

电气设备安装运行维修实用技术丛书

# 电气设备故障检测 诊断方法及实例

主编  
陈家斌

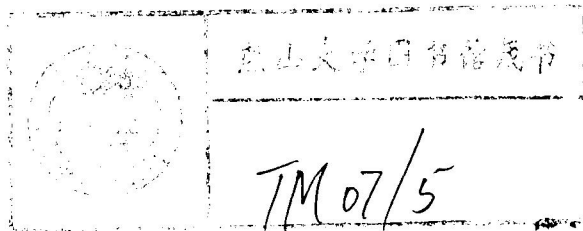


中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

电气设备安装运行维修实用技术丛书

# 电气设备故障检测 诊断及实例

● 主 编 陈家斌  
副主编 秦启根  
王广辉



中国水利水电出版社



0606713

— 14

## 内 容 提 要

本书共有 12 章, 全面系统地叙述了各类电气设备故障的检测诊断知识、方法、项目和实例, 包括变压器、断路器、互感器、避雷器、并联电容器、绝缘子、接地装置、电动机、架空电力线路、电力电缆线路等, 最后一章还介绍了电力设备故障的红外诊断技术。

本书内容丰富, 叙述精当, 实用性强, 可供城乡电气专业人员查阅使用, 也可供高校电气专业师生学习参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备故障检测诊断及实例/陈家斌主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2003

(电气设备安装运行维修实用技术丛书)

ISBN 7-5084-1560-4

I. 电… II. 陈… III. ①电气设备-故障检测②电气设备-故障诊断  
IV. TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 048255 号

书 名	电气设备安装运行维修实用技术丛书 电气设备故障检测诊断及实例
作 者	主编 陈家斌
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a> 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 26.5 印张 699 千字
版 次	2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—5100 册
定 价	45.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

## 本书编写人员名单

主 编 陈家斌

副主编 秦启根 王广辉

参 编 马 雁 杨建龙 孟凡中 牛新平  
雷 明 段志勇 朱秀文 张俊杰  
孟建峰 葛秦岭 张卫国 高 建  
李献中 张露江 魏 华 景 胜  
李强有 吴继斌 潘 建 郭宝明  
刘竞赛 单义峰 崔军朝 曹金陶  
周 军 王德华 张海涛

# 前 言

进入新世纪以来，随着各行各业的迅速发展和人民生活水平的不断提高，我国电力工业也得到了迅猛的发展。特别是近几年国家加大了城乡电网的建设与改造力度，是电力工业有史以来发展最快、投资最多的时期。在电网建设改造中大量地选用了新技术、新产品。由于电气产品发展较快，类型、品种繁多，广大电业职工急需安装、运行维护、检修方面的实用技术图书。鉴于目前国内电力专业还没有这方面的系统成套的实用技术书籍，为适应新时期加速培养电力专业技术人才，满足电力生产工作中的各专业、各层次职工的岗位工作学习培训需要，我们组织一些有实际经验的专业技术人员编写了《电气设备安装运行维修实用技术丛书》。这套丛书的出版必将对电力行业职工提高业务水平起到积极的促进作用。

这套丛书共五册，分别为：《电气设备的安装及调试》、《电气设备的运行维护及故障处理》、《电气设备故障检测诊断及实例》、《电气设备检修及试验》、《电力生产安全技术及管理》，可供读者选学选用。

这套丛书的特点：一是涵盖面较宽，较为系统全面，对 220kV 及以下电气设备的安装、运行维护、故障检测、修理及生产工作中的安全技术及安全管理等方面进行了介绍。二是内容简明扼要，通俗易懂，深入浅出，简洁直观，简单实用，易于操作。三是实用性强，全书以实际应用为出发点和归宿的原则，结合技术标准和各专业、各层次人员的应知应会要求，进行选材和组稿编写。

本册书为《电气设备故障检测诊断及实例》，系统叙述了一些常用电气设备的故障原因、类型、检测诊断方法、项目及故障实例。本书所列的故障实例，是从实际工作中总结得来的，可帮助广大电力职工正确检测诊断事故原因，提高事故诊断及速度，从而减少故障检测诊断处理的时间，避免不应有的损失，为企业和社会争取更大效益。由于电气设备的品种类型的繁多，故障的种类也具有多样性、复杂性，本书所述事故检测诊断及实例只起引导作用，并不能解决所有问题。如果读者能在本书的引导下，从实践中学习、总结、探索、提高，增强解决工作中实际问题的能力，我们也就感到欣慰了。

