

# 机器磨损 及其对策

金锡志 著

机械工业出版社

TH117.1

J90

# 机器磨损及其对策

金锡志 著



机械工业出版社

DW48/25

这是一本关于机器磨损及其对策方面的专著，其内容包括磨损的基本特性及其产生发展的一般性规律、金属表面的物理特征和几何形貌对磨损的影响、主要机械零件的表面磨损失效分析、磨损颗粒的特征分析和磨损机理、减磨抗磨技术、磨损的试验研究技术和机器装备的磨损工况监测技术。

本书可供从事机器设备管理和维修的技术人员以及摩擦学研究人员参考，还可作为学习铁谱分析技术的基础教材。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

机器磨损及其对策/金锡志著.-北京:机械工业出版社,1996

ISBN 7-111-04948-9

I. 机… II. 金… III. 机器-磨损 IV. TH117.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 95 第 177 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑:张保勤 版式设计:于文

封面设计:郭景云 责任印制

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996年6月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/32·9.375印张·204千字

0 001—2 500 册

定价:15.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

## 序

磨损导致材料和能源的消耗，影响机器的使用寿命和可靠性。统计分析表明，大部分机器零部件是由于表面过度磨损而失效的。为修复和更换磨损件要花费很多的资金和人力，特别是现代大型工业企业，因维修或故障停机造成的损失更为惊人。据我国 20 世纪 80 年代对冶金、煤炭和农机等 5 个部门的不完全统计，仅磨粒磨损一项消耗的备件钢材每年就有 100 万吨以上，如果加上停机和维修等费用，则每年损失要达数十亿元之巨款。现代机器制造业要求产品能耗低、寿命长，可靠性高。机器工作参数的不断提高使摩擦磨损问题日益突出，因此对机器磨损的控制和提高耐磨性已成为现代生产技术中的一个十分重要的问题。

然而由于磨损过程的复杂性，至今尚无统一的理论和模式来描述磨损的本质和过程，对各种磨损的机理还存在许多不同的认识。在工程设计中，人们还不能像强度计算那样对给定的摩擦副准确预测其抗磨能力和磨损寿命。在生产实践中，对机器磨损的监控、诊断和预报也大多未掌握系统的技术。可以说现在人们对磨损的认识和控制尚处于初期阶段。我国生产技术中对机器磨损问题的处理基本上还停留在凭经验的阶段。如何普及、应用和发展摩擦学知识和技术来提高机器的耐久性和可靠性，预防机器故障的发生，以节约能源、材料和人力，是当前工业界的迫切任务。

但现在出版的有关磨损的专著，大多偏重于材料的磨损，

实际机器中的磨损涉及问题更为广泛和复杂,但却缺乏这方面的专门著作。而本书的特点是:针对机器和典型零部件来阐述磨损的基本问题,以现代磨损理论为依据,从磨损表面和磨损颗粒两个方面来分析磨损的各种形式、特征、机理及其规律;并侧重介绍目前工程中应用的表面强化技术和润滑技术,以及磨损试验研究和监测方法,其中包括了不少有关表面改性、视情维修、状态监测和铁谱分析等具有应用价值的新技术和作者研究的新成果。全书内容系统,取材新颖,文字流畅,深入浅出,是一本知识性、应用性和可读性都很好的科技著作。它特别适宜于从事磨损和铁谱技术分析研究的科技人员以及机械设备维修管理人员阅读,也可作为专业人员培训教材和大专院校教学参考书。

我作为本书第一个读者,通读了全稿,感到颇有特色和新意,愿推荐给工作在生产、科研和教学第一线的有关科技人员,并期望这本书的出版会引起广大读者的兴趣,对促进磨损研究,开发抗磨技术,提高产品质量起到良好的作用。

全永昕

1994年3月

于杭州浙江大学

## 前 言

磨损作为摩擦学的一个组成部分，隶属于机械学学科领域，涉及到一切具有运动部件和设备的各行各业。长期以来尽管磨损是工程上的一个司空见惯的问题，但是仅仅近几十年来它才形成为一门学科的分支，并在理论、实验和应用方面得到飞速发展。目前国内外每年都有数以百计的关于磨损研究及其应用成果论文发表；有关磨损的专著也时有面世，然而从这些已出版的著作内容来看大多偏重于材料的磨损——也有很多学者因此把磨损归于材料学科的范畴。确切地说磨损应是材料学和摩擦学两门学科的交叉。

