

实用电源技术丛书

电力电子装置故障 自动诊断

徐德鸿 马 皓 编著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书在介绍可靠性工程和故障诊断的基本概念的基础上,介绍了电力电子装置主电路故障诊断的基本方法和触发脉冲的故障诊断方法,介绍了电力电子装置故障诊断的频谱分析方法、神经网络方法和参数模型方法,以及计算机在线检测与故障诊断系统的设计原理。

本书是一本理论知识与工程设计相结合的专著,可作为高等学校电力电子技术专业及相关专业的本科生、研究生和教师的参考书,也可供从事电力电子产品开发与研究的广大科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子装置故障自动诊断/徐德鸿,马皓编著. -北京:科学出版社, 2001

(实用电源技术丛书)

ISBN 7-03-009196-5

I. 电 I. ①徐… ②马… II. 电力电子开关-故障诊断
N. TM564

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第05978号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001年3月第一版 开本:787×1092 1/16

2001年3月第一次印刷 印张:9

印数:1—3000 字数:195 000

定价:19.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

序 言

什么是电源？很难用一句话概括。但是，现代人谁能离得开电源？衣食住行离不开电源，文化娱乐、办公学习、科学研究、工农业生产、国防建设、教育、环境保护、医疗卫生、交通运输、照明、通讯、宇宙探索等等，哪一样能少得了电源？只要用电就离不了电源。绝大部分的电是由发电厂生产发送的，称为市电。白炽灯、电炉、交流电动机等只要接通市电就行；计算机、电视机、X光机等虽然也是打开开关就能工作，但是这些机器里面都已经做了电能变换处理，将正弦波的交流市电转换成各自需要的直流电、高压电、脉冲电；在无法提供市电的岛屿、车船上，可以用蓄电池经过电能变换获得跟市电一样的交流电，让计算机、仪器设备等工作起来；进入太空的卫星、飞行器，把太阳能收集起来，再经过电能变换，获得需要的各种电能来维持长期运行。电能是宝贵的资源，需要珍惜和节约。绿色照明的节能荧光灯、高光效的 HID 灯电子镇流器，是经过功率因数校正和高频化处理的电源装置，既省电又净化了电网；交流电动机经过频率变换即所谓变频调速实现了电动机科学运转及电能的合理使用。水力发电、火力发电、核电站是电的主要来源；太阳光、风力、沼气、潮汐、生物能、化学能等等在特定环境里也能发电，作为电力的补充，这些补充发电需要经过 DC/DC 和 DC/AC 电能变换使其便于储存，并转换成与电网频率一致的正弦波。电网不稳定给用电设备带来许多麻烦，甚至无法正常工作；太阳、风力受四季和天气影响，发出的电更是不稳，很多场合需要稳压供电，这有赖于电能变换加以调整。总括起来，所谓电源乃是利用电能变换技术将市电或电池等一次电能转换成适合各种用电对象的二次电能的系统或装置。

上述电能变换主要体现在变压、调压、整流、滤波、稳定、变换等。而这些基本的电能变换是通过一系列的技术方法实现的，并且这些技术方法分别适用于不同的环境条件和要求。

变压：变压器是交流变压最常用的装置，相位控制也能完成交流变压，线性补偿、频率变换、时间分割（脉冲宽度调制，即著名的 PWM）等都能实现变压。直流变压最常用的手段就是 DC/DC 变换，无源和有源分压器是小功率直流变压较简便的方法。

调压：在变压的基础上加以步进和连续的设置就成为调压。根据需要可以手动、自动或遥控。

整流：整流是最早使交流电转换成直流电的方法。利用单相性的无源器件来实现则最简单，利用有源开关的同步整流器能将整流器的损耗减至极小。

滤波：为获得平滑的直流，可以通过无源或有源的滤波电路来实现。

稳定：将变压或调压引入自动负反馈控制，就能使之稳定。若反馈量分别是电压、电流、功率、频率、相位，则响应获得稳压、稳流、恒功率、稳频、稳相的稳定电源。

变换：变换的特定含义是由一种状态转变到另一种状态。比如交流-直流之间的转换；正弦波、方波、三角波、梯形波、脉冲波、特种波等波形转换；低频-高频转换；光、热、机械、风、磁、理化等能量与电能之间的转换。

