

〔苏〕 P. A. 马卡洛夫 著

机器的技术诊断手段

机械工业出版社

机器的技术诊断手段

〔苏〕 P. A. 马卡洛夫 著

李敏 樊耕耕 译



机械工业出版社

TH17
7723

本书阐述了对各种处在运行条件下的机器进行技术诊断时所用的电气和电子手段,介绍了各种技术诊断器械的结构原理图、特性和误差。主要论述了诊断信息的一次测量变换器、中间变换器和其他仪器,以及诊断电力设备、内燃机、液压驱动装置、机械传动装置和制动器时的方法和手段。

本书对从事机器技术诊断的设计、科研、检测人员以及有关专业的大专院校师生有参考价值。

**СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ
ДИАГНОСТИКИ МАШИН**

Р. А. Макаров

МОСКВА МАШИНОСТРОЕНИЕ 1981

• • •
机器的技术诊断手段

〔苏〕 Р. А. 马卡洛夫 著

李敏 樊耕耕 译

•
责任编辑 林佩珊

封面设计 刘代

•
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•
开本 787×1092 1/32·印张 9 1/4·字数 202 千字
1987年7月北京第一版·1987年7月北京第一次印刷
印数 00,001—4,860·定价 2.25 元

•
科技新书目: 144-111

统一书号: 15033·6596

译 者 的 话

七十年代以来,随着电子测量技术、信号处理技术以及计算机技术的发展,设备诊断技术已逐渐形成一门新的多科性综合技术。它的发展和推广运用,同设备维修制度的改革和设备运行可靠性的提高,有着极其密切的关联。目前,在世界上一些工业发达国家内,正在推行预知维修或状态监测维修。这种先进的维修方式,便是以设备的状态监测和诊断技术作为其支柱的,而机器的技术诊断手段,则是它的物质基础。

现代设备状态监测和诊断技术的概念,是于1979年引入我国的。当时,由译者在~~中国机械~~工程学会设备维修学会第二届年会上所作的《~~国外设备维修基~~本情况》(姚家瑞、李敏、王秩信、沈亮安编写)报告中,~~曾~~将这项技术作为一种发展动态加以介绍。~~当时~~还没有充分意识到发展和推广运用这项技术的迫切性。

以后的几年中,我~~国~~引进了不少单系列、大机组、生产能力大、经济效益高的设备(尤其是流程工业的成套设备),加上原有的役龄已进入老年期的设备,都迫切需要采用先进的设备诊断技术,以便于它们发挥最大的生产和经济效益。这样,就出现了推动我国设备诊断技术发展的客观要求。

基于这种形势和人们对设备诊断技术认识的提高,在国家经委于1983年1月下达的《国营工业交通设备管理试行条

例》中明确提出：“根据生产需要，采用现代故障诊断和状态监测技术，发展以状态监测为基础的预防维修体制。”同年3月，中国机械工程学会设备维修学会召开了首届设备诊断技术专题座谈会，发出了《积极开发和应用设备诊断技术为四化建设服务》的创议书，要求设备诊断技术的方法研究、手段研制、实际应用这三个环节紧密衔接，相互促进，以尽快缩短我国在此领域内与世界先进水平所存在的十年左右差距。其中，特别强调了手段研制，因为它是前后两个环节的中间纽带。

1985年11月，国家经委委托中国设备管理协会在上海召开了设备诊断技术应用推广会议。会前，机械工业部仪表局召开了全国诊断仪器生产规划会议，对今后的诊断仪器生产进行了初步规划。基于目前所用的诊断手段中很大一部分需由国外进口，因此，加紧研制我国自制的机器诊断手段，尤其是开发简易实用的诊断仪器，已成为当务之急。

近几年来，我国已陆续出版了一些诊断技术方面的书籍，但尚无系统阐述诊断手段原理、结构及其元件的专著。译者以为，本书虽未能全面反映这方面的最新技术，但对于我国初、中级诊断手段的研制，仍不失为具有实用价值的参考资料。

限于译者水平，译文中不当和错误之处，敬请读者指正。

1985年12月

前 言

在机器的使用和提高可靠性的效能管理方面，技术诊断所起的作用正在不断增长。最近几年以来，这种情况已经变得十分清楚。在技术设备的发展中，出现了极为明显的总趋势——除了努力提高性能参数以外，对效能和可靠性的要求也在不断提高，同时又要求减少机器的金属耗用量。

