

高可靠性的保证

——HB 7089《航空电子设备完整性大纲要求》

王立群

(空军第一研究所)

摘要 在分析航空电子设备故障机理及常规可靠性设计为什么不能满足要求的基础上,说明了参照 MIL-A-87244A 制定的,提出了指导航空电子系统可靠性设计新方法的 HB 7089 的主要特点,如:采用损伤容限和耐久性设计、采用并行设计制造工艺、对关键设备进行预防性维修。HB 7089 的完整性设计要点为:定义使用环境,确定元件、零件和材料的特性,制定设计准则,对耐久性 & 损伤容限进行控制以及进行寿命管理等。我国应大力宣传 AVIP 的优越性,进行有关技术培训,推行系统工程方法等,以促进 AVIP 在航空工业的广泛实施。

关键词 航空电子设备 完整性大纲 可靠性 产品设计

1 航空电子设备完整性大纲的作用

1.1 常规可靠性设计的不足

海湾战争的史实证明,航空电子设备在现代战争中的作用日益重要。在美国,军事装备,其中包括航空电子设备的可靠性历来是以 MIL-STD-785《设备和系统研制与生产阶段的可靠性大纲》或与其相当的可靠性大纲来保证的。从 40 年代到 70 年代末,电子设备的可靠性虽然提高了几十倍,但仍然远远不能满足现代战争的需要。如就美军的战斗机来说,航空电子设备的修复性维修量一般占了飞机总维修量的 35%,超过了发动机所占的比例(25%);如果把发动机及飞行控制系统等中的航空电子设备的故障修复都算在一起,则维修量要占到 45%~50%。这种情况,严重影响了飞机的平时可用性和战时出动率。即使到 80 年代中期,按常规可靠性大纲设计的航空电子设备,其外场可更换单元(LRU)的平均故障间隔时间(MTBF)也只能达到 50~100 h。

为满足现代战争的需要,美国空军在 80 年代中期曾提出:到 1990 年,航空电子设备 LRU 的 MTBF 至少要达到 2 000 h,以达到在战争

的头 30 天中有 90% 的概率不会出现故障的目标。这样,战时飞机部署到无维修车间的野战机场时,就不必用 3 架次的 C-141B 运输机来空运航空电子设备的中继级维修车间,从而提高部署的机动性。

美国空军认为常规可靠性设计的不足在于:设计时假设电子设备的故障是随机性的;研制时对新设备中内在的初始缺陷认识与控制不够。根据故障是随机性的假设,电子设备的维修一般就采用事后维修方式,从而影响了安全或任务关键的电子设备的战备完好性。

但是后来的研究表明,电子设备的故障实际上是耗损性的。

1.2 电子设备的故障机理

以半导体和集成电路为主组成的现代航空电子设备与地面电子设备具有复杂的混合结构。如典型的印制板组装置,印制板是多层玻璃纤维环氧树脂片的叠合结构,板上有铜质电路和孔壁镀铜的孔,并焊有不同的元件(如扁平封装、双列直插封装的集成电路等)。研究表明,这样的结构中,不同材料的热膨胀系数和刚度有着相当大的差别,故存在着热和刚度失配问题。电子设备在使用中因开关循环、使用模

式变换和环境的影响,要产生低频热循环和高频振动循环。电子元器件在存在热与刚度失配和热与振动循环的环境下工作时,要承受相当大的交变热应力与振动应力,其典型的应力值可为飞机主要结构所允许应力的2~3倍。从断裂力学的观点来看,在新的电子元器件中不存在制造缺陷是不现实的。新元器件中的微观缺陷(裂纹)会在交变应力下扩展,最后形成疲劳破坏。因此,电子设备的一类主要故障是机械性疲劳,其中包括低频热疲劳和高频振动疲劳。另一类主要故障是化学性的,包括由潮湿、化学或生物因素引起的电介质老化、形成电解质和腐蚀。电介质老化和电解质形成会造成电路短路,而由腐蚀生成的高电阻薄膜会使电路通电不良。

由上可知,电子设备的故障机理主要是疲劳和腐蚀,故障主要是耗损性的而不是随机性的。过去之所以把它看成随机性的,主要原因在于:故障在时间、部位和程度上的分散性,以及没有深入考虑故障机理。下述的试验与部队实际使用情况都证明了上述结论是正确的。

