;维修性;民用飞机

中图分类号: V217

文献标识码: A

OSID: 

0 引言

维修性是民用飞机的一种质量特性,维修性设计工作要与民用飞机研发进程一起开展计划和实施,从而使民用飞机能够便于维修、快速维修和经济维修。通常,民用飞机维修性设计首先要捕获维修性需求,随之提出维修性设计要求,再贯彻到系统设备和结构的设计中,最后开展维修性验证与优化工作,是一个反复迭代的过程^[1]。

系统工程是一种跨学科的方法,是一种产品集成与过程集成的过程,强调对全生命周期中各组成元素的权衡分析,实现全局最优^[2]。民用飞机的研发是一项极其复杂的系统工程,维修性设计的目的是通过设计实现规定的维修性需求,可以采用系统工程方法,结合民用飞机研发过程,设计出满足适航和用户维修性需求的民用飞机^[3-8]。

民用飞机维修性需求来源通常有适航规章、用户需求以及相似机型经验等^[9]。在进行民用飞机系统设备维修性设计时,设计要素来源于维修

性设计要求,而系统设备的维修性设计要求来源于维修性需求的传递。在现阶段的维修性需求向下传递的过程中,往往缺少系统、全面、准确的方法。此外,进行系统设备维修性设计时,缺乏对维修性设计要素的系统化、规范化制定方法,从而导致设计出来的民用飞机不能完全满足适航和用户的需求。

本文针对传统的民用飞机维修性设计存在的不足,结合系统工程方法,解决了维修性需求向设备级分配的问题,为民用飞机维修性设计工作提供参考。

1 维修性需求捕获

系统工程中民用飞机产品实现是“V”模型,包括需求定义、初步定义、系统集成等主要任务^[10]。需求捕获过程是系统工程技术过程中的初始过程,维修性需求反映了客户对民用飞机应达到的维修性水平的愿望,是维修性设计的起点和目标。

维修性需求捕获时,首先识别完整的利益攸关方,捕获并权衡利益攸关方需要,再整理成需求

* 通信作者. E-mail: wangjiexuan@comac.cc

引用格式: 王洁萱. 基于系统工程方法的民用飞机维修性设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2022(3): 123-127. WANG J X. Maintainability design of civil aircraft based on systems engineering method[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2022(3): 123-127 (in Chinese).

语言,最后进行需求完整性分析并确定各需求权重。

根据飞机级研制需求与目标、适航规章和相关国内外标准转化、工程经验问题总结,以民用飞机电子电气设备舱为例,整理的需求举例如下:

1)所有在航线中进行更换、报废的设备和零部件应能拆装,且在拆装时无需拆卸临近的其他设备和零部件;

2)设备的检查点、测试点、接地点等维护点应布置在可以接近的位置;

3)选用的电插头或管接头应易于接近/更换;

4)设备架后部线缆应便于接近,应留有足够空间供单个维修人员操作;

5)系统设备维修程序应容易、简单;

6)C 检及 C 检以下需目视检查的设备和零部件应布置在无需移动面板、覆盖物或其他部件就能看到的地方。

用层次分析法结合用户意见对上述需求权重进行计算^[11],如表 1 所示。需求权重矩阵设为 A 。

$$A = [0.25 \ 0.15 \ 0.25 \ 0.15 \ 0.1 \ 0.1] \quad (1)$$

表 1 需求权重

需求	一	二	三	四	五	六
权重	0.25	0.15	0.25	0.15	0.1	0.1

$$B = [b_{ij}]_{14 \times 14} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.1 & 0.1 & 0.7 & 0.1 & 0.1 & 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.7 \\ 0.1 & 1.0 & 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.0 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.7 & 0.3 \\ 0.1 & 0.7 & 1.0 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.1 & 0.5 & 0.0 & 0.5 & 0.5 & 0.0 & 0.7 \\ 0.7 & 0.5 & 0.7 & 1.0 & 0.5 & 0.1 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.1 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 1.0 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.1 & 0.7 & 0.1 & 0.7 & 0.7 & 0.3 \\ 0.1 & 0.0 & 0.7 & 0.1 & 0.1 & 1.0 & 0.7 & 0.1 & 0.0 & 0.7 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.7 \\ 0.7 & 0.1 & 0.7 & 0.7 & 0.0 & 0.7 & 1.0 & 0.7 & 0.3 & 0.1 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.5 \\ 0.5 & 0.0 & 0.1 & 0.7 & 0.0 & 0.1 & 0.7 & 1.0 & 0.0 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.0 & 0.7 \\ 0.7 & 0.0 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.0 & 0.3 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.7 & 0.7 & 0.0 & 0.7 \\ 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.1 & 0.7 & 0.0 & 1.0 & 0.7 & 0.1 & 0.0 & 0.3 \\ 0.7 & 0.1 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 0.7 & 1.0 & 0.7 & 0.7 & 0.7 \\ 0.7 & 0.1 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.1 & 0.7 & 1.0 & 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.7 & 0.0 & 0.7 & 0.7 & 0.1 & 0.3 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.7 & 0.5 & 1.0 & 0.5 \\ 0.7 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.7 & 0.5 & 0.7 & 0.7 & 0.3 & 0.7 & 0.7 & 0.5 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据专家意见,建立维修性需求与维修性设计