由于编者水平有限，书中可能存在不当或错误，敬请广大读者批评指正。

编 者

2003 年 5 月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 电气设备故障检测诊断知识</b> .....	1
第一节 设备故障率 .....	1
第二节 设备故障机理 .....	2
第三节 设备故障检测诊断方法 .....	8
第四节 设备故障检测诊断过程及内容 .....	13
第五节 利用人体感官诊断设备故障 .....	17
第六节 利用仪器仪表检测诊断设备故障 .....	22
<b>第二章 变压器的故障检测诊断</b> .....	40
第一节 变压器的故障类型及原因 .....	40
第二节 变压器的故障检测诊断方法 .....	45
第三节 变压器的故障检测诊断项目 .....	48
第四节 变压器保护动作的故障检测诊断 .....	53
第五节 变压器铁心的故障类型及检测诊断项目 .....	61
第六节 变压器铁心的故障检测诊断实例 .....	67
第七节 变压器绕组的故障类型及检测诊断项目 .....	82
第八节 变压器绕组直流电阻不平衡的故障检测诊断 .....	88
第九节 变压器绕组短路的故障检测诊断 .....	96
第十节 变压器绕组其他的故障检测诊断 .....	101
第十一节 变压器过热的故障检测诊断 .....	110
第十二节 变压器过热的故障检测诊断实例 .....	112
第十三节 变压器受潮的故障检测诊断 .....	128
第十四节 变压器喷油的故障检测诊断 .....	131
第十五节 变压器局部放电的故障检测诊断 .....	137
第十六节 变压器油的故障检测诊断 .....	143
第十七节 变压器绝缘老化的诊断 .....	155
第十八节 变压器有载分接开关的故障检测诊断 .....	158
第十九节 变压器无励磁分接开关的故障检测诊断 .....	172
第二十节 变压器故障的综合检测诊断 .....	179
<b>第三章 断路器的故障检测诊断</b> .....	186
第一节 断路器的劣化和故障机理 .....	186
第二节 油断路器的故障类型及原因 .....	189
第三节 油断路器的故障检测诊断项目 .....	195

第四节	油断路器的故障诊断实例	199
第五节	SF <sub>6</sub> 断路器的故障类型及原因	204
第六节	SF <sub>6</sub> 断路器的故障检测项目	205
第七节	SF <sub>6</sub> 断路器的故障检测诊断	209
第八节	真空断路器的故障类型及原因	211
第九节	真空断路器的故障检测诊断项目	212
第十节	真空断路器的故障检测诊断实例	214
第十一节	隔离开关的故障类型及原因	216
第十二节	隔离开关的故障检测项目	222
第十三节	隔离开关的故障检测诊断实例	224
第十四节	开关操动机构的故障类型及诊断	226
第十五节	操动机构的故障检测诊断实例	232
<b>第四章</b>	<b>互感器的故障检测诊断</b>	<b>242</b>
第一节	互感器的故障类型及原因	242
第二节	互感器的故障检测诊断项目	244
第三节	互感器的故障检测诊断实例	248
<b>第五章</b>	<b>避雷器的故障检测诊断</b>	<b>257</b>
第一节	避雷器的故障类型及原因	257
第二节	金属氧化物避雷器的故障检测诊断项目	258
第三节	避雷器的故障检测诊断实例	260
<b>第六章</b>	<b>并联电容器的故障检测诊断</b>	<b>267</b>
第一节	并联电容器的故障类型及原因	267
第二节	电容器的故障检测诊断方法	271
第三节	电容器保护装置的動作原因及故障检测诊断	274
第四节	密集型电容器内部的故障检测诊断	277
第五节	电容器的故障检测诊断实例	279
<b>第七章</b>	<b>绝缘子的故障检测诊断</b>	<b>286</b>
第一节	绝缘子和绝缘套管的故障类型及原因	286
第二节	绝缘子和套管的故障检测诊断及项目	290
第三节	绝缘子和套管的故障检测诊断实例	295
<b>第八章</b>	<b>接地装置的故障检测诊断</b>	<b>302</b>
第一节	接地装置的故障类型及原因	302
第二节	电气接地电阻的测量	305
第三节	接地装置的故障检测诊断实例	308
<b>第九章</b>	<b>电动机的故障检测诊断</b>	<b>311</b>
第一节	电动机的故障类型及原因	311
第二节	电动机的故障检测诊断及项目	317
第三节	电动机的故障检测诊断	321
第四节	电动机不能起动及转速偏低的故障诊断	332
第五节	电动机不能起动及转速偏低的故障诊断实例	336

