

目 录

第一章 概述	(1)
§ 1.1 故障诊断的必要性	(1)
§ 1.2 故障诊断的基本概念	(2)
§ 1.3 故障诊断装置的性能要求	(5)
第二章 电网络与设备的分类诊断法	(6)
§ 2.1 判别函数法	(6)
§ 2.2 故障字典法	(9)
§ 2.3 概率法	(18)
§ 2.4 模糊识别	(20)
第三章 分析法	(27)
§ 3.1 网络元件参数测试及其故障诊断	(27)
§ 3.2 伴随网络法	(33)
§ 3.3 多频故障诊断	(43)
§ 3.4 k 节点故障诊断	(53)
§ 3.5 有限故障的分块故障诊断	(59)
§ 3.6 极小偏差向量法与二次规则法	(65)
第四章 线性系统辨识及其故障诊断	(67)
§ 4.1 线性系统辨识的主要方法	(68)
§ 4.2 应用系统辨识结果进行故障诊断	(91)
第五章 逻辑控制电路的故障诊断	(96)
§ 5.1 数字电路故障诊断的基本方法	(96)
§ 5.2 继电控制电路的逻辑等效与故障诊断	(108)
§ 5.3 将电路按故障等效性分块以确定其可测试性	(117)
第六章 应用微型计算机进行故障诊断的总体设计	(122)
§ 6.1 分析测试要求与确定技术指标	(122)
§ 6.2 故障诊断装置的总体设计	(125)
§ 6.3 故障诊断装置软件与硬件的研制步骤	(129)

第七章 故障诊断装置的接口技术	(131)
§ 7.1 概述	(131)
§ 7.2 激励信号产生电路	(132)
§ 7.3 模数转换器	(144)
§ 7.4 数据采集电路	(158)
§ 7.5 开关量输入接口	(178)
§ 7.6 脉冲量输入接口	(182)
第八章 误差分析与数据处理	(193)
§ 8.1 应用微型计算机进行故障诊断时的干扰及其抑制	(193)
§ 8.2 模拟量输入电路的误差分析	(196)
§ 8.3 字长对故障诊断的影响	(199)
§ 8.4 故障诊断中应用的数字滤波方法	(203)
第九章 故障诊断装置的软件设计	(213)
§ 9.1 应用软件设计的方法与步骤	(213)
§ 9.2 故障诊断装置应用软件的组成	(217)
§ 9.3 故障诊断装置设计举例	(225)
第十章 故障诊断理论与技术的发展	(234)
§ 10.1 目前故障诊断存在的问题	(234)
§ 10.2 人工智能在故障诊断中的应用	(235)
§ 10.3 自检测的新概念	(242)
附录A § 3.4 中两个定理的证明	(243)
参考文献	(247)

第一章 概述

§ 1.1 故障诊断的必要性

人们总是希望仪器、设备或系统经常处于良好状态,可是仪器、设备或系统又是会发生故障的,只有在经过修复之后才能重新恢复良好状态。仪器、设备或系统可用率的定量刻画就是所谓的有效度,稳态有效度 A 可表示为

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

其中 $MTBF$ 为平均故障间隔时间

$MTTR$ 为平均修复时间

为了提高有效度 A , 一方面应尽可能地增大 $MTBF$, 即提高产品的可靠性, 这要靠精心地设计、制造和合理地装配、调试来实现; 另一方面则是尽可能减小 $MTTR$ 。众所周知, 产品可靠性的提高要受到技术条件和工艺水平的限制, 提出的要求过高, 在经济上会付出很高的代价, 而且, 再好的产品在使用过程中也会出故障, 因此缩短平均修复时间对提高有效度起重要的作用。而在故障修复过程中, 查找故障原因占用了大量的时间, 据有关统计资料, 对飞机设备而言, 查找故障原因的时间占总排故时间的 70% 左右。这表明, 为了缩短平均修复时间, 必须做到迅速准确地判断故障部位。

早期, 维护检查和查找排除故障的工作主要是由人工进行的, 但人工方法花的时间长, 费用贵; 对维护人员的技术水平要求高, 他们必须经过专门的培训, 而且具有比较丰富的维修经验; 维护人员的负担重, 必须熟记仪器设备的工作电路、技术数据、检查方法和步骤。随着仪器设备规模的增大、复杂性及运行速度的提高, 人工的方法已无法满足要求。对仪器设备进行自动测试或故障诊断 (在本书中这两种提法的含意相同) 已是势在必行。事实上, 一些先进的设备离开故障诊断装置就很难发挥其应有的作用。

同时, 在维修工作中, 随着从“预防为主”的维修思想向“以可靠性为中心”的维修思想的转变, 维修方式已从单纯的定时维修发展为定时维修、视情维修和监控三种方式。为了实现视情维修, 必须了解当前设备的实际技术状况; 为了实现监控方式, 就必须有进行监控的技术装备。可见, 先进的维修手段是落实正确的维修思想和采用合适的维修方式的重要条件。应用计算机的自动化原位测试装置正是维修手段改革的主要内容和发展趋势, 它还将为维修体制的改革和实现高质量、高效率的维修提供可能。

自动故障诊断对于机载、舰载和车载设备, 尤其是对军用装备有特别重要的意义。快速而有效的故障诊断可以使装备迅速恢复良好状态, 从而大大提高部队的机动性和战斗力。

故障诊断装置在一些技术比较先进的国家已经得到了广泛应用, 近年来在国内已得到有关部门的重视, 不少单位正在从事研究, 其中有些成果已经付诸实用。

§ 1.2 故障诊断的基本概念

一、故障及其分类

系统或设备丧失规定功能的现象称为故障。

故障可按不同的原则进行分类。对于电网络及由其组成的设备来说,按故障的程度可分为软故障和硬故障。软故障又称为渐变故障,它是指元件参数超出容差范围而造成的故障。对这种故障,通常除了要判定故障元件之外,还应计算元件参数对标称值的偏离量。硬故障又称为突变故障,如开路和短路故障。