70年代初,美国通用电气公司飞机实验室对制造过程受到严格控制的焊有扁平封装集成电路的印制板作了试验。试验中对其施加了综合热和振动的试验循环。在温度变化范围为 $-65\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下,当试验循环数少于570次时,无任何故障出现,但当超过570次时,孔壁的铜镀层就连续出现疲劳断裂。在温度变化范围缩小为 $-55\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,降低了热应力时,首次故障时间的出现延长到了1900次试验循环,连续出现疲劳破坏的部位也从孔壁铜镀层转移到了扁平封装的引线与印制板的焊点上。美国和日本的一些其他公司也作了类似试验,并得出了相似的结果。这些试验充分证明电子元器件的一类主要故障是疲劳破坏,是耗损性的。从美国空军部队的外场拆下的有故障电子LRU来看,大约有50%的元件或连接点上有疲劳裂纹。常见的疲劳破坏部位是在引线连接处、孔壁铜镀层、焊点和玻璃封焊处。另

外40%~50%的元器件上有腐蚀问题,即在连接器或其他部位上有高电阻薄膜。

1.3 完整性设计能使航空电子设备可靠性满足需要

鉴于航空电子设备故障机理同飞机结构故障机理的相似性和常规可靠性大纲的不够有效,为保证电子设备有足够的可靠性,美国空军借鉴飞机结构完整性大纲,于1986年制定了电子设备完整性大纲:MIL-A-87244《航空电子设备/(地面)电子设备完整性大纲(AVIP)要求》,1987年又将其改版为MIL-A-87244A,用于所有航空电子设备和地面电子设备的研制以及现役电子设备的重大改进。1988年,美军将AVIP应用于全球定位系统的数模转换器(GPS-DAC)、先进空中战术侦察系统(ATARS)、短距攻击导弹电子设备(SRAM2)等6种新型航空电子系统的研制和现役夜间低空导航与红外瞄准吊舱(LANTIRN)的改装,均使这些航空电子设备的可靠性满足了作战需要。如以MTBF计,LRU的MTBF达到了2000h以上。

我国航空工业标准HB 7089-94《航空电子设备完整性大纲要求》是借鉴MIL-A-87244A结合国情制定的,其性质、特点、主要内容和作用是同该美军标一样的。

2 AVIP的主要特点

航空电子设备完整性大纲(AVIP)是一种系统工程大纲,是对航空电子设备进行设计、分析、鉴定、生产和寿命周期管理的规范化程序,其目的是以最佳的寿命周期费用保证航空电子设备的完整性,从而提高其战备完好性。航空电子设备完整性是指航空电子设备在规定的使用条件和使用寿命期内能呈现的反映其效能的综合设计特性,它是设备的安全性、耐久性(可靠性的一种体现)、维修性、测试性和抢修性的综合。美国空军认为,AVIP同飞机结构、发动机结构和机械设备等的一族完整性大纲一起,是执行其《可靠性与维修性2000年行动计划》

的支持性大纲。美国国防部指示, AVIP 应与常规可靠性大纲并列, 作为电子设备可靠性(耐久性)设计的源文件。

AVIP 有以下主要特点:

(1) 采用损伤容限和耐久性设计

基于电子设备的故障机理类似于飞机结构的观点, AVIP 中也采用了飞机结构完整性大纲中用的损伤容限和耐久性设计。损伤容限是指电子设备在规定的无维修期内抵抗由制造或使用所致缺陷、裂纹或其他损伤所引起的失效的能力, 它是有关电子设备的安全性的; 耐久性是指电子设备在所安装的环境中, 在其修理费用少于更新费用的条件下, 能延续工作的能力, 它是有关电子设备的使用经济性的。

这些设计特性是确定性的, 而非概率性的。它们从最坏情况出发来确定材料的特性和设计应力/环境谱, 按疲劳和腐蚀的故障机理来控制使用应力与环境应力。其主要的设计参数是无故障工作时间和经济寿命; 在需要时(如合同要求时)也可给出 MTBF。

(2) 要求作严格的环境应力筛选

应对电子设备及其模块、组件、元件等逐层分别作环境应力筛选, 以保证研制中实际上已消除(消除 98% 以上)由于设计与制造不良所致的故障隐患, 以减小或避免在使用中发生故障。