第六节	电动机振动和响声异常的故障检测诊断	345
第七节	电动机过热的故障检测诊断	349
第八节	电动机过热的故障检测诊断实例	352
<b>第十章</b>	<b>架空电力线路的故障检测诊断</b>	<b>358</b>
第一节	架空电力线路的故障类型及原因	358
第二节	架空电力线路的测试诊断项目	361
第三节	架空电力线路的故障检测查找实例	362
<b>第十一章</b>	<b>电力电缆线路的故障检测诊断</b>	<b>371</b>
第一节	电力电缆线路的故障类型及原因	371
第二节	电力电缆线路的故障检测诊断及项目	373
第三节	电力电缆线路的故障检测诊断步骤	379
第四节	电力电缆线路的故障检测诊断方法及其选用	384
第五节	电力电缆线路的故障检测诊断实例	385
<b>第十二章</b>	<b>电力设备故障的红外诊断</b>	<b>392</b>
第一节	电力设备故障红外诊断的原理和特点	392
第二节	红外诊断的仪器及选用	394
第三节	电力设备外部故障的红外诊断	398
第四节	电力设备内部故障的红外诊断	403



# 第一章 电气设备故障检测诊断知识

## 第一节 设备故障率

设备在整个服役期限内，故障发生的次数和使用时间之间是有着宏观规律的，虽然对每一台设备来说，出现故障的次数和使用寿命各不相同，但其发展规律都是一致的，图 1-1 是设备故障率和使用寿命的关系曲线，其形状两边高，中间低凹平坦，形似一个浴盆，故称设备故障发生的“浴盆”曲线。

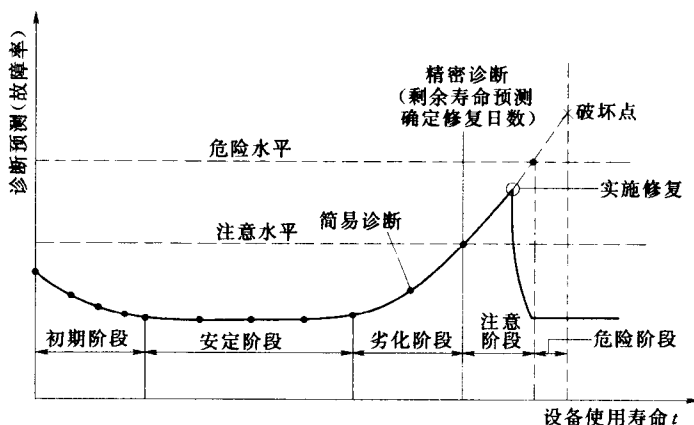


图 1-1 设备故障率与使用时间的关系

### 一、设备故障率时段

从故障的“浴盆”曲线中，可以看出，在整个服役期内，设备故障率通常可分为三个阶段。

#### (一) 初期故障率

设备刚投入运行时，初期故障率较高，原因是设备刚投入运行，必然会暴露一些制造、安装、调试中遗留的问题，而且设备刚投入运行，操作和维护都有一个适应过程。随着对设备性能的逐步熟悉和暴露问题的解决，故障率就逐渐降低。

#### (二) 稳定期的故障率

设备在进入稳定期后，故障率较低，而且很稳定，这段时间设备运行较正常，一般只有个别突发性的故障出现。

#### (三) 劣化期的故障率

随着服役时间的推移，设备逐步进入劣化期，劣化现象逐渐显著。以电动机为例，在服役 15~20 年之后，绝缘老化征象明显，如泄漏电流增加、绝缘电阻下降、局部放电增加等。在这一时期，由于劣化趋势发展，设备故障率又逐步升高，终于进入到危险水平，如在此时不采取措施进行维修，则设备最终将因故障而导致损坏和失效。

## 二、设备服役期各时段的检查维修

在掌握了设备运行的这种宏观规律后,如果应用设备诊断技术,对设备采取状态维修,根据不同服役阶段采取不同的措施,及时进行检查与维修,就可以延长设备的服役寿命。具体办法如下:

(1) 初期阶段。在设备试运行阶段应严格验收和认真调整,以减少设备隐患和故障率。同时在初期阶段,设备点检周期要短一些,以及时发现故障,排除故障。

(2) 稳定期阶段。必须维持正常的点检和操作管理,但点检的周期可适当长一些。

(3) 劣化期阶段。设备进入劣化期后,故障后逐渐增加。这时必须适当地增加点检的次数。当简易诊断发现故障征兆和状态参数已经达到应引起注意的水平时,就应该立即采取精密诊断,对故障部位和程度进行准确的判定,作出相应的维修方案和措施,通过维修,排除故障和隐患,使设备恢复原有性能,设备重新进入低故障的稳定值,这样就延长了设备的使用寿命。

