



“十三五”普通高等教育本科规划教材

DIANJI SHEBEI ZHUANGTAI JIANCE YU GUZHANG ZHENDUAN

电气设备状态 监测与故障诊断

刘念 主编
刘影 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电气设备状态 监测与故障诊断

主 编 刘 念
副主编 刘 影
参 编 谢 驰 幸晋渝
 刘明丹 张有润
主 审 韩 力



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了电力系统中常用电气设备的状态监测与故障诊断技术。全书共 12 章，主要内容包括电气设备故障诊断的方法，以及汽轮发电机、水轮发电机、风力发电机组、交流电动机、电力变压器、高压断路器、高压开关柜、GIS 组合开关、输电线路、避雷器、电力电容器等电气设备的状态监测与故障诊断技术。每章后附有思考题与习题。

本书可供高等院校电气工程及其他相关电力类专业师生作为教材使用，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备状态监测与故障诊断 / 刘念主编. —北京: 中国电力出版社, 2016.1

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-8439-2

I. ①电… II. ①刘… III. ①电气设备—设备状态监测—高等学校—教材②电气设备—故障诊断—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 243171 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 1 月第一版 2016 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 277 千字

定价 25.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着电力工业的快速发展,我国电力系统已步入以超大容量机组发电、特高压交直流输电、新能源发电和智能供配电为主要特征的智能电网时代。电力能源是国家的战略能源之一,也是现代工业和国民经济发展的基础,越来越多的电气设备投入电能生产过程中,这些电气设备能否安全可靠地运行,对于国民经济建设、确保生产安全和保障人民生活水平都具有十分重要的意义。

我国将全面提高电网智能化水平,大力推进智能发电厂、智能变电站、特高压输电、新能源发电等重点领域和关键环节实现突破,并将加快智能电网创新示范工程建设。电气设备状态监测与故障诊断技术在智能电网建设中已得到了广泛应用,其具体实施是保证智能电网安全可靠运行和实现智能电网状态维修的关键之一。因此,有关电气设备状态监测与故障诊断技术已成为全国各高校电气工程专业学生必修的专业知识。

本书分为12章,第1章概括地介绍了电气设备故障诊断的常用方法及发展趋势;第2章介绍了汽轮发电机的状态监测和故障诊断技术;第3章介绍了水轮发电机的状态监测与故障诊断技术;第4章介绍了风力发电机的状态监测与故障诊断技术;第5章介绍了交流电动机的状态监测与故障诊断技术;第6章介绍了电力变压器的状态监测与故障诊断技术;第7章介绍了高压断路器的状态监测与故障诊断技术;第8章介绍了高压开关柜的状态监测与故障诊断技术;第9章介绍了GIS组合开关的状态监测与故障诊断技术;第10章介绍了输电线路状态监测与故障诊断技术;第11章介绍了避雷器的状态监测与故障诊断技术;第12章介绍了电力电容器的状态监测与故障诊断技术。

参加本书编写的有四川大学教授刘念,电子科技大学博士刘影、张有润,四川大学锦城学院谢驰,四川农业大学刘明丹和成都理工大学工程技术学院幸晋渝。全书由刘念任主编,刘影任副主编,重庆大学韩力教授担任主审。

在编写本书的过程中,参考了许多国内同行专家、学者们的研究成果及文献资料,在此一并表示感谢。

由于作者学识水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请同行和读者批评指正。

作 者

2015年5月

目 录

前言

| | |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 电气设备状态监测与故障诊断的概念与起源 | 1 |
| 1.2 电气设备故障诊断的方法 | 2 |
| 1.3 电气设备状态监测与故障诊断的发展趋势 | 11 |
| 思考题与练习题 | 12 |
| 第 2 章 汽轮发电机状态监测与故障诊断 | 13 |
| 2.1 汽轮发电机的原理与结构 | 13 |
| 2.2 汽轮发电机的状态监测 | 17 |
| 2.3 汽轮发电机故障诊断 | 30 |
| 2.4 汽轮发电机状态监测与故障诊断系统 | 32 |
| 思考题与练习题 | 35 |
| 第 3 章 水轮发电机状态监测与故障诊断 | 36 |
| 3.1 水轮发电机的原理与结构 | 36 |
| 3.2 水轮发电机的状态监测 | 47 |
| 3.3 水轮发电机故障分析 | 48 |
| 3.4 水轮发电机状态监测与故障诊断系统 | 49 |
| 思考题与练习题 | 54 |
| 第 4 章 风力发电机组状态监测与故障诊断 | 56 |
| 4.1 风力发电动力学 | 56 |
| 4.2 风力发电机组的结构 | 58 |
| 4.3 风力发电机组状态监测 | 61 |
| 4.4 风力发电机组故障分类 | 63 |
| 4.5 风力发电机组故障原因 | 64 |
| 4.6 风力发电机组状态监测与故障诊断系统 | 64 |
| 思考题与练习题 | 67 |
| 第 5 章 交流电动机状态监测与故障诊断 | 68 |
| 5.1 交流电动机的原理与结构 | 68 |
| 5.2 交流电动机状态监测 | 72 |
| 5.3 交流电动机故障信号处理方法 | 73 |
| 5.4 交流电动机的故障分析 | 74 |

