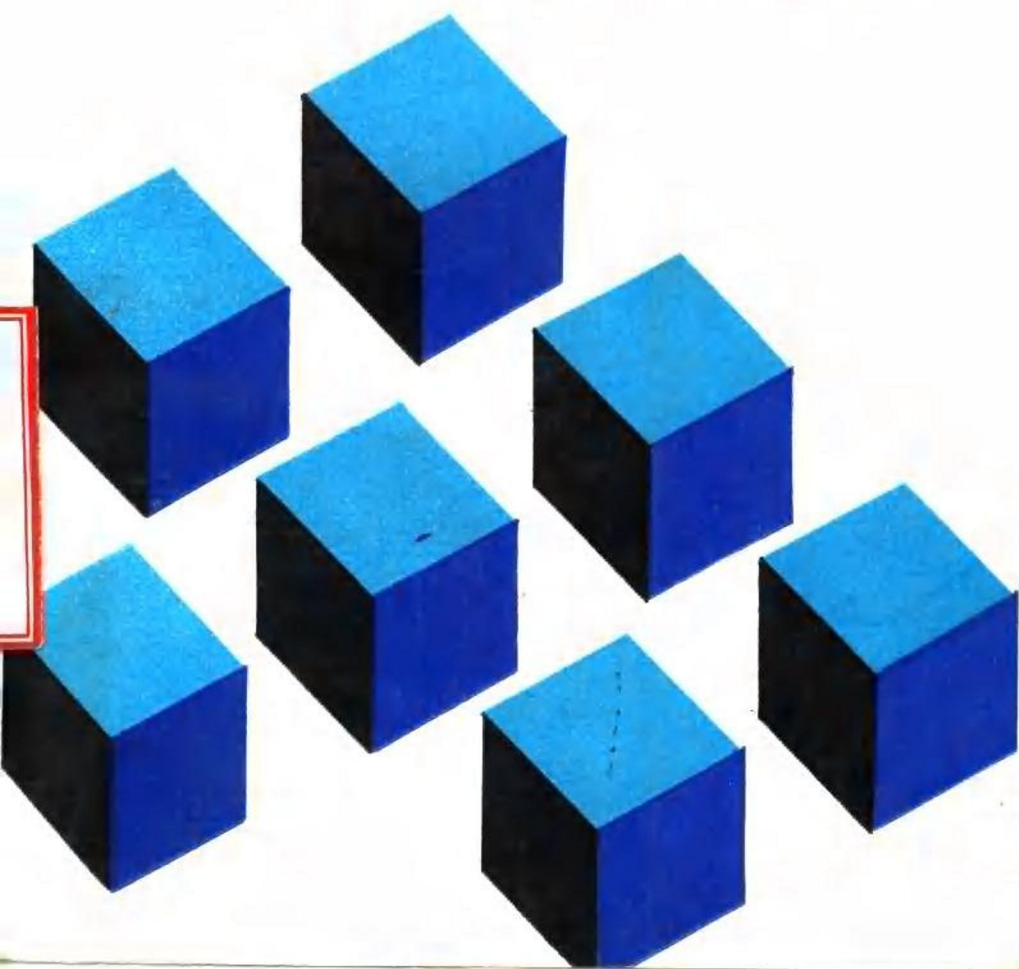


数字式 航空电子系统

〔美〕Cary R. Spitzer 著

航空工业出版社



数字式航空电子系统

〔美〕Cary R. Spitzer 著

陆润生 秦显忠 等译

顾维伦 校

金德琨 ~~审~~

航空工业出版社

《京》新登字161号

内 容 提 要

本书首次系统详尽地介绍数字式航空电子系统的设计、制造、试验、使用和维护。重点阐述系统综合技术,对于各种系统中的通用部分,如电源、总线和座舱显示也作了深入的分析。本书的另一特点是实用性,书中提供了大量经过验证的图、表和曲线并引用了各种实用的规范和标准。因此,本书对于从事航空电子系统研制的科技人员、高等院校师生以及有关管理部门都具有实际的参考价值。