诊断技术的应用使设备能进行状态维修,减少了故障率,延长了设备服役期限,这是诊断技术促进设备的科学管理的结果。

## 第二节 设备故障机理

### 一、设备故障形态

#### (一) 设备的故障形态

设备故障形态或故障模式,是以不同表现的形态来描述故障现象的一种表征。如机电设备常见故障形态如表 1-1。

表 1-1 机电设备的常见故障形态

设 备	常见故障形态	设 备	常见故障形态
通用机械设备	疲劳、损耗、冲击、变形、折断和破裂等	流量控制的各种阀门	关闭失效、错误开关、堵塞、泄漏及破损等
风机、水泵及涡轮机械	误启动、误停机、超转速、倒反转、异常振动、运转部分破损等	继电器开关	腐蚀变形、疲劳断裂、绝缘不良、严重损耗等
通用电力设备	电阻变化、局部放电、接地不良、短路、漏电及断路等	计量检测装置	疲劳劣化、示值不准以及信号异常等
电动机和发电机	绝缘劣化、温升过大、碳刷磨损、腐蚀变形及零件磨损等	齿轮零件	疲劳断裂、点蚀剥落、熔融烧伤、磨损腐蚀、塑性变形等
工业槽、罐及压力容器	腐蚀泄漏、隔热破坏,不能加热和冷却、出现疲劳裂纹等	滚动轴承	剥落、裂纹、压痕、磨损、腐蚀、烧伤、锈蚀、污斑、蠕变
换热器及管路系统	管道堵塞、蠕变破坏、管系共振,以及管路变形等	设备支承结构	变形、松动、缺损和脱落等

#### (二) 电力设备故障形态

电力设备常见的故障形态如:异常振动、疲劳、腐蚀、蠕变、磨损、脆性及塑性断裂、绝缘劣化等。

电力设备故障形态的概率分布典型调查如表 1-2。

从表 1-2 中看出异常振动故障形态在转动机械中所占比例达到 30%。静止设备腐蚀与裂纹比例最大，两者合计近 50%。电力设备中，绝缘劣化所占比例达到 62%。

针对概率最大的故障形态设置监测装置加以诊断，可有效地提高故障诊断的可靠性。

表 1-2 设备故障形态分布

故障形态	转动设备	静止设备	电气设备	仪表设备	其他	合计
异常振动	72		1	1	1	75
磨损	47	10		3	1	61
腐蚀	6	44	1	3	2	56
裂纹	20	25		1	2	48
绝缘劣化	2	3	28		1	34
异常声音	27			2		29
疲劳	18	8		2	1	29
泄漏	6	14	3		3	26
油劣化	7	5			6	18
材质劣化	6	8	1	2	2	19
松弛	8	2			2	12
异常温度	5	3		1	2	11
堵塞		5			2	7
剥离	4	4				8
其他	9	6	11	1	4	31
合计	237	137	45	16	29	461

## 二、设备故障机理

设备故障机理是指诱发设备系统，零部件发生故障的物理与化学过程以及电学与机械学过程。也可以说是形成故障源的原因。故障机理包括三个主要因素。

### (一) 对象状态 (内因)

指发生故障的对象本身，其内部状态与结构对故障的抑制和诱发作用，即内因的作用。如设备的功能、特性、强度内部应力、内部缺陷、设计方法、安全系数和使用条件等。

### (二) 外因

指能引起设备系统，零部件发生故障的外部破坏因素，如动作应力 (体重、电流、电压、辐射能等)，环境应力 (温度、湿度、压力、放射线、日照等)，人为的失误 (误操作、误装配、调整不当等) 以及时间因素 (环境等的时间变化、负荷周期、时间的劣化) 等故障诱因。

### (三) 结果

指输出的异常状态，故障模式等。

图 1-2 示出了故障机理与故障模式因果关系图。从图 1-2 中可见，故障模式相同，其故障机理不一定相同。同一故障机理，可能出现不同的故障模式。也就是说，故障模式反映着故障机理的差别，纵然故障模式不同，都可能是同一机理派生的。

## 三、异常振动

电力设备，特别是旋转机械的异常振动在故障中占有相当大的比例、按不同的分类方法，异常振动可分为：

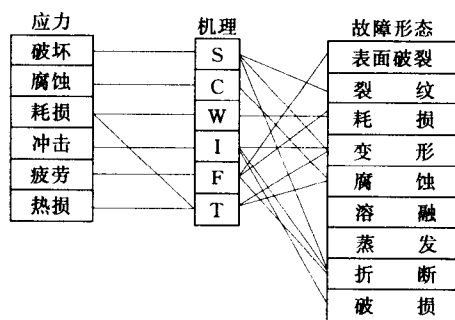


图 1-2 故障机理与故障形态的关系

(1) 按振动原因分：转子不平衡；转轴不对中；转子摩擦；轴承缺陷；油膜振荡及涡动；电气、空气动力或水动力。

(2) 按振动频率分：倍频振动；分频振动。

(3) 按振动发生部位分：转轴，包括各类机器转子的轴颈，轴端及叶片等；轴承，包括油膜滑动轴承，滚动轴承等；壳体，包括轴承座，机壳等；基础，指机座，钢筋混凝土基础；其他，包括阀门，阀杆及各种管道等结构。

