

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。

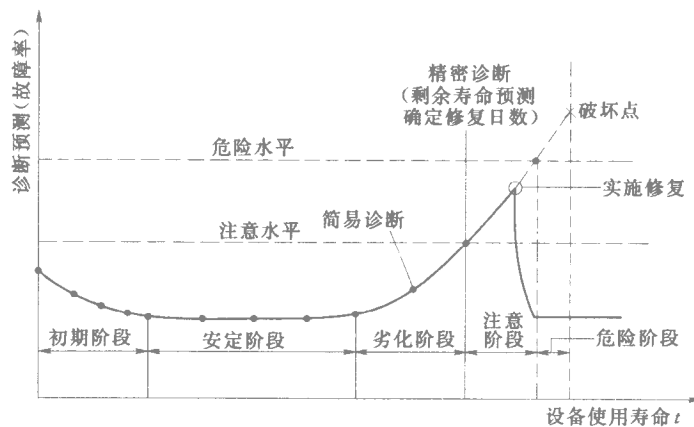


图 1-1 设备故障率与使用时间的关系

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	开闭失效、错误开关、闭塞、泄漏及破损等
风机、水泵及涡轮机械	误起动、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、磨损磨蚀、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：

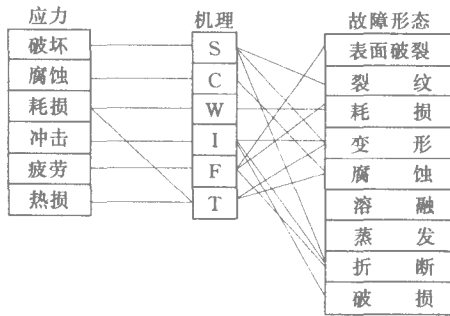


图 1-2 故障机理与故障形态的关系

(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： Me （金属）+ X （介质） \longrightarrow MeX （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

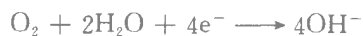
电化学腐蚀是金属表面与电解质发生电化学反应，阳极发生溶解的腐蚀现象。

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Ⅱ、Ⅲ阶段）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，处于不断生灭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 0.1mm ）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、扭转弯曲和剪切断口相似。
- (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°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

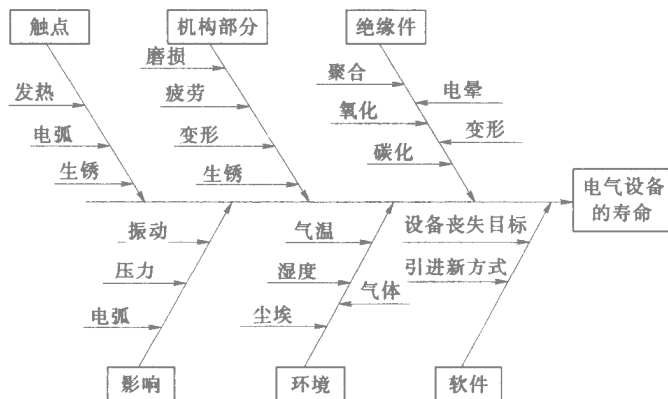


图 1-3 与电气设备的寿命有关的因素

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	大型结构件、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

研究各种故障的机理，研究各种故障所对应的征兆。在诊断过程中，首先分析设备运转中所获取的各种信号，提取信号中的各种特征信息，从中获取与故障相关的征兆，利用征兆进行故障诊断。由于故障与各种征兆间并不存在简单的一一对应关系，因此利用征兆进行故障诊断往往是一个反复探索和求解的过程。

（二）故障的智能诊断方法

在上述传统的诊断方法的基础上，将人工智能的理论和方法用于故障诊断，发展智能化的诊断方法，是故障诊断一条全新的途径，目前已广泛应用，成为设备故障诊断的主要方向。

人工智能的目的是使计算机去做原来只有人才能做的智能任务，包括推理、理解、规划、决策、抽象、学习等功能。专家系统是实现人工智能的重要形式，目前已广泛用于诊断，获得了很好的效果。

