

有限状态机由软故障引起的 状态转换错误概率

王光兴

(东北工学院)

摘 要

本文提出了受软故障影响的有限状态机的模型, 据此导出了计算有限状态机由软故障引起的状态转换错误概率的方法, 介绍了一种新型的利用纠错码和状态束原理的容错有限状态机, 并计算了软故障引起的状态转换错误概率. 这种有限状态机对于状态转换具有本征的抗噪声性能.

一、序 言

在超大规模集成电路 (VLSI) 中经常出现所谓的软故障. 它是由于元件中所含的微量放射性物质衰变时辐射的 α 粒子造成的. 软故障是随机的能自动恢复的非重现性故障, 恢复后不会留下与其相关的物理缺陷. 近年来随着半导体集成度的不断提高, 它对超大规模集成电路性能的影响愈来愈大. 组合逻辑系统中软故障引起的错误概率在过去的文献中已有分析^[1]. 本文着重分析软故障对有限状态机(以下简称 FSM) 的影响, 提供一种分析 FSM 中由软故障引起的状态转换错误概率的一般方法, 并提出一种对付软故障的新型容错 FSM.

二、一种新型容错 FSM

通常一个有限状态机 A 是通过指定其输入 I 、状态 S 和输出 O 等三个空间及状态转换 δ_0 、输出 ω_0 等两个映射来定义的, 本文感兴趣的是状态转换性能. 为了简化分析, 所以仅用输入 I 、状态 S 两个空间和状态转换映射 δ_0 表示一个 FSM, 即

$$A = (I, S; \delta_0), \quad (1)$$

$$\mathbf{s}(t+1) = \delta_0[\mathbf{i}(t), \mathbf{s}(t)]. \quad (2)$$

其中 $\mathbf{i}(t) \in I$; $\mathbf{s}(t+1), \mathbf{s}(t) \in S$; $t \in (0, 1, 2, \dots)$; $\mathbf{s}(t), \mathbf{s}(t+1)$ 分别表示该 FSM 在 t 及 $t+1$ 时的状态变量矢量; $\mathbf{i}(t)$ 表示在 t 时刻的输入变量矢量.

下面介绍一种用二进制纠错码保护状态分量的新型容错 FSM. 这种码可以是线性

的或非线性的, 且只有码的距离性质对容错性能有影响. 现给出本文应用的编码例子如下:

$$\begin{aligned} S &\xrightarrow{1-1} G \in V = S \times P, \\ \mathbf{x} &\rightarrow (\mathbf{x}, \mathbf{p}), \mathbf{x} \in S, \mathbf{p} \in P. \end{aligned} \quad (3)$$

这里 V 是 n 维二进制矢量空间; G 是 V 的一个特定的子集并由编码确定; S 是 K 维状态空间, 它被嵌入到空间 V 中, \times 表示矢量积; P 是一个 $(n - k)$ 维矢量空间. 很明显 (3) 式具有一一对应的性质.

决定下一状态的方程 (2) 同样也可以被编码, 根据式 (3) 一一对应的性质, 可确定出一个新的被编码的状态转换方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(t+1) &= \lambda\{\mathbf{i}(t+1), [\mathbf{s}(t), \mathbf{p}]\}, \mathbf{i}(t) \in I, \\ \mathbf{z}(t+1) &\in G, \mathbf{s}(t) \in S, \mathbf{p} \in P, [\mathbf{s}(t), \mathbf{p}] \in G. \end{aligned} \quad (4)$$

上式中 λ 为转换函数; $\mathbf{z}(t+1)$ 代表被编码的下一状态变量矢量; $[\mathbf{s}(t), \mathbf{p}]$ 即 $\mathbf{z}(t)$ 代表被编码的现在状态变量矢量. G 是较大的 n 维矢量空间 V 的子空间, 被编码的状态转换映射函数 λ 被扩展到空间 V 中去, 用 Λ 表示. 这一新的扩展状态转换映射函数. 包含了状态束的概念. 状态束是指靠近 G 中某一状态 (即所谓状态束中心) 的 V 中的那些状态的集合. 根据与状态束中心的汉明距离函数, 采用定距离束或最小距离束原则, 来确定状态束的全部成员, 从而得到

