

# 电机的状态监测

[英]P.J.达夫勒

J.彭曼

姜建国 史家燕 译

周庆昌 校

水利电力出版社

# 电机的状态监测

[英]P.J.达夫勒 J.彭曼  
姜建国 史家燕 译 周庆昌 校

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书是一本介绍电机状态监测的书。全书分为三部分：第一部分主要介绍电机故障监测与诊断的基础知识，第二部分较详尽地讨论了电机的各种监测技术，第三部分介绍了几个应用的例子。本书既讨论了电机各种故障的机理，也介绍了故障的检测方法；既有一定的理论分析，又有实际应用的例子，实用价值较大。

本书可供电力类专业工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业师生参考。

Condition Monitoring of Electrical Machines

Peter J. Tavner James Penman

Research Studies Press Ltd. John Wiley & Sons Inc 1987

电机的状态监测

[英] P. J. 达夫勒 J. 彭曼

姜建国 史家燕 译 周庆昌 校

\*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京四季青印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 7.5印张 165千字

1992年9月第一版 1992年9月北京第一次印刷

印数0001—3620册

ISBN 7-120-01790-X/TM·473

定价6.30元

## 译 者 的 话

电机的状态监测 (Condition Monitoring) 和故障诊断 (Faults Diagnosis) 是近十多年来发展起来的。

电机的状态监测就是利用各种传感器 (包括电、热、机械、光、声、乃至辐射和化学的传感器), 在电机运行时, 对电机进行检测, 从而可判断电机是否处于正常状态。而故障诊断则是使用计算机及其相应的智能软件, 根据传感器等提供的信息, 对故障进行“确诊”和“开出处方”, 即对故障进行分类、定位, 确定故障的严重程度, 并提出处理意见。因此状态监测和故障诊断是一项工作的两个部分, 前者是后者的基础, 后者是前者的更高层次的发展。

电机的状态监测能对电机起到“健康检查”的作用, 故可及时了解电机的“健康”状况, 掌握电机“病症”的发展情况和严重程度。运行维护人员可据此进行综合判断, 确定出检修的最佳时刻。这种技术可帮助运行维修人员摆脱被动检修和不太理想的定期检修的困境, 按照设备内部的状况, 合理地安排检修工作, 实现所谓“预知”维修。这样既可避免由于设备突然损坏, 停止运行带来的损失; 又可比较充分地发挥设备的作用; 如再和故障诊断系统结合起来运用, 经济效益当更加巨大。国外实践已证实了这一点, 国内许多单位也正在开展这方面的工作。

本书主要是讲电机的状态监测。全书分为三部分。第一部分主要是介绍电机及其故障“诊断”的“入门”。第二部分较详尽地讨论了各种监测技术。第三部分介绍了几个应用

的例子。书末参考文献列举了1986年以前世界有关电机状态监测的文章。该书既介绍了比较成功的状态监测技术，又讨论了尚在发展的不十分成熟的新进展，是一本比较全面地介绍电机状态监测技术的书。

本书第一、四、五、六章由清华大学电机系姜建国翻译，第二、三、七、八章由能源部电力科学研究院系统所史家燕翻译，全书由中国电力企业联合会周庆昌校订。由于我们水平有限，时间比较短，译文中的缺点乃至错误在所难免，恳请读者指正。

1992年7月

# 目 录

译者的话	
第一章 监测概论	1
1-1 引言	1
1-2 监测的必要性	3
1-3 监测什么和什么情况下需要监测	7
1-4 本书的内容	10
第二章 电机的结构、运行及其故障形式	12
2-1 引言	12
2-2 电机的结构	15
2-3 各种类型电机的构造	22
2-4 电机的技术条件与故障机理之间的关系	26
2-5 故障机理	29
2-6 电机的故障实例	30
2-7 结论	38
附录 1 电机故障的机理	38
第三章 监测系统的基本单元	45
3-1 引言	45
3-2 自动监测	47
3-3 信号变送	47
3-4 数据采集及其预处理	63
3-5 数据处理	65
3-6 诊断	73
第四章 监测用的电气技术	75
4-1 引言	75
4-2 发电机和电动机的定子故障监测	75
4-3 发电机转子故障	85

