

电子器件核加固基础

国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了核辐射对电子材料、元器件和线路的损伤机理;并对各种核辐射环境、核辐射效应及核加固措施等作了一般性论述。书中还搜集了不少有关核爆炸环境下的试验数据。可供从事电子材料、元器件、线路及设备的核加固工作的人员参考。

FUNDAMENTALS OF NUCLEAR HARDENING OF ELECTRONIC EQUIPMENT

L. W. Ricketts

John Wiley & Sons, Inc. 1972

*

电 子 器 件 核 加 固 基 础

[美] L. W. 里基茨 著

《电子器件核加固基础》翻译组 译

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可證出字第 074 号

总发行所北京发行所发行 各地新华书店经售

上海商务印刷厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张 16 7/8 443 千字

1978 年 6 月第一版 1978 年 6 月第一次印刷 印数: 0,001—8,000 册

统一书号: 15034·1661 定价: 2.10 元

译者的话

随着核技术的发展,核爆炸产生的核辐射对电子元器件的效应日益引起人们的重视。在六十年代初,国外就投入一定力量从事抗核辐射加固的研究、试验工作。目前电子元件、器件、电子线路及电子设备的核加固已成为一门新的学科,正处于发展之中。核加固的电子元器件是电子线路和设备核加固的基础。

本书阐述了核辐射对电子材料、元器件和线路的损伤机理;并对各种核辐射环境、核辐射效应及核加固措施等作了一般性论述。书中还搜集了不少有关核爆炸环境下的试验数据,这些均可供从事这方面工作的人员参考。

作者在本书的序言及各章中多次宣扬核武器“毁灭人类”、核效应威胁“人类生存”、核战争“不堪设想”等资产阶级唯武器论观点,在技术上亦大力鼓吹“能源枯竭”、“宇宙膨胀”等唯心主义货色。在译校过程中,已对这些资产阶级反动观点作了删改。但限于译者水平,译文中尚可能存在许多错误和不当之处,敬希读者批评指正。

在本书译校过程中,承不少单位的同志大力协助,参加译校工作,特此表示感谢。

《电子器件核加固基础》翻译组

目 录

第一章 引言	1
1.1 模拟	3
1.2 分析	3
1.3 质量控制	6
1.4 鉴定	9
1.5 分析方法	10
1.6 对易损性分析时的几项工作	11
第二章 辐射环境和辐射效应	14
2.1 概要	14
2.2 定义	15
2.3 辐射的量度	22
2.4 核武器环境	24
2.5 1百万吨核爆炸	28
2.5.1 马赫茎	29
2.5.2 粒子和射线	29
2.5.3 放射性粒子沉降	33
2.6 超压	33
2.6.1 动压	37
2.6.2 等值线	37
2.6.3 概述	38
2.7 核环境中的辐射强度	40
2.7.1 γ 射线	43
2.7.2 中子	52
2.7.3 电磁脉冲	57
2.7.4 热冲击	58
2.7.5 噪声	62
2.7.6 极光效应	63
2.7.7 光	63

2.7.8 冲击波	64
2.7.9 气候变化	64
2.7.10 其它效应	65
2.8 宇宙环境	65
2.8.1 太阳系内的自然辐射强度	66
2.8.2 宇宙射线	66
2.8.3 空间辐射强度	67
2.8.4 太阳风	71
2.8.5 宇宙膨胀和物质变化*	75
2.8.6 放射性碳 C^{14}	75
2.8.7 地球所吸收的太阳能	75
2.9 反应堆环境	76
2.9.1 核电站	77
2.9.2 加速器	78
2.9.3 剂量测定	80
2.9.4 $\langle N_{AP} \rangle$ 和 $\langle S_{NAP} \rangle$ 发电机	80
2.9.5 核电池	82
2.10 电视	83
2.11 辐射的生物学效应	84
第三章 电子材料和无源元件的辐射效应	93
3.1 辐射对材料的穿透	93
3.1.1 模拟设备	93
3.1.2 计算机模拟	94
3.1.3 辐射的探测和测量	94
3.2 能量和材料的相互作用	96
3.2.1 作用于材料的辐射	96
3.2.2 电子间的相互作用	96
3.2.3 γ 射线(X 射线)和物质的相互作用	97
3.2.4 α 粒子的穿透	99
3.2.5 中子对材料的损伤	99
3.2.6 瞬时辐射	100
3.2.7 核辐射粒子	101
3.2.8 同位素	103
3.2.9 放射性核素	103
3.2.10 α 粒子的放射	103

