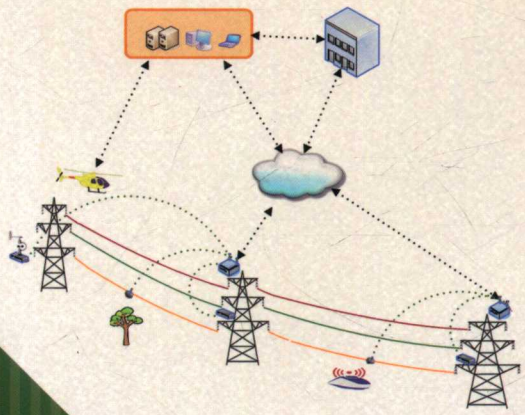
先进能源智能电网技术丛书

智能输电线路
原理方法和关键技术

盛戈皞 刘亚东 · 著



科学出版社

智能输电线路原理方法和关键技术

盛戈皞　刘亚东　著

科学出版社
北京

内 容 简 介

智能输电线路的目标是实现输电线路运行控制的信息化、互动化和自动化，提高电网输电环节的安全性和可靠性，提升电网运行效率和资产利用率，是智能电网的重要环节。本书结合智能电网的建设和发展现状，系统阐述智能电网条件下输电线路智能化的技术原理和实现方法，主要内容包括智能输电线路的技术内涵、架构体系以及智能输电线路监测技术、动态增容技术、分布式故障定位技术、多维度状态评价方法、监测装置共性关键技术等。

本书包含对智能输电线路这一新概念的全面阐释，既有现有智能监测技术的原理和应用分析，又有近年来随着智能电网发展涌现的新方法、新技术的原理和实现，理论联系实际，具有先进性和实用性，可供电力行业输电线路设计制造、运行管理、检修维护以及电网调度等相关专业科研人员及工程技术人员阅读使用，也可供高等院校电气工程相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能输电线路原理方法和关键技术 / 盛戈皞，刘亚东著. —北京：科学出版社，2017.12
（先进能源智能电网技术丛书）
ISBN 978-7-03-055090-3

Ⅰ. ①智… Ⅱ. ①盛… ②刘… Ⅲ. ①智能控制—输电线路—研究 Ⅳ. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 268584 号

责任编辑：王艳丽
责任印制：谭宏宇/封面设计：殷 靓

科学出版社 出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

南京展望文化发展有限公司排版
苏州越洋印刷有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本：787×1092 1/16
2017 年 12 月第一次印刷 印张：16 3/4
字数：410 000

定价：98.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

先进能源智能电网技术丛书
编辑委员会

顾 问 专 家：饶芳权

主 任 委 员：江秀臣

副主任委员：蔡　旭　韦　巍

委　　员：（按姓氏笔画排序）

尹　毅　朱　淼　刘　东　严　正

黄学良　符　杨　解　大

序

当今人类社会面临能源安全和气候变化的严峻挑战，传统能源发展方式难以为继，随着间歇式能源大规模利用、大规模电动车接入、各种分布式能源即插即用要求和智能用户互动的发展，再加上互联网＋智慧能源、能源互联网（或综合能源网）等技术的蓬勃兴起，推动了能源清洁化、低碳化、智能化的发展。在能源需求增速放缓、环境约束强化、碳排放限制承诺的新形势下，习近平主席于2014年提出了推动能源消费、供给、技术和体制四大革命及全方位加强国际合作的我国能源长期发展战略。作为能源产业链的重要环节，电网已成为国家能源综合运输体系的重要组成部分，也是实现国家能源战略思路和布局的重要平台。实现电网的安全稳定运行、提供高效优质清洁的电力供应，是全面建设小康社会和构建社会主义和谐社会的基本前提和重要保障。

电力系统技术革命作为能源革命的重要组成部分，其现阶段的核心是智能电网建设。智能电网是在传统电力系统基础上，集成新能源、新材料、新设备和先进传感技术、信息技术、控制技术、储能技术等而构成的新一代电力系统，可实现电力发、输、配、用、储过程中的全方位感知、数字化管理、智能化决策、互动化交易。2014年下半年，中央财经领导小组提出了能源革命、创新驱动发展的战略方向，指出了怎样解决使用新能源尤其是可再生能源所需要的智能电网问题是能源领域面临的关键问题之一。