| | | |
|-------------|-------------------------|------------|
| 5.5 | 交流电动机故障诊断方法 | 81 |
| 5.6 | 交流电动机状态监测与故障诊断 | 83 |
| | 思考题与练习题 | 88 |
| 第6章 | 电力变压器状态监测与故障诊断 | 89 |
| 6.1 | 电力变压器原理与结构 | 89 |
| 6.2 | 电力变压器状态监测 | 91 |
| 6.3 | 电力变压器故障分析 | 95 |
| 6.4 | 电力变压器状态监测与故障诊断系统 | 99 |
| | 思考题与练习题 | 104 |
| 第7章 | 高压断路器状态监测与故障诊断 | 105 |
| 7.1 | 高压断路器的结构与分类 | 105 |
| 7.2 | 高压断路器状态监测 | 110 |
| 7.3 | 高压断路器故障分析 | 114 |
| 7.4 | 高压断路器状态监测与故障诊断系统 | 117 |
| | 思考题与练习题 | 119 |
| 第8章 | 高压开关柜状态监测与故障诊断 | 120 |
| 8.1 | 高压开关柜的分类与结构 | 120 |
| 8.2 | 高压开关柜状态量监测 | 121 |
| 8.3 | 高压开关柜的故障分析 | 124 |
| 8.4 | 高压开关柜状态监测和故障诊断系统 | 128 |
| | 思考题与练习题 | 130 |
| 第9章 | GIS组合开关状态监测与故障诊断 | 132 |
| 9.1 | GIS组合开关的结构 | 132 |
| 9.2 | GIS组合开关状态监测 | 134 |
| 9.3 | GIS组合开关故障分析 | 136 |
| 9.4 | GIS组合开关状态监测与故障诊断系统 | 137 |
| | 思考题与练习题 | 140 |
| 第10章 | 输电线路状态监测与故障诊断 | 141 |
| 10.1 | 输电线路结构 | 141 |
| 10.2 | 绝缘子结构 | 144 |
| 10.3 | 输电线路状态监测 | 145 |
| 10.4 | 输电线路故障分析 | 149 |
| 10.5 | 输电线路状态监测与故障诊断系统 | 154 |
| | 思考题与练习题 | 159 |
| 第11章 | 避雷器的状态监测与故障诊断 | 160 |
| 11.1 | 避雷器结构 | 160 |
| 11.2 | 避雷器故障分析 | 161 |
| 11.3 | 避雷器状态监测与故障诊断系统 | 162 |
| | 思考题与练习题 | 168 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第 12 章 电力电容器状态监测与故障诊断 | 169 |
| 12.1 电力电容器结构 | 169 |
| 12.2 电力电容器状态监测 | 171 |
| 12.3 电力电容器故障分析 | 172 |
| 12.4 电力电容器状态监测与故障诊断系统 | 174 |
| 思考题与练习题 | 176 |
| 参考文献 | 177 |

第1章 概 述

1.1 电气设备状态监测与故障诊断的概念与起源

电气设备状态监测与故障诊断是一种对运行的电气设备在不拆卸、不强制停止其运行的状态下,通过各种传感器取得设备运行中的状态参数,分析设备运行状态及设备产生故障的原因,判定故障类型和故障部位,并能够预测设备故障趋势的技术。

电气设备状态监测与故障诊断技术最早发展于20世纪60年代,是由军事、航空航天的需要逐步发展起来的。早期对设备的维护主要是根据检修计划进行的,不论设备是否运行良好或有异常状态,都对其强制停机全面检测。由于这种原始拆卸检修,破坏了很多运行良好的设备原有的结构和结构间的平衡性,反而大幅度缩短了设备的使用寿命。最初的故障诊断对于有异常情况的设备,通过对设备的触摸和对声音、振动、气味、外观等主要特征进行评判,以及采用十分简单的测量仪器来确定设备是否存在故障隐患。这种检测方法不能完全准确判定设备的故障类型和故障部位。1967年,美国国家航空航天局(NASA)专门成立了设备状态监测和故障诊断技术小组,从事诊断技术的研究和应用,在故障诊断、故障机理分析、信号处理等方面取得了很多基础性的研究成果,在很多方面做了开创性的工作,为现代故障诊断技术奠定了很好的理论基础。

“诊断(diagnosis)”一词源于医学术语,它的含义是“根据病症来识别病人所患何病”。从人工智能的观点来看,诊断是医生通过采集病人症状(包括医生的感观、病人的主观陈述以及各种医检所得的结果),并根据症状进行分析处理,以判断患者的病因及病情的严重程度,从而确定对患者的治疗方案的过程。电气设备故障诊断技术借用了上述概念,其含义是:通过对电气设备的在线监测,采集设备运行状态的特征量,了解及评估设备在运行过程中的状态,从而能够早期发现故障的技术。现在这种技术通常被称为“状态监测与故障诊断(condition monitoring and fault diagnosis)”。

