

系统辨识思想在串联晶闸管换流阀故障诊断中的应用

张小牯 张成乾

(陕西机械学院自动化工程系, 西安 710048)

摘 要

高压直流输电用晶闸管换流器的阀臂由多个晶闸管串联构成, 长期以来这种换流阀的故障诊断问题一直没有得到很好地解决。本文应用系统辨识的思想提出了一种全新的办法, 较好地解决了这一难题, 并对文中提出的故障诊断方法, 讨论了诊断系统的实现问题。

关键词: 故障定位, 晶闸管, 匹配。

一、引 言

高压直流输电较交流输电而言, 由于线路造价低, 适于远距离输电, 调节迅速、运行可靠等优点而被广泛采用, 特别是前两个优点更适合我国幅员辽阔、资金短缺的国情, 因此高压直流输电在我国有着广阔的发展前景。高压直流输电的主体设施是整流站和逆变站, 各站的核心是三相桥式换流器, 换流器的桥臂由若干晶闸管串联构成, 以满足高压要求。晶闸管较易损坏, 如不及时排除故障, 会导致其它元件或桥臂的过压或短路, 使晶闸管损坏呈现链锁反应趋势, 所以晶闸管故障应及时发现及时排除。晶闸管串联阀臂的传统故障诊断方法^[1,2]是在每个晶闸管元件两端引出两根线通过氖灯或其它手段检测出晶闸管是否出现故障, 这种方法的致命弱点是对每个晶闸管都要进行检测, 否则故障不能定位到元件一级上^[3], 当串联晶闸管的个数较多时这种方法的弱点就显得特别突出。为此作者用现代控制理论中系统辨识的思想, 即通过输入输出信号便可以实现串联晶闸管的故障定位, 且输入输出信号的个数不随串联晶闸管个数的增加而增加, 从而减少了诊断系统构成的复杂性。

二、建立故障模型

为了讨论问题方便, 把诊断对象晶闸管串联阀臂放在单相半波可控整流电路中研究。在图1中, TR为整流变压器, u_1 、 u_2 为TR两边的电压, L_d - R_d 为感性负载, VD是续

流二极管, VT_1, VT_2, \dots, VT_n 是 n 个晶闸管, R_0 是稳态均压电阻. 在实际应用中每个晶闸管上还并有一个 R-C 网络用于吸收瞬态突变能量, 只在晶闸管导通或关断的瞬间起作用, 由于故障诊断是在晶闸管导通或关断以后进行的, 这时 R-C 网络不起作用, 故在图中未标出.