专家系统由知识库、推理以及工作存储空间（包括数据库）组成。实际的专家系统还应有知识获取模块、知识库管理维护模块、解释模块、显示模块以及人机界面等。

专家系统的核心问题是知识的获取和知识的表示。知识获取是专家系统的“瓶颈”，合理的知识表示方法能合理地组织知识，提高专家系统的能力。为了使诊断专家系统拥有丰富的知识，必须进行大量的工作。要对设备的各种故障进行机理分析，其中有的可建立数学模型，进行理论分析；要进行现场测试和模型试验；特别要总结该领域专家的诊断经验，整理形成适合于计算机处理的知识信息；还要研究计算机的知识自动获取的理论和方法。这些都是使专家系统有效工作所必需的。

（三）故障诊断的数学方法

设备故障诊断技术作为一门学科，尚处于发展之中，必须广泛利用各学科的最新科技成就，特别要借助各种有效的数学工具。其中包括基于模式识别的诊断方法，基于概率统计的诊断方法，基于模糊数学的诊断方法，基于可靠性分析和故障分析的诊断方法，以及神经网络、小波变换、分形几何等新发展的数学分支在故障诊断中的应用等。

三、设备诊断方式及功能

（一）设备诊断进行方式

- （1）功能诊断和运行诊断。
- （2）定期诊断和连续诊断。
- （3）直接诊断和间接诊断。
- （4）常规工况诊断和特殊工况诊断。
- （5）在线诊断和离线诊断。

（二）设备诊断技术的功能

设备诊断技术涉及各方面知识领域，以及对设备故障机理的研究。它必须根据设备在使用过程中的故障机理、劣化过程及机理，通过采用对各种状态参数的检测与分析，劣化程度的检测和分析，性能强度的检测和分析等各种方法，分析和判断设备的运行状态，确定设备故障部位和劣化程度，预测设备的可靠性与寿命，制定最合适的修理方案和检修周期。设备诊断技术的功能如图 1-4 所示。

四、设备检测诊断的层次

设备检测诊断技术的基本层次一般分为简易诊断和精密诊断两个层次，简易诊断是诊断的基础，只有当简易诊断难以确诊时，才选用精密诊断。其两个层次的相互关系如图 1-5 所示。

