1996 年 3 月　　重庆大学学报 （自然科学版）　　Vol. 19, №. 2
第 19 卷第 2 期　　Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)　　Mar. 1996

(10) 56-60

32 位微处理器功能测试状态集的研究*

Study on Functional Testing State Sets for 32-bit Microprocessors

曹泽翰　　李立新　　刘朝刚
Cao Zehan　　Li Lixin　　Liu Chaogang

（重庆大学计算机研究所，重庆，630044；第一作者 56 岁，男，教授）

TP368.1

A

摘　要　基于微处理器指令译码功能故障模型，给出了各类指令所需的测试状态集应该具有的性质及其构造方法。

关键词　功能测试；测试状态集；测试矩阵；条件域预置　微处理器

中国图书资料分类法分类号　TN407

ABSTRACT　Based on the functional fault model of instruction decoding in microprocessors, this paper gives the properties of the testing state set should have for any type of instructions and presents the method to construct such testing state sets.

KEYWORDS　functional testing; testing state sets; testing matrix; conditional field pre-set

0　引　　言

微处理器(MP)的功能测试包括指令译码、数据存储与传输、数据处理和存储管理等，但最核心的还是核实它的指令系统能否正确的译码与执行。指令译码故障影响的范围很大，32 位 MP 一般都具有位操作指令，给测试造成新的困难。通常只有在对待测指令进行测试之前，在 MP 的所有可访问的寄存器中预置特定的数据(称为测试状态)才能有效地使故障的影响表现出来。此外，这些数据的预置，可以大大减少时序因素给测试造成的困难。

一条指令的功能往往由若干个微操作完成，为了反映故障指令操作的部分执行，文中引入了微功能操作的概念及其对应的指令译码故障模型。

定义 1　设 MP 中用户能控制和观察的寄存器(简称用户寄存器)的集合为 E_i，则 E_i 中各寄存器状态(数据)的集合称为 MP 状态。

定义 2　微功能操作是指任何能改变 MP 状态或输出信号的最小操作。

从测试的角度可将指令分为传送类、运算类、转移类、条件置字类和控制类等。控制类指令的测试情况比较特殊，测试方法单独考虑，其余各类指令当其正常的微功能操作出现了下列情形之一就认为出现了指令译码功能故障：

1) F/φ：漏掉了正常的微功能操作；

2) F/F'：正常微功能操作被另一微功能操作所代替；

3) $F/F+F'$：除执行正常微功能操作 F 外还执行了另一微功能操作 F'。

* 收文日期　1994-12-20

如果分别用 TF,OF,SF,JF 表示传送类、运算类、条件置字节和条件转移类微功能操作进而可以将故障模型细化，如 $TF/TF+OF'$,JF/TF' 等等，以便于故障影响的分析。

以下几节分别讨论各类指令的测试状态集应该具有的性质及其构造方法。

1　测试状态集的性质

定义 3　设 M 为 MP 的全部可能的状态集合，IS、$RS\in M$，(IS,RS) 表示执行指令 I 以前 MP 的状态为 IS，执行以后 MP 的状态为 RS，IS 称为 I 的前置状态，RS 称为 I 的结果状态。

定义 4　设集合 $\{(IS_1,RS_1),(IS_2,RS_2),\cdots,(IS_n,RS_n)\}$ 中的元素均是与指令 I 相关的前置状态和结果状态，若指令 I 的任何故障在 $\{IS_1,\cdots,IS_n\}$ 中至少有一个 IS_i，使 RS_i 中表现出故障差异，则称 $\{IS_1,\cdots,IS_n\}$ 为指令 I 的测试状态集。

大多数指令可以按指令分类构造测试状态集，为了系统地研究各类指令的测试状态集，我们把 n 个测试状态看作元素个数为 m（m 是 MP 用户寄存器数）的 n 个向量 X_1、X_2,$\cdots$,X_n，并构成一个 n 行 $\times$ m 列的测试矩阵 X.