电能变换涉及的技术非常多,常见的有参数稳压、线性反馈稳压、磁放大器技术、数控调压技术、相控技术、变频、PWM、SPWM、软开关PWM、移相谐振、无功补偿、功率因数校正、裂相、电流均分、传感采样、驱动保护、储能、充电、抗干扰、电磁兼容等等。实际需要推动这些技术不断发展和进步,使电源装置能满足负载各种各样的需求。

造就这些电源装置还需要专用的元器件和材料。电能变换用到的器材有功率开关器件、专用的集成电路、软磁材料以及外围元器件等。由于很多电源装置结构相当复杂,为简化设计而出现的集功率开关、变换控制电路、传感保护电路为一体的智能功率集成模块受到欢迎。

厚膜集成的电源模块、积木式的功能模块,灵活机动,既能单独使用,又能相互组合成较大的电源系统。在这里器件和整机的界限已相当模糊。

不同的负载要求不同的电源装置,万能的电源至少今天还未出现。一个特定用途的电源装置,应当具有符合负载要求的性能参数和外特性,这是基本的要求。安全可靠是必须加以保证的。高效率、高功率因数、低噪音是普遍关注的品质。无电网污染、无电磁干扰、省电节能等绿色指标是全球范围的热门话题,并有相关的国际和国家标准规范进行约束。有时特定的使用环境又要求电源具备一些额外的适应性能力,比如耐高温、耐高寒、耐高湿、抗辐射、抗振动、防爆、体积小、重量轻、智能化等。

电源技术发展到今天,已融汇了电子、功率集成、自动控制、材料、传感、计算机、电磁兼容、热工等诸多技术领域的精华,已从多学科交叉的边沿学科成长为独树一帜的功率电子学。

电源技术又是实用性极强的技术,服务于各行各业、各个领域的各式各样的负载,它们的性能特点以及采用的技术方法千差万别,这就造就了电源技术的丰富内涵。

由中国电源学会和科学出版社联合组织出版的《实用电源技术丛书》将展示多彩的电源世界,帮助读者全面了解当今电源的方方面面,并希望读者能从这套丛书中获得启示,在实际工作中找到最佳的电源方案。为此,丛书的选题力求从实际需要出发,内容突出实用性、新颖性和广泛性,写作侧重于原理阐述、实例解剖和经验介绍。我们将尽力让《实用电源技术丛书》成为广大读者的良师益友,但是,电源技术浩如烟海,有限的书目实难尽述。另外,电源的新技术不断涌现,且成长周期相当短,作者的实践有限,谬误之处在所难免,敬请读者指正。

《实用电源技术丛书》编辑委员会

《实用电源技术丛书》编辑委员会

顾 问：蔡宣三 丁道宏
主 任：倪本来
副主任：张建荣 侯振程
委 员：马传添 马鹤亭 区键昌 刘凤君 庄蓄田
李厚福 李朔生 李宗光 陈 坚 严仰光
张 立 张广明 张志国 张 嵘 张承志
张占松 张卫平 陆 鸣 段军政 季幼章
周庭光 赵良炳 赵修科 徐德高 徐会明
徐泽玮 徐德鸿 徐兰筠 袁维慈 黄济青
龚绍文 喻 翔 谭 信

