



# 数字系统故障对策与 可靠性技术

郑崇勋 著

国防工业出版社

· 北京 ·

(京)新登字 106 号

图书在版编目(CIP)数据

数字系统故障对策与可靠性技术/郑崇勋著. —北京:  
国防工业出版社, 1995. 5

ISBN 7-118-01373-0

I. 数… II. 郑… III. ①数字系统-故障修复②数字系  
统-可靠性 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP/数据核字(94)第 11202 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 12¼ 320 千字

1995 年 5 月第 1 版 1995 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 18.90 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开

放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

## 国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤 刘 仁 何庆芝

(按姓氏笔划为序) 何国伟 何新贵 宋家树 张汝果 范学虹

胡万忱 柯有安 侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

# 前 言

在科学技术高度发展的现代社会,数字电子技术已成为高科技的重要保证和支柱。数字技术的广泛应用,加快了社会发展的节奏,紧密了社会各方面联系,也给国民经济、国防工业和社会生活各个领域注入了新的活力。由于数字系统和设备在各个应用领域的重要性日益加重,对它的可靠性的要求也就越来越高。高可靠性是数字电子设备生命力和技术优势的根本保证。为了提高数字系统的可靠性,研究设计和生产试验部门的工程师和专家学者进行了大量的工作和长期的努力,取得了可喜的成绩。现代的数字程控电话交换机可连续工作 20 年,全局阻断小于一小时,计算机网络信息系统可保证连续运行数年无破坏性事故。

尽管目前数字系统的可靠性已达到了很高的水平,然而问题并没有彻底解决。造成数字系统或设备不可靠的原因主要来自两个方面:一是由于各种无法控制的故障所造成的;一是产品(或系统)本身的可靠性质量问题。前者是故障对策所要研究的问题,涉及到如何迅速而准确地查找、诊断和排除故障。后者就是可靠性技术所要研究的问题,涉及到如何减少故障、控制故障的发生,以及减小或免除故障的危害。也就是说,既要注意“治病”(故障对策),更不可忽视“防病”(提高可靠性)。两者是相辅相成,在技术上是互补的、相关交叉的。防病措施有力,发病也就少,治病也要容易;治病有方,则也就减小病的危害。本书编写的指导思想既注重两者的不同和差别,又强调两者在技术上的相互配合和统一。本书在绪论之后,第二至五章主要讨论故障对策,第六至九章论述数字系统可靠性技术,在论述内容上略有交叉。

由于故障对策和可靠性技术都是实用性技术,著者在内容选取上偏重于比较成熟和有效的方法,同时也注意最新研究成果,按

照“少、新、精”的原则选材。在论述上着重于基本原理和方法的阐明,尽量避免引入过多的专用术语、概念和特殊的数学方法。由于数字系统理论发展落后于实践应用,所以一些数学方法往往只针对某些特定问题,对于这类数学方法书中尽可能避免,以免读者在阅读理解有困难或费时。注意加强物理概念和基本原理的阐述,许多问题“点到为止”,避免冗长的赘述,而列出一些文献供读者深入时参考。本书的内容也融入了作者及其研究小组多年来的研究工作的心得和体会。

著者特别感谢许多专家学者,尤其是“国防科技图书出版基金”评委会及国防工业出版社的同志对本书的关心和支持,他们对本书的内容和编写提出了许多宝贵的意见,给予著者真诚的鼓励 and 关心,使著者终于能在各种潮流冲击下静心地完成编写工作。

限于著者的水平和学识,书中错误和不当之处在所难免,诚望专家学者不吝指教。



## 内 容 简 介

本书从故障对策和可靠性技术两方面论述了如何使数字系统更加可用更加可靠这一核心问题。内容主要包括:如何循正确的路线和科学的方法迅速查找、验证和排除数字系统常见故障;静态和动态逻辑故障的判断、测试、诊断和消除技术;信息码差错的控制及传输波形畸变的校正;消除各种干扰所造成的故障和差错的方法;系统可靠性的评价、预计和分配方法;易测性设计技术;故障自检测和失效保险的设计方法;各种容错技术等。内容选材注意了有关发展动态,着重选取介绍实用有效的方法和理论,也融入了著者及其科研组多年实践工作的心得体会,是一本理论与实践、科学性与实用性并重的论著。