最近几年间，诊断对象的概念也扩大了。现在，这一概念所包含的不仅是机器及其各个组成部分，而且包括了毛坯[⊖]。诊断系统的应用领域也得到了扩充，其中包括了生产中调整和验收产品的过程[⊙]。因此，诊断方法及其手段的名目均已显著增加。

本书阐述的只是用器械（和它们的元件）手段来实现处于运行中的机器诊断系统，以保持机器的可靠性。这些手段之间的主要区别在于：它们被设计成对照不同的参数对机器作出诊断，而这些参数则能说明机器经过一定的作业时数后所发生的、因磨损或材料劣化而产生的缺陷。研究的对象仅限于各种电气和电子手段，因为它们最有发展前途。

目前，已经有大量文献对技术诊断作了阐述。在不少书本中，对各种理论问题，如技术诊断的逻辑方面，数学模型的建立，诊断算法（程序）的编写方法等〔2，15，58，65，75〕进行了研究。这些著作所涉及的是诊断的程序方法，主要用

⊖ 见ГОСТ 20911-75，技术诊断。术语和定义。

⊙ 见ГОСТ 20417-75，技术诊断。诊断系统的研制程序总论。

于各种无线电电子装置、自动机和电子计算机(电脑)中,

另一类著作所阐述的是用器械对某类机器进行诊断的方法,这些机器包括汽车和拖拉机〔6, 19, 37, 54, 82, 84〕;内燃机〔25, 31, 36〕;飞机和直升飞机〔28, 78〕;船舶〔57, 69〕;机床〔40, 60〕;木材加工和建筑机械〔27, 76〕等。在这些著作中,介绍了诊断所用的方法、手段和工艺。还有一些著作,它们部分地或者全面地阐述某几类诊断方法,例如,适合于许多类机构和机器的振动声学诊断法〔3, 66〕。专门介绍适合于诊断汽车拖拉机发动机的器械手段的著作只有一本,即参考文献〔92〕。

编写本书的目的,是尝试将机器的各种最典型组成部分的技术诊断手段资料作系统的整理和总结。无论是对于诊断手段的设计师或者机器的研制人员,这种资料都会是有用的。

本书的前三章阐述机器技术诊断手段的主要特性和各个组成部分。研究了各种主要的、按其作用的物理原理共性加以分类的一次测量变换器[⊖],并对它们在机器技术诊断中的应用特点和领域作了分析。介绍了按被测参数分类的各种一次变换器的结构,以及一些中间变换器和仪器。在有关测量变换器的叙述材料中,将评价基本性能所需的计算部分压缩到了最低限度。根据这种安排,如读者需要详细了解各种测量变换器的计算和设计,可以参阅有关的著作,如参考文献〔2, 24, 77, 90, 91〕;如需详细了解以数字测量技术为基础的诊断装置所用的中间变换器,则可参阅参考文献〔92〕。

凡是研究机器各组成部分(电力和液压驱动装置,内燃

⊖ 变换器一词的原文为 Преобразователь, 也有译作传感器的, 但由于它的含义比传感器广, 且为了区别于 Датчик (专译作传感器) 一词, 故译作变换器。——译注

机，机械传动装置和制动器）的诊断手段的各章，都是按照统一的原则来编写的，即在各章的前几节内介绍诊断手段一章中所研究的诊断方法和诊断参数的资料，而在各章的后几节内，则说明实施这些方法所必需的手段。看来，章节的这种结构安排是最为合理的，因为同一种诊断方法可以用不同的手段来实施，反之，同一个手段也可被用来实施不同的方法。

本书的主要篇幅介绍各种连续式（模拟）测量手段，因为这种手段简单、可靠和便于实用，并且具有足够的准确度，可测的波段范围宽，示值（读数）醒目，从而决定了它们能在各种机器的诊断系统中得到广泛应用。

