

输变电设备 健康诊断与故障预警

程宏波 辛建波 著

中国电力出版社

输变电设备健康诊断与故障预警

程宏波 辛建波◎著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

输变电设备健康诊断与故障预警 / 程宏波, 辛建波
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2020.12
ISBN 978-7-5643-7853-0

I. ①输… II. ①程… ②辛 III. ①变电所 - 电气设备 - 故障检测 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 245168 号

Shubiandian Shebei Jiankang Zhenduan yu Guzhang Yujing

输变电设备健康诊断与故障预警

程宏波 辛建波 著

责任编辑	黄庆斌
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	11.5
字 数	170 千
版 次	2020 年 12 月第 1 版
印 次	2020 年 12 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-7853-0
定 价	88.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

Foreword

为保证智能电网安全稳定和提高电网设备管理效益，电网设施的健康管理水平也需要加强和提升。本书内容针对输变电设备状态检测的有效方法和传感技术、状态评估技术、信息技术以及通信支撑技术等先进技术开展研究和工程应用，全面提升设备智能化水平，推广应用智能设备和技术，实现电网安全在线预警和设备智能化监控。

随着智能电网建设的不断深入和推进，输变电设备的状态监测手段越来越多，获得的信息也越来越全面。目前，输变电设备的状态数据大多相互独立地分散在各个不同的系统中，数据之间相互隔绝，导致对这些数据的管理烦琐、工作量大，数据中蕴含的信息不能得到充分有效的利用。随着时间的推移，这些数据的量将呈指数级增长。从这些海量的状态数据中提取有效的信息，实现对输变电设备运行维护的有益指导是充分发挥智能电网优势的一种有效途径。

本书围绕输变电设备全寿命周期的健康管理，从统一数据平台的搭建、状态数据的自动获取、多维状态数据的特征压缩与提取、设备状态的多元统计评价以及状态参数的纵向预测等方面进行介绍，在对输变电设备状态数据综合管理的基础上，实现对状态数据的综合利用，以及对输变电设备运行状态的全过程管理。本书主要内容如下：

统一的数据管理平台是实现输变电设备健康管理的基础。输变电设备相关的状态数据涉及面广,包含内容多,结构复杂。第 2 章基于 HADOOP 提供的分布式数据存储功能进行数据统计与计算过程的管理,分析了搭建输变电设备健康管理统一数据平台的系统方案。

输变电设备状态数据的准确获取是实现设备状态精确管理的保证。第 3 章研究了输变电设备状态数据的自动获取方法,研究并开发了利用 WiFi SD 卡和蓝牙 U 盘实现常用检测终端测试数据自动上传的方法及装置。

多维状态数据的特征压缩与提取是实现状态数据利用的前提。输变电设备的状态监测数据量大、来源多,可能有多个变量能对同一状态特征进行描述,部分状态属性之间存在着冗余。第 4 章利用主成分分析、因果关联分析、属性约简等手段分析多维状态数据之间的关联关系,在此基础上提取最能反映设备状态的关键指标参量,删除无用、重复的状态指标,从而有效地降低设备状态分析的难度,提高监测数据处理效率。

准确的状态判断是实现健康管理的关键。为充分发挥多维状态数据的作用,第 5 章提出利用多元统计控制图对输变电设备的状态进行评判,分析了多元 T2 控制图、多元累积和控制图以及多元指数加权滑动平均控制图 3 种典型多元统计控制图用于输变电设备状态评判的构建方法,对比了不同控制图对设备状态变化波动检出能力的区别,开发了相应的多元统计控制评判软件。该方法可将多元监测数据转化为一个统计指标,以直观的形式表示出来,不仅能发现输变电设备运行过程中状态参数均值向量的波动情况,还能反映多元参数之间协方差的变动情况,提高了识别的灵敏度。

状态参数的预测可为预防性检修提供参考。输变电设备的历史状态数据蕴含着设备状态变化的规律，反映了设备状态发展的趋势。第 6 章利用灰色模型、指数加权移动平均模型以及 Logistic 模型对历史数据反映的设备状态的发展过程和规律性进行延伸，对设备未来的发展趋势进行预测，对设备中潜伏的早期故障进行判断，从而为预防性检修提供依据。