电气设备状态监测与故障诊断利用电气设备的输入状态、输出状态和内部运行状态等可监测数据,对电气设备客观地做出判断,确定故障的类型、程度、部位以及产生故障的原因,预测故障趋势,并发出预警信号。由于电气设备故障具有潜伏性、破坏性、突发性、随机性等特点,电气设备状态监测与故障诊断系统就应该从其特点入手,具备实时性、准确性、可靠性和安全性。要实现电气设备故障的准确诊断必须要有相应的方法和可靠的依据,而状态监测就是为诊断提供依据,正是这些监测量为诊断提供了基础。通过在线的实时监测装置对电气设备的运行状态进行实时监测,并跟踪记录电气设备现在和过去的运行状态,实现全方位的状态监测,随时将这些状态量转换后传输至故障诊断系统处理。电气设备故障诊断系统根据系统本身的方法和算法对接收到的状态量进行分析和处理,判断电气设备运行是否正常,确定故障部位及原因,预测故障的发展趋势,提出电气设备的检修意见等。图1-1以发电机组状态监测与故障诊断的简易结构图为例,说明了电气设备状态监测与故障诊断的过程。

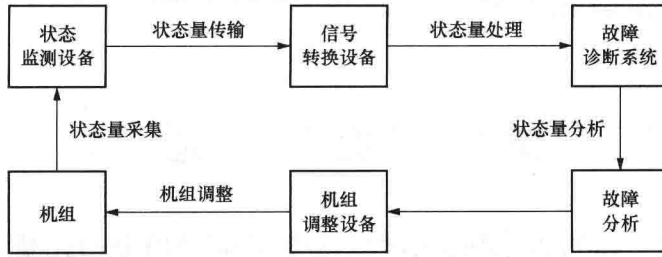


图 1-1 发电机组故障诊断系统结构图

1.2 电气设备故障诊断的方法

电气设备故障的产生有一个或快或慢的发展过程，故障征兆也是随着时间的推移而逐步暴露出来的。通过对电气设备的运行趋势分析和故障趋势预测，可以跟踪电气设备的状态变化，对故障的早期预报提供依据。可以将电气设备的各种设计参数、结构参数、配置参数、状态参数、运行参数、工况参数及其他诊断信息有机地结合起来进行电气设备的故障分析与识别。

现有的电气设备故障诊断方法主要分为两大类，即基于模型的故障诊断方法和无模型的故障诊断方法。其中，无模型的故障诊断方法又包括基于信号处理的方法和基于人工智能的方法。基于模型的故障诊断方法的核心思想是用解析冗余取代硬件冗余，以系统的数学模型为基础，利用观测器、等价空间方程、滤波器、参数模型估计和辨识等方法求取识别量的残差值，然后基于某种准则或阈值对该残差值进行评价和决策。电气设备故障诊断方法分类如图 1-2 所示。

下面介绍几种诊断方法。

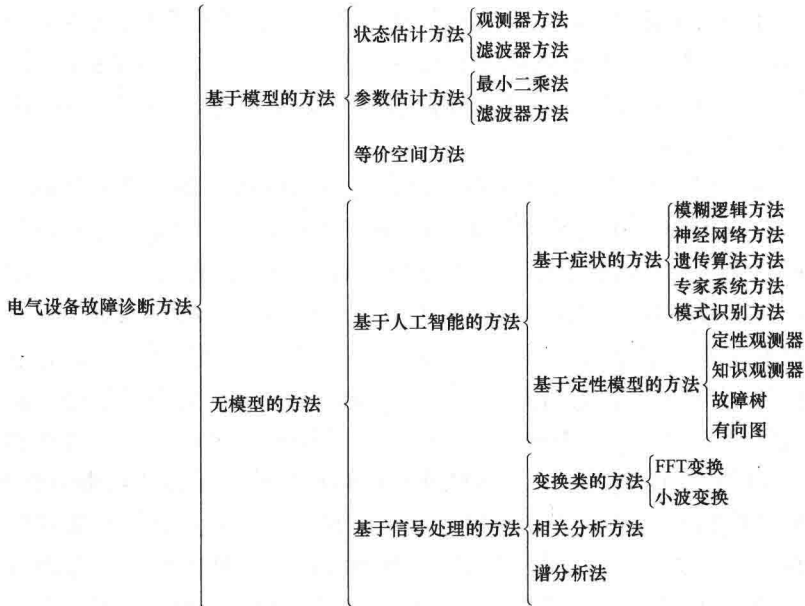


图 1-2 电气设备故障方法分类示意图

1.2.1 基于模型的故障诊断方法

基于模型的故障诊断方法可以分为状态估计方法、等价空间方法和参数估计方法三类。这三种方法均是独立发展起来的，但它们之间存在一定的联系。现已证明等价空间方法与观测器方法在结构上的等价性。