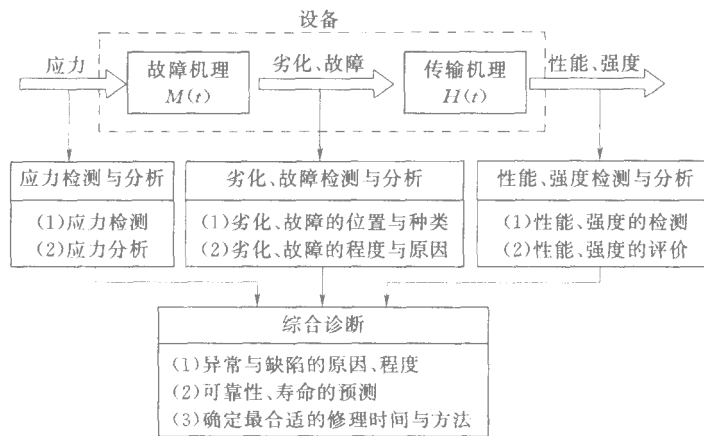


图 1-4 设备诊断技术的功能

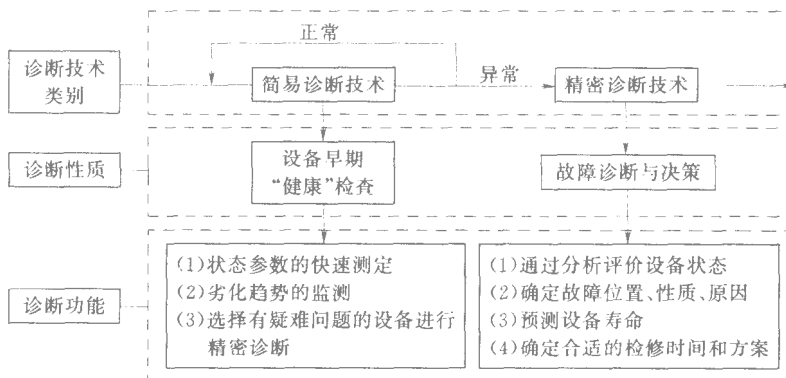


图 1-5 设备检测诊断技术的基本层次

(一) 简易诊断

简易诊断技术是使用简易的仪器和方法，对设备技术状态快速作出概括性评价技术。一般包括以下几个特点：

- (1) 使用各种比较简单并易于携带的诊断仪器及检测仪表。
- (2) 由设备维护检修人员在生产现场进行检测和分析。
- (3) 仅对设备有无故障，严重程度及其发展趋势做出定性的初始判断。
- (4) 涉及技术知识和经验比较简单，易于学习和掌握。
- (5) 需要把采集的故障信号进行储存归档，并确定设备是否需要作精密诊断检修。

设备的状态监测包括定期在线监测，也都属于简易诊断技术范围，它主要通过能对反映设备技术状态的一些参数，看其是否正常。当存在异常和超限值时，应能发出警报和自动停机。但状态监测并不同于故障的识别和判断。

(二) 精密诊断

精密诊断技术是使用精密仪器和方法，对简易诊断难以确诊设备作出详细评价的技术，它一般具有以下特点：

- (1) 使用各种比较复杂的诊断分析仪器或者专用诊断设备。

- (2) 由具有一定经验的工程技术人员及专家在生产现场或诊断中心进行。
- (3) 对设备故障的部位, 发生原因及故障类型进行识别, 属于定量诊断。
- (4) 估算故障的危险程度, 预测其发展。
- (5) 确定消除故障并恢复设备正常状态的方法。
- (6) 涉及的技术知识和工作经验比较复杂, 需要较多的学科配合。
- (7) 进行深入的信号处理, 以及根据需要预测设备寿命。

近年开发的一些计算机辅助设备诊断系统和人工智能(专家系统等)也都属于精密诊断的范畴。

(三) 简易诊断和精密诊断的配合关系

由于简易诊断的操作和使用手段比较简单, 投资少并容易掌握, 因而在一般情况下, 多数机械设备(也包括一般电动机)都采用简易诊断来诊断设备的现时状态。只有对在简易诊断中提出疑难问题的设备, 以及大型、精密和关键性的设备, 才使用精密诊断技术。两种诊断技术的合理配合使用, 才能使设备诊断技术在实际应用中既经济又有效。

五、设备故障诊断技术的发展

电气设备的诊断技术是指通过对其电气绝缘的试验和各种特性的测量, 了解及评估它们在运行过程中状态, 从而能早期发现故障的技术。电气设备的诊断技术大体经历了以下 3 个阶段。

(一) 停电试验阶段

这一阶段起始于 20 世纪 50 年代初期, 采用常规的预防性试验方法测量绝缘电阻、泄漏电流并进行交流耐压试验。通过这些试验对保证电器设备安全运行起到了积极作用, 有的诊断技术一直延续至今。

(二) 带电测量阶段

这一阶段起始于 20 世纪 70 年代左右, 当时人们仅仅是为了不停电而对电器设备的某些绝缘参数进行直接测量。其项目主要是测量设备泄漏电流和介质损耗因数。显然测量项目少, 应用范围小, 因而没有得到普及和广泛应用。

(三) 在线监测阶段

这一阶段起始 20 世纪 90 年代, 随着科学技术的发展, 在线监测诊断技术在借鉴国外诊断技术的基础上, 对局部放电、振动监测等方面进行了不少研究。随着先进的传感器技术、计算机技术和数字波形采集与处理等高新技术的应用, 高压电器的在线监测技术必须将向更高阶段发展, 实现全自动在线监测系统与专家诊断系统的完美结合, 从而构成智能化高压电器绝缘及特性的在线监测与诊断系统, 并可纳入整个电网的自动化系统。

随着科学技术的不断发展, 诊断技术也必然会不断发展, 其方向为:

- (1) 先进检测技术、手段、设备的研制开发, 广泛采用高可靠性监测设备。
- (2) 由单纯的监测诊断向监测、诊断、管理、管理系统化, 集成化发展, 直接服务于设备状态检修。
- (3) 集中式诊断系统向集中分散诊断系统发展。
- (4) 人工智能诊断系统开发(专家系统、神经网络、模糊集)。
- (5) 预测技术(剩余寿命评价)的开发及应用。
- (6) 设备诊断理论和诊断方法的研究, 故障机理的研究, 诊断数据的形成和完善。

第四节 设备故障检测诊断过程及内容

一、设备故障诊断的过程

设备故障诊断的内容包括状态监测、分析诊断和故障预测三个方面。其具体实施过程可以归纳为以下四个方面。

1. 信号采集

开关设备在运行过程中必然会有力、热、振动及能量等各种量的变化，由此会产生各种不同信息。根据不同的诊断需要，选择能表征设备工作状态的不同信号，如振动、压力、温度等是十分必要的。这些信号一般是用不同的传感器来拾取的。

2. 信号处理

这是将采集到的信号进行分类处理、加工，获得能表征机器特征过程，也称特征提取过程，如对振动信号从时域变换到频域进行频谱分析。

3. 状态识别

将经过信号处理后获得的开关设备特征参数与规定的允许参数或判别参数进行比较，对比以确定设备所处的状态，是否存在故障及故障的类型和性质等。为此应正确制定相应的判别准则和诊断策略。

4. 诊断决策

根据对开关设备状态的判断，决定应采取的对策和措施，同时根据当前信号预测状态可能发展的趋势，进行趋势分析。上述诊断内容可用图 1-6 来表示。

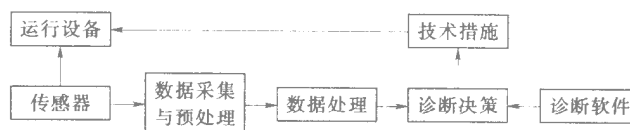


图 1-6 设备诊断过程框图

使用传感器从被诊断的设备或系统中获得原始信息是设备诊断的第一步。传感器使用方式有两种，它可以永久地安装在机器或设备某一固定部位（如状态监测系统中的传感器都是固定安装在一个监测部位），也可以采用手持式传感器巡回检测方式，这时传感器往往与便携式测量或记录仪表，如振动计、声级计、数据采集器、磁带记录仪等配磁使用。固定安装方式的传感器可以较方便地长期性获得机器运行的状态参数，并将数据送入数据采集系统和分析系统进行处理。手持式传感器和便携式检测记录仪表配套的检测方式比较灵活，可以根据需要选择测点位置，但是必须在现场进行。这种方式实际上已经包括了数据采集过程，它只适用于设备简易诊断和间断式状态监测。

数据采集和预处理是设备诊断过程的第二步。为了使设备诊断得到正确的结论，数据分析系统得到的信息必须有高的保真度。因此，在信号的采集和传输过程中，必须注意被噪声污染，在背景噪声较大的地方，信号应该经过数字化处理后再进行传输。当有很多个信号需要采集和传输时，必须使用信号采集器或多路电子开关，以实现定时采样和检测的目的。但是，有很多传感器获得的电信号并不具备直接进行信号处理（或数据处理、分析）的条件，必须进行阻抗变换、信号放大、滤波等处理，这些处理称信号预处理，信号预处理和数据采集

有时往往结合在一起，难以具体划分。

数据处理是设备诊断中重要的一环，它往往是由各种分析仪、信号处理仪或计算机来完成。由传感器上获得的信息往往都是各种物理量（应力、温度、位移、速度、电流、噪声等）的动态波形，而这些动态波形往往又是由很多幅值、频率、相位不同的波形混叠而成，为了分解信号内的各种频率成分的有效值，为了全面的揭示动态波形中包含的信息，必须对信号进行加工处理——信号处理。信号分析可以采用各种数学处理分析方法，如时域分析、频域分析、幅值分析等。这些分析有些已经可以通过硬件来实现，大大提高了分析和处理速度。

