

第11章 设备诊断技术基础

姚家瑞

第1节 设备诊断的类型和设备状态信号

(一) 设备故障诊断的类型

1. 简易诊断和精密诊断

(1) 简易诊断 它相当于对人的健康的初级诊断。为了能对设备的状态迅速有效地作出概括的评价，它应具备以下功能：

- 1) 设备所受应力的趋向控制和异常应力的检测。
- 2) 设备劣化，故障的趋向控制和早期发现。
- 3) 设备性能效率的趋向控制和异常检测。
- 4) 设备的监测与保护。
- 5) 指出有问题的设备（发现患者）。

简易诊断通常由现场作业人员实施。

(2) 精密诊断 它是根据简易诊断认为有异常的设备需要进行的比较详细的诊断，其目的是判定异常部位，研究异常的种类和程度。精密诊断通

常由专门技术人员实施。精密诊断要掌握图11-1-1的技术。

2. 功能诊断和运行诊断

功能诊断是对新安装或刚维修后的设备进行运行工况和功能是否正常的诊断，并且按检查的结果对设备或机组进行调整。而运行诊断是对正常工作设备故障征候的发生和发展的监测。

3. 定期诊断和连续监控

定期诊断是每隔一定时间，对工作的设备进行定期的检测，例如主轴承振动情况的定期检测；而连续监控则是采用仪表和计算机信息处理系统对机器运行状态进行监视或控制。连续监控用于因故障而造成的生产损失重大、事故影响严重以及故障出现频繁和易发生突发故障的设备，也用于因安全和劳保上的原因不能点检的设备。

4. 直接诊断和间接诊断

直接诊断是直接确定关键零部件的状态，如主轴轴承间隙量、齿轮齿面磨损量以及腐蚀环境下的叶片腐蚀状况等。直接诊断往往受到机器结构和工作条件的限制而难以实现，这时就不得不采用间接

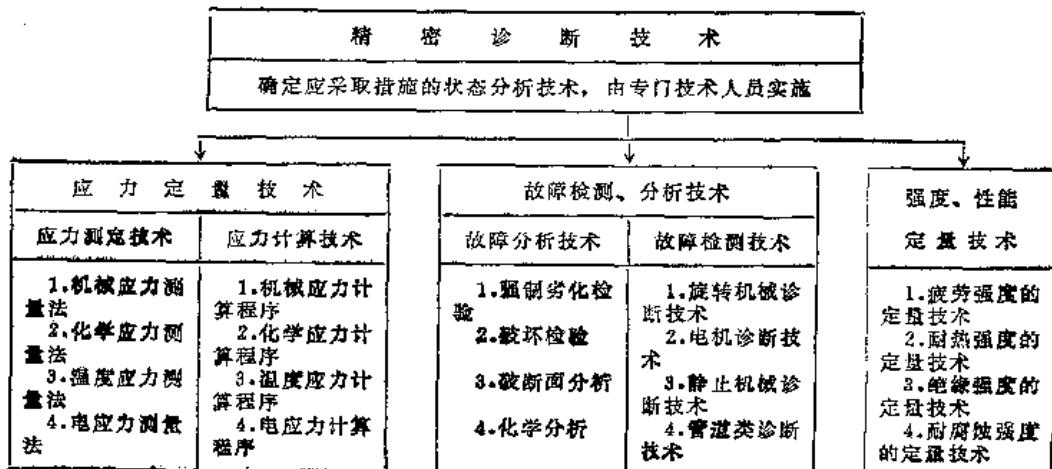


图11-1-1 精密诊断技术

诊断。

间接诊断是通过来自故障源的二次效应，如按振动的信号来间接判断设备中关键件的状态变化。用于诊断的二次效应往往综合了多种信息。

(二) 设备状态信号及其获取

1. 传递设备状态的信号

设备出现劣化即会出现状态变化的各种信号，取得与这些异常情况相对应的信号，就能对设备的异常进行诊断。这些信号，一般可以分为以下三种类型：

(1) 机械信号 这是由于设备状态劣化而产生的动作状态变化的信号。有电流、电压、扭矩、转速等直接和功能有关的信号，以及振动、声音、温度等并不一定与功能有直接关系的次要信号。

(2) 电磁信号 电流、电压、磁感应密度及部分放电、导磁等电气、磁力信号。

(3) 化学信号 由设备劣化过程新生成或过量生成的物质，例如液体（润滑油成分的变化）、气体等化学物质产生的信号。

对这些信号，有各种不同的检查方法，检查、测定设备所发生的各种信号，就作为设备诊断的开始。

2. 信号的获取

(1) 获取信号的基础 决定是否对某部位进行测定，其原理很简单，就是对有问题的装置进行测量。具体讲，如果温升有问题就测定温度，如果振动有问题就测定振动；如果电气绝缘有问题就测定电阻。但是，对于很多有问题的数值并不是都能直接测量到的。以电动机为例，可以列举出以下一些问题：

- 1) 安装电动机的螺栓松动等的不良。
- 2) 定子线圈短路、绝缘不良、温升。
- 3) 转子线圈短路、绝缘不良、温升。
- 4) 整流子有磨损、绝缘不良、接触不良、温升。

5) 轴承滚道面磨损、裂纹、润滑不良。

以上问题大多数是属于内部的，不能直接观测到的数据。特别是有关转子内部的一些数据、轴承转动体的异常情况等，在运转中是不可能直接观测到的。因此，研究设备诊断的第一步是，首先考虑如何进行监视这样的量值。处理方法大致有两种：

第一，对于没有必要经常监视的量值，进行定期停止运转来测定或者拆卸修理。

第二，把不能够直接测定的数据转换为与之密切相关的数据进行观测。电动机的安装不良或者轴承有问题，往往会引起电动机的异常振动和异常声音。因此，即便不拆开轴承也能测出电动机振动与声音的异常。在设备诊断技术上，关于选定观测数值的问题，最好是选定尽可能容易测量、测定少数几个测定量就能确切地检测出各种异常情况的数据。这就有必要知道各种异常情况在所观测到的每种信号内以什么样的形态出现。这就是下面将要阐述的信号处理技术问题。

第三，也有在什么时候观测以及怎样进行观测的问题。就观测时期而言，可以分为连续测定与定期点检两种。对于设备的异常情况变化比较急剧且难以知道在什么时候发生异常情况的，当然应该进行连续测定；对于设备劣化发展缓慢的，可以适当的时间间隔进行观测。

(2) 传感器的选择与使用 为了掌握设备状态，必须知道选择什么样的传感器测量什么数据。从监视什么这个最根本的观点出发，可以分类为温度、润滑油、裂纹、泄漏、振动、腐蚀等，对应于这些不同的类别都有着具体不同的传感器。

实际上，使不使用传感器、选择什么样的传感器，是不是连续监测，怎样应用检测出来的数据，这些都是首先要考虑的问题。测出温度数值，利用温度计就可以了。

因为设备诊断是根据传感器所测定的数值进行处理的，所以传感器的可靠性比什么都重要。为此，除了使用可靠性高的传感器外，如何对待传感器本身的多路化也是非常重要的问题。

在原理上，对应于某些物理现象可以考虑出各种不同的传感器。例如，对由于温度升高，物体的长度就伸长的物理现象，就设计制造出了通过测定温度变化情况来检测长度变化的传感器。可以推定，现在已由注重宏观现象转为有效地应用微观的量子效果的物性型传感器的倾向。

安装传感器的地方，应尽量距离观测位置近些，以便提高检测的灵敏度。例如在诊断轴承时，希望把振动传感器（拾波器）尽量安装在距离轴承近的位置上。但是，从前所生产的设备大多在设计时未考虑到设备诊断这个问题。希望今后在设计设备时能考虑到设备诊断的需要。

振动传感器的性能及其选用详见第12章。

第2节 各种故障现象 及其诊断方法

(一) 异常振动

根据对大量旋转设备故障实例的分析，旋转设备因安装、调整、对中不良和动平衡不好等原因引起的振动故障占相当大的比例。利用这一特点，对旋转设备进行振动状态监测和故障诊断，通常总是可以获得令人满意的结果。其主要依据为：

1) 正常运行的旋转设备都有其特定的频谱形状。

2) 设备的不同故障往往有不同的离散频率的振动与其相对应。

3) 通过对安装在机器上不同测点传感器所获得的完整振动信号进行频谱分析，可精确地分辨出振动信号的频率成分和各种频率的振动能量，并可显示出响应振型的圆轨迹图。

旋转设备故障原因十分复杂，往往是多种原因交织在一起。对强迫振动引起的异常振动，其原因一般较易确定，但由自激振动引起的异常振动，如摩擦振动和非接触型振动等，则往往需要丰富的诊断经验或借助其他手段，才能得到正确的判断。