3.2.11	中子和 γ 射线的关系	104
3.2.12	电磁辐射	104
3.2.13	裂变过程	106
3.2.14	放射性粒子的分类	106
3.2.15	辐射加热	107
3.2.16	电离效应	107
3.2.17	屏蔽材料	108
3.2.18	静电屏蔽	109
3.3	绝缘材料的辐射效应	110
3.4	磁性材料的辐照效应	116
3.5	材料及部件的总剂量阈值	119
3.6	辐照引起的电阻率变化	123
3.7	光学材料的辐射效应	126
3.8	电气分系统的辐射损伤	126
3.9	辐照所引起的金属性能的变化	138
3.10	空间辐射环境用的材料	138
3.11	互辐射效应	143
3.12	辐射对镍和镅的影响	144
3.13	晶体在辐射环境中的敏感性	144
3.14	部件分析	146
3.14.1	参数变化与辐射能量的关系	146
3.14.2	加固器件的性能	147
3.15	焊料的热损伤	148
3.16	连接器的热损伤	149
3.17	电阻的核加固	149
3.18	电容器的核加固	151
3.19	电缆分析	155
3.20	核辐照环境中的热电偶	159
3.21	红宝石激光器的敏感性	160
3.22	其它电子部件的辐射效应	162
第四章	半导体器件的辐射效应	168
4.1	基本半导体效应	169
4.2	中子环境下晶体管特性的叙述	170
4.3	表面复合速度	172

4.4	基极-发射极场区的复合	173
4.5	发射极效率	173
4.6	高注入水平	173
4.7	电流增益截止频率	174
4.8	位移损伤过程	174
4.9	对入射能量的依赖关系	176
4.10	损伤常数对电阻率和注入水平的依赖关系	178
4.11	双极晶体管的中子损伤常数	179
4.12	硅材料的损伤常数	180
4.13	锗分析	182
4.14	离子注入	183
4.15	半导体器件的结论	188
第五章	分立器件的模型设计和辐射灵敏度分析	194
5.1	$p-n$ 结器件	194
5.1.1	计算机模型设计	194
5.1.2	半导体体内的电离效应	194
5.1.3	集总模型技术	196
5.2	包含辐射效应的二极管模型	199
5.3	本征晶体管的光响应	206
5.3.1	详细的晶体管集总模型	210
5.3.2	包含辐射效应的埃伯施-莫尔 (Ebers-Moll) 晶体管模型	212
5.3.3	模型设计小结	220
5.4	二极管的核加固	220
5.4.1	$p-n$ 结的二次击穿	225
5.4.2	雪崩二极管	225
5.4.3	微波雪崩二极管振荡器	226
5.4.4	隧道二极管	228
5.4.5	变容二极管的抗中子辐射性分析	229
5.5	晶体管的核加固	233
5.5.1	方程推导	234
5.5.2	有关辐射效应的一些表格	242
5.5.3	功率晶体管	247
5.5.3.1	抗辐射硅 $n-p-n$ 功率晶体管	248
5.5.3.2	K' 值的解释和使用	249

5.5.3.3 辐照数据分析	251
5.5.4 结型场效应晶体管分析	256
5.5.4.1 瞬态辐射效应	256
5.5.4.2 永久性损伤	257
5.5.5 绝缘栅场效应器件	260
5.6 可控硅整流器	261
5.7 对确定标率的元器件(晶体)的影响	264
5.8 真空管	265
5.9 太阳电池	265
5.10 奥氏器件	277
5.11 电池组	278
5.12 提要	279
第六章 集成电路的辐射效应	285
6.1 集成电路与分立元件电路辐射效应的比较	286
6.2 中子效应	288
6.3 γ 剂量率的影响	296
6.4 对扩散电阻的影响	298
6.5 包含光子、质子和电子效应的典型电路分析	299
6.6 闭锁机理	302
6.7 四层开关作用	303
6.8 二次击穿	306
6.9 持位电压击穿	307
6.10 氧化物电荷堆积	309
6.11 介质隔离	310
6.12 集成电路中的互补金属-氧化物-半导体晶体管(CMOS)	319
6.13 调节器和触发器	326
6.14 方向和展望	327
第七章 电路与等效电路分析	333
7.1 元件分析与电路分析	333
7.2 分析步骤	334
7.3 电压调节器和电源	341
7.4 辐射环境中的电路设计	342
7.4.1 有源与无源元件的数量比低	342
7.4.2 电路功率损耗低	342

