

 黄新波 等编著

# 输电线路在线监测与故障诊断



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 输电线路在线监测与

# 故障 诊断

黄新波 陈荣贵 王孝敬  
孙钦东 蔡 伟 章 云

编著



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

输电线路在线监测与故障诊断技术是具有交叉学科性质的一门新兴技术,它是状态监测、状态巡视、状态检修的基础和前提之一。通过在线监测,在不影响设备运行的前提下提取各种状态信息,由监控中心专家软件判断设备的运行状态,并及时给出预警信息。本书将详细分析各种主流在线监测技术(绝缘子污秽、MOA、导线温度及动态增容、远程可视、线路覆冰雪、导线舞动、防盗报警、驱鸟装置等)的原理、实现和应用分析,并针对在线监测与故障诊断的一些关键技术和共性问题(通信网络、工作电源和传感器)进行探索,希望能够有更多的科研机构重视和加强输电线路在线监测与故障诊断技术的研究及开发,不断提高和完善其性能,使之真正成为防止电网事故大面积停电的第一道防御系统的一项关键技术。

本书是推行和实施状态监测、状态检修的应用型参考书,可作为从事输电线路技术研究、设计、制造、使用和运行检修专业人员的参考书,也可用于高等院校电气和电力专业大学生和研究生的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

输电线路在线监测与故障诊断/黄新波等编著. —北京:  
中国电力出版社, 2008  
ISBN 978-7-5083-7847-3

I. 输… II. 黄… III. ①输电线路—在线—故障监测  
②输电线路—故障诊断 IV. TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 140952 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 415 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



# 序一

输电线路在线监测与故障诊断

我国幅员辽阔，110kV 以上电压等级输电线路总长度超过 60 万 km，输电线路的安全可靠运行是电网安全的根本保障。20 世纪 90 年代以来，我国多个区域曾发生过大面积污闪事故，其主要原因可归结为天气恶劣以及大气污染等因素导致输电线路绝缘性能下降。近年来，输电线路冰灾事故在我国发生数千次，特别是 2008 年初，我国南方大范围遭遇了严重的冰雪冻雨等灾害天气，导致电网出现大面积冰灾事故。输电线路覆冰及舞动等因素造成了大量输电线路倒杆倒塔事件，严重危及电网安全可靠运行，对工业生产和居民生活造成了巨大影响。

输电线路状态在线监测及事故预警是提高输电线路运行安全可靠性的有效方法。近十年来，我国一批高校、研究院所及企业投入研究并相继开发出了绝缘子泄漏电流、输电线路覆冰、导线测温及输电线路图像等监测设备，通过对输电线路状态监测参数的分析，可及时判断输电线路故障并提出事故预警方案，便于及时采取绝缘子清扫、覆冰线路融冰等措施，降低输电线路事故发生的可能性。

目前，相对于变电设备在线监测与故障诊断技术研究，开展输电线路在线监测与故障诊断技术研究的时间较短，迄今尚无系统阐述输电线路在线监测与故障诊断原理及方法的著作。本书作者在总结归纳大量文献成果的基础上，结合自己从事输电线路在线监测技术开发的成果和经验，比较全面地介绍了输电线路在线监测中的关键技术问题。本书详细阐述了输电线路在线监测中传感器、电源和数据通信等关键技术，并在绝缘子污秽、导线温度、线路图像以及舞动在线监测等章节中详细阐述了监测系统框架与实现方法。本书比较全面地归纳总结了目前输电线路在线监测的各种原理和方法，内容充实，实用性较强，对输电线路在线监测技术开发和运行管理人员有较大的参考价值。

本书出版后，可以进一步推动我国输电线路在线监测技术的研究、开发及应用，在提高输电线路运行可靠性和国家电网安全方面发挥积极作用。

重庆大学 孙才新院士

2008 年 10 月 16 日



## 序二

输电线路在线监测与故障诊断

在线监测技术最早应用于变电站重要设备的监测，如变压器、套管、GIS等。美国是最早开展以在线监测为前期的状态检修工作，日本也是从20世纪80年代开始对电力设备实施以状态分析和在线检测为基础的状态检修，而欧洲很多国家也采用状态检修来提高检修效率和设备运行率。美国电力研究院的统计表明，实施状态检修提高设备利用率在5%以上，节约检修费用25%~30%。我国开展状态检修起步较晚，原水电部1987年颁布的SD 230—1987《发电厂检修规程》指出，应用诊断技术进行预知维修是设备检修的发展方向，近期国内电网企业正在积极推进输变电设备状态检修。2005年，国内陆续开发了输电线路覆冰、导线舞动、线路防盗、图像监控、导线测温、杆塔倾斜、泄漏电流等在线监测技术，并逐步在电力系统推广应用。2008年中南部电网冰灾引起了人们对输电线路在线监测技术的重视和投入，电网企业针对覆冰雪灾害加大相关防灾减灾技术研究和标准制定工作力度。