(二) 异常声音

训练有素而积累了丰富经验的人，可以很敏感地辨别出声音的微小变化。这对操作人员及设备维修人员的现场巡视来说，也是很有意义的。声音因为是完全不具有方向性的，所以在听到声音的位置及有交错的复杂声音的场所，凭听觉大多不易觉察到声音的变化，而且也有人接受不到的高频声音。一般认为，可听声频率范围为20~20kHz。

根据声音可以进行有效诊断的例子有：

- 1) 高精度齿轮。
- 2) 柴油发动机。
- 3) 泵的气穴。
- 4) 油压阀的磨损。
- 5) 喷气式发动机的功能不良。

声音可以用声级计测量。为了表示声音的大小，和振动同样，可以用声波的振动数和振幅来表示，这个振幅叫做声音的场合声压。它规定了相对于大气压，产生了多大的压缩压力和稀薄压。

声压级的定义是：声压与基准声压之比的常用对数乘以20，用分贝(dB)表示。

声压单位为Pa，这里的基准声压：空气中为20μPa，水中为1μPa。

(三) 异常温度

在作业人员巡视采用的手段中，有时可根据所测定的温度发现异常。可是，凭借手感直接察觉的温度范围，充其量不过50℃左右。一般来说，即使检测出温度，虽然知道与正常温度的温度差是多少，也很难于探索出异常温度发生的原因。但是，当比正常温度变化很大时，即使只发现了异常征兆，对于诊断也具有重要的价值。

在温度测量中，可以使用热电偶以及电阻温度计等，进行范围在-200~1500℃左右的接触式测量。也可以采用红外测温仪及红外热像仪测量。对于难以测量的部位，如下列设备有关部位的测量，可以进行非接触方式的遥测：

- 1) 控制盘(接线柱等的接触不良)。
- 2) 电缆线(检查电缆线的劣化部位)。
- 3) 烟囱(衬里的脱落及温度分布)。
- 4) 锅炉(炉壁的损坏及保温性能不好)。
- 5) 电动机、变压器(故障部位的检出)。
- 6) 测量装置用印刷线路的底板(接触不良)。
- 7) 反应装置(温度分布)。

(四) 泄漏

机器本身及管路母材部分发生泄漏的部位较少，几乎都是由于法兰、阀板、回水阀、填料盖、管接头等紧固部位，以及母材材料容易受到物理、化学作用的焊接部位和焊缝附近产生的泄漏。产生泄漏的原因如下：

1) 腐蚀和磨损。

2) 裂纹。

3) 不合适的材料和结构。

检查泄漏通常采用如下方法：

1) 根据加压试验检查泄漏。对反应塔、贮槽、热交换器等，可以在检查泄漏部位涂上肥皂水用压缩空气进行泄漏试验。这种检查方法很容易检查出泄漏的部位。

2) 用化学方法检查气体泄漏。对特定的气体，是让含有敏感化学药物的检查管吸引大气，根据试药的变化进行检查。这种方法可以进行大致的估

计，但不太适用于发现泄漏的具体部位。

3) 用超声波检查泄漏。当气体通过细缝而泄漏时，因为会发生超过听觉频率的超声波，所以，具有方向性的超声波传声器泄漏检查法已被广泛地使用。

另外，因为有利用放射性同位素的方法，利用油溶性导体的方法等，以及根据检查的对象设备、被检查的气体、液体种类等各种各样的方法。所以，在选择检查方法时应当慎重。

(五) 裂纹

装置及机器的裂纹有以下几种：

- 1) 在制造阶段由原材料产生的裂纹。
- 2) 加工制造阶段产生的裂纹。
- 3) 设备在使用中发生的裂纹。

检查这些裂纹通常是使用无损检测法。可是，要想判断出这些裂纹是有害还是无害，却相当困难。所以，在大多数情况下，或者是要规定裂纹的大小或数量标准，或者根据破坏检查的强度变化，以及用显微镜观察到的金相组织的变化等，来预测产生裂纹的原因和设备的使用寿命。以上的各种检查及判断，都是在已产生裂纹的情况下进行的。而如果能在设备开始使用时检查出发生的裂纹，那么，就能使诊断获得相当重要的情报。这种检查的方法有声发射 (Acoustic Emission) 法。

薄的锡板一弄弯，就会发出“锡嘶”的声音。一般金属物体产生裂纹时，会发出很高的高频超声波。把这种声波的释放叫做声发射，并把监测声波检查裂纹的检查方法叫做声发射法。

声发射法用于构造物、贮槽等的完工检查和定期检查，现在也广泛地用于对焊接质量进行管理，

这是今后大有发展的技术之一。

在无损检测法中，超声波、 \times 射线透法主要是用于内部裂纹的检测，但 \times 射线法的缺点是费用高。

检测表面裂纹的方法有：

1) 磁力探伤法是对物体通电或用电磁线圈造成磁场，检测缺陷形成的漏磁通。检测范围可达表面以下 5~6 mm。

2) 涡流探伤法是使用电磁感应（观测线圈阻抗的变化）来检测缺陷。

3) 浸透探伤是在金属表面涂上具有浸透性的某种有色液体，擦拭以后，由于在裂纹中残留有液体，故能显示出裂纹。

表11-2-1列出表面缺陷对各种非破坏性检查的适用性。

(六) 腐蚀

在制造业中，尤其是处理腐蚀性物质的工厂，或者具有高温高压反应程序的化学工业，以及石油化工、石油精炼工厂，材料的腐蚀是一个必须予以充分重视的问题。具有代表性的腐蚀现象有下面几种：

- 1) 应力腐蚀裂纹。
- 2) 氢损伤。
- 3) 全面腐蚀。
- 4) 局部腐蚀。
- 5) 高温腐蚀。

腐蚀检测方法，主要有以下几种：

- 1) 目视检查法。
- 2) 小孔检查法 开一小孔，检查因腐蚀减薄材料壁厚的程度。

表11-2-1 表面缺陷各种非破坏性检查适用性

缺陷种类 \ 探伤方法	涡流 (探测器)	漏磁通	电感	浸透	超声波 (表面波)	光学法
最小表面裂纹	○	○	○	●	△	△
表面裂纹	●	●	●	○	●	○
焊缝缺陷	○	○	○	○	×	△
轧制缺陷	●	○	○	○	○	●
凹坑	○	△	×	×	×	△
白点 (镍铬钢发裂斑点)	×	×	●	●	×	×
气孔	△	△	○	●	×	×
夹杂物 (表层)	×	○	△	×	●	×

注：●—非常好；○—好；△—可以检测；×—不能检测。

- 3) 放射线检查法 用射线进行透过检查。
- 4) 涡流探伤检查法 用电磁感应作用进行涡流电流检查。
- 5) 超声波厚度仪检查法 利用超声波，测定厚度是否减薄。
- 6) 使用试片进行检查的方法 定期地取出装进装置中的试片进行检查。
- 7) 根据电阻变化进行检查，可以检测因腐蚀而壁厚发生的变化。
- 8) 声发射检查法 由于腐蚀而产生裂纹时，可根据声发射进行检查。

(七) 材质劣化

所谓材质劣化，就是指构成设备的材料比开始使用前发生了某些变化，从而使材料的性能明显地下降。变化内容如下：

- 1) 尺寸变化 由于腐蚀使厚度减小，由于蠕变使材质胀出去及壁厚减少等，都会逐渐增大使用应力，缩短设备寿命。
- 2) 材质变化 其中有因金相组织的变化，使韧性及蠕变强度下降，使拉伸强度及冲击韧性下降以及由于疲劳所引起的破坏等。对这种变化应引起注意。
- 3) 表面变化 由于脱碳、渗碳而使强度下降，产生裂纹以及由于腐蚀产生了有缺陷的部位，使其处于相当危险的状态。

在劣化状态的检查中，裂纹及壁厚减薄等是用超声波探伤以及X射线等无损检测方法检查。检查机械性质时，需要切出试片进行破坏试验，虽然很可惜，但是用这种检查方法可以获得非常正确的数据。关于疲劳，最近利用应变仪分析，对判断剩余寿命可以说是相当有效的。