7.4.3 最大的逻辑灵活性	343
7.4.4 退火	343
7.4.5 计算机辅助电路设计	345
7.5 封装	346
7.5.1 厚膜微电路	346
7.5.2 梁式引线连接	350
7.5.3 薄膜微电路	351
7.6 中子对放大器偏压的影响	353
7.7 迂回躲避法	353
7.8 设计方法	357
7.9 准则	362
第八章 电磁脉冲	366
8.1 说明	366
8.2 使用脉冲函数的近似算法	371
8.3 电压和电流尖峰信号	373
8.4 电磁场衰减	374
8.5 对电磁脉冲的屏蔽	375
8.6 对天线系统的影响	377
8.7 半导体器件的电磁脉冲效应	381
8.8 平衡加固	385
8.9 电磁脉冲干扰的控制	386
8.9.1 控制设计	386
8.9.2 接地	387
8.9.3 屏蔽	390
8.9.4 接合	394
8.9.5 滤波器	395
8.9.6 其它建议	396
8.10 结论	398
第九章 可靠性问题	403
9.1 可靠性公式	403
9.2 定义	405
9.3 原则	407
9.4 核加固子系统可靠性举例	407
9.5 可靠性核加固标准	412

9.6 统计分析	412
9.6.1 非均匀辐射效应	413
9.6.2 独立分析的不一致性	414
9.7 影响可靠性和成本的其它因素	415
9.8 降低额定值	416
9.9 威布尔曲线	417
9.10 失效概率	418
9.10.1 失效概率与时间的关系	421
9.10.2 失效概率与辐射水平的关系	422
9.11 影响可靠性因素	424
9.12 关于可靠性结论	425
第十章 评论与展望	427
10.1 1980~1990 年的展望	427
10.2 核加固成本	428
10.3 计算机模型	430
10.4 问题范围	435
10.5 系统的瞬变现象	436
10.6 γ 剂量率问题	437
10.7 损伤机理	438
10.8 辐射效应分析	439
10.9 核加固委员会	441
10.10 加固的改进程序	442
10.11 损伤量的变化	443
10.12 加固的成本	445
10.13 建议	446
附录 A 名词注释	447
附录 B 变换表和图	490
附录 C 补充的书目	501
附录 D 辐射的历史和事实	513
附录 E 计算机模拟	520

第一章 引言

核爆炸时不但能造成相当于上千万吨 TNT 的摧毁力,而且放出各种射线,并形成典型的蘑菇状烟云。但对那些很高的辐射剂量了解的人并不多,这种辐射构成了摧毁生命的主要威胁。

特别是在研究热冲击、电磁脉冲和空气爆震波的时候,辐射媒介可能会对设备产生一些其它效应。其中有些效应可能是等效的,例如,中子辐射可使部件内部的温度升高,这和由热脉冲、电源过热,或系统中某个部件发生故障时所造成的温升类似。

加固一个系统,就是通过设计、制造和试验过程,使电子系统在宇宙空间,或在核爆炸附近能正常地工作和生存下去。加固过程中受到的限制是:尺寸、重量、可靠性、研制周期、复杂性、老化特性、工作性能和费用等,同时还得满足其它正常环境条件的要求^①。

主要要考虑的环境是核武器爆炸的环境,核爆炸可释放出中子、 γ 射线、热能、放射性碎片以及有关的电磁脉冲。这些辐射在实验室里不可能得到精确的模拟,但用线性加速器、闪光X射线机等,是可以对它们进行大致的模拟的。在实验室内产生辐射时,要产生中子,总得出现 γ 射线等,所以在很多情况下,几种不同的辐射常常是同时加以考虑的。

瞬时辐射(通常指 γ 射线)是从核爆炸释放出来的一种微秒级的强脉冲,它开始衰减得很快,然后便缓慢地衰减。例如,一百万吨的高空爆炸,在距爆心 160 公里处, γ 射线的剂量率为 10^7 拉德/秒(r/s),其持续时间约 1 微秒。在这样的环境下,电子设备可以吸收多达 10^5 拉德(r)的辐射剂量。初始辐射由 γ 射线和中子组