在研究方案及方法的基础上，本书在最后实现了国网某省公司输变电设备健康诊断与故障预警统一数据平台搭建，完成了对输变电设备状态数据的统一管理和综合分析，以及对输变电设备状态的多元综合评价及缺陷与故障的智能诊断。项目的实施有利于提高输变电设备状态管理的水平，减轻运营维护的压力。

本书是对相关研究工作的系统总结，希望本书内容能对相关领域的教学、科研工作提供一些参考，对我国智能电网的建设和发展起到一定的推动作用。

本书的编写得到了郭创新、娄贤嗣、康琛、曾晗、裘德新的大力支持。另外，作者在编写的过程中也参考了大量专家和学者的著作及论文，在此向他们表示诚挚的谢意。

由于新技术的快速发展，加之作者水平有限，书中疏漏与不足之处在所难免，恳请专家和读者对书稿中的不当之处不吝赐教。

作 者

2020 年 7 月

目 录

Contents

第 1 章	引 言	001
1.1	我国电网发展现状、存在的问题及研究的意义	001
1.2	国内外研究现状	003
1.3	主要研究内容	006
第 2 章	输变电设备健康管理统一数据平台的搭建	009
2.1	统一数据平台的体系结构	009
2.2	统一数据平台的网络拓扑	015
2.3	统一数据平台的系统功能	016
第 3 章	输变电设备状态数据的获取	019
3.1	输变电设备的状态检测方法	021
3.2	输变电设备状态检测数据的自动获取方法	049
第 4 章	输变电设备状态数据的特征压缩与提取方法	057
4.1	输变电设备状态数据的来源及其特点	057
4.2	基于时间序列分析的设备状态数据清洗方法	061
4.3	基于主成分分析法的特征压缩与提取	069
4.4	基于因果关联规则的特征压缩与提取	077
4.5	基于属性约简的特征压缩与提取方法	086
4.6	小 结	092

第 5 章	输变电设备状态参数的多元统计评价方法	094
5.1	输变电设备状态参数的多元统计控制图原理	095
5.2	输变电设备状态参数多元统计控制图的构建及其比较	097
5.3	基于 MCUSUM 控制图的变压器状态监测	109
5.4	小 结	111
第 6 章	输变电设备状态参数的数据预测方法	113
6.1	输变电设备状态参数的灰色模型预测方法	113
6.2	输变电设备状态参数的 Logistic 预测方法	119
6.3	输变电设备状态参数的 EWMA 预测方法	126
6.4	小 结	134
第 7 章	输变电设备健康评价及故障诊断的应用	135
7.1	系统开发的背景	135
7.2	系统开发的思路	137
7.3	系统的基本功能	138
7.4	输变电设备缺陷与故障的辅助诊断	148
第 8 章	总 结	166
	参考文献	168

第 1 章

引 言

1.1 我国电网发展现状、存在的问题及研究的意义

随着电网建设规模的不断扩大，输变电设备逐渐增多，对电网运营维护的压力也日渐增大。以国网某省公司为例，根据“十三五”规划，2016—2020年，该公司新增 110 千伏及以上线路 37.2 万千米、变电容量 24.4 亿千伏安，新增 35 千伏及以下配电线路 41.26 万千米、变电容量 2.91 亿千伏安，均保持中高速增长态势。电网规模的爆发式增长，将给输变电设备的检修维护模式带来巨大挑战，现行的人工检修及故障后处理方式将使运维人员面临巨大的工作压力。

随着智能电网建设的不断深入和推进，输变电设备的状态监测手段越来越多，获得的信息也越来越全面。从出厂时的设备初始数据，到运行时的在线监测数据，从对设备进行各种试验时的试验数据，到设备运行过程中的各种故障及缺陷记录数据，这些数据从多个方面较为全面地记录了设备在各个不同时期的真实运行状态。如截至 2016 年 5 月，某省公司电网已有输变电设备状态监测装置 667 套，其中：