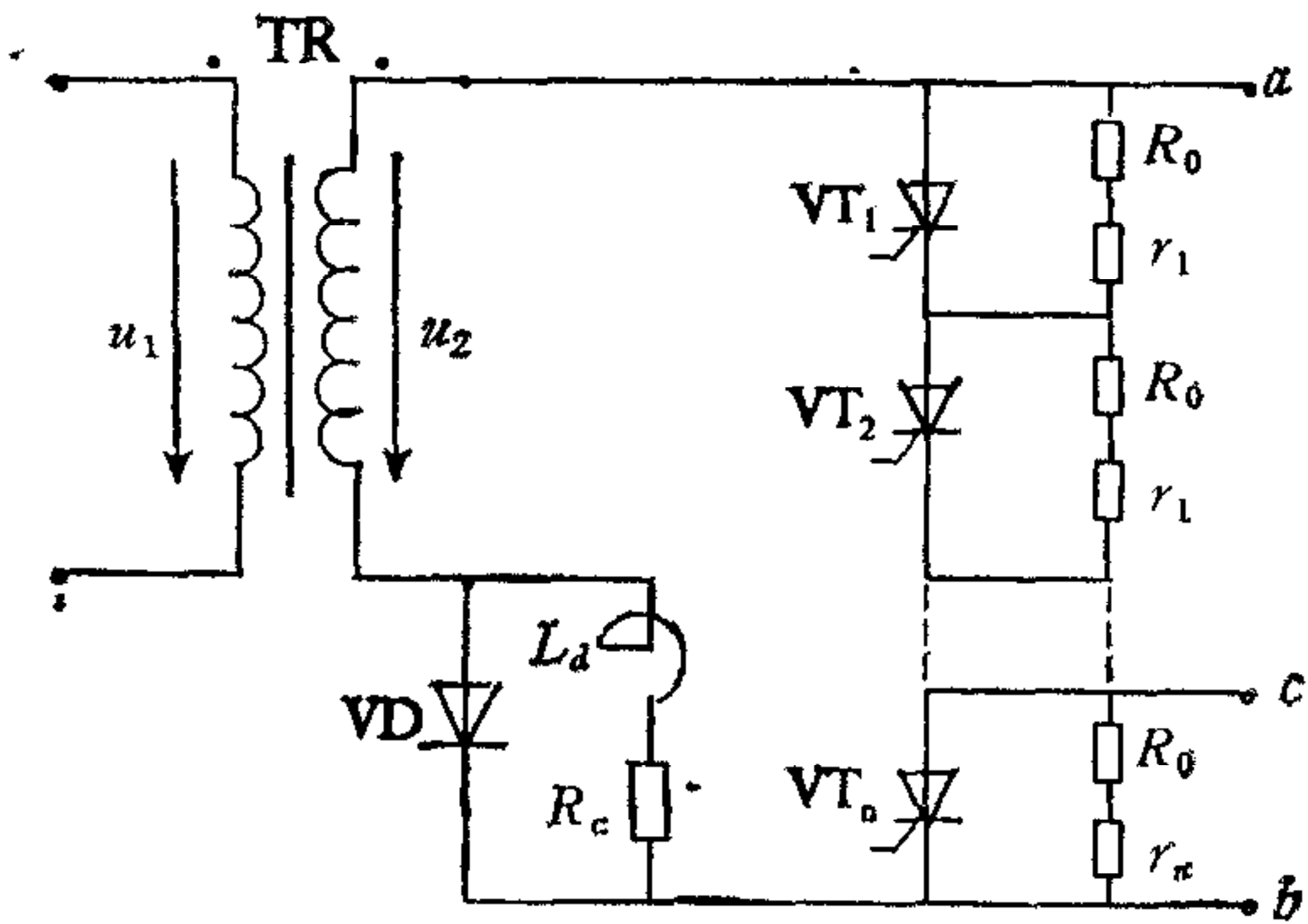


图 1 故障建模用图

把 n 个晶闸管的串联体看作一个系统, 取该系统的输入信号为 a, b 两点的电压信号 U_{ab} , 输出信号为 c, b 两点的电压信号 U_{cb} . 作者希望依靠 U_{ab}, U_{cb} 实现晶闸管的故障诊断, 并把故障定位在元件一级上; 为此在每个晶闸管的稳态均压电阻上再串一个适当小的电阻 r_i , 为建模方便,

令

$$R_i \triangleq R_0 + r_i, i = 1, 2, \dots, n, \tag{1}$$

$$\begin{cases} R_{\Sigma 1} \triangleq \{R_i / i = 1, 2, \dots, n\}, \\ R_{\Sigma 2} \triangleq \{R_i + R_j / i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n\}, \\ \dots\dots\dots \\ R_{\Sigma n} \triangleq \left\{ \sum_{i=1}^n R_i \right\}, \end{cases} \tag{2}$$

$$R_{\Sigma} \triangleq R_{\Sigma 1} \cup R_{\Sigma 2} \cup \dots \cup R_{\Sigma n}, \tag{3}$$

$$\begin{cases} \forall \beta_1, \beta_2 \in R_{\Sigma i}, \text{ 则 } \beta_1 \neq \beta_2, i = 1, 2, \dots, n-1, \\ R_{\Sigma i} \cap R_{\Sigma j} = \emptyset \text{ (空集)}, i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \tag{4}$$

r_i 的选取要保证(4)式成立, 以确保故障模型的唯一性. R_{Σ} 为该系统故障的完备测试集.

设 α 为控制角, 则整流阀的关断区间为

$$(2k-1)\pi < \omega t < \alpha + 2k\pi. \tag{5}$$

导通区间为

$$\alpha + 2k\pi \leq \omega t \leq (2k+1)\pi. \tag{6}$$

式中 k 为正整数, ω 为电网的角频率, t 为时间变量.

晶闸管常见故障有两类, 一类是熔通故障(应该关断时仍导通), 另一类是熔断故障(应该导通时不导通), 本文就这两种故障分别加以讨论.