(4) 按振幅方位分：径向振动，指沿转轴某截面直径方向的振动，包括水平振动和垂直振动；轴

向振动，指沿转轴轴线方向的振动；扭转振动，指沿转轴旋转方向的振动。

异常振动机理有以下几种。

#### (一) 转子不平衡振动

引起转子不平衡原因是多方面的，例如：转子的材质不均匀；制造、安装过程中产生的误差；由于设计、结构等方面的原因使得制造出来的转子，几何中心线或多或少地偏离其旋转线。这样当转子旋转时，转子各微小单元质量的离心惯性力组成的力系是一个不平衡的力系，引起机器产生异常振动。

#### (二) 转轴不对中引起振动

造成不对中的原因有两种：

(1) 由弯曲轴而产生轴承座安装不正确所致。

(2) 在同一轴系中的不同机器的转轴中心线偏置。不对中会造成转子的附加弯距以及轴承中的附加负荷致使各轴承之间负荷重新分配，从而引起机组异常振动。

#### (三) 转子摩擦

(1) 转轴材料内摩擦会引起振动。

(2) 叶轮与轴的紧配合会造成不稳定振动。

(3) 转子动静接触时摩擦引起振动。

#### (四) 轴承缺陷

与不平衡引起的正弦振动相反，由轴承缺陷所引起的振动信号属于脉冲性质，并且它具有很陡的边缘。这些陡的前沿会在高频处出现大量的谐波分量。

#### (五) 电磁力引起的异常振动

电机异常振动的原因从电磁力角度分析有定子异常产生的电磁振动、气隙不均匀引起电磁振动和转子导体异常引起的电磁振，其机理也不尽相同。

(1) 定子异常产生的电磁振动。当电机运行时，转子在定子内腔旋转，由于定、转子磁场的相互作用，定子机座将受到一个旋转力波的作用，而发生周期性的变形或振动，这种旋转力波形成的磁拉力，随转子旋转而转动，当旋转磁场回转一周，磁场力和电磁振动变化两次（2级电机），当定子三相磁场不对称（电网三相电压不平衡或缺相运行，定子绕组三相不对称等），定子铁心和定子绕组松动时，将会产生异常振动和谐波。

(2) 气隙不均匀引起电磁振动。气隙不均匀（偏心）分静态和动态不均匀。静态不均匀是由于加工不精确和装配不良，使定子中心与转子轴心不重合产生偏心，过大的偏心值将在电机气隙中产生很大的单边磁拉力，产生电磁振动。动态偏心是由于转轴挠曲或转子铁心不

圆造成的。

(3) 转子导体异常引起电磁振动。当笼型异步电机笼条断裂，绕线型电动机转子回路电气不平衡时，转子绕组故障处电流无法流过产生不平衡电磁力，旋转磁场在故障点追越转子时，磁场强度发生变化，其负荷电流发生节拍脉振。

#### 四、疲劳裂纹形成机理

疲劳故障模式分为高频疲劳、低频疲劳、高温疲劳、热疲劳和热机械疲劳、腐蚀疲劳等。

高频疲劳是工程中最常见的疲劳故障，它是低应力（循环应力  $\sigma \ll \sigma_s$  屈服极限）、长寿命（失效循环数  $N > 10^5$  次），其特点是突发性、局部性及对缺陷的敏感性，如汽机叶片等损伤。

低频疲劳亦称应变疲劳或塑性疲劳，其循环应力  $\sigma \geq \sigma_s$  屈服极限，失效的循环数  $N < 10^5$  次，如锅炉汽包及压力容器等损伤。

高温疲劳是部件循环应力处于高温条件下产生的疲劳，如汽轮机转子等各类损伤，内部产生较大的热应力的情况。由于热应力的交变作用而引起的失效。在交变热应力作用下产生叠加有交变的机械应力，称为热机械疲劳。如火电厂锅炉管烟气侧。