本书主要对象是从事与数字系统有关的工程技术、科研人员;高等院校高年级学生、研究生和教师。

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b>第一章 绪论</b> .....        | 1   |
| 1-1 数字系统故障对策概论 .....       | 1   |
| 1-2 数字系统可靠性技术概论 .....      | 12  |
| 1-3 问题的核心 .....            | 19  |
| 小结 .....                   | 20  |
| 参考文献 .....                 | 21  |
| <b>第二章 故障查找基础</b> .....    | 22  |
| 2-1 常用数字电路测试设备 .....       | 22  |
| 2-2 逻辑分析仪及特征分析仪 .....      | 29  |
| 2-3 故障查找基本策略和方法 .....      | 36  |
| 2-4 故障检修流程图 .....          | 43  |
| 2-5 数字电路故障分析 .....         | 46  |
| 小结 .....                   | 55  |
| 参考文献 .....                 | 56  |
| <b>第三章 逻辑故障诊断</b> .....    | 57  |
| 3-1 逻辑故障模型及可测试性 .....      | 57  |
| 3-2 布尔差分法 .....            | 64  |
| 3-3 通路敏化法 .....            | 71  |
| 3-4 <i>D</i> 算法 .....      | 75  |
| 3-5 PODEM 算法和 FAN 算法 ..... | 84  |
| 3-6 逻辑故障测试难点讨论 .....       | 92  |
| 3-7 时序逻辑的组合化测试法 .....      | 100 |
| 3-8 时序机的功能测试 .....         | 105 |
| 3-9 逻辑故障实用测试技术 .....       | 114 |
| 3-10 动态逻辑故障对策 .....        | 118 |
| 小结 .....                   | 126 |
| 参考文献 .....                 | 128 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>第四章 数字信号传输故障对策 .....</b> | <b>130</b> |
| 4-1 数据传输概论 .....            | 130        |
| 4-2 差错控制码 .....             | 138        |
| 4-3 传输畸变及对策 .....           | 152        |
| 4-4 间歇差错产生原因及排除 .....       | 163        |
| 4-5 光纤数据通信 .....            | 167        |
| 小结 .....                    | 170        |
| 参考文献 .....                  | 172        |
| <b>第五章 干扰与噪声的防治 .....</b>   | <b>173</b> |
| 5-1 数字电路的抗干扰能力 .....        | 173        |
| 5-2 干扰来源及抗干扰一般对策 .....      | 177        |
| 5-3 工频电源干扰的防治 .....         | 182        |
| 5-4 电磁干扰及电磁相容性设计 .....      | 189        |
| 5-5 其他干扰的防治 .....           | 201        |
| 5-6 数字系统内部噪声的抑制 .....       | 206        |
| 小结 .....                    | 213        |
| 参考文献 .....                  | 214        |
| <b>第六章 可靠性技术基础 .....</b>    | <b>216</b> |
| 6-1 可靠性特征量 .....            | 216        |
| 6-2 系统的可靠性模型 .....          | 224        |
| 6-3 提高数字系统可靠性基本方法 .....     | 232        |
| 6-4 可靠性设计概论 .....           | 241        |
| 6-5 系统可靠性预计和分配 .....        | 244        |
| 小结 .....                    | 254        |
| 参考文献 .....                  | 255        |
| <b>第七章 数字系统易测性设计 .....</b>  | <b>257</b> |
| 7-1 逻辑可控性和可观性 .....         | 258        |
| 7-2 改善逻辑电路易测性基本方法 .....     | 262        |
| 7-3 组合逻辑易测性结构设计 .....       | 275        |
| 7-4 时序逻辑易测性结构设计 .....       | 282        |
| 7-5 印制电路板的易测性设计 .....       | 290        |
| 小结 .....                    | 299        |
| 参考文献 .....                  | 300        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| <b>第八章 故障自检测与失效保险 .....</b> | <b>302</b> |
| 8-1 故障安全与自检测 .....          | 302        |
| 8-2 组合逻辑自检测电路设计 .....       | 306        |
| 8-3 自检测时序电路设计 .....         | 317        |
| 8-4 失效保险设计 .....            | 325        |
| 小结 .....                    | 331        |
| 参考文献 .....                  | 332        |
| <b>第九章 容错技术 .....</b>       | <b>334</b> |
| 9-1 概述 .....                | 334        |
| 9-2 硬件容错技术 .....            | 337        |
| 9-3 信息冗余 .....              | 352        |
| 9-4 软件容错技术 .....            | 364        |
| 9-5 时间冗余 .....              | 376        |
| 小结 .....                    | 378        |
| 参考文献 .....                  | 379        |

# 第一章 绪 论

人类一存在,就不断地为防治疾病和提高自身的健康素质而斗争;数字电路一出现,工程师和专家就不断地为对付其各种故障和提高其自身的可靠性而努力。

学会对付数字系统和设备可能出现的形形色色的故障是从事与数字电路有关的工程技术人员的重要技能。为了提高这种能力,仅靠技术人员自身经验的积累是不够的,他们需具备对付故障的理论和方法,学会如何从根本上减少所设计的数字系统的故障率。前者就是“故障对策”所要讨论的问题,包括对故障的查找检测、分析诊断和治理等。后者就是“可靠性技术”所要研究的问题。

