

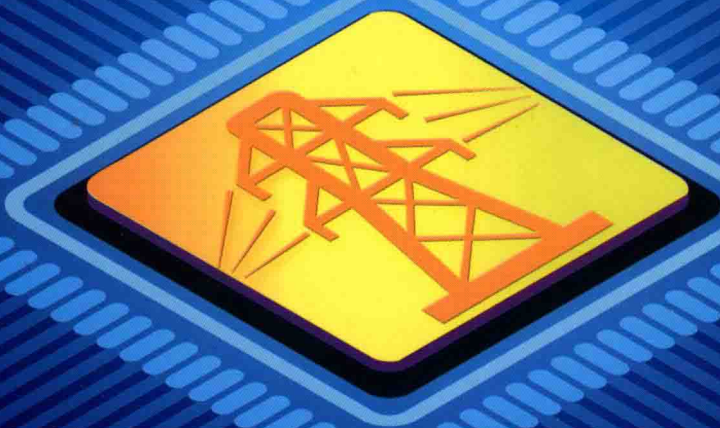


国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网芯片 技术及应用

杜蜀薇 赵东艳 杜新纲 赵兵 等 编著

ZHINENG DIANWANG XINPIAN
JISHU JI YINGYONG



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网芯片 技术及应用

杜蜀薇 赵东艳 杜新纲 赵兵 等 编著

ZHINENG DIANWANG XINPIAN
JISHU JI YINGYONG



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

智能电网的发展趋势是自主、可靠、可控、安全稳定运行,迫切需要推动芯片的国产化进程。新技术的发展,要求电力设备更加小型化、微型化,并实现移动作业,促使芯片向着高安全、高可靠、高集成、低功耗的方向快速发展。为了总结智能电网芯片技术及应用成效,更好地研究、开发以及应用智能电网专用芯片技术,特编写《智能电网芯片技术及应用》一书。

本书共分为7章,分别为概述、智能电网芯片关键技术、主控芯片技术及应用、通信芯片技术及应用、安全芯片技术及应用、射频识别芯片技术及应用、传感芯片技术及应用。

本书可供从事智能电网芯片技术及应用等工作的技术人员学习使用,也可供大专院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网芯片技术及应用 / 杜蜀薇等编著. —北京: 中国电力出版社, 2019.5
ISBN 978-7-5198-2898-1

I. ①智… II. ①杜… III. ①电网—芯片 IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第005994号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 罗翠兰

责任校对: 黄蓓 常燕昆

装帧设计: 张俊霞

责任印制: 石 雷

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2019年5月第一版

印 次: 2019年5月北京第一次印刷

开 本: 710毫米×1000毫米 16开本

印 张: 15.5

字 数: 272千字

印 数: 0001—2000册

定 价: 88.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社营销中心负责退换

《智能电网芯片技术及应用》

编 委 会

主 编 杜蜀薇

副 主 编 赵东艳 杜新纲 赵 兵

参 编 王于波 张海峰 唐晓柯 庞振江 原义栋
陈燕宁 胡 毅 李德建 李 延 王 峥
杜 君 周芝梅 胡晓波 袁艳芳 郭 彦
刘庆时 张 彤 乔彦彬 刘 芳 周春良
何松生 宋彦斌 夏冰冰 徐平江 孔维超
张 喆 姚玉林 王海宝 杨立新 袁远东
王帅鹏 付 振 王维彬 王小曼 陈永利
杨 季 杜鹏程 陈奎林 张 虹 李 良
张树华 罗 丹 杨 文 王 蒙 任孝武
尉中杰 綦 锐 付英春 曾世杰 张 萌
房 超



前 言

“关键核心技术是国之重器，对推动我国经济高质量发展、保障国家安全都具有十分重要的意义。”习近平总书记在2018年中央财经委员会第二次会议上深刻阐述了关键核心技术在经济社会发展全局中的重要作用。突破芯片核心技术，是提高创新能力、掌握科技发展主动权的一项重要任务。近期发生的“中兴事件”体现出中国在芯片核心技术方面受制于人，从而导致了主动权的丧失。但从长远来看，这个事件必将促进我国芯片业快速发展，并以此为契机，促进世界芯片产业加速转向中国，形成第三次产业转移，中国接下来的几年，芯片行业将迎来发展的黄金时代。