1. 参数估计方法

当故障由参数的显著变化来描述时，可利用已有的参数估计方法来检测故障信息，根据参数的估计值与正常值之间的偏差情况来判断系统的故障情况，设计步骤是：

(1) 建立被控过程的输入输出模型，即

$$y(t) = F[u(t), \theta] \quad (1-1)$$

式中 θ ——模型参数；

$u(t)$ ——输入参数；

$y(t)$ ——输出参数。

(2) 建立模型参数与过程参数之间的联系，即

$$\theta = g(P) \quad (1-2)$$

式中 P ——过程参数。

(3) 基于系统的输入输出序列，估计出模型参数序列 $\hat{\theta}_i$ 。

(4) 由模型参数序列计算过程参数序列。

(5) 确定过程参数的变化量序列。

(6) 基于此变化序列的统计特性，检测故障是否发生。

(7) 当确定有故障发生时，进行故障分离、估计及决策。

上述故障诊断的基本思想是把理论模型和参数辨识结合起来，其框图如图 1-3 所示，其中 u 为输入， y 为输出， N 为外部扰动。

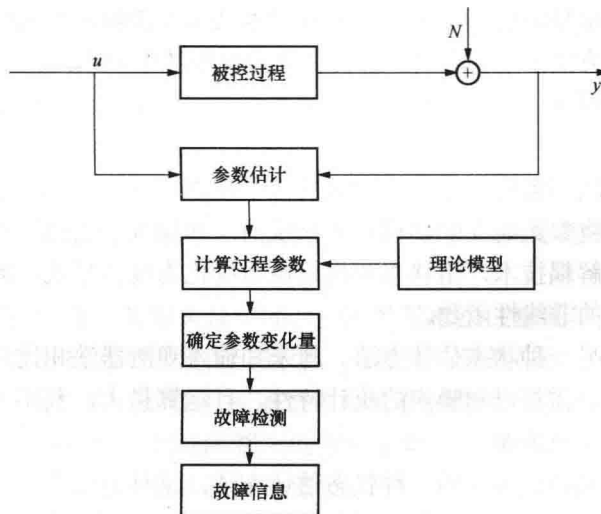


图 1-3 基于参数估计的故障诊断框图

因此，这种方法需要下列前提条件：①建立精确的过程模型；②具有有效的参数估计方法；③选择适当的过程参数；④有必要的故障统计决策方法。

尽管已经提出了诸多的参数估计方法，但由于最小二乘法简单实用，并且有极强的鲁棒

性,因此它仍是参数估计的首选方法。但是,基于参数估计的故障诊断方法存在的问题有:

(1) 基于系统参数估计的故障诊断方法是利用系统参数过程的系数关联方程反推物理元件参数,而对于一个实际系统,系统参数过程的系数关联方程的个数不一定等于物理元件参数个数,而且这种系统参数过程的系数关联方程是非线性的,由此求解物理元件参数是很困难的,有时甚至是不可能的。

(2) 当系统发生故障时,不仅可能引起系统参数的变化,还可能引起模型结构的变化,基于系统参数估计的动态故障诊断面临的是一种变结构变参数的参数估计问题,需要一种同时辨识模型结构和参数的实时递推算法。

(3) 系统故障发生时,系统故障引起系统模型结构和参数变化的形式是不确定的,而对不确定时变、变结构、变参数辨识问题,目前还缺少有效的方法。

2. 状态估计方法

被控过程的状态直接反映系统运行状态,通过评估系统的状态,并结合适当模型则可进行故障诊断。首先重构被控过程状态,并构成残差序列,且残差序列中包含各种故障信息。基本残差序列,只能通过构造适当的模型并采用统计检验法,才能把故障从中检测出来,并进一步分离、估计及决策。所谓残差,就是与被诊断系统的正常运行状态无关的、由其输入输出信息构成的线性或非线性函数。在没有故障时,残差等于零或近似为零;而当系统出现故障时,残差显著偏离零点。为便于实现故障分离,残差应当属于下面两者之一:

(1) 结构化残差:对应于每个故障,残差都有不同的部分与之对应,当诊断对象发生故障时,这些特定部分就由零变为非零。

(2) 固定方向性残差:对应于每个故障,残差向量都具有不同的方向与之对应。理论上讲,当系统发生故障时,残差应以确定性的偏移量出现。状态估计方法在线性系统和非线性系统的故障检测与诊断中都有应用。通常可以基于状态观测器或滤波器来进行状态估计,如未知输入观测器法、卡尔曼滤波器法、自适应观测器法以及模糊观测器法等。

采用状态估计诊断方法的前提条件:①具备过程模型数学知识;②已知噪声的统计特性;③系统可观测或部分可观测;④方程解析有一定的精度;⑤在许多场合下要将模型线性化,并假设干扰为白噪声。

未知输入观测器方法不需要对象非常精确的数学模型,将建模不确定性作为系统的未知输入来处理。这种方法将参数的失配建模作为系统的未知输入,故障则是系统状态和输入的非线性函数,通过干扰解耦技术,用状态变换把原系统化为规范形式。同时,将故障转化为可测输入和输出信号间的非线性函数。

