

高等学校测控技术专业规划教材

测控系统故障检测与诊断

陈春俊 王雪梅 李艳萍 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书系统地介绍了测控系统故障检测与诊断的基本理论及工程应用。主要内容包括：测控系统的可靠性分析、测控系统故障模型化和参数化方法、测控系统的故障树诊断方法、基于信号分析的故障诊断方法、测控系统常用传感器故障检测与诊断方法、测控系统常用执行器故障检测与诊断方法、摆式列车测控系统的故障诊断实例分析。

本书可供高等工科院校测控技术与仪器、自动化、精密机械和机电一体化专业的学生使用，同时也可供从事测控技术、自动控制的研究、使用、调试和维修的工程技术人员学习和参考。

前 言

现代测控技术在国民经济和军事领域有着广泛而深入的应用，测控系统的功能越来越强大，同时系统的结构更加复杂，系统投资成本也更高。因此，对测控系统的可靠性、可维护性要求越来越高，测控系统的故障检测与诊断技术是提高系统可靠性和可维护性的重要手段。

本书总结了编著者长期的教学经验与科研工作成果，荟萃了现有故障诊断、机电设备故障诊断、控制系统的故障诊断和容错控制、控制系统的故障检测与诊断技术等理论与成果，针对“测控技术与仪器”本科生所开设先修课程的情况，在学生掌握测控系统故障检测与诊断基础理论、技术与方法的基础上，重点培养学生以系统论的观点进行故障检测与诊断和解决实际问题的能力。同时力图做到概念清楚，对故障诊断的基础理论和方法进行了系统阐述、对现代故障检测与诊断技术新成果也概括性地进行了简述。以便于学生在掌握故障检测与诊断基础理论的同时，对故障检测与诊断所取得的最新成果和发展方向有一定程度的了解。

全书共分为 11 章。第 1 章为绪论，主要介绍测控系统的基本组成、测控系统故障检测与诊断的重要性、测控系统故障检测与诊断的主要内容。第 2 章为测控系统的可靠性分析，主要阐述可靠性的含义、可靠性模型以及提高可靠性的主要方法。第 3 章为测控系统的模型化和参数化，介绍测控系统的故障模型、故障的可检测性和参数估计方法。第 4 章为故障树分析与诊断方法，阐述故障树的建造、故障树的定性分析和定量分析方法。第 5、6、7、8 章为故障诊断中的信号处理方法，分别介绍了相关分析法、时间序列分析法、小波分析法和神经网络分析方法。第 9 章为常用传感器及其故障检测，主要对温度、流量和压力过程控制中的传感器进行了原理简介和故障检测与诊断。第 10 章为测控系统执行器故障检测与诊断。在简要介绍对气动执行器和电动执行器原理的基础上，对执行器典型故障进行了分析。第 11 章为摆式列车倾摆测控系统故障诊断分析，在介绍了摆式列车测控系统组成原理的基础上，对摆式列车测控系统故障诊断进行了研究。

本书是在高品贤教授所编《机电设备运行工况监测及故障诊断》讲义的基础上编写的。由陈春俊教授（博士）提出编写提纲，并完成了第 1、2、3、4、10 章的编写；王雪梅副教授（博士）撰写了第 6、7、8、11 章，李艳萍博士编写了第 5、9 章。在本书的编写过程中，得到了西南交通大学高品贤教授的关心和支持，高教授对本书的结构、内容安排提出了大量的宝贵意见。同时西南交通大学教务处和西南交通大学“211 出版基金”资助了本书的出版，在此一并表示感谢。

由于作者水平所限，书中错误在所难免，恳请各位读者批评指正。

编著者

2008 年 7 月

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

第1章 绪论

1.1 测控系统的基本组成

人类在认识自然和改造自然的过程中，一方面要采用各种方法获得反映客观事物或对象运动属性的各种数据、记录并进行必要的处理，这一任务称为“测量”；另一方面采用各种方法支配或约束某一客观事物或对象，以达到希望的目的，这一任务称为“控制”。“测量”和“控制”是人类认识自然和改造自然的两项工作任务。在“测量”过程中，使用的工具或装置称为测量仪器或检测仪表。由测量仪器、辅助装置和被测对象构成了“检测系统”。在“控制”过程中，使用的工具或装置称为控制仪器或调节仪表。由检测仪表、控制仪表、执行机构和被控对象构成了“控制系统”。当测量项目中某部分与完成控制的目的无关时，这类控制系统称为“测控系统”。

传统的测控系统主要由“测控电路”组成，所具备的功能不仅少，而且比较弱。随着计算机技术的迅速发展，传统的测控系统发生了根本变革，计算机成为了测控系统的主体和核心，代替了传统测控系统的模拟电子线路，从而形成了现代测控系统。现代测控系统是集测量和控制为一体的综合系统，目的是实现生产过程的自动化，它由硬件和软件两大部分组成。

1.1.1 硬件组成

硬件一般由被测控对象（生产设备或生产过程）、过程通道、计算机及人机交互设备等部分组成，如图1-1所示。

1. 测控对象

测控对象是指所要检测和控制的生产设备或生产过程。如飞机的姿态控制系统中的测控对象为飞机，锅炉温度控制系统中的测控对象为锅炉，高速列车运行舒适度控制系统中的测控对象为高速列车车体。

测控对象可按照其组成元件或子系统的线性性分为线性对象和非线性对象。

2. 计算机

计算机是测控系统的核心，其主要任务是进行数据采集、数据处理、逻辑判断、控制量计算、越限报警等。同时，计算机还通过接口电路向系统的各个部分发出各种控制命令，指

挥整个测控系统有条不紊地工作。考虑到实时控制的特点，选择计算机时应注意其数据存取速度及运算速度，应满足在一个采样周期内能完成数据采集、处理、运算及将输出量输出到执行机构等功能。其信息处理能力要与测控系统的动态性能相适应。