腐蚀疲劳是其部件在腐蚀介质和循环应力共同作用下导致的失效，如汽轮机叶片、低压转子主轴。

疲劳裂纹发源于应力集中部位，多处于部件表面，只有当内部具有较严重的缺陷时，裂纹才发源于内部或表层之下，从金属微观来看，疲劳裂纹产生于滑移高度集中的地方。

#### 五、腐蚀机理

腐蚀按机理分为化学腐蚀和电化学腐蚀。

##### 1. 化学腐蚀

化学腐蚀是金属与介质界面之间发生的化学反应而引起的损坏。

化学腐蚀其反应式： $\text{Me} (\text{金属}) + \text{X} (\text{介质}) \longrightarrow \text{MeX} (\text{腐蚀产物})$ 。

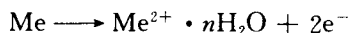
其特点：腐蚀产物直接在参与反应的金属表面形成连续的膜，该膜能减缓腐蚀速度。

##### 2. 电化学腐蚀

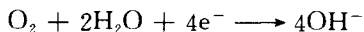
电化学腐蚀是金属表面与电解质发生电化学反应，阳极发生溶解的腐蚀现象。

电化学腐蚀化学反应有以下两个过程：

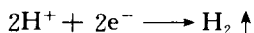
(1) 阳极过程。金属以水化离子的形式进入电解液，而把当量的电子留在金属中



(2) 阴极过程。去极化剂吸收金属中阳极过程放出剩余电子，当电解液中存在氧时



当电解液呈酸性时



其特点：电化学腐蚀产物在电解液中形成，对阳极不起保护作用，阳极和阴极过程可在电解液和金属界面的不同区域局部发生。

#### 六、蠕变机理

金属在高于一定温度下受到恒应力作用，即使应力小于屈服强度也会随着时间的增长而缓慢地产生塑性变形，这种现象称为蠕变。

蠕变是经过空隙的产生、发展连接成微小龟裂、再发展直到破裂这一过程进行的。蠕变

过程中金属组织的变化主要是晶界滑动、滑移（第一阶段）、亚晶形成（第Ⅰ、Ⅲ阶级）、新相的析出、碳化物的集聚、球化和合金元素的再分配。

## 七、磨损

磨损是设备故障最常见的模式，据统计全世界总能耗的 $1/3\sim 1/2$ 消耗于摩擦，一般机器中 $75\%\sim 85\%$ 的零部件是因磨损而报废的。磨损按其表面物质损耗的不同机理分为粘着磨损、磨粒磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损、微动磨损和表面疲劳磨损，现分别予以叙述。

### （一）粘着磨损

（1）氧化型磨损。摩擦界面为氧化膜，无明显的粘着现象，又称轻微磨损。

（2）金属型磨损。摩擦界面为金属，有明显的粘着现象，摩擦率高，又称严重磨损。

（3）磨合磨损。新投入运行的滑动轴承，经磨合，接触面上的微凸体被磨去，使配合面上的微观形貌处于平衡状态。

（4）拉伤。在摩擦之间，由于形成局部焊合，在滑动摩擦方面形成很狭窄的条带或沟槽，此为拉伤。拉伤表面的金相组织会出现一薄硬层，为超细粒组织。

### （二）磨粒磨损

（1）刨削磨损。表面金属成大颗粒状从摩擦面剥落，磨损面有严重的沟槽。

（2）高应力磨削磨损。由于在磨粒接触点压应力集中，金属表面韧性组元发生塑性流动和疲劳，而脆性组元开裂。应力超过磨料的压脆强度。

（3）低应力擦伤磨损。摩擦面受到轻微擦伤，施于磨粒上的应力不超过磨料的压脆强度。

### （三）冲蚀磨损

固体、液体、气体不断地向固体靶面进行撞击而产生的磨损现象称为冲蚀。例如汽轮机末级动叶片的水滴冲蚀，锅炉高温段省煤器固体粒子冲蚀。

### （四）腐蚀磨损

机械作用和环境介质的腐蚀作用同时存在所引起的磨损称为腐蚀磨损。

（1）氧化磨损。金属表面受到空气中或润滑剂中氧的作用所形成的氧化膜，处于不断生长或减薄与增厚的交替循环之中。

（2）腐蚀介质磨损。指除氧以外的各种腐蚀介质，如：酸、碱、盐作用下在摩擦过程中的生成物不断产生和磨耗的过程。内燃机汽缸活塞组件的磨损是典型的腐蚀磨损的例子。

### （五）微动磨损

两接触表面之间在外载荷作用下产生切向往复振动（振幅一般不超过 $0.1\text{mm}$ ），由此发生的磨损现象称为微动磨损。

### （六）表面疲劳磨损

固体表面在循环应力周期地作用于摩擦表面时，当接触区的应力超过材料的屈服点时，产生塑性变形并不断硬化，出现显微疲劳裂纹，裂纹发展造成表面颗粒脱落，形成表面麻坑。这一现象称为表面疲劳磨损。