目前，输电线路在线监测与诊断技术的发展非常迅速，但在早期开发的产品应用中不同程度存在检测信号失真、数据稳定性差、产品工艺落后等技术问题和系统安装工作量大、维修困难等情况，从某种程度上影响了线路在线监测技术的推广应用，且大多在线监测技术尚无相关标准，在线监测系统在选型、检验和运行维护管理方面缺乏规范的手段和依据，部分劣质在线监测系统由于检验不严流入网内，发生误报、拒报甚至无法正常运行等，给电网的运行管理带来不利影响。只有确定可真实灵敏地反映设备状态的监测标准，选用成熟可靠的在线监测系统，才能对输电设备运行状况进行连续监视和评估，促进在线监测技术在应用中不断成熟和发展，提高输电线路运行状态的可监视性。

目前尚无有关输电线路在线监测技术与故障诊断方面的专著。书中详细分析了输电线路绝缘子污秽在线监测系统、输电线路氧化锌避雷器在线监测系统、导线温度及动态增容在线监测系统、输电线路远程可视监控系统、输电线路覆冰雪在线监测系统、输电导线舞动在线监测系统、输电线路防盗报警监测系统、输电线路驱鸟装置等各种主流在线监测技术的原理、实现和应用分析，并针对在线监测与诊断技术的一些关键技术和共性问题进行探索，有助于解决在线监测与故障诊断技术的标准化和兼容性、在线监测技术的稳定性与可靠性、状态分析与故障诊断等相关问题。书中内容新颖充实，结构科学严谨，对于推广输电线路在线监测技术、保障高压输电线路安全具有重要意义。

在该书即将出版之际，志序祝贺。

国家电网公司 张园威

2008年8月20日



# 前言

输电线路在线监测与故障诊断

输电线路在线监测与故障诊断是指直接安装在线路设备上可实时记录表征设备运行状态特征量的测量、传输和诊断系统，是实现输电线路状态监测、状态检修的重要手段，状态检修的实现与否很大程度取决于在线监测技术的成功与否。目前，输电线路在线监测与故障诊断技术的研究及开发非常迅速，已经初步在国家电网公司和南方电网公司中应用，并取得一定的效果。2008年南方电网的冰灾事故将进一步促进在线监测技术的大发展。

作者在国内较早开展了输电线路在线监测技术的研究，研发的输电线路绝缘子泄漏电流在线监测系统、导线覆冰在线监测系统、导线温度及增容系统、防盗报警系统、远程可视监控系统均在电力系统成功应用。本书反映在线监测与故障诊断理论和技术的最新成果，详细分析各种主流在线监测技术的原理、实现和应用，探索一些关键技术和共性问题，并给出一些在线监测系统的具体设计与应用实例，希望能够有更多的科研机构重视和加强输电线路在线监测与诊断技术的研究及开发，在应用中不断完善，使之真正成为防止电网事故大面积停电的第一道防御系统的一项关键技术。

全书共11章：第1章介绍输电线路在线监测与故障诊断技术的发展现状及相关问题；第2章介绍在线监测分机通信网络、工作电源和传感器的设计；第3章介绍输电线路绝缘子污秽在线监测系统；第4章介绍输电线路氧化锌避雷器在线监测系统；第5章介绍导线温度及动态增容在线监测系统；第6章介绍输电线路远程可视监控系统；第7章介绍输电线路覆冰雪在线监测系统；第8章介绍输电导线舞动在线监测系统；第9章介绍输电线路防盗报警监测系统；第10章介绍输电线路驱鸟装置；第11章介绍在线监测数字化管理系统。

本书是推行和实施状态监测、状态检修的应用型参考书，可作为从事输电线路技术研究、设计、制造、使用和运行检修专业人员的参考书，也可用于高等院校电气和电力专业大学生和研究生的参考教材。