按故障存在的时间,可分为永久性故障和间歇故障。永久性故障是指一旦出现就长期存在的故障,任何时刻进行检测均可发现此类故障。间歇性故障是指某种特定条件下才出现的或随机性的、存在时间短暂的故障现象。由于难以把握其出现的规律与时机,这种故障不易检测。

按同时出现故障的数量又可分为单故障和多故障。若某一时刻仅有一个故障,称为单故障;若同时可能发生若干个故障,则称为多故障。通常,诊断多故障比诊断单故障更为困难。

二、故障诊断的基本思想和发展情况

诊断原为医学用语,指用各种手段对人体进行检查、化验,然后根据医学理论确定是否患病和患有何种疾病的过程。诊断就是由现象判断本质、由当前预测将来、由局部推测整体的过程。在工程技术领域,也需要根据技术装备的若干个可以直接测量的信号推断装备是否正常,确定故障部位和预测故障的发生,故借用诊断这个术语,称为故障诊断。

故障诊断的基本思想可以这样来表述。若被测对象全部可能发生的状态,包括正常状态和故障状态,组成状态空间,它的可测量特征的全部可能取值范围形成特征空间。当系统处于某一状态 s 时,它将具有确定的特征 y ,即存在着映射 g :

$$g: S \rightarrow Y$$

反之,一定的系统特征也对应确定的状态,即存在着映射 f :

$$f: Y \rightarrow S$$

状态空间和特征空间的关系可用图 1.2-1 表示。如果 f 和 g 是双射函数,即特征空间和状态空间存在一对一的、映满的映射,则由特征向量可唯一地确定系统的状态。映射 g 可由系统的工作原理和相应的理论求得,如对自动控制系统,它可用状态方程或传递函数表示。故障诊断的目的在于根据可测量的特征向量判断系统处于何种状态,即故障诊断的任务是找到映射 f 。因此,在一定意义上说,故障诊断过程相当于一般学科所解决问题的逆过程。

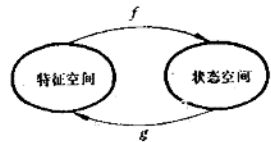


图 1.2-1 状态空间与特征空间

故障诊断学科由故障诊断理论和故障诊断技术两部分组成。故障诊断理论主要研究故障诊断方法和被测对象的可测试性,故障诊断技术则是研究实现故障诊断的技术手段。

故障诊断方法随诊断对象性质和特点的不同而异。从电路的故障诊断而言,理论上较为成熟而且应用较多的是数字电路的故障诊断。从五十年代起,就已经开始进行数字电路自动故障诊断的研究工作,六十年代在理论上已形成体系,七十年代已有数字电路商用自动测试程序在市场上出售。关于模拟电路的自动故障诊断,六十年代才着手研究,七十年代末初步建立了故障诊断理论并向实用化的方向发展。但由于模拟电路的多样性及复杂性,其故障诊断理论至今尚未形成完整的体系,在应用上存在的问题更多,许多方法仅限于理论上的探讨。

本书讨论各种电气系统、仪表系统和自动控制系统的故障诊断。组成这些系统的电网络和电设备大多属于模拟电路的范畴,少数具有数字电路的一些特点。对不同的诊断对象,采用的故障诊断方法也是不同的。

若系统可能发生的状态是有限的,例如可能发生 n 种故障,这时把正常系统所处的状态称为 s_0 ,把存在不同故障的系统看作是处于不同的状态分别称为 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 。系统处于状态 s_i 时,对应的可测量特征向量为 $y_i=(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ 。故障诊断的任务就是根据实测的一组特征向量 $y=(y_1, y_2, \dots, y_m)$ 判定该系统正处于何种状态。在这种情况下,故障诊断就成为按特征向量对被测系统进行分类的问题。为了进行故障分类,已经提出了多种判别准则,从而形成了多种故障分类方法,这些将在下一章再详细加以讨论。由于这类方法简单易行,已经得到了广泛应用,特别适合于对多个分立机件构成的系统的故障诊断。

有的被测对象可能发生的状态数是不可数的,例如对模拟系统的渐变故障就是如此。其内部参数和输出参数的变化都是连续的,不宜于简单地用分类的方法来处理。考虑到输出响应的变化是由于内部参数的变化造成的,一种最直观的办法就是首先计算由于每个内部参数的单位变化造成的输出响应的变化量,即进行灵敏度分析;实施诊断则是其逆过程,根据实际测量到的系统输出响应的变化反过来求出内部参数的变化量。这种方法简洁明了地反映了这类对象故障诊断的基本思想。然而,实际运用时,这种方法遇到了困难,它们主要是,内部参数与可测响应之间通常是非线性关系;被测系统的检测点的数目往往少于元件数,致使已知方程数少于未知量的数目,从而无法解出全部元件参数的数值;加之元件的实际参数值存在容差,即使没有故障时,元件值也与标称值不同,而故障诊断一般是根据标称值进行的,这就提出了诊断结果的可信度问题;硬故障与软故障之间的差别很大,有些故障诊断方法只适用于诊断硬故障,而另一些则只适用于诊断软故障,但不能同时适用于诊断这两类故障。为了解决这些模拟电路故障诊断特有的困难,许多学者进行了大量的研究,提出了很多好的方法,在第三章将对其中的若干种主要方法加以讨论。

对于线性控制系统,因为这类对象的理论比较系统和完整,特别是系统辨识原理已发展成为现代控制理论的一个重要分支,其中许多辨识方法为这类系统的故障诊断创造了条件。因此,线性控制系统故障诊断的基本思想是,选择适用的系统辨识方法,利用系统辨识的结果进一步判定故障部位,这些是第四章讨论的主要内容。

目前的电网络和电设备中,还大量使用着由继电元件组成的控制系统。由于继电元件只有通和断两种状态,其功能与组合电路十分相似,因此可把它转化为数字电路,借用数字电路的方法对其进行故障诊断。第五章将按这一思想作进一步阐述。

在故障诊断的理论研究和技术实现中,可测试性是一个十分重要的问题,人们已经给予高度的重视。在设计阶段,设计出固有可测试性较好的产品,将为故障诊断的实施提供必要的前提和有利条件。对已有的产品,通过恰当地选择检测点和测试信号,充分发挥其可测试