(1) 输电在线监测装置 116 套，包含微气象 31 套、导线温度 10 套、覆冰 19 套、视频 9 套、图像 27 套、微风振动 8 套、导线舞动 3 套、现场污秽度 5 套等，分布于 23 回线路中。输电在线监测装置涵括导线温度、覆冰、风偏、舞动、杆塔倾斜、微气象、微风振动、现场污秽、视频、图像 10 种监测类型。

(2) 变电在线监测装置 551 套, 包含油中溶解气体 66 套、铁芯接地电流 20 套、微水 13 套、顶层油温 2 套、变压器局部放电 6 套、分合闸线圈电流波形 7 套、SF₆ (六氟化硫) 气体压力 14 套、SF₆ 气体水分 14 套、储能电机工作状态 7 套、绝缘 384 套、视频 18 套等, 分布于 48 座变电站。变电在线监测装置涵括油中溶解气体、微水、铁芯接地电流、GIS (封闭式气体绝缘组合电器) 局部放电、电容型设备绝缘、避雷器绝缘监测、储能电机工作状态、分合闸线圈电流波形、变电视频等 9 种监测类型。

除此以外, 还有反映输变电设备运行环境的地理信息系统 (GIS), 国网某省公司气象信息监测系统, 以及反映输变电设备使用和维护情况的产生管理系统 (PMS) 等。

目前, 这些数据独立地分散在各个不同的系统里, 各种监测数据仍以孤立状态存在, 某种特定数据只能在某一指定系统下进行应用, 导致对这些数据的管理烦琐、工作量大, 数据中蕴含的信息未能得到充分有效的利用。随着时间的推移, 这些数据的量将呈指数级增长。如何从这些海量的数据中提取有效的信息, 实现对输变电设备运行维护的有益指导是充分发挥智能电网优势的一种有效手段。

输变电设备的监测数据全方位、多角度地反映了设备的运行状态, 合理有效利用这些信息对设备状态进行评价, 将使评价结果更为准确、全面。同时, 大数据背景下积累的历史数据越多, 对设备状态的把握就越加全面, 未来状态的不确定性也就越低。因此, 通过充分挖掘智能电网海量监测数据中所蕴含的有用信息, 可以实现对电网输变电设备健康状态的准确评估, 为设备的状态检修提供依据; 通过分析设备状态与服役时间、服役环境之间的关联关系, 可以找出影响输变电设备健康状态的因素, 提出相应的处理建议; 通过分析设备历史数据所体现出的发展规律, 对设备未来的健康状态进行预测, 可以在故障发生之前提早进行处理, 减少甚至避免故障的发生, 避免因故障而带来的损失。

基于以上考虑, 项目提出建立面向大数据的输变电设备健康诊断与故障预警云服务平台, 实现对现有生产管理系统 (PMS)、状态监测系统、能量管理系统 (EMS)、气象信息系统、地理信息系统 (GIS) 等与输变

电设备相关的多源跨平台数据的综合集成和统一管理，在此基础上构建“状态监测—健康评估—趋势预测—故障预警”多级工作模式的输变电设备状态管理模式。本书主要研究对设备多源、分布和异构状态数据的统一管理方法，研究多维状态数据的特征压缩和提取方法，研究输变电设备健康状态的综合评价及图形化显示方法，研究输变电设备的趋势预测方法，以求充分发挥全景状态信息大数据的优势，构建输变电设备健康管理及故障预警体系。这对电网具有以下重要作用：

（1）实现输变电设备相关状态数据的统一综合利用。通过构建全景状态信息的一体化监控平台，将与输变电设备状态相关的所有信息进行集中综合分析，使对设备的管理从孤立分散转为集中协同，从单项监控转为全局可观，从过程管理转为全寿命周期管理。