(3) 并行设计制造工艺

AVIP 采用了并行工程, 除了并行设计安全性、耐久性、维修性、测试性等特性外, 还要求与硬件一起同步设计其制造工艺, 以保证所设计的特性不至于在制造中降低。

(4) 对关键设备采用预防性维修

AVIP 要求对事关安全关键和任务关键的电子设备的维修采用预防性维修方式, 即定时维修方式或视情维修方式。非关键电子设备可按经济性权衡结果和用户的保障条件来确定采用预防性维修方式还是事后维修方式。

(5) 具有高的费用效益比

应用 AVIP, 只需多花 10% ~ 20% 的电子

设备采购费, 就能大幅度提高其可靠性。以 MTBF 为例, 应用 AVIP 比用常规可靠性大纲提高 10 倍以上; 这样, 设备的效能可大大提高, 并且可以显著降低寿命周期费用。由此可知, 应用 AVIP 具有高的费用效益比。

(6) 标准的形式有利于革新研制途径

同 MIL-A-87244A 一样, HB 7089-94 是一种革新型的空格规范。它由正文和附录两部分组成。正文比较简单。在其“要求”和“验证要求”两章中, 在每项性能参数要求的后面都留出空格, 以便在签订研制合同时按具体需要和情况填入适当数据。附录比较详细, 不仅对正文中所提要求的原理、指南和经验作了详细说明, 而且还建议在空格中宜填入的具体数据。由于在这类规范中, 各项要求后面都留有需经订购方与承制方协商后填写的空格, 它的贯彻实施不仅有利于明确提出航空电子设备的各项战术技术性能指标, 并且能促进研制途径的革新。

3 完整性设计要点

HB 7089 的 AVIP 的实施包括准备设计资料、拟订初步计划、设计、验证与生产、进行寿命管理等 5 个阶段。其采用的损伤容限与耐久性设计的要点如下:

(1) 定义使用环境

要深入了解和确切定义航空电子设备及其所安装的飞行器的使用特点和使用环境。其做法是: 通过数据收集和现场调研收集飞行器的使用环境、任务组合与剖面、飞行包线等数据, 经分析与评估后修定拟研制的航空电子设备的合同规范, 然后按修定后的合同规范定义航空电子设备使用寿命期内的环境条件。这些条件包括各种温度循环的变化幅度、变化速率和循环数, 各振动水平的经历时间, 通电断电循环数, 以及其他一些事件(如弹射起飞、拦阻着陆、维修、搬运等)的环境条件。

(2) 确定元件、零件和材料的特性

确定电子设备中所用元件、零件和材料的

理化与生物特性,以建立设计准则和研制过程控制准则。确定的方法是收集现有的数据,不足时再作必要的试验来确定。这些特性的许用值,除了断裂韧性和裂纹扩展率可用均值以外,其余的要按最坏情况确定,一般用均值减去3倍标准离差的值。

(3) 制定设计准则

要对每个元件制定设计准则。这些准则实际上是考虑到环境条件、使用情况和产品质量等的不确定性而建立的降额使用准则,主要包括以下一些:

- a. 航空电子设备的设计使用寿命裕量(一般为2);
- b. 介电材料设计裕量,包括使用电压值、残余介电强度、绝缘材料的最大允许应变等3个参数的设计裕量(一般均为2);
- c. 导体的电流承载能力裕量(一般为2);
- d. 零件的设计应力值裕量(一般为2);
- e. 设备和零部件对静电放电的敏感性裕量应按有关规章(如美国按国防部手册 DOD-HDBK-263)的规定;
- f. 共振频率比裕量,各层次部件间的共振频率比要大于1.5(一般为2);
- g. 印制板修改/修理中允许切割和冲钻的次数应按有关标准(美国按 MIL-P-28809)的规定,超过时要有充足的论证理由。

这些准则是在定义使用环境和了解元件故障机理的基础上制定出来的。

(4) 耐久性控制

耐久性设计的一方面要求是,电子设备的经济寿命不应短于设计使用寿命,并且在此寿命期内尽量减少部件的修理或更换次数;另一方面要求是,所有事关安全或任务关键的航空电子设备和部件,都设计成有能满足最低要求的无故障工作时间。