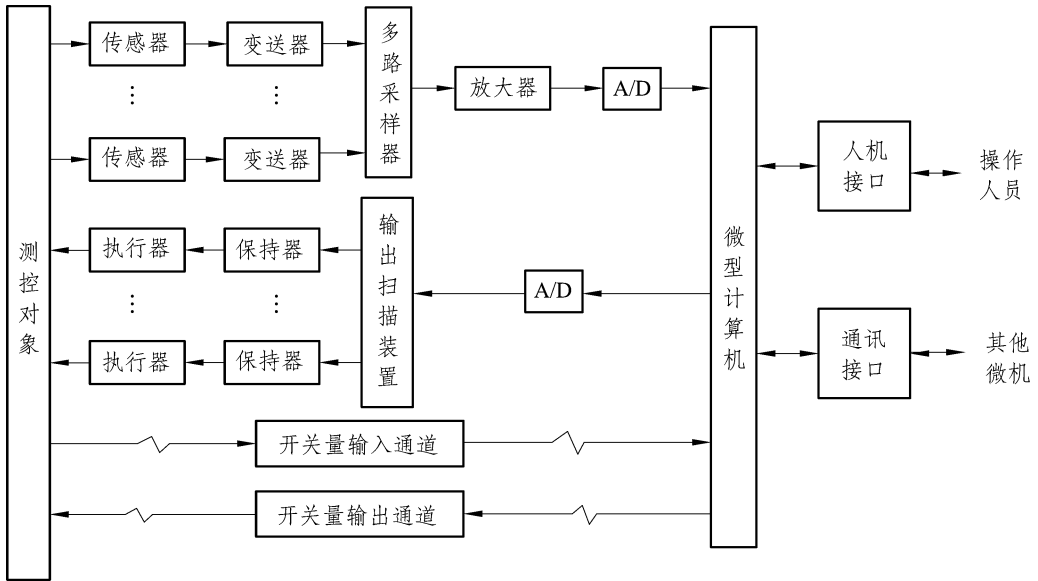


图 1-1 测控系统的硬件组成

3. 过程通道

过程通道是计算机和被测控对象之间交换信息的桥梁，通常由模拟量输入/输出通道、开关量输入/输出通道等几部分组成。

1) 模拟量输入通道

它用来将被测控对象的模拟量参数转变为数字信号并送往计算机处理。它由传感器、变送器、多路开关和模数转换器等组成。

传感器用来对被测参数和控制参数的值进行检测，并将其转换为电信号。

变送器用来将传感器得到的电信号转换为统一的直流电流（0~10 mA 或 4~20 mA）或直流电压（0~5 V 或 1~5 V）信号。

多路采样器亦称多路开关或多路转换器，它用于对多路模拟信号进行分时切换，即将时间上连续的模拟信号转换为时间上离散的模拟信号。

模数（A/D）转换器用于将时间上离散的模拟信号转换成时间上离散的数字信号，并送入计算机中处理。为减小被采集的参数值随时间变化对 A/D 转换器精度的影响，可在多路采样器之后接采样保持器。

2) 模拟量输出通道

执行器是控制系统中的重要部件，执行器根据调节器的控制信号，改变生产过程的预定参数。目前工业生产中使用的执行器，其控制信号基本上是模拟的电压或电流信号。计算机输出的控制量必须经过 D/A 转换器转换为模拟信号后，方能控制执行器（或称执行机构）。当控制多个回路时，还需要使用多路输出装置进行切换。由于经 D/A 转换的控制量在时间

上是离散的，而执行机构的控制信号是连续的模拟信号，所以多路输出的信号都采用输出保持器加以保持后再去控制执行机构。

执行器按照采用的动力方式可以分为电动执行器、气动执行器和液压执行器大大类。电动执行器的输入有连续和断续信号两种。连续信号为 $0\sim 10\text{ mA}$ 或 $4\sim 20\text{ mA}$ ；断续信号指开关信号。气动执行器的输入信号为 $0.2\sim 1\text{ kgf/cm}^2$ 。对于气动和液压执行器，尚需电-气或电-液转换装置。

3) 开关量输入通道

它用于将生产现场的各种继电器、限位开关等二位状态输入计算机。

4) 开关量输出通道

控制系统中继电器、接触器的闭合或断开，电机的启动或停止，报警信号的通或断，都通过计算的开关量输出来控制。完成这些功能的部件构成了开关量通道。

4. 人机交互设备

在计算机测控系统中，一般使用人机交互设备作终端装置，以便操作人员能和计算机系统“对话”。它使操作人员能及时了解生产、加工过程的状态，进行必要的人工干预，修改参数或紧急处理某些事件。人机交互设备包括电源开关、键盘、显示设备、打印记录设备等。

5. 通信接口

通信接口的功能是为测控系统实现分布式测控、远程测控、数据共享等功能。计算机网络的通信有两种方式，即并行通信和串行通信。并行通信一般用于计算机内部各部件或近距离设备的通信，串行通信常用于计算机之间的通信。

1.1.2 软件部分

测控系统的软件分为系统软件和应用软件。

计算机系统软件包括操作系统和支持软件。操作系统是计算机所有软硬件资源的管理者和协调者，而监控程序则是最初级的操作系统。支持软件包括程序设计语言、编译程序等。系统软件一般由厂家提供，但对于小规模测控计算机系统（如单片机系统等），其监控程序的规模不大，则可由应用人员自行编制。

应用软件一般是由测控工程师根据需要自行编制的测控程序，也可以是软件公司编制的商业组态测控软件。在测控系统中，应用程序的优劣将对系统的调试、运行的可靠性，系统的精度和效率产生较大影响。