放眼全球，智能电网已经成为全球电网发展和科技进步的重要标志，欧美等发达国家已将其上升为国家战略。我国也非常重视智能电网的发展，近五年来，党和国家领导人在历次政府工作报告中都强调了建设智能电网的重要性，国务院、国家发改委数次发文明确要加强智能电网建设，产业界、科技界也积极行动致力于在一些方向上起到引领作用。在“十二五”期间，国家科技部安排了近十二亿元智能电网专项资金，设置了九项科技重点任务，包括大规模间歇式新能源并网技术、支撑电动汽车发展的电网技术、大规模储能系统、智能配用电技术、大电网智能运行与控制、智能输变电技术与装备、电网信息与通信技术、柔性输变电技术与装备和智能电网集成综合示范，先后设立“863”计划重大项目2项、主题项目5项、支撑计划重大项目2项、支撑计划重点项目5项，总课题数合计84个。国家发展和改革委员会、国家能源局、工业和信息化部、国家自然科学基金委员会、教育部等部

委也在各个方面安排相关产业基金、重大示范工程和研究开发(实验)中心,国家电网公司、中国南方电网有限公司也制定了一系列相关标准,有力地促进了中国智能电网的发展,在大规模远距离输电、可再生能源并网、大电网安全控制等智能电网关键技术、装备和示范应用方面已经具有较强的国际竞争力。

国家能源智能电网(上海)研发中心也是在此背景下于2009年由国家能源局批准建立,总投资2.8亿元,包括国家能源局、教育部、上海市政府、国家电网公司和上海交通大学的建设资金,下设新能源接入、智能输配电、智能配用电、电力系统规划、电力系统运行五个研究所。在"十二五"期间,国家能源智能电网(上海)研发中心面向国家重大需求和国际技术前沿,参与国家级重大科研项目六十余项,攻克了一系列重大核心技术,取得了系列科技成果。为了使这些优秀的科研成果和技术能够更好地服务于广大的专业研究人员,并促进智能电网学科的持续健康发展,科学出版社联合国家能源智能电网(上海)研发中心共同策划组织了这套"先进能源智能电网技术丛书"。丛书中每本书的选择标准都要求作者在该领域内具有长期深厚的科学研究基础和工程实践经验,主持或参与智能电网领域的国家"863"计划、"973"计划以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

"十三五"期间,我国要实施智能电网重大工程,设立智能电网重点专项,继续在提高清洁能源比例、促进环保减排、提升能效、推动技术创新、带动相关产业发展以及支撑国家新型城镇化建设等方面发挥重大作用。随着全球能源互联网、互联网+智慧能源、能源互联网及新一轮电力体制改革的强力推动,智能电网的内涵、外延不断深化,"先进能源智能电网技术丛书"后续还会推出一些有价值的著作,希望本丛书的出版对相关领域的科研工作者、生产管理人员有所帮助,以不辜负这个伟大的时代。

江秀臣

2015.8.30 于上海

前　言

输电线路是电力输送的物理通道和电力通信的重要载体，也是电力系统分布最广、造价最高的组成部分，其高效、可靠运行是电网安全、经济运行的基础。为适应建设坚强智能电网的要求，输电线路的发展需要将电气技术、检测技术、通信技术、信息处理、大数据和人工智能等各领域最新研究成果与输电线路设计、运行、管理的各个环节有机结合，实现输电线路运行状态的智能化感知、分析和评估诊断以及信息流的网络化共享、融合和互动，建设信息化、数字化、互动化、自动化的智能输电线路运行体系。

目前，我国已经在特高压、高级调度中心、智能变电站等电网关键技术方面取得突破性的进展并获得重大的成果，为智能电网的建设奠定了良好的基础。相对于调度和变电环节，国内外输电线路智能化技术的发展相对较慢，线路信息化、数字化、自动化和互动化的程度较低，离智能电网的要求还有相当大的距离。2008 年以来，输电线路的在线监测技术获得较为广泛的应用，为智能输电线路的实现提供了基础支撑条件，但是由于对智能输电线路的模式、目标、功能和实现方案还没有统一的认识和实践经验，线路状态与电网运行相结合的智能决策缺乏系统完善的模型和分析方法，智能输电线路的应用还远未成熟。本书结合作者的研究工作对智能输电线路涉及的理论方法和关键技术进行阐述，探索一些共性问题与新的技术发展方向，希望能够有更多的科研机构及电网相关专业部门重视智能输电线路的研究和应用，在应用中不断完善，使之真正成为实现智能电网建设与发展目标的关键环节。