2 确定维修性设计要求

根据维修性需求,结合相关标准规范,初步选定的维修性设计要求为:维修可达性、标准化、互换性、维修测试方便性、维修经济性、维修防差错、维修人为因素、调整和校准、口盖、维修标识、拆卸与安装、维修可操作性、维修工具及设备、平均修复时间。

在确定所需的维修性设计要求后,需要从需求到维修性设计要求的转换,采用 QFD 方法,得出维修性设计要求权重^[6]。主要步骤如图 1 所示。

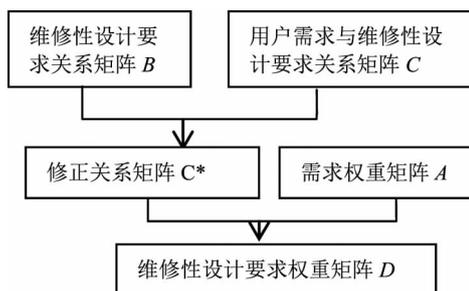


图 1 计算维修性设计要求权重步骤

根据经验和专家打分得出维修性设计要求之间的关系矩阵 B ,其中的 b_{ij} 代表第 i 个因素和第 j 个因素的关系($i = 1, 2, \dots, 14, j = 1, 2, \dots, 14$),如 b_{12} 代表维修可达性和标准化的关系,记为 0.1。

要求之间的关系矩阵 C 。

$$C = [C_{ij}]_{6 \times 14} = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 1 & 5 & 3 & 3 & 5 & 5 & 0 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & 1 & 1 & 5 & 1 & 5 & 5 & 3 & 5 & 3 & 5 & 5 & 5 & 5 \\ 3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 5 & 3 & 0 & 0 & 5 & 3 & 1 & 1 & 5 \\ 5 & 3 & 1 & 5 & 3 & 3 & 5 & 3 & 5 & 3 & 5 & 5 & 3 & 5 \\ 5 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 5 & 0 & 5 & 1 & 1 & 3 & 1 & 5 \\ 3 & 3 & 3 & 5 & 1 & 3 & 3 & 5 & 3 & 3 & 5 & 5 & 3 & 5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据公式 $C^* = CB$ 得出修正关系矩阵。

权重矩阵 D 。

通过 C^* 与 A 计算可以得到维修性设计要求的

$$D = AC^* = [24.285 \quad 12.5 \quad 22.235 \quad 29.305 \quad 16.89 \quad 18.305 \quad 25.785 \quad 21.71 \quad 19.46 \quad 16.095 \quad 29.335 \quad 28.215 \quad 19.12 \quad 29.425] \\ = [0.0778 \quad 0.04 \quad 0.0711 \quad 0.0937 \quad 0.054 \quad 0.0586 \quad 0.0825 \quad 0.0694 \quad 0.0622 \quad 0.0515 \quad 0.0938 \quad 0.0902 \quad 0.0612 \quad 0.0941] \quad (4)$$

综上,可以得出维修性需求与维修性设计要求之间的关系矩阵,如表 2 所示。

于在狭小的空间里设备超过 20 个,且有两个质量超过 30 kg 且体积较大的配电盘箱。初始布置示意图如图 2 所示。选定设备布置、外形尺寸、连接形式、线缆管路走向、测试方便性作为设计要素。根据该设计状态,根据维修性设计要求与设计要素之间的关系得到设计要素的相对重要度,如表 3 所示。