直接参与本书编写的人员有黄新波、程荣贵、王孝敬、孙钦东、蔡伟、章云等。其中，黄新波撰写了第1章、第2章中的2.2节、第3章、第4章、第5章、第7章、第8章和第11章，程荣贵撰写了第2章中的2.1节和2.3节，孙钦东撰写了第6章，王孝敬撰写了第9章，蔡伟和章云撰写了第10章。黄新波对全书进行了统稿，张冠军对全书进行了审阅。此外，韩晓燕、刘伟、黄官宝、田毅、强建军、欧阳丽莎等参与了本文的校对工作。

本书的编著工作得到了西安金源电气有限公司刘家兵、罗文莉等有关领导的大力支持。

在线监测与故障诊断作为新技术，先前存在运行稳定性差、缺乏行业标准无法指导生产等相关问题，广大电力用户对此表现出极大耐心和体谅，可以说正是在他们无私的帮助和指导下，在线监测与故障诊断技术才有了今天健康和快速的发展。在此对国家电网建设运行部和特高压运行部、南方电网、华东电网、华中电网、西北电网、华北电网、新疆电力公司、

北京超高压公司、山西电力公司、河南电力公司、湖北电力公司、青海电力公司、重庆电力公司、江苏电力公司、贵州电网公司、云南电网公司、广西电网公司等单位表示衷心的感谢。

感谢为本书提供资料的个人和单位。

输电线路在线监测与故障诊断是一个全新领域，由于作者知识水平所限，书中疏漏欠妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

2008年8月于西安



# 目 录

输电线路在线监测与故障诊断

序一

序二

前言

第1章 绪论	1
1.1 在线监测、状态监测和状态检修	2
1.2 输电线路在线监测技术	3
1.2.1 在线监测的必要性	3
1.2.2 系统构成	4
1.2.3 输电线路在线监测技术	4
1.3 在线监测技术急需解决的问题	7
1.3.1 在线监测与故障诊断技术的标准化	7
1.3.2 在线监测技术的稳定性与可靠性	8
1.3.3 状态分析与故障诊断	9
1.3.4 在线监测的管理问题	11
第2章 在线监测分机通信网络、工作电源、传感器设计	12
2.1 无线数据通信网络	12
2.1.1 移动通信网络的发展	12
2.1.2 GSM 数据通信	13
2.1.3 GPRS 数据通信	15
2.1.4 ZigBee 数据通信	18
2.2 在线监测分机的电源设计	21
2.2.1 太阳能电池板	22
2.2.2 太阳能储能蓄电池	25
2.2.3 锂离子电池	26
2.2.4 蓄电池容量及太阳能电池板功率估算	27
2.2.5 太阳能供电控制器的设计	28
2.2.6 太阳能电池供电系统稳压电路设计	31
2.2.7 低压差集成线性稳压器	36
2.2.8 监测分机电源设计举例	38
2.3 常用传感器设计	39
2.3.1 温度传感器	39



2.3.2	湿度传感器	42
2.3.3	集成温湿度传感器 SHT11/SHT71	46
2.3.4	压力传感器	48
2.3.5	角度传感器	50
2.3.6	风速和风向传感器	52
2.3.7	电流传感器	53
2.3.8	其他传感器	56
<b>第3章</b>	<b>输电线路绝缘子污秽在线监测</b>	<b>60</b>
3.1	污闪事故	60
3.2	污闪机理	61
3.3	防污闪措施	62
3.4	污秽度表示方法	62
3.5	泄漏电流在线监测技术	63
3.5.1	泄漏电流监测原理	63
3.5.2	泄漏电流监测方法	64
3.5.3	泄漏电流在线监测装置设计	67
3.5.4	通过泄漏电流进行污秽判断	72
3.6	等值附盐密在线监测技术	81
3.6.1	人工污秽实验室测试方法	81
3.6.2	等值附盐密在线监测技术	83
<b>第4章</b>	<b>氧化锌避雷器在线监测</b>	<b>88</b>
4.1	氧化锌避雷器的运行故障简况	88
4.2	监测原理	89
4.2.1	MOA 的伏—安特性	89
4.2.2	氧化锌电阻片的等值电路	90
4.2.3	MOA 泄漏电流组成	90
4.3	MOA 在线监测方法	91
4.3.1	全电流法	91
4.3.2	三次谐波法	92
4.3.3	基波法	93
4.3.4	补偿法	93
4.3.5	数字谐波法	94
4.3.6	双“AT”法	94
4.3.7	基于温度的测量法	95
4.4	各种监测方法的优缺点	95
4.5	MOA 诊断算法	96
4.5.1	小波变换法	96

