

抗辐照加固技术文集

计 算 机 专 集

第 四 分 册

航天工业部七七一研究所

抗辐照加固技术文集

计算机专集

第四分册

航空航天部、七七一所、情报资料室

一九八九年四月

目 录

1、抗辐照加固计算机的发展-----	(1)
2、容错计算机的发展概况-----	(30)
3、用于 MTL - STD - 1750 A 计算机的双工艺抗辐照 电路系列-----	(41)
4、瞬态故障保护结构的设计方法-----	(51)
5、容错系统的设计和评估工具-----	(63)
6、作为多处理机基础的 R I S C 结构-----	(86)

抗辐照加固计算机的发展

一、引言

随着微电子技术的迅速发展,计算机已广泛用于航天事业和各种类型的武器系统。战争环境对计算机的各种抗干扰能力要求十分严格。弹载计算机的应用和发展不仅面临着苛刻的使用条件,而且要求计算机在核爆炸环境中具有突防生存能力。多年来美国及一些其它国家采用了种种加固措施来保证空间计算机系统具有一定的突防能力要求。

加固型计算机的发展首先是从各种机载计算机开始的,尔后,随着各类武器系统的研制,出现了能够满足各类系统要求的抗恶劣环境的加固型计算机。五十年代末,导弹与宇宙飞船对微小型弹载导航和制导计算机的要求促进了微电子技术的发展,出现了集成电路。六十年代末,军用加固型计算机有了较大的进步。67年列入美国空军和海军装备的军用加固型计算机就达67种之多,从各种火控系统到海军战术数据系统NTDS及大型导弹武器的宙斯盾AEGIS系统都装备了大量的加固型计算机。七十年代初,一些技术先进的国家开始对加固型计算机进行系列化、标准化工作,同时走与国际优选系列兼容的道路,从而大大促进了加固型计算机的发展。

二、恶劣环境对计算机的要求

宇航与空间开发，航海与海洋开发，野外作业与石油地矿勘探，核能利用与气象预测，铁路运输与冶炼等都需要使用计算机。这些方面使用的计算机大都在机载、舰载、车载等特定条件下工作，同时还会受高低温气候、颤震、冲击、高低压的影响，一般室内用的计算机只能望尘莫及，只有经过特殊技术处理的各类加固型计算机才能在上述应用领域正常工作。

军事应用。各类战场上部署计算机。军事环境极其恶劣，温差变化达几十度以上，地形凸凹不平，空气严重污染。一般计算机很难在战场上发挥作用。现代战争中的核爆炸是最恶劣的环境，唯有经过特殊抗辐射加固处理的计算机才能为用户提供取胜的信息。

随着现代科技的发展，“保密”问题日趋重要。计算机工作时会产生电磁辐射，尤其在视频显示装置上辐射波最强。在远离辐射源一公里之内都能收到辐射信息并能复原。有保密要求的部门使用的计算机系统必须采用一定的加固措施（防辐射、防冲击、防泄露），才能确保计算机正常工作。

1、恶劣环境

核辐射环境是目前存在的恶劣的环境。太空环境和核爆炸周围的环境是相当复杂的。这里重点强调对计算机影响很大的那些环境：

捕获辐射

带电粒子在地球磁性区域被捕获，形成 Van Allen 带。这

个带是由高能电子、质子和轻离子组成。这些带电粒子在地球磁场中盘旋。电子能量可达到甚至超过5 Mev，质子能量可超过500 MeV。Van Allen 带给宇宙飞行器造成了很宽的自然辐照环境。这个环境与宇宙飞行器的轨道和飞行周期有关。例如，在地球同步轨道中，电子的通量可能是 $10^5 / \text{cm}^2 / \text{sec}$ (能量超过1 MeV的电子)。

宇宙射线和日辉

宇宙射线是高能光线和高离子流。它们起源于太阳系之外。计算机可能受到影响的宇宙射线的通量在太空中大约为60粒子/ m^2 / sec 。日辉是等离子体、X-射线、高能质子、 α 粒子和重粒子的源泉。特别是质子和重离子可以穿透航天飞机的计算机。日辉质子能在高空飞机中产生相当可观的辐照环境。由于地磁场的聚焦效应和高能质子的穿透能力，在极面航线上，这是一个特别关心的问题。每十年可能发生一两次具有强质子流级别的日辉环境。

核爆炸

核爆炸有两种基本类型，裂变型和聚变型。像铀那样的元素被分裂时产生裂变型核爆炸。重氢同位素聚变时就产生聚变型核爆炸。在两种情况下，产生的产物有 γ -射线、X-射线、中子流以及放射性离子流。