耐久性由各种耐久性验证分析和试验予以控制。基本的分析工具包括计算机辅助有限元分析、有限差分析和人工分析技术。任何超过应力设计准则的零部件都要作附加的寿命评

估,并作必要的设计修改,以满足对使用寿命和无故障工作时间的要求。

(5) 损伤容限控制

损伤容限设计只用于事关安全或任务关键的航空电子设备。进行这项设计前首先要分析航空电子设备的故障后果,分析出现故障是否会影响载机的飞行安全或任务的完成。该项设计包括两个方面:一方面要使元件中的最大裂纹或缺陷在设备进行规定的维修之前不会扩展到临界尺寸;另一方面要制订一份电子设备预防性维修大纲(计划),以避免设备发生故障。在有的情况下,设备应设计有应力监控电路,或在载机中设计有时间-应力测定器,以监控设备的工作状况。

对于安全关键的航空电子设备,除了采用比任务关键设备更为严格的硬件设计和预防性维修措施以外,还应有余度设计,并确保设备不会发生事关安全性的单点失效。

(6) 质量控制

其主要措施如下:

- a. 选择好承制方,并监控所购元件和材料的质量;
- b. 严格执行有关规章(美国按 MIL-STD-1520、MIL-STD-535、MIL-Q-9858 等)中的质量保证条款;
- c. 与硬件设计同步设计制造工艺,以尽量减少产品在制造中偏离设计要求,其中要尽量采用标准的和成熟的制造工艺;
- d. 按设备的各层次严格进行环境应力筛选;
- e. 对安全或任务关键设备进行质量验证分析、演示或试验;
- f. 做电子设备的破坏试验,以鉴别易失效的元件或材料;
- g. 迅速采取纠正措施。

(7) 腐蚀预防和控制

详细分析使用环境对结构腐蚀的影响,应按最严酷环境条件来确定关键零部件的材料、制造工艺和防腐蚀措施,并尽可能准确预计腐

蚀生成率以便确定定期检查期限。特别要注意预防与控制关键接地点、电磁干扰点以及连接器上的腐蚀。上述措施要由详细的分析和试验来验证。

(8) 寿命管理

要按常规方法对航空电子设备进行维修性与测试性设计,以满足航空电子设备的维修性要求;用计算机辅助方法标识各种电缆、电线,以便于战时抢修。对事关安全或任务关键的航空电子设备应进行预防性维修,其中包括定期更换有寿命限制的零部件和视情检查其他零部件。目前一些国家正在开发适用的视情检查技术。当前常用的方法是参数裕量检测技术;还可望应用漏电和电源电路特征分析技术来检查 CMOS 集成电路的故障征兆。视情检查的首次检查期应等于无故障工作时间,复查期应与之相等或为其几分之一。部件在制造和修理中的脱焊重焊次数不能超过 6 次。

对于一种航空电子设备,使用中应记录其若干个工作应力参数,记录仪由承制方提供或利用载机的参数记录仪。承制方应与使用方商定需作记录的该种电子设备的数量,使得能在该设备形成初步作战能力后的 3 年内,反馈得到并确定其实际使用应力谱。承制方还应提供单台航空电子设备的应力跟踪装置(如参数记录仪、时间—应力测定器等),以便按照所设计的基准维修间隔期和每台电子设备的实际应力变化历程来确定每台电子设备的实际维修间隔期。

4 实施 AVIP 需要解决的问题

虽然实施 AVIP 的基本技术是综合应用已有的技术,而不需要开发新的技术,然而对我国来说,AVIP 毕竟是一项新事物,将其付诸实施,需要解决很多问题。笔者认为,为了能在我国航空领域有效地实施 HB 7089,当前需要做好如下几项主要工作:

(1) 宣传 AVIP 的优越性

要向工业部门、军队和有关厂所的领导和

技术部门宣传 AVIP 的优越性。说明实施 AVIP 是建立在正确认识航空电子设备故障机理之上的,考虑了影响应力与材料特性的最坏情况;要求对航空电子设备及其各层次都作严格的环境应力筛选,以便在研制中尽可能消除故障隐患,减少在使用中发生故障;能以最佳的寿命周期费用大幅度提高电子设备的可靠性,满足现代战争对战备完好性的需要。还应说明,AVIP 是常规可靠性大纲的发展,两者虽然方法不同,但目标是一致的,故可根据对电子设备的具体战术技术性能指标要求和研制约束条件来选择采用哪一类大纲。