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(t+1) &= \Lambda[\mathbf{i}(t), (\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma})], \mathbf{z}(t+1) \in G, \\ \mathbf{i}(t) &\in I, \boldsymbol{\beta} \in S, \boldsymbol{\gamma} \in P, (\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}) \in V. \end{aligned} \quad (5)$$

状态矢量空间 V 中的每一个矢量有 n 个分量, 它们与 FSM 中的 n 个状态记忆元件的输出值相对应. G 中的矢量是状态束中心的集合, $\mathbf{z} \in G$ 的 n 个分量确定了每个对应的记忆元件所要求的输入, 以使它们产生适当的下一状态值, 即

$$\begin{aligned} z_j &= h_j[\mathbf{i}, (\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma})], \\ j &= 1, 2, \dots, n, \mathbf{i} \in I, \boldsymbol{\beta} \in S, \boldsymbol{\gamma} \in P. \end{aligned} \quad (6)$$

(6) 式为激励方程. 每一矢量分量的激励方程按下述方法确定, 即每个状态束都映射到编码空间 G 中的适当的下一状态, 这样在定距分束的情况下, 只要记忆元件的输出值呈现错误的不超过 $(d_G - 1)/2$ (d_G 指 G 中矢量间的汉明距离) 个, 由全部记忆元件输出的现在状态分量被包含在原状态束中, 而这一状态束就像编码空间 G 中的基本编码状态一样是被当作一个整体来对待的, 因此系统的下一状态值总是处在正确的状态束中.

三、模型和状态转换错误概率分析

同步 FSM 可能有各种不同的形式, 但一般可用图 1 所示的原理图来表示. 系统中出现的软故障, 用加在元件输出端的布尔噪声变量 $\varepsilon, \eta, \gamma$ 表示. 由于软故障引起的信息遗失可能出现在“0”状态, 也可能出现在“1”状态^[2], 所以假设噪声变量可以使元件的逻辑输出取补.