1. 熔通故障

在晶闸管关断区间, 满足(5)式的时间域内, 未发生熔通故障的晶闸管不通过电流, 电流由均压电阻上流过; 发生熔通故障的晶闸管, 其均压电阻上不通过电流, 全部电流从该晶闸管上通过. 在此关断区间内若 $U_{cb} = 0$, 则表明 VT_n 发生熔通故障, 否则 VT_n 未发生熔通故障. 这时流过整个换流阀的电流为 $I = \frac{U_{cb}}{R_n}$, 未发生熔通故障晶闸管的均压

电阻之和为 $\frac{U_{ab}}{I} = \frac{U_{ab}}{U_{cb}} R_n$, 所以发生熔通故障晶闸管的均压电阻之和为

$$S = \sum_{i=1}^n R_i - \frac{U_{ab}}{U_{cb}} R_n. \quad (7)$$

上式右端各量为已知或可以实时测量得到,因而可以得到 S , 若 $S = 0$ 表明晶闸管未发生熔通故障, 否则表明 $VT_i, i = 1, 2, \dots, n-1$ 中至少有一个晶闸管发生了熔通故障, 为了定位故障, 用得到的 S 值去匹配 R_Z , 由于(4)式保证了 R_Z 中各元素的唯一性, 故 R_Z 中必有且仅有一个元素为 S , 即 $R_Z \cap \{S\} = \{S\}$, 这样就可以根据与 S 匹配上的元素在 R_Z 中的位置找出是某个或某几个晶闸管发生了熔通故障, (7)式为熔通故障模型。

2. 熔断故障

若假定单个晶闸管正常情况下的导通压降不大于 ε_2 , 则 n 个晶闸管的导通压降不大于 $\varepsilon_1 = n\varepsilon_2$. 在导通区间, 即满足式(6)的时间域内, 若 $U_{ab} > \varepsilon_1$ 则表明有晶闸管发生熔断故障。这时未发生熔断故障的晶闸管流过一定量的电流, 处于导通状态, 其均压电阻上认为无电流流过, 而发生熔断故障的晶闸管不通过电流, 电流由其均压电阻上通过。此时若 $U_{cb} > \varepsilon_2$, 表明 VT_n 也发生了熔断故障, 通过整流阀的电流为 $I = \frac{U_{cb}}{R_n}$, 熔断晶闸管的均压电阻之和为 $\frac{U_{ab}}{I}$ 即

$$D = \frac{U_{ab}}{U_{cb}} R_n. \quad (8)$$

在导通区间内若 $U_{ab} > \varepsilon_1, U_{cb} < \varepsilon_2$, 表明 VT_n 未发生熔断故障, 但有其它晶闸管发生熔断故障, 为了得到有用的 U_{cb} 信号, 在下一个导通区间不触发 VT_n , 即有一个导通角内人为地制造 VT_n 的熔断故障, 这样做在极短的时间内是允许的, 这时熔断晶闸管的均压电阻之和与(8)式完全相同, 由于 VT_n 是人为制造的熔断故障, 应该减去 VT_n 的均压电阻值, 从而有

$$D = \frac{U_{ab}}{U_{cb}} R_n - R_n. \quad (9)$$

可见若有熔断故障发生, 可由式(8)或(9)得到一个 D 值, 与熔通故障定位相同, 可以唯一地实现熔断故障的定位, 式(8)和(9)为熔断故障模型。

三、诊断系统的实现

以上介绍了晶闸管的故障模型, 但要实现晶闸管的故障诊断系统还要进一步的做工作。本文介绍的诊断方法是通过大量的数据匹配实现晶闸管的故障定位, 用这种方法实现的诊断系统要以计算机为核心, 因此涉及到计算机晶闸管故障诊断系统的软硬件构成问题。硬件构成的主要难点是强弱电的隔离技术, 软件主要是如何由故障模型得到诊断算法及该算法的可实现性。

