

数字计算机的错误检测逻辑

任天恩译

上册

西北电讯工程学院

一九七五年五月

毛主席语录

独立自主，自力更生，艰苦奋斗，勤俭建国。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行，我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

译 者 说 明

本书对数字计算机中广泛使用的一些硬件错误检测技术作了一般性介绍，并首次引进布-尔差分分析出现错误的逻辑电路。

由于作者是面向逻辑设计人员的，书中若干定理的数学处理显得粗糙。因此本书在理论方面远不及错误检测理论方面的专著，但从实用方面看，对不熟悉这方面内容的读者还是一本有一定参考价值的入门材料，为此本着“洋为中用”的精神把本书翻译出来。原书中的笔误及印刷错误在译文中已经改正。

本书部分章节有的兄弟单位已摘译发表过，最后定稿时曾作参考。同时本译稿经本院外文教研室和译者所在教研室有关同志校阅过并提出很好意见，这里一并表示谢意。但由于译者水平有限错误仍一定不少望使用过程中提出宝贵意见。

译者

一九七五年五月

原 序 摘 要

本书是写给IBM公司逻辑设计人员的一本叙述许多错误检测技术的手册的结果。把手册扩充成一本书是为了叙述许多可用于数字计算机的错误检测技术。其对象是对计算机设计问题特别是对逻辑设计问题感兴趣的人员。

本书可作为研究错误检测系统设计的教科书。对于检测各章中讨论的计算机逻辑的特殊范围内发生的错误的方法，也是有益的参考书。

本书中的一些材料，作者曾用于课堂授课。逻辑设计和布尔代数是理解本书所必需的基础知识。此外，具备一些计算机设计的知识是有益的。

除前3章外，其它各章是独立的。读完为所有章节提供数学基础的，第1、2和3章外，其余各章几乎可以任意次序阅读。

关于错误检测的文献是缺乏的。其原因部分是因为许多错误检测技术，单独看起来显得没有多大意义。写本书的原因之一是提供装置中已知最实用的错误检测技术，从这里能够看出它们对错误检测系统的总的关系。文献缺乏的另一原因是不知道技术发展状况，因此，难于确定一种特殊方法是否优于已采用的那些

5754-102

方法。加之，许多所谓作者都不愿面临提出不好的技术时遇到的困难。

希望，在发现改进时本书能作为可以引用的一般技术参考。

本书叙述的错误检测技术是围绕晶体管逻辑设计的。大部分思想也适用于其它种类的逻辑，如：磁心、继电器和低温元件，然而，在把检验思想用于这些逻辑时，需要作一些调整。

FREDERICK F. SELLERS, JR.

MU-YUE HSIAO

LEROY W. BEARNSON

目 录

术语和符号	1
第一章 数字计算机中的错误检测	10
1.1 保护用户的错误检测	12
1.2 引起重新起动的错误检测	15
1.3 修理的错误检测	17
1.4 通过重新配置实现高可靠性的错误检测	20
1.5 故障模型假设	21
1.6 错误的种类	23
1.7 错误检测的理论问题	25
1.8 注释	27
第二章 数学基础	28
2.1 基本布尔差分概念	28
2.2 用布尔差分分析逻辑的例子	31
2.3 求布尔差分的方法	34
2.4 二重布尔差分	36
2.5 代码距离	39
2.6 同余和余数算术的基本概念	41
2.7 图逻辑电路的简单介绍	42
2.8 注释	44
第三章 一些错误检测代码	46
3.1 奇偶检验	48

3.2	余数代码	51
3.3	定权代码	57
3.4	不合法符号检验	59
3.5	代数错误检测代码	60
3.6	其他代码	67
3.7	注释	67
	问题	68
第四章 错误检验器		69
4.1	奇偶检验电路	69
4.2	定权代码检验器和阈电路	76
4.3	阈电路	78
4.4	余数检验	87
4.5	注释	96
	问题	96
第五章 数据通道的检验		97
5.1	检验器在数据通道中的位置	97
5.2	关于字和字节的检验	101
5.3	非代码传输检验	103
	问题	103
第六章 加法器错误特性		105
6.1	并行二进制加法器	105
6.2	加法器错误特性	110
6.3	注释	115
	问题	115
第七章 奇偶检验加法器		116
7.1	半和数检验	116