虽然，一切磨损问题都离不开材料自身的磨损特性，但是在实际应用中这种特性是以某种机械零件为载体而表现出来的，而且任何一种材料的磨损特性都是以特定的工况（或试验）条件为前提的，例如用同样的材料制成不同的机器零件，由于其使用条件上的差异，不论其磨损的程度，还是对其耐磨的要求都可能是大相径庭的。因而在处理和解决实际工程中的磨损问题时，除了材料以及表面处理工艺外，必须同时考虑机器零件摩擦表面的接触形式、摩擦表面之间的相对运动和受力情况、表面的几何形貌及其润滑和周围的环境等一系列问题。

本书试图以一种新的概念来考虑磨损问题，即以现代磨损理论为依据，从磨损表面和磨损颗粒两个方面来论述磨损表面的形式、机理及其之间的内在联系，并且着重讨论了磨

损的失效分析、试验研究和抗磨技术以及磨损的监测方法等有关磨损在工程实践中应用的问题。

磨损理论及其应用技术经过几代人的努力, 尽管已有了长足的进步, 但是还远远不能满足今天工程上的实际需要, 磨损问题的复杂性和艰巨性正如 Tabor 教授在第一届国际材料磨损会议(圣路易斯城, 1977. 4)上所指出的那样, “磨损研究很困难是因为发生在两个相对滑动表面的情况太复杂了, 所以通常把某种机制孤立起来进行研究, 这样就容易对这个机制在整个磨损过程中的作用评价过分了。”

因此, 可以预料在今后相当长的时间里, 磨损研究将继续成为人们所感兴趣和倾力的前沿学科。人们需要开发更多、更好的技术, 以克服磨损所造成的困难和危害, 而且从长远来说还期待在磨损理论方面会出现较大的突破。英国著名的摩擦学学者 D. Dowson 教授曾在《摩擦学史》一书的导论中宣称: “如果说过去 75 年代表润滑的时代, 在此之前的时代代表摩擦的时代, 那么现在这个时代则可以称为是磨损的时代了”。

本书成稿后, 承蒙全永昕教授审阅并对书中的若干错误作了指正, 还得到了刘泽九高级工程师的支持, 以及康乃正、陈德金和李兴林等工程师的帮助。另外在成书的过程中还得到高凤鸣先生的帮助。作者谨此表示深切的感谢。限于作者的学术水平和实践经验以及成书仓促, 书中难免有谬误和缺憾之处, 恳请读者谅解和指正。