卡尔曼滤波器法是另一种状态估计方法。与未知输入观测器法相比较,这种方法的设计过程相对简单,但缺点是需要已知噪声的统计特性,且运算量大。利用自适应扩展卡尔曼滤波器方法可以有效克服噪声影响。

自适应观测器法也是颇受关注的一种状态估计方法。这种方法直接建立系统的自适应检测观测器或诊断观测器,再构造出残差,对故障进行检测或诊断。值得注意的是,若建立的是检测观测器,则应在正常系统模型的基础上建立观测器方程,即观测器方程中的故障矩阵取系统正常时的值;若建立的是诊断观测器,则观测器方程中的故障矩阵为待估计的值。无论实际建立的是哪一种观测器,都要求通过在线调节观测器参数,使系统残差收敛,从而使观测器及整个系统达到稳定。

近年来,由于模糊模型与观测器方法的结合,产生了基于模糊模型的观测器方法,它利用描述非线性系统输入输出关系的 IF-THEN 模糊规则将原非线性模型在工作点处进行局部线性化,再将这些线性模型进行加权组合来拟合原非线性模型。在模糊模型基础上,按照线性系统的方法,建立起模糊观测器。

3. 等价空间方法

等价空间方法是利用系统的输入、输出的实际测量值检验系统数学模型的等价性,从而检测和隔离故障的一种方法。等价空间方法主要包括几种具体的方法:奇偶方程方法、方向性残差方法和约束优化的等价方程方法等。其中,应用最多的是奇偶方程方法和方向性残差方法。

奇偶方程方法是通过构造测量冗余方程和奇偶向量,得到包含残差的奇偶方程,从而对故障进行检测和诊断。目前已有的成果主要是在线性系统方面,对非线性系统的研究还处于起步阶段。

方向性残差方法是通过将故障与残差的传递函数转化为对角形式,使得残差为固定方向,从而每个残差分量和故障向量的一个分量相关联,实现故障分离。

1.2.2 基于系统输入输出信号处理的故障诊断方法

1. 直接测量系统的输入、输出

在正常情况下,被控过程的输入、输出在正常范围内变化,即

$$U_{\min}(t) < U(t) < U_{\max}(t) \quad (1-3)$$

$$Y_{\min}(t) < Y(t) < Y_{\max}(t) \quad (1-4)$$

当此范围被突破时,可以认为故障已经发生或将要发生。

2. 基于小波变换的方法

其基本思路是:首先对系统的输入、输出信号进行小波变换,利用该变换求出输入、输出信号的奇异点;然后去除由于输入突变引起的极值点,则其余的极值点对应于系统的故障。这种方法不需要系统的数学模型,具有灵敏度高、克服噪声能力强的特点,已在 GIS 管线泄漏诊断系统、发电机局部放电中得到成功应用。

3. 输出信号处理法

系统的输出在幅值、相位、频率及相关性上与故障源之间会存在一定的联系,这些联系可以用一定的数学形式表达故障发生时,可利用这些分量进行分析处理,判断故障源的所在。常用的方法有频谱分析法、概率密度法、相关分析法及功率谱分析法等。

4. 信息匹配诊断法

此方法引入了类似矢量、类似矢量空间、一致性等概念,将系统的输出序列在类似空间中划分成一系列子集,分析各个子集的一致性,并按照一致性强弱进行排列。一致性最强的一组子集的鲁棒性也最强,而一致性最差的子集则可能已经发生故障。通常类似矢量值很小,而当故障发生时,类似矢量将在此故障相应的方向上增大,因此类似矢量的增加表明故障的发生,而其方向给出了故障部位的传感器位置。

5. 基于信息融合的方法

故障诊断实际上是根据检测量所获得的某些故障特征以及系统故障与故障表征之间的映射关系,找出系统故障源的过程。为了充分利用检测量所提供的信息,在可能的情况下,可以对每个检测量采用多种诊断方法进行诊断,这一过程称为局部诊断。将各诊断方法所得结果加以综合,得到系统故障诊断的总体结果,称为全局诊断融合。对局部-全局融合方案的实

现, 可用模糊逻辑的方法进行决策。

6. 信息校核法

在许多系统的故障诊断中, 都没有考虑到信息校核方法。实际上, 系统的信息校核是进行故障诊断的比较简单有效的方法, 因为信息是进行系统过程监测的依据, 但是利用错误的信息进行计算和推理会带来系统诊断故障的误判和漏判。可依据能量守恒定律等物理化学规律及数量统计来进行信息的校核, 信息的矛盾一般意味着信息获取上的故障或矛盾。

1.2.3 基于模糊逻辑的故障诊断方法

模糊理论 (fuzzy theory, FT) 是将经典集合理论模糊化, 并引入语言变量和近似推理的模糊逻辑, 具有完整的推理体系的智能技术。

电气设备在故障诊断过程中存在许多不确定性, 常常表现为不同的故障状态可能具有相似的特征, 而不同的故障特征可能对应同一故障状态。因此, 故障可视具有一定的模糊性, 不能将故障绝对地识别为“存在”与“不存在”。对于故障的这一模糊现象, 用传统的诊断方法存在一些困难, 模糊诊断则显示出其模糊数学的优越性。