数字式航空电子系统

〔美〕Cary R. Spitzer 著

陆润生 秦显忠 等译

顾维伦 校 金德琨 审

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

—邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售

航空工业出版社印刷厂印刷

1992年2月第1版

1992年2月第1次印刷

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 7.25

印数: 1—2 000

字数: 194千字

ISBN 7-80046-431-8/V·103

定价: 6.80 元

序 言

“航空电子”一词源于“航空”和“电子学”两词的结合，问世于1949年。这一独特的“行业电子”由于结合了航空的需求和电子工业的可能，自问世以来，就具有强大的生命力，并逐渐形成一个独立的学科。特别是70年代以来，由于微电子、计算机、控制论的发展使得“数字式航空电子”发展更为迅速。它不但促进了航空技术的发展，也促进了电子技术的发展。它所描述的设备和系统已从原来单纯的飞机附属设备发展成为现代飞机必不可少的组成之一。现代飞机由于采用了主动控制技术（ACT）可以使静不稳定性结构的飞机借助于飞行控制系统达到动态稳定并具有可操纵性，改变了经典的气动力设计，给飞机设计师们以更大的自由度。而主动控制的基本功能主要是在电传操纵（FBW）的支持下得以实现的。民用客机的飞行管理系统，根据飞机状态、飞行条件和控制指令，选择最佳飞行高度、速度和航迹，对飞机、发动机及各系统进行全面管理控制，是一个高度自动化的航空电子综合系统，能全面满足安全、舒适、经济要求。军用飞机的各种任务，无论是目标探测、识别、预警、制导、控制、通讯、对抗等等几乎都是靠航空电子系统来完成的。

数字式航空电子系统不但大大提高了飞机本身的性能，而且还扩大和提高了飞机完成任务的能力，使得飞机和以前相比具有不可思议的能力。所以人们习惯于把航空电子比喻为飞机的耳、目、大脑和神经。

近十年来，关于数字式航空电子系统的各种设计、制造、试验、安装及其技术要求、标准、规范，已出版了大量文献。该学科发展成熟的一个标志是，这方面的材料已能归纳综合成系统阐述数字式航空电子系统的书，本书肩负的正是这样的责任，从

这个意义上讲，它是数字式航空电子系统发展的一个重要里程碑。

本书的作者Cary R. Spitzer长期从事航空航天飞行器电子系统的综合设计工作，是航空电子领域内一位有影响的专家，是IEEE的高级会员。本书列举了大量数字式航空电子系统的实例，介绍了设计这类系统所需要的基本材料以及如何使用这些材料的实际提示。本书的重点在于如何按照任务需求，完成自上而下的顶层设计将各子系统综合成有效的大系统。而不是研究各个子系统的细节。本书偏重于工程应用，除了对任务需求、评审、制造、维修以及各类标准和规范做了详细介绍以外，还对实际设计中的诸问题，如和飞机的机械、电气、电磁接口，软件设计和调试、验证直至费用估算都做了大量介绍，不少实例取自于目前正在服役的机种，如F-16、F-18。鉴于飞行控制系统在其安全可靠方面有其独特的要求，故本书中将予以更大的注意。对其它各类任务型航空电子系统也做了大量介绍。相信本书的翻译出版对正在我国兴起的航空电子这一学科的发展，将会起到促进作用。

金德琨

1992.2于北京

目 录

序言.....	(I)
译者的话.....	(VI)
第一章 确定航空电子系统要求.....	(1)
飞机和它执行的任务推动航空电子系统设计.....	(1)
各种“性”的分析.....	(4)
军用规范MIL-F-9490要求的概况.....	(6)
FAR 25.672对飞控系统设计的影晌.....	(10)
何时,何地,由谁维修.....	(10)
确定与飞机的接口.....	(11)
第二章 航空电子系统的设计.....	(13)
系统结构的基本原理.....	(13)
数据总线选择.....	(15)
容错系统和硬件.....	(16)
容错软件.....	(19)
系统设计的评估.....	(21)
目前的和未来的结构实例.....	(24)
第三章 系统与飞机的配合.....	(32)
航空电子的外封装——ARINC型式.....	(33)
航空电子的外封装——(DOD-STD)型式.....	(36)
航空电子设备的冷却.....	(40)
EMI是一个真正的挑战.....	(42)
座舱布局.....	(47)
第四章 硬件评估与确认.....	(50)
联邦航空条例(FAR)——指导数字式	
民用航空电子系统的适航审定.....	(51)
故障树分析——一种业已证实	