智能电网作为现代工业系统的重要组成部分，其集成现代通信信息技术、自动控制技术、决策支持技术与先进电力技术，具有信息化、自动化、互动化特征，适应各类电源和用电设施的灵活接入与退出，实现与用户友好互动，具有智能响应和系统自愈能力，能够显著提高电力系统安全性和运行效率。芯片在智能电网中起着举足轻重的作用，适用于智能电网发展的各种专业芯片也伴随着电网技术的进步而不断升级换代。智能电网的发展趋势是自主、可靠、可控、安全稳定运行，迫切需要推动芯片国产化进程，促使芯片向着高安全、高可靠、高集成、低功耗的方向快速发展。

近年随着电网智能化的快速发展，芯片在智能电网中大量应用，这两大领域紧密相连，催生了新技术、新产品、新应用，但系统性地讲述智能电网芯片的文献书籍却不多见。本书所介绍的智能电网芯片是一类专用芯片，部分关键技术是经过多年的生产实践总结出来的，具有自主知识产权，这些关键技术的应用，极大提高和推动了智能电网终端产品的创新水平。本书共分7章，分别为概述、智能电网芯片关键技术、主控芯片技术及应用、通信芯片技术及应用、安全芯片技术及应用、射频识别芯片技术及应用、传感芯片技术及应用。第1章概述中对芯片的发展历史进行了回顾，并着重介绍了智能电网芯片的需求与应用。第2章对芯片研制过程中的功耗、可靠性、电磁防护、可测性及热电仿

真5项关键技术进行了详细描述。这几项关键技术是芯片开发过程中需要解决的基础性问题，只有全面掌握这些关键技术，才能为专用芯片的研发奠定基础。第3章~第7章对智能电网专用芯片进行了充分的介绍，分别是主控芯片、通信芯片、安全芯片、射频识别芯片和传感芯片。每一章都列举了芯片在智能电网中的应用场景，突出了各专用芯片的特殊设计理念。书中所介绍的技术均来自有关单位研发制造智能电网芯片过程中的经验积累。全书不涉及较深的理论，通俗易懂，实用价值高，但对研究和开发芯片在智能电网中的应用工作具有非常高的参考价值，对研发、制造、应用智能电网设备的技术人员、研究院所和高校的师生有很大的帮助。

本书由杜蜀薇教授级高级工程师总体策划、拟订大纲，由赵东艳研究员高级工程师、杜新纲教授级高级工程师和赵兵教授级高级工程师指导，由长期从事智能电网芯片的研发、制造工作和智能电网芯片应用技术的相关技术人员共同完成编写工作，最后由杜蜀薇统一定稿。

本书在编写过程中，得到国家电网有限公司营销部、中国电力科学研究院有限公司、国网北京市电力公司、相关科研院所和高校等单位的大力支持，在此表示诚挚的谢意。

由于芯片产业是一个多学科的产业，加之编者水平和精力所限，本书很多地方叙述不够透彻，也有很多不尽如人意的地方，作为智能电网芯片领域的从业人士，笔者愿意以此抛砖引玉，欢迎各位专家、学者及同仁们批评指正，也希望能够以此带动更多的同道中人凝聚智慧，引领行业前行。

编者

2018年9月

主要符号说明

英文缩写	英文全称	中文全称
ACK	Acknowledgement	有效应答位
ADC	Analog Digital Converter	模数转换器
AHB	Advanced High Performance Bus	高级高性能总线
AMBA	Advanced Microcontroller Bus Architecture	高级微控制器总线结构
AMR	Anisotropic Magneto Resistive	异性磁电阻
APB	Advanced Peripheral Bus	高级外围总线
APDU	Application Protocol Data Unit	应用协议数据单元
ARM	Advanced RISC Machine	进阶精简指令集
ASK	Amplitude Shift Keying	振幅键控
AXI	Advanced Extensible Interface	高级扩展接口
BCI	Bulk current injection	大量电流注入法
BJT	Bipolar Junction Transistor	双极型晶体管
CIC	Cascaded Integrator Comb	积分梳状滤波器
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	互补金属氧化物半导体
CMR	Colossal Magneto resistive	庞磁电阻
COS	Chip Operation System	芯片操作系统
CPLD	Complex Programmable Logic Device	复杂可编程逻辑器件
CRC	Cyclic Redundancy Check	循环冗余校验
CT	Current Transformer	电流互感器
DAC	Digital Analog Converter	数模转换器
DDC	Digital Down Converter	数字下变频器
DMA	Direct Memory Access	直接存储器访问
DSP	Digital Signal Processing	数字信号处理