1. 诊断系统的软件构成

1) 熔通、熔断故障的可分离性。

基于故障模型的熔通、熔断故障诊断算法是容易获取的, 如果只发生同一类型(熔通或熔断)故障, 用这种算法是能正确实现故障定位的, 但在实际应用中熔通、熔断故障是可

能同时发生的，这就要求诊断算法既能正确诊断与熔通故障并存的熔断故障又能正确诊断与熔断故障并存的熔通故障。即要求算法能正确分离熔通、熔断故障并实现故障定位。

第一，熔通、熔断故障的诊断不在同一时间域上进行。即两个算法要求的输入输出信号 U_{ab} 和 U_{cb} 不在同一时间域上，因为熔通故障的诊断是在满足式(5)的时间域上进行的，熔断故障的诊断是在满足式(6)的时间域上进行的。第二，发生熔断故障的晶闸管不影响熔通故障诊断算法的输入输出信号，发生熔通故障的晶闸管也不改变熔断故障算法的输入输出信号。这是因为熔通故障是在晶闸管关断期间诊断的，在此期间，熔断故障等价于无故障的晶闸管，所以发生熔断故障的晶闸管不改变熔通故障诊断算法的输入输出信号。同理，发生熔通故障的晶闸管也不影响熔断故障诊断算法的输入输出信号。第三，两个诊断算法彼此独立。因为一个算法不涉及另一个算法的数据和结论。基于上述三点，可得出如下结论：该算法可以正确分离熔通、熔断故障，实现多重故障定位。

2) 诊断系统的软件构成。

图 2 为诊断系统的程序流程图，其中左边是熔断故障诊断算法对应的程序流程，右边为熔通故障诊断算法对应的程序流程。图中 U_g 为与 n 个串联晶闸管的触发脉冲在时间上相一致的数字脉冲信号， U_{gn} 为第 n 个晶闸管的实际触发脉冲。程序依靠 U_g 导向进入熔通故障诊断分支或熔断故障诊断分支。在流程图中“确定适当采样”一框中的适当时