7.2	全和数奇偶检验	117
7.3	用于加法器的奇偶检验	119
7.4	具有奇偶检验 I 的重复进位	123
7.5	具有奇偶检验 II 的重复进位	124
7.6	和数依赖于进位的加法器	127
7.7	超前进位加法器的高速奇偶性预测	133
7.8	检验增量器	138
7.9	二进制编码的十进制加法器的检验	140
7.10	注释	144
	问题	144
第八章	余数检验加法	145
8.1	基本检验系统	145
8.2	余数代码的错误检测能力	152
8.3	按字节运算的运算器的检验	157
8.4	注释	157
	问题	158
第九章	混合检验加法器	159
9.1	引言	159
9.2	修改的重复方法	160
9.3	错误检测的三电平逻辑和双路逻辑	162
9.4	5 中取 2 代码和查表加法器	167
9.5	二元五进制代码和加法器检验	169
9.6	修改的反演二进制 (MRB) 代码	173
9.7	MRB 加法器	175
9.8	MRB 减法器	180
9.9	注释	182

问题	183
----	-----

附录	184
----	-----

第十章 除加法以外的算术运算的错误检测 187

10.1 减法的错误检测	187
--------------	-----

10.2 补数的错误检测	191
--------------	-----

10.3 移位操作的错误检测	194
----------------	-----

10.4 逐位逻辑操作的错误检测	195
------------------	-----

10.5 乘法错误的检测	201
--------------	-----

10.6 除法错误的检测	206
--------------	-----

10.7 注释	207
---------	-----

问题	207
----	-----

第十一章 校验计数器 208

11.1 引言	208
---------	-----

11.2 奇偶校验二进制计数器	208
-----------------	-----

11.3 环形计数器	215
------------	-----

11.4 定权计数器	220
------------	-----

11.5 反馈移位寄存器计数器	223
-----------------	-----

11.6 单位距离代码奇偶校验计数器	224
--------------------	-----

11.7 K ₀ U ₀ 12 单位距离错误校验代码	226
--	-----

11.8 余数校验计数器	229
--------------	-----

11.9 用加法器作计数器	230
---------------	-----

11.10 校验计数器和时序机	232
-----------------	-----

11.11 注释	233
----------	-----

第十二章 校验组合逻辑 234

12.1 错误检测原理	234
-------------	-----

12.2 错误检测分级	238
-------------	-----

12.3	检验组合逻辑的例子	239
12.4	串接网络中的错误检测	245
12.5	用再生输入变量进行错误检测	248
12.6	最可机型 (MLP) 错误检测	252
12.7	双路逻辑	254
12.8	奇偶检验逻辑的实例	255
12.9	注释	256
	问题	256
第十三章	时序电路中的错误检测	258
13.1	时序电路的错误检测	259
13.2	基本错误分析	260
13.3	同步时序逻辑的检验	262
13.4	异步时序逻辑的检验	269
13.5	注释	276
	问题	276
第十四章	存储器的错误检测	277
14.1	按字编址存储器的错误检测	277
14.2	磁带的错误检测	280
14.3	延迟线存储器的错误检测	283
14.4	磁盘或磁鼓存储器的错误检测	284
14.5	纪录波形	288
14.6	使用线性反馈移位寄存器的错误检测	291
14.7	注释	301
	问题	301
第十五章	系统错误检测问题	304

15.1	关于系统目标的决定.....	304
15.2	帮助检查检验的诊断.....	308
15.3	误差停机——避免潜在的错误.....	310
15.4	检验特殊电路.....	311
15.5	送通误差信号.....	313
15.6	两个逻辑检验区域的衔接.....	314
15.7	运用故障的机器.....	315
15.8	性能的测量.....	316
15.9	注释.....	318