输电线路智能化技术是实现线路高效可靠运行的手段，既要立足于目前处于发展期的现实，又要兼顾未来成熟期的前景。本书依据智能电网对输电环节的要求以及智能输电线路技术支撑体系，结合智能输电线路示范应用工程，系统地阐释智能电网条件下智能输电线路的理论方法与关键技术，主要内容是智能电网条件下智能输电线路的实现模式、技术体系架构、技术原理和方法，涵盖输电线路智能化涉及的关键理论与新兴技术，其中输电线路分布式故障定位与故障辨识、负载能力动态评估、输电线路健康状态多维度差异化评价以及大数据分析技术的应用等原理和方法是本书作者近年来完成国家自然科学基金项目、科学技术部“863”计划（国家高技术研究发展计划）、科学技术部国际合作项目以及上海市科学技术委员会科技攻关项目等相关研究的成果，内容涉及线路规划设计、运行

维护、生产管理和电网调度等多个电网业务部门。本书既有理论分析和验证，又有现场实践应用经验的总结，并结合国内外最新的研究进展提出新的技术发展方向，可以为智能输电技术的研究和应用提供理论与方法的指导。

本书的研究成果是作者所在的上海交通大学智能输配电研究所教师及所指导的研究生共同取得的。直接参与本书写作的有盛戈皞、刘亚东，其中，盛戈皞撰写了第1～3章、第5章、第7章，刘亚东撰写了第4章和第6章。江秀臣教授、李国杰教授、钱勇老师为本书的研究和撰写工作进行了指导并提出了非常宝贵的建议和意见，研究生任丽佳、严英杰、王孔森、岳天琛、江淼、谢潇磊、秦嘉南、刘珂宏、申文、邵庆祝、朱成喜、徐湘忆、毛先胤、朱文俊、胡佳豪、邢毅、陆鑫淼、吴波、齐书情、庄启恺、毋金涛、张成、袁力翔、孙务本、杨威威等做了大量的研究工作，代杰杰、杨越文、梁涵卿等进行了校对。此书在编写过程中，还得到了上海交通大学电气工程系的领导和同事的大力支持和帮助，作者谨表示由衷的感谢。

本书有关研究工作得到国家自然科学基金项目“基于大数据分析的输变电设备状态评估基础理论与方法”（项目编号：51477100）、国家科学技术部“十二五”国家“863”计划智能电网专项“大数据分析技术在输变电设备状态评估中的研究与应用”课题（项目编号：2015AA050204）、国家国际科技合作项目“智能电网智能输电关键技术与实施方案”（项目编号：2013DFG71630）以及国家电网公司和南方电网公司多个科技项目的资助，本书中涉及的一些数据和现场应用技术材料以及系统的示范应用得到了国网山东省电力公司、国网上海市电力公司、中国南方电网超高压输电公司、广东电网公司、中国电力工程顾问集团华东电力设计院等电网设计和运行单位的帮助，在此一并深表感谢。

智能输电线路是一个涉及面较广的、全新的技术领域，本书主要结合作者的科研工作对关键技术问题进行了论述，覆盖范围有限。由于作者学识水平有限以及研究工作的局限性，疏漏与不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作　者