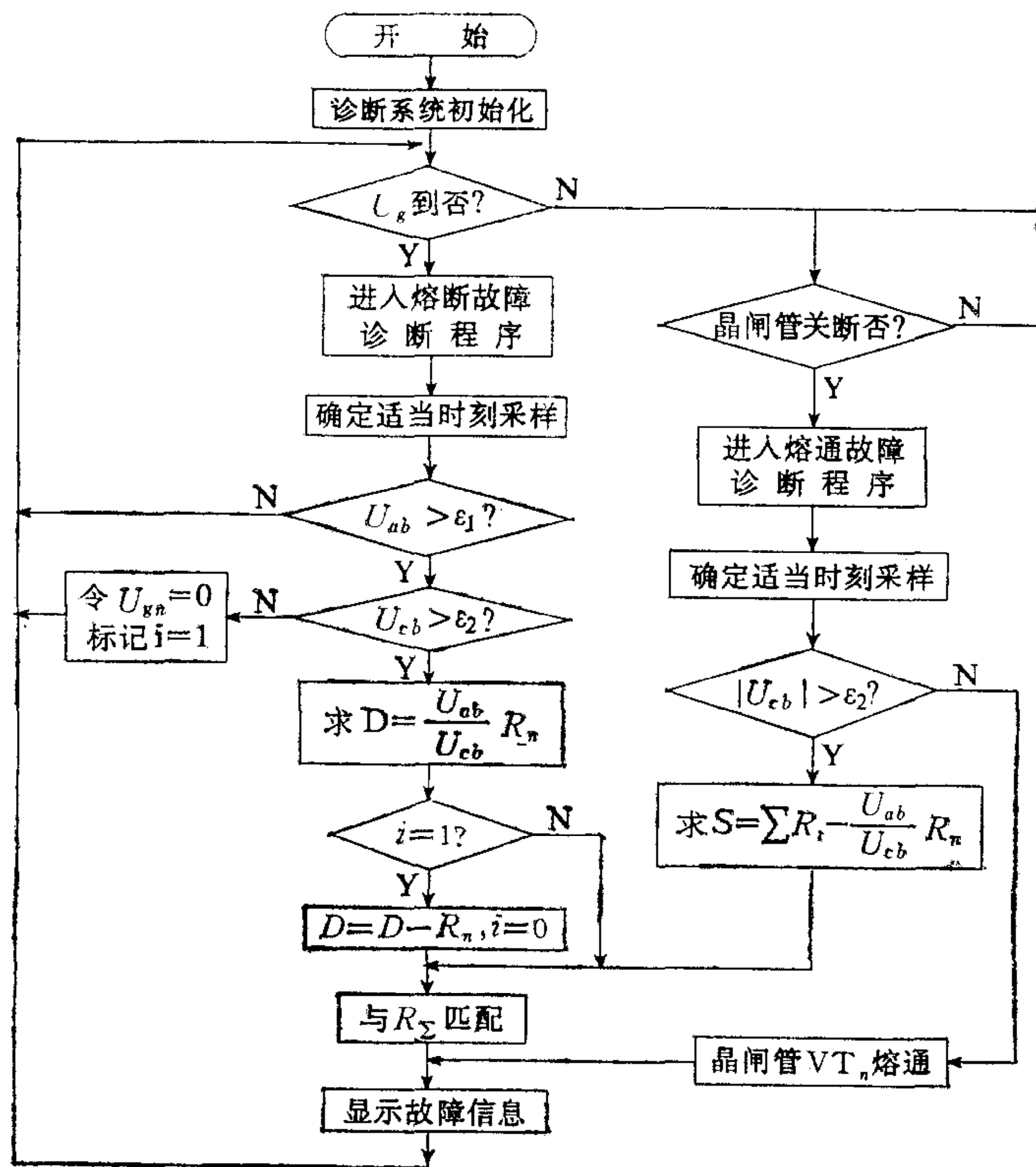


图 2 诊断系统程序流程图

刻，是指晶闸管可靠关断或可靠导通的稳态时间域上的一个点。流程图中设置标志 i 的目的是为了区分熔断故障诊断算法要采用式(8)还是式(9)；若 $i = 1$ ，说明下一步不触发 VT_n ，即令 $U_{gn} = 0$ ，熔断故障诊断算法采用的是式(9)；若 $i \neq 1$ ，则熔断故障诊断算法采用的是式(8)。

3) 串联晶闸管故障诊断的简化算法。

在满足(4)式的基础上， R_Σ 为系统故障的完备测试集，基于这一测试集的故障诊断系统的实现有两个缺点。第一，当 n 很大时，要保证(4)式成立， r_i 的选取有一定的难度。第二，集合 R_Σ 中元素太多，匹配时间长，影响诊断系统的实时性。为此，可以根据具体要求构造一个诊断系统的必要测试集 R'_Σ ，例如：在实际应用中，对于同一类型的故障，最多只要求定位到 $n1$ 重，这里 $n1 = (n/2)$ ，对于大于 $n1$ 重的故障，则说明这个串联阀臂至少有一半晶闸管已经损坏，可以用新阀臂去更换。此时(2),(3)式为

$$\begin{cases} R_{\Sigma 1} \triangleq \{R_i / i = 1, 2, \dots, n\}, \\ R_{\Sigma 2} \triangleq \{R_i + R_j / i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n\}, \\ \dots\dots\dots \\ R_{\Sigma n1} \triangleq \{R_i + R_j + \dots + R_k / i \neq j \neq \dots \neq k; \\ i, j, \dots, k = 1, 2, \dots, n\}, \end{cases} \quad (2)'$$

$$R'_\Sigma \triangleq R_{\Sigma 1} \cup R_{\Sigma 2} \cup \dots \cup R_{\Sigma n1}. \quad (3)'$$

显然基于必要测试集的故障诊断算法较基于完备测试集的故障诊断算法有较好的快速性，同时也为 r_i 的选取创造了便利条件。其不足是这种简化算法只能判断是否发生了 $n1$ 重以上的故障，但不能给这种故障定位。

2. 诊断系统的硬件构成

以计算机为核心构成的故障诊断系统，其技术难点在于强弱电的隔离，这一问题解决不好，整个故障诊断系统难以可靠运行。为此采用了全浮空数字隔离技术，其作法是先将高压电信号转换成低压电信号，即将电压 U_{ab} 、 U_{cb} 变换成为 U'_{ab} 、 U'_{cb} 。经过模/数 (A/D) 转换，低压电信号 U'_{ab} 、 U'_{cb} 转换为数字量。这时 A/D 转换器转换的电压很低，但仍属于强电，A/D 转换器上的静电压可以很高，目前的集成电路抗静电的能力是很强的，这样做对于 A/D 转换器来说是允许的，但强电信号能频繁地产生很强的干扰，如果把 A/D 转

