

中国电子学会论文集



73.617083
ZDX
1

73.617083
ZDX
1

第二届学术年会论文选

DIERJIE XUESHUNIANHUI LUNWENXUAN

(上)

1983.10

中国电子学会电子产品可靠性与质量管理学会编



编 者 的 话

中国电子学会电子产品可靠性与质量管理学会第二届学术年会征文启事发出后，得到了全国各地区、各部门、各单位广大从事可靠性与质量管理工作的同志们的热烈响应，共收到论文摘要三百七十余篇。在学会办公室初选的基础上，又经五月在广州召开委员会会议作了审查。经审查同意在学术年会上交流的文章均收入这本“第二届学术年会论文选”。但限于篇幅，一般均有删简。

由于时间、人力及我们的经验、水平的限制，论文选难免存在不少缺点和错误，欢迎大家批评指正。

最后，借论文选出版的机会，谨向积极支持学术年会工作，踊跃应征的同志表示衷心的感谢。

1983年9月

第二届学术年会论文选(上)

目 录

综 述

软件可靠性发展状况·····	黄锡滋	1
国外高可靠分立半导体器件的现状与发展趋势·····	徐立生	9
可靠性增长分析·····	周延昆	14

质量管理与可靠性管理

电子新品研制过程的可靠性管理·····	丁定浩 汪廷震	21
企业标准化工作在现代质量管理及可靠性技术管理中的地位·····	刘灯宝	27
用数据说话,加强可靠性管理·····	卓礼章 赵维干 周新华	33
××电子—机械控制系统研制工作中的可靠性管理·····	泮凌云 张渭方	33
半导体器件专业生产线生产过程中的预置品质控制·····	李舒祥	38
质量认证全面提高晶体管 3DG130 的质量水平·····	江擎孚	45
可靠性技术与管理体制的建立是可靠性工作的当务之急·····	卢昆祥	50
当前电子产品可靠性管理若干问题的探讨·····	卢昆祥	56
可靠性管理的基础工作之一——质量反馈·····	巫金海	60
试论我国可靠性工作中的几个问题·····	宋珞华	65
试谈可靠性与工艺的关系·····	崔来堂	68

可 靠 性 设 计

故障树分析在电视机可靠性分析中的应用·····	黄祥瑞 黄慈荣	71
地缆×××路无人增音机盒的可靠性预计和分配·····	李致启 江声崇	76
系统可靠性设计中确定重要度的一种新方法·····	龚松澜	82
复杂系统可靠性设计的最优化·····	刘炳章	85
计算机和空间电子系统的可靠度最优布局·····	谭维康	92
HDS—801系统中央处理机的可靠性设计·····	彭铮良	98
动态负载曲线在半导体电路可靠性设计中的应用·····	杨连云	104
电子设备热设计及计算实例·····	周广涛	110
黑白电视机可靠性设计实例·····	谢厚良	120
系统、整机的可靠性设计技术——直流稳压电源的新型设计方案·····	管素圣	124
关于机载通信设备可靠性指标的探讨·····	廖祖祜	126
电子电路的质量优化设计方法·····	王槐荫	129
158工程及281机质量管理·····	钱毋荒 张汉三	135

维 修 性

机载合成孔径雷达的机内测试.....	彭海良 杨玉林	142
舰载综合火控系统可维修性设计.....	王锡吉	145
飞机电子设备的机内检测 (BIT) 与系统可靠性及维护性分析		
.....	肇龙云 谭兴山 毕文周	151
制导雷达维修方式改革的研究.....	侯发居 王良发 张纯阳	158
故障自动定位与数据传递通用接口.....	金世学	164
军用电子设备维修问题的探讨.....	丁继明	169
雷达维修性探讨.....	刘瑾辉	174

元 器 件 可 靠 性

采用 SIPOS 钝化可提高硅器件的可靠性.....	翟冬青 李洪鑫 李彦波	180
保证半导体器件镀金层耐高温性能的有效途径.....	罗福新	185
提高VMOS晶体管负阻击穿耐量的有效途径.....	陆景唐	189
关于He-Ne激光器可靠性的实验研究.....	胡志强 施迎难	194
国产半导体光电器件的可靠性.....	于瑞祥	199
软磁铁氧体元件的可靠性评价与质量认证.....	曹恩荣	203
星载电子设备中微波铁氧体器件的可靠性.....	何水校	207
锗高频小功率晶体管 h_{FE} 的稳定性问题.....	滕宗兴 朱锦千 张 雪	212
双极型晶体管交流参数温度特性及其测量.....	李学信 田春生 刘 宁	215
PECVD氮化硅在半导体器件钝化工艺中的应用.....	陈 琳 陈永兴 许春芳	222
用测试图形预计晶体管 β 稳定性.....	黄德奇 陈春仙 薛正缪	225
1981年全国12英寸黑白显象管评比管失效分析报告 (I)	吴冲若	228