前 言

由于电力电子技术的迅猛发展,各种高性能的电力电子产品不断涌现,电力电子设备的应用日益广泛,对设备的可维护性要求愈来愈突出。传统的人工故障查找方法由于缺少详细的故障状态信息,并依赖于维修人员的经验,要准确而且快速地诊断故障是比较困难的,导致维修周期长,影响了企业的生产。在电力、化工、钢铁、冶金、通讯、电气、铁道等行业,电力电子设备通常被用于生产工艺的关键流程之中,因电力电子设备故障而导致生产的中断则意味着重大的经济损失。故障自动诊断技术是提高设备可维护性的有效手段之一。所谓故障自动诊断就是动态监视电力电子装置的工作状态,检查是否发生故障;若发现故障,自动诊断故障的部位和性质,并通过外部设备向用户提供故障的部位和性质等信息,或者进行故障的隔离,启动备用系统等重构工作。而且故障自动诊断也为预知维修创造了条件。因此,现在越来越多的高性能电力电子产品将故障自动检测与诊断技术应用于其中。

本书主要讨论了电力电子装置故障诊断的频谱分析方法、神经网络方法和参数模型方法,以及在线检测与故障诊断系统的设计原理。作者希望本书的出版能对国内广大从事电力电子技术的科研人员了解这一领域的概况和发展有所帮助,能对我国在这一研究领域的进步起到一点促进作用。

本书共分七章,第一章概述了可靠性工程和故障诊断的基本概念;第二章介绍了电力电子装置主电路故障诊断的基本方法(电流检测法和电压检测法)和触发脉冲的故障诊断方法;第三章分别介绍了基于傅里叶分析和沃尔什分析两种频谱分析方法的故障诊断原理;第四章介绍了基于神经网络和波形直接分析的故障诊断原理;第五章分别介绍了基于参数估计和状态估计的故障诊断原理;第六章介绍了电力电子装置在线检测与故障诊断系统设计的原理;第七章介绍了在线检测与故障诊断系统中的系统功能软件与组态。

本书第一章至第五章由徐德鸿教授撰写,第六、七章由马皓博士撰写。

浙江大学程肇基教授详细、认真地审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的建议,谨致以衷心的感谢。本书中引用了作者所在课题组的部分科研成果,谨向课题组的卞敬明教授、程肇基教授、吴国忠副教授、章其民副教授、杜丽副教授、邵金水高工、杨筱辉副教授和研究生致以衷心的感谢。研究生陈敏、方红兴、孔晓丽、宿清华、龚广海、赵川红、程永华等参与了全书插图的绘制和书稿的校阅工作,在此一并表示衷心的感谢。

本书的出版得到了中国电源学会编辑工作委员会倪本来先生和科学出版社张建荣编审和汤秀娟编辑的大力支持,特此致以衷心的感谢。

由于作者水平有限,所见资料也有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

作 者

2000年9月于求是园

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 可靠性工程的基本概念	1
1.1.1 可靠性, 可维修性	1
1.1.2 可靠度, 失效率, MTTF, MTBF, 维修度, 修复率	1
1.1.3 串联系统的可靠性	5
1.1.4 并联系统的可靠性	6
1.2 故障诊断概述	6
1.2.1 故障诊断方法的分类	6
1.2.2 故障诊断的目的与意义	7
1.2.3 电力电子电路故障诊断	8
第二章 电力电子装置故障诊断基础	9
2.1 晶闸管三相全桥整流装置主电路故障诊断	9
2.1.1 电流检测法	9
2.1.2 电压检测法	10
2.1.3 串联晶闸管故障诊断	12
2.1.4 并联晶闸管的故障诊断	12
2.2 常用触发脉冲故障诊断	13
2.2.1 常用触发脉冲形式	13
2.2.2 脉冲故障诊断方法	14
第三章 基于频谱分析的故障诊断方法	16
3.1 傅里叶级数和傅里叶变换	16
3.1.1 傅里叶级数	16
3.1.2 傅里叶级数的复数形式	19
3.1.3 傅里叶变换	20
3.2 离散傅里叶级数和离散傅里叶变换	20
3.3 用傅里叶谱分析方法诊断鼠笼异步电动机转子断条故障	21
3.3.1 直接谱分析方法	21
3.3.2 噪声最优抵消法	22
3.4 用傅里叶分析法诊断电力电子电路的故障	25
3.4.1 三相桥式整流器的故障模型	25
3.4.2 故障类的诊断	27
3.4.3 故障类内故障元的定位	28
3.4.4 讨论	29
3.5 用沃尔什分析法诊断电力电子电路的故障	31
3.5.1 沃尔什变换	31