4-4	电动机转子故障	102
4-5	发电机和电动机状态监测——综合性电气法	108
<b>第五章 监测用的化学方法</b>		<b>117</b>
5-1	引言	117
5-2	绝缘的劣化	117
5-3	影响监测的因素	119
5-4	绝缘劣化的测定	123
5-5	润滑油和轴承的劣化	138
5-6	油劣化的监测	139
5-7	磨损碎屑的监测	140
<b>第六章 振动监测技术</b>		<b>146</b>
6-1	引言	146
6-2	定子铁芯的响应	146
6-3	定子端部绕组的响应	155
6-4	转子动力学	156
6-5	轴承振动的特性	162
6-6	振动的监测	166
<b>第七章 温度监测</b>		<b>186</b>
7-1	引言	186
7-2	局部温度的测量	186
7-3	局部最热点温度的测量和热象	193
7-4	平均温度的测量	195
7-5	结论	196
<b>第八章 监测的应用实例</b>		<b>197</b>
8-1	引言	197
8-2	多参数监测系统	197
8-3	大型汽轮发电机的自动监测	207
8-4	大型电动机的监测	215
<b>参考文献</b>		<b>221</b>

# 第一章 监测概论

## 1-1 引言

旋转电机已应用于现代社会的家庭生活和工业生产的各个方面。普通一户人家在电钟、家用电器、玩具和供暖系统中，所用电动机的台数可达20~30台之多，这些电动机的额定功率一般都在1kW以下。

为了要把我们的生活维持在一定的水平，就要依靠功率更大和更复杂的电机。电，虽然用起来十分方便，但发电机却相当复杂，有的容量可超过100万kW。我们买来的大部分食品要用冷藏设备或空气调节器来保鲜，而这些设备的核心部分也是电机。许多家庭用品本身是石油和化工的副产品，或者它们的外包装是石油和化工的副产品，而生产塑料和化学纤维产品的生产线上，原材料的传送和反应的控制，当然也是靠电机来实现的。

轧制造汽车用的钢材，要用大型的电机。给加热钢坯的炉子加料，也要大量使用电机。如果没有电机，我们的社会很快就要瘫痪。

总的看来，电机有大有小，它们或是在车间里相对独立地运行而和其它设备不大相干，或是成为复杂生产线上的一个部件。生产线只有所有部件都在正常地运行，才能维持生产。从发展来看，生产线上电机所起的作用越来越大，在未来的几十年里，这种趋势肯定会进一步加速。

历来大家认为电机很容易和系统的其它电气设备、机械



设备脱开；而且笼统地说，电机的可靠性也是很高的。以上两点正是电机的继电保护发展的基础。继电保护的设计原则是在事故发生后，保护动作，从而限制事故进一步地发展。继电保护的基本功能如图1-1所示。

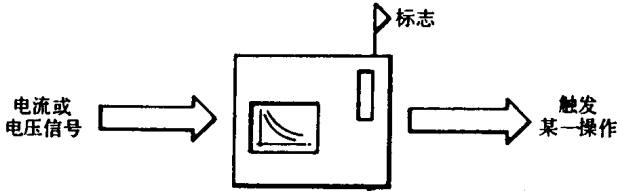


图 1-1 继电保护的基本功能

传感器提供的信号是电流信号或电压信号，继电器根据设计师或维修人员预先设置的整定值判断这些信号的电平。如果这些电平超过了整定值，继电保护就动作。其结果常常是电机断电，同时继电器上的标志也显示出发生了事故。这就是最简单的继电保护。实际上，现在的继电保护可以有更多的功能，有的可以把许多复杂的判据程序写入内存，这样就可以有各种复杂的功能。例如，用这种继电保护可以实现电机没有冷却到一定的温度不能重新启动的功能。

如上所述继电保护可以认为是一种监测，工程上应用得很广泛也很成功。所有的电机的继电保护系统实际上是一些电气—机械装置。对于具体的电机而言，常采用的保护有下述几种。

- (I) 接地保护；
- (II) 过流保护；
- (III) 差动电流保护；
- (IV) 欠压和过压保护；
- (V) 负序保护；

- ( VI ) 失磁保护；
- ( VII ) 逆功率保护；
- ( VIII ) 超速保护；
- ( IX ) 振动过大保护；
- ( X ) 过热保护。

以上所列也并非包括了所有的各种保护。

这里着重指出的是只有在事故发生后保护才能动作，而且通常是执行某些操作。这正如文献[1-1]所说的那样：“设备的保护，并不意味着能够预防事故发生，它只能在事故发生后采取行动；它是在悬崖绝壁下的救护车，而不是悬崖绝壁顶上保护行人的栅栏”。