2017年9月

目　录

序

前言

第 1 章　智能输电线路概述 …… 1

1.1　智能输电线路的目标和内涵 …… 1

1.2　智能输电线路的实现模式和价值 …… 3

1.3　智能输电线路的组成架构 …… 5

1.4　输电线路智能化的关键理论和技术 …… 7

1.5　智能输电线路的发展现状 …… 9

参考文献 …… 12

第 2 章　输电线路关键状态智能监测与评估 …… 13

2.1　输电线路状态综合监测的总体架构 …… 13

2.2　输电线路智能监测功能及原理 …… 14

2.2.1　智能监测终端分类 …… 14

2.2.2　关键状态参数监测及智能评估 …… 15

2.3　智能输电线路状态信息交互模式及内容 …… 20

2.4　输电线路关键状态评估诊断方法分析 …… 22

2.4.1　导线覆冰厚度评估及预测 …… 23

2.4.2　导线弧垂的估算 …… 32

2.4.3　绝缘子绝缘状态评估及闪络预警 …… 37

2.4.4　导线舞动评估 …… 41

2.4.5　导线微风振动分析评估及寿命预测 …… 43

参考文献 …… 46

第 3 章　输电线路动态增容及其风险评估 …… 48

3.1　概述 …… 48

3.2　输电线路负载能力动态评估的原理和计算模型 …… 51

3.2.1 输电线路负载能力动态评估基本原理 …… 51
3.2.2 稳态允许载流量计算模型 …… 53
3.2.3 暂态允许载流量计算方法 …… 60
3.2.4 输电线路载流量影响因素分析 …… 63
3.3 基于导线张力监测的输电线路负载能力动态评估技术 …… 70
3.3.1 基于导线张力监测的输电线路负载能力动态评估基本原理 …… 71
3.3.2 基于导线张力的导线弧垂和平均温度计算方法 …… 73
3.3.3 现场应用数据分析 …… 75
3.4 基于多源信息融合分析的输电线路多时间尺度负载能力预测方法 …… 84
3.4.1 Elman 神经网络原理及其改进 …… 85
3.4.2 输电线路多时间尺度负载能力动态预测方法 …… 87
3.4.3 实例计算和误差分析 …… 87
3.5 输电线路动态增容运行风险评估方法 …… 97
3.5.1 基于 MCMC 方法的气候模型 …… 98
3.5.2 输电线路运行风险评估方法 …… 102
3.6 输电线路动态增容运行的智能调度策略 …… 104
3.6.1 增容运行调度应用总体策略 …… 104
3.6.2 负载能力动态评估预测分析 …… 106
3.6.3 $N-1$ 事故情况下的运行安全校核 …… 106
3.6.4 与电力系统稳定分析控制技术的结合原则 …… 107
3.7 风电场送出线路增容运行分析 …… 108
3.7.1 风力发电机功率特性分析 …… 108
3.7.2 风电场送出线路增容原理及效果分析 …… 109
参考文献 …… 114
第 4 章 输电线路分布式故障定位与故障辨识 …… 117
4.1 概述 …… 117
4.2 行波基本理论 …… 119
4.2.1 行波的折射与反射 …… 120
4.2.2 三相线路相模变换 …… 121
4.3 分布式故障定位基本原理 …… 123
4.3.1 分布式故障定位原理概述 …… 123
4.3.2 各检测点行波序列分析 …… 123
4.4 基于故障电流综合分析的故障区间确定方法 …… 126
4.4.1 基于故障电流偏离度的故障区间判断方法 …… 127
4.4.2 检测外区段故障区间判定 …… 131
4.4.3 基于初始行波极性的故障区间定位方法 …… 133
4.5 分布式故障定位算法 …… 133
4.5.1 两端对称法 …… 134
4.5.2 中点主导法 …… 137

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

4.5.3　四点联合法 …… 141
4.5.4　多点绝对时差法 …… 144
4.6　基于故障电流行波时域特征的雷击类型辨识方法 …… 146
4.6.1　基于行波极性差异的反击识别方法 …… 146
4.6.2　基于行波时域特征的输电线路绕击识别方法 …… 152
4.7　分布式故障定位与雷击类型辨识案例 …… 155
4.7.1　单相金属性接地故障 …… 155
4.7.2　反击闪络 …… 159
4.7.3　绕击闪络 …… 160
参考文献 …… 162
第 5 章　输电线路健康状态多维度差异化评价 …… 165
5.1　概述 …… 165
5.2　基于关联规则和主成分分析的输电线路状态评价关键参数提取 …… 167
5.2.1　基于关联规则分析的基础参量量化模型 …… 168
5.2.2　主成分分析法提取输电线路状态评价关键参数 …… 170
5.2.3　输电线路状态评价关键参数体系的建立 …… 173
5.2.4　关键参数的有效性验证 …… 175
5.3　基于组合赋权和模糊评判的输电线路健康状态综合评价 …… 177
5.3.1　各层状态量的模糊评判矩阵 …… 177
5.3.2　基于层次分析法和熵权法的组合赋权 …… 180
5.3.3　模糊综合评判 …… 182
5.3.4　实例验证 …… 183
5.4　考虑时间和空间信息的输电线路差异化状态评价 …… 185
5.4.1　考虑时间和空间信息的输电线路差异化评价模型 …… 185
5.4.2　考虑时间和空间信息的状态评价权重差异化调整 …… 186
5.4.3　实现步骤 …… 192
5.4.4　实例验证 …… 194
参考文献 …… 196
第 6 章　输电线路智能监测装置共性关键技术 …… 198
6.1　概述 …… 198
6.2　基于差分绕线 PCB 线圈的暂态电流传感器 …… 198
6.2.1　罗氏线圈基本理论 …… 199
6.2.2　罗氏线圈测量干扰分析 …… 201
6.2.3　差分绕线双半环 PCB 罗氏线圈设计 …… 203
6.2.4　双半环 PCB 罗氏线圈性能测试 …… 207
6.3　高效可靠的输电线路智能监测装置供电技术 …… 210
6.3.1　多电池组太阳能光伏供电技术 …… 211
6.3.2　高能量密度 CT 感应取能技术 …… 217
6.4　安全稳定的输电线路状态监测系统通信技术 …… 236