（2）通过对设备健康状态的感知，实现对设备故障的预警，并提前检修，从而减小设备故障引起的风险；通过对设备状态的准确判断，实现真正的状态检修，从而减少维修次数，缩短维修时间。这些举措使设备的管理更加精细，并由传统的事后响应转化为主动预防，提高设备完好率和利用率。

（3）通过对设备状态信息、故障信息、维修信息及运行条件的挖掘，分析影响设备状态的关联因素，为有针对性地采取预防措施提供依据；利用统计信息挖掘故障模式与故障特征之间的关联关系，提取新的故障征兆集，提升故障诊断的正确率。

（4）充分发挥“互联网”+与“电网大数据”的作用，将大数据带来的巨大存储压力转化为有用的经济效益。

1.2 国内外研究现状

目前，电力系统中的大数据研究主要围绕着存储、处理和挖掘三个方面来展开^[1]。一是大数据的存储和压缩方法的研究，主要解决海量数据需要巨大存储空间的问题^[2,3]；二是大数据的处理方法研究，主要解决海量数据的快速处理问题^[4]；三是大数据的挖掘问题，主要研究怎么从大量中的数据中发现新知识、创造新价值的问题。数据的压缩存储与并

行处理和计算机技术紧密相关，本项目重点关注的是电力系统中输变电设备状态监测数据的挖掘利用问题。

自 2012 年以来，国内外大学、科研机构和电力公司均开展了智能电网大数据的研究和工程应用。在国外，IBM 和 C3-Energy 公司开发了针对智能电网的大数据分析系统^[5]，Oracle 公司提出了智能电网大数据公共数据模型^[6]，美国电科院等研究机构启动了智能电网大数据研究项目^[7]，美国的太平洋燃气电力公司、加拿大的 BC Hydro 等电力公司基于用户用电数据开展了大数据技术应用研究。在国内，中国电机工程学会于 2013 年发布了《中国电力大数据发展白皮书》，国家高技术研究发展计划（863 计划）2015 年度项目申报指南在先进能源技术领域成立了 3 个项目，支持智能电网大数据的研究^[8]。自 2012 年以来，国家电网有限公司启动了多项智能电网大数据研究项目。2013 年，国家电网有限公司建立了“一库三中心”，即统一数据资源库、统计发布中心、数理分析中心、辅助决策中心。统一资源库负责收集、提供资源数据；“三中心”分别用来应用/提供统计数据、分析数据和决策数据^[9]。江苏省电力公司于 2013 年初率先开始建设营销大数据智能分析系统，开展了基于大数据的客户服务新模式应用开发研究；山西省电力公司开展配网营运大数据挖掘，通过挖掘供电能力、运行效率、线损的影响因素，预判未来趋势，为规划设计及运行检修提供辅助支持；北京等电力公司也正在积极推进营配数据一体化基础上的智能电网大数据应用研究。

上述情况表明，各电网公司在智能电网大数据的应用方面存在着较为急切的需求，然而目前关于大数据应用的具体方法却相对较为缺乏，相关的研究目前还多集中于对大数据总体重要性的分析上。文献[10]分析了发电、供电以及用电各个环节中大数据的产生来源和特点，从大数据存储、实时数据处理、异构多数据源融合以及大数据可视化 4 个方面论述了智能电网大数据带来的机遇和挑战。文献[11]在分析大数据、云计算、智能电网三者关系的基础上，给出具有通用性的电力大数据平台总体架构，并从电力大数据的集成管理技术、数据分析技术、数据处理技术、数据展现技术 4 个方面深入探讨符合电力企业发展需求的大数据关键技术的选择。文献[12]则在分析智能配电网大数据现状和特征以及

梳理数据关系网的基础上，阐述了大数据在智能配电网中应用所涉及的大数据存储与处理以及大数据解析等关键技术，分析了大数据在智能配电网中的应用前景，提出了应用路线图。文献[13]则结合主动配电网在能量优化调度、状态分析评估、保护控制及需求侧管理方面的应用需求，对大数据技术可能的应用场景做了展望。上述文献为我们描绘了智能电网大数据应用的美好前景，为我们利用开发大数据指明了研究方向。