继电保护动作将使电机断电。如果某台电机从该生产线上解列并无多大困难，或者该事故电机和别的正在运转的设备没有什么关系，那么继电保护动作当然就是可以允许的了。如果电机在生产流程中起着很重要的作用，它的突然停电会导致整个生产流程的停止运行，这时所造成的损失就比单台电机有计划地停电所造成的损失大得多。当然也还有不少场合，单台电机的价值和—一个车间的停止运转所造成的经济损失相比并不小。从维修的角度来看，监测不一定只是针对单独某台电机而设的，而更多的时候是为了对生产流程中多台设备的“健康”状态进行检查而设的。

## 1-2 监测的必要性

按预定的计划停机的概念必然会导致人们产生“监测”的思想。所谓“状态监测”就是在设备整个使用期内连续不断地对它们进行“健康状态”的检查与判断。状态监测和继

电保护是密切相关的，但各自处理的方法又十分不同，因此，带来的效益也就完全不同。

这主要是因为监测能在事故发生前进行预报，而保护则基本上是在事故发生后的反应性动作。在许多情况下，状态监测可以扩展为主要保护。状态监测有在事故的早期阶段就发现事故与提前报警功能，这正是运行维修人员所希望的。因为这样他们就可以选择在最合适的条件下有准备的停机与检修设备，其结果是既节省时间，又减少了损失。

如前所述，运行维修人员希望利用监测系统来作故障的提前报警。但也要看到，监测系统也给运行人员带来相当重的负担。此外，还有以下的问题也是需要考虑的。例如，一旦人们确定要进行监测，那么应该采用什么形式的监测？是间歇的还是连续的？是不定期间歇的还是定期间歇的？如果选择的是定期的维修的方案，那么是否根本不需要监测呢？还有，监测可以得到大量的数据，如何最好地利用这些数据而又花钱最少？最后也许是最重要的是需要花多少钱才能使监测真正有效？这些问题几乎没有一个是简单回答的，但我们可以从维修和更换设备所造成的企业的负担，以及各种维修策略所需的经费来加以研究，并由此得出某些指导性意见。我们有三种不同类型的维修方式。

- (I) 损坏后再修理；
- (II) 定期的检查与维修；
- (III) 根据状态监测的结果进行维修。

(I)类维修方式是设备一直不停地运行，只有在损坏后才更换设备。(II)类可以包括一些有限的监测措施，也可以不包括任何监测措施。(III)类则肯定需要监测。根据尼尔(NEALE)在1979年发表的报告<sup>[1-2]</sup>，表1-1列出了一些

工业部门每年每个雇员所占有的机械设备的投资数。为了使该表的数字能反映目前的实际情况,我们做了一些修改。表中所列工业部门都是电机及其辅助设备占有较大比例的部门。

上述报告还指出维修费的年平均数是设备年投资的80%。表1-2列出了某些工业部门的设备年维修费与机械设备的年投资的百分比。实际上维修费是很高的。因此,任何能减少这些数字的措施都会受到欢迎。惠普 (Hewlett-Packard) 杂志上发表的<sup>[1-3]</sup>令人吃惊的数字表明:美国商务界每年在维修方面的花销高达2000亿美元,而且以每年12%递增。当然这些钱只有几个百分点是花在电机的维修上的,但花在电机维修上的钱仍然数量很大。

表 1-1 每个雇员每年设备的投资

工业投资	每年机械设备的投资 每个雇员 (英镑)	工业投资	每年机械设备的投资 每个雇员 (英镑)
电气工程	400	石油精炼	14000
供电部门	8000	钢铁	1800
化学工业	2400	北海石油和天然气	160000
纺织工业	600	自来水	800
仪器制造	400		

表 1-2 某些工业部门设备年维修费与年投资的百分比

工业部门	设备年维修费 设备年投资 (%)	工业部门	设备年维修费 设备年投资 (%)
煤	26	煤 气	80
钢	42	自 来 水	80
铁	50	纺 织	82
造	78	机 械	100
化	80	仪 表 制 造	150
工	80	印 刷	160
电			
机			
电			
供			
电			