6.4.1 智能输电线路状态监测数据传输方式分析 …… 237
6.4.2 智能输电线路状态监测系统组网方式分析 …… 240
6.4.3 基于无线 Mesh 网络的输电线路状态监测数据传输 …… 243
参考文献 …… 246
第 7 章 智能输电线路的最新进展和发展趋势 …… 248
7.1 大数据和人工智能技术在输电线路状态评估中的应用 …… 248
7.2 光传感技术在智能输电线路中的应用 …… 251
7.3 传感器集成化和智能化技术 …… 253
7.4 输电线路状态检测图像自动处理和分析技术 …… 253
7.5 计及输电线路等设备状态的电网优化调度技术 …… 254
参考文献 …… 255

第1章

智能输电线路概述

1.1 智能输电线路的目标和内涵

当今人类社会面临能源安全和气候变化的严峻挑战，传统能源发展方式难以为继，可再生能源大规模利用，互联网、新能源等技术蓬勃兴起，推动了能源清洁化、低碳化、智能化发展。在能源需求增速放缓、环境约束强化、碳排放限制承诺的新形势下，习近平于2014年提出了推动能源消费、供给、技术和体制四大革命和全方位加强国际合作的国家能源长期发展战略。通过科技创新驱动，建立安全、低碳、清洁、高效的能源体系是保障我国能源安全的必然选择。

智能电网也被称为电网2.0，它是以物理电网为基础，将现代先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网，实现可靠、安全、经济、高效、环境友好等目标[1]。智能电网已经成为全球电网发展和科技进步的大趋势，被赋予消纳新能源、支撑电动车、提高大电网运行效率和用户节能的重任，欧美等发达国家已将其作为国家战略，并制定了智能电网发展技术路线图和时间表。我国国家电网公司和南方电网有限责任公司分别在2009年和2010年提出了智能电网的发展规划，此后每年的国务院政府工作报告都将智能电网的建设作为重要工作内容，“863”计划、国家重点研发计划重点专项“十三五”规划、国家自然科学基金等都持续将智能电网技术及其装备列为重点研究和发展方向。2015年7月，国家发展和改革委员会下发《关于促进智能电网发展的指导意见》，明确清洁能源的充分消纳、提升输配电网络的柔性控制能力、满足并引导用户多元化负荷需求等发展目标。2016年7月，《“十三五”国家科技创新规划》将智能电网列入15个面向2030年的国家“科技创新2030”重大项目。近年来，国家电网公司提出建设的全球能源互联网(Global Energy Internet)也是以智能电网为基础、以特高压电网为骨干网架、以输送清洁能源为主导、全球互联泛在的坚强智能电网，目标是从根本上解决全球能源安全、生态环境与世界和平等问题[2]。

智能电力设备是智能电网建设和发展的基础，其主要目标是根据设备自身运行状态

信息和外界多种信息的综合分析，采用智能分析、智能决策与控制手段，实现对设备运行状态的适时、适当调整与改变。电力设备智能化使得相关信息系统和人员能够实时掌控装备的运行状态，及时发现、快速诊断和消除故障隐患，从而在尽量少的人工干预下，快速隔离故障、自我恢复，使电网具有自适应和自愈能力，促进了智能电网建设中自适应和自愈目标的实现[3]。因此，实现电力设备智能化不但能使电网具备事故防御尤其是大面积事故防御能力，提高电网的自适应和自愈能力，大幅度减少电网大面积停电事故给国民经济和社会公共安全带来的突发性灾难，提高电网可靠安全运行水平，而且为大规模可再生能源利用提供优质电能平台奠定了重要技术基础，对实现节能减排、减少温室效应的目标具有重要战略意义。