(八) 松动

机床等设备都是用或多或少的螺钉连接起来的。作为连接件的螺钉，特别是螺栓和螺母的松动问题，它使维修人员感到很伤脑筋。

螺栓的松动，在振动多的场所、有冲击的场所以及受热的场所等都会发生，特别是由振动引起的松动更多。其中，振动与轴成垂直方向的松动情况最多，其次是轴向振动所引起的螺钉松动。

因此，为了防止螺钉松动的发生，应当控制振动的发生。但是，振动又是难以完全消除的。熟练

的工作人员，可以根据声音的变化及振动的程度发现松动。

为了检查螺钉松动，有根据振动进行分析的方法。简单的固定轴承用的螺栓、螺母的松动，在旋转振动频率的2倍频率附近，可以测出很多峰值。对复杂的结构件，根据所测本体和螺栓、螺母的振动波形相位，就能比较容易地检测出来。

为了防止发生松动，连接螺栓应保持适当的轴向力，并用弹簧垫圈和使用两个螺母紧固进行防松。

因为电气线路的连接部分比其它部位的温度高，所以，可以用红外测温仪进行松动的检查。

(九) 润滑油劣化

一般用油的粘度及氧化度等物理或化学的变化，作为表示润滑油劣化的方法。然而，根据对油中所含金属微粒的成分形态及大小的分析，可以得到油液循环着的那些部件的劣化信息。分析金属磨损微粒，测量金属微粒的分布、检查磨损程度和鉴定金属成分可测定出是哪个部位发生了磨损。

在金属微粒的分布测定中，普遍使用铁谱仪，并且用光学浓度计进行测量。同时，在成分的分析中，油的光谱分析法(SOAP)已广泛使用。不但在飞机的润滑油管理中已被使用，而且一般行业也开始使用。光谱分析法，在30秒钟左右能分析16种金属元素。在这16种金属成分中，铁、铅、铜、铬、铝、镍、银、镁等8种，是机械构成部分的磨损粉。硅、硼、钠是污染物质。磷、锌、钙、钡、锰等5种成分，是润滑剂中含的添加剂。由于对各种成分进行了趋向管理，因此可以推定出异常部位，同时也可预测大修时间以及更换润滑油的时间。

(十) 电气系统的异常

对构成电气系统主要部分的电动机、电缆、变压器的异常进行诊断的方法，主要是：

1) 电动机 它和一般旋转体一样，除了用振动测量法诊断转子的不平衡及轴承部位的异常外，还采用以下方法诊断线圈的劣化：

- ① 电压降低试验法。
- ② 直流高压法。
- ③ $\tan \delta$ 法。
- ④ 交流电流法。

⑤ 部分放电法。

2) 电缆 对电缆的劣化诊断，采用以下方法：

- ① 直流高压法。
- ② 耐电压法。
- ③ 部分放电法。

3) 变压器 在一般的绝缘劣化的其它诊断中，广泛采用的是根据变压器的气体分析来进行劣化诊断。当变压器发生异常时，一般情况是会伴随着局部的发热，这部分热使周围的绝缘物（绝缘油、绝缘物质）受到热分解作用，产生出特有的气体。根据部分气体溶解在油中。所以，对油进行分析，掌握油中溶解气体的种类和数量，就可以进行劣化诊断。

另外，电气系统的大部分异常，都会伴随着温度上升。例如接触不良、电缆母线以及变阻器的短路、控制盘、配电盘元件的异常所发生的局部过热，因为该部分会伴随着局部的温度上升。所以，可以有效地利用非接触的红外测温仪或热像仪进行诊断。

第3节 设备诊断技术的构成

设备诊断技术由以下4项基本技术构成。

(一) 检查测量技术

设备诊断技术常需要测量下列各种参数，如：

- ① 应力参数；② 征兆参数；③ 性能和强度参数。

这里首先应当把现有的检查测量技术整理成体系，同时也必须开发新的诊断测量技术。

1. 应力参数的测量技术

- 1) 为了掌握故障和劣化原因，并改进设备。
- 2) 为了消除不正常的应力，延长设备寿命。
- 3) 为了进行寿命和可靠性预测。

定量地掌握设备的各种应力，对于设备诊断来说，是最基本的要求。

在图11-3-1表示了各种应力的量化技术和各种劣化原因相应于可靠性预测的关系。

这样，在定量地检测出应力之后，才能够利用

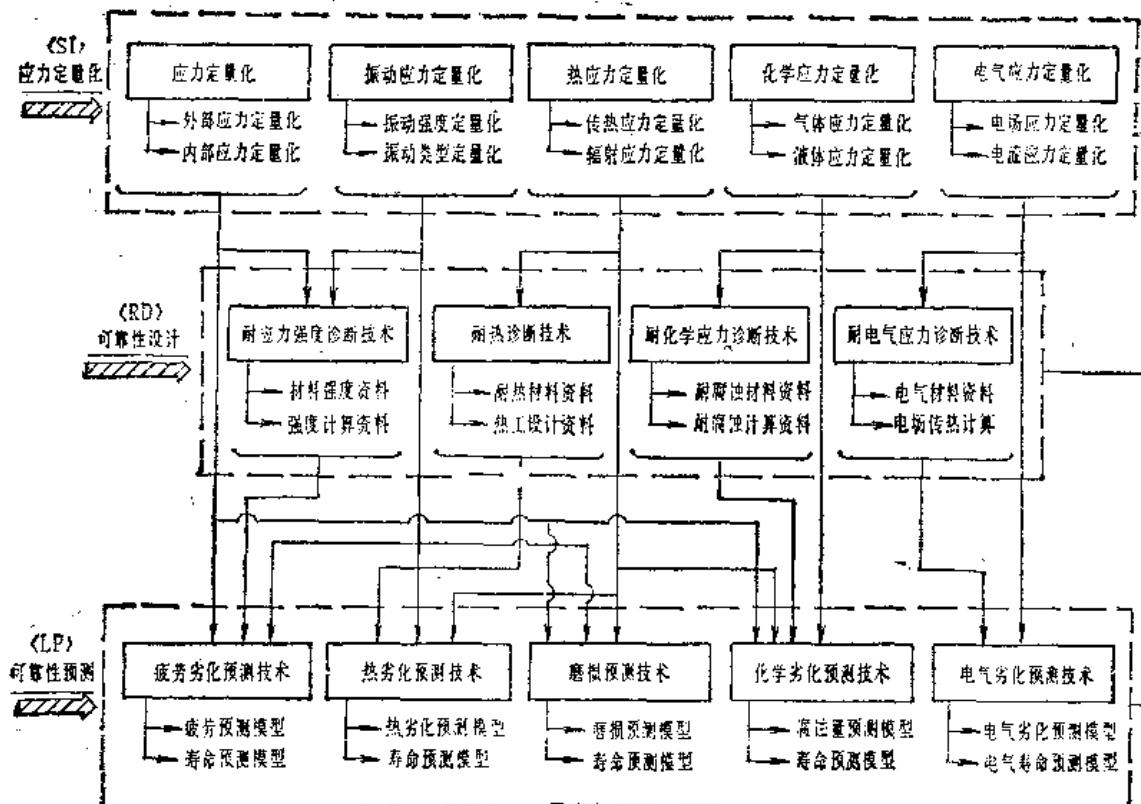


图11-3-1 各种应力检测技术和可靠性预测的关系

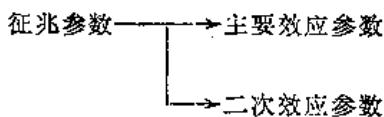
诊断技术，对可靠性和寿命进行预测。

为了进行诊断，不仅应当检测出应力的大小，而且还必须检测并表示出应力的各种必要成分，如应力的时间分布和应力场分布。

2. 征兆参数的测量技术

在设备诊断中，故障（劣化）征兆参数的测量是最基本的内容。

被利用的征兆参数可以分为两种，一种是表示设备主要功能的主要效应，另一种是附带产生的二次效应。也就是说，可以认为：



所谓主要效应参数，是指设备为了完成其功能所具有的变量，例如，若是电动机的话，便是指扭矩或转速等。

所谓二次效应，如果同样以电动机为例的话，则是指除主要功能以外的，附带发生的振动、声音、温度上升及转速变化等。

作为主要效应，一般可利用设备的输入功率参数 P_i ，输出功率参数 P_o ，其差（损耗） $P_i - P_o$ ，其比值 P_o/P_i ，后者也就是功率利用效率。