目 录

前言

绪论	1
----	---

第一章 机器技术诊断手段的基本性能	6
-------------------	---

1. 机器技术诊断手段的效能和一般特性	6
---------------------	---

2. 机器技术诊断手段的度量特性	10
------------------	----

第二章 机器技术诊断手段的一次测量变换器	24
----------------------	----

3. 电阻变换器	25
----------	----

4. 电容变换器	31
----------	----

5. 磁电变换器	35
----------	----

6. 压电变换器	39
----------	----

7. 光电变换器	43
----------	----

8. 温度变换器	45
----------	----

9. 电量变换器	51
----------	----

10. 机器技术诊断手段中应用的一次变换器的结构	57
--------------------------	----

11. 内装式机器技术诊断手段的变换器	75
---------------------	----

第三章 机器技术诊断手段的中间变换器和仪器	83
-----------------------	----

12. 变换器的连接线路	84
--------------	----

13. 放大器	96
---------	----

14. 调制器	106
---------	-----

15. 解调器	108
---------	-----

16. 滤波器	111
---------	-----

17. 微分和积分变换器	117
--------------	-----

18. 阈值装置	120
----------	-----

19. 变频器	125
---------	-----

20. 机器技术诊断手段中所用的仪器	132
--------------------	-----

第四章 机器的电力驱动装置和电气设备的诊断手段	144
-------------------------	-----

21. 诊断参数和诊断方法	145
22. 诊断手段	162
第五章 内燃机的诊断手段	175
23. 诊断参数和诊断方法	176
24. 诊断手段	188
第六章 机器的液压驱动装置的诊断手段	200
25. 诊断参数和诊断方法	201
26. 诊断手段	214
第七章 机器的机械传动装置的诊断手段	235
27. 诊断参数和诊断方法	236
28. 诊断手段	258
第八章 运输和起重机械的制动器的诊断手段	274
29. 诊断参数和诊断方法	274
30. 诊断手段	277
结束语	282
参考文献	285

绪 论

为了确定是否需要更换或修理诊断对象中的故障部分或者整个诊断对象，以及为了规定出最适宜的预防作业周期和内容，都需要用到在机器使用过程中通过诊断获得的结果。

在机器运行中进行技术诊断，可保证对机器的状态是否良好、工作能力及其功能状况进行检查，找出缺陷和收集预测剩余寿命所需的信息。关于通过诊断所能达到的效果，可通过下述内容了解：

通过及时发现并消除机器各组成部分的不良状态，能使可利用率平均提高12~18%；

由于避免了不必要的拆装作业，故有利于保持诊断对象的技术性能（例如，液压泵经拆装之后，由于需要有新的磨合周期，技术性能将降低6~10%）；

保证技术性能（寿命）得到充分的利用（按目前情况，约有25%的汽车发动机是在寿命未能得到充分利用的情况下送修的，而大约有10~15%是在已不宜修理、即将发生事故前的状态下送修的）；

保证机器能在最优调节状态下工作，从而可提高它们的有效生产能力，降低燃料、润滑材料和电能的消耗量（例如，在未采用诊断的情况下，约有80%的拖拉机发动机所发出的功率低于标称值）。

由于能经常检查和监视各个对安全起保证作用的组成部分，故能提高工作的安全性（例如，在起重机械上，只有

40%的制动器故障是在进行计划性技术维护和修理时排除的，其余的故障都是在提出申请后修理时才予以消除的）；

研制新机器时，对于维护复杂、但结构却更有效的组成部分的采用，可以取消一系列的限制。

此外，可应用诊断手段调整机器的运行状态，能够建立起收集各主要部件状态变化动态信息的自动化系统。为了优化新研制机器的结构，改善制造工艺及运行规范，后一点是很重要的。

能够解决上述任务的诊断系统，是机器的技术诊断手段、诊断对象和执行者所构成的总体。在机器诊断中应用最广的各种器械式技术诊断手段，可以分为外部手段（只在诊断进行过程中与诊断对象连接）和内装式手段（结构上与诊断对象成为统一的整体）两类，利用后者能连续不断地获得有关诊断对象状态的信息。