^① 虽然抗核加固的规范还处于摸索阶段,但它们对于使用者和电子设备设计人员来讲,仍然是有意义的。

成, γ 脉冲一般只造成瞬时效应, 而中子流所引起的多半是永久性的破坏。

目前在导弹系统、空间飞船和卫星、核武器系统、地面通信设备、核动力推进系统、航空用导航计算机、雷达、指挥控制系统, 以及许多其它有关的系统中, 都需要使用抗辐射部件。

虽然在电子器件的抗核加固和高可靠性方面能否彼此兼顾上存在着激烈争论, 但这一点必须明确: 即最终加固后的器件或系统, 必须是可靠的。事实上, 在核环境下, 正是那些可靠性较差, 而参数一致性不好的器件最易失效。

在邻近核爆炸的地面某点, 当可受到 100 安匝/米 (At/m) 和 10^4 伏/米 (V/m) 的电磁脉冲时, 就能在一根长连线的两端产生很大的附加电压, 并在低阻通路中引起电流。例如, 对接收设备, 这一脉冲在连接电缆的开路端或高阻抗端会产生几千伏的电压。虽然具有低阻抗载荷的平衡电缆可以防止这种电压增升, 但是设计者在考虑电场作用的同时还得考虑到磁场的作用。

由电磁场引起的脉冲可以通过天线进入接收机, 并把输入电容器、变压器和其它易损的前端器件烧坏。

十年来, 抗核加固概念已发生了很大变化, 事实上, 最近人们已把整个核爆炸环境和宇宙场都列入抗核加固的范围。虽然热脉冲、爆震波(超压)、电磁脉冲等与材料、元件以及电路的核效应无直接关系, 但它们与总效应有关, 所以不得不加以考虑。

为加固一个系统, 必须:

1. 提出系统现实的性能要求;
2. 给出失效判据;
3. 确定系统辐射容限;
4. 运用或建立分系统模型;
5. 进行辐射易损性分析;
6. 进行辐射验证试验。

相对独立的破坏类型有:

1. 中子引起的性能降低;

2. 由 γ 射线和 X 射线引起的电离效应;
3. 由过电压或过电流(包括电磁脉冲效应)引起的部件损坏;
4. 由上述各种因素造成的热效应;
5. 特例——如敏感元件受到光、热或爆震波的影响等。

1.1 模拟

为证实系统的牢固程度,在各研制阶段中,要进行模拟试验,模拟核武器在空间环境里的各种效应。模拟基本包括两种形式——分析和环境试验。

在分析过程中,可计算元件遭受瞬时辐射和电磁脉冲时,电路和系统所受的影响。在电路和系统分析时,并不要求做成实际电路和系统,即使是环境参数,也不限于实际环境中所出现的参数。在理论上,通过单纯的(但也是复杂的)分析,可以实现对总效应的模拟。

脉冲式反应堆、稳态反应堆、闪光 X 射线机、电子直线加速器、钴-60 源、脉冲激光器,以及电磁脉冲的长线天线等各种试验设备,都可在不同程度上对各类效应模拟。但都不能理想地重现核武器的爆炸环境。如果对各种情况下所发生的相互作用都有一定了解,从对这些器件、电路和分系统的响应特性的观察中,就可以推导出有价值的数据来。只有当试验结果与分析方法相一致的时候,才能肯定分析结果的准确性。即使分析与环境试验结论相同,也还不能保证符合这种判据的系统,就一定能在真实环境里生存下来。尽管如此,在没有条件做核爆炸现场试验的情况下,这种检验手段的效果已够理想。大量实验室试验数据,完善的分析实验程序,齐全的辐射效应数据,这些都是进行核生存-核破坏分析所必需的。破坏机理,临界参数特征,器件响应特性以及系统可靠性等等,都可通过上述模拟手段得出重要的结论。

1.2 分析

在初学分析时,一个小差错就可能导致错误的结论。所以应

有或专门的分析小组,分析小组经过相当长的时期工作,才能积累较多的经验,以对分系统的易损性做出比较可靠的分析。至于结论的可信程度,则可望通过对有关资料的广泛交换而不断提高。

分析方法为:

1. 确定系统中有哪些部件在核环境下最易损坏;
2. 了解破坏机理;
3. 确定这些易损部件可否取消,或是否可采用加固元件,并检查电路的变化情况;
4. 在可靠性、工作性能及环境要求等方面协调;
5. 计算核环境的新容限;
6. 使用那些经过试验考验的可靠的部件。