核爆炸产物在太空中飞行不受任何阻碍，它可能击中航天飞机，也可能穿透航天飞机。一次核爆炸能产生M (10^6) 吨级的能量 (TNT的等效能量级别)，能在几千公里的距离内造成极恶劣的环境。在太空中的核爆炸，可能形成人造Van Allen电子带，这个

人造 Van Allen 带将延续几天到几年。

对于太空环境来说，大气层中的核爆炸产生的影响是缓和的。

X-射线很快被大气吸收。但是，中子流和 γ 射线有更强的穿透能力，它们在大气层中的最大穿透范围为10英里。由磁脉冲和猛烈传播的无线电波都是由核爆炸产生的优先向外传播的电荷产生的。100 km以外的核爆炸能产生最强烈的电磁脉冲，这种电磁脉冲(EMP)在几百平方公里的范围内其大小为50 KV/厘米。

2. 核环境产生的各种效应

核效应可两大类：瞬时衰减或长期衰减。由X-射线、宇宙射线及中子流引起的效应是瞬时衰减效应。瞬时衰减效应持续时间一般为几个毫微秒到几十个毫微秒，这与半导体器件制作工艺有关。长期效应一般持续几秒钟到几年时间。这种衰减效应是持久性的。瞬态效应有下列几种：

光电流：这种电流能使半导体器件在不该导通时导通。

翻转：存储单元或逻辑状态因核爆炸剂量率而引起触发。

单粒子效应：由于单个高能粒子（一般指重离子）通过而产生光电流效应引起逻辑状态或存储单元翻转。

门锁效应：离子化辐射脉冲使正常情况下应该截止的寄生结电路导通。然后，正反馈状态导致光电流，从而可能导致器件毁坏。

系统生成电磁脉冲：在电缆线或设备结构中系统生成的电磁脉冲场和电流。由于X-射线脉冲作用，在系统或设备中生成这种电磁脉冲。

烧坏：由于离子化、光电流以及系统生成电磁脉冲补充电流的积

分效应而引起半导体器件损坏。

核环境产生的长期效应有下列几种：

离子化损伤：离子化结果造成的损伤，例如造成O₃管的阈值电压漂移。

体损伤：造成少数载流子寿命缩短。这种效应使双极晶体管增益减小。

3、辐照环境对计算机设计的要求

辐照环境中使用的计算机必须具有辐照耐久性并能适合它们系统飞行的性能要求。飞行状态的导弹核武器系统或卫星中的固体器件、计算机系统、控制系统和电源系统对恶劣环境下的 γ 辐射累积剂量、中子注量是比较敏感的。对于造成瞬态效应的 γ 辐射剂量率更为敏感。核爆炸产生影响的时间标准（通过和恢复时间）与系统功能及临界特性有关，它强烈地影响着设计的实现途径。在确定性能要求和设计容限（余量）的时候，如果没有很好考虑和理解许多辐照影响问题，会造成设计余量过大或过小。核爆炸环境对性能的要求常常表示成模拟器环境中通过所需合格鉴定试验。在宇宙飞船应用中要增加对自主权容限和容错的要求，这些要求进一步约束了计算机的体系结构，必须对每一种性能要求进行仔细平衡，以满足在整个飞行过程中所需的功能。

4、核环境对电子器件设计的影响

衰变过程：部件在核环境中会衰变，其衰变程度与半导体工艺、有效辐照屏蔽以及各种核环境强度等级密切相关，最终的设计办法是将辐照屏蔽、部件选择以及保守电路设计综合起来考虑。

单粒子效应：存储器元件对单粒子效应（SEU）的灵敏程度取决于偏置电压、半导体工艺以及器件几何结构。对于几何尺寸较大的O M O S存储元件来说，单粒子效应灵敏性问题不是个主要问题，然而，随着器件几何尺寸的减小，象L S I和V L S I存储器那样的几何尺寸，单粒子效应灵敏性问题越来越受到重视。所采取的办法是：选择零部件、计算机体系结构设计。在设计约束允许的地方，采用高偏置电压下工作的大尺寸部件或S O S部件。大的L S I存储器需要自错误校正逻辑。关键性功能需要有多数表决的三重冗余。

光电流烧毁：光电流烧毁通过耐电流极限来避免。特殊电路例如电源电路会因光电流而严重退化，在有些特殊电路中采用超尺寸部件或更加微妙的设计措施来防止烧毁。为了实现光电流烧毁保护，一般的L S T T L逻辑板的功耗增加6%。