软件可靠性发展状况

成都电讯工程学院 黄锡滋

一、概 述

计算机科学发展的早期,人们主要集中于硬件的开发,而程序的编制则多由需算题的科学家和工程师自己去干。本世纪60年代,计算机硬件的功能有了惊人的发展,计算机的应用渗入到各个部门。随之而来的是软件的需要量和销售量急剧增加,软件的重要性也越来越引起人们的注意。60年代中期,计算机系统开发费用中软件费用所占的比例已超过了硬件,近十年来仍保持着增长的势头。有人预计在80年代中后期,软件的开发费用将占总费用的85~90%。图1示出了硬件和软件费用发展的趋势。

问题还不仅局限于费用上,随着软件的大型化、复杂化,人类智力的不完备性充分暴露出来。60年代后期,国外的软件产品不是不能按期交付使用,就是因错误百出而使整个计算系统瘫痪。美国空军范登堡中心在此期间发生的导弹试验失败事故,事后检查都是由于计算机软件的错误而造成。1968年在西德加密斯召开的 NATO 会议上,Dijkstra 针对软件存在的问题发言指出:“整个事业建立在一个大骗局上……”。1971年

Richard Hamming 估计,“即使是细心编号的程序,每200条到300条指令中必有一条错误”。这段时期往往被人们称为软件危机时期。这样便促使人们重视软件的开发和软件可靠性的研究。70年代以来相继举行了一系列重要的学术会议,例如1973年纽约召开了IEEE 计算机软件可靠性讨论会;1975年4月在洛杉矶召开了软件可靠性国际会议,等等,都有力地推动了软件可靠性技术的发展。

软件的质量除了可靠性之外还要用正确性、健壮性、维护性、效率等许多指标去综合评价,但毫无疑问,可靠性是软件工程需要解决的最重要课题之一。由于较早发展的研究硬件的“可靠性工程”(理论和方法)自然地应用到软件领域,因此可以说“软件可靠性”是“软件工程”和“可靠性工程”相结合而产生的新分枝。

在软件领域中,人们以为它百分之百的可靠,又或完全不可靠。但经过一段时间的实践,人们认识到,对于大型软件复杂系统,错误是不可避免的。软件也有类似于硬件的可靠性问题,需要用概率论的方法来研究和评价软件的可靠性。

分析硬件和软件的失效原因知道,硬件失效是由于产品的老化造成,而软件的失效则是由于软件本身固有的“错误”造成,它是一直存在着的,不过它的影响只在一定的环境条件下才表现出来,导致任务的失败。这里所指的环境不仅包括机器使用的客观条件,而且包括

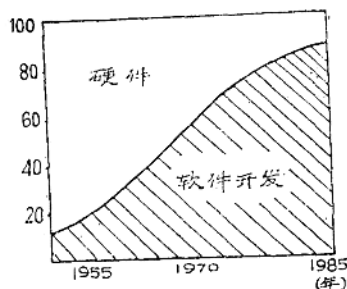


图1 硬件—软件费用发展趋势

了运算中使用的输入数据。软件的可靠性可由于错误的排出而得到提高。

目前对软件可靠性的定义仍存在着不同的观点。归纳起来大致有三类：即面向设计人员以软件本身固有的错误数来定义；面向使用者以软件能正常工作的时间来定义；面向使用者以能导致错误的输入数据来定义。这三种定义的内容将在本文第三部份继续讨论。

二、提高软件可靠性的方法

软件的发展，经历了任务提出、开发、维护、报废四个过程。软件的生存期由开发期和维护期构成。。软件的发展过程示于图 2。

在组成软件开发期的三个阶段（要求定义分析、设计、编码）中都可能引入错误。即使在以发现和改正错误为目的的试验和调试阶段，在改正原有错误的同时也可能引入新的错误。值得重视的是，在上述各阶段中错误被发现得越早，愈容易被改正，修改错误所花费用也越低。TRW 公司的一项研究表明，在编码阶段确定一个错误所花费用大约是设计阶段确定一个错误费用的两倍。试验和调试阶段确定一个错误的费用则是设计阶段的 10 倍。事实表明，正确和可靠的设计在发展可靠的软件产品中有重大作用。

提高软件的可靠性，主要有下面一些方法可以采用：

1. 数学证明法

这个方法是采用严格的证明来验证程序的正确性，开始于 50 年代图林的工作。60 年代以后，研究的人逐渐增多。怎样才能证明程序的正确性呢？Manna 把它归结为：已知程序部，其输入空间为 D_x ，输出空间为 D_z ，在 D_x 上定义输入谓词 $\Phi(x)$ ，在 $D_x D_z$ 上定义输出谓词 $\psi(X, Z)$ 。则称程序关于 $\Phi(X)$ 和 $\psi(X, Z)$ 是正确的，如果对全部 D_x 中的 x ， $\Phi(x)$ 为真， $P(x)$ 有定义， $\psi(X, P(x))$ 为真。

为使证明较容易进行，Floyd 又建议，除了输入谓词和输出谓词外，在程序中的一些重要点，可加上一些必须满足的附加条件，因此整个程序的证明可简化为一些较小的步骤。

但对这个方法的有效性仍存在许多怀疑。1975 年，Manna 认为，正确性证明的缺陷在于只能应用于没有逻辑错误的程序，而对于有逻辑错误的程序则无能为力。甚至有人认为是注定要失败的。

