

The Maintenance Design with Modern Large Aircraft (I)

现代大飞机的维修设计（一）

文/ 戚燕杰 吕志刚 宋笔锋（西北工业大学可靠性工程研究所）

本文提出了维修设计（Design For Maintenance, DFM）的概念。通过空客A380、波音747、777、787，巴西Embraer170/190等较为典型的现代大中型运输飞机的维修设计案例，论述了面向维修的设计在现代大型运输飞机研制与发展中重要地位和作用，阐明了维修性及相关特性是现代大飞机成功与否的关键性技术。

关键词 维修成本 维修设计 维修性 维修 维修工时

飞机维修是现代航空公司获取利润与获得发展的重要因素，飞机的维修成本是用户在考虑购买飞机时的决定性因素之一，优良的维修性是现代飞机的“卖点”之一。飞机的维修性从根本上制约着飞机的维修成本，而维修性是飞机在设计时赋予飞机的一种属性、是由设计决定的质量特性。良好的维修性及相关特性是现代大飞机成功与否的关键性技术。

1 面向维修的设计

面向维修的设计（Design For Maintenance, DFM），又简称为维修设计，是指在产品设计时，以满足用户需求为前提，通过分析和研究产品寿命周期中各阶段的维修特性、并进行综合评价和权衡，提高产品的维修性及相关特性（可靠性、保障性、测试性等），使得产品能以最小的维修资源（维修成本、维修时间、维修人力、维修设备等）消耗获得最大的可用率的设计原则、方法和技术。

在飞机设计中，对于维修性的重要意义怎么强调也不过分。维护与修理维修是贯穿于飞机整个寿命周期过程中的

工作，要从根本上解决维修问题，做出主要贡献的应该是在飞机设计阶段^{1, 2}。那些本来能够在较好的设计中就可避免的数不清的使用故障与事故，暴露、出现在使用阶段时，依靠维修来解决和处理则需要高昂的人力、财力及时间代价³。那种期待飞机研制完成之后再去改善维修性的观念已被证明落后。面向维修的设计DFM提醒并保证着设计者对维修性必须比以往任何时候都给予更多的重视。

2 维修设计与现代大型运输飞机的发展

优良的维修性是新一代飞机特征的构成。维修性与可靠性在第三代飞机技术性能上较之于第二代有了很大的提高，但由于飞机复杂程度增加，设计经验不足等，导致在实际使用中问题层出不穷，例如：地面停机时间长、使用和保障费用

高、机动性差、可用率低等等。维修性问题的叠出直接影响了飞机性能的发挥。维修性是飞机在设计时赋予飞机的一种属性、是由设计决定的质量特性，设计完成之后的改进、改型都不能彻底改变局面。这就是第三代飞机经过多次升级，技术性能有了很大提高，但维修保障依然不良的根本原因。因此，新一代飞机在设计之初就非常重视维修性及相关特性的提高，将维修性列入设计指标，进行充分的维修性分析，实施综合维修保障计划，并使其与整个飞机的设

图/chelsea



计同步贯彻进行。这种作法的就是所谓DFM精神的体现。

2. 1 “以用户为本”是空客公司一贯秉承的理念，也是空客系列飞机成功的秘诀所在。从A300到A380的每一次发展，空客都把降低用户维修成本置于重要位置，A380更是面向维修的设计典范。

A380的设计总原则是面向维修的设计5。欧洲的飞机维修工时价格高达70~80美元6，A380以降低24%的直接维修费为目标，实现目标具体的设计指标包括：计算机模块的更换时间为15分钟，机轮更换时间为30分钟，刹车块、发电机、液压泵等更换时间为60分钟，发动机快速更换时间为6小时，主起落架更换少于8小时，飞行操纵面更换少于一个工作日等等。提高零部件的可靠性以减少更换的必要性，同时增加复式机构以及优化系统的冗余把一些小修补工作合并到定期维修中去。

采用先进的维修技术延长维修间隔时间。A380的维修间隔设计是：A检750小时；C检18~24个月（服役初期18个月，其后24个月一次）；中检

5~6年；大检12年。这些是根据A340维修程序提出的，A380维修程序采用“视情维修”的原则。A380每次检修的维修工时不大于波音747~400现行标准，航线维修、发动机及机体维修应占飞机运营成本的18%~19%。