1.2 测控系统故障检测与诊断的意义

随着现代化生产的发展和科学技术的进步，现代测控系统的作用越来越重要，结构越来越

越复杂，自动化程度越来越高。测控系统在工业生产中起把关者和指导者的作用，它从生产现场获取各种参数，运用科学规律和系统工程的方法，综合有效地利用各种先进技术，通过学习自控手段和装备，使每个生产环节得到优化，进而保证生产规范化、提高产品质量、降低生产成本、保证安全生产。

由于测控系统在工作过程中，会受到许多无法避免的因素的影响，系统有时会现出各种故障，以致降低或失去其预定的功能，甚至造成严重的以至灾难性的事故。国内外曾经发生的各种造成大量人员伤亡和重大经济损失的恶性事故，都或多或少的与测控系统的故障有关。如 1979 年美国三里岛核电站的泄漏和 1986 年苏联切尔诺贝利核反应堆的泄漏，1985 年我国大同电厂和 1988 年我国秦岭电厂汽轮机发电机组的严重断轴毁机事件等。因此，保证测控系统的安全运行，消除事故隐患，是十分重要的问题。

测控系统的故障分为硬件故障和软件故障。

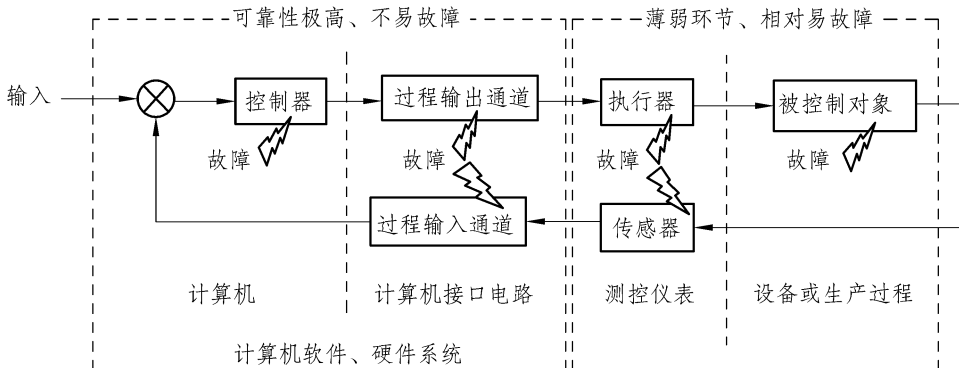
硬件故障是图 1-1 中各个环节都有可能发生的故障，具体来讲，硬件故障可分为 3 种类型：

- (1) 被测控设备的故障，如设备的某一部分不能完成原有的功能。
- (2) 测控仪器故障，包括传感器、执行器的故障。
- (3) 测控计算机的故障，包括计算机电源系统、CPU、输入/输出设备和接口电路的故障。

测控系统的软件故障主要可分为 2 种类型：

- (1) 操作系统故障。指计算机在使用过程中，由于操作系统设计上的漏洞、病毒的攻击、黑客攻击或环境因素的影响，使得操作系统不能正常运行。
- (2) 应用程序的故障。指应用程序设计上的漏洞或运行中受到病毒的破坏，失去了原有的功能。

测控系统的安全性与可靠性取决于两个方面，一是测控仪器、设备在设计与制造上各项技术指标的实现，为此设计中应采用可靠性设计方法，要有提高安全性的措施；二是设备测控系统安装、运行、管理、维修和诊断措施的实施。在现代测控系统中，由于计算机的可靠性越来越高，工控计算机对环境的要求越来越低，且计算机容错技术日趋成熟，计算机硬件与软件的可靠性已达到了较高水平。据统计，大量测控系统的失效是由传感器、执行器和被测控设备的故障引起的，如图 1-2 所示。因此，研究传感器、执行器和设备的故障诊断技术已成为保证测控系统安全可靠运行的重要手段。



此为试读, 需要完整图 1-2 测控系统各环节故障情况 ongbook.com

1.3 测控系统故障检测与诊断及容错控制的含义

1.3.1 测控系统故障检测与诊断的含义

测控系统故障检测与诊断是一门综合性的技术，它的发展涉及众多的学科。它利用了传感器技术、数理统计、模糊集理论、信号分析与处理、模式识别、人工智能、现代控制理论、计算机科学与技术等学科知识，对运行中的测控系统出现故障的机理、原因、部位和故障程度进行识别和诊断，并且根据诊断的结论，确定设备的维修方法和防范措施。

测控系统的故障检测与诊断同人类医学诊断类似，人生了病需要求医就诊，同样测控系统在运行中出现故障，也需要“医生”去帮助分析和诊断病因。人体的疾病是在内因和外因作用下产生的，通过人的各部位器官和组织能反映出一定的症状。对病人的治疗过程，先根据病人表现出的症状进行相应的理化检验，再根据检查的结果和病史，利用医学知识和经验，诊断出病人的疾病类型、性质和程度，最后采取相应的治疗措施。对于测控系统的故障诊断也是采取相应的诊治过程，首先需要采用信号检测与分析方法对测控系统正常运行信息进行特征参数提取；其次对在运行过程中表现出来或潜在的故障现象及故障位置进行分析，提取出此时的特征参数，利用专家的知识 and 经验，用一定诊断方法和手段，诊断出测控系统故障的性质、类型、部位与程度；最后提出相应的治理措施以排除故障，保证系统安全、有效地运行。