文献[14]、[15]针对大数据时代下电网数据体量大、类型多、速度快的特点，搭建了基于云计算的数据处理平台，而文献[16]则在此基础上提出一种基于云计算技术的电力大数据预处理属性约简方法，为大数据的应用提供基础。文献[17]则将智能电表、SCADA（数据采集与监视控制）系统和各种传感器中采集的数据整合，并利用并行化计算模型 MapReduce 与内存并行化计算框架 Spark 对电力用户侧的大数据进行分析，提出基于随机森林算法的并行负荷预测方法。文献[18]通过对国家电网公司库存物资动态特征历史数据进行挖掘，提出基于支持向量机-稀疏贝叶斯学习方法的物资需求概率预测模型。文献[19]采用聚类分析法对电能质量监测中心的所有海量数据进行了分析，通过选取不同的电能质量指标组合作为聚类变量，开展了大量的聚类分析工作，最终确定了4类有效的电能质量指标组合进行聚类分析。文献[20]以相关性分析和信息聚合为主要手段，实现对电力变压器运行状态的评估与决策，该研究具有很好的参考意义，但该文只利用了关联分析一种方法分析了变压器一种设备，而输变电设备的种类众多，特性各异，大数据蕴藏的价值也包含多个方面，更多合适的方法尚有待进一步深入的研究。

目前对电网中输变电设备监测数据的利用存在着以下问题：

（1）数据管理比较分散。设备的出厂试验数据、在线监测数据、试验检测数据、缺陷和故障记录数据等自成系统，相互隔绝。

（2）数据利用比较单一。目前在线监测系统一般根据某单一监测量是否超过阈值来判断设备是否故障，没有考虑信息相互之间的影响，受外界干扰（电磁干扰、传感器误差）的影响较大。

（3）对历史数据缺乏有效利用。监测数据中没有考虑设备本身特性

(如出厂试验值)、历史监测数据等对设备健康状态有较大关联的历史信息, 缺乏对设备健康状态的全面把握。

(4) 状态评价结果比较简单。大多数设备的评价只有正常和故障两种状态, 只能对设备是否发生故障进行判断, 不能反映设备健康状态的发展趋势, 无法实现对运行趋势恶化的判断、识别, 以及不能对即将发生的故障进行预警, 对运行、维修起不到多大的指导作用。

1.3 主要研究内容

本书围绕输变电设备, 从全景信息的采集、多元数据的集成、多维状态数据的特征压缩与提取、健康状态的多元综合评价、状态趋势的预测预警等方面开展研究, 力求实现对输变电设备运行全寿命过程的综合管理, 以及对输变电设备运行状态的全面了解, 以及对输变电设备运行趋势的准确把握。本书主要研究内容及相互之间的关系如图 1-1 所示。