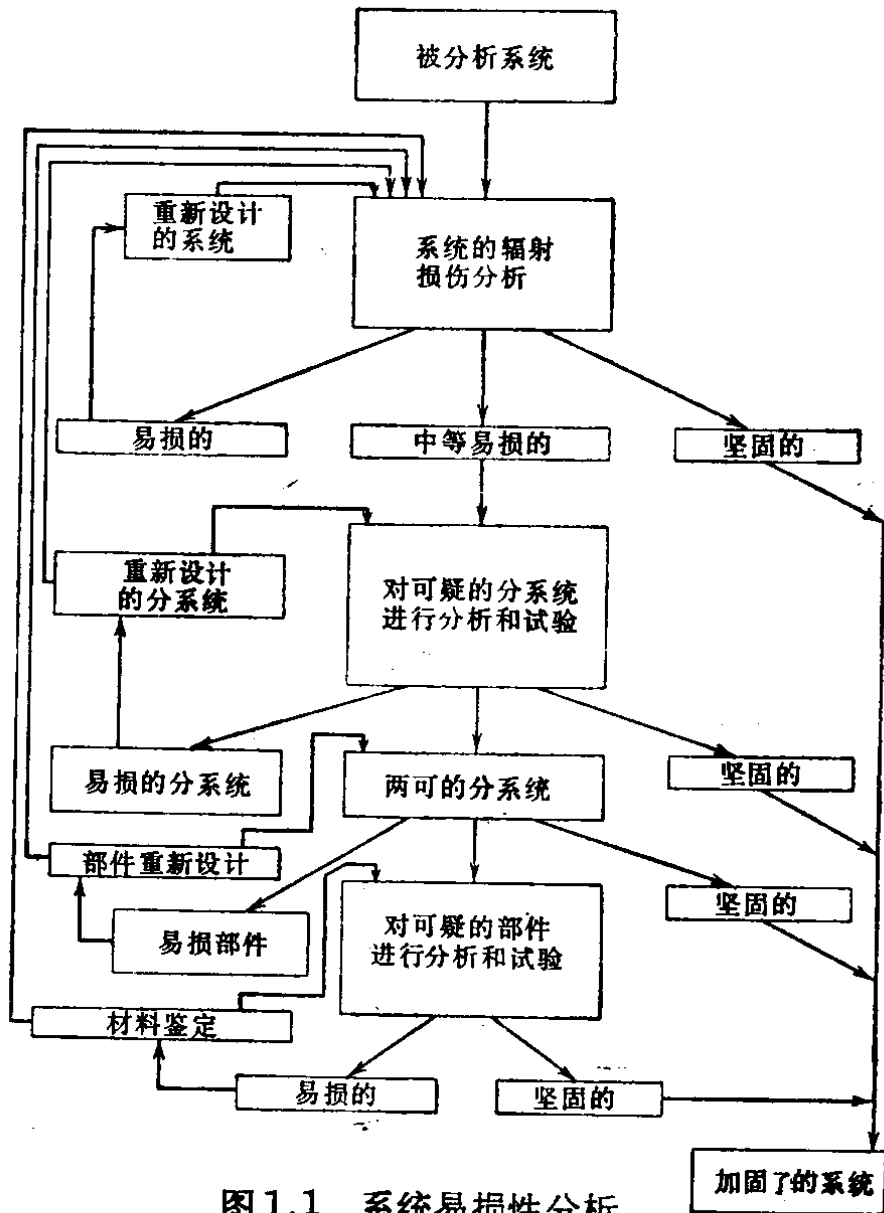


图 1.1 系统易损性分析

在分析时,要善于利用器件、运算电路、分系统的功能预计值等数据,核辐射试验结果及以往的电路和分系统的分析结果。在不少情况下,通过计算即可对 γ 射线、中子流或电磁脉冲环境下的最坏事例进行核实。然而,有时由于电路复杂,要得到与实验室的试验结论一致,非得利用计算机不可。

辐照失效一般分类法是:

- 1. 彻底毁坏;
- 2. 瞬时失效,事后能自行恢复的暂时损伤;
- 3. 暂时失效,经退火处理即可恢复的损伤;
- 4. 永久性能降低。

另一种分类法是(图 1.1):

- 1. 易损的;
- 2. 中等易损的;
- 3. 坚固的。

对系统进行分析的工作量分配大致如下:

任 务	抗核加固工作量(%)
1. 熟悉系统	10
2. 抗核指标分析	5
3. 系统故障分析	5
4. 电磁脉冲分析	10
5. 爆震波、热脉冲(及其它辐射)分析	10
6. 部件数据分析	5
7. 预计部件响应特性	20
8. 电路和组件分析	10
9. 制订试验大纲	10
10. 资料归档	5
11. 其它工作	10

对每一种潜在的破坏效应,通过分析必须弄清下列问题:

- 1. 被论及的效应造成系统失效的可能性是什么?
- 2. 在什么情况下这一效应是重要的?
- 3. 根据哪些证据才足以断定某个对象是易损的或是坚固的?