由此可见，大家都希望设备的维修更有效一些。特别是有些公司，约有70%的维修工作是无计划的“紧急维修”。它们就应该仔细考虑哪种维修方式更适合于本单位采用。例如，损坏了再修的方式需要有大量的备件，而且要设备损坏不影响整个系统的情况下才适用。对这种方式人们要问：干嘛要把大量的投资花在备件上呢？应该允许这种情况继续存在吗？

许多工业部门，特别是供电部门，根据有限的不连续的状态监测结果，采用定期大修和更换设备的计划维修方式。这种维修方式能节省多少费用，大家的估计并不一致。通常认为全部维修费的60%是该花的。这当然是属于乐观的估计。这种维修方式要求有很熟练的维修人员来执行。还有另外一种估计，认为用这种方式维修，更换下来的设备其中只有10%是必须换下来的，那就是说其余的90%的设备都是没有必要更换的。

考虑到现代生产过程中使用电机越来越多和生产过程也越来越复杂的现实，自然会得出如下的结论：对设备的一些关键项目连续状态监测可以获得很大的效益，其中包括可以更有效地使用设备，减少设备的损坏，降低更换设备所需的费用。运行人员可以连续不断地收集设备的运行行为的信息，从而有助于提高设备的利用率和效率。图1-2<sup>①</sup>为典型的继电保护单元外形图，该设备能提供有关设备的运行和维修两方面的信息。此外，另一个重要的要考虑的因素是维修得愈好，设备运转也愈安全。运行人员可以经过长期的状态监测所积累的数据来分析设备状态的发展趋势，从而进一步改进维修计划。这些数据也可向设备的制造者和设计者提供信息，用以

---

① 该图，译文中略去了——译者注。

改进其产品的可靠性。这样就形成了如图1-3所示的“大闭环”，它包括设计制造、设备运行、设备状态监测和控制、设备状态的发展趋势等项。

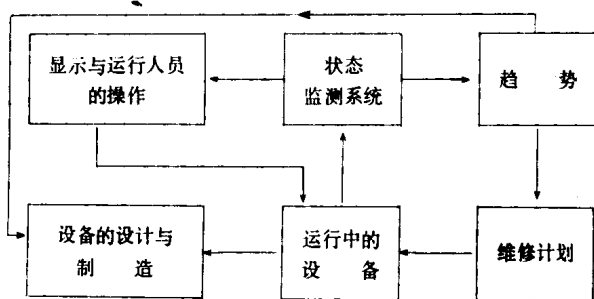


图 1-3 状态监测在“大闭环”中的位置

那么状态监测需要花多少经费呢？这因设备所在生产流程的价值的不同而有所差异，但决不会少于被监测设备的投资的1%。对一般的工业部门来说，更典型和更实际的估计是设备费的5%，而对那些重要的生产部门，如近海石油天然气工业部门，这个数字就有可能超过10%。

### 1-3 监测什么和什么情况下需要监测

状态监测能带来什么好处的问题，我们已经讨论过了。现在要问，什么情况下需要监测和监测什么？这里监测什么是指监测什么样的机器和什么样的参数两个方面。前者是容易回答的。从投资方面来考虑，对于小于20kW的电机来说，无论采用和电机装在一起的永久性的智能监测装置，还是采用由有熟练技能的人员定期使用的便携式监测装置，都是不合算的。当然，如果小电机在大系统中起着很重要的作用，则

另当别论。故应更加细心地去考查单台电机停止运转对整个系统的影响。

对发电厂里的大型电动机来说，如需备件的话，则投资很大。若采用监测，即便是进行不连续的监测，其经济效益也是相当可观的。电厂中锅炉吸风机和送风机用的电动机、锅炉给水泵用的电动机和冷却水泵用的电动机就属于这类电动机。应当知道，成功的监测可以大幅度地减少现场备用电动机的数量。