且已被接受的技术	(57)
故障模式及其影响分析	(61)
危害度和损坏模式及影响分析	(65)
以计算机为基础的可靠性建模和预测	(70)
民机机载设备环境试验标准——RTCA DO-160	(73)
军用航空电子环境试验标准——	
MIL-STD-810	(76)
第五章 软件评估和验证	(78)
软件开发基本要素	(79)
DO-178要求做哪些工作	(82)
DOD-STD-2167为设计者提供依据	(87)
Ada高级语言	(92)
MIL-SID-1750标准化计算机指令	(95)
第六章 航空电子系统的基本要素 I：数据总线	(97)
MIL-STD-1553数据总线	(98)
ARINC-429数据总线	(106)
ARINC-629 数据总线	(115)
第七章 航空电子系统基本要素 II：座舱显示和	
输入/输出装置	(117)
CRT多用途显示装置	(117)
发光平板显示器	(123)
液晶显示器	(125)
显示器介质比较	(126)
多功能键盘节省空间并提供灵活性	(130)
平视显示器提供富有革新精神的选择	(131)
通信的另一种方法是语音交互系统	(134)
显示术语由深奥转为通俗	(136)
第八章 航空电子系统基本要素 III：电源	(137)
MIL-STD-704 适用于军用飞机	(138)

DO-160 规定了民用飞机的电源品质.....	(141)
军用与民用要求的比较.....	(145)
电源系统设计提示.....	(149)
第九章 使维修更方便.....	(152)
考虑到维修方便的设计.....	(153)
BITE和CFDS的巨大作用.....	(155)
自动测试设备加速维修.....	(158)
ATLAS: 一种重要的测试语言.....	(159)
远程诊断和维修支持.....	(161)
第十章 估算航空电子系统的费用.....	(162)
几个基本原则.....	(162)
民用航空电子系统的寿命期费用.....	(164)
民用航空电子系统的资金流动分析.....	(168)
军用航空电子系统的寿命期费用.....	(172)
软件费用.....	(173)
确定备件级别.....	(178)
附录A 术语.....	(181)
附录B 环境试验.....	(190)
附录C 软件文件编制说明.....	(204)

第一章 确定航空电子系统要求

每一个完成既定任务的航空电子系统的基础在于有一个明确的性能要求定义。如果设计者一开始对系统要完成什么任务只有一个模糊的不完整的概念，他就不可能制造出一个使用户和操作人员都满意的系统。本章讨论系统性能要求的制定，它建立在对用户的需求和航空电子系统设计的某些基本原则的应用有清晰了解的基础上。

在制定航空电子系统要求时，载机及其完成的任务是最重要的因素。设计师必须知道如何把这些因素分解到各个部分，从而确切了解它们对制定数字式航空电子系统要求的影响。

可靠性、可维修性、可承受性、生存率、合格审定性等各种“性”也是制定航空电子系统要求时要考虑的因素。一个好的设计师应清楚地认识到在一张冗长的清单上每个“性”的重要性。

有许多标准、规范、特性是设计航空电子系统时必须遵循的要求。其中有两个文件特别重要：一个是MIL-F-9490《有人驾驶飞机飞控系统、安装和测试通用规范》；另一个是FAR25.672《增稳、自动系统和动力操纵系统》。这两个文件对航空电子系统特别是飞控系统提出许多要求，开始设计前设计者必须要充分了解这些要求。

本章最后讨论在设计开始阶段有时得不到足够重视的维修和与飞机接口两个专题。早期阶段对这两个问题的忽略，在后来的系统开发和使用阶段几乎肯定要引起麻烦。

飞机和它执行的任务推动 航空电子系统设计

设计一个数字式航空电子系统的起点是清楚地了解飞机对装

于其上的航空电子系统提出的必须要满足的要求。如果不清楚地了解这些要求，则该系统决不会达到它所预期的性能。

为了确定飞机对航空电子系统设计的影响，必须要分析研究飞机所执行的任务。例如对维修小时与飞行小时之比、平均故障间隔时间（MTBF）这类性能要求必须分析研究。如果可能和合适的话，把这些要求分配给装在飞机上的各个系统。还必须指出，某些性能要求也会影响到航空电子系统的地面支持设备的设计，特别是像平均修复时间和地面再次出动准备时间这类要求。

下面给出从任务需求导出航空电子系统要求的过程：

任务

任务段

——滑行

——起飞

——爬升

——巡航

等等

任务段要求（典型值）

——起飞场地长度 <1524 米

——旅客舱的加速度 $<0.2g$

——横滚速率 ≥ 90 度/秒

等等

航空电子系统要求（典型值）

——故障概率 $\leq 10^{-9}$ /飞行小时

——迎角敏感速率 ≥ 20 度/秒

设计过程由采用自上而下的分析飞机任务开始。如果要求飞机飞行若干个类型的任务，可以把要求最高的任务选为基准，其它可能的任务作为对基准任务附加的任务来处理。再把基准任务分成若干段，每段都要经过详细分析，从而制定出航空电子系统