作者

1993 年 10 月

# 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 第 1 章 概论 .....                     | 1  |
| 1.1 摩擦学与磨损 .....                   | 1  |
| 1.2 磨损过程的一般规律 .....                | 3  |
| 1.2.1 磨合阶段 (图 1-1 中 AB 段) .....    | 4  |
| 1.2.2 稳定磨损阶段 (图 1-1 中 BC 段) .....  | 4  |
| 1.2.3 剧烈磨损阶段 (图 1-1 中 CD 段) .....  | 5  |
| 1.3 磨损、摩擦与润滑之间的关系 .....            | 7  |
| 1.4 磨损的基本属性 .....                  | 9  |
| 第 2 章 金属表面及其几何形貌 .....             | 11 |
| 2.1 金属表面的组成 .....                  | 11 |
| 2.1.1 表面吸附层 .....                  | 12 |
| 2.1.2 氧化膜和化学反应膜 .....              | 13 |
| 2.1.3 毕氏层 .....                    | 14 |
| 2.1.4 变形层 .....                    | 14 |
| 2.1.5 基体金属 .....                   | 15 |
| 2.2 金属表面的几何形貌 .....                | 16 |
| 2.2.1 表面形貌的测量 .....                | 17 |
| 2.2.2 表面形貌的自相似性及其频带宽度范围 .....      | 20 |
| 2.2.3 滤波 .....                     | 23 |
| 2.2.4 表面粗糙度高度特征的表征 .....           | 31 |
| 2.2.5 表面粗糙度水平特征的表征 .....           | 40 |
| 2.2.6 表面形貌的表征参数及其应用 .....          | 50 |
| 2.2.7 表面粗糙度高度标准偏差和相关长度对磨损的影响 ..... | 59 |
| 第 3 章 机器零件的磨损失效分析 .....            | 62 |
| 3.1 磨损表面的主要形式 .....                | 62 |
| 3.1.1 轻微磨损 .....                   | 63 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 3.1.2 严重磨损 .....                            | 64  |
| 3.1.3 胶合 .....                              | 64  |
| 3.1.4 划伤和擦伤 .....                           | 65  |
| 3.1.5 点蚀 .....                              | 66  |
| 3.1.6 微动磨损 .....                            | 67  |
| 3.2 滑动轴承 .....                              | 68  |
| 3.3 滚动轴承 .....                              | 75  |
| 3.3.1 轻微磨损 .....                            | 76  |
| 3.3.2 严重磨损 .....                            | 80  |
| 3.3.3 点蚀 .....                              | 82  |
| 3.3.4 微动磨损 .....                            | 85  |
| 3.4 齿轮 .....                                | 87  |
| 3.4.1 齿面间的相对运动 .....                        | 87  |
| 3.4.2 齿面磨损规律 .....                          | 90  |
| 3.4.3 齿面磨损形式 .....                          | 94  |
| 第4章 磨损机理 .....                              | 100 |
| 4.1 粘着磨损 .....                              | 100 |
| 4.2 磨料磨损 .....                              | 104 |
| 4.3 剥层磨损 .....                              | 107 |
| 4.4 表面滚动接触疲劳 .....                          | 109 |
| 4.4.1 裂纹中封闭油压作用理论——接触疲劳裂纹<br>从表面向深处扩张 ..... | 110 |
| 4.4.2 交变切应力作用理论——接触疲劳裂纹从亚<br>表层向表面扩张 .....  | 112 |
| 4.5 腐蚀磨损(氧化) .....                          | 120 |
| 第5章 磨损颗粒 .....                              | 123 |
| 5.1 磨损与磨损颗粒 .....                           | 123 |
| 5.2 磨损颗粒的运行效率 .....                         | 124 |
| 5.3 磨损颗粒的定性分析 .....                         | 130 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 5.3.1 正常滑动磨损颗粒 .....            | 130        |
| 5.3.2 切屑状磨损颗粒 .....             | 131        |
| 5.3.3 严重滑动磨损颗粒 .....            | 132        |
| 5.3.4 滚动接触疲劳磨损颗粒 .....          | 134        |
| 5.3.5 滚滑磨损颗粒 .....              | 138        |
| 5.3.6 非铁金属的磨损颗粒 .....           | 140        |
| 5.3.7 铁的氧化颗粒 .....              | 144        |
| 5.3.8 腐蚀磨损颗粒和摩擦聚合物 .....        | 147        |
| 5.4 磨损颗粒的定量分析 .....             | 153        |
| 5.4.1 在磨损过程中磨损颗粒数量和大小分布的变化规律 .. | 154        |
| 5.4.2 光密度测量法 .....              | 155        |
| 5.4.3 铁谱片图象分析 .....             | 157        |
| <b>第6章 抗磨技术 .....</b>           | <b>166</b> |
| 6.1 影响磨损的主要因素以及抗磨的一般原则 .....    | 167        |
| 6.1.1 粘着磨损 .....                | 167        |
| 6.1.2 磨料磨损 .....                | 170        |
| 6.1.3 剥层磨损 .....                | 171        |
| 6.1.4 表面接触疲劳 .....              | 172        |
| 6.1.5 氧化或腐蚀 .....               | 180        |
| 6.2 表面强化技术 .....                | 181        |
| 6.2.1 表面热处理和化学热处理 .....         | 183        |
| 6.2.2 薄膜强化 .....                | 188        |
| 6.3 润滑技术 .....                  | 191        |
| 6.3.1 润滑剂的基本性质 .....            | 192        |
| 6.3.2 流体动力润滑 .....              | 198        |
| 6.3.3 润滑剂和添加剂 .....             | 207        |
| <b>第7章 磨损的实验研究 .....</b>        | <b>230</b> |
| 7.1 研究磨损的实验系统 .....             | 230        |
| 7.2 磨损试验机 .....                 | 234        |