模糊诊断是一种基于知识的人工智能诊断模式。它利用模糊逻辑来描述故障原因与故障现象之间的关系, 通过隶属度函数和模糊关系方程解决故障原因与状态识别问题。设电气设备可能出现的各种故障状态构成一个集合, 此集合可以用状态向量来表示

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (1-5)$$

由故障状态引起的各种故障特征或征兆构成一个集合, 此集合用特征向量 Y 表示

$$Y = [y_1, y_2, \dots, y_m] \quad (1-6)$$

状态向量 X 和特征向量 Y 中的各元素 x_i 和 y_i 均为模糊变量, 其数值由各自对应的隶属函数来确定。

在运用模糊逻辑进行故障诊断时, 诊断规则可由反映设备状态和特征之间因果关系的模糊关系矩阵 A 予以描述。这样, 状态向量 X 、模糊关系矩阵 A 、特征向量 Y 构成了模糊关系方程

$$X \circ A = Y \quad (1-7)$$

即

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \circ \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} = (y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (1-8)$$

式中, \circ 为模糊算子。

根据设备特征 (Y) 和诊断规则 (A) 推理出设备状态 (X) 的故障诊断过程, 就转化成模糊关系方程的求解问题。

模糊理论可适用于不确定性问题; 模糊知识库使用的语言变量, 更接近人类的知识表达方式; 模糊理论能够得到问题的多个可能解决方案, 并根据方案的模糊度的大小来进行优先程度的排序。但是, 在模糊理论实际应用中, 隶属函数的获取、复杂系统模糊模型的建立和辨识等理论与方法还不够完善, 使模糊理论实际应用受到限制。

1.2.4 基于神经网络的故障诊断方法

人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 是对人脑神经系统的数学模拟, 是一种

模拟人类脑神经系统知识处理过程的人工智能技术。人工神经网络具有模拟任何连续非线性函数的能力和从样本学习的能力，非常适合应用于电气设备故障诊断系统。

人工神经网络是对生物神经系统的简单描述，是由大量简单的基本单元（人工神经元）相互广泛连接而成的复杂网络系统，它能反映人脑功能的若干基本特性。在人工神经网络中，人工神经元模拟人脑中神经元的基本特性，但它只是简单模拟，而不是逼真地描述。人工神经元是一个基本计算单元，一般为多输入、单输出的非线性单元，信息分散地存储在连接线的权重上。人工神经元的结构模型如图 1-4 所示。

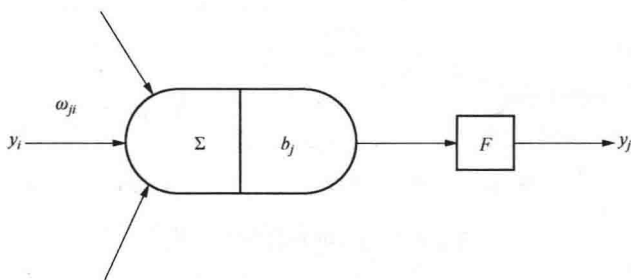


图 1-4 人工神经元模型

人工神经元模型具有以下特征：

- (1) 每个神经元 j 均有一个输出，即状态 y_j 。
- (2) 神经元 i 到神经元 j 的作用是通过突触完成的，作用强度以系数 ω_{ji} 表示，表示第 i 个神经元对第 j 个神经元的加权值。
- (3) 每一个神经元 j 都有一个实数阈值 b_j ，它与输入共同影响神经元的输出。
- (4) 对于每一个神经元 j ，它的状态 y_j 为所有与其相连的神经元 i 的状态 y_i 以及它们之间的连接强度 ω_{ji} 和神经元 j 的阈值 b_j 的函数，此函数称为激励函数，记作 $y_j = F(y_j, \omega_{ji}, b_j)$ ，最常用的函数形式为 $y_j = F(\sum_j \omega_{ji} - b_j)$ ，即神经元输出为其输入的线性加权和的函数。

由大量人工神经元互相连接而成的人工神经网络，具有以下特点：

- (1) 高维性。神经元数目较多，并行处理。
- (2) 神经元间连接的广泛性，信息分布式储存。
- (3) 自适应性。网络连接线权重可在学习或使用中不断调整，适应特定的功能需要，自组织、自学习。

人工神经网络可用于模式识别、信号处理、自动控制、人工智能、优化设计等方面。从某种程度上讲，电气设备故障诊断也是一种模式识别或信号处理的过程，因而人工神经网络可用于电气设备故障诊断。有代表性的人工神经网络模型有很多，其中前馈(back propagation, BP)网络和径向基函数(radial basic function, RBF)网络在故障诊断中的应用更广泛一些。