的要求。

不管飞机是用来执行军事还是民用任务，共同任务段包括滑行、起飞、爬升、巡航、下降、着陆和滑跑。对于军用飞机，可能还有其它任务段，如低空突防、空/空格斗、空/地攻击和侦察。为制定航空电子系统的性能要求，应把每一飞行段都置于合理的水平来研究。典型巡航段对飞行控制航空电子系统的要求可能包括姿态、高度、马赫数保持，阵风减缓，改善乘坐品质和导航。在执行典型的军用任务比如空战时，对航空电子系统的要求可能包括目标距离、距离变化率及方位角等的测量。这些要求必须用定量的明确的术语来表示。

在给定任务段内飞机飞行的时间必须精确地规定，因为它对航空电子系统设计有很大的影响。例如最后进场和着陆段用较短时间就意味着自动着陆系统工作时间短，这个短工作时间就成为计算自动着陆系统失效率的一个主要因素。类似地，对高性能军用飞机，通常空战段所用的时间很短，但对只在这一段上使用的设备的预期的失效率有很大影响。反之，如果飞机在超音速巡航段长时间飞行，蒙皮温度可能很高，因而使附近的航空电子设备受热。

影响航空电子系统设计的许多要求不一定直接与飞机任务有关。为了达到最大的生产效率、有效性、减少寿命期费用和拥有费用，通常用户在利用率和维修范围内会提出一些附加的要求。例如民用飞机的出航可靠性，军用飞机的任务完成率，维修小时与飞行小时之比，平均故障间隔时间和地面维修时间等。

重要的是对任务和性能要求要通过专家评审，如果错误理解它们对航空电子系统设计的影响，会导致以后要以高昂的代价来重新修正设计。

对所有要求的分析中，可追踪性是必须的。每一个设计阶段的要求必须可追踪至下一个设计阶段的要求。当某个要求难以满足时，这种可追踪性就变得特别有价值。了解这些要求的来源，

有可能导致修改某些要求，以使这些要求更便于实现。

各种“性”的分析

每一个专业都有它的缩写和简称。数字式航空电子系统则更进一步，以各种“性”作为度量。数字式航空电子系统有许多“性”，由于它们被视为确定系统设计的重要衡量标准，所以及早研究它们是有用的，每种“性”的重要程度取决于系统的设计和应用。

最重要的“性”是能力，航空电子系统有什么样的能力？它们能否完成任务甚至完成得更多？系统设计师的任务是在受到各种约束条件的情况下使系统有最大的能力。

其次，重要的和熟悉的两个“性”是可靠性和可维修性。可靠性的重要性是众所周知的，每个设计师都力求使得系统尽可能地可靠，因为通常高可靠性使维修费用降低。然而有时也并不完全这样。有可能设计师可以花费大量时间采用高可靠性的部件进行高可靠性的设计，但却导致系统的开发和购置费用过高，尽管有这种风险，可靠性对设计师来说仍作为第二个最重要的因素来考虑。

对于设计者来说，可维修性的重要性仅次于可靠性。能够容易维修的系统对运行费用和寿命期费用有很大影响。为了更好地完成任务，系统必须具有可维修性。

可达性、可测试性和可修复性都和可维修性有关系。由于所有航空电子系统有时都需要维修和修理，所以可达性也是一个重要设计因素。航空电子系统必须可达以保证快速和正确地修复。还需要考虑，航空电子系统必须设计成可测试的和可修理的。特别是在外场，这些因素必须特别强调。机内自检（BIT）具有许多潜在的益处，但必须仔细设计以保证能可靠和可信赖地工作。可维修性和可达性在本书的后面还要讲到。

可靠和可维修的系统将有更好的可用性。军用和民用飞机的用户特别注意飞机的可用性，因为它是任务有效性的主要决定因素，经常修理或需长时间修理的飞机是不利于执行任务的，因为这些飞机不能可靠地用于飞行。

可承受性是成本的另一种叫法。随着航空电子系统的能力和重要性的增长，它们的成本也在逐步提高，因而，航空电子系统的费用越来越多地受到注意。在设计、研制、购置和运行费用之间将有许多折衷选择。