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 7.2.1 磨损试验机的分类 .....                               | 234 |
| 7.2.2 模拟试验机 .....                                  | 234 |
| 7.2.3 台架试验机 .....                                  | 247 |
| 7.2.4 行车试验 .....                                   | 257 |
| 7.3 磨损的测定方法 .....                                  | 257 |
| 7.3.1 测量法 .....                                    | 258 |
| 7.3.2 称量法 .....                                    | 258 |
| 7.3.3 表面轮廓或粗糙度 .....                               | 258 |
| 7.3.4 金相分析法 .....                                  | 259 |
| 7.3.5 磨损颗粒分析法 .....                                | 259 |
| 7.3.6 放射性同位素法 .....                                | 259 |
| 第8章 机器磨损的监测技术 .....                                | 260 |
| 8.1 定期维修与视情维修 .....                                | 260 |
| 8.2 状态监测 .....                                     | 263 |
| 8.3 状态监测的种类 .....                                  | 264 |
| 8.3.1 动态分析法 .....                                  | 264 |
| 8.3.2 检测法 .....                                    | 265 |
| 8.3.3 润滑油分析法 .....                                 | 265 |
| 8.3.4 趋势分析法 .....                                  | 267 |
| 8.4 磨损颗粒分析技术 .....                                 | 268 |
| 8.4.1 磁塞 .....                                     | 268 |
| 8.4.2 过滤(滤膜)称重法 .....                              | 270 |
| 8.4.3 光谱分析技术(SOAP) .....                           | 270 |
| 8.4.4 颗粒计数法 .....                                  | 274 |
| 8.4.5 铁谱技术 .....                                   | 275 |
| 8.4.6 各种颗粒分析技术对磨损颗粒的检测能力比较及<br>磨损工况监测技术的综合应用 ..... | 285 |
| 参考文献 .....                                         | 287 |

# 第 1 章 概 论

## 1.1 摩擦学与磨损

摩擦、磨损和润滑是一种极为普遍的自然现象，并与人类的日常生活和生产实践密切相关。但是直到 1966 年英国学者 H. P. Jost 发表了著名的《润滑（摩擦学）、教育和研究》报告<sup>[1]</sup>之后，摩擦学在国民经济中的重大意义才逐渐引起人们的普遍关注，而且从此被真正确立成为一门独立的边缘学科。

摩擦学的定义为：研究在相对运动中相互作用着的表面的科学和技术及其有关的实践。摩擦学具有两个基本属性：

一是它的多学科性，主要涉及到以下几种学科及其相应的摩擦学问题：

|            |                         |
|------------|-------------------------|
| 冶金学：       | 金属材料及其热处理、表面硬度、亚表层金相组织。 |
| 化学：        | 润滑油、添加剂和氧化物。            |
| 流变学：       | 粘度。                     |
| 流体力学：      | 油膜的形成、厚度及其承载能力。         |
| 机械设计及制造工艺： | 表面的设计及加工处理。             |
| 弹性力学：      | 表面的弹性变形。                |
| 显微学：       | 磨损颗粒。                   |
| 计量学：       | 表面几何形貌。                 |
| 物理化学：      | 表面吸附层（也叫表面化学或摩擦化学）。     |

传热学：                    穿过固体表面传导的热。

热力学：                    润滑剂中对流的热。

除此之外还需要相当的数学知识（应用数学和数值计算方法）和计算机处理的能力。

二是它的实践性，摩擦学的理论分析往往需要大量实验研究的支持，摩擦学的应用更是直接服务于各种生产实践。

磨损的定义为：两个接触表面之间由于相对运动而发生物质运动的过程。作为摩擦学的主要组成部分，它也同样具有上述两种属性。

摩擦与磨损分别是自然界中能量守恒和物质守恒两大基本规律的重要环节，因为减少摩擦和磨损从本质上看也就是节省能量和提高材料利用率的问题。而且从冶金的角度来看金属材料的消耗和再生在很大程度上也是能量的消耗。因此研究和解决磨损问题也是一个世界范围内节省能源的问题。据有关调查分析表明：世界上的能源约有  $1/3 \sim 1/2$  是以各种形式消耗于摩擦，而由磨损引起的经济损失又是摩擦所引起的 12 倍左右。经验和实践告诉我们，在设计、制造、操作和维护方面都没有重大失误的情况下，75% 的机器都是因为零件的过度磨损而导致其最终失效，人们甚至以此作为机器所具有的合理寿命，因为任何机器都不可能具有无限长的寿命。因此磨损问题不能不引起人们的极大重视。至于润滑一般说来是控制摩擦和磨损的最简易有效的方法之一。