此外还必须注意到正确性和可靠性是两个既有联系又有区别的概念，其区别在于程序的正确性仅是指它符合说明书的要求。即使是通过正确性证明的程序，仍不能排除在定义要求、数学模型抽象上以及文字说明语句发生错误。

2. 结构程序设计

结构程序设计的基本思想是 Dijkstra 在 68 年发表的一封题为“转向语句是有害的”公开信中提出的。1972 年他正式采用了结构程序设计这个术语。Mill 于同年将结构程序设计

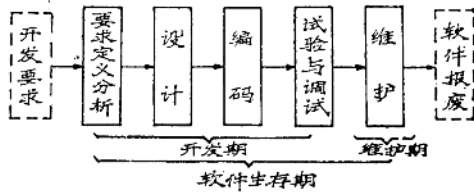


图 2 软件发展阶段图

定义为“逐步将数学函数展开为逻辑联系和事函数直至所有的事函数都能用程序语言直接实现时为止的一种程序设计方法，这个定义本身也不够确切，随着结构程序设计术语在随后的滥用，对这个方法的认识更加混乱。为此，1974年 Denning 不去正面定义它，而是用具有一定特点的程序设计方法：它不用 GOTO 语句的编程，尽量控制和减少各功能块之间相互作用次数，是一种从顶到底的设计方法。采用这种方法设计的软件程序，逻辑结构简单，层次分明，主程序员易于掌握设计的全局，便于组织、安排、协调下属程序员的工作，从而减少设计中的错误。

但70年代末，美国有些人指出，如果认为只要应用结构程序设计就能保持得到完美无缺的软件，这是不实际的。

3. 模块程序设计

在许多工程领域中，系统都是由各种部件（模块）构成。工程师从各种已有的部件出发可设计出具有各种不同功能的设备，这种思想在软件工程中的运用就是模块程序设计。它的主要内容是要研制出一套可以重新组合、重新使用的标准软部件，以供程序设计人员使用。这些标准软部件必须经过严格的质量检验，确保其性能无误。用这些软部件可以组合成各种具有特定功能的软件系统。有人也把这种方法归结为结构程序设计，其实二者是有差别的。

这种方法的优点在于可简化设计工作、减少错误、易于将系统重新配置，满足功能变化的要求，也易于增添、维修、更新部件和适应新的硬件技术或更有效的算法。

现在能满足这些要求的软部件为数很少，要发展为成套的标准部件则更加困难。首先必须深入寻找隐蔽于很多应用软件内部的公共功能，以选择确定标准软部件的功能界限。其次对每一种普遍功能的软部件，存在着许多可供选择的实现方法，它们在不同的应用场合，又各具优点，究竟什么是最佳方案，可以成为标准，需要进行大量的实验。此外确定软部件的大小也是困难的，太大不一定通用，太小又没多大价值。

因此，这种设计方法，只是今后发展的方向，很难在近期内实现。

4. 失效模式及效应分析法（FMEA）

FMEA 早已成功地应用于硬件的可靠性设计，它从讨论部件的单个失效模式出发，分析它们对系统的影响，进而研究补偿的措施和消除的方法，编制出严重的失效模式及关键项目表。

FMEA 方法用于软件设计最早的报导见于1978年。1979年 Reifer 提出 FMEA 方法可应用于软件发展的要求分析阶段，用于进行风险分析和可行性研究。据报导 FMEA 正用来研究改进某个现代武器系统的软件可靠性。

· 试验与调试

通过试验和调试发现并改正软件中的错误，是现阶段用来提高软件可靠性的最重要手段和最有效的方法。也是软件开发期中人力和时间消耗最多的一个阶段。如图3所示。

试验分为三类：

(1) 功能试验：单独或联合考查程序是否能实现规定的各种功能。

(2) 接收试验：与用户合作，尽量选择类似于实际使用条件的输入数据进行试验，考核软件能否交付使用。

(3) 结构试验：验证程序的正确性和可靠性。试验条件的选择：应保证程序中的每个语句至少被执行一次；每个支点的每个支路至少试验一次；所有控制通路都必须测试。试验的安排又可分为模块试验、结合试验和系统试验三种。

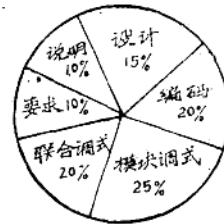


图3 各研制活动（维护除外）所需要的人力

在试验和调试过程中，软件中的错误会陆续被发现并得到改正，软件可靠性也随之增长。但要想完全消除错误也是不可能的。78年发表的有关资料表明，贝尔实验室的电子换接系统的一个经过精心调试的软件，在投入使用后，由软件造成的故障仍占全部故障的20%。79年透露的美国某指挥和控制系统的的结果表明，该系统软件的机器指令总数为45万条，在1千小时的中心处理机（CPU）运行时间中，发生过25次关键性失效，以每条指令为单位，故障发生率近似为 $5 \times 10^{-8} / \text{CPOhr}$ 。

容错技术

容错技术主要用于故障后果特别严重的系统，如飞行控制系统、核反应堆安全系统或某些大型软件系统的关键性部份。这个技术仍处在早期发展阶段。软件容错主要采用两种方法：

(1) N—文本程序设计：针对给定的功能，N个（ $N \geq 2$ ）独立编制的程序同时在几台疏松耦合的计算机中运行，并把计算结果加以比较，按照多数表决的原则或其它预定的策略作出决策。这个方法是由 Elmendorf 在1972年提出的，随后由 Avizenis 和 Chen 在1976年和1978年实际应用。