特别对简易诊断参数来说，多数还是使用主要

效应参数有效。

在图11-3-2上表示了主要效应参数测量方法的一些概念。

另外，在图11-3-3上，表示了电动机一泵装置的主要效应参数测量例。当然，应根据实际情况选择参数，比如，为了进行状态监测，只用效率参数也就足够了。

二次效应参数多用于精密诊断。此时，主动机械和静止机械所使用的参数及测量技术有着很大的差别。

当为主动机械时，可以利用各种测量技术检测其本身所产生的征兆参数。

当为静止机械时，主要用以下三种方法：

1) 外部刺激法 这种方法利用机械冲击，电脉冲等，从外部施加各种刺激，观测其响应状态。

2) 外部照射法 这种方法，利用放射线和光线，从外部进行照射，观测其反射或透过状态。

3) 外部和内部涂敷法 在外部或内部涂敷或埋设某些物质，当发生异常之后，这些物质将产生一些已知的变化。

把用于诊断的各种检测技术进行整理，其结果表现在以下两表中，表11-3-1是主动机械的征兆检测技术一览表，表11-3-2是被动机械的征兆检测技术一览表。

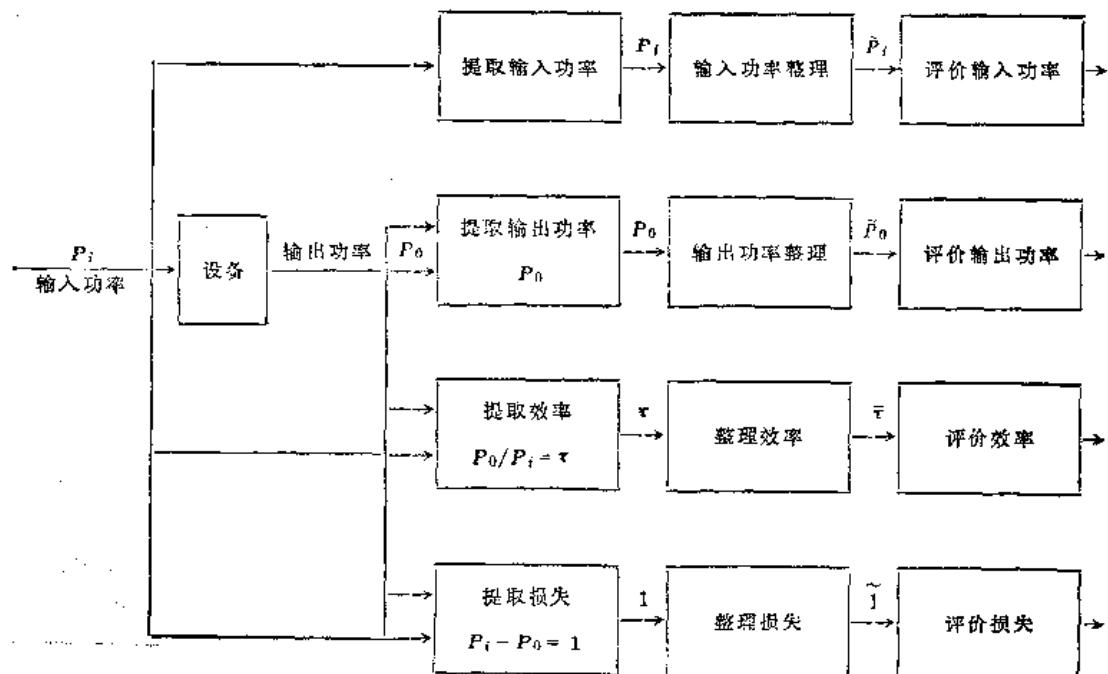
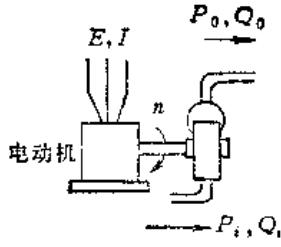


图11-3-2 设备主要效应参数测量方法的概念



参数分类	监测参数	监测目的
输入功率参数	E I EI P_i Q_i	1. 监测电机的异常 2. 监测泵的异常 3. 监测负载的异常
输出功率参数	P_o Q_o n $P_o Q_o$	1. 检测泵的性能 2. 检测负载的异常
效率参数	$P_o Q_o / EI$	检测泵的性能
损失参数	$EI - P_o P_o$ $P_o - P_i$ $Q_o - Q_i$	1. 检测负载异常 2. 检测泵的异常

图11-3-3 电动机—泵组的主要效应

表11-3-1 主动机械征兆检测技术一览表

检测系统	检测技术名称(例)	应用诊断技术(例)
振动音响信号系统 (Vibration and Sonic Signature)	1.振动法 2.振动模型法 3.音响法	1.采用振动的旋转机械诊断技术 2.采用振动的轴承诊断技术 3.采用振动的齿轮诊断技术
超声波信号系统 (Ultrasonic Signature)	1.超声波法 2.空气超声波法 3.声发射法	1.用超声波对轴承进行诊断的技术 2.用超声波所进行的荷电检测技术 3.声发射法, 对压力容器进行诊断的技术
压力信号系统 (Pressure Signature)	1.压力脉动法 2.压力损失法 3.冲击压力法	1.用压力脉动诊断油泵的技术 2.用压力损失诊断堵塞的技术 3.用过渡压力波型对阀和油缸进行诊断的技术
热信号系统 (Thermal Signature)	1.各种温度测量法 2.温度自动记录法 3.热流计法 4.其他热敏元件	1.用各种热敏元件对工作线圈的监测 2.用温度自动记录法对烟囱进行诊断 3.用热流计对炉砖进行诊断
电气信号系统 (Electrical Signature)	1.波形法 • 电压波 • 电流波 • 电功率波 2.放电(电晕)法 3.直流分量法 4.漏泄电流法	1.根据三相电流不平衡诊断电动机的异常 2.利用电压波形高频成分进行的整流诊断 3.利用电流波形高频成分进行的振荡诊断 4.利用电功率波形所进行的效率诊断 5.利用电晕法所进行的绝缘劣化诊断 6.利用直流分量法所进行的绝缘劣化诊断 7.利用漏泄电流法所进行的绝缘劣化诊断

(续)

检 测 系 统	检测技术名称(例)	应 用 诊 断 技 术 (例)
磁力信号系统 (Magnetic Signature)	1.漏磁量法 2.磁通变形法	1.用漏磁量法对变压器进行诊断 2.用磁通变形法诊断电动机异常
化学信号系统 (Chemical Signature)	1.固体分析法 2.液体分析法 3.气体分析法	1.分析电刷粉末进行整流诊断 2.分析润滑油诊断机器(SOAP) 3.分析绝缘油可燃性气体诊断变压器
机械信号系统 (Miscellaneous mechanical Signature)	1.转速法 2.位移法 3.流量法	1.根据角加速度诊断旋转机器 2.用变位法诊断低速轴承 3.用流量法诊断破损情况

表11-3-2 静止机械征兆检测技术一览表

检 测 系 统	检测技术名称(例)	应 用 诊 断 技 术 (例)
振动音鸣阻抗系统	1.机械阻抗方法 2.音响阻抗方法 3.撞击法	1.用机械阻抗法诊断缺陷 2.用音响阻抗法诊断材料的质量 3.用撞击法诊断缺陷
光学系统	1.管内检查法 2.全息照相法	1.用光导纤维观测器观测管内 2.用全息照相法诊断表面缺陷
超声波系统	1.脉冲反射法 2.脉冲透射法 3.共振法 4.超声波全息照相法 5.超声波阻抗法	1.用脉冲法诊断内部缺陷 2.用超声波全息照相法诊断内部缺陷 3.诊断壁厚 4.用超声波诊断输送带接合部分 5.用超声波阻抗诊断材料质量
应力测量系统	1.应变仪法 2.应力涂料法	1.根据应力分布诊断缺陷 2.根据应力分布诊断装配异常
磁力线扭曲系统	1.应力检查法 2.强度检查法	1.用磁力线的扭曲诊断应力分布 2.用磁力线的扭曲诊断材料的疲劳强度
压力检查系统	1.水压检查法 2.真空检查法	1.用水压检查法检测泄漏 2.用真空检查法检测泄漏
电气参数系统	1.电气响应法 2.电气参数法 • ρ 法(电阻率法) • $\tan \delta$ 法(损失率法) • c 法(电容法) • ϵ 法(电容量法)	1.用电气响应法诊断控制系统 2.用电阻法诊断壁厚 3.用电阻法诊断裂纹 4.用 $\tan \delta$ 法诊断绝缘老化情况 5.用 c 法检查油中杂质
电磁特性系统	1.涡流检查法 2.磁粉检查法 3.录磁检查法 4.线圈检查法	1.用涡流法检查表面的缺陷 2.用涡流法诊断材料质量 3.用涡流法诊断绝缘的老化情况 4.用涡流法诊断铝条的老化情况
放射线系统	1.透视法 2.放射线同位素示踪法 3.激活分析	1.用透视法诊断内部缺陷 2.用放射线同位素示踪法诊断磨损情况 3.用放射化分析法诊断微量泄漏
表面喷涂系统	1.肥皂薄膜法 2.着色浸透法 3.荧光浸透法	1.用肥皂薄膜法诊断泄漏 2.用着色浸透法诊断表面缺陷 3.用荧光浸透法诊断表面缺陷