性能,可以提高故障诊断装置的技术性能如故障覆盖率、故障分辨力,缩短故障诊断时间,并进而提高设备的利用率。

对于电网络与设备的可测试性,现在还没有统一的衡量标准。对不同类型的被测对象,许多学者提出了不同的可测试性测度,书中在讨论各种被测对象的诊断方法时,对其可测试性也将分别加以分析。

测试技术是故障诊断的重要组成部分,它包括检测点的选择、测试信号的确定和产生、被测对象输出响应的采集、处理、测试和诊断算法的实现、测试和诊断结果的自动显示和记录等。测试技术是否完善决定了故障诊断能否顺利实施和付诸实用。故障诊断装置是实现自动故障诊断的工具和手段,是测试技术的集中反映。早期的自动测试装置着重解决的是减少人工操作以提高测试速度,并实现测量结果的自动记录和显示。现代的自动测试系统(ATS)或自动测试装置(ATE)则是计算机技术和自动测试技术和结合的产物。本世纪五十年代末到六十年代的军用自动测试系统已使用了计算机,但计算机与测试装置及测试对象间的联系比较繁杂,响应速度慢,结构复杂、价格昂贵。经过几个阶段的发展,自动测试系统的性能逐步得到了完善和提高。特别是微型计算机的出现和推广,其使用灵活、适应性强、价格低廉,体积小、重量轻等特点,使得它成为进行自动测试的有力工具。微电子技术和计算机的发展,使得设备的复杂程度和运行速度剧烈增加,它一方面对故障诊断提出了更高的要求,使这个问题的解决更为迫切,与此同时,也为故障诊断的实现提供了十分有利的条件,从而成为推动故障诊断技术迅速发展的重要原因。新型自动测试系统的基本思想是:在计算机控制下对被测设备施加激励,采集被测对象的响应、进行数据处理,计算性能参数和诊断故障、自动输出测量和诊断结果。它把计算机技术和测试技术融为一体,充分发挥了计算机的控制能力、高速数据处理能力和输入输出能力。计算机既是控制中心又是硬件测量仪器。只要修改软件,就可开发新的测试功能。其优点是硬件少,因此体积小、重量轻、功耗下降、成本低、可靠性高;功能强;可扩充性强;自动化程度高;有自检功能。随着分布式计算机系统的发展,将会出现分布式的自动测试系统。超大规模集成电路技术的发展,将使人们能够把被测对象与其测试装置组装在一起,集成在少数芯片中,这将把测试技术推向一个新阶段。

三、故障诊断的功能

(一) 故障检测 故障检测是指判断系统或设备是否有故障,若有故障则发出故障信号。

(二) 故障定位 故障定位是指故障的具体部位。故障定位又称为故障隔离或故障诊断。本书把故障诊断一词赋予更广的含意。

(三) 故障辨识 对于某些检测对象,不仅要确定故障部位,还要求对故障作进一步的描述,称为故障辨识。它包括故障参数识别和故障影响分析。例如对电路故障的诊断,不仅要知道哪个元件出了故障,还要求知道元件参数的变化量。即使元件参数没有超出正常范围,知道了元件的实际数值,就可通过前后几次测量结果的比较,找到其变化规律以预测故障,做到视情维修,减少盲目性。

(四) 连续监测 连续监测又称状态监测。它可以连续地对被测对象的主要性能参数进行监视和记录。一旦发现故障就发出故障信号。连续监测通常只指出故障的性质而不能进行故障定位,但可根据连续监测记录的数据作进一步分析。

四、故障诊断的分类

按不同的方法,对故障诊断可作不同的分类。

按被测试对象与诊断装置的关系而言,有主动诊断与被动诊断之分。由诊断装置向被测试对象发出激励信号,并测量对象对激励的响应的诊断方法叫主动诊断。被测试对象本身可以发出信号,诊断装置只是采集这些信号的诊断叫被动诊断。

按实施诊断时被测试对象是否工作,可分为在线诊断与离线诊断。诊断时对象处于运行状态的叫在线诊断;如果对象中止运行,称离线诊断。

按实施诊断时被测试对象的工作状态,可分为动态诊断与静态诊断。前者是指诊断时对象处于动态过程中,后者是指诊断时对象处于稳定状态。

按被测试对象的性质来分,有数字电路故障诊断与模拟电路故障诊断。由于这两种电路有不同的特点,其诊断方法有很大的差异。

§ 1.3 故障诊断装置的性能要求

一、故障诊断装置的主要技术要求

(一) 故障检测率(或覆盖率) P_d

$$P_d = n/N$$

其中 n 为诊断装置可以检测的故障数; N 为实际发生的故障数

(二) 故障隔离率 P_i

$$P_i = m/n$$

其中 m 为可以实现故障定位的故障数

(三) 虚警率 虚警率是漏诊率与误诊率之和。漏诊是指把故障状态判断为正常情况,误诊是把正常情况判断为故障状态。虚警率可用被测对象在一定运行时间(如1000小时)内,诊断装置的虚警次数来衡量。

(四) 故障分辨率 δ 故障分辨率 δ 用以衡量诊断装置获得的故障定位的信息量。可以用故障诊断装置能够分辨的最小故障集中包含的元件数的多少来衡量。例如,不同场合使用不同等级的故障诊断装置可分别把故障隔离至 LRU (Line Replaceable Unit) 或 SRU (Shop Replaceable Unit) 或元件级,显然其故障分辨率是依次增高的。

(五) 诊断时间 t_d 诊断时间 t_d 指从开始诊断到输出诊断结果所需要的时间。诊断时间应在人们可以接受的范围之内。

二、使用要求

(一) 诊断装置的可靠性 故障诊断装置是用来检查和监视被测对象的,它的工作必须可靠。通常要求故障诊断装置的可靠性指标应比被测对象高一个数量级。

(二) 故障诊断装置对使用环境的要求 故障诊断装置应能在其运行环境下正常工作。因此,它对环境温度、湿度、风沙、盐碱的适应能力、抗振能力,均应与其运行环境相一致。

(三) 体积、重量符合要求。

(四) 价格合理。

(五) 本身的维护好,有较强的自检测能力。

第二章 电网络与设备的分类诊断法

分类法的理论基础,是模式识别中的统计方法或决策理论。如果被测对象的各种可能发生的故障状态不太复杂,允许对其作简单的分类或只需要确定到相应的故障状态而不必对其结构信息作进一步的描述时,就可以采用分类法进行故障诊断。这种方法适用于多种电网络和电气设备,而且比较简单、实用,因而得到了广泛的应用。