(2) 恢复框图技术

这个方法可以只使用一台计算机。最简单的恢复框图结构是：

```

Ensare  T
By      P
Else By Q
Else Error
    
```

其中 T 是成功执行 P 或 Q 时的接收试验条件，如果执行 P 不能满足测试条件，再转而执行 Q，并清除执行 P 时产生的数据。

在实时应用的场合，程序的执行应是正确和及时的，因此接收试验还有时间监视功能。图4给出了一个实时应用软部件的恢复框图结构。

三、软件可靠性预测技术

由上述可见，由于大型软件不能完全消除错误，因此，要对软件产品的可靠性作出正确的评价，就必须解决怎样定义和如何定量描述软件的可靠性问题，下面对此作一介绍。

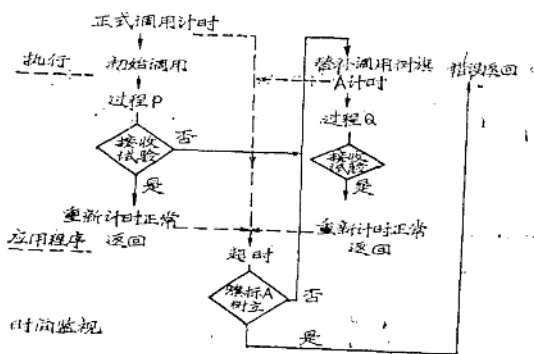


图4 应用模块恢复框图

1. 软件可靠性的定义

软件可靠性的定量研究萌芽于60年代末, 又经70年代的蓬勃发展, 虽提出过许多描述软件可靠性的数学模型和方法。但至今还没有一致公认的标准定义和分析方法。目前对软件可靠性的定义大致可分为三类:

(1) 沿用硬件可靠性的概念, 以时间为基础的定义法: 在规定的时间内、规定的条件下, 程序能正常执行其规定功能的概率, 即以正常运行时间来考查软件可靠性。

(2) 以数据为基础的定义法: 对一组随机选择的输入数据能给出正确输出的概率。

(3) 以错误数为基础的定义法: 按照程序在某一时刻仍然残留的错误数目来量度程序的可靠性。

设计人员较倾向于第(3)种定义法。因为它在某种程度上直观地反映了软件产品的质量。其它两种方法则是面向用户的, 因为用户关心的是在使用时对软件的可信赖程度。应该指出, 三种定义方法各侧重点不同, 但它们存在内在联系, 在实用上是互为补充的。

下面介绍从上述定义出发, 发展的几种有代表性的描述软件可靠性的数学模型。

2. 杰林斯基——莫洛达模型 (J-M 模型)

这是一个以指数分布为基础的数学模型, 它假定在两个相继失效构成的时间间隔内, 软件系统的失效率为常数, 其大小正比于系统中残余“错误”的数目, 又假定每次失效发生后, 总有并仅有一个错误被排除, 用 N 表示软件最初的缺陷数, 用 $X_i, i \in (1, \dots, N)$ 表示在第 $i-1$ 个错误被改正后软件投入运行至第二次失效发生的时间, 则可得出失效密度函数为:

$$f(x_i) = \lambda e^{-\lambda x_i} \quad i \in (1, \dots, N) \quad [1]$$

失效率为:

$$\lambda = \Phi [N - (i - 1)] \quad [2]$$

其中 Φ 是一个比例常数。

用最大似然法从下列两式中可求出 N 、 Φ 的估计值 $\hat{N}$ 和 $\hat{\Phi}$:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{\hat{N} - (i - 1)} = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i}{\hat{N} \sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n (i - 1) X_i} \quad [3]$$

$$\hat{\Phi} = \frac{n}{\hat{N} \sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n (i - 1) X_i} \quad [4]$$

3. 谢克——瓦尔示屯模型 (S-W 模型)

假定在两个相继失效的时间间隔内, 软件系统的失效率是时间的线性函数, 并正比于软件残留的错误数目。再假定每次失效后总有一个并仅有一缺陷被排除, 那么, 软件的失效率为:

$$E(t_i) = \Phi [N - (i - 1)] t_i \quad i \in (1, \dots, n) \quad [5]$$

式中 Φ 是比例常数。从式 [5] 可推出可靠度函数为:

$$R(t_i) = \exp \left\{ -\Phi [N - (i - 1)] \frac{t_i^2}{2} \right\} \quad [6]$$

用最大似然法求出 N 和 Φ 的估计值:

$$\hat{N} = \left[\frac{2n}{\Phi} + \sum_{i=1}^n (i-1) X_i^2 \right] \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad [7]$$

$$\hat{\Phi} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{2}{N - (i - 1)} \right] \frac{1}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad [8]$$