在有噪声的情况下, 方程 (2) 转换成

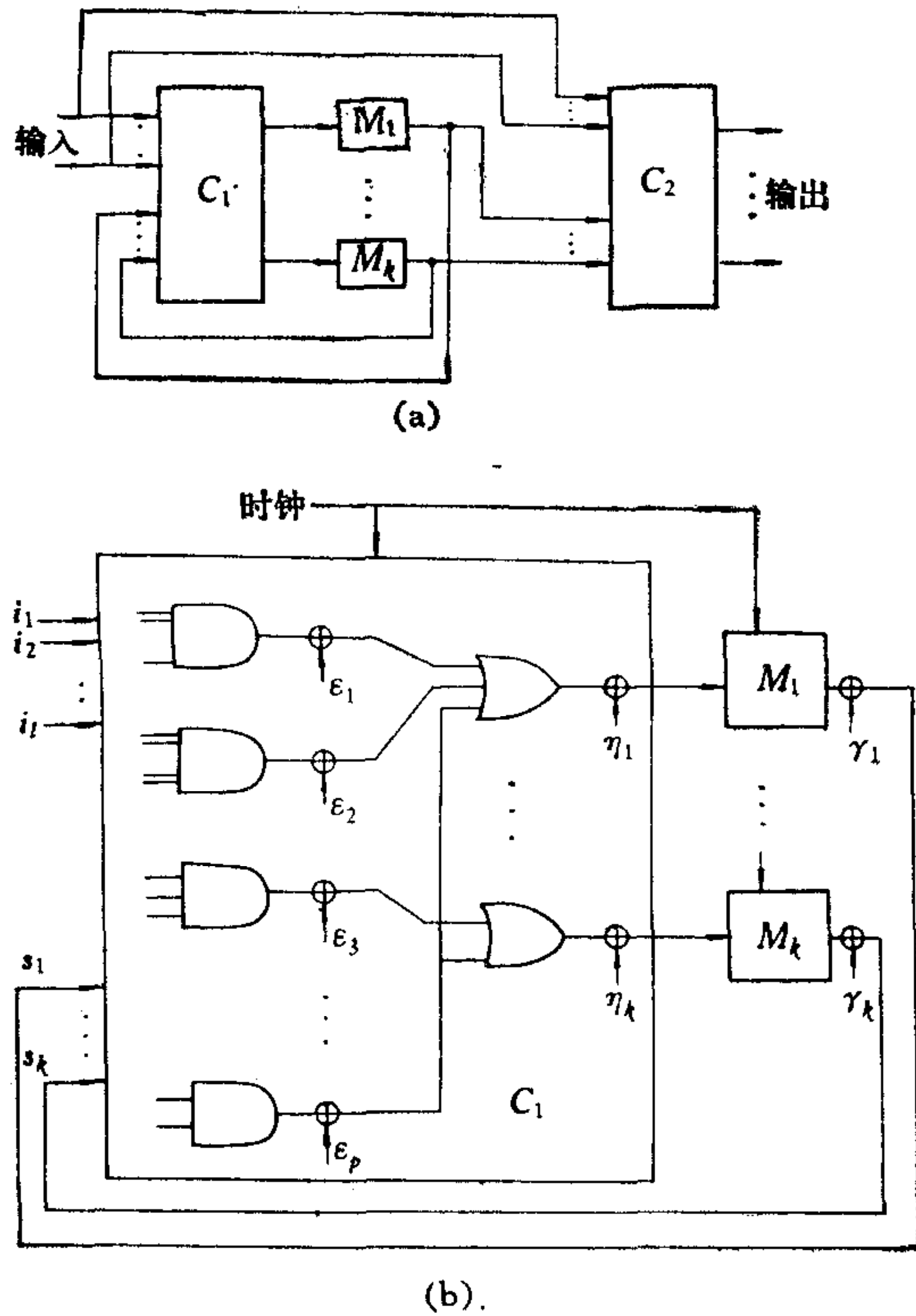


图 1 有限状态机原理图

$$\mathbf{s}(t + 1) = \delta\{(\mathbf{i}(t); \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}), \mathbf{s}(t)\}, \mathbf{i}(t) \in I, \mathbf{s}(t) \in S. \tag{7}$$

公式 (7) 在无噪声时为

$$\mathbf{s}(t + 1) = \delta\{(\mathbf{i}(t); 0, 0, 0), \mathbf{s}(t)\} = \delta_0[\mathbf{i}(t), \mathbf{s}(k)]. \tag{8}$$

状态转换错误是由于某种原因(如软故障)使系统在 $t + 1$ 时刻本应处于 S_i 状态, 但结果却处于 s_i 状态. 据此, 状态转换函数 $\delta_0[\mathbf{i}(t), \mathbf{s}(t)]$ 的数字实现由软故障引起的错误概率为

$$\xi = P\{\{\delta[(\mathbf{i}; \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}), \mathbf{s}] \oplus \delta[(\mathbf{i}; 0, 0, 0); \mathbf{s}]\} \neq 0\}. \tag{9}$$

为了简化分析, 引入判断函数, 并利用状态转移矩阵的性质, 由上式可得到

$$\xi = 2^{-l} \cdot \sum_{\mathbf{i} \in I} \sum_{(\boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}) \in H} \sum_{\mathbf{s} \in S} J[(\mathbf{i}, \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}), \mathbf{s}] \cdot \{\rho^{W[\boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}]} \cdot (1 - \rho)^{p+2K-W[\boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}]}\} \frac{1}{m_i}. \tag{10}$$

上式中 I 是输入空间; H 是噪声空间; S 是状态空间; ρ 是单个逻辑元件的故障概率;

$$W[\boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}]$$

是布尔噪声矢量的汉明权; $J[\mathbf{i}, \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\gamma}]$ 是判断噪声是否会引起输出错误的判别函数.

用公式 (10) 编制了计算机程序, 并得到了图 2 所示 FSM 的状态转换错误概率曲线(见图 3). 通过计算并与一般实现进行比较, 可见在单个元件的软故障概率较小的条件下, 它具有本征抗噪声性能.