续表

英文缩写	英文全称	中文全称
DTMOS	Dynamic Threshold (Voltage) Metal Oxide-Semiconductor	动态阈值电压金属氧化物半导体
DTU	Data Transfer Unit	数据传输单元
DUC	Digital Up Converter	数字上变频器
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory	电可擦可编程非易失性存储器
EMC	Electromagnetic Compatibility	电磁兼容
EPON	Ethernet Passive Optical Network	以太网无源光网络
ESAM	Embedded Secure Access Module	嵌入式安全存取模块
ESD	Electro-Static discharge	静电放电
FCLK	Feedback Clock	反馈时钟
FCS	Frame Check Sequence	帧校验序列
FEC	Forward Error Correction	前向纠错编码
FFT	Fast Fourier Transformation	傅氏变换的快速算法
FTU	Feeder Terminal Unit	馈线监测终端
GFSK	Gauss frequency Shift Keying	高斯型频移键控
GIS	Gas Insulated Switchgear	气体绝缘开关设备
GMR	Giant Magneto Resistance	巨磁电阻
GPIO	General Purpose Input/Output	通用输入 / 输出口
IED	Intelligent Electronic Device	智能电子设备
IFFT	Inverse Fast Fourier transform	快速傅里叶反变换
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
LCD	Liquid Crystal Display	液晶显示器
LDO	Low Dropout Regulator	低压差线性稳压器
LNA	Low Noise Amplifier	低噪声放大器
LPF	Low Pass Filter	低通滤波器
LSB	Least Significant Bit	最低有效位
MAC	Media Access Control	媒体访问控制 (物理地址)
MCU	Micro Controller Unit	微控制器
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System	微机电系统
MOS	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor	金属 - 氧化物半导体场效应管

续表

英文缩写	英文全称	中文全称
SC-FDMA	Single-carrier Frequency-Division Multiple Access	单载波频分多址
SCI	Smart Card Interface	智能卡接口
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory	同步动态随机存储器
SNR	Signal-Noise Ratio	信噪比
SoC	System on Chip	系统级芯片
SPI	Serial Peripheral Interface	串行外设接口
SP	Strict Priority	严格（或绝对）优先级
TB	Transport Block	传输块
TCM	Tightly Coupled Memories	紧耦合存储器
TDD	Time Division Duplex	时分复用双工
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
TEM	Transmission Electron Microscope	透射电子显微镜
TMR	Tunnel Magneto Resistance	隧道磁电阻
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	通用异步收/发传输器
WRR	Weighted Round Robin	权重轮询调度



目 录

前 言

主要符号说明

第 1 章 概述	1
1.1 芯片发展概述	1
1.2 智能电网概述	2
1.3 芯片在智能电网中的应用	4
1.4 智能芯片未来发展方向	16
第 2 章 智能电网芯片关键技术	21
2.1 芯片低功耗技术	21
2.2 芯片可靠性设计技术	26
2.3 电磁防护技术	31
2.4 芯片可测性设计技术	36
2.5 热电仿真技术	40
第 3 章 主控芯片技术及应用	47
3.1 主控芯片概述	47
3.2 主控芯片的关键技术和电路	49
3.3 芯片软件系统	66
3.4 主控芯片在智能电网中的典型应用	69

第 4 章 通信芯片技术及应用	81
4.1 通信芯片概述	81
4.2 通信芯片的关键技术与电路	84
4.3 芯片软件系统	107
4.4 通信芯片在智能电网中的应用	113
第 5 章 安全芯片技术及应用	129
5.1 安全芯片概述	129
5.2 安全芯片的关键技术和电路	133
5.3 芯片软件系统	141
5.4 安全芯片在智能电网中的典型应用	144
第 6 章 射频识别芯片技术及应用	153
6.1 射频识别芯片概述	153
6.2 射频识别芯片的关键技术和电路	155
6.3 射频识别芯片在智能电网中的典型应用	162
第 7 章 传感芯片技术及应用	173
7.1 传感芯片概述	173
7.2 传感芯片的关键技术和电路	180
7.3 传感芯片在智能电网中的典型应用	209
参考文献	224
索引	229