4. 谢曼模型

如果 I_T 是总的指令 (机器语言) 数, E_T 是系统开始时存在的“错误”数, 用 τ 表示, 排错时间 $\zeta_c(\tau)$ 表示在时刻 τ 每单位指令已被消除的错误数, 则在 τ 时刻每单位指令存留的错误数 $\zeta_r(\tau)$ 为:

$$\zeta_r(\tau) = \frac{E_T}{I_T} - \zeta_c(\tau) \quad [9]$$

谢曼假定系统的失效率与 $\zeta_r(\tau)$ 成正比, 即

$$E(t) = K \zeta_r(\tau) \quad [10]$$

由此得出系统的可靠性函数为:

$$R(t, \tau) = \exp [-K(E_T/I_T - \zeta_c(\tau)) t] \quad [11]$$

用最大似然法可得出 E_T 和 K 的估计值 $\hat{E}_T$ 和 $\hat{K}$:

$$\hat{K} = \sum_{j=1}^n n_j / \sum_{j=1}^n \left[\hat{E} / I_T - \zeta_c(\tau_j) \right] H_j \quad [12]$$

$$\hat{K} = \left[\sum_{j=1}^n n_j / (\hat{E}_T / I_T - \zeta_c(\tau_j) S) \right] / \sum_{j=1}^n H_j \quad [13]$$

其中 n_j 是在第 j 次测试中运行的次数, H_j 是在 j 次测试中各次运行的总时间。

5. 米沙模型

这个模型仍采用指数分布描述系统可靠性:

$$R(\tau, \tau') = \exp[-C Z(\tau) \tau'] \quad [14]$$

其中 τ 是在调试阶段机器运行时间, τ' 是计算机投入使用后的执行时间。

这个模型的特点是区分了两种时间概念。一种是前述的定义为机器中心处理机(CPU)运行(执行)的时间。另一种是以周(或日)作为计时单元的日历时间, 由于测试的过程受制于三种资源(故障识别人员, 错误改正人员, 程序留机时间), 米沙建立了执行时间和日历时间的联系:

$$\Delta t = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \max\left(\frac{dt_i}{d\tau}, \frac{dt_F}{d\tau}, \frac{dt_c}{d\tau}\right) d\tau \quad [15]$$

其中: t_i 表示故障识别时间, t_F 表示错误改正的时间, t_c 表示程序留机的时间。

用最大似然法, 米沙还给出了表达式中各参考数的估计值。

6. 勒尔逊模型

设 E 是全体输入数据的集合:

$$E = (E_i; i = 1, 2, \dots, n)$$

E_e 是 E 的子集合, 用 E_e 中的元素作为输入数据时, 将导致系统失效, N_e 表示 E_e 中元素数目, 勒尔逊定义, 程序运行一次失效的概率为:

$$P = \frac{N_e}{N} \quad [16]$$

程序运行一次无故障的概率为

$$P = 1 - P = 1 - \frac{N_e}{N} \quad [17]$$

系统运行 n 次不出故障的概率为

$$R(n) = R^n = (1 - P)^n \quad [18]$$

为评定某个程序的可靠性, 可抽取 n 组数据作试验, 如果 $\hat{N}_e$ 次失败, 则可得出 R 的估计值 $\hat{K}$ 为:

$$\hat{K} = 1 - \frac{\hat{n}_e}{n} \quad [19]$$

7. 米尔——鲍森模型

他们用超几何分布来估计软件中的错误数目。米尔提出, 如以 N 代表软件中固有错误的总数, n_1 代表测试前人为加入的错误数, 那么, 如在测试中发现的错误数为 r 个, 则其中有 K 个是人为错误, 其概率为:

$$q_k(N) = \frac{\binom{n_1}{k} \binom{N-n_1}{r-k}}{\binom{N}{r}} \quad [20]$$

由此得出, N 的最大似然估计值为

$$\hat{N} = \text{int} \left[\frac{n_1 r}{K} \right] \quad (21)$$

鲍森后来指出上两式是不正确的, 按照米尔的方法, N 的最大似然估计值应为

$$N^* = \text{int} \left[\frac{n_1(r-k)}{K} \right] \quad (22)$$

鲍森提出了两步测试方法。设第一个程序员测出了 n_1 个错误, 第二个程序员独立地测出 r 个错误, 如其中 K 个是属于第一个程序员已发现的错误, 则可用式 (20) 表示有 K 个错误是属于第一次已发现的错误的概率。式 (21) 给出的是在这种情形下 N 的最大似然估计。

上面的几种数学模型都在一定范围内获得应用, 但是, 这些模型尚需实验结果加以证明。近几年来新的数学模型仍在不断提出 (如时间相关错误检测率模型和硬-软件综合评估模型等), 它们的实用价值更有待于进一步的研讨。

四、软件的维护性

软件的维护性在相当长的时期内曾被人们忽视, 近几年来才开始受到注意。许多大型软件系统运行的结果表明, 软件维护费用大大超过了软件的研制费用。Boebn 在 1976 年预测到 85 年时软件维护费用将达到或超过硬软件总费用的 60%。图 5 是 Boebn 的预测曲线。

按照 Swanson 的见解, 软件的维护性包括下列三方面的内容:

- (1) 事故维修: 指发生故障后采取的维护措施。
- (2) 自适性维护: 指由于数据环境变化或处理环境变化而需要进行的维护性作业。
- (3) 完全性维护: 指提高处理效率, 改进处理方法和改进可维护性而进行的维护性作业。