(2) 培训有关技术

培训的主要内容如下:

a. AVIP 的管理程序与措施。如完整性要求的提出、控制与验证的程序,AVIP 计划的制定等;

b. 损伤容限与耐久性技术。如有限元分析、有限差分析、腐蚀防护与控制、寿命管理、预防性维修性大纲的制定技术等。

培训对象应包括管理人员和技术人员,培训内容应有不同的侧重点。

c. 贯彻并行工程。一方面应并行设计各项设计特性,另一方面在硬件设计的同时设计其制造工艺。后者对我国设计单位来说,是个新问题。

(3) 贯彻系统工程方法

要应用系统工程的原理与方法,恰当权衡与综合诸如功能、重量、安全性、可靠性(耐久性)、维修性、测试性、寿命周期费用、进度等各项主要的研制要素。与常规的可靠性大纲相比,应用 AVIP 可大幅度提高电子设备的可靠性,减少(对安全关键设备)或消除(对任务关键设备)其余度,但可能要增加设备的重量,故应按设备的关键性和对可靠性、重量、经济性等要求进行恰当的分析与权衡。

(4) 开发有利于实施 AVIP 的技术

虽然实施 AVIP 所需的基本技术是现有的,但是为了更有效地实施,还应积极开发一些

对 HB 7089—94 中几个问题的探讨

牛寅生

(六一三研究所)

摘要 HB 7089《航空电子设备完整性大纲要求》提出了一些新颖的概念,提供了一套科学的设计方法和管理程序,开辟了提高航空电子设备质量的新途径。概括介绍了航空电子设备完整性大纲的主要内容及其所要求的分析和试验工作。分析对比了完整性与可靠性在定义、属性、失效机理、故障模式、维修策略、分析和试验要求,以及完整性大纲与可靠性大纲在目标、要求、内容方面的主要差别。指出完整性和可靠性都是设备的一种特性,而前者涵盖了后者。编制、实施 AVIP 和可靠性大纲是提高航空电子设备质量的不同途径,对于任务和安全关键设备而言,实施 AVIP 效果更好。

关键词 航空电子设备 产品质量 完整性 可靠性 设计大纲

参照 MIL-A-87244A 编制的 HB 7089—94《航空电子设备完整性大纲要求》是一项重要的标准,它提出了一些崭新的概念、一套科学的设计方法和一种先进的管理程序,开辟了提高航空电子设备质量的新途径。它的目标是在降低寿命周期费用的同时,提高航空电子设备(以下简称设备)的工作完好性和任务成功率。美国空军已在一些设备研制中实施了航空电子设备完整性大纲(AVIP),并取得了显著的效果。为了尽快地、更好地实施 HB 7089—94,笔者现就该规范中的几个问题进行一些探讨,以期与关心该规范的同仁切磋。

1 AVIP 的主要内容

本规范只对 AVIP 规定了准确的定义,指出了明确的目标,给出了具体的应用指南,提出

有利于实施的辅助技术,例如,视情检查工作所需的状况监控技术、检验焊点焊接质量的技术等。

参考文献

1 MIL-A-87244A, Avionics/ Electronics Integrity Program Requirements, 1987

了编制和执行 AVIP 的要求和责任者——承制方,但没有集中、详细地规定 AVIP 的内容。通过对规范中有关内容的分析可归纳出其主要内容为:

- a. 总体计划(AIMP)和分计划;
- b. 各阶段工作和阶段计划;
- c. 各种分析和试验;
- d. 承制方和转承制方有关产品完整性方面应做的各项工作;
- e. 对 8 个重点问题的考虑。

2 AVIP 的分析和试验要求

在编制和执行 AVIP 过程中,需要进行大量的分析和试验工作,要求将这些分析和试验填入 AVIP“要求”部分(以下简称 AVIP 要求)相应空格中,并要纳入相应的分计划。这些分

- 2 J. C. Halpin. AVIP Air Force Thrust for Reliability. In: The Shock and Vibration Bulletin, Part 1, June, 1985
- 3 E. F. Pello. Implementing an AVIP, a Case Study. In: Naecon' 90, V. 3, P. 1028, 1990