

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2016.03.011

民用飞机设备可靠性设计

Equipment Reliability Design on Civil Aircraft

闫旭东 / YAN Xudong

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

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

摘要:

民用飞机可靠性设计的目标是保证飞机达到规定的可靠性定量指标和定性要求,以提高飞机的可靠度,降低运营费用,使飞机具有良好的经济性和市场竞争能力。民用飞机由数量巨大的各种设备组成,设备的可靠性是飞机可靠性的重要保证。

关键词:民用飞机;设备;可靠性;平均故障间隔时间

中图分类号:V328.5

文献标识码:A

[Abstract] The purpose of civil aircraft reliability design is to endure the aircraft meet the qualitative and quantitative reliability requirements, in order to reduce the cost in working, and to make better economical and competition ability. Civil aircraft is composed of large number of equipments. These equipments reliability guarantees the aircraft reliability.

[Keywords] civil aircraft;equipment; reliability;mean time between failures

0 引言

民用飞机由数量庞大的各种设备组成,这些设备实现了飞机的各种预定功能。设备的可靠性是飞机可靠性的重要保证,可靠性的不高不但影响航空公司运营的费用,而且直接影响飞机的安全性。设备在研制过程中,需严格遵循相应的可靠性设计原则,保证设备达到规定的可靠性定量指标和定性要求。

1 设备可靠性概述

设备可靠性指的是产品在规定的时间内及环境下完成设定功能的能力。民用飞机设计中,常用“平均故障间隔时间(Mean Time Between Failures,以下简称MTBF)”来作为可靠性设计要求的指标。民用飞机设备工作的环境参数包括不同的压力、湿度、电磁干扰、振动、冲击、加速度、盐雾、沙尘等,在不同的工作环境下,由于各种各样的磨损、老化、腐蚀等现象的存在,设备很难永久保持其技术状态不变。尤其是对于飞机上的设备来说,其工作环境非常复杂,设备能否在复杂的环境下,长时间

完成设计要求的功能就成为了设备可靠性的最重要的指标。

可靠性是一种与时间、质量密切相关的概念。它要研究的是设备在一定时期内的各种失效条件和机理,并以此建立可靠性模型和方法来提高设备的质量,而这样的设备质量是基于时间观念和条件观念之上的质量——在一定的时间范围内和一定的条件下,设备的运行是可靠的。这一观念凸显了传统的质量控制和可靠性工程之间的差别。

民用飞机上的设备,由于安全性要求很高。设备不但要通过研制试验来验证功能及性能是否符合设计要求;设备在出厂时,还要进行相应的测试来验证是否合格,包括尺寸检查、验证压力、泄漏、重量等;同时,设备需进行长时间的可靠性试验来验证设备的可靠性,包括耐久度振动、耐久度工作压力循环、温度循环等试验。

2 设备可靠性要求

民用飞机设备的可靠性指标要求来源于以下两个方面:

1) 系统可靠性要求。设备可靠性是保证系统可靠性的重要因素,设备可靠性 MTBF 要求来源于系统可靠性的分配。参考航空公司的运营数据确定各设备可靠性分配值占系统可靠性指标的比例,并对各设备进行可靠性指标初步分配,结合设备部件制造商提交的数据对初步分配值进行修正,最终得到各设备的可靠性分配指标。假设飞机及各主要系统的故障率服从指数分布。具体见式(1)~(3)。

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\lambda} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}} \quad (3)$$

式中: λ 为系统的故障率; λ_i 为各设备的故障率;MTBF 为系统的平均故障间隔时间值。

2) 系统安全性要求。设备可靠性是保证系统安全性的重要因素,设备可靠性 MTBF 要求来源于系统安全性中的设备失效引起的功能失效影响等级对于设备研制保证等级的要求。

3 设备可靠性数据来源

民用飞机设备可靠性 MTBF 数据的来源主要有两个途径:

1) 货架产品的设备可靠性 MTBF 数据来源。货架产品是指在民航市场已服役飞机中大量装备的产品。货架产品 MTBF 来源于航空公司的运营统计数据,等于在规定的条件下和规定的时间内,产品累积的总飞行小时除以同一时间内的故障总数。

2) 新研产品的设备可靠性 MTBF 数据来源。新研产品是指在未投入运营或研制试飞阶段飞机上装备的最新研制产品。新研产品包括两种:一种是基于货架产品的改进型,一种是全新研制的新产品。新研产品没有航空公司对于设备故障的统计数据。新研产品 MTBF 主要来源于计算分析,分析方法见式(4)。

$$\frac{1}{\text{MTBF}} = \lambda_{\text{维修}} = \frac{\lambda_{\text{飞行}} \cdot t_{\text{飞行}} + \lambda_{\text{地面}} \cdot t_{\text{地面}} + \lambda_{\text{不运行}} \cdot t_{\text{不运行}}}{t_{\text{飞行}}} \quad (4)$$

式中: λ 为设备的故障率; t 为设备的运行时间;MTBF 为设备的平均故障间隔时间值; $\lambda_{\text{维修}}$ 是设备

平均维修间隔时间对应的故障率; $\lambda_{\text{飞行}}$ 是设备飞行阶段的故障率; $\lambda_{\text{地面}}$ 是设备地面运行时的故障率; $\lambda_{\text{不运行}}$ 是设备不运行时的故障率; $t_{\text{飞行}}$ 是设备飞行阶段的时间; $t_{\text{地面}}$ 是设备地面运行时的时间; $t_{\text{不运行}}$ 是设备不运行的时间。

新研产品的设备可靠性 MTBF 计算中需使用的数据包括设备在飞行、地面运行、储存不运行期间的时间及失效率,其对应各个阶段的失效率数据来源于相似货架产品设备的失效率。

4 设备的设计过程、故障模式及影响分析

设备的设计过程中,需首先分析设备可能出现的故障模式及影响,建立故障物理模型,对于正确理解故障机理、研究具体的故障模式,具有特殊的意义,并可用于预测设计的可靠性和安全性。设备零部件设计时,应尽量采用标准件或质量成熟的零件,一般零部件可按类比法设计,重要的零件按概率法设计,对一些关键零部件还应进行可靠性试验。对产品的设备应进行可靠性计算分析、试验验证、优化更改,直到设备满足可靠性指标要求为止。另外,还要进行人机系统的设计,主要包括操作性和适应性设计。设备的设计过程如图 1 所示。

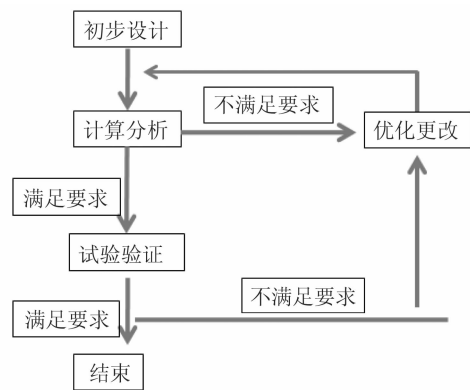


图 1 设备的设计过程

5 可靠性方法在设备研制过程中的应用

设备可靠性设计可分为定性和定量两大类。前者侧重于对故障进行模拟分析,采取针对性措施使得产品达到可靠的目的,而后者侧重于对零件的强度分布和应力分布做复杂的计算,建立极限函数,从而设计出满足需求的产品。由于民用飞机设备工作环境复杂,因此,在实际中常用的是定性的

设计方法。可靠性设计由于产品不同构成的差异,可采用的设计方法很多,仅常用的就有十几种,对于民用飞机设备来说,常采用的可靠性设计方法有以下几种。

1) 故障预防设计

对于属于串联系统的产品来说,由于任何一部分的失效都会导致整个系统的失效,因此,为了提高整机的可靠性,必须要控制好每个零部件的质量,要选用经过分析验证的可靠性高的零部件或标准件,要尽可能采用成熟的设计方案。