Boebn 还认为软件的可维护性也可分为易试验性、易理解性、易变更性。至于怎样定量描述这些性质迄今尚无解决办法。

现在, 人们已认识到只有从开发阶段起就注意到可维护性才是解决问题的根本途径。譬如说明书和程序的易读性、程序的可扩充性、维护影响范围的局部化、出错影响范围的局部化、维护过程的文本化都应在设计阶段注意解决。此外, 维护工具的开发也是提高可维护性的一个重要手段。

五、结 束 语

随着我国计算机工业的发展和计算机的推广应用, 必然会提出开发大型软件系统的要求。那时软件的可靠性将成为悠关全局的重要问题。我们要看到这个趋势, 尽快开展软件可靠性的研究工作。这就需要软件工程和可靠性两个学科的科技人员共同努力, 各自从自己的领域出发, 在纵深发展本学科研究工作的同时, 也注意横向发展, 推进软件可靠性的研究,

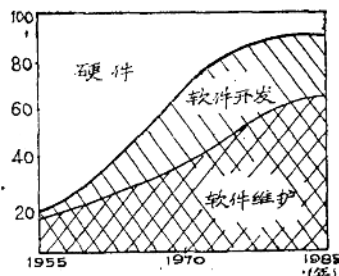


图 5

尽快缩小在这个领域内我国同国外的差距,把我国自己的软件可靠性研究工作搞上去。

(注)文中所列参考资料,因篇幅所限略去。——编者

国外高可靠分立半导体器件的现状与发展趋势

电子工业部十三所 徐立生

一、前 言

半导体器件从发明到现在已经有三十多年的历史,主要经历了锗、硅器件两代历程,预计下一代高性能器件将属于砷化镓器件,目前硅器件已发展成熟,不论在电性能和可靠性方面都达到了很高的水平,小功率器件的现场使用失效率达到 10^{-7} /小时以下,大功率器件的现场使用失效率达到 10^{-6} /小时,高可靠器件的一个研制周期需要3~5年时间,失效率水平可以降低半个到一个数量级。只有在器件的可靠性设计、工艺过程的质量控制、可靠性筛选和评价试验、失效机理分析等方面作出巨大的努力后,才能有把握地生产出高可靠半导体器件。

本文从微波功率晶体管,海缆、卫星、宇航用晶体管,砷化镓场效应晶体管等器件出发,阐述了国外高可靠分立半导体器件的现状与发展趋势。这些国外经验对我国研制和生产高可靠半导体器件有参考价值。

二、微波功率晶体管

硅双极型微波功率晶体管是分立器件的重要成员之一,它从六十年代开始进入微波领域,到七十年代已经在功率、频率性能上取得了重大的进展,在P、L、S波段的雷达、通信、遥测、电子对抗等方面得到了广泛的应用。目前国外的产品水平为400MHz、100W,1GHz、50W,2GHz、40W,3GHz、10W,4GHz、5W等等,以上为连续波性能,在脉冲应用时,输出功率还可增加几倍。在C波段以上开始让位于砷化镓器件;在S波段以下,无论从价格、可靠性和使用方便等方面都占明显的优势,还在继续发展。

1. 可靠性水平

表一列举了七十年代有代表性的高可靠性微波功率管的可靠性水平,总的看来进展是缓慢的。目前器件的平均寿命已达百万小时以上,现场使用失效率低于 10^{-6} /小时,器件的正常使用结温由初期的100℃左右提高到目前的140℃左右,有利于减小整机的体积和重量,实现小型化。

2. 主要失效机理

1. 早期的高可靠微波功率管都采用铝铝系统,性能较差,目前的军用产品大多采用金金系统,性能有明显的提高,但也产生了一些新的失效机理。微波功率管的失效模式可以分为短期的突然失效和长期的参数退化失效两大类。属于突然失效的机理有:负载失配和二次

表一 微波功率晶体管可靠性水平

发表年份	1971	1972	1973	1973	1975	1979
厂 家	欧、美	RCA	MSC	富士通	RCA	MSC
型 号		2N3375	MSC1330	27个品种	TA8777	商业器件
电 性 能	1GC、 20W	400MC5W	1.4GC30W	1GC30W等	1.2GC40W	
预期MTTF(小时)	50万		100万	216万	100万	
预期 λ (1/小时)	2×10^{-6}		1×10^{-6}	5×10^{-7}	1×10^{-6}	
结 温 T_j	100°C		100°C	145°C	140°C	
使用MTTF(小时)		22万	15—78万*	240万*		150万
使用 λ (1/小时)		4.5×10^{-6}	$2.6-6 \times 10^{-6}$	4.2×10^{-7}		6.7×10^{-7}
置 信 度		60%	60%	60%		60%
使用结温 T_j			140—160°C	145°C		
金属化系统	Al	Al	Al	Al	Au	
使 用 场 合		F4J机 空用导弹	相控阵雷达	微波中继	民兵导弹	航空测距

* 作者按现场数据计算值

击穿引起的烧毁,各种环境应力引起的失效等等。属于退化失效的机理有,金属的电徙动(开路),金属置换如硅在铝中的溶介(EB短路),脉冲功率管的铝颗粒增大(EB短路),表面沾污形成的各种表面态等等。