从测试 MP 的角度定义了矩阵 X 的以下性质：

1）行全异性：矩阵 X 的同一行的元素互不相同。

2）非 0 非 1 性：矩阵 X 的任何元素非全 0 位和非全 1 位。

3）运算异码性：对于指令系统的任何运算操作 O_i，矩阵 X 存在行 X_j，使得以该行的任何元素作为源操作数，其结果不同于该行的任何元素。

4）运算不等性：对于指令系统的任何运算 O_i 和 O_k，矩阵 X 存在行 X_j，使得以该行任何元素作源操作数，其结果互不相等。

5）条件完整性：对于指令系统的任何条件转移（或置字节）指令 I，矩阵存在行 X_i 和 X_j，X_i 中状态寄存器的值满足 I 的转移（置字节）条件，X_j 中状态寄存器的值不满足 I 的条件。

6）位串互异性：矩阵 X 存在行 X_i 和 X_j，行中所有元素的 r 至 s 位的值互异（r 和 s 的取值与指令系统中的位串类指令相关）。

7）同位互异性：矩阵 X 存在行 X_i 和 X_j，其同列元素 x_{ik},x_{jk}（$k=1,\cdots n$）的第 W 位互异（W 的值与指令系统的位操作指令相关）。

在构造矩阵 X 时，允许同一行同时具有多个性质。

定理 1　矩阵 X 满足性质集合 A，可构成传送类指令的测试状态集，其中

$A=$｛行全异性，非 0 非 1 性，运算异码性、位串互异性，同位互异性｝

证明：（概要）

1）对于 TF/φ 和 TF/TF' 型故障，由行全异性保证故障的结果状态不同于正常结果状态。

2）对于 TF/OF' 型故障，若 OF' 为算逻操作由运算异码性，位串插入由位串互异性，位操作由条件完整性与同位互异性保证故障的结果状态不同于正常结果状态。

3）对于 TF/SF' 和 $TF/TF+SF'$ 型故障将引起结果状态出现 0 位寄存器。

4）对于 TF/JF' 和 $TF/TF+JF'$ 型故障，由于条件完整性，至少引起一次错误的转移操作。

5）对于 $TF/TF+TF'$,$TF/TF+OF'$ 和 $TF/TF+SF'$ 型故障，当故障操作 TF'、OF' 和

SF' 的目的寄存器与 TF 操作的目的寄存器不相同，或目的寄存器相同但在 TF 操作之后或与 TF 同时执行，其故障影响与 1、2、3 的故障相同。或目的寄存器相同，且故障操作在正常操作之前完成，被视为冗余故障。证毕。

定理 2　矩阵 X 满足性质 B，可构成运算类指令的测试状态集，其中

$$B = A \cup \{\text{运算不等性}\}$$

证明：（略）

2　测试状态集的构成

为了尽可能减少测试的次数和测试序列长度，应在满足定理 1、2 的前提下使测试状态集尽可能的小，为此我们给出了一种用于 32 位 MP 的称为 T 码的编码，即

$T = \{a; a \in N/2$ 码，a 的最高位为 1，最低 5 位为 01000，且 8 至 15 位构成 4 出自 8 码$\}$

测试状态矩阵 X 可按以下方式构成

a. 第一行 X_1，除状态寄存器外的 $m-1$ 个元素用不同的 T 码字构成。状态寄存器的赋值记作 $Flag_1$，应使尽可能多的转移条件得到满足；

b. 第二行 X_2，状态寄存器的赋值为 $\overline{Flag_2} = \overline{Flag_1}$ 表示将 $Flag_1$ 中条件域的值按位取反，其余元素与 X_1 的元素相同；

c. 第三行 X_3，除状态寄存器外的 $m-1$ 个元素是用 U 码字 $u_i (i = 1, \cdots, m-1)$ 构成，u_i 是 X_i 行中相应元素的最低 5 位不变，其余各位取反。状态寄存器的赋值 $Flag_3$ 与 $Flag_1$，$Flag_2$ 一起力求满足条件完整性。若对某些指令系统，仍不能满足条件完整性，则需增加 $Flag_4$，其余 $m-1$ 个元素与 X_3 的对应元素相同。