输电线路是智能电网的六大环节之一，是电能输送的物理通道和电力通信的重要载体，也是电力系统分布范围最广、建设维护成本最高的组成部分，其高效、可靠运行是电网安全、经济运行的基础。根据电力行业统计分析，输电网络的停电事故大部分都是由于高压电力设备故障引起的，而高压电力设备的故障绝大部分为架空输电线路故障，近年来发生的一些重大停电事故，如 2003 年美加大停电、2005 年“9.26”中国海南大停电、2005 年“10.24”中国西藏藏中电网大停电以及 2016 年“8.12”中国京沪高铁大面积停运等最初都是由于输电线路故障引发的。为适应建设坚强智能电网的要求，输电线路运行管理需要将电气技术、检测技术、信息通信技术、大数据和人工智能技术等各领域最新研究成果与输电线路建设、运行、维护、管理的各个环节有机结合，实现输电线路运行状态的智能化感知、分析和识别以及信息流的网络化共享、融合和互动，建设信息化、数字化、互动化、自动化的输电线路运行维护体系，保障输电线路的安全高效运行。

智能输电线路的主要目标是采用先进的在线监测、智能巡检和带电检测等手段，通过准确可靠的传感测量技术与安全高效的通信技术，获取全景、广域的输电线路状态信息，建立可视化展示的输电线路运行监测分析平台，在此基础上利用多源数据融合分析技术和决策支持技术对输电线路及其通道环境状态进行智能分析评估、在线安全预警、故障精确定位和智能诊断，并与生产管理系统、智能调度系统甚至线路设计部门实现数据共享和互动，为线路设备状态检修、优化调度运行、电网应急防灾等提供线路状态信息和辅助决策支持，从而尽量减少人为参与，增强线路运行的可靠性和安全性，提高线路运行的经济性和线路利用效率，降低电网的建设、运行、维护等成本，减少电网停电损失，使输电线路运行、维护和管理综合效益达到最优化。

智能输电线路是智能电网的基础元件，具有自主感知和评估自身运行状态的能力，能综合外界多源信息，采用智能分析、决策与控制手段，使电网对输电线路运行状态可观测、可调整和可控制，支持电网主动提前应对线路故障、提高输电线路运行效率，达到输电网络安全、高效运行的目标。智能输电线路是传统输电线路适应智能电网发展的必然趋势，其主要内涵体现在以下几个方面。

1）实现输电线路运行状态的智能监测和自动评估

构建坚强智能电网，首先是提高电力系统运行的可靠性，而实现输电线路智能化监测和状态评估是其中的首要工作之一。采用传感、通信、人工智能等新技术，及时、准确、全面地获取输电线路运行的健康状态、劣化趋势和动态负载能力等关键性能，使设备具备自身状态评估能力，实现输电线路的故障预警，可以在很大程度上避免事故发生，提高线路

运行的可靠性，这是建设智能电网的基本内涵之一，也是实现输电线路智能化的最重要手段和基础。

2）实现输电线路状态信息交互和融合分析

智能电网是物理网与信息网的融合体，智能电力设备可作为一体化网络中的“节点”，其信息采集、传输、存储、处理、集成、展现是智能电网建设需要解决的重要问题。因此，为了有效实现输电线路的智能化，使线路状态信息可知，需要在智能电网信息体系架构下建立智能输电线路通信和信息平台，实现智能输电线路之间以及智能输电线路与其他智能电力设备和各层次、各环节应用系统之间的信息集成和交互。通过信息交互和融合形成完整、全面的电网视图，为智能电网智能决策和分析提供技术基础保障。

3）实现输电线路故障准确定位和智能诊断，为线路故障快速自愈提供支撑

在输电线路状态感知的基础上，通过对线路故障的机理、规律和特性的认识，为故障的智能识别提供理论指导，采用先进的信息处理和智能分析技术，对故障特征信息进行辨识，实现输电线路故障的精确定位和智能诊断，可以及时发现和处理故障，是实现输电线路故障快速自愈的基础。

4）实现输电线路运行风险实时评估和安全预警，为输电线路应急防灾、状态检修和全寿命周期管理提供智能决策支持

建立输电线路自身风险的实时评估和故障预测模型，具备输电线路故障早期的安全预警能力，实现输电线路应急防灾和状态检修的智能决策和优化管理。以此为基础，根据输电线路健康状态和重要程度，采取预测性检修策略，提高输电线路故障的主动防御能力，同时在满足可靠性要求的前提下，实现最优的线路全寿命周期成本，延长线路的服役时间。