1.3.2 容错控制的含义

“容错”原是计算机系统设计中的一个概念，容错（fault - tolerance）是容忍故障的简称。容错控制（fault - tolerance control）的概念是1986年9月由美国国家科学基金会和美国电工和电子工程师学会（IEEE）控制系统学会共同在美国加利福尼亚州桑塔卡拉拉大学举行的控制界专题讨论会的报告中正式提出的。容错控制系统是一类特别的控制系统，它可适应其环境的显著变化。容错的指导思想是：一个控制系统迟早会发生故障，因此在设计控制系统时应考虑一旦发生故障（如传感器或执行器的故障），控制系统怎样来维持稳定性和可靠性。

所谓容错控制系统，就是指具有冗余能力的控制系统，即在某一部件发生故障的情况下，系统仍能按原定性能指标或可接受的略低的性能指标安全地运行。容错控制系统的一般原理结构如图1-3所示。它与传统测控系统相比增加了传感器、执行器和被控对象或设备的状态监测信息提取、故障检测与估计功能，控制器的控制算法则增加了故障时的控制策略。从目前发展看，测控系统的故障诊断与容错控制有着密切的联系。测控系统的故障诊断是容错控制的基础，容错控制反过来为测控系统故障诊断提供更大的活力，两者从根本上都是希望提高测控系统运行的可靠性。

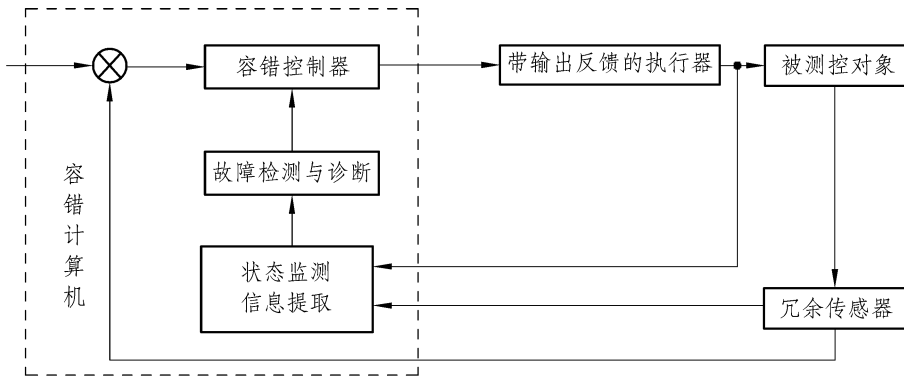


图 1-3 容错控制系统原理框图

1.4 测控系统故障检测与诊断的目的和任务

测控系统故障诊断技术是测控系统现代化管理、运行、维修的重要内容，而且也是提高产品质量的重要手段。其目的和任务有以下几个方面：

(1) 早期预报事故。测控系统的重大事故往往具有突发性，对生产和社会危害极大，因此早期预报可以得到巨大的经济效益和社会效益。

(2) 及时准确地诊断出测控系统所发生的故障及原因，不仅可以减少由于停机所造成的生产损失，而且可防止再次发生同类事故。

(3) 提高测控系统维修质量和效益。通过对测控系统的故障诊断，可以对测控系统推行“预防维修制”。目前我国采用的维修制度有两种：定期维修制（包括大修、中修和保养）和故障后修理（事后修理）。这两种维修制度都无法做到“按需修理”，而通过故障诊断，可以做到这一点。

(4) 确定复杂机器的最佳运行参数。由于故障诊断可以判断机器的功能状态，故可以确定其最佳的运行参数，充分发挥测控系统的生产潜力。

(5) 提高测控系统的设计制造水平和产品质量。由于故障诊断能找出测控系统的薄弱环节和缺陷，给设计、制造提供了依据和改进途径。

(6) 提高测控系统管理的现代化水平，建立测控系统的技术档案。

1.5 故障检测与诊断技术的发展历史概况

测控系统的故障检测与诊断，实际上自有工业生产以来就已存在。早期操作人员凭借自己的感观，对测控系统正常工作的声音、振动等状态特征的感受，依据自己工作的经验来判

断某些故障的存在，并提出修复的措施。但故障检测与诊断技术作为一门学科，则是最近 40 多年来才发展起来的。

故障检测与诊断始于（机械）设备故障诊断，其全名是状态监测与故障诊断。它包含两方面内容：一是对设备的运行状态进行监测；二是在发现异常情况后对设备的故障进行分析、诊断。设备故障诊断是随设备管理和设备维修发展起来的。欧洲各国在欧洲维修团体联盟（FENMS）推动下，主要以英国倡导的设备综合工程学（Terotechnology）为指导；美国以后勤学（Logistics）为指导；日本则吸收二者特点，提出了全员生产维修（TPM）的观点。美国自 1961 年开始执行阿波罗计划后，出现了一系列因设备故障造成的事故，1967 年在美国宇航局（NASA）倡导下，由美国海军研究室（ONR）主持成立了美国机械故障预防小组（MFPG），并积极从事技术诊断的开发。美国的诊断技术在航空、航天、军事、核能等尖端部门处于世界领先地位。英国在 20 世纪 60~70 年代，以 Collacott 为首的英国机器保健和状态监测协会（MHMG&CMA）最先开始研究故障诊断技术。英国在摩擦磨损、汽车和飞机发电机监测和诊断方面具有领先地位。日本的新日铁自 1971 年开发诊断技术以来，1976 年达到了实用化。日本的诊断技术在钢铁、化工和铁路等部门处于领先地位。

1971 年美国麻省理工学院的 Beard 博士首先提出了用解析冗余代替硬件冗余，通过系统自组织使系统闭环稳定，通过比较器的输出得到系统故障信息的思想，标志着故障检测与诊断这门技术的开端。经过 40 多年的发展，控制系统（传感器、执行器和设备）的故障诊断技术得到了深入、广泛的研究，取得了许多可行的方法。随着传感器技术、现代控制理论、现代信号分析与处理、模式识别技术等的发展，故障诊断基础学科的不断发展和完善，测控系统故障诊断技术将迎来新的发展高峰，为国民生产、生活带来更多的经济和社会效益。