4.5.2	提升小波理论法	97
4.5.3	灰关联分析法	98
4.5.4	数学形态学法	100
4.6	输电线路 MOA 在线监测系统设计	102
4.6.1	系统方案的选取	102
4.6.2	系统总体构架	102
4.6.3	具体模块设计	103
4.7	试验数据	108
<b>第 5 章</b>	<b>导线温度及动态增容在线监测</b>	<b>110</b>
5.1	静态提温增容技术	110
5.2	动态监测增容技术	114
5.2.1	国外动态增容技术研究现状	114
5.2.2	国内动态增容技术研究现状	115
5.3	增容技术的理论基础	120
5.3.1	导线稳态方程及允许载流量的基本计算公式	120
5.3.2	摩尔根载流量简化计算公式	123
5.3.3	摩尔根载流量的简化计算公式验证	125
5.3.4	线路的跃迁研究	126
5.3.5	通过实时监测导线运行环境来提高导线输送容量的可行性分析	130
5.3.6	对增容的投资成本和效益进行的分析	132
5.4	各种因素对输送容量的影响	132
5.4.1	各国导线载流量计算的边界条件	132
5.4.2	各因素对载流量的影响	132
5.5	输电线路导线温度及动态增容系统	136
5.5.1	系统构成与系统功能	136
5.5.2	在线监测分机设计	137
5.5.3	运行实例分析	141
<b>第 6 章</b>	<b>输电线路远程可视监控</b>	<b>144</b>
6.1	系统概述	145
6.2	远程可视监控系统的关键技术	145
6.2.1	微控制器	145
6.2.2	图像传感器	147
6.2.3	图像采集	147
6.2.4	数字图像压缩标准	148
6.2.5	远程传输协议	150
6.3	输电线路远程可视监控系统	151
6.3.1	现场监测分机的设计	151

6.3.2	图像数据在移动互联网上的传输 .....	153
6.3.3	专家软件的功能概述 .....	154
6.3.4	系统的应用分析 .....	155
<b>第7章</b>	<b>输电线路覆冰雪在线监测</b> .....	<b>157</b>
7.1	输电线路覆冰雪危害及其形成机理、防护措施 .....	157
7.1.1	输电线路覆冰雪危害 .....	157
7.1.2	输电线路覆冰形成机理 .....	160
7.1.3	输电线路覆冰雪气候参数、模型研究 .....	161
7.1.4	输电线路除冰/抗冰技术 .....	163
7.2	输电线路覆冰雪力学分析 .....	165
7.2.1	力学模型基础知识 .....	165
7.2.2	力学模型在在线监测技术中的应用 .....	171
7.3	覆冰雪在线监测系统软硬件设计 .....	174
7.3.1	定量覆冰雪在线监测系统 .....	174
7.3.2	定性覆冰雪在线监测系统 .....	177
7.3.3	输电线路覆冰雪在线监测系统难点 .....	177
7.3.4	现场覆冰监测数据分析 .....	181
7.4	线路覆冰与局部气象因素的关系 .....	184
7.4.1	监测点概况 .....	184
7.4.2	现场监测数据 .....	184
7.4.3	覆冰量与气象因素之间的关系 .....	189
7.5	输电线路融冰过程监测系统的初步研究与设计 .....	191
7.5.1	现行融冰方案分析 .....	192
7.5.2	系统简介与设计 .....	193
7.5.3	融冰过程监测系统与融冰系统的典型设计方案 .....	195
7.5.4	借助融冰过程监测系统可实现的相关研究 .....	196
<b>第8章</b>	<b>输电导线舞动在线监测</b> .....	<b>197</b>
8.1	输电导线舞动的概念及形成因素 .....	197
8.2	输电导线舞动的危害及防舞措施 .....	198
8.2.1	导线舞动的危害 .....	198
8.2.2	防舞措施 .....	199
8.3	输电导线舞动的机理 .....	201
8.3.1	输电导线舞动机理基础 .....	201
8.3.2	输电导线舞动机理的发展 .....	202
8.4	输电导线舞动数学模型建立 .....	203
8.4.1	输电导线舞动数学模型的发展 .....	203
8.4.2	输电导线舞动三自由度数学模型的建立与分析 .....	204