3.5.2	故障类的区分	31
3.5.3	故障类内故障元的定位	33
第四章	基于神经网络的故障诊断方法	37
4.1	神经网络模型	37
4.1.1	生物神经元模型	37
4.1.2	人工神经元模型	37
4.1.3	神经网络模型	39
4.2	前向网络	39
4.2.1	感知器	39
4.2.2	BP 网络	41
4.3	BP 网络的学习算法	42
4.3.1	BP 网络的前馈计算	42
4.3.2	BP 算法	43
4.3.3	三层 BP 网络的程序设计	44
4.4	用 BP 网络诊断电力电子电路的故障	47
第五章	参数模型与故障诊断	51
5.1	基于数学模型的故障诊断原理	51
5.2	故障诊断中的参数估计方法	51
5.3	离散时间系统的参数估计	53
5.3.1	最小二乘法	53
5.3.2	离散系统的参数估计	55
5.4	利用参数估计法诊断电动机转子断条故障	56
5.4.1	异步电动机稳态运行的单相等值电路	56
5.4.2	用最小二乘法辨识参数	57
5.5	连续时间系统参数估计	58
5.6	直流调速系统的故障诊断	59
5.6.1	基本方程	59
5.6.2	基于参数估计的故障诊断	60
5.7	电力电子系统的参数估计	61
5.7.1	电力电子电路的建模	61
5.7.2	离散双线性系统	64
5.7.3	离散双线性系统的参数辨识	64
5.8	状态估计法及残差法	66
5.8.1	全阶状态观测器	66
5.8.2	残差法	67
5.8.3	多重观测器法	68
第六章	在线检测与故障诊断系统设计	70
6.1	在线检测与故障诊断系统概述	70
6.1.1	功能	70
6.1.2	硬件结构	70

6.2	一次检测部分	71
6.2.1	性能特点	71
6.2.2	低电压模拟量检测	72
6.2.3	高电压模拟量和电流量检测	73
6.2.4	开关量检测	77
6.3	下位机部分	78
6.3.1	模拟量下位机硬件结构	78
6.3.2	开关量下位机硬件结构	87
6.3.3	下位机软件组成结构	88
6.4	通讯及同步问题	90
6.4.1	PC-单片机多机通讯技术	90
6.4.2	通讯命令的格式及其功能	105
6.4.3	数据的同步采集	113
第七章	系统功能软件及组态	115
7.1	上位机功能概述	115
7.1.1	上位机的主要功能	115
7.1.2	组态功能概述	115
7.2	测点参数设置组态	117
7.3	故障诊断模型及其组态	122
7.3.1	故障诊断软件的结构及运行	123
7.3.2	故障诊断的组态	123
7.4	图形显示与报表处理	126
7.4.1	图形显示	126
7.4.2	报表	129
7.4.3	故障信息列表与打印	130
7.5	后台处理	130
	参考文献	131

第一章 绪 论

1.1 可靠性工程的基本概念^[5]