4. 需要采取哪些进一步的具体措施。是把电子部件的事先分析(或经验)的结果与设计要求比较, 进行一些更为复杂的分析性预测工作, 重新设计电路, 替换电子部件, 在辐射环境下做试验, 或是采取其它更复杂的措施等等。

1.3 质量控制

为了保证生产出好的器件、组件和分系统(图 1.2), 虽然有了抗核加固要求的质量控制程序, 仍应保持那些基本的检验、筛选和试验过程, 而且还需要通用的必要校正程序。为达到统计上的要求, 对某些系统, 必须采用专门的制造工艺, 甚至必须采用特殊的检查手段, 而对另外一些系统, 却只需选取适当的间隔进行周期性检验。控制的工作量和费用和中子通量、总剂量、 γ 射线剂量率、以及其它辐射(如电磁脉冲、热, 以及爆震波等)的最高指标有关。

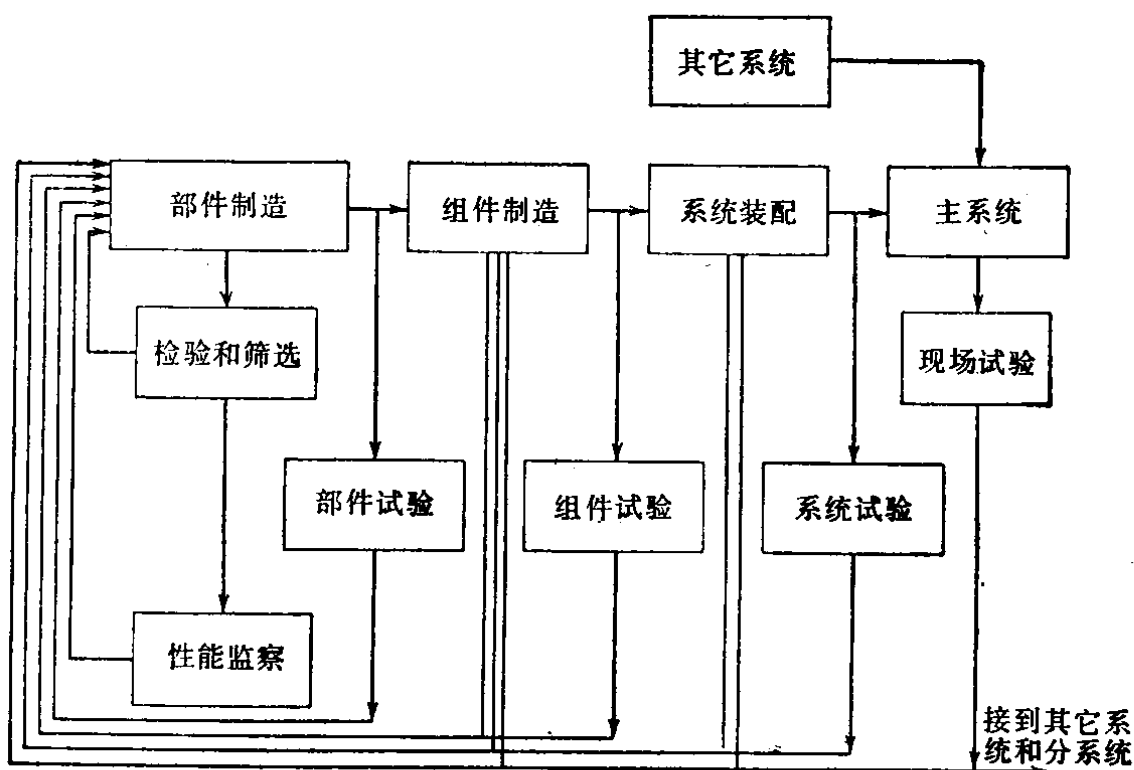


图 1.2 一般质量控制程序

虽列出了很多不同的加固方法, 但有些很少为专业人员采用, 有些虽曾作为唯一的手段被采用过, 但着重点一变, 这些技术就被搁到一边去了。与系统的生存概率有关的一些问题, 几乎都与过