8.5	输电导线舞动数学模型的参数分析	205
8.5.1	空气动力参数的确定	205
8.5.2	覆冰质量的计算	206
8.5.3	攻角的计算	206
8.6	输电导线舞动监测技术的研究现状	207
8.6.1	输电导线舞动的计算机仿真技术	207
8.6.2	采用摄像技术实现输电导线舞动的监测	207
8.6.3	基于 GSM SMS 的输电导线舞动在线监测系统设计	207
8.6.4	系统专家软件的介绍	209
8.7	基于位移、加速度传感器的输电导线舞动在线监测系统	211
8.7.1	设计思想的提出	211
8.7.2	系统设计思路	212
8.7.3	位移、加速度传感器的选型及特点	214
8.7.4	系统理论数据的 MATLAB 仿真	217
<b>第 9 章</b>	<b>输电线路防盗报警监测系统</b>	<b>219</b>
9.1	防盗报警系统的发展现状	219
9.2	微波感应式防盗系统	220
9.2.1	监测分机	221
9.2.2	监控中心	222
9.3	基于加速度传感器防盗系统	222
9.4	基于振动传感器和雷达探测器的防盗系统	224
9.4.1	系统构成	224
9.4.2	监测装置安装方式	228
9.5	感应式报警器	228
9.5.1	感应式报警器的特点	228
9.5.2	感应式报警器组成及工作原理	229
<b>第 10 章</b>	<b>输电线路驱鸟装置</b>	<b>232</b>
10.1	鸟害问题分析	232
10.1.1	鸟类活动引起线路跳闸的主要原因	232
10.1.2	鸟害故障发生的特征	233
10.1.3	鸟粪闪络	234
10.1.4	鸟害故障暴露出的问题	234
10.2	预防鸟害的措施	234
10.2.1	防鸟刺	235
10.2.2	防鸟罩	236
10.2.3	防鸟挡板	237
10.2.4	滚管式和滚线式驱鸟装置	238

602	10.2.5	风车式驱鸟器	238
603	10.2.6	封堵、人为筑巢引导相结合防鸟	238
604	10.2.7	高压电子驱鸟器	240
605	10.2.8	声音驱鸟法	240
606	10.2.9	超声波驱鸟器	240
607	10.2.10	激光防鸟器	242
608	10.2.11	雷达驱鸟器	242
<b>第 11 章 在线监测数字化管理系统</b>			245
609	11.1	二维在线监测数字化管理系统设计	246
610	11.1.1	系统总体结构	246
611	11.1.2	数据库、GIS 软件平台、面向对象开发语言选择	246
612	11.1.3	系统功能	247
613	11.1.4	二维在线监测数字化管理系统数据库设计	248
614	11.2	三维在线监测数字化管理系统	251
615	11.2.1	海拉瓦洛斯达技术简介	251
616	11.2.2	系统结构	251
617	11.2.3	系统功能	251
<b>参考文献</b>			257



# 第 1 章

## 绪 论

电力系统是一个由众多发、送、输、配、用电设备连接而成的大系统，这些设备的可靠性及运行状况直接决定整个系统的稳定和安全，也决定着供电质量和供电可靠性。检修是保证电力设备健康运行的必要手段，它关系着设备的利用率、事故率、使用寿命、人力、物力、财力的消耗，以及电力企业的整体效益等诸多问题。随着电网建设的加速和市场经济的推进，电力企业为避免由定期预防性试验及定期检修对设备检修“过渡”或“漏失”而引起的运行可靠性降低和经济损失，迫切需要以输变电设备状态在线监测与诊断技术为基础的状态维修，以预防和减少事故的发生，提高电力系统的安全性、可靠性、稳定性。