本章归纳了数字系统常见故障类型及产生原因,介绍了数字系统可靠性技术基本概念,为以后各章的学习奠定初步基础,也是本书的引言。

## 1-1. 数字系统故障对策概论

数字系统的故障情况要比正常情况更加复杂和多样化。这就要求从事与数字电路有关工作的技术人员,不仅要具备对正常电路或系统的设计分析和评价能力,而且还需深刻了解电路有故障时的症状及查找故障、检测和修复故障的理论与方法。许多工程技术人员也都从自己的实践工作中或多或少地总结和积累了对付故障的经验。然而,由于数字系统复杂性和规模的不断增大,仅靠技术人员自身实践经验的积累已显得越来越难“驾驭”各种故障。这就需要有一套对付故障的科学方法与策略,并从理论上予以阐明和总结。

### 1-1-1 数字系统的失效与故障

当一个数字电路或系统在规定的工作条件下,不能完成预定的功能——逻辑变换、状态转换关系及给出应有输出时,该数字电路或系统即被认为是失效了。引起失效的原因是该电路或系统存在有故障。大部分故障均会导致失效,如电源短路或开路、IC 芯片故障、输入或输出断线等。然而,有时故障不一定引起电路功能失效。例如在图 1-1 所示电路中,当电路  $a$  点与电源短路或  $b$  点对地短路都不会影响电路的逻辑功能,即使故障导致门电路  $G_1$  或  $G_2$  失效。实际上,图 1-1 电路中  $G_1$  和  $G_2$  两个门是多余的。这类故障因其不影响电路功能,故仅从输入和输出的逻辑函数关系是难以测试出是否有故障,因而称为冗余故障或不可测故障。而对于能导致功能失效的故障,均可从输入和输出的关系中来判定是否存在故障,故称为可检测故障。

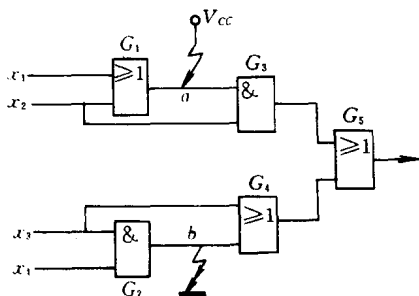


图 1-1 冗余故障例

短路都不会影响电路的逻辑功能,即使故障导致门电路  $G_1$  或  $G_2$  失效。实际上,图 1-1 电路中  $G_1$  和  $G_2$  两个门是多余的。这类故障因其不影响电路功能,故仅从输入和输出的逻辑函数关系是难以测试出是否有故障,因而称为冗余故障或不可测故障。而对于能导致功能失效的故障,均可从输入和输出的关系中来判定是否存在故障,故称为可检测故障。

另一类故障介于上述两者之间。这种故障有时导致功能失效,有时又不影响电路功能。例如接触不良,可能在 100 次测试中,有 5 次不正确。又如外界干扰所引起的功能变化,也是随机性的。这类故障称为随机故障,是一种动态故障。

对于可检测的故障通常都比较确定,故障也比较容易查找。而对于不可测故障必需采取特殊措施使其变为可检测故障,再进行测试。对于随机偶发故障往往十分令人头疼,难以检测。

### 1-1-2 故障的主要类型

研究故障的分类是为了更好地抓住故障的主要特征,以便更好地对付它。从不同的准则出发,可以有各种不同的故障分类。前述按故障存在是否影响其功能可分为可测故障、不可测故障和随机故障。可测故障是指可以从输出端来观察其对输入的响应而判定是否存在故障,因而称为可测故障。随机故障是时而能观察到故障对功能的影响,时而又不能。而不可测故障对功能毫无影响,即故障的存在不影响输入和输出之间的正常关系。

从故障的因果关系可分为物理性故障和逻辑性故障。物理性故障是指导致故障的直接物理性原因,如晶格缺陷、集成电路内部引线断落等。逻辑性故障是指故障所引起的逻辑状态变化,例如 TTL 电路的输入开路相当于将该输入固定于逻辑 1 状态等。

从故障的表现症状和性质,一般可将故障分为静态故障(Static Faults)和动态故障(Dynamic Faults)两大类。这种分类便于研究故障对策,有必要作较详尽的讨论。

静态故障的特征是对于给定的某种输入,电路会给出稳定的错误输出,其故障症状具有良好的重复性。静态故障是一种永久性故障,故比较容易观察和研究,它在被排除之前具有稳定不变的特点,所以通常又把它称为硬故障。