空客主要从设计制度、新材料和新技术的应用这三个层面来保证A380的维修设计。

2. 1. 1 通过相关制度在设计过程中保证A380的维修性。

通过其著名的“V”型设计验证过程设计飞机，把维修性贯穿于整个“V”型设计过程。首先从整机层面自上而下提出设计要求，逐步落实到系统层面、子系统层面，直至零部件层面；设计方案出来后，自下而上从零部件层面到子系统、系统层面再到整机层面一级级地进



图/chelsea

行验证，以检查最终的设计方案是否能满足最初的设计要求。为A380提供发动机的公司也使用类似的方法进行设计。早在1994年，空客负责指导飞机用户维修部门的维修专家们就被邀请参与到A380最初的设计团队中。在这个阶段，保证飞机可靠性和维修性的设计轮廓被勾勒出来。1996年9月，空客超大飞机部（LAD）将维修方面的职能并入设计工程中，并直接向总工程师汇报。

MODERN LARGE AIRCRAFT

A380维修设计的原则是：用最新的技术优化飞机的可靠性和维修性，同时又要做到在维修时用到最少的新技能和新程序步骤。这是考虑到在使用过程中，A380将和其他飞机一起做维修维护检查，维修的差异性越小，维修人员对新型飞机的适应性将越好。

当飞机的零部件和系统设计出来后，使用两种平行的方法进行评估：第一种是预测如果系统失效，会导致哪些潜在的航班延误、取消，目的是验证这些情况是否会导致飞机的停港时间超出规定的正常时间。如果超出，则需重新设计。第二种方法是按照零部件、系统的设计可靠度，来验证出现延误情况的可能性。如果出现延误情况的可能性较大，则需要提高系统零部件的设计可靠性。

空客在制度方面的另一措施是邀请飞机订户及意向客户航空公司参与设计。通过举办研讨会，让来自营运和维修业的人士提出意见，分析以前的维修经验。过去常造成飞机延误和高维修成本的地方，都尽量在设计之初被克服。在整个设计过程中都坚持定期举行这种会议，直到产品投放使用。

2. 1. 2 通过使用先进材料提高

A380的维修性9

空客多年来通过使用可靠性高、维修性好的航空材料来延长飞机结构使用寿命和简化维修。使用Glare材料制造机身就是空客通过使用先进材料提高A380维修性的典型实例。Glare材料不但比传统的结构材料要轻得多（Glare层板可使结构减重30%），而且具有很好的抗疲劳破坏性能，其疲劳裂纹形成和扩展速度很慢，在A380的整个使用寿命期内都不需要进行疲劳损伤的检查。

2. 1. 3 通过使用新技术提高A380的维修性

2. 1. 3. 1 空客将激光焊接技术用于A380的下机身壁板与桁条的焊接，以此代替铆接工艺。由于采用新工艺，不再需要使用大量铆钉，不但减轻了重量，还避免了铆接容易造成的缝隙腐蚀和疲劳裂纹等固有问题，从而减少了检查和维修量。

2. 1. 3. 2 通过改进飞机原有系统提高A380维修性10。例如，对A380的飞行操作系统，其动力源由传统的三套液压系统设计改为两套液压和两套电动系统，提高了裕度值。比起传统设计，使用四套系统虽然会增加成本，但省去一个液压系统，给系统的维护维修带来

了很大的便利。进一步改进液压系统，使用了5000Pa的压力（军用），减小了尺寸、管件和接头，简化了维护与修理工作。

2. 1. 3. 3 通过电脑辅助设计模拟维修操作步骤验证A380的维修性。设计人员主要通过电脑辅助三维动画模拟维修人员在相关的舱内做维护维修的操作步骤和情景，来验证实际安装拆卸时应有的步骤及维修工具是否有足够的工作空间等问题。这些三维动画，今后还可用于维修培训，演示正确的维修过程。

2. 1. 3. 4 通过增加状态监控系统提高A380的维修性

飞机尺寸的加大、各种新技术的应用使A380的维修不但没有复杂反而变得相对简单。

A380充分体现了DFM的精神。毕竟，维修性差的飞机今后是没有市场的。

2. 2 波音公司对于飞机维修设计历来都很重视，波音飞机的维修理念领导着世界航空维修的发展。最经典的事例是波音747飞机维修大纲的制订，它开创了“以可靠性为中心的维修（RC