尽管摩擦学作为一门新兴的学科创立时间不长，但是由于广大摩擦学工作者的努力，在总结前人经验的基础上不论是在理论，还是在实践方面都有很大的发展，特别在流体动力润滑和用其解决工程实际问题方面都取得了令人瞩目的突破。可惜的是对于磨损人们至今尚未取得这样的进步。然而

近几十年来已有越来越多的学者把兴趣转移到这方面来，他们通过大量的试验研究，对磨损从现象到机理的认识不断深入，并且在材料表面行为的研究和金属表面处理工艺方面都取得了重要的成果，从而对于如何防止、减少、诊断和监测磨损起着很大的推动作用。

## 1.2 磨损过程的一般规律

通常，机器或零件的摩擦副从投入运行到破坏都要经历三个阶段，并表现出不同的磨损特征，这主要是指磨损的严重程度。这三个阶段的磨损规律一般用磨损量—时间和磨损率—时间的关系曲线来表达如图 1-1 所示，而其中磨损率—

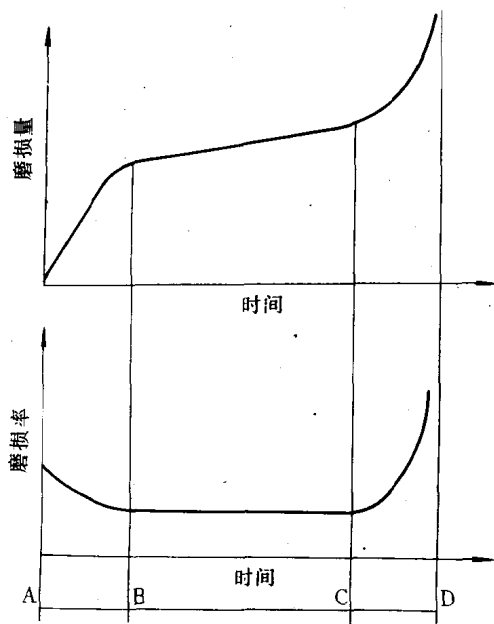


图 1-1 磨损过程的一般规律

时间曲线，就是所谓的“浴缸曲线”。

### 1.2.1 磨合阶段（图 1-1 中 AB 段）

一个崭新的，即加工后未经摩擦的固体表面总具有一定的表面粗糙度和比较尖锐的微凸体尖峰，因而实际上两个表面之间通过微凸体进入真实接触的面积是很小的，于是在这些接触着的微凸体之间会产生很大的单位面积接触压力，乃至超过材料的屈服强度，并造成微凸体材料的流动，以及由于接触面之间的变形在局部微区产生很高的温度，致使接触面发生熔焊，随即又由于表面之间的相对运动而被撕裂。同时微凸体在相对运动过程中也很容易发生碰撞、折断和划伤。因此在磨合期零件摩擦副表面的磨损量迅速增加并达到较高的磨损率。另一方面由于加工和装配等原因使接触表面之间的间隙不均匀，从而难以形成稳定的油膜，这时的润滑状态处于一种从边界到混合润滑的过渡；然而随着磨合期的结束，微凸体不断被磨平，促使它们之间的接触面积不断增大，而单位面积的接触压力却随之减小；同时通过一定的磨损之后，摩擦副的间隙趋于均匀，油膜得以建立，即进一步向完全流体动力润滑过渡；于是磨损的剧烈程度大大减缓，磨损率也随之减小，并向稳定磨损阶段过渡。