按表面疲劳磨损的机理可分为滚动疲劳磨损和滑动疲劳磨损。

（1）滚动疲劳磨损。表面硬度升高，表层晶粒产生塑性流变，表层组织的外层为白层区，该区碳化物减少、合金元素增加故硬度明显升高。

（2）滑动疲劳磨损。固体相互摩擦表面的粗糙度使得表面接触集中在若干接触点上，在法向力的作用下，实际接触斑点互相挤压产生相应的应力和应变。在摩擦面相互滑移时，其表层下一定体积的材料所承受的这种作用反复进行，逐渐形成应力集中源，继而产生裂纹，最

后各裂纹交叉汇合割裂材料造成磨屑。

## 八、脆性及塑性断裂

### (一) 塑性断裂

当部件所承受的应力大于材料的屈服强度时，将发生塑性变形。如果应力进一步增加就可能发生断裂，称为塑性断裂，它一般发生于静力过载或大能量冲出的恶劣工况下。其特征为：

- (1) 这类部件的损坏特征与拉伸、冲击、扭转变曲和剪切断口相似。
- (2) 在裂纹或断口附近有宏观塑性变形。
- (3) 断口微观形貌主要是韧窝。
- (4) 在裂纹和断口附近的金属组织有明显的流变特征。

### (二) 脆性断裂

部件的脆性断裂是指部件材料的力学性能变化不大，而韧性急剧下降，断裂时几乎没有塑性变形，断裂过程极快而吸收能量极低的突发性破坏现象。

一般来说，只有处于脆性状态的零件，才能发生脆性损坏。产生脆性断裂的加载条件是静载或冲击。脆断时的应力大大低于材料的屈服强度，属于平面应变条件下的裂纹失稳扩展。其特征为：

- (1) 部件断裂成两块或碎成多块。
- (2) 断口与最大正应力垂直，断口周围塑性变形很小。
- (3) 断口粗糙，有金属光泽，有时断口上有人字形或放射状纹路。
- (4) 其微观特征沿晶型断裂呈冰糖块花样，穿晶型断裂呈各种解理花样。

## 九、绝缘老化

### (一) 绝缘老化因子及特征

绝缘应力又称影响因子，可分为热、电、环境和机械因子四种，通常称为 TEOM 因子。

(1) 热老化。热老化是由热因子引起的，绝缘材料（树脂）由于收缩热分解等产生空隙及剥落而造成的老化。即遵循温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ，则寿命减半的规则。

(2) 电老化。电老化是由绝缘层内的空隙放电，在高压电场作用下产生局部放电，进而产生树枝状放电而引起的老化。

(3) 机械老化。机械老化是由起动、突然短路等异常运行时电磁力、热应力、振动等高循环疲劳造成的绝缘层老化。

(4) 环境老化。环境老化是由环境的温度、灰尘、油污、盐分及酸、碱等腐蚀性物质使绝缘层遭受膨胀、润湿腐蚀等而形成的老化。

### (二) 绝缘老化机理

绝缘层的老化是热老化、电老化、机械老化和环境老化诸因素的重叠而复合的老化过程。

#### 1. 初期

云母带之间的树脂漆，云母带与导体之间的接触良好，基本上没有空隙。

#### 2. 老化状态

由于所浸树脂漆的收缩，热分解而造成化学键断裂，由于产生分解气体而形成的空隙，导体和绝缘层的热膨胀系数之差而引起的剥落等，往往使整个绝缘层产生许多小空隙和局部的大空隙。

### 3. 寿命期

随着绝缘层整体的空隙量增加而云母片断裂，局部产生大空隙，随之局部空隙相互之间形成联系，寿命终止。

## 第三节 设备故障检测诊断方法

随着运行的时间推移，设备故障的一般形态向初期故障、偶发故障、磨损故障发展。预防性维修对磨损故障是很有效的。典型的例子是更换设备的滚动轴承、断路器进行定期的检修等。对这些设备根据设计数据和运行实际情况分出开始达到频繁发生磨损故障的使用时间，在适当时期进行维修和更换零件，以预防故障的发生。

而偶发故障是随机发生的，但与其对应设备的诊断技术，即监控技术是密切相关的。乍看起来似乎是不规则发生设备的异常，如果微观地来看，也归属于发生故障的部位和构成单元，分别对各个单元进行检测，判定有无异常情况，万一发现异常时可对其进展情况加以监视，就能够在发展成设备的重大故障之前采取适当对策。