如果某台电机停止工作会造成很大的损失，则应对该台电机进行连续的监测。汽轮发电机就是这一类电机，一台大型发电机组停止运转一天，损失超过50万英镑。

由此可见，有些电机采用状态监测是易为人们所接受的。但另外还有一些电机是否进行监测，在决策之前应仔细估计，要考虑到维修所带来的负担问题。可是又不要为了省钱，把“至今还没有出过什么问题”作为根据，错误地否定监测的必要性。另一方面，我们又要注意，监测系统本身是复杂的，它也需要维修。如果投资搞了一个复杂的监测系统，由于设计和维修水平不高，引起大量的虚假报警，最后导致这个监测系统不起作用，那就是最糟糕不过的了。

要进行监测的应是那些能给运行和维修人员提供足够信息的基本参数，以便在确保电厂运行安全的前提下，决定运行和维修的计划。自动地在线监测电机的状态是近年来才有的。传统的一些物理量如线电流、电压、铁芯温度、轴承振动等一直都是要测量的，而且以后也还是要进行测量的。近年来也还对另外一些物理量进行监测。如用传感器检测冷却气体和油的热分解产物，检测轴承润滑油内所含杂质的多少。一些特殊的方法，如准确地测量旋转速度和漏磁通等，也在

故障监测中开始应用。

由于监测系统的硬件可以采用复杂的电子线路和微处理器为核心的系统，那么就可监测更多的物理量，这就使监测系统更为复杂了。计算机性能价格比的提高，微处理器的功能的进一步增加，都促使监测系统的功能更强和更全面。当然，这主要也是被监测的设备及其所要监测的信号复杂程度增加了。

以上这些都会使人们想到，如此强有力的监测系统的产生，保护和监测会不会合二为一呢？事实上最后肯定会是这样的。但在还没有积累相当多的运行经验之前，它们还是分开为好。

至于什么时候需要监测是比较容易回答的问题。当监测的投资与效益相比为合算的时候，或者有突出的安全上的考虑的时候，就要进行监测。评估投资与效益的问题是相当复杂的问题。笼统地说，使用监测系统后，如果年度净收入增加，则进行监测是值得的。年度净收入为年度毛收入与年度花销之差。监测的费用包括初始的调研费，设备的购置与安装费，工作人员的培训费和采集有关数据的费用。在整个使用期间，监测系统花掉了这些投资，而这笔投资可从装上监测系统后带来的效益中得到补偿。我们已在这一章的前面部分对监测的效益问题作了一些讨论。因此，完全可以说，如果监测系统方案选择恰当的话，则它的投资在其运行的第一年里就可全部收回。这样的例子并不少见。

有关监测系统决策的若干问题及如何求出合适答案的步骤，用“决策树”的形式示于图1-4。



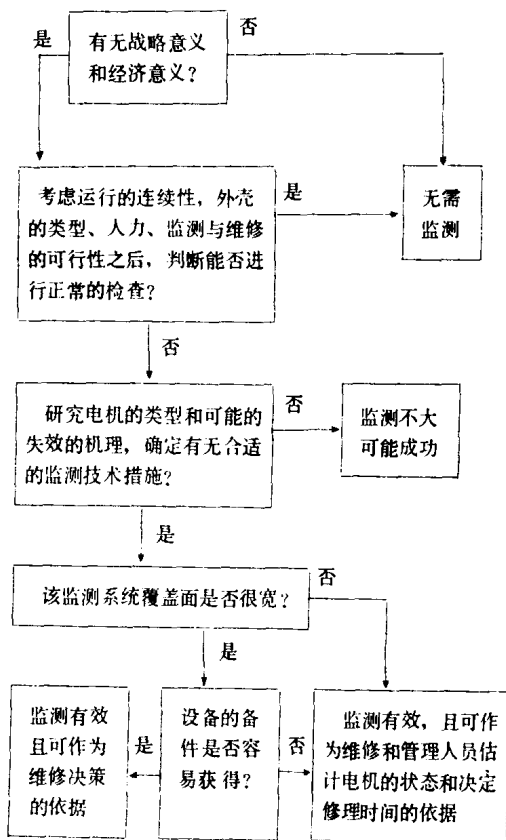


图 1-4 判断是否值得监测的决策树形图

## 1-4 本书的内容

不久以前我们感到有必要把各种有关状态监测的技术资料收集到一起, 提供给愿意从事电机监测的技术人员参考。这是一个非常宽广的技术领域, 需要有多方面的知识, 如电