我们可以证明按上述方法形成的测试矩阵能满足定理 1、2 中的性质。

值得指出的是：

T 码是针对 32 位 MP 的功能设计的，其中最低几位的固定值用作位操作的位指针。低位的固定值以及位串区间（8 至 15 位），均可根据 MP 的指令系统的功能描述来确定。对于无位串操作的 MP，可将 T 码简化为 T' 码

$$T' = \{a; a \in N/2 \text{ 码}, a \text{ 的最高位为 1，最低 5 位为 01000}\}$$

对于无位操作的 MP，可进一步简化为 T'' 码

$$T'' = \{a; a \in N/2 \text{ 码}, a \text{ 的最高位为 1，最低位为 0}\}$$

3　条件转移指令的测试状态集

条件转移指令和条件置字节指令因故障而产生其它类型的微功能操作，同样需要在上述测试集下进行测试，但仅此是不够的，因为我们要判断待测指令的转移或不转移（置字节或不置字）是否真正由待测指令的正确执行引起的，而不是由其它转移类指令所引起的。所以必须增加状态寄存器条件域的预置和测试（其它寄存器可维持前一次的预置状态）。由于转移条件（置字节条件）涉及的条件位及转移逻辑各不相同，增加的状态寄存器预置只能对不同的待测指令分别构造。这时我们最关心的是用最少次数的预置达到区分正常转移（置字节）与故障转移（置字节）的目的。以下针对条件转移指令的讨论，可以同样用于条件置字节

指令。

定义 5　J_i 表示一条件转移指令，J_i 转移条件所涉及的状态寄存器中的状态位称为 J_i 的相关位记作 J_i(相关位)，J_i 的转移条件集合 $S(J_i)$ 是指转移时相关位取值的集合。

例如 J_i 指令的转移逻辑表达式为 $A+B$，则

$$J_i(\text{相关位}) = \{A, B\}$$

$$S(J_i) = \{11, 10, 01\}$$

定义 6　若条件转移指令 J_i 相关位的个数为 1，称 J_i 为单条件指令；J_i 相关位的个数为 2，称 J_i 为双条件转移指令，其余类推。

定义 7　一指令系统中，所有条件转移指令相关位的并集称为(状态寄存器的)条件域。f 是条件域的一种预置，$J|_f$ 表示 J 指令在 f 预置下的转移情况，即 $J|_f = 0$ 表示 f 不满足 J 的转移条件，$J|_f = 1$ 表示 f 满足 J 的转移条件。

引理 1　两条件转移指令 J_0 与 J_i 是可区分的，当且仅当，存在条件域的一个预置 f 使得 $J_0|_f <> J_i|_f$。

为了下面的讨论更直观，我们引入条件跳变的概念，所谓指令条件发生跳变是指一给定的条件转移指令对条件域的两次预置，其转移逻辑表达式的值发生 $0 \to 1$ 或者 $1 \to 0$ 的跳变。从测试的角度，条件域的两次预置应使待测指令发生条件跳变的同时，其它条件转移指令不发生条件跳变或只发生相反的跳变。

定理 3　任一待测指令 J_0，若两次条件域的预置 f_1 和 f_2，使得非相关位的两次赋值相同，且 $J_0|_{f_1}()J_0|_{f_2}$，则对于任一条件转移指令 J_i，J_i(相关位) $\cap$ J_0(相关位) $= \varphi$，J_0 和 J_i 可区分。

证明：因为 $J_0|_{f_1}()J_0|_{f_2}$，即 J_0 产生条件跳变，由于 J_i(相关位) $\cap$ J_0(相关位) $= \varphi$ 以及 f_1 和 f_2 对于 J_0 不相关位的赋值相同，则 $J_i|_{f_1} = J_i|_{f_2}$，即 J_i 未产生条件跳变。故 f_1 或 f_2 使得 $J_0|_{f_1}()J_i|_{f_1}$ 或 $J|_{f_2}()J_i|_{f_2}$，由引理 1 得证。