表 2 维修性设计要求与维修性需求关系矩阵

维修性设计要求	维修性需求						相对重要度
	1	2	3	4	5	6	
维修可达性	5	5	3	5	5	3	0.0778
标准化	3	1	1	3	1	3	0.04
互换性	1	1	3	1	0	3	0.0711
维修测试方便性	5	5	3	5	0	5	0.0937
维修经济性	3	1	3	3	1	1	0.054
维修防差错	3	5	5	3	1	3	0.0586
维修人为因素	5	5	3	5	5	3	0.0825
调整和校准	5	3	0	3	0	5	0.0694
口盖	0	5	0	5	5	3	0.0622
维修标识	3	3	5	3	1	3	0.0515
拆卸与安装	5	5	3	5	1	5	0.0938
维修可操作性	5	5	1	5	3	5	0.0902
维修工具及设备	5	5	1	3	1	3	0.0612
平均修复时间	5	5	5	5	5	5	0.0941

从表 2 可以看出维修可达性、维修测试方便性、维修人为因素、拆卸与安装、维修可操作性、平均修复时间所占权重较高,均达到了 8% 以上,在设计时需要着重考虑。

对维修性设计要求进行细化,提出系统设备的维修性设计要求。如在拆卸与安装下提出“电子电气设备舱内蓄电池应布置在便于拆装、远离热源和通风良好的地方。拆装蓄电池不应拆装其他部件,并只需由一个人完成”“电子电气设备舱的电子设备架应设计成可拆卸的形式”等细化要求。

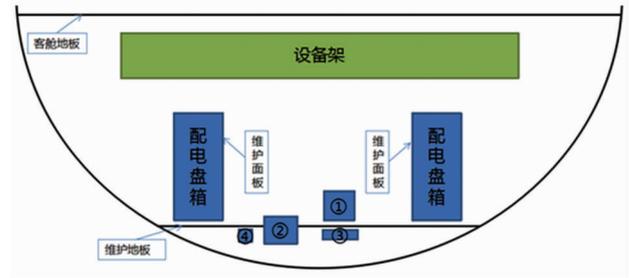


图 2 电子电气舱初始简化布置

表 3 产品设计要素相对重要度

维修性设计要求	设备布置	外形尺寸	连接形式	线缆管路走向	测试方便性
维修可达性	5	3	3	3	0
标准化	0	0	3	0	0
互换性	0	3	1	0	0
维修测试方便性	3	1	0	3	5
维修经济性	3	1	1	1	1
维修防差错	1	1	1	5	0
维修人为因素	3	3	3	1	0
调整和校准	1	0	0	0	0
口盖	3	3	0	0	0
维修标识	0	1	0	3	1
拆卸与安装	5	1	5	1	0
维修可操作性	3	3	3	3	0
维修工具及设备	1	5	5	1	3
平均修复时间	5	3	3	3	5
相对重要度	0.240	0.203	0.203	0.174	0.109

3 维修性设计与优化

3.1 确定设计要素

以某机型电子电气设备舱维修性设计为例,由

表 3 中相对重要度较高的设计要素,应在系统设备的维修性设计时着重考虑。对表 3 中的设计要素的相对重要度进行分析,设备布置(0.240)最重要,其次是外形尺寸(0.203)与连接形式(0.203)。而在实际的维修性设计中,外形尺寸和连接形式如果进行重点设计,会增加系统设计难度。

3.2 维修性设计优化

根据客户意见,综合考虑上述分析过程,提出在原设计方案上增加维护舱门、配电盘箱维护方向的优化方案。即设计要素增加舱门和盘箱方向,用于减少外形尺寸和连接形式的相对重要度。优化后的布置示意图如图 3 所示。