1.1.1 可靠性,可维修性

系统的可靠性指系统在规定的条件下、规定的时间内完成规定功能的能力。

可靠性定义的三要素：规定的条件、规定的时间和规定的功能。

规定条件：系统的可靠性与规定的条件关系密切，同一系统在不同的运行条件下的可靠性完全不同。

规定时间：系统的可靠性与规定的时间也密切相关。系统的可靠性将随时间的推移而降低。

规定功能：规定的功能越强，系统的可靠性越低。

条件：环境的温度、湿度、气压、加速度等。

功能：预定功能和指标。

系统的可维修性指系统发生故障后进行维修，能尽量恢复正常工作的能力。

可维修性反映了系统维修的难易程度。它是系统的一种内在的特性，由如下因素构成：系统的简单性、维修方便性、后勤保证能力。

可靠性、可维修性为定性概念，下面介绍有关定量概念。

1.1.2 可靠度,失效率,MTTF,MTBF,维修度,修复率

1. 可靠度

引入随机变量 T ，表示系统的寿命。可靠度的定义如下：

可靠度：对于任一时刻 $t > 0$ ，系统的可靠度 $R(t)$ 是它的寿命随机变量 T 大于 t 的概率，即

$$R(t) = P(T > t) \quad (1.1)$$

可靠度 $R(t)$ 表示系统在 $[0, t]$ 时间内完成预定功能的概率。

令 $F(t)$ 表示随机变量 T 的分布函数， $f(t)$ 表示 T 的分布密度，则有

$$R(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (1.2)$$

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx, \quad t > 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (1.4)$$

由于 $F(t)$ 表示系统在 $[0, t]$ 内失效的概率，因此通常称为不可靠度。 $f(t)$ 为失效密

度。可靠度与不可靠度之间存在如下关系：

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (1.5)$$

也即

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1.6)$$

上式两边求导数，得

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\frac{dF(t)}{dt} \quad (1.7)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (1.8)$$

可靠度 $R(t)$ 的性质：

① $R(t)$ 是 t 的单调递减函数；

② $R(0) = 1$ ；

③ $\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0$ ；

④ $0 < R(t) \leq 1$ 。

可靠度与时间的关系，见图 1.1。

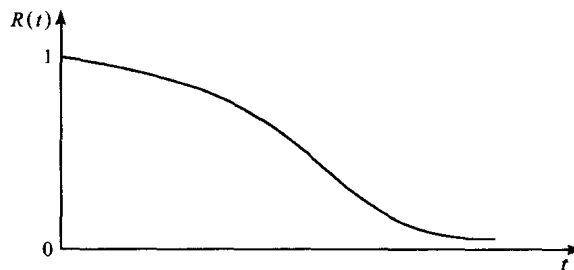


图 1.1 可靠度与时间关系

2. 失效率

失效率又称故障率。失效率的定义如下：

失效率：设备在 t 时刻前正常工作， t 时刻后单位时间内发生故障的条件概率密度，即

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \quad (1.9)$$

失效率 $\lambda(t)$ 表示设备在 $[t, t + \Delta t]$ 内发生故障的概率的大小。 $\lambda(t)$ 愈小，则设备的可靠性愈高，反之设备的可靠性愈低。因此，失效率 $\lambda(t)$ 是衡量设备可靠性的指标之一。

由 $\lambda(t)$ 的定义可知 $\lambda(t) \geq 0$ 恒成立。失效率与可靠度之间存在如下关系：

$$\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (1.10)$$

证明：由条件概率公式，可得

$$\begin{aligned} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) &= \frac{P(t < T \leq t + \Delta t, T > t)}{P(T > t)} = \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} \\ &= \frac{\int_t^{t+\Delta t} f(t) dt}{R(t)} \stackrel{\text{中值定理}}{=} \frac{f(\xi) \Delta t}{R(t)} \end{aligned}$$

其中， $t < \xi \leq t + \Delta t$ 。

上式代入失效率的定义 $\lambda(t)$ ，得到：

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \frac{f(t) \Delta t}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \quad (1.11)$$