同所有的测量手段一样，机器技术诊断手段分为手动的、半自动的和自动的三种，此外，按照与诊断对象的关系，机器的技术诊断手段可以分为专用的和通用的两种。专用的器械式手段的特点，是比较简单和价格较低。通用的器械式手段能按照可换的程序工作，所以适用于各种不同的诊断对象。各种通用手段虽然具有复杂和价格高昂的特点，但可以便于统一化，从而能组织批量生产。通常，内装式的机器技术诊断手段都是专用的。由于机器的各个组成部分结构差异很大，因此，很难将它们统一化。

机器的技术诊断手段可以制成为可携带的、流动的或固定的结构。

图1所示为功能（或测试）诊断用机器技术诊断手段的简图。

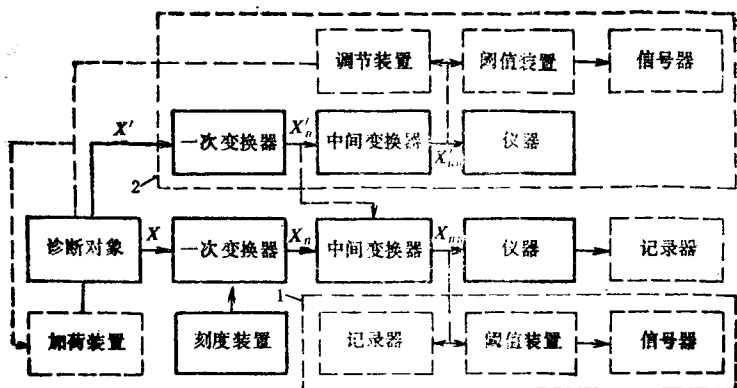


图1 机器技术诊断手段的结构简图

1—内装式仪器部分 2—诊断对象工作规范的指示和调节部分

诊断参数 x 的量值由主测量系统的一次变换器接受,并在一次变换器的输出端形成信号 x_n ,它与 x 之间保持函数关系。在一般情况下,信号 x_n 不能被直接用来驱动显示、记录或信号发生仪器。所以, x_n 要利用中间变换器变换成(其中包括规范化)信号 x_{nn} ,它也由仪器或信号器加以接受。

进行功能诊断时,对于诊断对象的完全确定的工作规范(回转频率,温度,压力等),通常要将诊断参数的数值规范化。所以,诊断装置通常都包含有一或若干个附加的平行测量系统,在一次变换器的输出端上形成信号 x'_n ,由它们表征诊断对象的工作规范。对诊断对象进行诊断时,定出诊断对象的明确工作规范,可在附加测量系统中使用测量范围有限的仪器,也就是其测量范围只适合于这些工作规范的变动量的仪器。所以,在附加测量系统的输出端上,常常应用刻度有限的指示仪表或比较仪(带有“大于—小于”信号指示的阈值装置)。在半自动和自动的机器技术诊断手段中,通常采

用自动调节诊断对象工作规范的方式，为此目的，要将信号 x'_{nn} 通过调节装置送到诊断对象的控制器件中。

有时，特别是在开动的诊断对象上使用的内装式手段中，往往将信号 x'_n （例如，回转频率）输入到诊断装置主测量系统的中间变换器内，这样，便可考虑到诊断对象的工作规范而自动修正信号 x_{nn} 。

采用试验诊断法时，要将诊断对象同加荷装置连接起来，由后者给诊断对象加上一定的负荷。在手动的机器技术诊断手段中，加荷装置由操作人员控制；在半自动的和自动的机器技术诊断手段中，为了控制加荷装置，是由诊断对象的工作规范设定部件发出控制信号的。

在机器技术诊断手段的构成中，还包含有刻度装置（量尺），其用途是以给定刻度表达被测值。刻度装置可以是外部的——按照机器技术诊断手段进行预防性作业时使用，也可以是内装式的——能用来对机器技术诊断手段的特性和功能实行经常的监督。

现代的信息—测量技术已能保证研制成全自动的机器技术诊断手段，它可将信息输出给微处理机或电子计算机以进行处理（加工）、提出建议或储存。在这种场合下，应该在图 1 所示的机器技术诊断手段的结构中补充相应的装置。但是，苏联和其他国家的经验表明，就目前来说，自动的机器技术诊断手段只适合于复杂的和重要的诊断对象，或是用来管理数量很多而分布区域集中的、比较简单的机器。