动态故障是当信号发生变化时出现的,具有随机性(偶然性)或者间歇性,一般比较难观察和测量,需要采用高速示波器或其他特殊检测设备才能发现。

常见的静态和动态故障在下一小节讨论。

当然,对故障还有其他分类准则,如按故障原因划分、按其危害性分类、按故障发生的时间分类、按是否与人为因素有关分类等等。有关章节还将分别论及。

### 1-1-3 常见静、动态故障

迄今为止,印制电路板仍是数字系统的基本单元或部件,它的故障对数字系统来说最有典型性。本书主要讨论电路级和系统级的故障,而不涉及器件本身内部工艺问题。

常见的静态故障有：

#### 1. 固定故障(stuck faults)

这种故障在电路板上最为常见，多由于连线错误或集成电路内部短路或开路引起的。造成某一连线或集成电路的输入或输出端的逻辑值固定不变，故称为固定故障。由被固定的逻辑值不同，又分为固定于 1 的故障和固定于 0 的故障两种。如果这种发生在片子内部，则难以修复，只有换片子。

#### 2. 桥接故障(bridge faults)

印制电路板上两相邻线间短路，就形成了所谓的桥接故障。被桥接的两条线逻辑值相同时，不出现矛盾，否则就出现矛盾并产生差错。对于不同类型的器件会产生不同的效果，使桥接线的逻辑值趋 1 或者趋 0，或者为 1 和 0 之间的某一阈值。对于多数逻辑电路来说，两路输出线桥接可能把一个或二个单元电路烧毁，最后转化成为固定故障。输出线和输入线之间的桥接形成反馈，可能造成电路振荡或不稳定。桥接故障的查找和诊断比固定故障要困难得多。

#### 3. 开路或断线

这类故障的症状很像固定故障。如 TTL 电路的输入开路相当于该线逻辑固定于 1。一个或非门的输入开路可能造成其输出逻辑常为 0。从逻辑性状来分析，这类故障常可归入固定故障。

#### 4. 电源故障

电路板上的电源故障均属于静态故障。如电路板上一部分 IC 片子失电，电路的逻辑功能就出错。一个 IC 片子失电，在多数情况下，好像该片子被去掉，故障症状往往像是该片的输出被固定于 0 或者 1。所以就其逻辑症状而言，等同于固定故障。电路失电的原因多由于电源线或地线开路、错接线或接触不良，也可能由于电源本身完全不能工作或断线。

另一类故障是电源电压不正常超过了允许偏差，如电压异常升高或过低。电压过高，严重的造成电路烧毁或功能出错（产生振荡、逻辑值倒置等）。轻微的可造成电路不稳定或影响使用寿命。电源电压偏低可使逻辑值不稳定，且易受干扰。这类电源故障多半是



由于直流稳压电路或开关稳压电源故障引起,也可能是接错线或者不同电压等级的电源混淆。在检查测试电路之前应首先查对和校正电源电压。

### 5. 无源器件故障

在数字电路中除了各种数字式 IC 芯片外,还要使用不少无源元器件,如电阻器、电容器等。这些元件可能发生诸如电阻器端帽松脱造成开路、电容器短路或开路或电容值变化、电阻器烧毁等故障。这类故障多数表现为短路或开路故障,即类同于短路或断线故障。然而电阻值变化可能造成晶体振荡器停振、逻辑值模糊等故障,电容变化可引起去耦不良、振荡器频率变化等后果。应选用优良器件或者使器件降额使用,在安装生产过程中避免使这些元器件受到机械损伤。

### 6. 用错或插错片子

由于 IC 片子样子十分相似,打印的型号字很小,不易看清,多次触摸更会造成标志模糊,故用错片子的事屡见不鲜。另外,又由于 IC 片子十分对称,很容易将片子上定位用的标志口弄错,或者偶然插反。这时往往使片子上的电源极性也反了,不仅电路不能正常工作,有时还会烧毁片子。故在使用集成电路芯片时应仔细辨认片子的型号和定位标志,以减少这类故障。

### 7. 接触不良

这又是一种常见的、不易对付的故障。诸如插件松动、焊接不良(虚焊)、接点表面氧化、接触簧片弹性退化等原因都会造成接触不良。它的故障症状与开路相似,但带有一定偶然性,在故障初期更难以发现。选用质量好的接插件、良好的表面处理工艺,保证焊装质量都能大大减少此类故障。

### 8. 绝缘不良

这类故障往往被人忽视。然而随着印制电路板上元器件密度的增加,线间距离的减小,由于印制板表面处理不良或板材质量差而造成的绝缘不良会导致信号串线和泄漏,使电路工作不稳定甚至无法工作。选用良好的印制板材料并注意表面清洁处理是防止