证毕。

由式(1.10)可解得可靠度与失效率的关系：

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(r) dr} \quad (1.12)$$

于是得到不可靠度与失效率的关系：

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(r) dr} \quad (1.13)$$

统计表明，多数的不可修复设备的故障率与时间的关系呈浴盆曲线，如图 1.2 所示。起始故障率呈下降的趋势，之后保持基本恒定，最后呈上升的趋势。

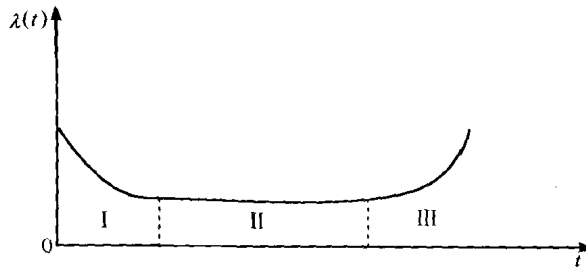


图 1.2 典型设备故障率随运行时间的变化曲线

第 1 阶段：早期故障期，反映了设计或制造工艺的缺陷；

第 2 阶段：偶发故障期，故障率低，且近似为常数；

第 3 阶段：设备进入老化阶段，故障率呈上升趋势。

不可修复设备在第 2 阶段，其失效率 $\lambda(t)$ 近似为常数，若令 $\lambda(t) = \lambda$ ，由式(1.4)、(1.12)和(1.13)可得

$$\begin{cases} R(t) = e^{-\lambda t}, \\ F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \\ f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \end{cases} \quad t \geq 0 \quad (1.14)$$

可见，当设备的失效率 λ 为常数时，设备的寿命 T 为指数分布。

3. MTTF, MTBF

设设备寿命 T 服从 $f(t)$ 分布，寿命的均值

$$E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (1.15)$$

当失效率 λ 为常数时，则随机变量寿命 T 的均值为

$$\begin{aligned} E(T) &= \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = - \int_0^{\infty} t d e^{-\lambda t} = - \left[t e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt \right] \\ &= - \left[\frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} d(-\lambda t) \right] = - \frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \quad (1.16)$$

对于不可修复的系统， $E(T)$ 称为平均寿命，记为 MTTF (Mean Time to Failure)。

对于可维修系统, $E(T)$ 称为平均无故障时间, 记为 MTBF (Mean Time Between Failure)。

4. 维修度, 修复率

引入随机变量: 维修时间 T_D 。维修度的定义如下:

维修度: 在规定的条件下和规定的时间 $(0, t)$ 内, 系统通过维修而恢复正常状态的概率称为系统的维修度, 记为 $F_D(t)$, 于是

$$F_D(t) = P(T_D \leq t) \quad (1.17)$$

若维修时间随机变量 T_D 的分布密度函数为 $f_D(t)$, 则有

$$F_D(t) = P(T_D \leq t) = \int_0^t f_D(t) dt \quad (1.18)$$

修复率: 若系统在时刻 t 处于维修状态, 则称该系统在单位时间内能修复的概率为其修复率, 记为 $\mu(t)$, $\mu(t)$ 可表示为

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T_D \leq t + \Delta t | T_D > t) \quad (1.19)$$

$\mu(t)$ 与 $F_D(t)$ 和 $f_D(t)$ 存在如下关系:

$$\mu(t) = \frac{f_D(t)}{1 - F_D(t)} = \frac{F'_D(t)}{1 - F_D(t)} \quad (1.20)$$

当 $\mu(t)$ 已知, 可解出维修度 $F_D(t)$ 。上式可表示为

$$\frac{dF_D(t)}{1 - F_D(t)} = \mu(t) dt \quad (1.21)$$

两边积分:

$$\begin{aligned} -\ln(1 - F_D(t)) &= \int_0^t \mu(t) dt \\ 1 - F_D(t) &= e^{-\int_0^t \mu(t) dt} \end{aligned} \quad (1.22)$$

因此

$$F_D(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t) dt} \quad (1.23)$$

如果 $\mu(t) = \text{常数}$, 也即 $\mu(t) = \mu$, 可得

$$F_D(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (1.24)$$

于是

$$f_D(t) = \frac{dF_D(t)}{dt} = \mu e^{-\mu t} \quad (1.25)$$

5. 平均修复时间 (Mean Time to Repair, MTTR)

$$MTTR = \int_0^{\infty} t f_D(t) dt \quad (1.26)$$

当 μ 为常数时, 即 $\mu(t) = \mu$,

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \mu e^{-\mu t} dt = \frac{1}{\mu} \quad (1.27)$$