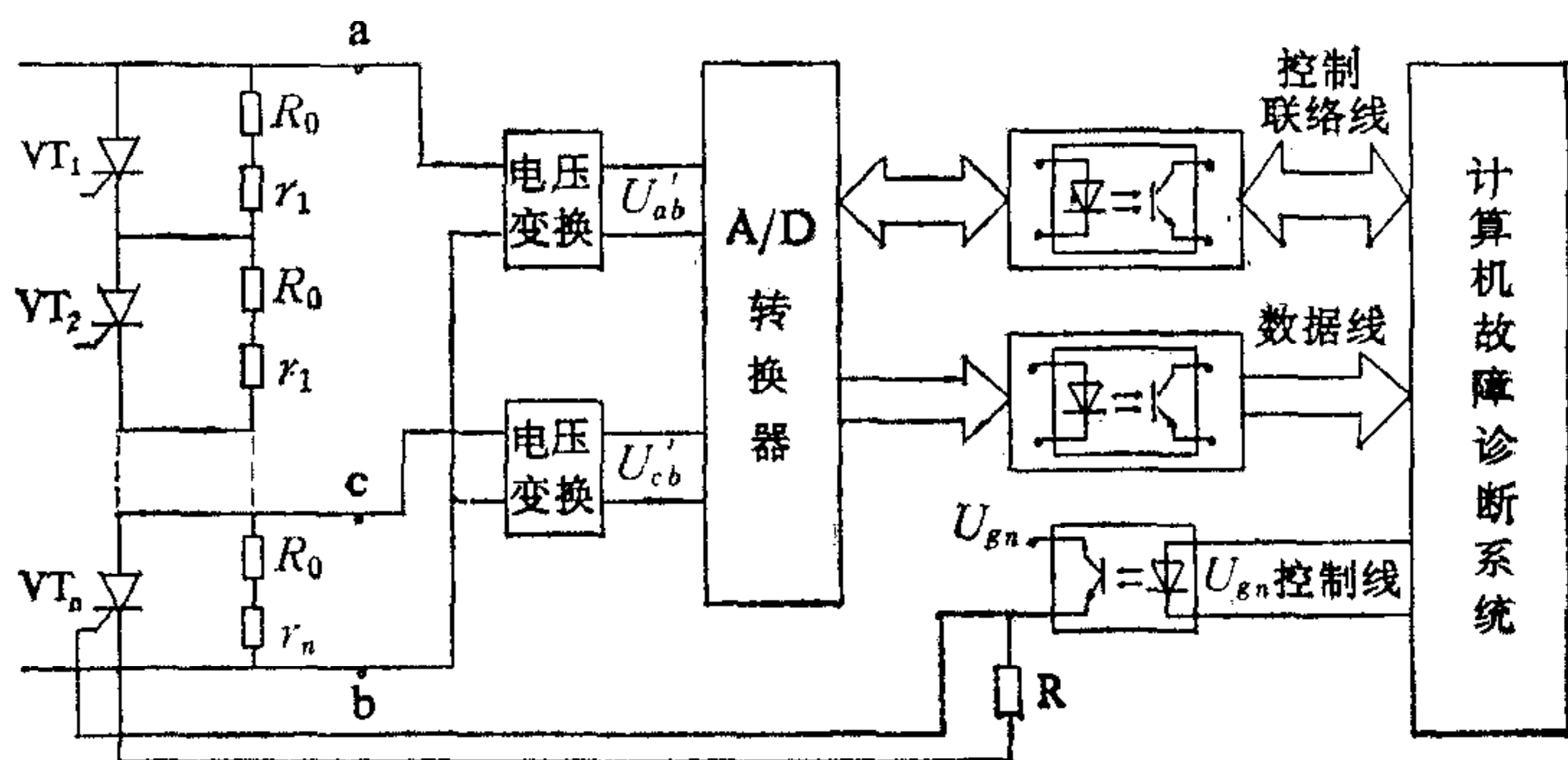


图3 诊断系统硬件结构框图

换结果不经过隔离而直接送给计算机系统,即 A/D 转换器与计算机系统共地,则强电干扰会进入计算机系统,使其无法正常工作,甚至产生死机现象,为此作者把 A/D 转换后的数字信号经过光电隔离送入计算机,计算机与 A/D 转换器之间的控制联络信号也采用相同的办法进行隔离,这样就切断了计算机与 A/D 转换器之间的电联系,保证计算机系统不会受到强电信号的干扰.如果计算机采用普通的单片机,而模/数转换器采用位数多、速度高的 A/D 器件,则 A/D 器件的价格可以比计算机系统的价格还要高.所以本文采用的全浮空数字隔离技术的目的不是保护计算机系统免受强电损坏,而是要保证计算机系统可靠地工作.用这种技术设计的诊断系统硬件构成框图见图 3.