我国在故障诊断技术方面起步较晚，1979 年才初步接触设备诊断技术。目前我国诊断技术在化工、冶金、电力等行业应用较好。我国的故障诊断技术经过 30 多年的研究与发展，已应用于航空、航天、电力、石油化工、机械制造等领域。

1.6 故障检测与诊断的主要理论和技术发展趋势

1.6.1 故障检测与诊断的主要理论和方法

故障检测与诊断技术作为一门综合性新学科，涉及面很广、内容繁多，从不同的角度出发有多种故障诊断分类方法，这些方法各有特点。从学科整体可归纳以下理论和方法：

（1）基于机理研究的诊断理论和方法。从动力学角度出发研究故障原因及其状态效应，针对不同机械设备进行的故障敏感参数及特征提取是其重点。

（2）基于信号处理及特征提取的故障诊断方法。主要有时域特征参数及波形特征诊断法、时差域特征法、幅值域特征法、信息特征法、频谱分析及频谱特征再分析法、时间序列特征提取法、滤波及自适应除噪法等。

（3）模糊诊断理论和方法。模糊诊断是根据模糊集合论征兆空间与故障状态空间的某种映射关系，由征兆来诊断故障的。

(4) 振动信号诊断方法。该方法研究较早,理论和方法较多且比较完善。它是依据设备运行或激振时的振动信息,通过某种信息处理和特征提取方法来进行故障诊断的。

(5) 故障树分析诊断方法。这是一种图形演绎法,它把系统故障与导致该故障的各种因素形象地绘成故障图表,能较直观地反映故障、元部件、系统及因素、原因之间的相互关系,也能定量计算故障程度、概率、原因等。

(6) 故障诊断灰色系统理论和方法。该方法是从系统的角度来研究信息的关系,即利用已知的诊断信息去揭示未知的诊断信息,它有自学习和预测功能。它利用灰色系统的建模(灰色模型)、预测和灰色关联分析等方法进行故障诊断。

(7) 故障诊断专家系统理论和方法。该方法是近年来故障诊断领域最显著的成就之一。它的内容包括诊断知识的表达、诊断推理方法、不确定性推理以及诊断知识的获取等。

(8) 故障模式识别方法。该方法是一种十分有效的静态故障诊断方法,它以已有 30 年发展历史的模式识别技术为基础,关键是对故障模式特征量的选取和提取。现已发展出多种模式分类器,如线性分类器、Bayes 分类器、最近邻分类器等。该方法的诊断效果在很大程度上依赖于状态特征参数的提取、样本的数目、典型性和故障模式的类别、训练和分类算法等。其未来研究应注重新聚类算法、自动学习识别方法及与 ANN 相结合。

(9) 计算机数字图像识别法。计算机图像处理技术是跨学科的前沿技术,应用范围十分广泛,由于图像提供的是二维信号,有很强的直观感,易于识别、便于远距离传输,近年来在故障诊断中得到了广泛应用。

(10) 故障诊断神经网络理论和方法。神经网络应用于故障诊断是其最成功的应用之一。由于神经网络具有原则上容错、结构拓扑鲁棒、联想、推测、记忆、自适应、自学习、并行和处理复杂模式的功能,使其在工程实际存在着大量的多故障、多过程、突发性故障、庞大复杂机器和系统的监测及诊断中发挥出较大的作用。在众多的神经网络中,尤其以基于 BP 算法的多层感知器(MLP)神经网络理论最坚实,应用最广泛且最成功。神经网络故障诊断方法易实现对非线性系统的故障诊断。

(11) 基于数学模型的故障诊断理论和方法。该方法是以现代控制理论和现代优化方法为指导,以系统的数学模型为基础,利用观测器(组)、等价空间方程、Kalman 滤波器、参数模型估计和辨识等方法产生残差,然后基于某种准则或阈值对该残差进行评价和决策。基于数学模型的故障诊断方法能与控制系统紧密结合,是监控、容错控制、系统修复和重构的前提。

故障诊断理论和方法分类虽然很多,但总的来说可归纳为两类:一类为基于非模型的故障诊断理论和方法,如信号空间特征、模态和信息处理方法的诊断理论与方法;基于知识推理、人工智能、专家系统的诊断方法;基于模式识别和神经网络的诊断方法。另一类为基于系统数学模型和现代控制理论、方法的故障诊断理论和方法,也包括相互间的结合和集成。

1.6.2 诊断技术的研究现状与发展趋势

1. 诊断技术的主要研究方向

目前我国诊断技术的研究主要集中在 5 个方面:传感技术的研究,关于信号分析与处理

技术的研究，关于人工智能与专家系统的研究，关于神经网络的研究以及关于诊断系统的开发与研究，还包括诊断仪器仪表的研究。

2. 诊断技术的发展趋势

从诊断技术的发展趋势来看，将面向从单纯监测、诊断向监测、诊断、管理、调度的集成化方向发展；由开环控制向闭环控制方向发展；从简单诊断向智能化方向（专家系统、神经网络）发展。