2) 简化设计

通常,越是简单的结构,其应力也越简单可控。因此对于机械来说,应在满足功能需要的前提下,力求使得结构简单,这一点对于飞机设备来说尤为重要。

3) 冗余设计

民用飞机中安全性影响大的设备都有多套备份,当一套装置出现故障时,备份的装置仍然可以保证设备的功能正常,不会导致航空公司运营受到影响。

4) 安全裕度设计

安全裕度设计是一种使零件的使用应力低于其额定应力的设计方法。工程实践表明机械零件在等于或大于其额定承载力下运行,极容易发生疲劳反应,而如果低于额定承载力下运行,故障率很低,可靠性也较高。因此,当机械零部件的荷载应力不确定的时候,可以采用提高平均强度,降低平均应力的方法来提高可靠性。

5) 成熟技术设计

民用飞机设备大量采用国内外民机的成熟技术及货架产品,在满足性能、可靠性、安全性、重量、外形等要求的情况下,采用已成功应用在成熟机型的货架成品和改进产品,可大大提高系统可靠性。

6) 耐环境设计

耐环境设计是在设计时就考虑产品在整个寿命周期内可能遇到的各种环境影响,如设备工作的压力、温度、湿度、电磁干扰、振动、冲击、加速度、盐雾、砂尘等环境因素的影响。对于民用飞机设备来说,应考虑使用时所面临的各种恶劣环境,采取有效措施,提高零部件本身的耐环境能力。

7) 标准化设计

民用飞机设计时选用成熟的标准零部件、成熟的材料及工艺加工方法,以提高设备的可靠性。

8) 健壮设计

健壮设计中最具代表性的方法是日本田口玄一博士创立的田口方法,即一个产品的设计应由系统设计、参数设计和容差设计的三次设计来完成,这是一种在设计过程中充分考虑影响其可靠性的内外干扰而进行的一种优化设计。

6 系统级可靠性分析

系统 MTBF 等于系统各设备故障率代数和的倒数。表 1 是设备 MTBF 统计表。对于成熟的货架产品,设备的 MTBF 来源于运营的统计数据,设备的 MTBF 值等于在规定的条件下和规定的时间内,产品累积的总飞行小时除以同一时间内的故障总数;对于新研产品,设备的 MTBF 需参考相似设备的故障率进行计算和预计。可用式(5)来表示。

$$MTBF_{\text{系统}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\text{故障率}_i)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{MTBF_i} \right)} \quad (5)$$

表 1 设备 MTBF 统计表

序号	关键设备	数量	MTBF(飞行小时)
1	设备 1	2	100 000
2	设备 2	1	15 000
3	设备 3	2	50 000
4	设备 4	2	20 000
5	设备 5	2	20 000
.....

7 结论

在设备研制阶段,应提出其可靠性的定性与定量要求,确定相应的方案和改进措施,提出明确的可靠性指标和考核方法,并按照计划开展可靠性设计分析和试验工作。在产品定型阶段,应考核产品的可靠性,保证其达到要求。对于安全性影响较大的设备,应加强产品研发过程中的可靠性试验,查找产品中存在的问题,并及时进行相应的改进。

(下转第 65 页)

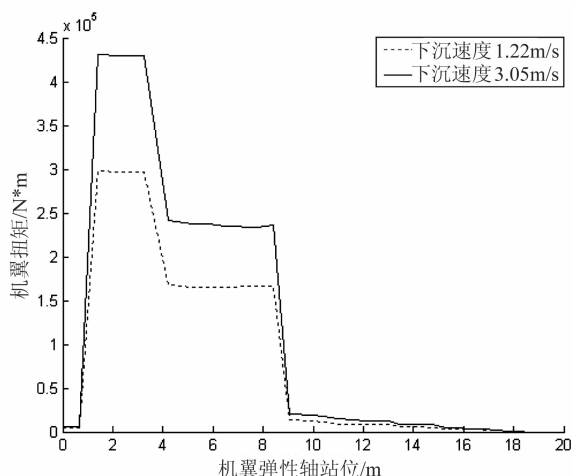


图5 机翼扭矩响应包线图

由以上计算结果,可以清晰地看出机翼结构局部危险部位,即各部件较高载荷集中处,如机翼根部,因此需要对此部位进行加强设计,从而使整架飞机的安全性得到保障,具有明显的实际意义。