与可承受性密切相关的是互换性和兼容性。因为具有这些属性的系统一般都是较可承受的，即使通常它们不是主要的出发点，但只要能保证不牺牲其它更重要的性能特性，应该尽量考虑与以前的或其它同类系统有互换性和兼容性。可改装性——一个新设计的设备代替性能较差的老设备，成功地安装在飞机上运行的能力也属于这一类，虽然也有为改装应用而专门设计的设备。

航空电子系统设计始终就有一个可支援性问题。支援费用是系统运行费用中的一个主要部分，只要可能，设计时应该采用和其它系统通用的零部件和支援设备，使支援设备费用分摊到几个系统上，良好的系统设计原则要求不使用昂贵的、难以保持库存的或在系统投入使用若干年后会有淘汰危险的、异常的或特殊的线路及零部件。

数字式航空电子系统还有三种固有的重要的“性”：灵活性、适应性和可编程性。这些“性”来源于驱动数字硬件工作的软件。数字式航空电子系统就如设计者所想象的、计算机存储器所允许的那样具有很大的灵活性、适应性和可编程性。在航空电子系统中，软件的重要性与硬件相同，近几年航空电子的软件已经是决定系统费用的最重要因素之一，关于软件将在以后章节讨论。

与“性”有紧密关系的还有生存性、易损性、敏感度，三者同等重要。虽然这些术语通常用在一般性的文章中，但在此赋

有特殊的意义，这个问题将在第四章研究。按照定义，一个具有生存性的系统在非核威胁的情况下能继续工作。生存性要通过仔细考虑飞行任务剖面和系统防护设施等许多因素才能获得。易损性要求考虑余度和容错。

适航审定是民用飞机航空电子系统的一个特别重要的问题。每一个民机航空电子系统，在它进入飞行服务之前，必须按飞机登记所在国所建立的严格条例进行适航审定^①，如果不能满足适航条例的性能要求，即使一个系统设计得前所未有的好，它也不能安装在飞机上。

军用规范 MIL-F-9490 要求的概况

军用规范 MIL-F-9490《有人驾驶飞机飞控系统 设计、安装和测试 通用规范》是数字式航空电子系统用于美国空军飞机和旋翼式飞机飞控系统的一个基本规范。如名称所示，9490是一个通用规范，可用于机械式、模拟式和数字式等各类飞控系统，当然本节只针对所选择的通用要求及其对数字式飞控系统的特殊要求。由于飞控系统可能是应用数字式航空电子要求最高的系统，所以9490包含了不少极其严格的要求。

MIL-F-9490规定的若干个定义一般在有关电子设备规范中找不到，飞控系统有五种工作状态，概述如下：

工作状态 I 正常工作状态。

工作状态 II 有限制的工作状态。整个飞控系统非关键部位降级工作或失效，乘员工作负荷适度增加，或降低任务有效性，但任务能完成。

工作状态 III 最低限度的安全工作状态。降低飞控系统性

注：① 在美国，对民用航空的管理和适航证颁发单位是联邦航空局（FAA）。在英国是民用航空局（CAA）。在法国是民航总局（DGAC）。在其它国家发证机构有不同名称，本书中FAA一般被解释为相应的国家级的管理和发证单位。

能、安全性或可靠性。乘员工作负荷大幅度增加或急骤降低任务有效性，能安全返回并在原来预定的地点或其它地点着陆。

工作状态Ⅳ 能控制到应急（立即）着陆状态。

工作状态Ⅴ 能控制到可退出飞行状态。

9490还进一步制定了一组危害度分类定义。这些定义与FAR 25.1309（参看第四章）中类似术语的定义是不一致的，所以规定这些术语（特别是“基本”术语）的使用是非常重要的。

基本状态：如果它的丧失使飞控系统的性能下降到工作状态Ⅲ以下，则这种状态称之为基本状态。

飞行阶段基本状态：除了它只用于特定的飞行阶段外，其它和上述的基本状态相同。

非关键的状态：功能丧失不影响飞行安全或控制能力的降低不超出工作状态Ⅲ的要求。

在飞控系统中用类似于FAR 25.1309的方式采用术语“极少的”描述其失效概率。失效概率的精确值取决于飞机种类：

重型轰炸机、运输机、运货机和空中加油机：

$$\leq 5 \times 10^{-7} / \text{小时}$$

旋翼机： $\leq 25 \times 10^{-7} / \text{小时}$

其它飞机： $\leq 100 \times 10^{-7} / \text{小时}$

在某些地方，此规范非常清晰、易懂，例如§3.1.3中所述那样：“飞控系统应该尽可能简单、直接、易于操作，与整个系统的要求相一致。”§3.1.3.4中所述：“所有系统的配置应满足本范围的可靠性、不易损性、对抗失效性和其它通用要求。”这些陈述也许是在任何军用规范里能找到的最好的设计忠告，它们几乎可以用于任何硬件。由于9490的许多要求也是所有航空电子系统的最佳设计目标，所以它们通常以修改过的形式用于本书的始终。但是在本节中，对这些共同的要求将加以说明，使得对9490有一个概要了解。