3. 可靠性设计要点

半导体器件的固有可靠性取决于器件的可靠性设计。一般说来器件的电性能和可靠性是互相制约的,在设计时要进行折衷考虑。高可靠器件只能选择工艺上、结构上成熟的器件,决不能片面地追求高性能,这是一条基本的设计原则。微波功率管通常都在高结温下工作,正常工作结温选择110°C~140°C,比小功率器件高50°C以上,按照 Arrhenius 方程可以预期功率管的固有寿命要比小功率管低1~2个数量级,即失效率高1~2个数量级。针对微波功率管的使用特点和主要失效机理分析,在器件可靠性设计中要特别注意以下几点:

①热设计:要从结构上尽量减小管子的热阻,有源区的热分布要均匀,不应有局部发热区,必要时可以采用多胞结构,在器件研制阶段要用红外显微镜检查热分布是否达到设计要求,射频状态下的峰值结温不宜超过140°C。

②采用发射极镇流电阻以均衡电流防止正偏二次击穿,设计良好的功率管可抗无限大电压驻波比,也有采用保护二极管结构(TRW公司)。

③外延材料要留有余地,防止反偏二次击穿。

④为减少电徙动引起的失效, 电流密度 J 不宜过大。在 MIL 标准中规定: 对于铝系统 $J \leq 2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, 有玻璃钝化的情况下 $J \leq 5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$; 对于金系统 $J \leq 6 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 。金系统的抗电徙动能力要比铝系统好一个数量级, 常用的有 Pt/Ti/Pt/Au、Pt/Wo/Au, Pt/Ti/W/Pt/Au 等等。

⑤微波功微管的图形设计比较灵活, 常用有梳状、覆盖、网状和菱形等四种, 以 TRW、RCA、MSC 和雷声公司为代表, 各有其优点和缺点, 其中覆盖结构电流密度最小, 从抗电徙动角度看最为有利, 但要牺牲一些频率性能作为代价。

⑥采用各种钝化层以防止表面沾污, 又可减小金属的电徙动。

⑦采用内正配技术, 可以提高效率降低结温。

⑧要注意器件的封装设计。器件的使用可靠性由电应力、热应力和环境应力决定, 这些都和管壳封装有关, 不应忽视。对封装的要求是: 低的热阻、匹配良好、机械强度高、气密性好。

三、海缆、卫星、宇航用高可靠晶体管

海缆、卫星、导弹等高可靠系统对电子元器件的可靠性、稳定性提出了极高的要求。海缆系统设计寿命为 20 年, 通常只允许出现 1~2 次故障。国际通讯卫星 II~VII 号 (1967~1985) 设计寿命分别为 3、5、7、10 年, 造价上亿美元。洲际导弹和宇宙飞船工作时间虽然不长, 但由于系统庞大, 拥有几十万元器件, 从任务的重要性和人员的安全性考虑, 也必须选用最高可靠性元器件, 对于上述用途的器件, 在国外也称为超高可靠性器件。

1. 可靠性水平

表二列举了海缆无人增音机用高可靠晶体管的可靠性水平, 置信度为 90%。制造海缆系统需要有高度的技术水平, 据现有报导只有美、英、法、日四国有能力研制。海缆器件的发展也经历了锗、硅两代器件, 金属化系统现在全部采用金系统, 在七十年代中期使用失效率已降低到 1 菲特, 由于使用结温低, 在稳定的环境中工作, 体现了分立器件的最高可靠性水平。

表二 海 缆 系 统 晶 体 管 可 靠 性 水 平

发表年份	1967	1968	1969	1974	1974	1975
厂 家	英STC	贝 尔	英邮总	富士通	富士通	贝 尔
型 号			4A2	FT1207等	ECL 1346等	
系 统		SF		CS-1M	CS-36M	SG
使用 λ (1/小时)	5.5×10^{-8}	5×10^{-9}	2.6×10^{-8} *	5×10^{-9}	1×10^{-9}	2.8×10^{-9} *
使用结温 T_j				60°C	60°C	65°C
金属化系统	Al	Ge Tr	Al	Au	Au	Au

* 作者按系统数据计算值

卫星、导弹、宇航用高可靠器件，在美国称为宇航级（S级）器件。民兵 I 导弹制导计算机用的晶体管现场统计失效率为 1.2×10^{-8} /小时，民兵 II 改用集成电路后失效率低于 8×10^{-9} /小时。阿波罗飞船用的器件失效率为 2.8×10^{-8} /小时。NEC 公司报导：C 波段晶体管在空间应用条件下其 MTTF 大于 10^9 小时（注意 $T_j < 65^\circ\text{C}$ ）。

2. 主要失效机理

海缆、宇航用高可靠晶体管都要在专用的生产线上制作，实行严格的质量控制，器件的失效模式都要受控，在实际应用中处于降额使用状态，应力和结温较低，一般不会发生突发性的致命失效。主要的失效机理有：金属电徙动引起的性能退化；电流放大系数的退化；由于金穿过阻挡层引起 PN 结的退化。其中电徙动的激活能最小，为 0.85eV ，有可能是低应力使用中的主要失效机理。另外两种失效机构在高应力试验中被发现，激活能大于 2eV ，在结温 200°C 以下使用时对可靠性威胁不大。此外，由于二次击穿和浪涌电流引起的烧毁，表面沾污引起的参数退化等失效机理也可能存在，通常在产品研制过程中加以消除。