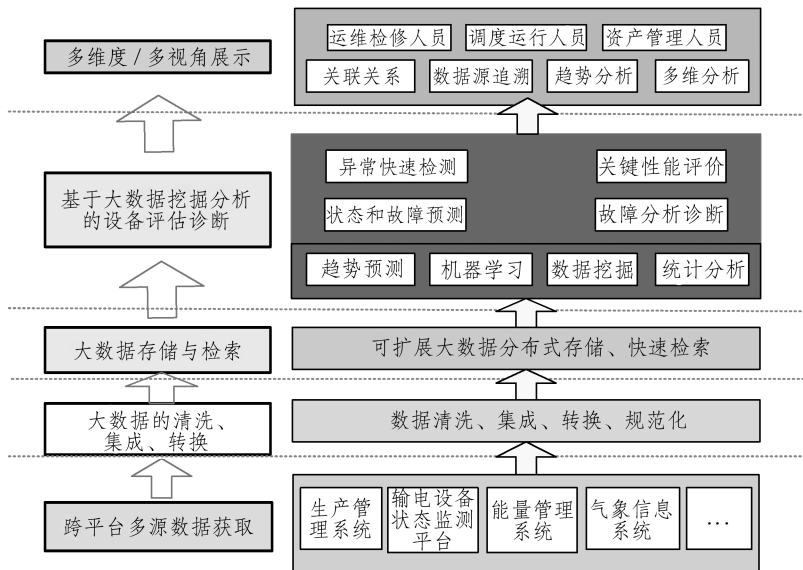


图 1-1 本书主要研究内容及相互之间的关系

(1) 输变电设备健康管理统一数据平台的搭建。

此部分研究多源、分布和异构的输变电设备相关状态数据的跨平台接入和转换方法；研究基于分布式存储和分布式管理的输变电设备状态数据的统一管理平台；实现对现有生产管理系统（PMS）、输变电状态监测系统、能量管理系统（EMS）、电网气象监测预警系统、地理信息系统（GIS）等与输变电设备相关的多源跨平台数据库的高速并发读取和跨平台数据安全传输，同时支持现场测试数据、试验数据的分布式上传；研究输变电设备不同来源、不同类型的数据融合和集成技术、数据抽取技术、过滤技术和数据清洗技术；研究输变电设备多源数据的统一表示方法；研究现场测试数据、试验数据的分布式上传方法；研究海量异构数据的分类存储和访问控制方法；研究面向状态综合管理的大数据平台体系架构。

(2) 输变电设备状态测试数据的自动上传方法研究。

此部分研究利用无线互联实现现场检测终端测试数据自动上传的方法；研究适用于已有检测设备的数据自动上传装置。

(3) 输变电设备多维状态数据的特征压缩及提取方法研究。

此部分研究设备状态数据关联关系的分析方法；研究利用状态数据冗余关系进行特征压缩的实现方法；研究对设备数据进行聚类的分析方法；研究对多维状态数据进行特征抽取的方法；研究适用于不同类型设备的特征约减方法。

(4) 输变电设备状态的多元综合评价方法研究。

此部分研究从海量数据中找出潜在模态及规律的方法；研究设备本征数据的内在关联关系，结合设备属性、特殊工况等个性化因素建立输变电设备的多维状态评价模型；研究输变电设备状态评价结果的可视化直观展示技术。

(5) 输变电设备状态参数的数据预测方法研究。

此部分研究利用历史状态数据对输变电设备的未来状态进行预测的方法；研究数据驱动的输变电设备状态参数的预测模型及模型参数估计方法；研究利用预测结果对输变电设备进行预防性维修的方法。

(6) 输变电设备健康诊断与故障预警统一数据平台的开发及应用。

此部分结合某省电网实际，开发某省电网输变电设备健康诊断与故障预警统一数据平台，实现对输变电设备状态数据的统一管理，在系统平台的基础上开发相应的高级应用。

第 2 章

输变电设备健康管理统一数据平台的搭建

输变电设备相关的状态数据涉及面广，包含内容多，既包括设备内部的电气量（如电压、潮流）、非电气量（如线温、油温、绝缘子污秽）等数据，又包括设备外部的微气象信息、电网运行信息（如电网拓扑、潮流分布）等实时状态数据，还包括设备的历史运行信息、故障、检修记录等历史数据。

当前这些相关状态的信息分散存在于众多不同的系统之中，分属于不同的人员管理，给多维状态数据的综合分析利用带来了困难。实现面向对象的输变电设备多维状态数据的统一管理，是实现多维状态数据分析利用的前提。

2.1 统一数据平台的体系结构

云服务平台拥有良好的体系架构，这是支撑输变电设备健康管理的基础条件。输变电设备的分散性和动态性的特征，决定了云服务平台是一个开放的系统，其体系结构也是开放的和可扩展的。借鉴云计算和云存储系统的典型体系结构，结合输变电设备健康状态管理的实际需求，构建的云服务平台的体系结构如图 2-1 所示。

云服务平台架构中，以输变电设备的状态数据为主线，将分布在不同区域、不同设备的异构状态数据进行统一管理，以输变电设备全寿命周期管理为目标进行任务的开发，以实现输变电设备资产的智能化运维。