术语和符号

本节包括本书中使用的一些术语和符号。其目的是帮助不熟悉作者使用的一些技术术语的读者。在许多情形之下，这些术语在正文中首次使用时都加以定义。因为画逻辑存在着几种标准的惯例，所以画出图符号。

布尔差分 (Boolean Difference)

布尔函数 $F = F(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ 对于 x_i 的布尔差分定义如下：

$$\frac{\Delta F}{\Delta x_i} = F(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \vee (x_1, \dots, \bar{x}_i, \dots, x_n)$$

二进制字位 (Bit)

二进制数字的字位取值 0 或 1。

字节 (Byte)

字节是字位的集合，例如 4 位或 8 位的集合。通常一个计算机字由几个字节组成。

校验位 (Check bit)

校验位是可以附加到一个二进制序列，形成一个新序列，使得这个新序列中的所有位满足一预定规则的一个或多个字位。可以用该规则检验序列的有效度。

校验器 (Checker)

校验器是检验代码或电路工作有效度的电路。

代码 (Code)

代码是满足预定规则的一组数字序列。代码中的任一序列称

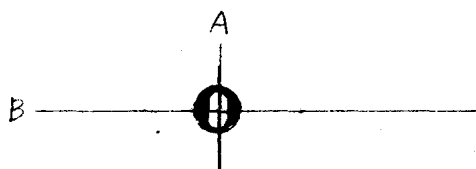
为代码字。

1. 汉明代码: R. W. Hamming⁴⁴ 设计出的一组代码。代码字中的所有单个错误都可以校正。说及的代码组能校正单个错误, 检测双重错误或偶数个错误。
2. 多项式代码或循环码: 任意代码字可以多项式 $f(x)$ 形式表示, 且每个代码字 $f(x)$ 可以生成多项式 $G(x)$ 除尽的代码。
3. (n, R) 代码: 代码字的长度为 n , 消息 (信息) 位的数目为 R 的代码。

冷子管或低温元件 (Cryotron 或 Cryogenic Element)

冷子管是一种逻辑元件, 其逻辑运算类似普通闭合继电器。

冷子管符号如下:



当导线 A 中电流流动时, 它禁止导线 B 中电流流动; 当 A 中没有电流流动时, 电流可以在 B 中流动。冷子管根据超导体原理工作, 超导性发生在接近绝对零度时的温度。

距离 (Distance)

长度相等的两个二进制序列之间的距离是对应位取值不相同的字位的数目。代码的最小距离是代码字的所有对之间的最小距离。距离和汉明距离同义。

错误 (Error)

错误是不同于正确结果的结果:

1. 固定错误: 停留时间无限长的错误。
2. 暂态错误 (Transient error): 短时期内出现和停留

时间很短的错误。

3. 并发错误 (Burst Error): 二进制序列中紧连在一起出现的几个错误。

异一或 (Exclusive-OR)

异一或是记作 $\vee$ 的逻辑关系。异一或被定义为 $a \vee b = a\bar{b} + \bar{a}b$ 。逻辑框图在关于符号一节中叙述。

故障 (Fault)

故障是一个或几个参数超过其规定极限值的元件。

倒置网络 L^{-1} (Inverse Network L^{-1})

网络 L^{-1} 是逻辑网络 L 之逆。若 L 的输出是 L^{-1} 的输入, 则 L^{-1} 的输出和 L 的输入相同。

卡诺图 (Karnaugh Map)

卡诺图是表示布尔函数的一种形式。对于逻辑函数的输入的每组可能的状态, 卡诺图有一对应值。若对于输入变量的 (这) 一组状态, 逻辑函数为 1, 则对应值是 1。卡诺图亦称为维奇 (Vietet) 图。

维修 (Maintenance)