3. 可靠性设计要点

海缆、卫星、宇航用器件的可靠性设计建立在失效物理基础上，首先要透彻地分析器件的失效机理，对于主要的机理要采取保守设计，留有充分的余地，不允许轻易采用新结构、新技术和新工艺，一切都要建立在严格论证的基础上，也可以引用长期积累起来的制管经验。

在器件可靠性设计中要注意以下几点：

①对电徙动机构要认真对待，器件电流密度尽可能低，通常用金系统，尽量减少管子的热阻，以保证器件在低结温下工作。

②为防止金穿过阻挡层使 PN 结破坏，要增加阻挡层厚度，工艺中用 SEM 监控针孔。

③采用有效的钝化层，MIL 标准规定：S 级器件淀积 $\text{SiO}_2 > 6000 \text{ \AA}$ 或 $\text{Si}_3\text{N}_4 > 2000 \text{ \AA}$ 。

④加厚外延层防止二次击穿，也可选择双外延集电极等最佳结构。

⑤海缆器件要有最好的气密性，漏气速率要小于 $10^{-10} \text{ cm}^3/\text{秒}$ 。

四、砷化镓场效应晶体管

砷化镓场效应晶体管的全称是砷化镓肖特基势垒栅场效应晶体管（GaAs MES FET），是由 C.A. Mead 于 1966 年首次提出，当 1970~1971 年在材料和工艺上有重大突破后，进展非常迅速。砷化镓场效应管的低噪声性能非常优越，从 C~K_a 波段远远超过了硅双极晶体管，目前在 4GHz 下 N_F 为 0.7dB，已接近常参水平，在 18GHz 下 N_F 为 2.3dB，作为通信卫星等低噪声放大是理想的器件。由于场效应管是多子器件，还具有良好的抗辐照性能。功率场效应晶体管是在 1973 年由富士通和 RCA 公司首次研制成功，近年来已成为微波技术领域中最热门的课题，目前在 4~20GHz 频段输出功率都超过了硅双极晶体管，在卫星通信、雷达、电子对抗等场合都可以广泛应用。在 C 波段以下双极晶体管尚占优势，在 C 波段以上砷化镓场效应管占优势，并且是 X 波段以下唯一能和行波管进行竞争的固态器件。因此国外普遍报道：在微波技术领域中进行一场砷化镓场效应晶体管的革命，并预期砷化镓器件将成为

九十年代的尖端技术。

1. 可靠性水平

表三列举了1974年以来有代表性的砷化镓低噪声和功率场效应晶体管的可靠性水平。在低噪声器件方面，早期的报道都是按加速寿命试验的外推值，较好的MTTF为 10^8 小时，比双极晶体管MTTF 10^{10} 小时差二个数量级。文献指出：不加偏压的加速外推将给出一个过于乐观的预言，二者可相差100倍。在高湿度和离子沾污下引起的失效机理，在使用情况是不容许忽视的。总的看来在现场使用可靠性方面要比双极性器件差1~2个数量级，正在积极改进之中。功率场效应管的可靠性水平也有明显的提高，NEC估计未筛选器件的MTTF为 5×10^5 小时，筛选以后还可以提高1个数量级，贝尔实验室报道初始失效率为 10^{-6} /小时，长期使用后能降到 10^{-7} 小时。美国的通信卫星制造商已开始用在卫星上代替行波管放大器。今后的关键问题是器件的可靠性问题，由于现场使用数据不多，许多高可靠系统还不敢轻易使用，一旦器件的失效机理研究透彻以后，就有广阔的使用前景。

表三 Ga As MES FET 的可靠性水平

发表日期	1974	1975	1976	1976	1976	1976
厂家	NEC			HP	普莱赛	NEC
型号	V244	2SK85			GAT2.3	
预期MTTF(小时)	$>10^7$	10^8	10^7	10^6-10^8	$>10^7$	$>10^8$
沟道温度Tch	60°C		70°C		62°C	100°C
发表日期	1978	1979	1980	1980	1980	1982
厂家	贝尔	NRL	NEC8684	NEC	贝尔	贝尔
型号		功率FET	功率FET	现场统计	2WFET	功率FET
MTTF	$>10^7$	$>5 \times 10^6$	$>10^8$	$\lambda * 2.5 \times 10^{-7}$	$\lambda 10^{-6} - 10^{-7}$	$\lambda < 10^{-7}$
Tch	60°C	125°C	125°C			110°C

* 置信度60%

2. 主要失效机理

由于砷化镓器件的历史较短，在可靠性工作方面的经验正在积累之中，目前根据文献报道，低噪声砷化镓场效应管的主要失效机理有，静电放电引起的永久性损伤，电接欧姆接触退化引起参数的退化，由于砷化镓材料不佳引起电参不稳定等等。其中欧姆接触的退化可能成为主要的失效机理此外，由于封装不良，在高湿度和离子沾污情况下也容易产生退化失效。