接口烧毁：S E E D P保护是通过给所有的输入/输出引脚加上终端保护器件的办法来实现的。一般的终端保护器件是齐纳二极管、电阻、MOV等器件及各种电容。这样一来，虽然每个接口电路的功率很少受影响，但是给封装造成了一定的麻烦。输入/输出电路对电磁脉冲的防护受电缆屏蔽和终端保护器件综合效果的影响。如果系统结构和电缆屏蔽能使电磁脉冲减弱到足够小的程度，那么，就不需要终端保护器件。

翻转恢复：核辐照损伤后恢复原状是系统体系结构设计中的一个重要问题。核事件的恢复有两个重要途径：一是把核环境屏蔽至逻辑翻转水平之下。二是在不能进行屏蔽的地方防止逻辑翻转的发生。

辐照剂量率在 10^7 拉特/秒以上时，大多数存储器器件都单发

生翻转。只有CMOS/SOS器件在 10^{10} 拉德/秒辐照下不会翻转。如果能够用屏蔽方式把环境屏蔽至器件翻转剂量率以下，那么就不需要进一步采取防护措施。在采取了防止翻转措施的设计中，并入了一个电路来探测剂量率是否高到足以发生逻辑翻转的程度。这个电路叫“翻转事件探测器”。当“翻转事件探测器”关闭时，恢复程序就被启动。事件信号常常作为“电源开”复位对待。在计算过程包含积分式或依赖于时间历史的地方，需要采用非易失性存储器，如涂复金属线、磁芯或磁泡那样的磁性存储器。关键性的控制状态可以存储在封锁继电器中或存入防翻转触发器中。

门锁：J I I O 中的门锁效应会引起功能丧失或器件烧毁。对付门锁问题所采取的设计途径包括电源选通、部件挑选、部件筛选和分析。电源选通是防止门锁损伤的一种方法，这就要求电源电路在损伤之前去掉电源，以后再重新启动。电介质隔离的集成电路（D I I O）能消除寄生的衬底SCR作用而不会产生门锁效应，但该电路的可获性受到限制。J I I O 型电路的门锁率较低，一般低于1%。可采用闪光式X射线机来进行100%筛选以消除各种门锁。

三、加固型计算机的分类

目前国际上对加固计算机尚无统一的分类方法，一些发达的国家（如美国）将加固型计算机分成三类：

1、全加固型计算机（Ⅲ型）（Fully Hardened）。全加固型计算机能承受恶劣的环境条件、耐高低温、抗震动防冲击；耐潮湿抗噪声，防霉菌；耐雨淋、抗日光辐照，防可爆炸气体。可以在地

面、海上、空中使用。此外还要求它在电磁干扰和核辐照的恶劣环境中仍能稳定可靠地工作。它是加固型计算机中要求最高的机型。全加固型计算机的主要技术指标如下：

使用工作温度： $-45^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ ；

贮存运输温度： $-45^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ；

潮 热： $+50^{\circ}\text{C}$ ，92%~98%；

振 动： $10\text{Hz}\sim2000\text{Hz}$ ，10g三个方向。每个方向两次，共14分钟。

冲 击：峰值50g，持续时间11ms，半正弦波每面各三次。

高 心： $11\sim100\text{g}$ ，6个面，每面1~5分钟。

全加固型计算机除满足以上环境条件之外，还要求符合美国国防电子产品测试认证的美国国防部PES标准 and 宇宙飞行抗辐照的特殊要求。

2、部分加固型计算机（R型），也叫半加固型计算机。根据使用环境不同，一般分为地面固定式、车载、舰载、机载等加固机型。它具有较好的抗震、耐高低温和耐潮湿性能，可以用于装备陆军指挥系统、火炮指挥系统、空、海军地面指挥系统、装甲兵指挥系统、铁道部队地面指挥系统。同时也可以用于石油钻井、地质勘探、煤矿井下等野外恶劣环境。其主要技术指标如下：

使用工作温度： $-20^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$

贮存运输温度： $-40^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$

潮 热： $+50^{\circ}\text{C}$ 92%~98%

振动强度：扫描振动为 $2 \sim 10 \text{ Hz}$ （振幅 10 mm ）

$10 \sim 500 \text{ Hz}$ （加速度 5 g ）

随机振动 3 g （RMS）

冲击：峰值加速度 30 g ，冲击 300 次

运输：铁路： 10000 公里（时速 $80 \sim 100$ 公里/小时）

公路： 1500 公里（ $3 \sim 4$ 级公路，时速 $30 \sim 40$ 公里/小时）

3、抑制散射型（T型）计算机

任何电子设备在工作时都会散发泄露各种寄生电信号或机械噪声，局外人可根据电信号与噪声分析出输入输出以及存储的内容。在某些场合使用的电子产品除要满足抗恶劣环境条件外，还需要有一定的保密性。70年代，美国国家安全局制定了TEMPEST标准，解决噪声控制和抑制标准问题。具有符合TEMPEST标准的计算机及其外部设备并不完全具备E、R两类加固型计算机的加固功能，但有些计算机系统采用防噪声泄露或抑制措施是很有必要的。