美国最早开展以在线监测为前期的状态检修工作，日本也从 20 世纪 80 年代开始对电力设备实施以状态分析和在线监测为基础的状态检修，而欧洲很多国家也采用状态检修来提高检修效率。国外统计资料表明，他们在实施状态检修后，一般可使设备大修周期从 3~5 年延长到 6~8 年，甚至 10 年，并且 1.5~2 年即可收回实施状态检修所增加的投资。应该说，国外在状态检修技术研究与实践应用方面都已取得了显著成绩。据美国电力研究院诊断检修中心的统计表明，实施状态检修提高设备利用率在 5% 以上，节约检修费用 25%~30%。我国开展状态检修起步较晚，原水电部 1987 年颁布的 SD 230—1987《发电厂检修规程》指出，应用诊断技术进行预知维修是设备检修的发展方向。应该说，状态检修在国内还是取得了一定的进展。由于输电线路在线监测技术的制约，期望加强现有模式下的离线监测手段来推动状态监测实施，但还是存在诸多问题。

输电线路在线监测技术是指直接安装在线路设备上可实时记录表征设备运行状态特征量的测量系统及技术，是实现状态监测、状态检修的重要手段，状态检修的实现与否很大程度上取决于在线监测技术的成功与否。国外较早开展了输电线路在线监测技术的研究，并将自己国家成熟或试运行的各类在线监测设备推向中国市场，而国内有能力从事这项技术研发的高等院校及科研院所由于缺乏市场能力和足够的资金，无法将研制的成果批量产业化，导致我国目前成为全球输电线路在线监测与诊断系统需求最大的市场。最近几年随着高新技术企业的发展，国内出现了一些专业的在线监测技术生产厂家，他们在积极学习国外先进技术的同时，立足本国电力国情，开发了一系列输电线路在线监测技术，有效提高了现有输电线路的运行安全。

输电线路在线监测技术在国家电网公司和南方电网公司中得到初步应用，部分监测系统在某些省电力公司的某些电压等级的设备已经普遍推广使用，如输电线路覆冰、导线测温、图像监测、氧化锌避雷器泄漏电流监测等，并取得一定的效果。目前，输电线路在线监测与

诊断技术的研究及开发非常迅速,但在早期开发的产品应用中都存在检测信号失真、结果稳定性差、产品工艺落后等技术问题和系统安装工作量大、维修困难等客观事实,从某种程度上阻碍了这种可大幅度提高电网安全运行的新技术的推广应用,且大多在线监测技术尚无相关标准出台,造成有数据没信息的窘况,给运行部门带来了很大困惑。此外,由于在线监测系统本身尚没有全面纳入到运行设备的管辖范围,因此在选型、检验和运行维护管理方面缺乏规范的手段和依据,部分劣质在线监测系统由于检验不严流入网内,发生误报、拒报甚至无法正常运行等,给电网的运行管理带来不利影响。

当前,只有确定可真实灵敏地反映设备状态的监测参数,选用成熟可靠的在线监测系统,才能对输电设备运行状况进行连续监视和评估,促进在线监测技术在应用中不断成熟和发展,使输电线路在线监测与诊断技术成为防止电网大面积停电事故第一道防御系统中的有力手段之一。



## 1.1 在线监测、状态监测和状态检修

目前很多人存在一个认识误区,认为在线监测就是状态监测,其实在线监测并不等同于状态监测,更不是状态检修。在线监测是通过在线监测装置(各种在线监测技术)在不影响运行设备的前提下实时获取设备的状态信息,它是状态监测的重要信息来源。目前状态监测包括在线监测、必要时的离线检测及试验,以及不与运行设备直接接触的(如GPS巡检、红外监测等)所有可得到运行状态数据等的几种监测手段。

状态检修从理论上讲是比预防检修层次更高的检修体制。状态检修是基于设备的实际工况,根据其在运行电压下各种绝缘特性参数的变化,通过分析比较来确定电气设备是否需要检修,以及需要检修的项目和内容,具有极强的针对性和实时性。因此,可以简单地把状态检修概括为“当修即修,不做无为检修”。目前大多认为状态监测检修主要包含状态监测、状态分析与故障诊断、检修决策等三个单元,其相互之间协调和修正,但状态检修技术随着在线监测技术的不断发展而逐渐进入实用化。与状态分析密切相关、能直接提高状态检修工作质量的理论与技术主要包括4方面的内容,即线路检修准则、设备寿命管理与预测技术、设备可靠性分析技术、专家系统。输电线路状态检修内容如图1-1所示。