设有一个系统,可能处于 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 种状态,或称该系统存在 n 个模式类,构成状态空间;从该系统可以测量到 m 个特征参量 $k_1, k_2, \dots, k_m$, 构成 m 维特征空间。分类法的任务就是按照一定的准则,根据实际测量到的一组特征参量,把系统划归某一个模式类。

因此,为了进行模式分类,首先应确定需要划分的模式类,即提出需要隔离哪些故障类型。其次是选择特征参量,要求特征空间是模式类的完备集,即每个模式类必须与特征空间中的特征向量或点集(区域)相对应。最后是根据系统的结构、性质、运行和维护经验确定分类的准则。

现在已经提出了多种分类准则,如按特征空间的划分进行分类、按故障的因果逻辑关系分类、按各种故障原因导致被观察故障现象的条件概率分类、按特征向量之间的距离分类、按模糊识别准则分类等。

下面讨论判别函数法、故障字典法和诊断树法、统计概率法以及模糊识别法。

§ 2.1 判别函数法

设被测对象可能有 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 个模式类, 可以从它测量到 m 个特征参量 $k_1, k_2, \dots, k_m$, 组成特征向量

$$\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_m)$$

判别函数法就是要为每个模式类设计一个函数 $D_i(\mathbf{k})$, $i=1, 2, \dots, n$ 。当被测系统属于第 i 个模式类时, 与其相应的判别函数取值最大, 即应有

$$D_i(\mathbf{k}) > D_j(\mathbf{k}) \quad j=1, 2, \dots, n, \quad i \neq j$$

特征空间边界的划分可用以下方程表示

$$D_i(\mathbf{k}) = D_j(\mathbf{k})$$

判别函数可选择线性判别函数、最小距离分类器、分段线性判别函数、多项式判别函数等。在此主要讨论线性判别函数。

一、线性判别函数

线性判别函数 $D_i(\mathbf{k})$ 是 m 个特征参量的线性组合

$$D_i(\mathbf{k}) = \sum_{j=1}^m a_{ij} k_j + a_{i, n+1} \quad i=1, 2, \dots, n$$

特征空间中区分模式类的决策边界的形式为

$$D_i(\mathbf{k}) - D_j(\mathbf{k}) = \sum_{t=1}^n (a_{it} - a_{jt})k_t + (a_{im+1} - a_{jm+1}) = 0$$

这是 m 维空间中的超平面方程。

现在通过几个例子说明线性判别函数的形式。

例 2.1-1 一维特征参量、单边界时的线性判别函数

设某系统，可能有两个模式类 s_1 和 s_2 ，只有一个特征参量 k ，其区分边界值为 c ，如图 2.1-1 所示。显然可选取线性判别函数为

$$D_1(k) = k - c$$

$$D_2(k) = c - k$$

例 2.1-2 一维特征参量、双边界时的线性判别函数

设某系统，可能有三个模式类 s_1 、 s_2 和 s_3 ，只有一个可测量的特征参量 k ，两个区分边界值为 c_1 和 c_2 ，如图 2.1-2 所示。则可选取如下的线性判别函数：

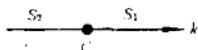


图 2.1-1 一维单边界

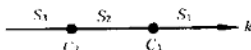


图 2.1-2 一维双边界

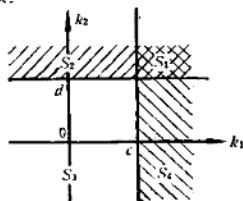


图 2.1-3 二维双边界

$$D_1(k) = (k - c_1) + (k - c_2)$$

$$D_2(k) = -(k - c_1) + (k - c_2)$$

$$D_3(k) = -(k - c_1) - (k - c_2)$$

例 2.1-3 二维特征参量、每个特征参量有一个边界值时的线性判别函数

设系统可能有四种模式类，两个可测量特征量 k_1 和 k_2 ，每个特征参量各有一个区分边界值 c 和 d ，如图 2.1-3 所示。其线性判别函数为

$$D_1(k_1, k_2) = (k_1 - c) + (k_2 - d)$$

$$D_2(k_1, k_2) = -(k_1 - c) + (k_2 - d)$$

$$D_3(k_1, k_2) = -(k_1 - c) - (k_2 - d)$$

$$D_4(k_1, k_2) = (k_1 - c) - (k_2 - d)$$

从以上几个例子可以看到，线性判别函数由若干项组成，每一项都是特征参量与其区分边界值之差，线性判别函数所包含的这种形式的项的数目等于特征参量的区分边界数之和。对应于不同模式类的判别函数都包含同样多的项，其差别只在于各差项的符号不同。于是，如果系统有 n 个模式类 $s_1, s_2, \dots, s_n$ ，有 m 个可测量特征参量 $k_1, k_2, \dots, k_m$ ，每个特征参量各有若干个区分边界值 $k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1l_1}; k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2l_2}; k_{m1}, k_{m2}, \dots, k_{ml_m}$ ，则第 i 个模式类 s_i 对应的线性判别函数 $D_i(\mathbf{k})$ 为①

① 空军工程学院，航空维修工程学，1984。

$$\begin{aligned}
D_i(\mathbf{k}) = & \text{Sign}(k_i^i - k_{i1})(k_1 - k_{11}) + \text{Sign}(k_i^i - k_{i2})(k_1 - k_{12}) + \dots \\
& + \text{Sign}(k_i^i - k_{i1l_1})(k_1 - k_{1l_1}) + \text{Sign}(k_i^i - k_{i2l_1})(k_2 - k_{21}) + \dots \\
& + \text{Sign}(k_i^i - k_{i2l_2})(k_2 - k_{2l_2}) + \dots + \text{Sign}(k_i^i - k_{in})(k_n - k_{n1}) \\
& + \dots + \text{Sign}(k_i^i - k_{inl_m})(k_n - k_{n1m})
\end{aligned} \quad (2.1-1)$$