1.7 现代故障检测与诊断的主要内容

现代故障诊断包括4方面的内容：故障建模或特征参数提取、故障检测、故障诊断与估计、故障修复与容错控制，如图1-4所示。

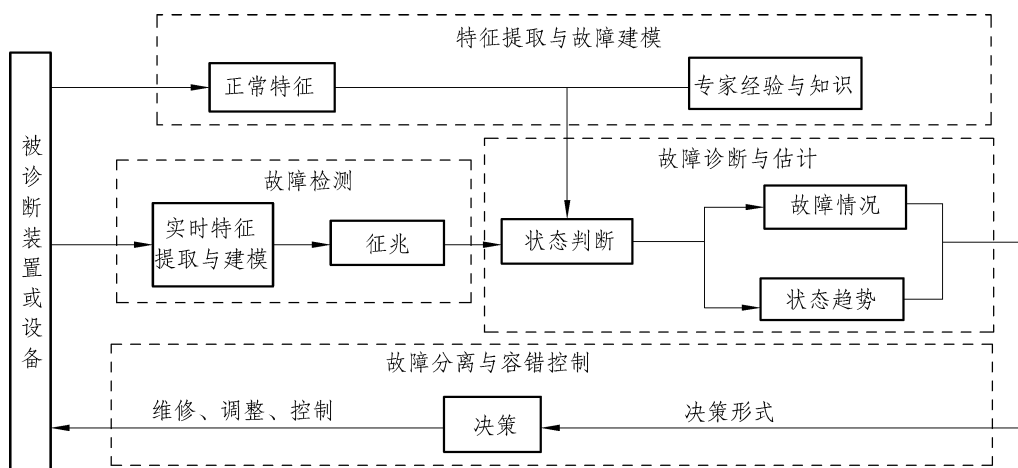


图 1-4 设备诊断过程框图

1. 故障建模或特征参数提取

按照检验信息和输入输出关系，建立系统故障的数学模型作为故障检测与诊断的依据，或者提取系统正常运行的特征参数。

2. 故障检测

在进行故障检测之前，需做以下假设：系统中的故障导致系统参数有变化，如故障使输出变量、状态变量、残差变量等其中之一或多个有变化。这是所有故障诊断方法都必须遵守的假设条件。故障检测是指确定系统是否发生故障的过程，即对一非正常状态的检测过程。

从可测或不可测的估计变量中，判断运行的系统是否发生故障。

3. 故障诊断与估计

故障诊断指根据残差方向和结构来分离出故障源的部位（即区别出故障原因是执行器、传感器还是设备），判断故障的种类，进行评价与决策的过程。故障分类是将故障按其严重程度进行分类，以便采取相应措施。故障的评价和决策是指根据故障的类别、严重程度，决定是否采取修复、补救、隔离或改变控制率等措施，以防止故障的影响和传播，预防灾难事故的发生。

4. 故障修复或容错控制

故障修复或容错控制是指根据故障诊断结论，改变控制率或控制重构或是系统重构，使整个系统在故障发生的情况下，保持稳定并改善系统性能。故障修复是自主系统和智能系统的重要环节。故障修复把故障状态检测和故障诊断与自动控制紧密联系起来，使故障诊断具有更深远的意义和广阔的应用前景。故障修复理论和方法将是目前和将来的研究方向。

故障诊断系统的性能包括及时性、敏感性、鲁棒性、误报率、漏报率等。

1.8 测控系统运行故障检测与诊断系统实例

在建筑生产、工厂货运等物料搬运过程中，都需要使用缆车、卷扬机、吊车、天车等如图 1-5 所示的物料搬运系统。该测控系统的工作原理为：测控系统是通过设置物料的提升高度，计算机通过光电正交编码器对伺服电动机旋转的角位移反馈，算出物料的提升高度是否达到要求，若不满足要求，则进行控制，直到达到需要高度为止。但由于长期使用过程中，因钢丝与驱动轮间存在摩擦磨损，有时会导致钢丝折断，若钢丝缆绳出现故障，将导致重大事故发生。所以对于重要的钢丝缆绳，一般均安有监测装置。图 1-5 (a) 所示系统中，除了检测和控制物料高度外，还对钢丝缆绳磨损程度进行检测与诊断。该装置由磁化线圈、检测线圈（磁电式传感器）、放大器、脉冲计数器、虚拟示波器等部分组成。其工作原理为：钢丝缆绳通过磁化线圈时被磁化，当钢丝缆绳中有断裂的钢丝时，将引起其截面积发生突然变化，从而在检测线圈中产生感应电势。这实际上是一种铁芯运动的变压器，其输出信号经滤波、放大器放大后为一脉冲信号。这一脉冲信号的幅度与钢丝断裂股数的多少成比例，即与铁芯截面积成比例。因此，通过是否存在脉冲以及脉冲的幅度，可以判别钢丝缆绳是否存在故障以及故障的程度，如果同时检测反映钢丝缆绳位置的长度信号，则还可以确定故障发生的位置，如图 1-5 (b) 所示。

上述情况是一种十分简单的故障，实际情况往往要复杂些。其原因是钢丝缆绳在没有折断的现象时，其截面积也不是处处相等的，加上钢丝上常常含有一些金属粉末或金属屑，也

会引起截面积变化。所以经放大器得到的信号并不是一条直线，会有波动和脉冲，这给识别工作带来一定困难。另外，我们希望钢丝在折断前就能预测出来，而不是在折断后（这种可能性是存在的，因为钢丝在折断之前截面积将逐渐变小），这样可以将事故消灭在发生之前。