诊断就是根据对机器运行状态检测和监测所得的信息，进行趋势分析和故障识别，确定机械运行是否存在故障，以及故障性质和故障部位，作出诊断决策，制定设备维修计划，确定设备继续运行还是停机检修。在设备诊断领域中，目前已经出现了大量的诊断软件（其中也包括专家系统），这些诊断软件的出现，大大地提高了诊断的效率和可靠程度，它们能完成大量的数据处理，识别故障和作出诊断结论。但是到目前为止，最终的诊断结论还是由人来作出的。这是因为诊断软件和专家系统的推理功能还没有完善到代替该领域专家的地步，而且复杂的现场也难以在诊断软件中全面考虑，诊断能力还受到一定限制。但是设备诊断技术的总趋势是采取更多的计算机来辅助诊断，开发出更多适应性强的诊断软件（包括专家系统），使设备诊断效率和准确性更高。

上面介绍的设备故障诊断过程是一个完整的程序，但是在实际使用中，不是每一次诊断都要进行完整的程序检测，往往省略了某些过程和环节，例如采用简易诊断技术对设备状态进行“健康”检查，在检测过程中只是采集数据和作出判断，并不需要使用复杂的手段进行全过程的诊断。

二、设备故障诊断技术

现代化的设备往往是由机械、液压、润滑、冷却、电气、控制等部分组成的一个系统，任何一部分的故障将影响整个系统的功能或者使设备整体功能失效，因此，设备诊断技术的诊断内容，应该包括上述各个部分的信息检测技术，其常用的技术如图 1-7 所示。

从图 1-7 列示的情况可以看出，设备故障诊断使用技术手段是多样的，涉及领域广泛，技术内容十分丰富，是一个较新的技术领域。如振动、噪声、绝缘、温度等检测技术和诊断方法都将在下面分别加以介绍。

（一）铁谱技术 (Ferrography)

铁谱技术又称铁相学，是 20 世纪 70 年代摩擦学领域里出现的一种研究磨损颗粒的新技术，它通过对磨损颗粒的尺寸、形态以及成分的分析，以获得机器在运动摩擦时磨损状况和磨损机理的重要信息，在机械设备早期预报失效、节能和润滑剂的研究等方面已得到广泛的应用。

设备故障诊断中，铁谱技术可用于对齿轮箱、精密机床、液压系统、大型空压机、原动机和大型发电机、电动机轴承磨损状况的检测和监测。

（二）红外测温 and 热成像技术

1. 红外测温技术

红外测温是检测设备温度异常的一种手段，一是种非接触式测温方法，它是通过测量物体辐射的红外光，显出物体的温度。

红外是红外辐射、红外线或红外光的简称，它是太阳光谱红光外的不可见光，其波长范围相当宽，为 $0.75\sim 1000\mu\text{m}$ 。太阳光从紫光到红光的热效应逐步增大，而红外光处具有最大

的热效应。除了太阳能辐射红外光外，自然界中的任何物体，只要本身具有一定的温度，都能辐射红外光。

红外线测温的特点：

(1) 是非接触式测量。不影响被测目标的温度分布，可用于对远距离、带电和不可接触的目标的温度测量。

(2) 反应速度快。红外光以光速传播，红外测温仪的响应时间主要取决于电子线路和显示装置，一般为零点几秒，因此可用于高速运动物体的测温。

(3) 灵敏度高。能分辨目标微小温差。

(4) 测温范围广。可测量 $-10\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围。

2. 热象仪

热象仪是利用红外成像 (Infrared Imaging) 技术，用一个红外传感器采集被测对象的红外辐射信号，将信号放大和处理后，在显示器上，形成被测对象的温度分布图形 (二维温度场) 的可见图像

3. 红外测温与热成像技术在诊断中的应用

红外测温热成像技术在设备故障诊断技术中的应用，主要是检测和分析反映在温度变化过程中发生的故障。如轴承缺油而发热的检测，电气设备触点接触不良的温度检测，变压器电动机铁心发热和匝间短路故障点的检测，输电线路和绝缘子温度检测等

(三) 电磁检测

1. 电学量测量的各种变送器

电机的各种基本电学量 (电压、电流、频率、功率等) 的测量，往往是通过电流互感器、电压互感器、电流变送器、电压变送器和功率变送器等来实现的，这些都是标准电器组件，其功能是使电气的工作回路与测量回路实现隔离，这里不再介绍它们的工作原理和使用方法了。