式中

$$\text{Sign}(k_i^i - k_{ijk}) = \begin{cases} +1 & k_i^i < k_{ijk} \quad i=1, 2, \dots, n \\ -1 & k_i^i > k_{ijk} \quad j=1, 2, \dots, m \\ & l_s=1, 2, \dots, l_j \end{cases}$$

为符号函数。 k_i^i 为在模式类 s_i 所对应的特征空间的区域中任取的特征参数 k_i 的值，故符号函数均为已知值。

线性判别函数也可写成矩阵的形式

$$D_i(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} k_1 - k_{i1} \\ \vdots \\ k_1 - k_{i1l_1} \\ k_2 - k_{i21} \\ \vdots \\ k_2 - k_{i2l_2} \\ \vdots \\ k_n - k_{in1} \\ \vdots \\ k_n - k_{inl_m} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \text{Sign}(k_i^i - k_{i1}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{i1l_1}) \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{i21}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{i2l_2}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{in1}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{inl_m}) \end{bmatrix} \quad (2.1-2)$$

式(2.1-2)还可以进一步写成

$$D_i(\mathbf{k}) = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ & \ddots & \\ & & 1 & \dots & 1 \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 & \dots & 1 \\ -k_{i1} \dots -k_{i1l_1} & -k_{i21} \dots -k_{i2l_2} & \dots & -k_{in1} \dots -k_{inl_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Sign}(k_i^i - k_{i1}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{i1l_1}) \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{i21}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{i2l_2}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{in1}) \\ \vdots \\ \text{Sign}(k_i^i - k_{inl_m}) \end{bmatrix} \quad (2.1-3)$$

或简写成

$$D_i = \mathbf{KHS}_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2.1-4)$$

式中 $\mathbf{K}$ 为特征向量矩阵，可由测量得到

$\mathbf{H}$ 为特征空间矩阵，表示特征空间的划分

$\mathbf{S}_i$ 为符号矩阵，可以事先求得

令 $\mathbf{D}(\mathbf{k}) = [D_1(\mathbf{k}) \ D_2(\mathbf{k}) \ \dots \ D_n(\mathbf{k})] = \mathbf{KH}[\mathbf{S}_1 \ \mathbf{S}_2 \ \dots \ \mathbf{S}_n] = \mathbf{KHS} = \mathbf{KM}$

$\mathbf{D}(\mathbf{k})$ 称为识别向量； $\mathbf{M}$ 称为识别矩阵，可事先算出。

二、非线性判别函数

如果特征空间不能以超平面来划分，就不能用线性判别函数来进行故障诊断，而要用较

为复杂的判别函数例如多项式判别函数。多项式判别函数可以表示为

$$D_i(\mathbf{k}) = a_{i1}f_1(\mathbf{k}) + a_{i2}f_2(\mathbf{k}) + \cdots + a_{iL}f_L(\mathbf{k}) + a_{iL+1}$$

其中 $f_i(\mathbf{k})$ 的形式为

$$k_{g_1}^{p_1} k_{g_2}^{p_2} \cdots k_{g_r}^{p_r}; \quad g_1, g_2, \cdots, g_r = 1, 2, \cdots, m \\ p_1, p_2, \cdots, p_r = 0 \text{ 或 } 1$$

它是 r 阶多项式，任何两个模式类之间的决策边界也具有 r 阶多项式的形式。

假如 $r=2$ ，判别函数被称为二次判别函数，这时

$$f_i(\mathbf{k}) = k_{g_1}^{p_1} k_{g_2}^{p_2} \\ L = \frac{1}{2}(m+3)m$$

决策边界是超二次曲面。

三、判别函数法的诊断步骤

(一) 测试前需要确定所需判定的模式类、选择特征参量、正确划分特征空间、构造判别函数，并存入计算机。

(二) 测量特征参量 $k_1, k_2, \cdots, k_m$ ，并对数据作预处理。

(三) 测试后计算主要是计算各个判别函数的数值并进行比较，若

$$D_i(\mathbf{k}) = \max_{1 \leq j \leq n} \{D_j(\mathbf{k})\}$$

则被测系统应该划归模式类 s_i 。

四、判别函数法的使用条件与特点

只有在被测对象的各个特征参量都具有相同量纲的情况下，才能用判别函数法进行故障诊断，否则，无法计算判别函数值，当然也就不能进行故障诊断。

判别函数法的优点是简单易行，测试后计算量小，而且可以根据连续几次检查中判别函数的变化预测其动向。

主要缺点是非线性判别函数难以构造，特征空间的边界难以准确划分。

§ 2.2 故障字典法

故障字典法是一种适用范围很广的故障诊断方法，不仅对电系统，甚至对非电类设备的故障以至人的疾病，只要能获得清楚而且确定的征兆，以及征兆与故障原因或疾病之间的关系，都可以用故障字典法进行诊断。

若被测对象可能发生 n 种故障，相应于 n 个模式类 $s_1, s_2, \cdots, s_n$ ，它有 m 个征兆（或特征） $k_1, k_2, \cdots, k_m$ ，并定义

$$k_j = \begin{cases} 0 & \text{第 } j \text{ 个征兆不出现} \\ 1 & \text{第 } j \text{ 个征兆出现} \end{cases} \quad j=1, 2, \cdots, m$$