但目前输电线路状态维修还不能仅完全依赖在线监测的结果,一是在线监测系统本身还处于研发及试运行阶段;二是在线诊断的专家系统还处于不断完善的过程;三是设备老化及寿命预测的研究还处于初期阶段;四是在线监测系统的技术标准、诊断导则以及专家系统的智能化程度尚有一个形成及发展过程。目前及相当长的一段时期内,需要系统而深入地不断总结和分析设备状态诊断所积累的大量诊断数据,制定出各种设备、各种自然灾害的诊断标准和使用导则,经过若干年的实践与修订后,再与在线监测结果进行全面的分析对比,才可能进入真正的设备状态在线诊断新阶段。这个漫长过程还需要多少时间,关键取决于在线监测系统的稳定性、精确灵敏度、智能程度及满足工程需要的工艺水平。尽管人们对输变电设备状态在线监测与诊断技术因种种原因而持不同的态度,但像电力系统综合自动化技术一样,它终将成为提高电力行业技术管理水平和大幅度提高电网安全运行水平的高度智能化的第一道防御系统的关键技术之一。

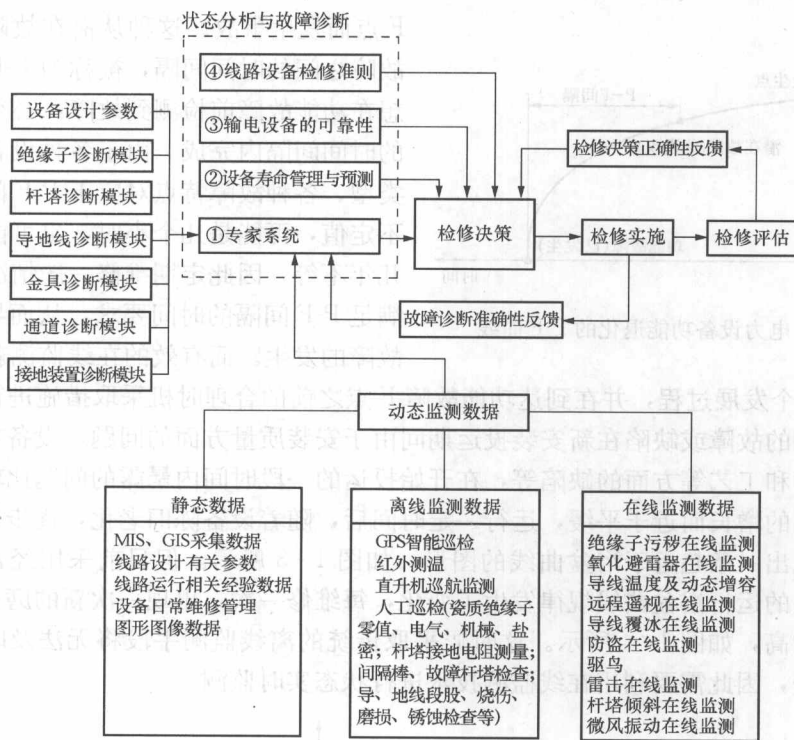


图 1-1 输电线路状态检修内容



## 1.2 输电线路在线监测技术

### 1.2.1 在线监测的必要性

早在 20 世纪 50 年代初，我国在发电厂和供电部门推行定期检修制度，这是一种以时间周期为基础的设备定期检修制度。这种检修方式的周期、项目等都是建立在传统经验的基础上，对设备个体的质量、运行环境、性能状态的差异考虑不全，工作死板教条。存在着检修周期短、设备停电次数多、检修费用高、检修工作量大、供电可靠性低等问题。随着电力工业的不断发展，这种检修模式已越来越不适应技术水平已得到大大提高的大电网、高电压、高参数、高自动化的电力系统。随着供电技术装备水平的提高，供电企业机制的改革和市场化运营，传统的定期检修方式，越来越无法适应形势发展和现有设备的运行需要。所以应该把主要精力放在对设备的在线监测和状态监测上。

在线监测技术基本原理可简述如下：污秽积累、缺陷发展、自然灾害等对输电线路的破坏大多具有各种前期征兆和一定的发展过程，表现为设备的电气、物理、化学等特性有少量渐进的变化，及时采集相应信息进行处理和综合分析后，根据其数值的大小及变化趋势，可预测设备的可靠性和剩余寿命，从而能及早发现潜伏故障，必要时可提供预警或报警信息。由于输电设备种类较多，结构差异很大，因此要求采用各种不同形式的传感器，将被测信号（电量和非电量）抽取出来，转换成监测装置可以检测的信号，并通过电缆送入监测装置。