(二) 信号处理技术

一般来说，设备诊断都是在工厂现场相当恶劣的环境条件下进行的。为了从各种噪声信号中把相当微弱的征兆信号检测出来，需要使用信号处理技术，因而，信号处理技术往往成了诊断是否成功的关键。

1. 诊断信号处理技术体系

从设备诊断角度来看，应将各种信号处理技术进行分类，可参见表11-3-3。时间系列处理技术是一种信号处理技术，用来表现各种参数的时间函数，这些参数包括振动、声响或各类主要效应参数，这是一种最基本的技术，在其它各类信号处理技术中，经常要用到它。

图象处理技术也是一种信号处理技术，它把信号表现为空间位置函数，即表现成几何图象。就图象而言，有一维的、二维（平面）的和三维（立体）的。除这种光学图象之外，设备诊断还经常以温度

模式和几何形状为对象。

模式识别技术着眼于人对模式的认识能力，今后，模式识别技术将在设备诊断领域获得更广泛的应用。

多变量分析，与其说是一种信号处理技术，不如说是一种识别理论，即在识别信号方面有效，并在使数字信号平滑化和检验代表特性方面也有效。

光学处理技术是有关利用光学原理进行的图象处理和模式识别的处理技术。目前，这门技术集中在研制新处理装置上，以求能设计出一种既快速及时，又操作简便的处理装置来。

在表11-3-4里，列出了信号处理技术的分类。这个表与时间系列处理技术有关，根据诊断的需要，把具体的处理方法进行了分类。可以看出，相关法和频谱分析法是最基本的方法。

2. 对若干设备诊断有效的信号处理技术概述

一般情况下，为了进行设备诊断，多用功率谱等线性处理技术，其分类请参见表11-3-4。

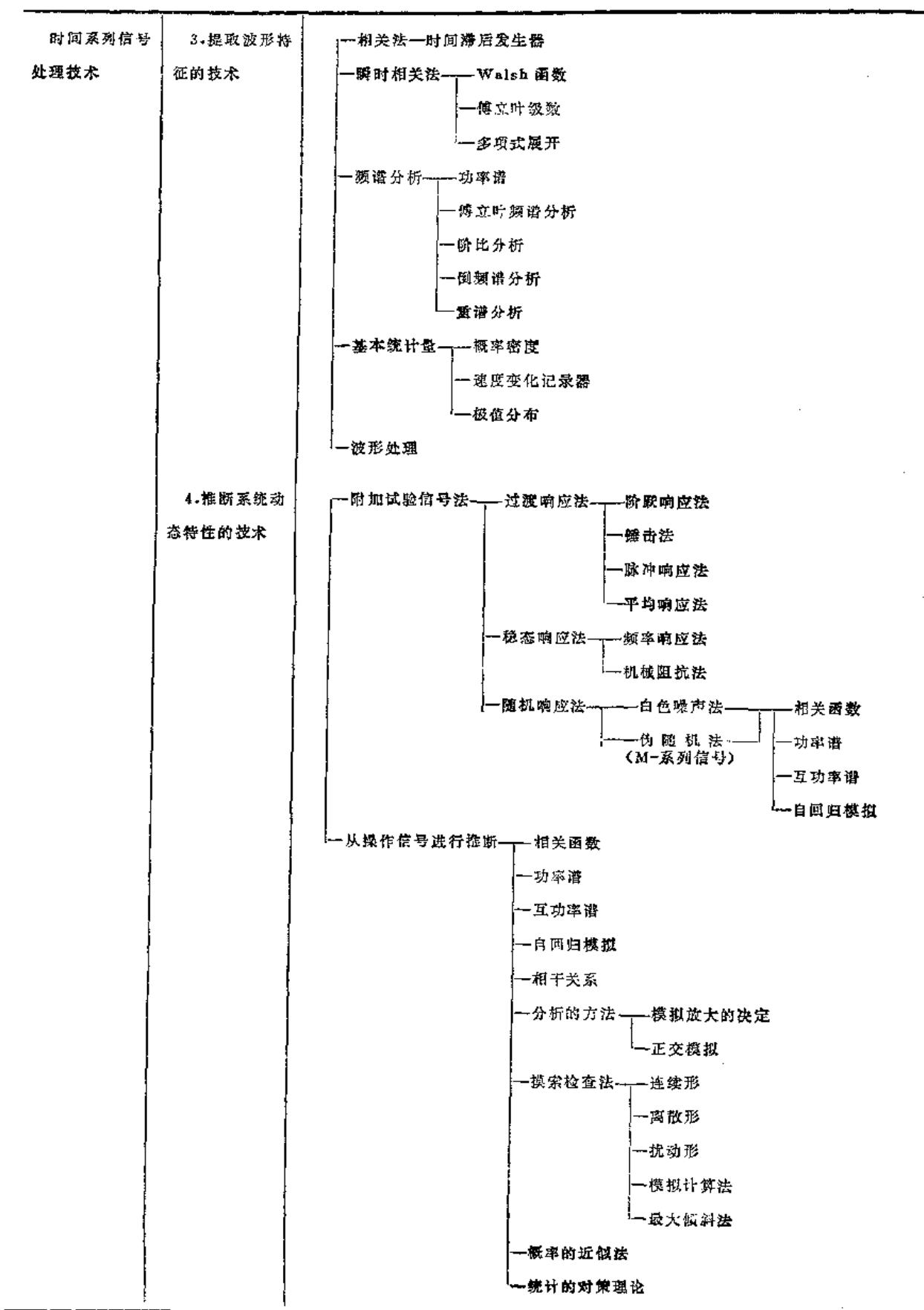
表11-3-3 诊断设备所用信号处理技术一览表

信号处理基础技术	时间系列信号处理技术	1. 分离信号和噪声的技术 2. 提取周期性特征的技术 3. 提取波形特征的技术 4. 推定系统的动态特征的技术 5. 识别信号源的技术 6. 信号的变换和合成技术 7. 预测技术
	图象处理技术	1. 图象信号的压缩和强化技术 2. 从图象中，把特定部分（形状或状态）分离出来的技术 3. 改善图象质量的技术 4. 测定几何尺寸的技术 5. 图象的记录、再生、记述技术
	模式识别技术	1. 模式和噪声的分离技术 2. 提取模式特征的技术 3. 识别模式集合的技术 4. 有关学习机能的技术
	多变量分析技术	1. 因素的分析技术 2. 模式的识别技术 3. 模拟技术
	光学处理技术	1. 不相干系统的处理技术 2. 相干系统的处理技术 3. 光电子学技术