在现阶段，最有普遍意义的重要课题，是研制出获得原始信息的现代方法和手段，并积累推广运用的经验，以便能有效地检查机器各组成部分是否处于良好状态、其工作能力和功能的状况，以及寻找各种缺陷和预测其寿命。

为了发展机器的技术诊断手段，另一个同样重要的课题是赋予新研制的机器以适合于诊断的条件（保证适检性）。大家都知道，使这个课题难以顺利解决的一个障碍，是各个部门的机器制造单位和用户之间缺乏联系，以及诊断的方法和手段主要是由使用部门来研制的。现在，根据ГОСТ20417—75《技术诊断、诊断系统研制程序总论》的规定，负责保证对产品实施技术诊断的是产品的研制者，这样，就预先决定了应在设计阶段解决机器的适检性问题。

第一章 机器技术诊断手段的基本性能

1. 机器技术诊断手段的效能和一般特性

机器技术诊断手段的效能。研究机器技术诊断手段的效能时，不能同使用此手段的诊断系统的效能割裂开来。而且，效能是诊断系统的最有概括性的特性，通过它可以评价系统所完成功能的完善程度。目前使用的有各种各样的效能评价指标。例如，经济指标 $W = (W_0 - W_1) / W_0$ ，式中 W_0 ——应用理想的诊断系统所能获得的理想效益（效果）； W_1 ——应用实际系统所获得的实际效益； W_2 ——由于使用诊断系统而支出的费用^[1]。但是，这项指标不能普遍使用，例如，在将效益同诊断对象发生事故时造成的损失作比较时，它就不适用了。因此，通常都不是只用一个指标而使用若干个局部性的单项指标，例如，信息—统计指标

$$W = \left(\sum_{i=1}^n H_{0,i} - \sum_{i=1}^n H_{1,i} \right) / \sum_{i=1}^n H_{0,i},$$

式中 $H_{0,i} = -(P_{0,i} \log P_{0,i} + (1 - P_{0,i}) \log (1 - P_{0,i}))$;

$H_{1,i} = -(P_{1,i} \log P_{1,i} + (1 - P_{1,i}) \log (1 - P_{1,i}))$ ——诊断对象在诊断前和诊断后第 i 项参数的熵； $P_{0,i}$, $P_{1,i}$ ——按第 i 项参数判定的诊断对象无故障工作的概率，分别为不是根据经验确定的和根据经验确定的。

这项指标充分地考虑了诊断系统的准确度指标，但是它并不反映，例如，使用诊断系统所支出的费用和诊断的劳动

量。十分明显，在系统效能的第一和第二项指标中，反映了机器技术诊断手段的不同特性；在第一项指标中是机器技术诊断手段的劳动量、折旧费和各项准确度指标，而在第二项指标中基本上只是各项准确度指标。

在ГОСТ23564—79中，规定了各项有关诊断系统效能的綜合的局部性指标。其中列出了六项局部性指标，可用来比较诊断系统的不同方案。下面，我们将研究这些指标及其与诊断手段特性的关系。

方式 (i, j) 的诊断失误的概率 P_{ij} 。两项事件同时出现的概率：诊断对象处于技术状态 i ，而诊断的结果认为处于技术状态 j 。此处， i ——诊断对象的实际技术状态； j ——根据诊断结果认定的诊断对象状态。显然，当 $i = j$ 时，指标 P_{ij} 表示正确判定诊断对象技术状态的概率。

正确诊断的概率 D ——诊断系统确定出诊断对象实际所处技术状态的最大概率。

诊断的平均延续时间 τ_d ——一次诊断的延续时间的数学期望值。

诊断的平均费用 C_d ——一次诊断的费用的数学期望值。

诊断的平均劳动量 Y_d ——进行一次诊断的劳动消耗量的数学期望值。

寻找缺陷的深细程度 L (按ГОСТ20911-75)——为能指出诊断对象的一个组成部分或其某个部分而规定的寻找缺陷的特性，其准确度应足以判定缺陷的部位。

在列举出的各项指标中，前五项的基础是对诊断对象的性能、诊断结果、诊断手段的特性的概率估算。其中，在指标 P_{ij} 和 D 中包括了各诊断参数测量误差的基本特性（测量误差的均方根偏差和测量误差分布的函数形式——这两项特