5）实现输电线路运行状态和电网调度运行的信息互动，为电网优化调度提供辅助决策支持

计及输电线路等电力设备的健康状态和动态负载能力合理制定调度运行方式，分析电网运行风险，在保证安全的前提下调整输电线路的输送容量，充分挖掘输电线路的输送潜力，对电网的安全、高效运行起重要作用。因此，除了支撑输电线路状态检修，智能输电线路还应以支持电网优化调度运行为重要目标。

1.2　智能输电线路的实现模式和价值

在未来，智能电网终将演化成电力空间和信息空间（包括各类信息系统及信息设备）高度融合的电力信息物理系统（electric cyber-physical system，ECPS），其中电力空间覆盖所有电力一次设备作为 ECPS 的物理承载基础，信息空间涵盖所有电力二次系统与电力信息系统作为 ECPS 的控制与运算分析平台[4]。智能输电线路的主要实现模式是基于 ECPS 的原理和架构，建立智能输电线路信息物理系统（transmission cyber-physical system，TCPS），并最终作为 ECPS 的一部分，也是典型的信息物理耦合系统。智能输电线路信息物理系统实现原理如图 1.1 所示，实际的输电线路是由杆塔、导地线等大量设备

和部件组成的物理系统，信息系统由输电线路状态监测系统与能量管理系统（energy management system，EMS）、生产管理系统（production management system，PMS）、智能巡检系统、地理信息系统（geographic information system，GIS）等共同组成，是实现输电线路智能化的运行监测分析平台。信息系统通过在线监测、智能巡检、电网量测等手段获得输电线路部件及整体的关键状态信息、气象环境信息以及电网运行信息等反映输电线路运行情况的全景信息，基于智能分析和评估诊断的结果，通过智能调度、状态检修等手段实现输电线路物理系统状态的调整和控制。智能输电线路信息物理系统的信息系统和物理系统相互依存、相互影响，共同实现输电线路的安全、高效运行。

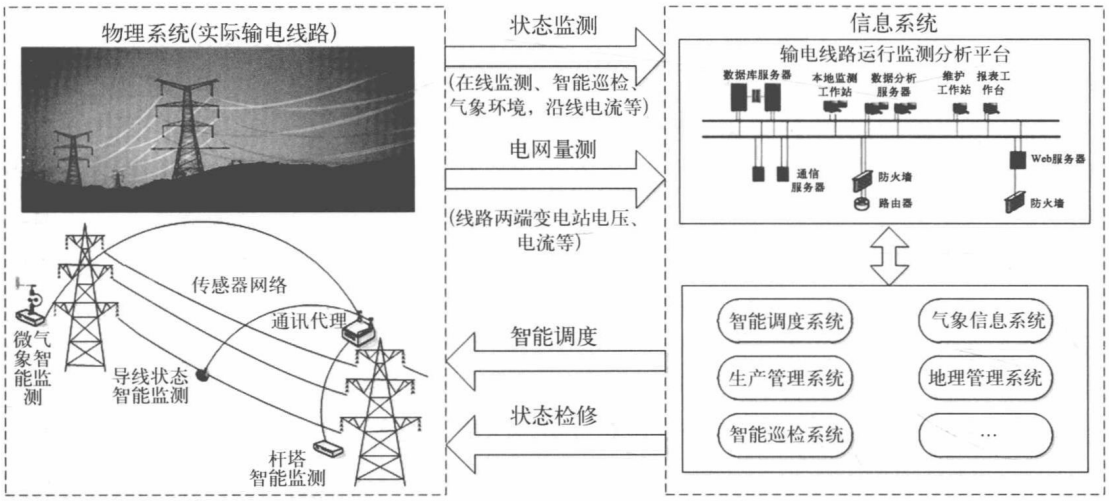


图 1.1 智能输电线路信息物理系统示意图

与其他典型 CPS 一样，智能输电线路信息物理系统同样由智能连接层、数据转换层、信息空间层、认知层和配置层组成。在微观上，智能输电线路信息物理系统通过在输电线路物理系统中嵌入传感、计算与通信内核，实现计算进程与物理进程的一体化，传感器、嵌入式计算机与通信网络对输电的物理进程进行可靠、实时和高效的监测、协调与控制。宏观上，智能输电线路信息物理系统是由运行在不同时间和空间范围的分布式的、异步的异构系统组成的动态混合系统，包括感知、分析、决策和控制等各种不同类型的资源和可编程组件。各个子系统之间通过有线或无线通信技术，依托网络基础设施相互协调工作。