第1章

概 述

1.1 芯片发展概述

芯片是半导体元件产品的统称,也是集成电路的载体,是现代工业的“粮食”,是现代信息技术的基础。芯片的发展历史并不长,1958年9月12日,美国人杰克·基尔比提出将两个晶体管集成在一块半导体材料上,从而发明了第一个集成电路,开启了人类通向智慧世界的大门。诺贝尔奖评审委员会在基尔比获得2000年诺贝尔物理学奖后如是评价:“为现代信息技术奠定了基础。”

在此之后,半导体芯片展现出令人目眩的发展速度,英特尔(Intel)创始人之一戈登·摩尔(Gordon Moore)提出了著名的摩尔定律,这个定律是对集成电路惊人发展速度的最量化的描述:当价格不变时,集成电路上可容纳的元器件的数目,约每隔18~24个月便会增加一倍,性能也将提升一倍。换言之,每一美元所能买到的计算机性能,将每隔18~24个月翻一倍以上。经过半个多世纪的实际观测,这一间隔基本稳定在18个月的水平。60年后的今天,芯片已经可以实现在指甲盖大小的面积上制造出超10亿个晶体管、每根导线相当于人的头发丝的五千分之一,并且这种发展速度还将持续一段时间。

中国芯片发展起步并不落后,自主发展期间基本同美国同步。1965年,王守觉在一块约 1cm^2 大小的硅片内,刻蚀了7个晶体管、1个二极管、7个电阻和6个电容的电路,我国第一块集成电路由此诞生,从此中国进入集成电路时代。1972年,自主研发的大规模集成电路在四川永川半导体研究所诞生,实现了从中小集成电路发展到大规模集成电路的跨越,仅比美国多用一年的时间。在20世纪70年代的特殊时期,中国芯片的发展受到较大冲击,日本在美国的技术支持下,半导体研发大获成功,并全面超越中国。20世纪90年代初,日本经济泡沫破裂,韩国趁势加大投资、拉拢人才,在芯片产量和研发上全面超越日本,成为世界第一。20世纪70年代开始落后的中国芯片产业虽然在改革开放后奋起

直追，但各种原因造成了以芯片进口为主的产业格局，尤其在核心、高端、通用芯片，特别是在数模混合电路中的 AD/DA、超高速串行器 / 解串器 (SerDes)、射频前端的 SAW/BAW 滤波器、高性能功率放大器 (PA)、现场可编程门阵列 (FPGA)、高性能处理器和电子设计自动化 (EDA) 工具等高阶领域差距更大，技术代差普遍在 5~10 年，替代率乐观的估计也不足 20%。

芯片的发展自然离不开产业的支撑，而芯片产业的转移变迁在不断验证着日本经济学家赤松要提出的产业发展的“雁形模式”。在过去的近半个世纪，世界芯片行业经历了两次产业转移：第一次在 20 世纪 70 年代末，从美国转移到了日本，造就了富士通、日立、东芝、NEC 等世界顶级的芯片制造商；第二次在 20 世纪 80 年代末，韩国与我国台湾成为芯片行业的主力，继美国、日本之后，韩国成为世界第三个半导体产业中心。近年，由于中国已经成为世界最大的电子产品制造国和消费国，从 2006 年开始中国进口芯片超过石油成为我国最大宗进口商品，2013 年至今每年进口额均超过 2000 亿美元。根据联合国贸易统计，中国在 2017 年进口了 2601 亿美元的集成电路芯片，这促使芯片形成第三次产业转移，即向中国的产业转移。

芯片的发展历程也恰恰在信息技术的应用中体现出来，各种电子类、工业控制类设备和系统都伴随着芯片的发展而被发明创造或改造升级。在如今的信息时代，个人消费品中的家用计算机、手机、家电、汽车等可能只包含有某几种芯片，就可以极大地方便人们的生活与工作；在电力系统、航空航天、高铁船运、医疗仪器、机器人等工业产品和控制系统中，更是有数不清的芯片在发挥着不可替代的作用，尤其是在近几年发展迅猛的智能电网、人工智能、物联网等新技术中应用了高端的专用芯片，使大数据、云计算应用成为可能，让人类更好地管理社会，同自然协同发展。

1.2 智能电网概述

电网是经济社会发展的重要基础设施，是能源战略布局的重要内容，是能源产业链的重要环节，是国家综合运输体系的重要组成部分。智能电网的发展与国际能源发展密切相关。21 世纪以来，世界经济形势和能源发展格局发生了深刻变化，世界主要国家均加速调整能源结构，转变能源开发利用模式，加快向绿色、多元、高效的可持续能源系统转型。构建清洁、低碳、可持续的能源体系成为新一轮能源变革的显著特征，而智能电网是新一代能源体系的核心平台。通过近 20 年的发展，智能电网已上升为各发达国家占据能源科技制高点的