四、加固型计算机的特点

1、高可靠

对于加固型计算机来说，能长时间高可靠地工作是它的主要特点。一般要能经受严寒、湿热、盐油雾、高低温冲击、霉菌、生物蛀虫的侵蚀。大部能在曝晒雨淋、狂风雷电、飞砂走石、波涛翻滚的恶劣环境下正常工作。另外还要在诸如机载、舰载、车载平台条件苛刻的环

境下能经受机械冲击、振动、摇摆颠、离心加速度、低气压、噪声和电磁干扰及核电磁辐照的影响。

2、高可靠

加固型计算机工作条件恶劣，空间狭小，对其体积、重量、功耗等都有严格的限制。另外由于条件恶劣，操作人员精力和体力消耗极大，要求加固机操作简单，便于维护。野战使用的计算机由于战场的需要，必须能在极短的时间内排除故障。舰载计算机经常离岸时间长达半年之久，所以必须便于维修，否则出了故障，后果不堪设想。

3、有较强的实时处理能力

加固型计算机由于在恶劣环境中使用，应具有中断响应时间短、运算处理速度快、数据传输率高的实时处理功能。尤其是现代航天飞行器、导弹、飞机、舰艇的飞速发展以及各类武器系统相关联的各种传感器如雷达、通讯、导航、声纳、光电跟踪等的技术发展，使武器系统越来越复杂，威胁程度大幅度增加。因而要求实时计算机系统能对来自各方面的信息作出快速而灵活的反应。以现在舰艇上的对空末端防御快速反应系统为例，要求系统中的计算机要在几秒钟内完成对目标的跟踪、威胁判断及对火炮作出目标指示的全部计算，而且要在保证系统静态和动态精度条件下，对输出信号、调度火炮直至炮弹离开炮管等一系列动作作出快速反应。

4、系列化、标准化、模块化程度高

战场上使用的各类加固机从使用的角度看，必须系列化。计算机系列化的最关键问题是系统结构格式标准化。不同的结构格式决定了不同的计算机系列。系列选定后，就要进行标准化工作。首先制定

技术标准，要求高级语言和指令系统结构格式标准化，要求机箱、模块标准化。同时要求易于同各种系统匹配联接，能随时组成各种应用系统。加固机系统的模块化有利于系统功能的扩展或增减。加固型计算机系统的硬、软件和结构都贯穿了模块化设计思想，硬件均由若干个功能模块插件构成，软件均由若干功能模块化程序段（包）构成。

5、稳妥、保守，多数采用优选成熟的商用计算机。

加固型计算机往往采用经过实践考验，技术成熟的商用计算机系列的某些机型进行加固而成。这就保证了所采用的硬、软件技术是经过较长时间的实践考验。各方面功能都已证明具有相对稳定性，以确保该机型高可靠工作。

五、国外加固机采用的加固技术

为了使计算机能在恶劣环境下稳定可靠地工作，就必须对计算机施以加固措施。这就称加固技术。加固技术有后天加固和先天加固两种。通过搞后天加固技术不断积累经验，积累试验数据，为搞先天加固打下技术基础。所谓后天加固的方法就是在原型机的基础上进行加固。首先对原型机进行摸底试验，找出原型机的薄弱环节及其边界条件，然后根据对加固机的技术要求针对这些薄弱环节分别施以加固措施。加固系统主要用于战略武器系统，要求加固机在穿越核爆炸区时仍能可靠地工作，这种加固技术是一门相当复杂的技术，它涉及到两门新兴的加固技术，一门是抗电磁场屏蔽技术，另一门是抗辐照加固技术。尤其是抗辐照加固技术是一门十分复杂、耗资巨大的技术。它要求元件从抗辐照加固做起。当核爆炸时，在爆炸区有大量的X、 γ 、

β 射线，这些射线会直接破坏硅和锗半导体材料中的晶格，使晶体管集成电路工作特性发生变化而失效，从而导致整机不能工作。所以，全加固型计算机必须建立在具有抗核辐照加固元件的基础上，并采取结构上的加固技术，从系统设计上提高可靠性。这就是先天加固。

1. 元件加固技术

一个抗辐照加固的计算机系统的成功设计需采用加固的元件并需好的系统设计技术。元件的理想加固是通过多种措施结合起来获得的。包括好的布线技巧、线路设计、工艺设计、工艺控制及辐照筛选等。