1. 前馈网络(BP网络)

BP网络是一种多层前馈网络，权值调整采用误差反向传播的学习算法，可以实现从输入到输出的任意非线性映射。BP网络一般由输入层、一个和几个隐层及输出层组成，网络的学习是一种有监督的学习训练。

图 1-5 所示为 3 层 BP 神经网络结构，其输入向量为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ，输出向量为 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_m]$ ，输入层为 n 个神经元，隐藏层为 h 个神经元，输出层为 m 个神经元，

ω_{ij} 为输入层和隐藏层之间的连接权重, ω_{jk} 为隐藏层和输出层之间的连接权重, 隐藏层的神经元个数 h 可认为与问题相关, 由经验可得 h 在 $[n/2+1, 3n]$ 之间。

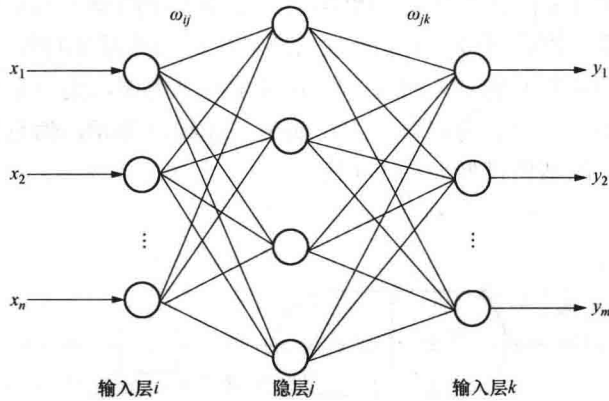


图 1-5 3 层 BP 神经网络结构

BP 训练样本可描述如下:

- (1) 随机给各个权值 ω_{ij} 和 ω_{jk} 赋一个初始值, 要求各权值互不相等, 且都为一较小的非零数, 可在 $(0, 1)$ 之间取值。
- (2) 输入样本集中的每一学习样本 (X_p, Y_p) , 计算出实际输出 O_p 。
- (3) 计算实际输出 O_p 和相应的理想输出 Y_p 之间的差。
- (4) 按极小误差方式调整权值矩阵。
- (5) 判断最大迭代次数 N 是否大于一预定给定的大数, 或者网络误差是否小于一较小的值 ε , 如果是, 则结束训练; 否则, 转步骤 (2)。

其中步骤 (1)、(2) 称为向前传播阶段, 步骤 (3)、(4) 称为向后传播阶段, 这两个阶段的工作一般应受到精度要求的控制, 根据 BP 算法的严格数学理论, 对第 p 个样本, 其误差可取为

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (y_{pj} - O_{pj})^2 \quad (1-9)$$

式中 E_p ——第 p 个样本的实际输出向量 O_p 和对理想输出向量 Y_p 之间的平方差;

O_{pj}, y_{pj} —— O_p 和 Y_p 向量分量。

网络关于整个样本的误差 E 则可记为

$$E = \sum_{l=1}^s E_{ps} \quad (1-10)$$

式中 s ——样本个数。

神经网络虽有诸多优点, 如并行处理能力、自适应、自学习等, 在智能故障诊断中受到越来越广泛的重视, 但其也存在很大的局限性, 如训练样本获取困难、忽视领域专家的诊断经验知识、权重形式的知识表达方式难以理解等。

2. 径向基函数网络 (RBF 网络)

RBF 网络由输入层径向基层 (隐层) 和线性输出层组成, 也是一种监督学习训练的前馈网络。径向基层神经元的传递函数为高斯函数 $\text{radbas}(n, b) = e^{-(bn)^2}$, 其输入为输入矢量与

权值矢量的距离乘以阈值，这与其他网络有所不同，输出层一般采用线性传递函数。网络结构随学习训练过程发生动态变化，即径向基神经元个数根据训练指标的要求而逐步增加，直至达到误差指标或达到制定的最大训练次数，而其他网络结构在学习训练前就已经确定下来而不能改变。

1.2.5 基于遗传算法的故障诊断方法

遗传算法 (genetic algorithm) 是一类借鉴生物界的进化规律 (适者生存, 优胜劣汰遗传机制) 演化而来的随机化搜索方法。它的推理过程就是不断接近最优解的方法, 因此它的特点在于并行计算与全局最优。

遗传算法是从代表问题可能潜在的解集的一个种群开始的, 而一个种群则由经过基因编码的一定数目的个体组成。每个个体实际上是染色体带有特征的实体。染色体作为遗传物质的主要载体, 即多个基因的集合, 其内部表现 (即基因型) 是某种基因组合, 它决定了个体的形状的外部表现, 例如黑头发的特征是由染色体中控制这一特征的某种基因组合决定的。

因此, 在一开始需要实现从表现型到基因型的映射, 即编码工作。由于仿照基因编码的工作很复杂, 往往进行简化, 如二进制编码, 初始代种群产生之后, 按照适者生存和优胜劣汰的原理, 逐代演化产生出越来越好的近似解, 在每一代, 根据问题域中个体的适应度大小选择个体, 并借助于自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异, 产生出代表新的解集的种群。这个过程将导致种群像自然进化一样的后生代种群比前代更加适应于环境, 末代种群中的最优个体经过解码, 可以作为问题近似最优解。