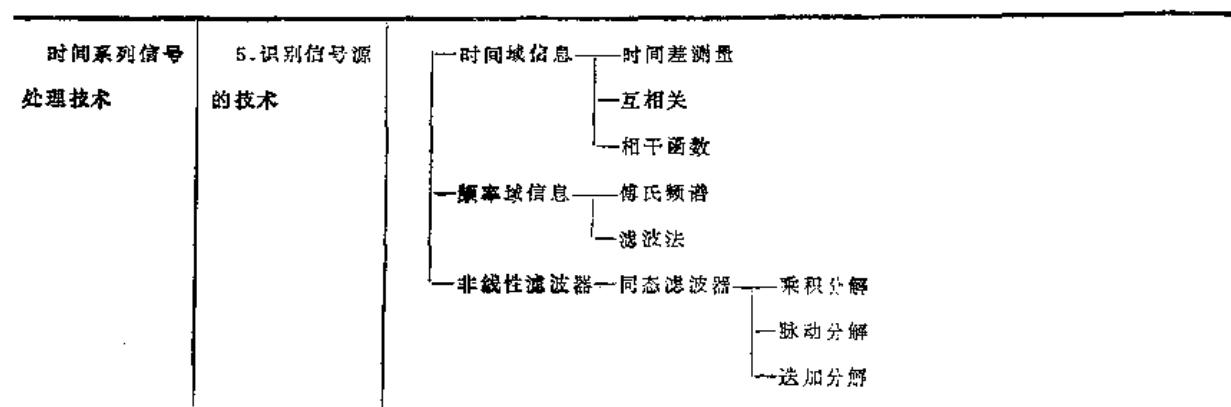
表11·3·4 根据需要对信号处理技术进行分类

时间系列信号 处理技术	1. 分离信号和 噪声的技术	<ul style="list-style-type: none"> - 相关法 <ul style="list-style-type: none"> - 直接相关 - 自相关, 互相关 - 暂时相关, 反射波相关 - 同步相关 - 运算相关 <ul style="list-style-type: none"> - 包络线运算后的相关 - 极值相关 - 频率滤波后相关 - 非线性变换后的相关 - 滤波法 <ul style="list-style-type: none"> - 线性滤波器 <ul style="list-style-type: none"> - 频率滤波器 - 匹配滤波器 - 加尔曼滤波器 - 模拟滤波器 <ul style="list-style-type: none"> - 无源滤波器 - 有源滤波器 - 数字滤波器 - 非线性滤波器 <ul style="list-style-type: none"> - 同态滤波器 <ul style="list-style-type: none"> - 乘积分解 - 卷积分解 - 平均化 <ul style="list-style-type: none"> - 平均响应法 <ul style="list-style-type: none"> - 直接平均响应 - 运算后平均响应 - 信号的双重判断 <ul style="list-style-type: none"> - 双重区域值判断 - 假定检验 <ul style="list-style-type: none"> - 贝叶斯判断法 <ul style="list-style-type: none"> - 赫曼比阿逊判断法 - 逐次检验法 - 明马克斯判断法
	2. 提取周期性 特征的技术	<ul style="list-style-type: none"> - 频谱分析 <ul style="list-style-type: none"> - 功率谱分析 <ul style="list-style-type: none"> - 傅立叶变换 <ul style="list-style-type: none"> - DET 检波器 - FFT 快速傅立叶变换 - 时间减缩 - 调谐滤波器 - 扫描滤波器 - 数字滤波器 - 傅氏频谱分析 - 阶比分析 - 倒频谱分析 - 相关法 <ul style="list-style-type: none"> - 自相关, 包络线运算后的自相关, - 与周期函数的互相关 - 信号的积分-平均响应法

(续)



(续)



(三) 识别技术

所谓识别技术，就是掌握观测到的征兆参数并预测其故障的技术。也就是说，是了解结果并预测原因的技术。

设备诊断常用的识别方法有两种，它们是：①决定论的识别方法；②概率论的识别方法。

方法①深入到被诊断设备的机构原理方面，从理论或试验上，追求每一设备的故障和征兆的关

系，这种方法是现今诊断技术的中心。

方法②以概率论为基础，利用过去积累的实验概率，从中去推算目前最可能出现的故障。

1. 决定论的识别法

目前，多数诊断技术尚处在采用决定论的识别方法水平上，它的基础是掌握每台设备的技术特征。

表11-3-5表示最详细地研究滚动轴承的识别计算法。

表11-3-5 滚动轴承的故障和征兆(振动)的关系

	异 常	特 性 频 率 f_0	备 注
内 圈	偏心	$n f_r$	
	内侧有波纹	$n z f_i \pm f_r$	特别应注意存在离次 n 时 波纹波数 = $n z \pm 1$
	斑点伤痕	$n f_i \pm f_r$ $n z f_i$	非线性振动
外 圈	内侧有波纹	$n z f_e$	$n = 1$ ，滚珠经过的振动
	斑点伤痕	$(n \pm 1) f_e$	非线性振动
滚 珠	直径不一致	$n f_0$	
	有波纹	$2 n f_b \pm f_e$	
	斑点伤痕	$2 n f_b$	
保 持 架			

f_r —旋转轴的基本频率

f_s —滚珠公转基本频率

f_b —滚珠自转基本频率

f_i —内圈与滚珠之间接触的基本频率

z —滚珠数量

n —正整数

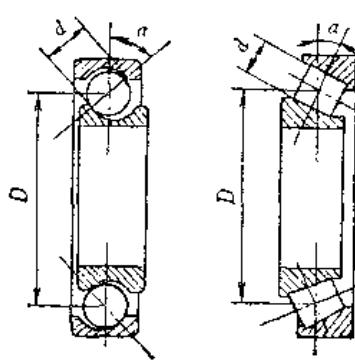
$f_r =$ 轴的转数 ($60r/min$)

$$f_0 = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$f_b = \frac{D f_r}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right\}$$

$$f_i = \frac{f_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

注： f_r 、 f_s 、 f_b 、 f_i 如以 f_r 相除，则为频率之比，即频次。



2. 概率论的识别法

这种方法是一种识别征兆原因的方法。由过去的数据可以得到征兆参数和故障之间的关系，在这种条件下，如果再重新出现征兆，这种方法就可以识别出征兆是由什么原因引起的。进而，还必须准备相应的逻辑，以便使识别结果的误判断损失最小。

为了使用本法，必须预知上述的实验概率，预先给定所希望的误判断损失，可是，对大部分设备来说，目前还没有这种数据。

再进一步说，就识别结果而言，也不过只能指出“ A 故障出现的概率最高”，其结果是不能断言必然出现 A 故障。从而，还必须进一步研究，了解这种技术实际上对设备诊断到底起多大作用。

有人曾发表过一些使用这种技术的研究论文。例如，有文章报导，综合使用贝斯定理和加尔曼滤波器^①，进行飞机发动机诊断的研究；使用判断表识别设备故障状态的研究；把判别函数方法简略化，进行柴油机故障的识别研究等。

另外，有人研究使用模型认识技术去识别故障。这种研究在国外也很盛行，其成果是可以期待的。

贝斯定理是最基本的理论，下面，概略地介绍一下贝斯定理的使用方法。

如果以 $P(X_j, A_i)$ 表示在 A_i 条件下现象 X_j 所产生的概率，那么，如有征兆（病状） X_j ($j = 1 \dots m$)，则其真正的故障原因 A_i 的概率便为：

$$\begin{aligned} & P(A_i/X_1, X_2, \dots, X_m) \\ &= \frac{P\left(\frac{X_1}{A_i}\right)P\left(\frac{X_2}{A_i}\right)\dots P\left(\frac{X_m}{A_i}\right) \cdot P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P\left(\frac{X_1}{A_i}\right)P\left(\frac{X_2}{A_i}\right)\dots P\left(\frac{X_m}{A_i}\right) \cdot P(A_i)} \end{aligned} \quad (11-3-1)$$

上式即为贝斯定理。

式中， $P(A_i)$ 是实验概率， $P(X_i/A_i)$ 是 A_i 发生故障，导致征兆 X_i 出现的概率。对各故障按(11-3-1)的式子进行计算，并把最大的 A_i 作为故障源，这种方法便是贝斯方法。

在实际诊断中，将其变形为图11-3-4那样。故障向量 F (n 次列向量) 和噪声向量 N (q 次列向量) 可同时用概率分布函数提供。

这样，由图可得到下式：

$$X = H \cdot F + N \quad (11-3-2)$$

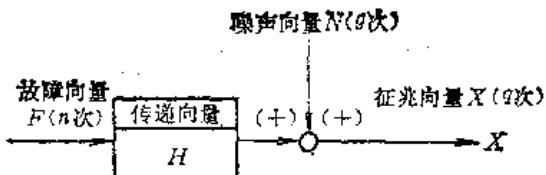


图11-3-4 故障向量和征兆向量的关系

假定 P 、 N 为正态分布。在具体情况下， F 不会是单一的。如果是由 F_1, F_2, \dots, F_n 组成的，即由 n 个成分组成，从而， F 和其期望值 \bar{F} 便为：

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (11-3-3)$$

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \\ \vdots \\ \bar{F}_n \end{bmatrix} \quad (11-3-4)$$

这时， F 的均方差为

$$\text{cov } F = E \{(F - \bar{F})(FF')'\} = P_a \quad (11-3-5)$$

其中， (\quad) 表示转换， P_a 为 $(n \times n)$ 阶矩阵。

噪声 N 可以用具有 q 个成分的向量表示：

$$N = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_q \end{bmatrix} \quad (11-3-6)$$