“生存性”和“不易损性”是9490和本章前文讨论过的“性”

中突出的两个。生存性要求在发动机推力不足的情况下，飞控系统应能至少保持在工作状态Ⅲ的性能。

不易损性对系统设计提出更高的要求。根据9490，对于许多外部不可预测事件，飞控系统性能不同程度的降低是允许的，这些不可预测事件包括自然的和诱发的环境、雷电、大气静电或机上其它系统失效、维修人员或机组人员没有操作或操作出错以及危害物的作用。

在外界诱发环境方面，MIL-E-6051《系统的电磁兼容要求》，MIL-STD-461《设备的电磁干扰特性要求》，对于飞控系统在产生和容忍电磁干扰（EMI）方面提出详细的要求。MIL-STD-461的某些要求将在第三章研究。对任何外界诱发环境，飞控系统至少具有保持“工作状态Ⅰ”的工作能力，暂时降到“工作状态Ⅳ”也是允许的。

当存在雷电或大气静电的情况下，飞控系统必须具有保持“工作状态Ⅰ”的工作能力，在直接受雷击时，可暂时降到“工作状态Ⅲ”工作。

“其它机载系统失效的”不测事件，汇集了更多的要求。在双发动机飞机中关键的发动机失效，或在具有三个或更多个发动机的飞机中有二个以上发动机失效时，飞控系统至少必须具有保持在“工作状态Ⅲ”的工作能力。万一像讨论易损性那样，发动机推力完全丧失，“工作状态Ⅲ”的能力是除“工作状态Ⅳ”的要求以外还应具有的。其它严格要求包括：

（1）对重型轰炸机、运输机、运货机和加油机，当发动机或其它旋转部件爆炸时，飞控系统性能在工作状态Ⅳ以下遭受损失的概率应该极小（ $< 5 \times 10^{-7}$ /飞行小时）；

（2）对其它飞机，相同的损失概率适用于工作状态Ⅴ。对由于敌方活动引起的不测事件，如采购方所定义的，一次作战中最少在一次遭遇中受到一次威胁，不易损性要求飞控系统至少保持在工作状态Ⅲ下继续工作。为满足这个要求，主结构部件应能

提供必要的防护。

除了允许以上讨论的各种不测事件带来的要求以外，9490对飞控系统还有其它一些值得注意的要求，例如，多路数据总线必须符合MIL-STD-1553（参看第六章对这个标准的讨论）。正确的设计要求采用余度数据总线，在电气上和空间上尽可能隔离。只有一根总线，容易因某一事件（虽这一事件的发生的概率极小）引起损坏而失效。

大多数设计师喜欢把最新的已被证明可用的技术用到航空电子系统的设计中去，然而在许多情况下，9490要求新技术在用于系统的重要部件之前，必须有专门的批准，属于这条规定的某些新技术有：数据的光传输介质、非液压控制的伺服作动器（机电式、马达—泵伺服作动器和气动式）。

当关键的或飞行阶段关键的部件与非关键部件交连时，应具有隔离和分离措施，以使得共模失效的传播概率极小。

MIL-F-9490承认设备扩展功能是必要的，这些功能保证飞控系统能够充分利用数字式系统的固有灵活性和可扩展性的优点。但只有以下两条成立时，飞机才可能为订购方所接受：

（1）飞控系统在最坏情况下，完成全部计算所用的时间不超过总的可利用时间的75%；

（2）所用的存储容量应不大于可利用的总容量的80%。计算和采样率必须使得它们不致引起不能接受的相移、舍入误差、非线性特性或虚假信号进入系统响应范围。

对于高机动性的飞机，飞控系统的预热时间应该是90秒或更小，对其它类型的飞机，应该为3分钟或更小。

由于飞控系统是一个关键系统，所以它的研制计划必须交给订购方供评审和批准。全部计划应该包括以下内容：

- （1）一个详细里程碑网络图；
- （2）综合和分解计划；
- （3）检验计划；