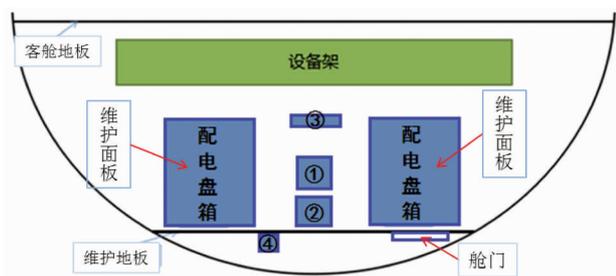


图 3 优化后电子电气舱简化布置

优化后的设计要素相对重要度如表 4 所示。

表 4 优化后的产品设计要素相对重要度

维修性设计要求	设备布置	外形尺寸	连接形式	线缆敷设	故障检测	舱门	盘箱方向
维修可达性	5	3	3	3	0	5	5
标准化	0	0	3	0	0	0	0
互换性	0	3	1	0	0	5	1
维修测试方便性	3	1	0	3	5	5	5
维修经济性	3	1	1	1	1	3	3
维修防差错	1	1	1	5	0	0	1
维修人为因素	3	3	3	1	0	3	3
调整和校准	1	0	0	0	0	1	0
口盖	3	3	0	0	0	0	0
维修标识	0	1	0	3	1	1	0
拆卸与安装	5	1	5	1	0	0	1
维修可操作性	3	3	3	3	0	5	5
维修工具及设备	1	5	5	1	3	1	1
平均修复时间	5	3	3	3	5	5	5
相对重要度	0.172	0.146	0.146	0.125	0.078	0.177	0.156

由表 4 可以看出,增加了舱门和盘箱方向设计要素后,外形尺寸和连接形式的权重降低,系统设计难度也因此降低。

增加两个设计要素,对电子电气设备舱维修性进行优化后,解决了舱内设备维修性问题,重新优化了布置空间,提高了舱内设备维修性。通过增加维护舱门,解决了舱内接近困难的问题,保证电子电气设备舱可快速接近,提高了航线运营效率,降低维护时间和成本,得到客户认可。

5 结论

本文提出了系统工程的方法将民用飞机维修性需求落实到系统设计中的:

- 1) 提出了通过 QFD 方法将维修性需求传递到维修性设计要求,并得出维修性设计要求的相对重要度;
- 2) 通过关联矩阵将民用飞机维修性设计要求传递到系统设计的设计要素,并提出基于关联矩阵的优化方法。

参考文献:

- [1] 郭博智,王敏芹,吴昊. 民用飞机维修性工程[M]. 北京:航空工业出版社,2018.
- [2] 杨多明,阮镰. 系统工程与质量功能展开的综合应用研究[J]. 北京航空航天大学学报,1998(3):362.
- [3] 李宝环,林敏. 基于系统工程的型号标准化工作方法研究[J]. 航空标准化与质量,2021(4):1-4.
- [4] 马小骏,彭焕春. 系统工程在大型客机运行支持系统研制中的应用综述[J]. 航空学报,2019,40(1):522736.
- [5] 高明君,郝建平,刘继民,等. 基于系统工程过程的维修性设计要求生成过程研究[J]. 工程设计学报,2010,17(2):81-85.
- [6] 王增强,李延来,蒲云. 质量功能展开中顾客需求与工程特性的关联度确定方法[J]. 计算机集成制造系统,2013,19(8):2066-2074.
- [7] 陆中. 民用飞机维修性并行设计关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
- [8] 常宁宁. 关联矩阵法在民用飞机维修可操作性设计中的应用[J]. 科技视界,2019,(25):51-53.
- [9] 陈卉. 民用飞机维修性需求初步探讨[J]. 科技视界,2016(6):112-115.
- [10] 沈腾,孟繁鑫,张浩驰. 需求工程方法在机载系统研

发中的应用研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12): 23-29.

- [11] 韩远馨,刘镇承,陈洁华. 基于层次分析法的维修性评价指标权重分析[J]. 机械设计与制造工程,2018, 47(7): 85-88.

作者简介

王洁萱 女,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机维修性设计。E-mail: wangjiexuan@comac.cc

Maintainability design of civil aircraft based on systems engineering method

WANG Jiexuan *

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

Abstract: Maintainability design is one of the basic works in the development of civil aircraft. The quality of maintainability directly affects the economy and market competitiveness of civil aircraft. The maintainability design of civil aircraft in China started late and lacks systematic forward design methods and technical guidance materials. Applying the practice of system engineering to the design of civil aircraft for forward design can reduce the design workload and rework as much as possible. Implementing the maintainability requirements of stakeholders into the maintainability design of system equipment is crucial to the maintainability design of civil aircraft. Taking the maintainability design of the electrical and electronic cabin of a civil aircraft as an example, the relative importance of the maintainability design requirements is obtained based on the demand weight through demand identification. Then, the maintainability design requirements are implemented into the design of the civil aircraft system equipment by the incidence matrix method. This method adopts forward design, which provides a design idea for designing a well-maintained civil aircraft to meet the needs of users.

Keywords: systems engineering; maintainability; civil aircraft

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