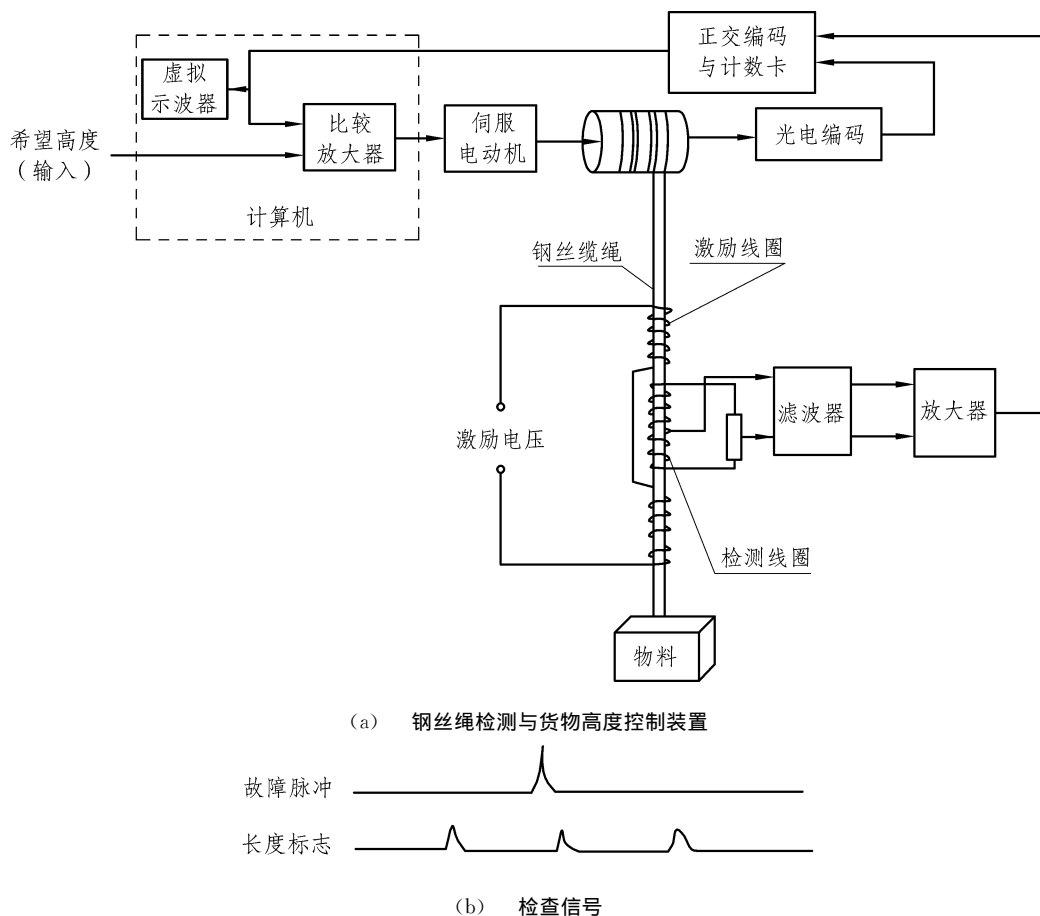


图 1-5 货物提升控制系统中，钢丝绳故障检测与诊断装置

这样就使故障诊断工作变得复杂起来。在实际诊断中，我们常常用一根良好的钢丝绳让其通过磁化线圈，测录其动态信号并进行统计分析，即将一系列动态信号组成时间序列 $\{X_t\}$ ，建立一个数学模型（时序模型），如 AR 模型，ARMA 模型和 GR 模型等。这种由良好钢丝绳建立的模型称为“参考模型”（或基准模型）。然后，将被监测的钢丝绳上所测录的信号，按同一方式建立模型，这种模型称为“待检模型”。将“待检模型”与“标准模型”进行比较，或者说判别“待检模型”是否属于“标准模型”（即是否是一个类型）。如果是，则说明运行中的钢丝绳是良好的；如果不是，则说明运行中的钢丝绳存在故障，这一过程就是故障诊断。如果将各种不同故障的钢丝绳也一一建立标准模型，则通过待检模型与标准模型还可以诊断出故障的类型。这只是一种故障诊断方法，在钢丝绳故障诊断中，还有许多其他方法，如非线性概率分类法等。

在钢丝绳运行中，不断地测录信号，定时建立“待检模型”并与“标准模型”比较，就可以了解钢丝绳在整个运行过程中的情况，这就是运行状态监测。

1.9 本课程的特点和学习方法

作为测控技术及仪器专业的学生，在学习完模拟电路、数字电路、传感器原理与应用、测控电路及装置、计算机原理与应用、自动控制原理、自动检测技术及精密测控与系统等先修课程之后，学生已掌握了测控系统的基本组成、能对测控系统工作原理进行分析、掌握了测控系统的设计方法和设计过程。

顾名思义，测控系统的故障诊断是对测控系统的传感器、执行器及被测控对象或设备是否正常工作的监测、故障诊断和处理过程。因此，本课程是一门综合性较强的专业课程。通过本课程的学习，要求测控技术及仪器专业的学生掌握：如何应用自动检测技术、人工智能与模式识别技术、现代信号分析与处理技术及先进控制理论知识，对测控系统的各主要环节（传感器、执行器、被测控设备）进行故障建模与特征参数提取、故障检测、故障诊断与估计、故障分离与容错控制等基础知识，以及测控系统故障诊断系统的设计与实现方法。

因此，这就要求学生在学习过程中，将已学的一门门专业基础课程和专业课程知识串通起来，用系统论的观点对测控系统各环节进行故障检测与诊断，课后进行归纳总结，充分利用网络资源来了解测控系统的现状和最新成就。

习 题

- 1.1 举例说明测控系统的基本组成，并简要分析基本工作原理。
- 1.2 简述测控系统故障诊断的必要性。
- 1.3 分析图 1-6 所示恒温控制系统，当出现加热丝不能正常工作时可能出现的故障。