设其期望值为 0 ($\bar{N} = 0$)。这时， N 的均方差

$$\text{cov } N = E \{NN'\} = R \quad (11-3-7)$$

R 为 $(q \times q)$ 阶矩阵。

下面，征兆的期望值为：

$$\begin{aligned} E\{X\} &= E\{EF + N\} = HE\{F\} \\ &+ E\{N\} = HF \end{aligned} \quad (11-3-8)$$

同时，其均方差为：

① 加尔曼滤波器是一种根据 R·E·加尔曼从 1960 年开始倡导的最佳滤波理论，假设信号是某白色噪声驱动的线性动态系统输出的，并以这个系统为基础组成的最佳滤波器。这个想法集线性系统理论之大成，广泛用来对各系统进行预测、鉴定和控制。

$$\text{cov}(X) = E(X - \bar{X})(X - \bar{X})' \\ = HP_0H' + R \quad (11-3-9)$$

只要作好上述准备，并能观测到 $P(F/X)$ ，即观测到征兆 X ，在这个条件下，就能求出故障 F 的概率。然而，对故障向量 F 和噪音向量 N ，一般可看成为独立的量，就有：

$$P(F/X) = \frac{P(F, N)}{P(X)} = \frac{P(F) \cdot P(N)}{P(X)} \\ = \frac{P(F) P(X - HF)}{P(X)} \quad (11-3-10)$$

在上式的基础上，任何能假定成正态分布的系统，都能适用，并由下式求得最可能出现的故障 F 的估算值。

$$\hat{F} = \bar{F} + PH'R^{-1}(X - H\bar{F}) \quad (11-3-11)$$

但是

$$P = P_0 - P_0H'(HPH' + R)^{-1}HP_0 \quad (11-3-12)$$

对应于观测到的征兆向量 X 来说，(11-3-11) 式中的 \hat{F} 是最可能出现的故障。

在具体计算中，首先应当求出征兆向量，

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (11-3-13)$$

然后按 (11-3-11) 式，可以求出对应于征兆向量 X 的故障概率值：

$$\hat{F} = \begin{bmatrix} \hat{F}_1 \\ \hat{F}_2 \\ \vdots \\ \hat{F}_n \end{bmatrix} \quad (11-3-14)$$

总而言之，为了确实提高这种技术的实用性，并作为一种方法固定下来，必须建立详细的理论，不断积累有特色的现场数据。

(四) 预测技术

所谓预测技术，就是对已被识别出来的故障 F 进行预测，预测该故障今后经过怎样的发展过程，最终进入危险范围，并预测在什么时刻进入危险范围。在确定实际的对策活动时，这些是必然会纠缠的问题。

图 11-3-5 是预测技术的概念说明图。此时，征

兆或应力（累积量）等因子的数目为两个。在图中，按一般图示的形式，用 $C(x_1, x_2)$ 和 $D(x_1, x_2)$ 分别表示注意水准和危险水准。预测技术的目标是掌握下述各类数据，这些数据包括各因子 (x_1 和 x_2) 的过去值和现在值，进入注意水准范围的时间（或应力值） t_c ，以及进入危险水准范围的时间（或应力值） t_d 。