在构造条件转移指令 J_0 的测试状态集时，根据定理 3 得到的两次预置，凡 J_i(相关位) $\cap$ J_0(相关位) $= \varphi$ 的指令 J_i 均可与 J_0 区分。问题的关键在于如何增加必要的条件预置以区分 J_i(相关位) 与 J_0(相关位) 交集非空的条件转移指令 J_i。

定理 4　测试矩阵 X 满足定理 1 中性质集合 A，且(状态寄存器)条件域的预置使待测条件转移指令 J_0 与其它所有条件转移指令均满足引理 1，矩阵 X 可以构成 J_0 的测试状态集。

证明：(略)

定义 8　指令系统中，具有相同相关位且转移条件互补的两条件转移指令称为对偶指令，且分别记为 J 与 J^*

定理 5　若指令系统中的任一条件转移指令 J 都存在对偶指令 J^*，则 J 与 J^* 的测试状态集相同。

证明：由于对偶指令 J 与 J^* 的测试状态集同样需要满足定理 1 中性质集合 A，因此只需证明 J 与 J^* 存在相同的条件预置。

设指令 J 的条件预置集合 $T_j = \{f_1, f_2, \cdots, f_n\}$，则对任一条件指令 J_i 及对偶指令 J_i^*，必存在 a，$1 \leqslant a \leqslant n$，满足 $J|_{f_a}()J_i^*|_{f_a}$ 和 $J|_{f_a}()J^*|_{f_a}$。

由于 $J|_{f_a}, J^*|_{f_a}, J_i^*|_{f_a}$ 取 0 或 1 值，故 $J^*|_{f_a} = J_i^*|_{f_a}$，也即 $J^*|_{f_a}()J_i|_{f_a}$。于是对于任一条件转移指令 J_i，存在 T_j 中的预置 f_a 可以区分 J_i 和 J^*，故 T_j 也是 J^* 的条件预置集合。同理，

J^* 的条件预置集合也是 J 的条件预置。证毕。

对于待测指令为单条件、双条件和三条件转移指令在不同情况下条件域的预置方法（限于篇幅，不一一具体分析）可以用程序自动完成。

条件预置生成过程：

1）根据指令系统描述，形成条件类待测指令集、状态寄存器的条件域和转移条件表达式集合。

2）根据条件表达式集合，确定传送、运算类测试状态集中的条件域预置值 $flag_1$、$flag_2$，$flag_3$。

3）根据条件转移指令的相关位分类。

4）按待测指令的相关位从转移逻辑表达式集合中找出其它相关表达式。

5）按待测的单条件、双条件和三条件转移指令的其它相关表达式的不同情况生成待测指令的条件预置 $flag_4$，$flag_5$……。

6）重复 4)、5）步直至待测条件转移指令集为空。形成条件转移指令的条件预置集合输出文件。

4 结束语

微处理器是一种功能复杂的时序机，但与一般的时序机相比，它的指令系统提供了较强的从外部控制和观察内部状态的能力。为了充分利用这种功能将微处理器预置成特定的状态（测试状态）来达到简化测试和提高测试效率的目的，本文针对指令译码功能故障模型对测试状态集的性质和构造方法进行了较系统地研究，利用 T 码字构造测试状态集具有测试状态集小，故障覆盖率高的优点。对于条件转移类指令，必须按指令增加若干次的条件预置与重复测试。文中给出的预置方法是根据每一待测指令的相关条件位与其它条件转移表达式的相互关系来产生的，较好地利用了待测 MP 的个性，使得到的条件预置数是接近最小的。

参 考 文 献

1 El-sayde A Talkhan, Aly M. H. Ahmed. Microprocessors Functional Testing Techniquues. IEEE Transation on CAD, 1989, 8(3): 316～318

2 Li Shen, Stephen Y. H. Su. A Functional Testing Method for Microprocessor. IEEE Transaction on Comprters, 1988, 37(10: 1288～1293

3 周继开等编译．16 位与 32 位微计算机手册，北京，国防工业出版社，1987，1～742

4 朱莉，张龙译．80×86 微处理器和 80×87 协处理器大全，北京：电子工业出版社，1994，232～447

5 齐秋群编．M68300 系列原理与应用．北京：北京理工大学出版社，1993