2. 磁场检测元件

电机内部和周围磁场的测量，也是电机故障诊断经常使用的，如测量磁场分布，测量谐波磁场和漏磁场。磁场测量通常是测量磁场分布中各点的磁通密度 (以下简称磁密)，目前应用的测磁元件主要有探测线圈和霍尔元件两种。

(四) 控制系统传递函数的检测

在设备日常的监测项目中，应包括控制系统特性的检测，及时发现特性偏差，并进行调整，使系统保持在最佳运行点。通过监测可以事先了解控制装置和驱动系统特性劣化和性能降低，以便采取对策，防止突发性事故的发生，目前已有了很多控制特性分析装置和模拟控制装置，利用这些设备可以以在线和离线方式对系统的控制特性 (包括动态特性) 进行检测和调整。另外控制系统的自动监测系统也已问世，它可以对系统的运行、故障情况进行检测，也包括了主要电气元器件 (如晶闸管、GTO、快速开关、快速熔断器、电抗器等) 的监测。

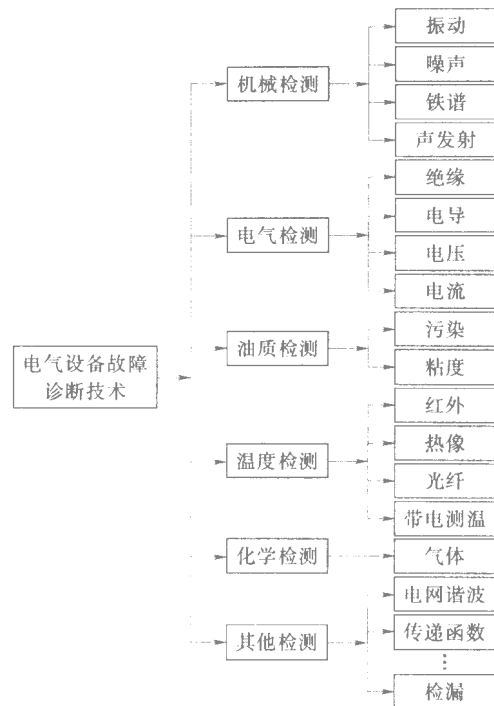


图 1-7 设备故障诊断常用技术

三、电气设备的诊断

电力设备诊断概述	故障物理	故障形态 异常振动、疲劳、腐蚀、蠕变、磨损、断裂、绝缘老化 故障机理 对象状态、外因 → 故障模式 故障分析：故障模式，影响与危害度
	诊断理论	检测技术(诊断传感器)机电、红外探测、光纤 信号处理技术：预处理，适配放大、噪声抑制、数据转换 数据处理：时域分析、频谱分析、倒频谱分析 识别技术：决定论、概率论识别 预测技术(寿命)决定论、概率论预测
	诊断方法	传统感官：振动和噪声，温度及热像，无损检测与声发射，绝缘诊断 化学诊断：绝缘油分析，润滑油光谱、铁谱，绝缘产物，汽、水 人工智能：专家系统、神经网络等
	诊断对象	发电设备 汽(水、燃气)轮机、锅炉、旋转电机、电站及辅机、核电 输变电：变压器、断路器、避雷器、互感器、电容器、架空线路、电缆、变电所、电力系统
	预测方法	电站高温部件寿命：解析法、无损法、金相组织法、破坏法 旋转电机绝缘寿命：NY、D 图示，最大放电法，马尔可夫概率法 充油绝缘寿命：CO、CO ₂ 总量及 CO/CO ₂ ，油中糠醛、丙酮、绝缘纸聚合度 电缆(cv)绝缘寿命：水树放电速度、长度与威布尔概率
	预测对象	热力设备 主蒸汽管、汽机转子、汽包、炉管、联箱、螺栓 电气设备：旋转电机、变压器、电缆 核电设备：反应堆压力容器、蒸汽发生器、管道、阀门