M)”现代航空维修的新纪元。RCM揭示了当代维修思想的本质以安全、可靠、经济为目标的维修。

2. 2. 1 波音747飞机维修大纲依据1968年7月形成的MSG-1而制订, 这是以可靠性为中心的维修理

论的首次实际应用; 1970年MSG-1被改进为MSG-2; 1972年欧洲也编写了《EMSG-2, European MSG-2》作为空客A-300及协和飞机的维修大纲; 1980年, MSG-2发展为MSG-3。1987年和1993年, 美国ATA两次对MSG-3进行修改, 使MSG-3R1和MSG-3R2成为世界民航界共同认可的航空器维修原理。如今, 各国都推荐用MSG-3制订飞机的维修大纲。RCM在国际上得到了普遍应用, 它指导着人们认识维修的现状和未来的发展。

2. 2. 2 从波音737、757系列的BITE系统到波音747、777的中央维护计算机系统CMCS的发展, 可以看出一直致力于进取的波音飞机维修设计¹⁵。监控维修CMM是现代飞机维修发展的方向。波音公司为提高777飞机的维修性而设计的CMCS, 在CMM领域取得了重大

突破, 其CMCS功能标志着飞机的监控维修已进入实用阶段; 其发展水平表明: 21世纪的飞机维修将依赖机载计算机维修系统, 向着以CMM为主的智能化方向发展¹⁶。CMCS使飞机安全性和经济性得以大幅提高, 也使传统的飞机维修业将面临维修方式发生根本变革的挑战。

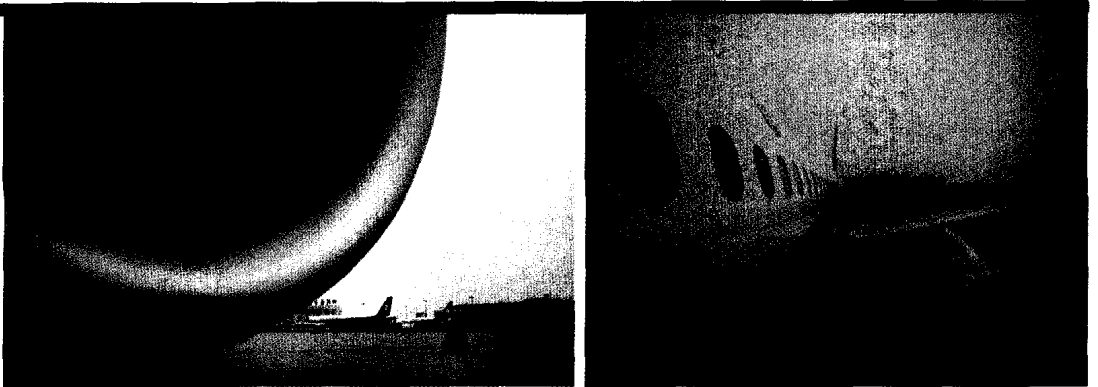
2. 2. 3 波音公司的维修设计不断地在创新发展着。例如, 在2006年, 波音公司推出了无线射频识别(RFID)智能标签技术¹⁸。波音787的部件供应商必须在其提供的1750类零部件上贴RFID智能标签。其他飞机也可在大修时安装RFID标签, FAA和EASA已经批准在民机上使用RFID标签, 未来的RFID翻修市场会逐步扩大。RFID的应用将会给航空公司的飞机维修带来重大的变化。

2. 3 巴西航空工业公司十分重视飞机的维修设计, 在销售Embraer170/190系列飞机时, 将其维修性作为一个新卖点¹⁹。这主要包括: 先进的计算机故障诊断系统减少了直接维修成本; 内置自检装置缩短了航班在机场的周转时间; 灵活的维修计划等。Embraer170/190飞机的直接维修成本比波音717、737以及空客A320低20%, 比庞巴迪公司支线喷气机低30%。

2. 3. 1 先进的计算机故障诊断系统

当飞机出现故障时, 可通过其配备现代的故障诊断系统的机载中央维修计算机(CMC)来查找原因, 可加快维修程序。巴航是首家采用此系统的公司。

2. 3. 2 先进的检测设计
Embraer170的自检装置可以使维修顺利



地完成维修任务,并降低维修成本。

2.3.3 系列化通用性设计

Embraer系列飞机包括 Embraer ERJ170/175/190/195共4个型号,这些飞机是按系列化概念设计的飞机,提供通用的系统和零件,采用相同的地面保障设备,可减少用户对备件的需求。该系列4个机型之间具有极高的通用性,可使航空公司节省大量维修、运营和培训成本。