三、结 束 语

本文是陕西机械学院青年基金资助课题的研究成果.作者采用 Intel 8031 单片机为核心组成了一个串联晶闸管故障诊断系统,由于采用了高档 A/D 转换通道,故在均压电阻上制造的差异较小,通过对十个晶闸管串联而成的换流阀的故障诊断,结果令人满意.特别是诊断系统和诊断对象之间的连线很少,且连线不随晶闸管个数的增加而增加,提高了诊断系统的通用性,故障的实时打印显示,为换流站的现代化管理提供了较先进的手段.

参 考 文 献

- [1] 张秀澹等,《电机工程手册》5 卷 32 篇,机械工业出版社(1982),90.
- [2] 钟彦儒,梁汉滨,采用波形分析法对电力电子装置中的晶闸管元件进行故障检测,陕西机械学院学报,3(1987),4,48—54.

THE APPLICATION OF THE CONCEPT OF SYSTEM IDENTIFICATION TO FAILURE DIAGNOSIS OF SERIES THYRISTOR VALVE

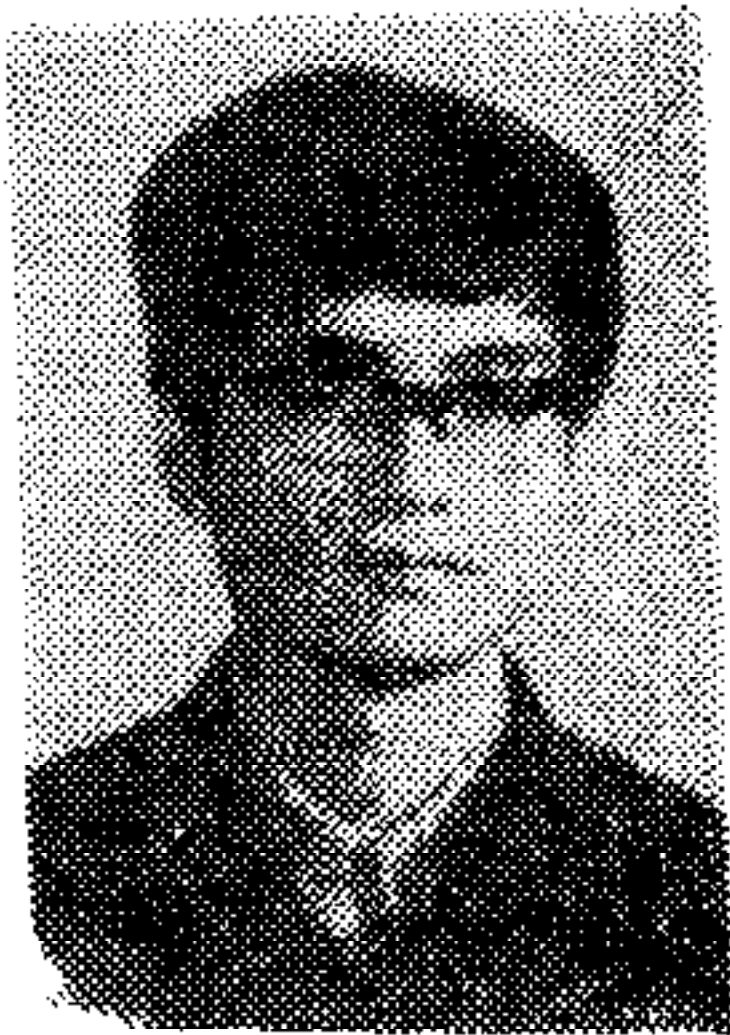
ZHANG XIAOMANG ZHANG CHENGQIAN

(Dept. of Automation, Shaanxi Institute of Mechanical Engineering, Xi'an 710048)