5 结论

通过上述计算分析,可以得出以下结论:

1) 根据本文计算分析,飞机着陆滑跑过程中机翼的动响应问题需要考虑飞机升力和滑跑速度,为有限元计算提供更可靠的外载输入;

2) 依据计算所提取的机翼各站位处的载荷响应峰值,做出动响应包线,确定各部件载荷的最大值,有助于预判结构局部危险部位。

参考文献:

- [1] 曾宁. 结构动力学在飞机设计中的应用技术研究[J]. 西南交通大学学报,增刊,2002,37(1):110-112.
[2] W Karam and J-C Mare. Advanced model development and

validation of landing gear shock struts[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 2010 224: 575-586.

[3] Kapseong Ro. A Descriptive Modeling and Simulation of Aircraft-Runway Dynamics [C]// 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Norfolk, Virginia, 7-10 April 2003: 1-11.

[4] Karen H. Lyle, Karen E. Jackson and Edwin L. Fasanella. Simulation of Aircraft Landing Gears with a Nonlinear Dynamic Finite Element Code[J]. Journal of Aircraft, 2002, 39: 142-147.

[5] Phil Evans, Mario G. Perhinschi, and Steven Mullins. Modeling and Simulation of a Tricycle Landing Gear at Normal and Abnormal Conditions[C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Toronto, Ontario Canada, 2-5 August 2010:1-20.

[6] 王富耻,张朝晖. ANSYS10.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006:1-2.

[7] 江见鲸,何放龙,何益斌,等. 有限元法及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006:1-7.

[8] 徐焱. 飞机带翼尖弹着陆响应研究[J]. 飞机设计,2003, 1:27-32.

[9] 孟庆贺. 飞机着陆撞击与滑跑响应分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.

[10] 陈旺. 小车式起落架落震及全机着陆动态仿真分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2005.

[11] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第9册:载荷、强度和刚度[M]. 北京:航空工业出版社,2001:111-129.

[12] Donald Freund, Douglas R. McKissack, Laurence C. Hanson. Dynamic Taxi, Take-Off and Landing Roll Analyses for Large Business Jet Aircraft[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 3-6 April 2000, A00-24567:1-11.

[13] 熊海泉,刘昶,郑本武. 飞机飞行动力学[M]. 北京:航空工业出版社,1990:86-88.

[14] 常振亚. 飞机飞行性能计算手册[M]. 陕西:飞行力学杂志社,1987:255-261.

(上接第51页)

参考文献:

- [1] 曾天翔,等译. 可靠性设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,1987.
[2] 陆廷孝,等主编. 可靠性设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
[3] 窦迎军. 换热器的可靠性分析[J]. 机械工程师,2012.
[4] 王珍熙. 可靠性、冗余及容错技术[M]. 北京:航空工业出版社,1991.

[5] 焦景堂. 航空机载设备可靠性维修性工程指南[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1993.

[6] [日]市田嵩,铃木和幸,编著. 可靠性分布与统计[M]. 郭建英,沙巨大,译. 北京:机械工业出版社,1988.

[7] 章国栋,陆廷孝,屠庆慈,吴真真. 系统可靠性维修性的分析与设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1990.

[8] 胡昌寿. 可靠性工程-设计、试验、分析、管理[M]. 北京:宇航出版社,1988.

[9] 姚一平,李沛琼. 可靠性及余度技术[M]. 北京:航空工业出版社,1991.