电气设备检测诊断方法如表 1-4。

表 1-4 电气设备检测诊断方法

技术方法	物理特征	检测目标	适用范围	
振动诊断 噪声	振动声学	稳态振动、瞬态振动模态参数等噪声	旋转机械 [汽(水、燃气)轮机, 泵, 风机, 磨机]、旋转电机(发电机、电动机)、断路器	
温度及热像	温度	温度、温差、温度场热像图	热力设备 [锅炉、汽(燃气)轮机、核电反应堆]、旋转电机及电器、变压器、断路器、架空线路、电缆	
无损检测 及声发射		设备(部件)的内部和表面缺陷	旋转机械、核电设备、旋转电机、热力设备	
	声学	声阻、超声波、声发射	热力设备、压力容器、管道、流体机械、工业阀门、断路器、变压器	
化学诊断	油液	绝缘油油气分析润滑油光谱、铁谱	变压器(电抗器)、互感器、旋转机械	
	水汽	放射元素	N-13、N-16	核反应堆压力容器、蒸汽发生器
		水汽	水汽品质	热力设备、化水设备
烟雾	烟雾	烃类成分	旋转电机	
绝缘诊断	电气参数	电压、电流、电阻、功率、电磁特性、绝缘功能等	旋转电机、变压器、断路器、避雷器、互感器、架空线、电缆、控制设备	
人工智能	专家系统神经网络模糊集		热力设备、旋转机械、旋转电机、输变电设备、核岛设备	

第五节 利用人体感官诊断设备故障

利用人体感觉器官检测，分析寻求故障的因果关系。虽然这些远远满足不了现代设备的要求，但是日常维护和定期检查，人体感官这种检测手段仍然用得很广泛，用眼睛看、耳朵听、手摸、鼻子嗅等所谓五种感官功能作为初步的检查、诊断，后施以精密的检查和诊断。

一、人体感官检测特性

人体感觉的诸多特性，并通过声音、振动、气味、变色等感觉来判断电力设备的异常状态。

了解人体感官检测的特性，可以在一定程度上提高检测的准确性，人类工程学告诉我们，人体感觉的诸多特性，通过声音、振动、气味、变色等感觉来判断电力设备的异常状态。人体的感觉与各种传感器有很多相似之处。例如，存在着灵敏度（刺激阈）、分辨力（辨别阈）、动态范围、反应时间以及非线性问题。但是人的感觉由于掺杂着因人而异的种种主观因素而且感觉的程度难以定量表示，只能通过语言近似描述（模糊概念），这就影响了诊断结果的统一性和科学性。

（一）刺激阈

人体的感觉共有八种，通过眼、耳、鼻、舌、肤五个器官产生的叫五感，此外还有运动感觉、平衡感觉、内脏感觉等，相应的器官如肌肉、内耳、内脏等也称为感受器。感受器产生感觉依靠其感受细胞接受外界刺激。当刺激超过 1h，尽管刺激是客观存在的，感受器却不能肯定感受或形成感觉，通常用产生 50% 的感觉概率的刺激值作为产生感觉的最低值，即刺激阈。人体感觉的一系列阈值，即在刺激的物理能和人体所能感觉到的最小刺激值之间，存在着以下阈值：

物理能—刺激峰值—上辨别阈—标准值—下辨别阈—刺激阈

已经测得人的各感觉刺激阈的平均值如表 1-5。人体五官感觉的特性列于表 1-6 中。

表 1-5 人的感觉刺激阈

感 觉	刺 激 阈	感 觉	刺 激 阈
视觉	晴朗的夜晚，距离 48km 能看到烛光	嗅觉	在 30m ² 的房间内，初入时能闻到一滴香水散发的香味
听觉	寂静处距离 60m 能听到表走动的声音	触觉	蜜蜂的翅膀从 1m 高处落到肩上的感觉
味觉	一茶匙的糖溶于 9L 水中，初次品尝		

表 1-6 人体五官感觉的特性

比较项目	感觉通道				
	视 觉	听 觉	嗅 觉	触 觉	味 觉
刺激种类	光	声	挥发、飞散物	压、触、冷、热	唾味可溶物
刺激来源	外部	外部	外部	接触表面	接触表面
识别特征	色彩、明暗、形状、运动状态等	声强、声调、方向、韵率等	辣气、香气、臭气等	触觉、痛觉、温度、压力等	酸、甜、苦、辣、咸等