### 1.2.2 稳定磨损阶段（见图 1-1 中 BC 段）

此时磨损量趋于平缓地增加，而磨损率则由高过渡到低，并维持在一个比较恒定的水平上，所以磨损量曲线与时间基本保持线性的关系，而磨损率曲线呈现为一段水平直线。说明零件摩擦副表面之间已形成较为稳定的油膜，在润滑油充裕的条件下处于一种（弹性）流体动力润滑状态。流体动力油膜的存在不仅在很大程度上避免了微凸体尖峰的接触，更重要的是极大地改善了表面的受力状况，因为它使微凸体尖

峰受力变为使整个表面处于一种承受小得多而又比较均匀的受力状态，这对减少以至完全避免磨损是极为有利的。特别当油膜厚度大大超过两个接触表面的粗糙度（如数量上达到4倍以上）时，摩擦副处于完全流体动力润滑状态；这时微凸体之间几乎不接触，摩擦表面依靠油膜传递赫兹接触压力，磨损也就保持在一个非常低的水平上。稳定磨损阶段也是机器设备的正常工作阶段，它可以而且也应当维持一段很长的时间。不过流体动力油膜存在的前提是摩擦副表面必须有相对运动，于是摩擦副在启动或停止的过程，也就是流体动力油膜建立或消除的过程，其润滑状态也就从边界—混合—完全流体的转变过程或其逆过程。这时摩擦表面还是会发生较多磨损。因此起动频繁的机器其磨损也较为严重，反之亦然。

### 1.2.3 剧烈磨损阶段（图 1-1 中 CD 段）

稳定磨损阶段经过足够长的时间以后，由于种种原因，如载荷波动、润滑油劣化和材料表面在长期的交变接触应力作用下发生疲劳剥落等原因，使油膜遭到破坏，迅即导致磨损加剧。应该说剧烈磨损的发生是磨损长期累积的结果，一旦发生往往是突发性和急剧性的，因此磨损量曲线和磨损率曲线都是呈急剧上升的。

剧烈磨损所造成的后果是严重的，不仅导致机械效率下降，精度丧失，还有可能产生异常的振动和噪声，摩擦副温度也迅速上升，最终造成零件的破坏和失效，甚至导致机器的报废。

在生产实践中掌握和运用上述磨损过程的一般性规律有很大意义，首先可以找出三个阶段的过渡点，即图 1-1 中的 B 点和 C 点。由于 AB 和 CD 阶段都是不稳定的，所以通过分析

和改进机器的运行,使B点尽早和C点尽迟地到来,从而最大限度地延长稳定磨损阶段,也即延长机器正常工作的寿命期。相反不适当的磨合条件和非正常的磨损工况条件都会导致机器零件的剧烈磨损阶段提前到来,造成机器设备的早期磨损,甚至提前报废。然而在磨合阶段,过分轻微的磨合条件,如过小的载荷或过低的速度,甚至不适当地使用含有减磨作用的添加剂的润滑油都会延长磨合期,即延迟稳定磨损期的到来,造成新设备迟迟不能投入正常运行,而提高设备的磨合成本,也有可能使机器还没达到充分的磨合便投入正常的运行,造成机器不应有的早期磨损,因此对于重要的设备必须通过试验来制定合理的磨合规范。必要时还可以使用磨合油(一种含有磨合添加剂的润滑油)来加速磨合的进程。当然这个磨合过程最好能受到监控,以免造成过度的磨损。磨合期结束后必须及时更换磨合油,而使用在正常工作状态下的润滑油,有时还应重新调整各摩擦副的间隙,以便使稳定磨损阶段的磨损率降到最低水平。对于重要的、大型机器设备的磨合过程实行磨损工况监测,可以及时地掌握由磨合转变为正常稳定磨损的时机,防止磨合不够或磨合过长的情况发生。此外也可以由此修订磨合规程,使之更加合理。

为了尽可能延长稳定磨损阶段,即推迟剧烈磨损阶段的到来,除了保持机器的正确操作和正常运行之外,还可以对机器的磨损状况进行监测,以便及时发现急剧磨损的发生,哪怕是一些早期的症状,并及时提供可靠而准确的信息,使设备维护部门有足够的时间采取必要的措施,保证设备的安全或将可能发生的损坏控制在最低限度。

总之,上述磨损过程的一般规律是实行磨损工况监测的主要依据,详见第8章。