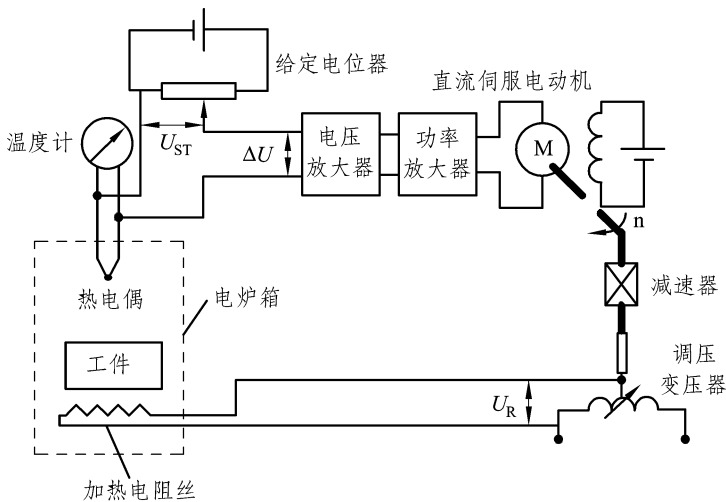


图 1-6 恒温控制系统原理图

第 2 章 测控系统的可靠性分析

测控系统故障诊断是对测控系统进行失效分析的重要内容，习惯上将运行中系统的失效分析称为故障诊断，此时系统并未完全失效；而失效分析一般是指研究系统潜在的或显示的失效机理、失效概率及失效所带来的影响等，是可靠性设计的重要组成部分。失效分析主要包括确定失效模式和效应分析以及故障树分析，它主要用来对系统可靠性作定性分析。从分析系统的薄弱环节入手，搞清楚各元部件失效和系统失效之间的逻辑关系，进而计算系统的失效概率，为系统可靠性预计和分析提供更有效的数据，并提出正确合理的修改设计方案和维修策略。

失效模式和效应分析是从元器件失效模式分析开始，采用“自下而上”的方法对系统可靠性与安全性进行分析，也就是采用所谓“逻辑归纳法”对系统可靠性进行分析的。故障树分析法则采用“从上而下”的逻辑演绎法来分析系统与各单元、元器件之间的失效关系。通常失效模式及效应分析与故障树分析配合进行，且在系统方案论证及设计阶段都要求进行这一工作。本章将简述元部件的可靠性分析、独立故障系统的可靠性分析、失效模式与效应分析的思想及基本方法，这对测控系统或测控设备故障诊断是十分重要的。

2.1 可靠性与失效性基本含义

2.1.1 可靠性基本含义

测控系统一般是由传感器、执行器、计算机及外围接口设备、被控对象或设备这 4 大部分组成。而这 4 大部又划分为元件、部件、子系统、系统 4 个层次，其中元件是指部件中的最小组成单元。但在测控系统中，这种层次的划分并不是绝对的。同一种组件在不同的研究场合，其划分的层次并不同。由于集成技术的日趋发达，元件在不断部件化。为便于分析，我们将元件和部件统称为元部件。

因为测控系统的是由许多元部件组成的，所以元部件的可靠性是研究测控系统可靠性的基础。而元部件的可靠性数据通常是通过大量的可靠性试验和现场使用情况来获取的。

通常将测控系统可靠性定义为：在规定的工作条件下和规定的时间内，测控系统成功地完成规定功能的能力，它是对测控系统可靠程度的定性评价。测控系统的可靠度定义为：在规定的工作条件下和规定的时间内，测控系统成功地完成规定功能的概率，它是对测控系统

可靠性的定量评价。“工作条件”包括外界环境条件、维修条件和使用条件。“规定的时间”是一种广义的时间，它可以是小时、日、月、年之类的单位，也可因对象不同而指一些相当于时间的量，如次数、距离等。“规定的功能”由测控系统的各项性能指标来给出，如测控精度、稳定度等。

在系统执行任务期间，发生局部故障是可以容许的。不管这种故障是否在执行任务过程中被消除，只要系统能够按预定的计划完成规定的功能，我们就认为系统是可靠的。

可靠性可按生产、使用和运转的过程分为以下 3 种：

(1) 固有可靠性。它是生产商在生产过程中就已确立了的一种可靠性，它与各生产商所选用的材料、元器件、零部件、设计方案、软硬件结构、制造工艺、装配工艺等有密切关系。它是系统内在的可靠性，当测控系统一旦被制造出来，固有可靠性便已确立。

(2) 工作前可靠性。它与测控系统由生产商转给用户过程中的包装、运输、保管过程以及实际过程中的环境、操作水平、维修技术等因素有关。

(3) 工作可靠性。这是指设备在实际运转或执行任务时的可靠性。通常所说的测控系统的可靠性就是指它的工作可靠性。

测控系统的可靠度可用组成系统的元部件或设备的可靠度来表示。通常，元部件或设备的可靠度是工作环境及运行时间的函数。当工作环境是理想环境时，可靠度只是运行时间的函数。此时给定运行时间后即可由元部件及设备可靠度与系统可靠度之间的关系计算出测控系统的可靠度。

2.1.2 失效性基本含义

元部件工作失效是指元部件工作出现故障。按元部件发生故障发生的情况，可将失效分为突发失效和逐渐失效。

元部件的突发失效是指元部件在工作过程中的某一时刻突然发生的失效，如电路系统中电阻烧毁、电容器击穿、导线断裂等。突发失效的出现是偶然的，其发生时间是随机的。

元部件的逐渐失效是指元部件在工作中由于老化、磨损、损耗、疲劳等原因引起的性能逐渐退化。

在现代一次性工作的武器测控系统中，主要考虑一次成功与一次失败的概率，因此只需要讨论突然失效即可。但在现代化工业测控系统中，由于涉及产品维修与更新问题，需要判断产品失效的程度，考虑逐渐失效问题是很重要的。对于长时间工作且又不能维修的测控系统，如科学卫星之类，必须对突发失效和逐渐失效同时进行考虑。

2.2 元部件的可靠度函数及失效分析

元部件的可靠度是指在给定的环境条件下，在一定的时间内，元部件无故障工作的概率。可靠度可通过对元部件的寿命测试和现场使用情况来作出估计。下面以元部件寿命试验