去加固元件和简单电路组件时的问题不同。在很多情况下,某个系统最不可靠的部分却与辐射效应没有丝毫关系,从而可把它们归纳到低劣的质量控制程序里面去。很多部件(特别是数字应用方面的)都含有集成电路或大规模集成电路。它们都应具有抗辐射能力,并要对产品的易损性或加固程度提出报告并注明日期。因此,系统设计时只要合理选择集成电路,即可不加特殊电路或采用特殊封装,以达到规定的要求。

加固电子系统的步骤为(图 1.3):

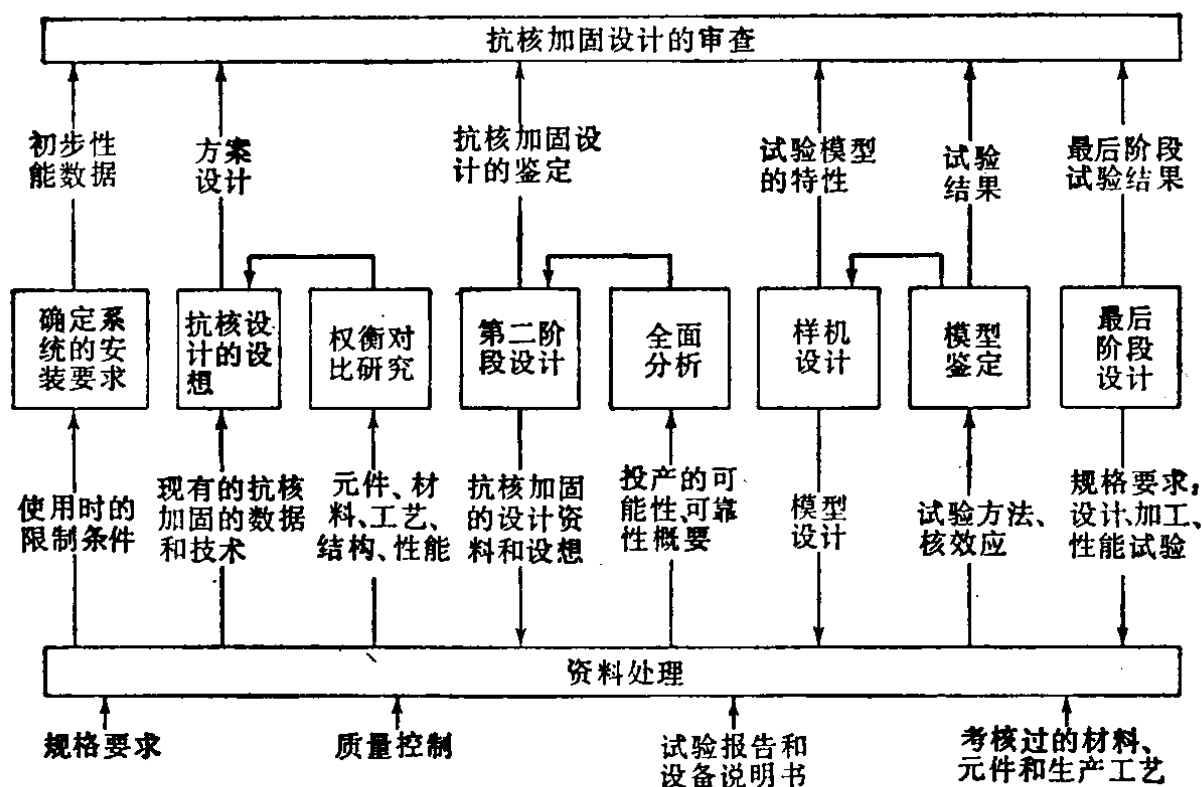


图 1.3 抗核加固的计划管理

1. 系统初步分析;
2. 用加固元件设计电路;
3. 通过详细的电路分析,精确地确定附加的变化和测定必要的
数据;
4. 在实验室里对最易损坏的部件进行辐射试验(图 1.4 给出了辐射和效应之间的关系);
5. 进行新的分析,预测电路和组件的响应;
6. 对电路和组件进行试验;