2.3.4 长寿命与维修间隔设计

飞机的设计寿命为80000飞行小时或80000飞行循环,可以运营30年。因而,飞机的防腐显得非常重要。为此,在飞机的结构设计时综合考虑了维修防腐和控制计划(CPCP)。根据最新的MSG-3推出了一套灵活的维修计划。飞机结构和腐蚀的检查工作多数在飞机投入使用8年以后才进行,减少了审定维修要求(CMR)任务的数量。美国FAA、欧洲JAA和巴西CTA批准了Embraer170型的定期维修计划。维修审查委员会批准其维修间隔为6000飞行小时,这是一个很有竞争力的数字。

2.3.5 计算机虚拟与实际验证维修设计

公司投资500万美元与达索系统公司共同建立的虚拟现实中心在新机的研发过程中起着十分重要的作用。维修人员利用虚拟工具,可以确定是否能够拆除一个零部件并更换。除了虚拟中心,维修性小组还进行大量的实际维修验证工作。在飞机交付之前,要实际验证每项维修任务,由经验丰富的维修人员验证维修手册中要求的每一项任务并确立实际完成每项工作的维修工时。工程师所

编写的维修手册除了要满足适航要求,还通过机械师和客户支援人员来确认所有的文字说明。

Embraer170/190系列飞机发动机维修设计、飞机维修设计的简单易行在各个细节上得到充分的体现。(篇幅所限细节内容从略)

3 小结

通过上述空客、波音及巴航等较为典型的现代大中型运输飞机的维修设计案例,以及A-400M、C-17、安-70、安-124以及我国Y-8等大中型军用运输飞机(篇幅所限恕不一一例举)对维修设计的重视与应用,充分说明了维修设计在现代大飞机研制与发展中的重要地位和作用。

飞机维修虽是整个航空装备发展链条中的一个环节,但其居于时间序列的后列,具“用户”身份和“终端”性质,更富全程感、总体感与现实感。英国、日本等发达国家都曾提出了“装备综合工程”这一更为广泛的概念来说明维修的综合性质。维修与设计的紧密结合已成为大势所趋,这种结合必然导致维修设计DFM的产生。随着科技的发展,飞机维修的作用日趋综合化,飞机维修在航空装备的全寿命过程“从摇篮到坟墓”工程中应有更多的发言权与制约性。■

参考文献

1. 王宏济译. 维修性设计指导(维修性丛书). 昆仑出版社, 1988. 3
2. 章国栋等. 系统可靠性与维修性的分析与设计. 北京航空航天大学出版社, 1990. 7
3. 高柱. 飞机维修性设计. 国际航空, 1992. 6 pp 60~62
4. 王哲. 现代飞机结构维修性设计. 航空维修与工程, 2003. 1 pp 33~34
5. 陈文. 面向维修的飞机设计原则. 航空维修与工程, 2001. 6 p2
6. 弗兰克·杰克曼. 航空维修市场预测. 航空维修与工程, 2007. 3 pp s2~s3
7. 顾铮. 提高A380可维修性的设计思想和工艺方法. 航空科学技术, 2006. 2 pp 11~14
8. 黄宝军、谢钧. 浅析A380的维修状况. 中国民航学院学报, 2002. 7 Vol. 20 Suppl pp 5~8
9. 陈绍杰. 复合材料与A380客机. 航空制造技术, 2002. 9 pp 27~29
10. 路多. A380的液压与作动系统. 国际航空, 2006. 4 pp 72~73
11. 比尔布切尔. A380: 便于维修的“庞然大物”. 航空维修与工程, 2005. 4 pp 12~14
12. 比尔布切尔. 空中客车关注可靠性和维修成本. 航空维修与工程, 2004. 3 pp 12~13
13. 何德华、樊志章. 飞机维修思想的发展和应用. 国际航空, 2006. 9 p67
14. J. 莫布雷, 石磊、谷宁昌译. 以可靠性为中心的维修RCM. 机械工业出版社, 2000. 7
15. 张加圣、王海涛. 从波音777的CMCS看航空维修的发展方向. 航空维修与工程, 2000. 2 pp 25~26
16. 卡罗尔西弗林. 波音787维修进展. 航空维修与工程, 2007. 3 pp 10~12
17. 吴蔚、张宝珍. 飞机维修系统的演变. 航空维修与工程, 2007. 2 pp s5~s6
18. 成磊编译. 波音787维修数据的差别. 航空在线, 2007. 02. 25
19. 比尔布切尔. 新Embraer系列飞机的维修策略. 航空维修与工程, 2004. 5 No. 227 pp 17~18