6. 可用度(有效性)

系统的有效性: 可维修系统能维持功能的能力, 即系统保持良好工作状态的能力。

$$\text{有效性} = \frac{\text{系统工作时间}}{\text{系统工作时间} + \text{不能工作时间}} \quad (1.28)$$

不可修复的设备从工作状态一旦转向故障状态, 则设备将永远失去工作能力, 因此可靠度 $R(t)$ 可完全描述该类设备的寿命。

而可修复的设备可以多次修复, 重新投入运行, 可靠度不能完全反映此类设备可工作时间的长短, 为此引入可用度:

$$A = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (1.29)$$

若设备的可靠度和维修度均服从指数分布的条件, 则

$$A = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (1.30)$$

例如, 某电源 $\text{MTBF} = 1$ 万小时, $\text{MTTR} = 4$ 小时, 则 $A = \frac{10000}{10000 + 4} \approx 0.9996$ 。

1.1.3 串联系统的可靠性

设不可维修系统 S 由 n 个独立子系统 S_1, S_2, \dots, S_n 串联组成, 如图 1.3 所示。



图 1.3 串联系统概念图

任何一个子系统失效都会引起系统 S 的失效, 那么系统 S 的寿命 T 为

$$T = \min(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (1.31)$$

其中, T_i 是子系统 S_i 的寿命。系统 S 的可靠度为

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{\min(T_1, T_2, \dots, T_n) > t\} = P\{T_1 > t, T_2 > t, \dots, T_n > t\} \\ &= \prod_{\substack{\text{子系统独立性} \\ i=1}}^n P(T_i > t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \end{aligned} \quad (1.32)$$

其中, $R_i(t)$ 是子系统 S_i 的可靠度。

设子系统 S_i 的失效率为 $\lambda_i(t)$, 则由式(1.12)可求得:

$$R_i(t) = e^{-\int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau} \quad (1.33)$$

因此, 系统 S 的可靠度为

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau} = e^{-\int_0^t [\sum_{i=1}^n \lambda_i(\tau)] d\tau} = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (1.34)$$

其中, $\lambda(t)$ 是系统 S 的失效率, 可表示为

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (1.35)$$

上式表明, 串联系统的失效率等于所有子系统失效率之和。

1.1.4 并联系统的可靠性

系统 S 为 n 个子系统的并联, 如图 1.4 所示。

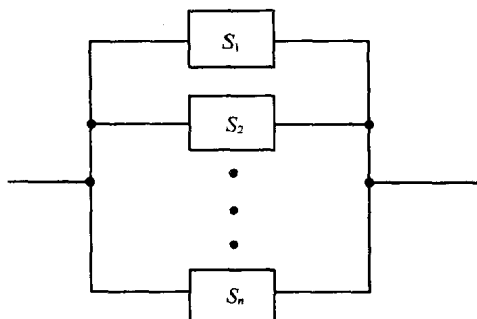


图 1.4 并联系统概念图

系统 S 由 n 个独立子系统 S_1, S_2, \dots, S_n 并联组成, 所以只有所有部件均失效时系统才失效。因此系统寿命为

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (1.36)$$

系统 S 的可靠度为

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) = P\{\max(T_1, T_2, \dots, T_n) > t\} = 1 - P\{\max(T_1, T_2, \dots, T_n) \leq t\} \\ &= 1 - P\{(T_1 \leq t), (T_2 \leq t), \dots, (T_n \leq t)\} \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n P(T_i \leq t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \end{aligned} \quad (1.37)$$