维修是为了继续或恢复正常操作对设备进行修理或调整的动作。

模 m (Mod m)

$y = x \text{ mod } m$ (读作对于模 m , y 和 x 同余) 意指对某整数 k , $y = km + x$ 。

模 m 计算器 (Mod m Calculator)

计算输入数 x 除以模 m 后的余数的电路。

模数 (Modulus)

用在前面定义中的数称为模数。

MRB 代码

修正的反演二进制 (Modified reflected binary) 代码。表示相邻数字的代码字之间的距离为 2 的一种代码。这是奇偶码的一种特殊情况。将在第九章中介绍。

奇偶检验位 (Parity bit)

令数 N 表示如下：

$$N = \{a_0, a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

则 N 的奇偶性，记为 $P(N)$ ，是

$$P(N) = \sum_{i=0}^n a_i \bmod r$$

式中 r 和数 N 的数字的基数相同。在二进制中， $r=2$ 。一序列的奇偶检验位是附加到该序列使序列中 1 的数目是偶数的一位字位。奇数的奇偶检验位意指得到的序列具有奇数个 1。

奇偶检验器 (Parity checker)

奇偶检验器是一种检验电路，若加到该电路输入的字位序列的奇偶性发生错误，电路能指示错误。

只读存储器 (ROS)

只读存储器 (ROS—Read only storage) 是一种不破坏读出存储器，常用于计算机的控制器。

重新配置 (Reconfiguration)

应用于计算机的重新配置是改变计算机系统的部件之间的连接。这样作是为了把系统的故障部件断开，在进行修理时容许系统工作。

余数 (Residue)

数 N 的余数是 $K(N)$ 。 $K(N)$ 是使 $R(N) = N \bmod m$ 的最小正数。

余数检验器 (Residue Checker)

检验字的余数的电路。

重复执行 (Retry)

重复执行是返回到计算中已知的正常工作点再启动的功能。术语“重复执行”通常意味着这种功能是自动控制的。当这种功能包括人工干预时，往往使用术语“再启动” (Restart)。

存储器 (Storage)

计算机系统中，存储器是保存几种状态之一，供以后访问的任何装置。此外，存储器也是保存程序和指令信息的部件的名称。后者往往称为记忆器 (Memory)。

阈电路 (Threshold Circuit)

每当

$$\sum_{i=0}^n I_i (W_i \geq T$$

时，阈电路的输出是1。式中 I_i 是第 i 个输出的值0或1， W_i 是预定的权， T 是预定的数。第二章和第四章将详细讨论阈电路。

两路逻辑 (Two-Rail Logic)

两路逻辑是每个布尔变量用始终具有相反状态的两根线的状态表示的二进制逻辑。两路逻辑往往称为双线逻辑 (Two-Wire Logic)。

权 (Weight)

术语“权”有两种不同的概念：

1、若 $N = \sum_{i=0}^n a_i r^i$ ，则 N 的第 i 位的权是 r^i 。

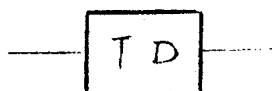
2、权是二进制序列中 1 的总数。

字 (Word)

计算机中，字是二进制字位序列。字通常是定义了算术指令的序列。例如：“加 A 到 B ”。通常， A 和 B 是字。对于随机存取存储器，字是存储在一个地址的一组二进制字位。

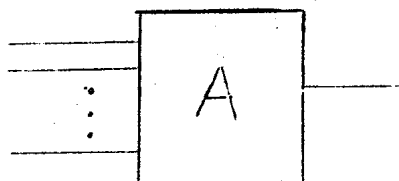
图 符 号 说 明

本书使用的图符号，除少数几个外，都按照美国标准协会 (American Standard Association) 标准 ASS Y32.14 画出。图符号下面的简短定义是用来帮助不熟悉本书使用符号的读者。



时间延迟

进入时间延迟元件的信号，经过固定的时间间隔以后在输出出现。



“与”