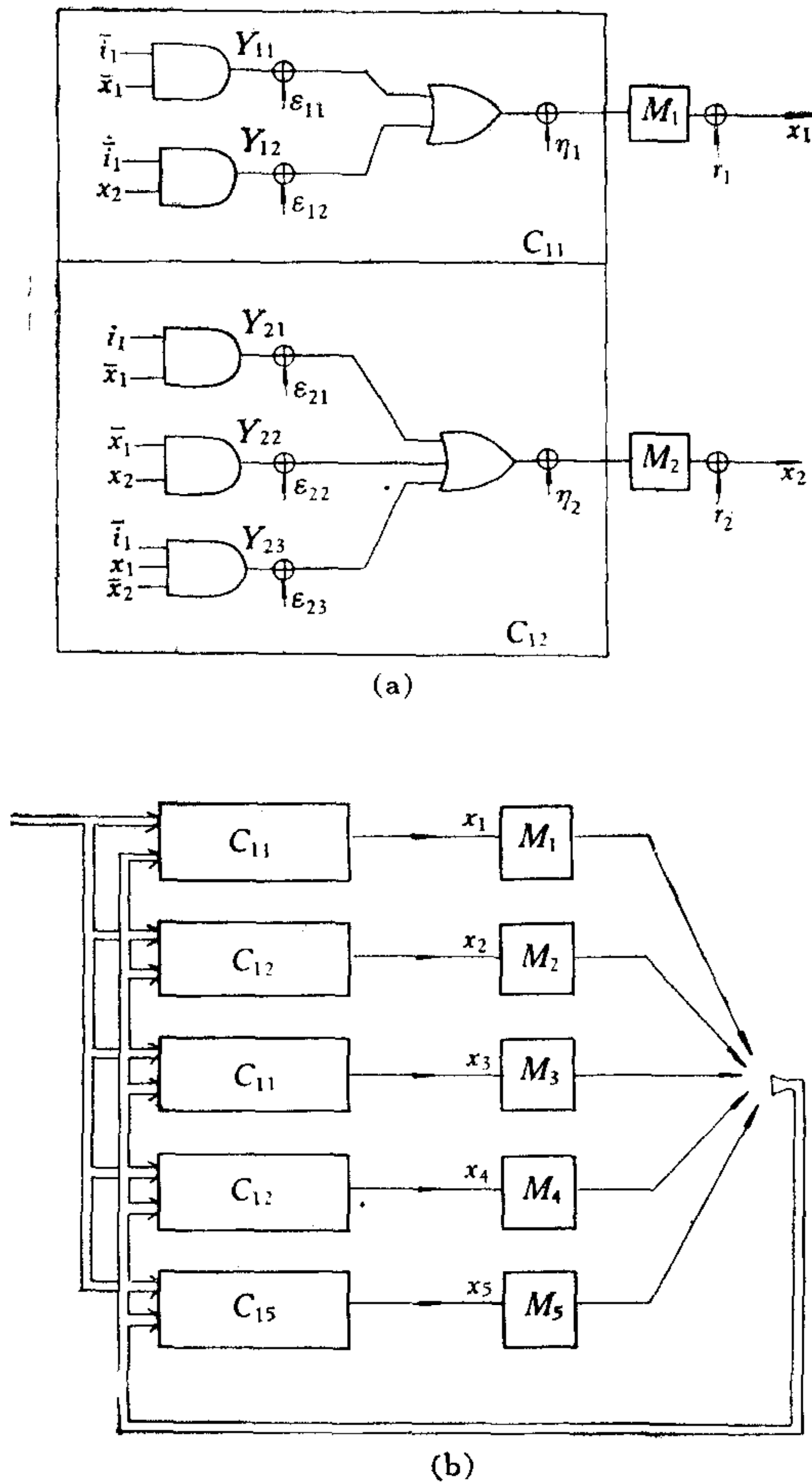


图 2

(a) FSM 的一般实现 (b) 用本方法得到的与(a) 对应的容错 FSM

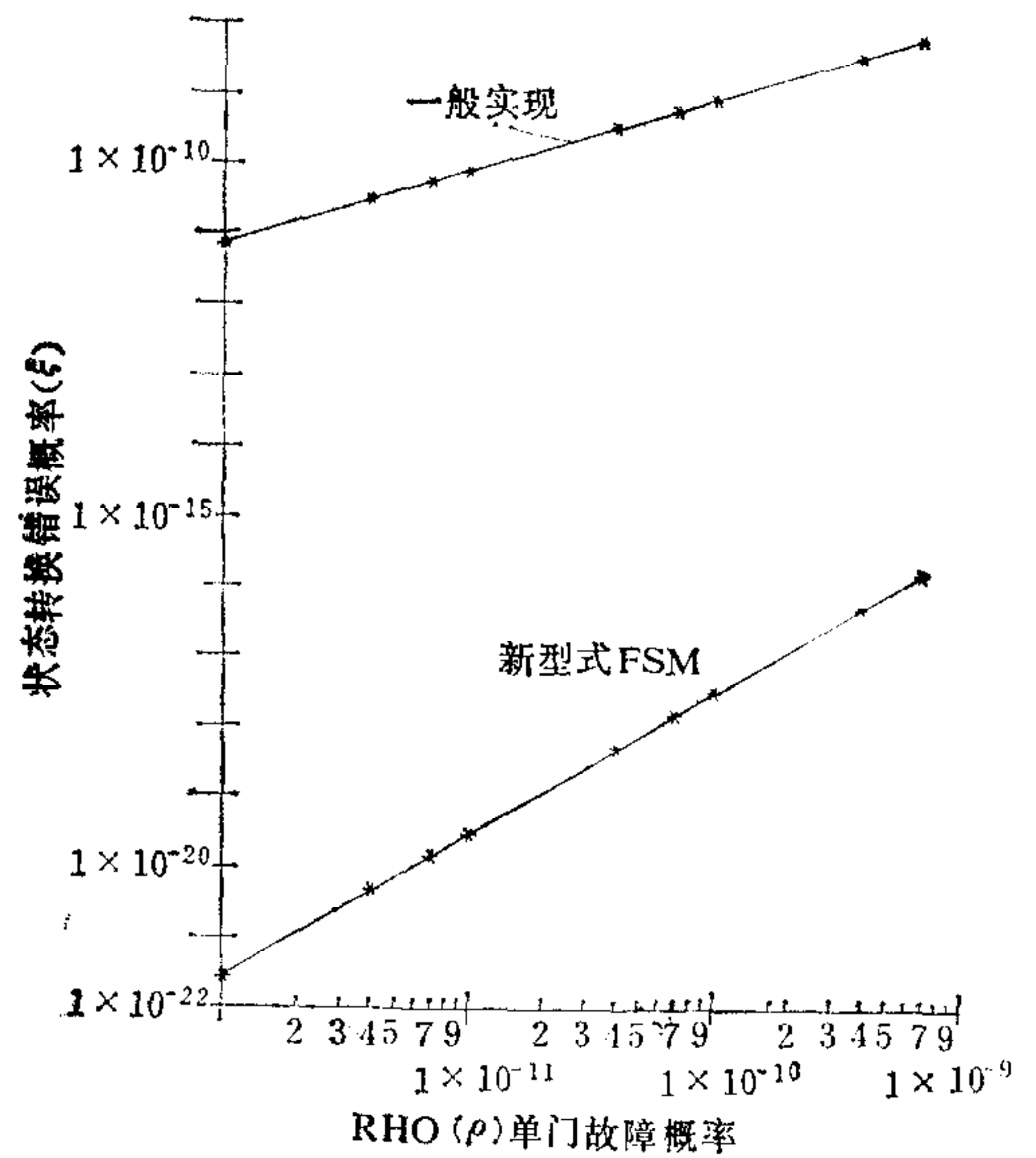


图 3 状态转换错误概率图

参 考 文 献

[1] Redinbo G. R., Noise Analysis of Soft Errors in Combinational Digital Circuits Via Walsh Transform, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-23, 1981.

[2] Noorlag S. W., Terman L. M. and Konheim A. G., The Effect of Alpha-Particle Induced Soft Errors on Memory Systems with Error Correction, *IEEE* Vol. SC-15, pp. 319—325, 1980.

[3] May T. C. and Woods M. H., Alpha-Particle-Induced Soft Errors in Dynamic Memories, *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol. ED-26, pp. 2—9, 1979.

[4] Yaney D. S., Nelson J. T., and Vanskike L. L., Alpha-Particle Trancks in Silicon and Their Effect on Dynamic MOS RAM Reliability, *IEEE Transaction on Electron Devices*, Vol, ED-26, pp. 10—16, 1979.