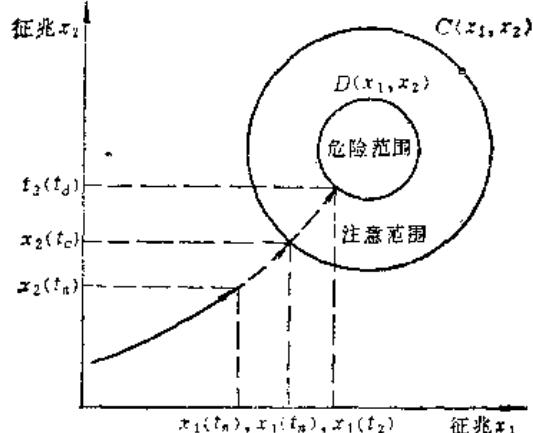


图 11-3-5 预测技术的概念说明图

当然，作为其前提，注意水准 $C(x_1, x_2)$ 和危险水准 $D(x_1, x_2)$ 必须是已知的。

不言而喻， $C(x_1, x_2)$ 和 $D(x_1, x_2)$ 还与设备的性能，强度有关，比如，仅用振动的水准就能预测的场合是很少的。

从这个意义上也可以明白，设备诊断技术当然具备评价设备性能和强度的能力。

预测技术和识别技术一样，可以分为两种方法，它们是：①对策论的方法；②概率论的统计方法。

下面，分别概要地介绍一下这两种方法。

1. 决策论的预测技术

正确地测定现状的劣化水平和设备的附加应力，并将其输入到各种理论模型中，根据计算来预测寿命和可靠性，这样一种方法，就是对策论法。

为此，必须准备与各种劣化类型相应的劣化预测模型算式，同时，还必须掌握以后附加的各种应力的大小和性质。

实际上，有两个问题妨碍着这种方法的实际应用：其一是在现场定量地掌握设备附加应力的工作量太大；其二是虽然建立了劣化模型，但要把这个模型提炼到适用于现场还有困难。

图 11-3-6 是本法的概念图。在图中，根据劣化类型给各主要应力都精选了一个量化理论计算公式。

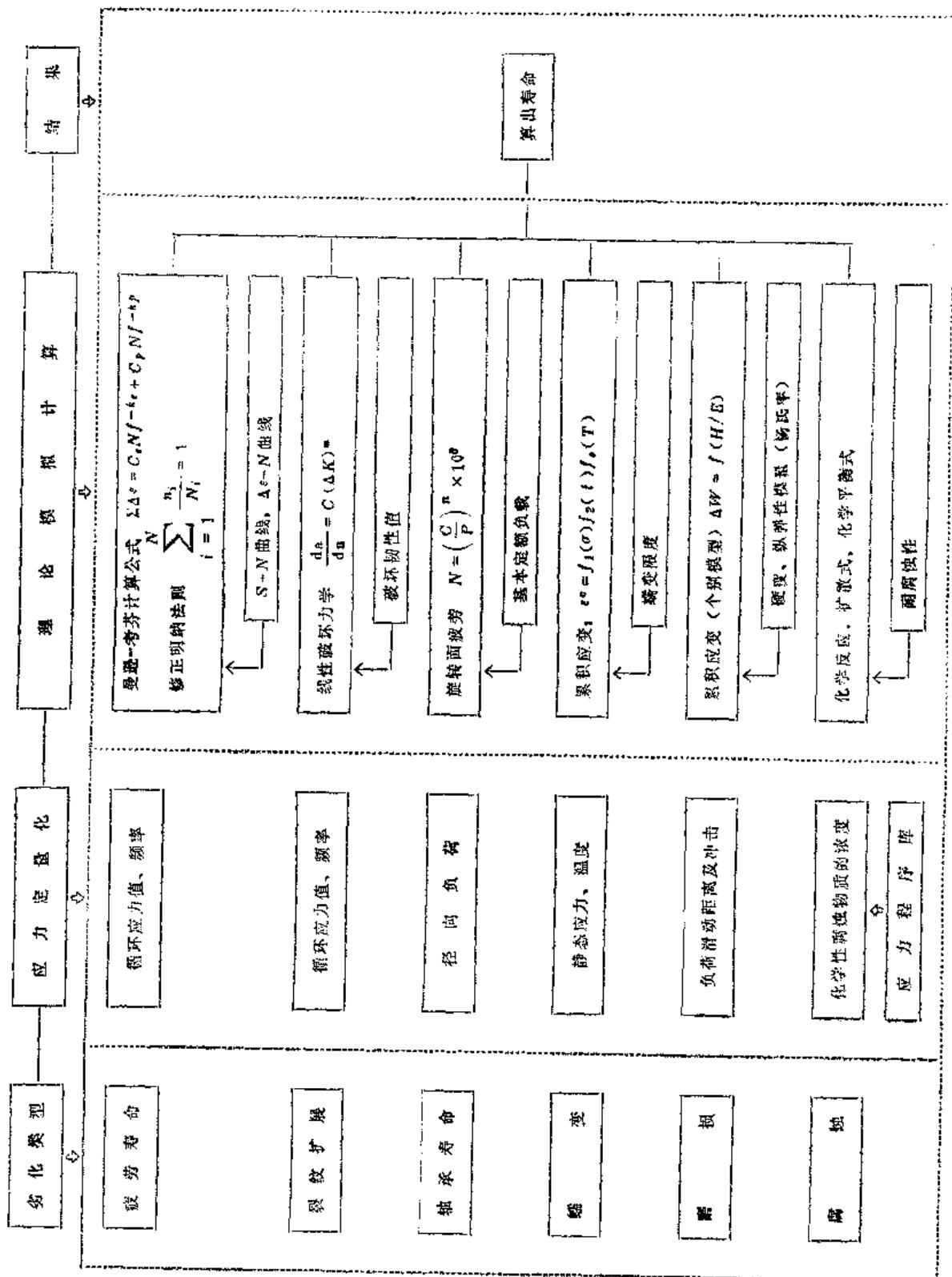


图11-3-6 对算论的预测技术的概念

对估算疲劳寿命来说，其基本算式是图11-3-6上栏所示的曼逊-考芬 (Manson-Coffin) 算式和明纳 (Miner) 法则。

$$\Delta \epsilon = C_s N f^{-k_s} + C_p N f^{-k_p} \quad (11-3-15)$$

式中 $\Delta \epsilon$ —— 循环变形；
 $N f$ —— 破坏前的循环次数。

C_s, C_p, K_s, K_p —— 材料常数。

式 (11-3-15) 被称为曼逊-考芬 (Manson-Coffin) 算式，这个式子考虑了弹性变形和塑性变形两个方面。

下式是明纳 (Miner) 法则：

$$\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (11-3-16)$$

式中 n_i —— 应力 σ_i 的频率；
 N_i —— 在外加应力 σ_i 的条件下，出现裂纹或发生断裂之前的循环次数。

明纳法则主要考虑裂纹和破坏并以 (11-3-16) 式为基本形，在实际使用中，还有各种各样的变形公式。

此外，作为与裂纹扩展有关的基本算式，在线性破坏力学的范围内，以下式最为有名。

$$\frac{d_s}{d_N} = C(\Delta K)^n \quad (11-3-17)$$

式中 $\frac{d_s}{d_N}$ —— 裂纹的扩展速度；

ΔK —— 应力扩展系数的复振幅；

C, n —— 材料常数。

在预测滚动轴承的寿命时，下式是一个基本算式：

$$N = \left(\frac{C}{P} \right)^n \times 10^6 \quad (11-3-18)$$

式中 N —— 整个寿命周期的总转数；
 C —— 基本额定负荷；
 P —— 负荷值；
 n —— 常数。

但是，本式仅以转动面的疲劳剥落为对象，疲劳剥落是发生在转动面上的一种纯疲劳破坏现象。应当注意，在这个式子中，没有考虑各种现场缺陷，如供油不足，装配不良等。

关于蠕变现象，也有多种研究报告，其中，下面的表达式比较有名。

$$\epsilon^0 = f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T) \quad (11-3-19)$$

式中 ϵ^0 —— 蠕变变形；
 $f_1(\sigma)$ —— 因应力而变化的因素；
 $f_2(t)$ —— 与时间有关的因素；
 $f_3(T)$ —— 与温度有关的因素。

同样，磨损量可表达为：

$$\Delta W = f(H/E) \quad (11-3-20)$$

式中 ΔW —— 磨损速度；
 H —— 硬度；
 E —— 弹性模量。

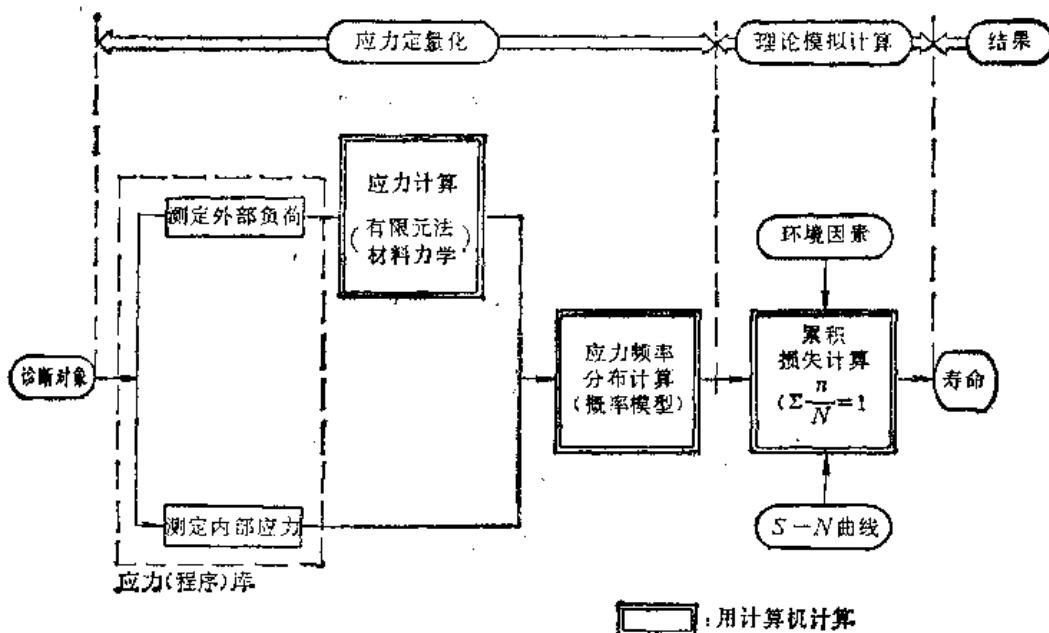


图11-3-7 决定论的疲劳寿命预测法

表11-3-6 预测技术一览表

预测技术系统	预测技术群	内 容 概 要
(E) 外插近似理论	分析学上的近似外插理论	牛顿法(分析学上的)外插近似理论,当然,可把该理论扩展成多变量外插近似式使用
	统计学上的回归近似理论	使用一元回归,多元回归等统计学上的预测和推定理论
(S) 指数平滑法	标准的指数平滑法	由一次或高次指数平滑法,预测最可能出现的未来值
	变形指数平滑法	应排除诸如季节变动这类可以预知的变动,以便进行效果最佳的预测
(D) 数字滤波器	数字滤波器设计理论	可以使用电子领域的数字滤波器理论,可以认为这是一般化了的指数平滑法

恰好,在钢铁等企业中,所遇到的大部分(70%以上)破坏性事故都是疲劳破坏,为了控制住这类事故,大部分预测技术业已完成。

图11-3-7表示了疲劳寿命预测系统的概况。

问题的关键在于,供给理论模型的应力不应该都是假设的,应该以现场的实测值为中心,由应力程序库把每台设备的实测应力提供出来。

这便是诊断技术的预测特点,也是其有很高实用性的原因所在。

2. 概率论的预测技术

这是一个时间系列的预测问题,即由过去的征兆 x ,故障数据 f ,按信息理论方法去预测未来。表11-3-6所列的各种方法,都能有效地加以使用。

在图11-3-8上,表示了一个实际的预测技术概念图,用它来预测汽轮机或套设备的可靠性。

在图上,征兆 f 的概率密度函数作为一种时间函数是已知的,由现在的时刻 t_j 和过去的数据,根据回归曲线,可以预测 f 达到极限值 f_e 的时刻 t_j 。

在时刻 t_k ,对 f 超过极限值的概率,可以用图中分布曲线的斜线阴影部分来表示。

在时刻 t_k ,获得了新数据,从而,可以把回归曲线和分布曲线进行更新。结果,使达到极限值的

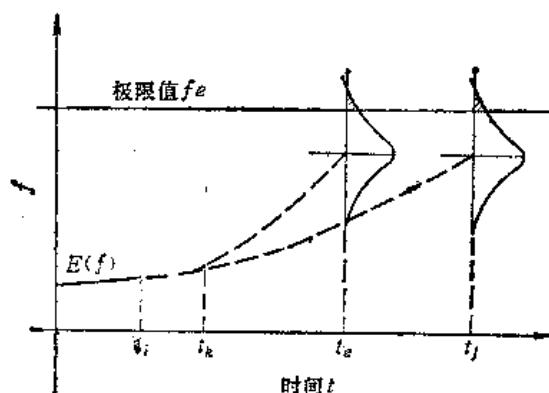


图11-3-8 概率论的预测技术实例

时刻被重新修正成 t_k ,分布曲线也更换成了新值。

这是英国的一个实例,是在运转中,预测汽轮机可靠性所使用的一个方法。它纯粹是按统计理论进行的。

参 考 文 献

[1]日本设备工程师协会设备诊断技术委员会编。

设备诊断技术。刘若南等译,北京市机械工业局技术开发研究所,1983

[2]深川矩義著。設備診斷技術の方法上分類。

日本設備工程師協會,1980