电路设计师必须懂得各种辐照环境对半导体材料及器件的影响，才有可能设计出达到抗辐照要求的器件。

A. 抗辐照加固CMOS电路

中子引起位移损伤并导致半导体器件中少数载流子寿命减少，减小电流增益，增加饱和电压，增加泄漏电流，降低截止频率。而CMOS器件是多数载流子器件，对中子的影响不敏感。双极器件性能会因中子而降低。

总电离剂引起电荷俘获于半导体器件的氧化层，因CMOS器件在氧化层半导体材料之间的介面内有它的有源区。因而它们对总剂是最敏感的，被俘获的氧化层电荷使CMOS器件的阈值电压漂移从而增加了泄漏电流，降低了开关速度。

瞬时电离辐射一般在核爆炸产生 γ 射线、X射线时发生。100拉德的剂量很容易在10ns内沉积。瞬时辐射在半导体器件的PN结里感生出一个大的瞬时光电流。光电流的峰值与剂量率成比例。它

能使存储器单元翻转，器件门锁和烧毁。

当高能粒子穿透单元的一个敏感的结点时，会淀积足够的电离电荷从而引起状态的变化。双极和CMOS器件对单粒子效应都很敏感。

EMP（电磁脉冲）是来自核爆炸由高能康普顿反冲中子所引起的辐射。EMP产生一个大电流并耦合到系统电缆和传输线中导致金属互连熔融和结烧穿。

加固的CMOS工艺：好的加固CMOS工艺应当减少阈值漂移和泄漏电流，避免门锁和单粒子扰动，减少对瞬态干扰的灵敏度。目前采用三种工艺实现加固的目标。

（1）衬底外延CMOS（EPI CMOS）

原材料是外延硅园片。它在 N^+ 衬底上再长一 N^- 层，其中 N^+ 衬底切断了能导致门锁的寄生四层结构。P阱表面重掺杂有助于防止由于氧化层的俘获电荷而形成表面反型层，并用 P^+ 保护环围起来以防止寄生的n沟场效应器件导通，这种技术大大减少了泄漏电流。氧化层是加固的硬氧化层。可利用干氧或高温氧化技术生成，这两种氧化技术生长成的硬而氧化层，由于退火较快，因而具有比软氧化层更少的永久性损伤。栅氧化层厚度保持在最小值，因为薄的氧化层比厚的氧化层更硬。调整N沟和P沟阈值电压以补偿任何辐射感生的漂移。

通过在交叉耦合的单元中使用反馈电阻来消除单粒子效应对存储器单元的扰动。反馈电阻能改变反馈电路的时间常数以使扰动不发生。

（2）绝缘体上CMOS

绝缘体上CMOS（SOI CMOS）可以替代加固衬底外延CMOS（EPI CMOS）。采用绝缘衬底就意味着消除了寄生

的四层结构，所以没有闩锁效应。绝缘衬底与体硅相比，对瞬时干扰不太敏感。然而，SOI CMOS对总电离剂量则比体硅CMOS技术更为敏感（因为有背沟泄漏）。为了减少背沟电流造成的影响，必须仔细在绝缘衬底上沉积硅以减少空穴俘获中心。

（3） 介质隔离（DI）技术

介质隔离技术（DI）是实现元件加固的另一种手段。这种技术是把每个晶体管都放置于它自己的介质隔离区内。每个晶体管与芯片上的其它晶体管都是绝缘的，这就消除了四层寄生的SOL结构，因而也消除了闩锁。而且因为每个介质隔离区的容积都比体硅的要小，所以在瞬时辐照条件下光电流就会减少，从而具有比体硅更高的抗干扰特性。DI的缺点是封装密度低，工艺成本高。

上述三种器件加固工艺技术以及双极技术对辐照的响应见表1。上述三种工艺技术制造的元件普遍用于空间和航空系统。在应用中系统设计师必须将其系统要求与元件规格加以比较以决定这些元件作为一种加固元件使用是否能满足要求。

一旦加固的CMOS工艺已经明确规定，那么，工艺控制和筛选是必不可少的，这样才能保证制造出来的器件满足规定的抗辐照水平。在工艺控制中四个关键的因素是：清洁和沾污控制；硅表面控制；减少栅氧后的高温处理；氧化层厚度控制。

在高温处理期间出现沾污能够降低抗辐照强度。硅的表面损伤可能会导致在硅——二氧化硅介面上的介面态和俘获电荷。俘获电荷降低抗辐照强度。介面态密度能够通过栅氧之前生成和剥离一层氧化层的办法来大大减少。