根据智能输电线路的内涵，其关键在于通过先进的传感和测量技术、通信技术、数据分析和决策支持技术，提高线路状态评估和故障辨识的智能化、自动化水平，满足智能电网安全、可靠、高效输电的要求，其应用价值主要体现在以下四个方面。

1）实现输电线路的信息化和智能化

通过先进的传感器技术、通信技术、信息技术和分布式智能技术对输电线路状态信息感知进行革命性升级，作为建设信息化、自动化、互动化的智能电网输电环节的主要基础。

2）大幅提高电网输电环节的安全性和可靠性

智能输电线路大大提高了线路状态智能监测和评估诊断的水平，实现了线路故障自动诊断、定位和预警，帮助线路维护部门及时准确地掌握线路运行状态，为输电线路的状态检修和设备全寿命周期管理提供科学依据，使输电线路有能力抵御极端恶劣天气和外

部攻击，减少输电环节引起的停电事故，确保用户供电的连续性。

3）最大限度地挖掘输电线路输送能力和利用效率

通过大量信息的融合分析，在保证输电线路安全运行的基础上，帮助电网运行调度部门最大限度地挖掘输电线路的输送能力，提高输电线路的资产利用效率和系统运行的经济性，减少电网对用户的强迫停电率，缓解拉电和限电，提高电力供应可靠性水平。

4）有效降低成本和节约资源

通过状态检修可提高检修效率，减少输电线路运行维护成本；通过优化设计减少线路造价，降低电网企业的综合运营成本；现有输电线路利用率的提高可以缓建或少建新的输电线路，从而改善生态环境，节约大量的土地资源和原材料。

总的来说，智能输电线路是智能电网的重要环节，输电线路智能化技术的应用可以大幅度提高输电线路的利用效率和运行安全性，降低电网的建设、运行、维护等成本，减少电网停电损失，为智能电网输电环节智能化提供技术基础和应用装置。

截至 2016 年，国家电网公司现有 110 kV 及以上输电线路 93.8 万公里，南方电网也超过 21 万公里，输电线路智能化技术有相当广阔的应用前景。智能输电线路相关技术涉及传感网、信息、通信、绿色能源接入、新型材料等多个领域的技术研发和产品制造，将有效带动信息、通信、装备制造等产业，并推动技术升级和产业结构调整，产生巨大的经济和社会效益。考虑到建设智能电网是我国能源领域未来发展最为重要的战略步骤之一，也是我国产业政策支持的重点方向，输电线路信息化、智能化技术具有重要的科学研究意义和应用价值。

1.3　智能输电线路的组成架构

智能输电线路的典型组成架构如图 1.2 所示，由若干台输电线路智能监测终端、智能输电线路运行监测分析平台以及其他互动应用系统组成。

输电线路智能监测终端安装在导线上或杆塔上，用于监测杆塔、导地线、绝缘子等部件的关键运行状态，通信管理单元通过无线传感器网络或现场通信总线的方式与安装在不同监测点的分布式智能监测终端进行信息交互，完成状态数据的自动收集、加工处理和初步分析，通过数据通信网络传送至信息化平台。

智能输电线路运行监测分析平台包括智能输电线路技术支持系统基础平台、通信服务系统、输电线路运行状态信息系统、输电线路智能分析应用系统、运行管理系统等五个主要部分以及与其他互动应用系统进行交互的接口。智能输电线路技术支持系统基础平台是所有模块进行数据存储、交互的核心应用支持平台，主要包括实时数据库和历史数据库、系统管理、安全防护、各类信息交互接口及人机支持等。输电线路运行状态信息系统用于实现输电线路运行信息展示，完成线路巡检、实验数据、在线监测运行状态及电气、力学、图像等各类参数的状态全景可视化展示、历史数据趋势分析以及状态预警等。通信服务系统实现监测分析平台与智能监测终端以及相关使用人员智能终端（APP、微信、短消息等）的信息交互。输电线路智能分析应用系统用于实现分析评估诊断与决策的智能化，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com