由于 $0 \leq 1 - R_i(t) < 1$, 由上式可知: 随着并联子系统的增加, 系统的可靠度将单调递增。

1.2 故障诊断概述

首先定义几个术语:

故障: 使系统不能按给定要求工作的一种不允许的性能偏离。

故障诊断: 发现故障的过程, 它包括故障报警、故障定位、故障程度估计。

故障报警: 作出系统有否故障的二值逻辑判断。

故障定位: 确定出故障的部位, 即故障源。

故障程度估计: 估计故障部位的严重程度。

故障报警、故障定位、故障程度估计三者的复杂程度依次增加。

1.2.1 故障诊断方法的分类

故障诊断的关键是提取故障的特征。故障特征是指反映故障征兆的信号经过加工处理后所得的反映设备与系统的故障种类、部位与程度的综合量。故障诊断方法按提取特征的方法的区别, 可分为如下几类:

(1) 谱分析方法

谱分析的目的: 信号中包含噪声, 为了提取特征; 故障信号的时域波形不能清楚地

反映故障的特征。

在故障诊断中比较常用的信号处理方法是谱分析。常用傅里叶谱、沃尔什谱，另外还有滤波、相关分析等。

(2) 基于动态系统数学模型的方法

又可分为检测滤波器方法、观测器方法和参数辨识方法三种。

检测滤波器方法：它将部件、执行机构和传感器的故障的输出方向分别固定在特定的方向或平面上。

观测器方法：根据残差，即系统实际输出与观测器输出的差异，判别系统是否有故障。

参数辨识方法：实时辨识出系统模型的参数，与正常时模型的参数比较，确定故障。

(3) 采用模式识别的方法

故障的模式识别：从那些反映系统的信息中抽取出反映故障的特征，并根据这些特征的不同属性，对故障进行分类。

(4) 基于神经网络的方法

利用神经网络的自学习、自归纳能力，经过一定的训练，建立起故障信号与故障分类之间映射关系。利用学习后的神经网络，实现故障诊断。

(5) 专家系统的方法

模拟专家的经验，实现故障诊断。专家系统的结构如下表所示：

专家系统结构	知识库：IF THEN 语句
	推理机：决定如何使用规则库中的规则、推理策略
	数据库：初始数据、中间结果
	解释程序：向用户解释推理的过程
	知识获取程序：管理知识库，修改增删，一致性
	人机接口：自然语言 \Leftrightarrow 内部表示形式

1.2.2 故障诊断的目的与意义

长期以来，由于人们无法准确掌握设备运行情况，因而不能预知事故的发生，所以不得不采取两种维修对策：

(1) 等设备坏了再进行维修，称为事后维修。

这种办法的问题是经济损失很大。因为等设备运行到破坏为止，往往需要昂贵的维修费；灾难性破坏需要更换设备，还可能造成人员伤亡。

(2) 定期检修设备，称预防维修。

有一定的计划性和预防性，但其缺点是如无故障，则经济损失较大。

因此合理的维修应是预知性维修。即在设备故障出现的早期就监测隐患，提前预报，以便适时、合理地采取措施。故障在线诊断技术也应运而生。

故障诊断的作用主要有：

(1) 早期预报，防止事故发生；

(2) 预知性维修，提高设备管理水平；

(3) 方便检修，缩短了维修时间，提高设备利用率；

(4) 对提高设备的设计制造水平，改善产品质量有指导意义。

1.2.3 电力电子电路故障诊断

电力电子电路的实际运行表明,大多数故障表现为功率开关器件的损坏,其中以功率开关器件的开路和直通最为常见。电力电子电路故障诊断与一般的模拟电路、数字电路的故障诊断存在较大差别,故障信息仅存在于发生故障到停电之前数十毫秒之内,因此,需要实时监控、在线诊断;另外电力电子电路的功率已达数千千瓦,模拟电路、数字电路诊断中采用的改变输入看输出的方法不再适用,只能以输出波形来诊断电力电子电路是否有故障及有何种故障。