令 $\mathbf{k} = (k_1, k_2, \cdots, k_m)$ 为特征向量。

当已经知道存在第 i 个故障时, 哪些征兆出现, 哪些征兆不出现, 即已经知道

$$s_i = f_i(k_1, k_2, \dots, k_m) = f_i(k) \quad (2.2-1)$$

时, 就可以按实际观察到的征兆特征判断故障原因了。上式中 $f_i(k)$ 为各特征的布尔表达式。将式 (2.2-1) 表示成表格的形式, 就是故障字典。

被测对象的特点不同, 形成故障字典的方法和进行故障诊断的方法也有所不同, 下面介绍其中的两种。

一、故障树分析——故障字典法

对于模拟系统而言, 各特征参量 $y_i (i=1, 2, \dots, m)$ 通常为模拟量, 若各参量的正常取值范围分别为 $y_{i,0}$, 则故障特征可定义为

$$k_i = \begin{cases} 0 & y_i \in y_{i,0} \\ 1 & y_i \notin y_{i,0} \end{cases}$$

(一) 通过故障树分析建立故障字典

故障字典反映了被测对象的故障原因与可以测量的外部特征之间的关系。为了建立这种关系, 我们很自然地会想到运用故障树分析的方法。

众所周知, 故障树是连接初始事件和顶端事件用来分析系统或设备产生某种不正常现象的原因的一种逻辑结构。故障树中的顶端事件是人们观察到的故障现象, 初始事件是不能进一步分解或不需要进一步分解的事件, 它指明了故障的原因。

建树的方法在有关故障树分析的书籍中有详细的介绍, 在此不再赘述。一旦建立了故障树, 就可以清楚地看到哪些故障原因会造成给定的故障现象, 也就是找到了函数关系

$$k_j = g_j(s_1, s_2, \dots, s_n) \quad j=1, 2, \dots, m \quad (2.2-2)$$

显然, 对式 (2.2-2) 求逆就可以得到式 (2.2-1), 从而建立故障字典。下面通过一个例子来说明这一方法。

设某系统, 顶端事件为 R 的故障树示于图 2.2-1。图中 $x_1, x_2, \dots, x_7$ 为初始事件, 表示故障原因, 顶端事件 R 为故障现象, k_1, k_2 和 k_3 为中间事件, 它们都是布尔变量 (只能取 0 或 1)。显然, 仅观察顶端事件是不足以分辨造成故障现象的原因的。如果中间事件 k_1, k_2 和 k_3 也是可观察的, 那就可以达到目的。根据图 2.2-1, 中间事件与初始事件之间的关系为

$$\begin{cases} k_1 = x_4 + x_5 + x_6 + x_7 \\ k_2 = x_2 + x_3 + x_6 + x_7 \\ k_3 = x_1 + x_3 + x_5 + x_7 \end{cases} \quad (2.2-3)$$

假设只可能发生单故障, 而且发生某种故障的系统对应一个模式类, 式 (2.2-3) 中的 x_i 相应地用 s_i 代替, 于是式 (2.2-3) 变为

$$\begin{cases} k_1 = s_4 + s_5 + s_6 + s_7 \\ k_2 = s_2 + s_3 + s_6 + s_7 \\ k_3 = s_1 + s_3 + s_5 + s_7 \end{cases} \quad (2.2-4)$$

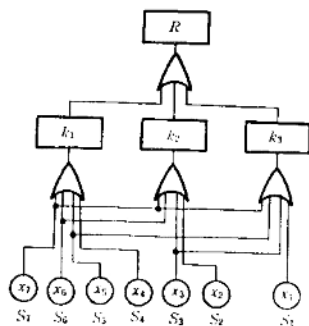


图 2.2-1 故障树

对被测系统进行故障诊断,就是要从可测量的特征 k_1 、 k_2 和 k_3 来判断故障原因,故应把模式类 s_i 表示成 k_1 、 k_2 和 k_3 的函数,即求式(2.2-4)的逆。

其实,并不需要作求逆运算。直接利用式(2.2-4)就可得到与之相应的故障字典如表 2.2-1 所示。表中每一行,相当于该系统处于某种状态 s_i 时,特征 k_1 、 k_2 和 k_3 的值,即当 s_i 为 1,而 s_l 为 0 ($l=1, 2, \dots, n, l \neq i$) 时根据式(2.2-4)求得的 k_1 、 k_2 和 k_3 的值。第 i 行第 j 列的元素为 0,表示系统出现第 i 个故障时,对第 j 个特征没有影响,第 j 个特征参数的数值仍在正常范围之内;反之,第 i 行第 j 列的元素为 1,则表示系统发生第 i 个故障时,对第 j 个特征有影响,使第 j 个特征参数超出了正常范围。

表 2.2-1

模式类 \ 特征	k_1	k_2	k_3
s_1	0	0	1
s_2	0	1	0
s_3	0	1	1
s_4	1	0	0
s_5	1	0	1
s_6	1	1	0
s_7	1	1	1

这种建立故障字典的方法适用范围较广,可用于元件级故障诊断,也可用于功能模块或可拆卸机件级的故障诊断。特别是对于复杂的大型设备或系统,当只要求将故障隔离至机件或功能模块时,用上述方法时只需要按各机件或功能模块之间的关系进行故障树分析建立故障树,然后就可以形成故障字典,而不必对各个机件或功能模块的内部工作情况作深入的分析研究,因而大大减小了工作量。

(二) 检测点的有效性

为了测量特征参量,必须选择检测点。在图 2.2-1 所示的例子中,我们选了三个检测点,并形成了故障字典。通过检查故障字典,可检验检测点的有效性,提供增减和改变检测点的要求,其原则是:

1. n 个行向量中的任何一个行向量都不应为零向量。否则,表示所选定的检测点不能检测该行所对应的故障。此时有两种处理方法,若此故障发生的概率很小或无关紧要,则可不予考虑;相反,则应增加检测点。

2. 若两个或数个行向量完全相同,表示用选定的检测点不能分辨这些故障。如果必须加以分辨,则应改变或增加检测点。

3. m 个列向量中,某列全为零或全为 1,表明这一特征与所有故障的发生均无关或均有关,不能提供故障定位的信息(注意,后一种情况提供了故障检测的信息),从故障定位的需要而言,该检测点是多余的。