电力设备的多数故障一般不会在瞬间发生，并且在功能退化到潜伏故障 P 点以后才逐步发展成能够探测到的故障（见图 1-2）。之后将会加速退化的进程，直到达到功能故障的



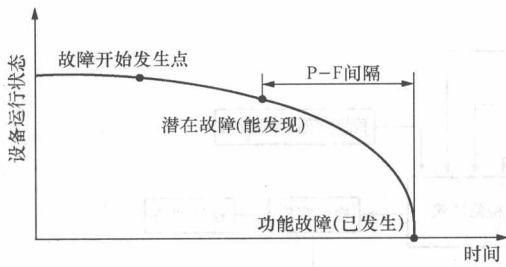


图 1-2 电力设备功能退化的 P-F 曲线

F 点而发生事故。这种从潜在故障发展到功能故障之间的时间间隔，被称为 P-F 间隔。如果想在功能故障前检测到故障，必须在 P-F 之间的时间间隔内完成。由于各种设备、各种故障类型、各种故障特点对应于 P-F 间隔的时间是不定值，可能是几个小时，也可能是几个月或几年不等，因此定期维修一般情况下不可能都满足 P-F 间隔的时间要求，从而导致设备功能故障的发生。而有效的在线监测就可能捕捉到

P-F 间隔的整个发展过程，并在到达功能故障 F 点之前的合理时机采取措施进行维修处理。

电力设备的故障或缺陷在新安装投运期间由于安装质量方面的问题、设备本身存在的薄弱环节及设计和工艺等方面的缺陷等，在开始投运的一段时间内暴露的问题比较多，随着消缺后运行时间的增长而近于平缓，运行一定时间后，随着设备陈旧老化，逐步暴露的缺陷开始增加，呈现出一条趋近于浴盆曲线的图形，如图 1-3 所示。但目前采用经常性的定期维修使常规设备的运行浴盆曲线规律发生了变化，每维修一次，出现一次新的磨合期，使维修后的故障率增高，如图 1-4 所示。这时候采取传统的离线监测手段将无法及时发现设备状态信息的改变，因此需要利用在线监测技术进行状态实时监测。

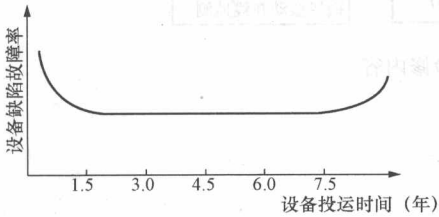


图 1-3 常规运行时间变化的设备故障率曲线

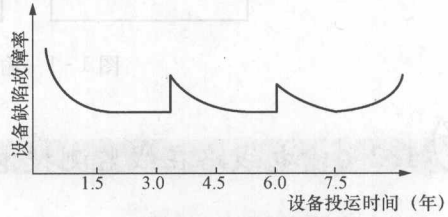


图 1-4 多次定期维修可能形成的设备故障率曲线

### 1.2.2 系统构成

输电线路在线监测技术主要分为五个部分，即网省公司监测中心、地市局监测中心、线路监测分机、通信网络、监测信息，如图 1-5 所示。线路监测分机定时/实时完成输电线路导线、地线、杆塔和绝缘子等设备状态信息的采集，完成环境温度、湿度、风速、风向、雨量等环境信息的采集，通过 GSM/GPRS/CDMA/3G 通信模块发送至地市局监测中心，监测中心专家软件则利用各种修正理论模型、试验结果和现场运行结果来判断输电线路的运行状况，及时给出预报警信息，从而有效防止各类事故的发生。监测中心可对分机进行远程参数设置（如采样时间间隔、分机系统时间以及实时数据请求等）。各地市局的监测中心与省公司监测中心采用 LAN 方式组网，省公司监测中心可以直接调用各地市局监测中心的导线、地线、杆塔、绝缘子及环境等采集信息。输电线路在线监测技术主要针对野外的输电设备进行监测，为了保证监测信息的及时传递，大多采用移动或联通的通信网络（GSM/GPRS/CDMA/3G），在无信号区可采取短距离无线电传递再通过移动或联通的通信网络进行远距离数据传输，目前科研人员正在尝试采用卫星通信系统解决移动信号缺乏的情况。

### 1.2.3 输电线路在线监测技术

国外在 20 世纪 90 年代针对输电线路在线监测技术开展了系统研究，如澳大利亚红相公