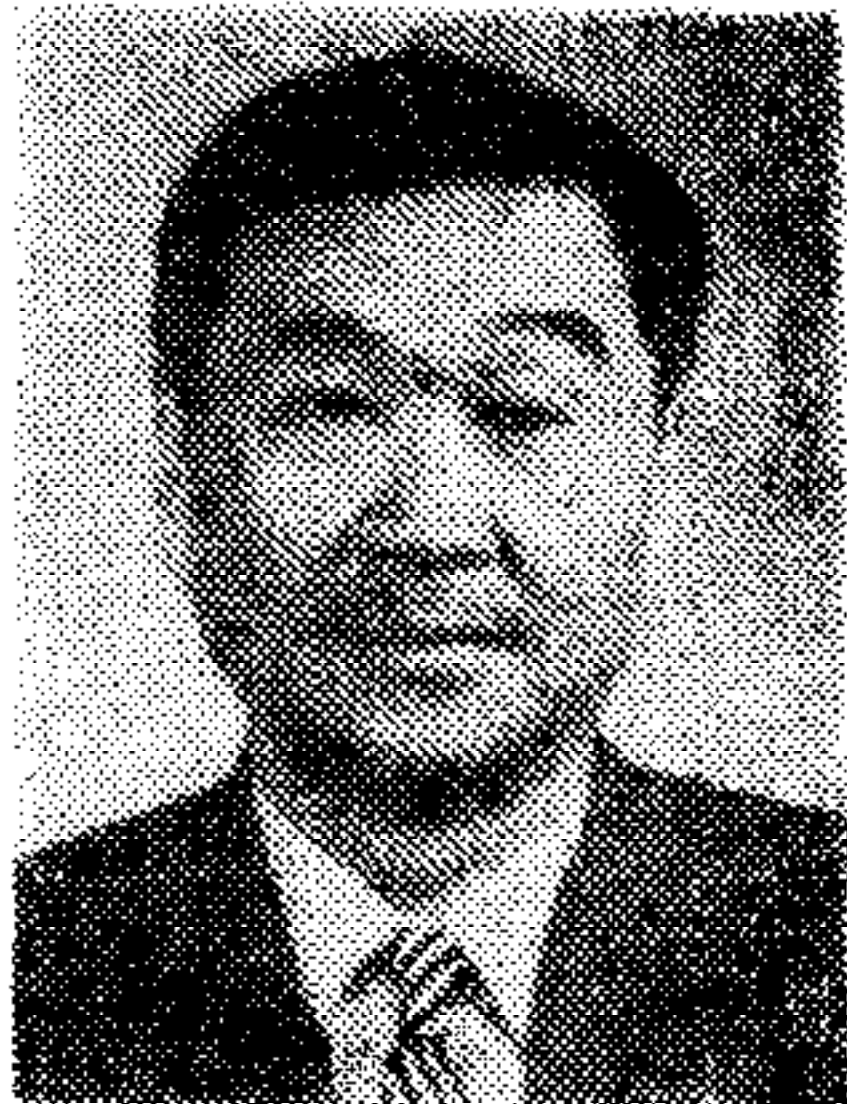
ABSTRACT

The application of the concept of system identification to fault detection of thyristor valve in high voltage direct current power transmission is discussed. The simulations of short and broken circuit failures have been tested and the practical feasibility has been studied.

Key words: Fault location; thyristor; match.



张小忙 1961 年生于陕西省。1983 年在陕西机械学院获工学学士学位，1988 年获工学硕士学位。现任陕西机械学院自动化工程系讲师，主要从事计算机在过程控制中的应用，传感器技术等方面的科学研究和教学工作。



张成乾 1932 年生于上海。1952 年毕业于上海大同大学电机系。一直从事教育工作，现任陕西机械学院自动化工程系教授，著有《系统辨识及参数估计》一书。近期致力于 C++ 及 OOM 软件设计方法的应用，同时对计算机在过程控制中的应用有浓厚兴趣。

第二届全国人机语音通讯学术会议

征 文 通 知

征文内容

语音感知与听觉模型；单音节及孤立词识别；大词汇量语音识别；连续语音识别；语音理解与语言模型；非特定人语音识别与说话人适应；说话人识别；语音识别新方法的研究；语音合成；语音分析在识别和合成中的应用；人工神经网络在语音识别、合成中的应用；语音增强及去噪；语音处理硬件；人机对话实用系统；语音数据库及语音系统性能评价。

论文要求

论文请寄全文或 800 字详细摘要，一式两份。论文投交截止日期：1992 年 4 月 30 日

论文录取通知日期：1992 年 5 月 30 日 录取稿全文交稿日期：1992 年 7 月 31 日

论文投交地址：北京中关村自动化研究所 100080

科技处 周如玉

会议时间：1992 年 9 月下旬

会议地点：北京或桂林(待定)

会议内容：国内外学者特邀大会专题报告

分组论文报告 专题讨论 软件及系统展览及演示 专业参观等

主办单位

中国自动化学会、中国计算机学会、中国电子学会、中国声学学会、中国中文信息学会的有关专业委员会及中国科学院自动化所。