4. 某两个列向量完全相同,表明这两个检测点是等效的,其中的一个并未获得更多的故障信息,可以去掉。更一般地说, j 个列向量应是线性无关的。

m 个检测点可测量 m 个特征参量,每个特征只能取 0 或 1 两个值,其最大组合数为 2^m ,即它最多只能分辨 $n=2^m$ 个故障状态。所以,当用故障字典法诊断故障时,若可能发生 n 种故障,必须使

$$2^m > n$$

$$m > \text{int} \left[\frac{L_s n}{L_a 2} \right] \quad (2.2-5)$$

式中 int 表示取整数。

这就是说，必须选择足够多的检测点，检测点数目最少应满足式 (2.2-5) 的关系。实际上，只有当故障和特征之间满足图 2.2-1 所示的类似编码器的关系时，才能用 m 个检测点隔离 2^m 个故障。而真实系统的故障树很少有这样的逻辑关系，故通常检测点的数目总是大于式 (2.2-5) 确定的数值。

(三) 用故障字典进行诊断

用故障字典进行诊断的步骤是

1. 测量特征参量 $y_1, y_2, \dots, y_n$
2. 形成特征

形成特征就是根据预先确定的各特征参量 y_i 的正常取值范围 y_{ia} ，按下式求出特征值

$$k_i = \begin{cases} 0 & y_i \in y_{ia} \\ 1 & y_i \notin y_{ia} \end{cases}$$

并据以组成特征向量 $k = (k_1, k_2, \dots, k_n)$ 。

3. 查阅字典

把实际测量到的特征向量 k ，与故障字典中的行向量逐一比较，若与第 i 行相符，则可断定系统发生了第 i 个故障；否则继续检索。如果整个字典查阅完毕无一相符，则认为被测系统正常。

(四) 诊断树法

诊断树法按故障与特征之间的关系，根据测得的特征参数顺序进行判断，最后找到故障部位。若某系统的故障与特征之间的关系如图 2.2-1 与表 2.2-1 所示，则其诊断树可画成图 2.2-2 的形式。

由图 2.2-2 可见，用诊断树法可每测量一个特征参量进行一次判断，一旦找到故障，诊断过程即告结束。判断特征值可用特征参量直接与其正常取值范围比较决定，不必预先形成特征值。当一些故障只与少数特征有关时，诊断过程完成较快，从而缩短了诊断时间。

例 2.2-1 飞机直流电源故障诊断举例

单台发电机直流电源系统原理图如图 2.2-3(a)。此系统的典型故障有：供电电压超过稳态电压极限、电压不稳定和发电机不供电等。前两种故障可根据汇流条电压判断，故障原因较明显，不需详加分析，而引起发电机不供电故障的因素较多，如反流断路器不工作，反流断路器控制电路有故障（即发电机电门电路有故障），发电机本身有故障，发电机激磁绕组电路断路或炭片电压调节器炭柱电路断路等。如果把包含一个故障原因的电源系统划为一个模式类，并且不区分反流断路器不接通是由于它本身的故障造成的还是由于它的控制电路故障造成的，则该系统可划为四个模式类 s_1, s_2, s_3 和 s_4 ，此外 s_0 表示系统正常供电，如图 2.2-3(b)。

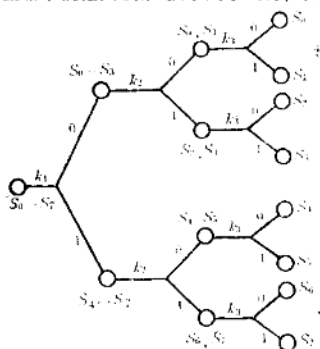


图 2.2-2 诊断树

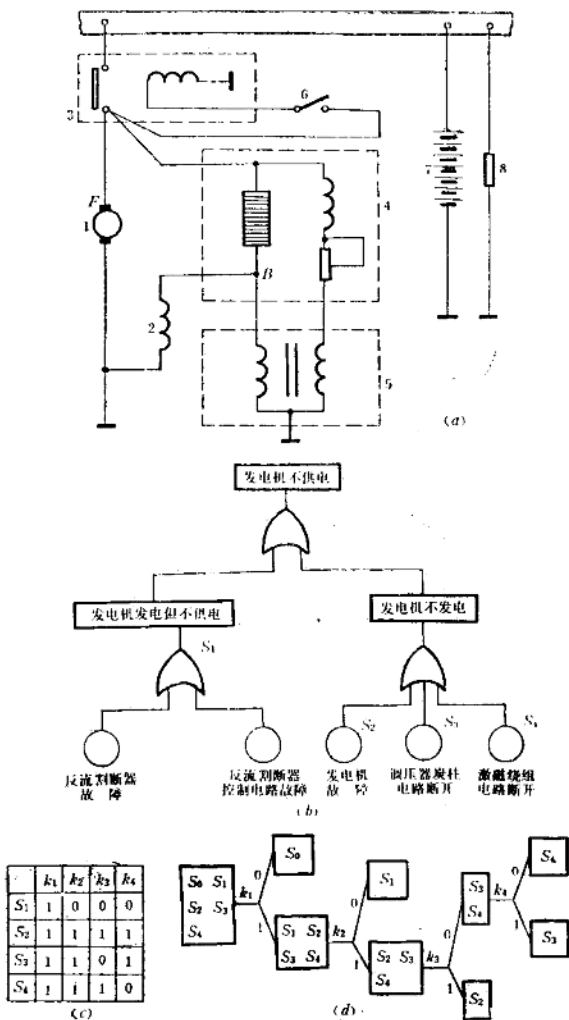


图 2.2-3 单发直流电源系统不供电故障的诊断

(a) 电源系统简化原理图

1. 发电机 2. 发电机励磁绕组 3. 反流断路器 4. 炭片式电压调节器
5. 稳定变压器 6. 发电机电门 7. 航空蓄电池 8. 用电设备

(b) 电源系统故障树 (c) 故障字典 (d) 诊断树

如果只要判断电源系统是否供电,则只需测量汇流条电压。若还要进一步判定故障部位,则应取得更多的故障信息,故需增加检测点 F 和 B 。

发电机正常供电时,汇流条电压的正常取值范围为 $U_{1d}(27\sim 29.7V)$;发电机正常发电时,发电机电压 U_F 的正常取值范围为 $U_{2d}(27\sim 29.7V)$;发电机因激磁电路故障而不能发电,但发电机本身良好时,发电机端应有剩磁电压, U_F 的正常取值范围为 U_{3d} (大于 $0.5V$);发电机与电压调节器正常,仅激磁绕组故障时, B 点电压 U_n 的正常取值范围为 U_{4d} (大于 $0.5V$)。