如图 1-6 所示, 遗传算法的基本运算过程描述如下:

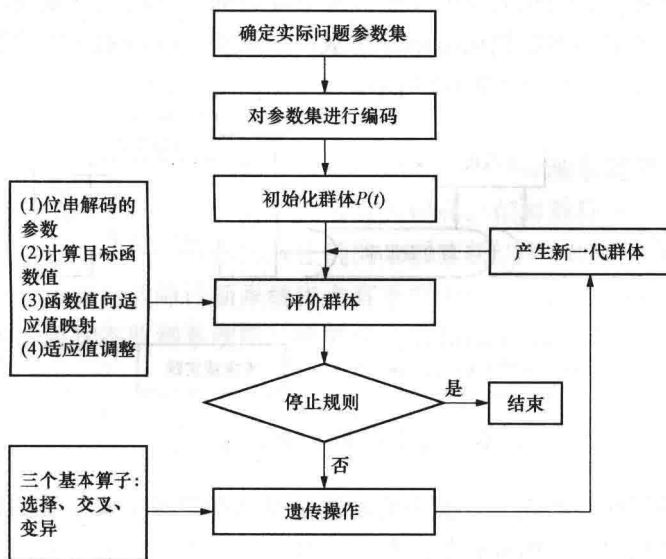


图 1-6 遗传算法基本运算过程

(1) 初始化: 设置进化代数计数器 $t=0$, 设置最大进化代数 T , 随机生成 M 个个体作为初始种群 $P(0)$ 。

(2) 个体评价: 计算种群 $P(t)$ 中各个个体的适应度。

(3) 选择运算: 将选择算子作用于种群。选择的目的是把优化的个体直接遗传到下一代

或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代。选择操作是建立在群体中个体的适应度评估基础上的。

(4) 交叉运算：将交叉算子作用于群体。所谓交叉是指把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作。遗传算法中起核心作用的就是交叉算子。

(5) 变异运算：将变异算子作用于群体，即对群体中的个体串的某些基因座上的基因值作变动。群体 $P(t)$ 经过选择、交叉、变异运算之后得到下一代群体 $P(t+1)$ 。

(6) 终止条件判断：若 $t=T$ ，则以进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出，终止计算。

与一般的优化方法相比，遗传算法有很多优点：只需较少的信息就可实现最优化控制；从问题解的串集开始搜索，而不是从单个解开始，覆盖面大，利于全局择优；同时处理群体中的多个个体，即对搜索空间中的多个解进行评估，减少了陷入局部最优解的风险，同时算法本身易于实现并行化；基本上不用搜索空间的知识或其他辅助信息，而仅用适应度函数值来评估个体，在此基础上进行遗传操作；不是采用确定性规则，而是采用概率的变迁规则来指导其搜索方向；具有自组织、自适应和自学习的特性。

1.2.6 基于专家系统的故障诊断方法

专家系统 (expert system, ES) 是一种拥有大量专门知识的计算机程序系统，是人工智能应用领域最活跃和最广泛的一个分支。专家系统是一个具有大量的专门知识与经验的程序系统，它应用人工智能技术和计算机技术，根据某领域一个或多个专家提供的知识和经验，进行推理和判断，模拟人类专家的决策过程，以便解决那些需要人类专家处理的复杂问题。简而言之，专家系统是一种模拟人类专家解决领域问题的计算机程序系统。

一个专家系统主要的功能结构由五部分组成：知识库、推理机、综合数据库、解释接口 (人机界面) 和知识获取模块，如图 1-7 所示。

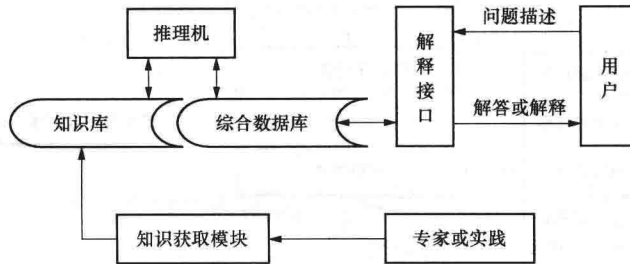


图 1-7 专家系统的一般功能结构

知识库是专家系统的核心之一，其主要功能是存储和管理专家系统的知识，包括事实性知识和领域专家在长期实践中所获得的经验知识等。

推理机实际是一组计算机程序，主要功能是协调控制整个系统，对用户提供的证据进行推理，以最终做出回答。在专家系统中，推理过程控制方式分为正向推理、反向推理和正反向推理三种。

综合数据库用于存储初始数据、证据以及推理过程中得到的中间结果等。在专家系统运行过程中，综合数据库中的内容是不断变化的，并且其数据的表示和组织通常与知识库中知识的表示和组织相容或一致。