如果能够有效地应用诊断技术，就能够知道构成设备的元件是否接近产生磨损故障的时期，所以能够把以时间为基础的维修转变成以状态为基础的维修。

为了进行诊断，下列三项工作是必要的：

- (1) 与异常或故障相对应的信号的监测。
- (2) 引出信号的特征，也就是信号处理。
- (3) 识别故障原因，标定故障部位，即用于判定故障的软件。

因此，要研究设备的异常和老化有关的故障机理，这一领域对提高可靠性和维修效果是很重要的，但是还没有得到充分发展，故障结构的分析、老化速度和寿命等很大问题随着科技的发展逐步进行解决。

### 一、用于诊断的传感器技术

设备诊断技术的基础在于掌握当前的状态，因此暂且不讨论传感器技术所要完成的重要任务，而是要得到对应于被检测设备的状态量。

电力设备的寿命如图 1-3 所示，当按其主要功能分别研究时，可以分成绝缘件、触点（导体）、机构部分的寿命，并分别规定老化因子。还必须考虑环境加给它们的应力。表 1-3 给出

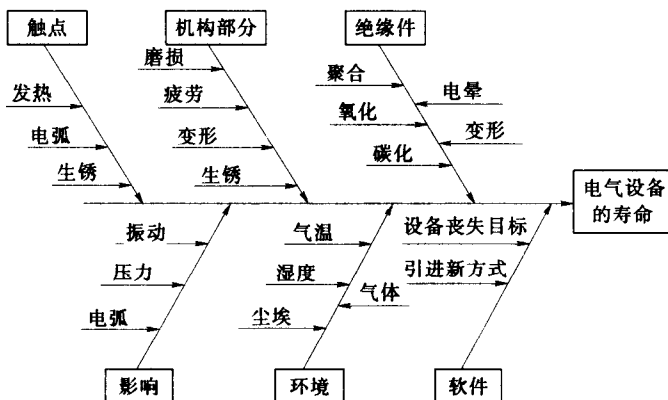


图 1-3 与电气设备的寿命有关的因素



适用于检测这些老化因子的传感器的典型例子。由此可以理解在设备诊断技术领域里，很需要行之有效的传感器技术。

表 1-3 适用于设备诊断的传感器

测定	传感器	应用的例子
振动测定	(1) 振动传感器 (2) 波形处理	(1) 轴承老化诊断 (2) 不平衡调整
音响测定	(1) 音响传感器 (2) 超声波传感器	(1) 轴承部分损伤检测局部放电声测定 (2) 超声波探伤法
温度测定	(1) 热电偶温度计 (2) 电阻温度计 (3) 放射线温度计 (4) 红外线传感器	(1) 绕组温度监视 (2) 轴承温度监视 (3) 转动部位温度测定 (4) 因温度分布而造成的异常损耗部位的检测
压力测定	压力传感器	流路堵塞的诊断
流量测定	流量传感器	(1) 冷却水量 (2) 冷却油量的测定
应变测定	变位传感器	应力测定
光测定	光传感器	(1) 断路器行程特性的测定 (2) 气体绝缘内部异常检测装置
放射测定	放射线传感器 X 光片	(1) 配管壁厚的测定 (2) 水垢粘附状态的检查 (3) 机器破损的检查
音响发射	超声波传感器	大型构件、工作中的压力窗口容器的监视
化学计量	气体色谱仪气体传感器	(1) 变压器油中气体分析 (2) 铁心监视器 (3) 润滑油诊断

## 二、设备故障诊断的基本方法

由于设备故障的复杂性的设备故障与征兆之间关系的复杂性，形成了设备故障诊断是一种探索性的过程这一特点。就设备故障诊断技术这一学科来说，重点不只在研究故障本身，而更在于研究故障诊断的方法。故障诊断过程由于其复杂性，不可能只采用单一的方法，而要采用多种方法。可以说，凡是对故障诊断能起作用的方法就要利用。必须从各种学科中广泛探求有利于故障诊断的原理、方法和手段，这就使得故障诊断技术呈现多学科交叉这一特点。

### (一) 传统的故障诊断方法

(1) 利用各种物理的和化学的原理和手段，通过伴随故障出现的各种物理和化学现象，直接检测故障。例如：可以利用振动、声、光、热、电、磁、射线、化学等多种手段，观测其变化规律和特征，用以直接检测和诊断故障。这种方法形象、快速，十分有效，但只能检测部分故障。

(2) 利用故障所对应的征兆来诊断故障是最常用、最成熟的方法。以旋转机械为例，振动及其频谱特性的征兆是最能反映故障特点，最有利于进行故障诊断的手段。为此，要深入