令特征 k_1 表示汇流条是否由发电机正常供电,特征 k_2 表示发电机是否正常发电,特征 k_3 表示发电机本身是否正常(根据电压 U_F 判断),特征 k_4 表示电压调节器是否正常(根据电压 U_n 判断),则各特征的值由下式决定

$$k_i = \begin{cases} 0 & U_i \in U_{id} \\ 1 & U_i \notin U_{id} \end{cases} \quad i=1,2,3,4$$

根据图 2.2-3(b) 的故障树,可以得到各特征与模式类之间的关系为

$$\begin{cases} k_1 = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 \\ k_2 = s_2 + s_3 + s_4 \\ k_3 = s_2 \\ k_4 = s_4 \end{cases}$$

逐次令 $s_i=1$, 而 $s_j=0$, $i=1, 2, 3, 4$, 但 $i \neq j$, 按上面的公式求出 k_1, k_2, k_3 和 k_4 的值分别填写在四行中,可以得到图 2.2-3(c) 所示的表格,这就是直流电源系统的故障字典。

当实际测量到一组汇流条电压、发电机电压 U_F 和激磁绕组电压 U_n 时,如果用故障字典法进行故障诊断,首先要把测量到的电压值与其正常取值范围比较确定各个特征 k_i ($i=1, 2, 3, 4$) 的值,即形成特征,然后查阅图 2.2-3(c) 所示的故障字典,以判定故障部位。

根据飞机直流电源系统故障原因与可测量特征之间的关系,可画出该系统的诊断树如图 2.2-3(d) 所示。若按诊断树进行故障诊断,首先按测量到的汇流条电压判断发电机是否向汇流条供电,若供电, $k_1=0$,表明系统正常;否则, $k_1=1$,说明存在发电机不供电故障。第二步判断发电机发电是否正常,若发电正常, $k_2=0$,说明不供电是由反流断路器或其控制电路的故障造成的,但不能分辨究竟是其中的哪一个原因,诊断过程至此可以结束。若发电不正常, $k_2=1$,则需进入第三步,判断发电机本身是否正常,若发电机端没有剩磁电压, $k_3=1$,说明发电机有故障,诊断过程也可就此结束。若发电机端有剩磁电压, $k_3=0$,表明发电机本身正常,发电机不能发电是由激磁电路故障造成的,于是需作第四步判断,若激磁绕组端没有剩磁电压, $k_4=1$,可以断定炭片调压器炭柱电路断路;若激磁绕组端有剩磁电压,则必定是激磁绕组有故障。

用诊断树法进行故障诊断时,所需要的数据,例如上面所说的汇流条电压、发电机电压 U_F 和激磁绕组电压 U_n ,可以一次集中采集,也可按诊断过程的需要,每次采集一个数据,判断一次。从这个例子可以看到,按诊断树法进行故障诊断时,对不同的故障,所需的诊断步骤的数目是不同的,对有些故障,很快就可以得到诊断结果。

在本例中,存在一个由反流断路器本身发生故障和它的控制电路发生故障构成的故障等效组,如果要求更高的故障分辨力,对这两者进一步加以区分,则需增加检测点。

二、故障模拟——故障字典法

对一般模拟电路,若只需诊断其内部发生故障的元件(通常指发生了硬故障),而不需计算元件参数的偏差时,也可以采用故障字典法。这种方法又称为测试前模拟法 SBT (Simulation Before Test)。

(一) 通过故障模拟建立故障字典

通过故障模拟建立故障字典的过程示于图 2.2-4。

1. 给出以下数据并输入计算机

(1) 电路描述 电路描述包括网络的拓扑结构、元件的类型和元件参数的标称值。

(2) 故障定义 故障定义就是规定需要诊断电路的哪些故障。

(3) 初步选择检测点和激励信号 所选的检测点应该是可达节点,而且这些点上的响应信号对内部故障最为敏感。激励信号不一定是电路正常工作时的输入信号,也不一定要加在输入端上,而应尽量使电路中的元件经历各种状态。

2. 故障模拟

故障模拟时,先用故障模拟程序算出元件参数为标称值时的节点电压,然后分别计算发生故障情况下每个节点的电压。

故障模拟是在测试前进行的,是建立故障字典的必要准备。

3. 故障检测与故障隔离算法

(1) 故障检测算法 只有当故障状态下被测电路的节点电压与正常情况下的节点电压之差足够大时,该故障才是可检测的。故障可检测的数量界限为

$$\sum_{k=1}^n (v_{k0} - v_{ki})^2 \geq n(\Delta V)^2$$

其中 v_{k0} 为正常电路第 k 个节点的电压

v_{ki} 为发生了第 i 种故障时,电路第 k 个节点的电压

n 为电路的节点数

ΔV 为一常数,其数值与电路性质有关,可根据计算或经验确定。例如,对包含晶体管的电路, ΔV 可定为 0.7V,因为某个节点电压 0.7V 的变化就可能改变晶体管的导通或截止状态。

(2) 形成故障模拟集 在模拟电路中,节点电压为模拟量。即使在电路正常的情况下,由于实际电路的元件参数存在容差,节点电压也有一定的变化范围。当电路发生故障时,各节点的电压同样也有一定的变化范围。若电路正常时某个节点的电压与电路发生故障时同

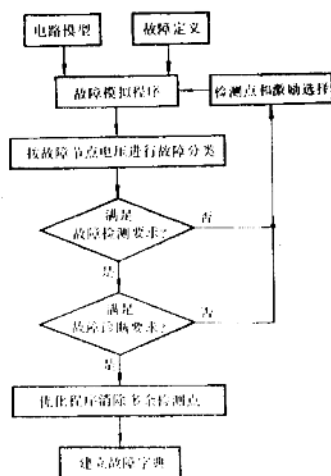


图 2.2-4 建立故障字典的过程