[5] Sttaf, Bad bits, *Scientific American* Vol. 242 pp. 70—72, 1980.

[6] Mangir T. E. and Avizienis A., Failure Modes For VLSI and Their Effect on Chip Design, Proc. IEEE International Conference on Circuits and Computers, pp. 685—688, 1980.

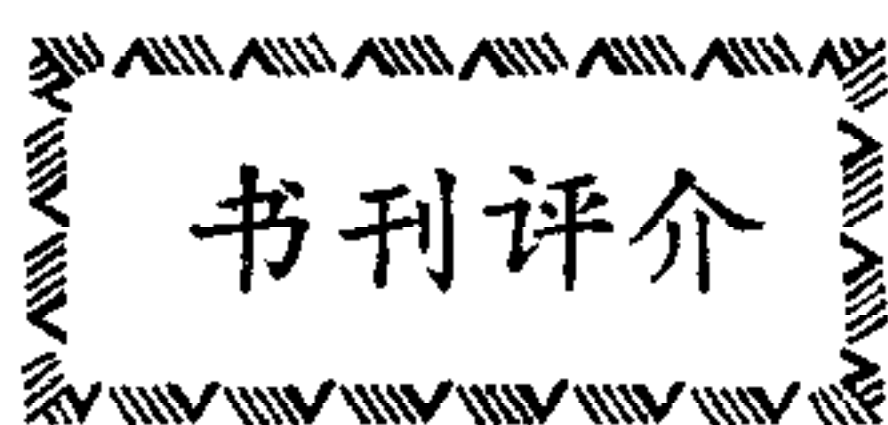
PROBABILITY OF STATE TRANSITION ERRORS OF FINITE STATE MACHINE CONTAINING SOFT FAILURE

WANG GUANGXING

(Northeast Institute of Technology)

ABSTRACT

A general model of finite state machines which contains gates and memory elements subject to soft failures has been proposed and a computational method for determining probability of state transition errors is provided. A new type of fault-tolerant finite state machine using error correcting codes and "cluster state" is presented. Probability of transition errors has been computed and a comparison with general realization has been made. It reveals that this kind of machines has inherent noise immunity for state transition.



《操作机器人动力学》和《操作机器人控制》 ("Dynamics of Manipulation Robots" and "Control of Manipulation Robots")

南斯拉夫学者 M. Vukobratovic 正在主持编写一套题为《机器人学的科学基础》(Scientific Fundamentals of Robotics) 的丛书,第一册为《操作机器人动力学》(简称《力学》),第二册为《操作机器人控制》(简称《控制》),已于 1982 年由 Springer-Verlag 公司出版。作者试图填补理论与实际应用之间的鸿沟,并为有关专业人员提供一套内容丰富的参考书。

在《力学》中,作者阐明了操作机器人动力学和动态控制的意义,认为机器人力学性质的研究是合理设计优质机器人所必不可少的前提。第一章里,作者指出机器人机构对于它所要完成的功能运动有自由度上的冗余性,并将主动机构进行了分类并回顾了机器人研究的历史;第二章主要探讨在计算机辅助下,建立主动开式运动链的数学模型并求其解的方法;第三章研究了操作机器人动力学的计算机模拟,建立了包括驱动器在内的完整的动态模型,讨论了驱动器模型复杂性的影响;第四章介绍具有弹性部件的机器人的动力学;第五章提出了一些评价和选择工业机器人的方法。

《控制》一开始,作者首先提出了机器人控制综合的一般原则。按控制方式机器人可分为三类,即自动的、生物技术的、互交的。自动操作机器人按对外界的适应能力又可划分为三代——固定程序的、自适应的、智能的。控制系统可递级分为最高级、战略级、战术级和执行级,后两级是《控制》所关心的课题。鉴于工业机器人的特点,作者提出了两阶段控制综合法。第一阶段,对一选定的初始状态,寻求控制以实现所要求的运动。这一阶段叫标定阶段。第二阶段寻求反馈控制,使得当初始状态偏离标定状态时能实现对标定轨道的跟踪。第二阶段也叫受扰阶段。在《控制》的最后一章,作者介绍了几个典型的机器人控制实例。

(张洪涛)