国家战略。

在全球能源深度转型的新时期，世界各发达国家都纷纷依据各自的战略需求提出智能电网发展纲要，从而占据能源科技制高点，获得在新一轮能源革命和世界竞争格局中的优势地位。

美国把发展智能电网作为电力系统改造、提高能源利用效率和促进经济发展的重要战略举措。根据美国“电网2030”计划，2030年将建立美国国家电力主干网、区域互联网（含加拿大和墨西哥）和地方配电网三部分，形成横跨四个时区的统一电网，发挥加强国家电网安全性、推动可再生能源利用、促进智能电网产业发展的战略作用，并且已开始实施 IntelliGrid、GridWise、GridWorks、现代电网先导计划（MGI）等一批技术创新项目，以及西北太平洋地区智能电网示范工程等一批示范工程。

欧洲智能电网是承载大规模可再生能源的重要平台。根据欧洲“超级电网”设想，通过构建超级电网，实现欧洲、北非、中东等环地中海地区的大规模可再生能源电力的跨国输送和互补利用。现已开始实施北海国家近海电网先导计划（NSCOGI）、ISLES、EcoGrid、德国 E-Energy 等一批技术研发和工程示范项目。

日本将提升能效作为发展智能电网的核心目标，在可再生能源利用方面着重发展太阳能。大力推进技术革新和产业升级，其能源消费强度下降到全球平均水平的三分之一，占据世界领先地位。

韩国也已提出智能电网发展计划，一方面在国内普及智能电网，另一方面积极主导国际标准制订，培育具有国际竞争力的智能用电产品和企业，抢占国际智能电网市场份额，充分体现其“出口导向型”经济特点。

我国对智能电网的认识非常深刻，认为电力系统技术革命是能源革命的重要组成部分，其关键在于智能电网。我国从2009年开始提出建设智能电网理念，并在政府工作报告中提到要推动智能电网建设。2015年，国务院印发《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》，对“互联网+智慧能源”行动做了详细阐释，为智能电网的发展注入了新的元素和活力。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》实施情况中期评估能源领域专题报告明确提出，为适应当前能源发展形势，需要新增“新型能源系统关键技术及系统集成”优先主题，推动以电为中心的能源系统与智能电网全面融合，构成能源生产和消费互动的新型体系。另外在“中国制造2025”先进装备制造业中，将智能电网成套装备也列为重要发展领域之一。近期电力行业提出的新一代电力系统，更是把智能电网领域推向了一个新的水平。

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。芯片在智能电网的信息化、自动化、互动化的过程中起到的正是核心支撑作用，可以说，没有芯片的应用就不会有智能化的电网。智能电网中应用了大量芯片，这些芯片既有复杂度极高的主控芯片，又有可实现特定功能的专用芯片；既有国外的进口芯片，又有国内自主研发的芯片。智能电网的快速发展，对芯片产生了强大的需求，也促进了电力专用芯片的发展。

1.3 芯片在智能电网中的应用

智能电网作为现代工业系统的重要组成部分，集成了现代通信信息技术、自动控制技术、决策支持技术与先进电力技术，具有信息化、自动化、互动化特征，适应各类电源和用电设施的灵活接入与退出，可实现与用户友好互动，具有智能响应和系统自愈能力，能够显著提高电力系统安全性和运行效率。芯片在智能电网中起着举足轻重的作用，适用于智能电网发展的各种专业芯片也伴随着电网技术的进步而不断升级换代。

芯片作为电力设备和系统的基本单元，是构成传感、测量、控制和通信的硬件基础。如果将智能电网比作人体的话，主控芯片就好比人的大脑，可完成数据的分析、处理和控制在控制工作；传感芯片就好比人的各种感知器官，可感知电网中的多项参数及变量，实现对电网环境的监测；通信芯片就好比人的神经系统和血管，可完成信息传输与交互的工作；安全芯片就好比给人戴上了施工和运行的安全帽和护盾，有效保障了整个系统的安全性；射频识别芯片就好比人的身份证号码，用来唯一区分不同的人。利用这些芯片搭建的高效传感与通信网，可以实时监测电网关键节点的电压、电流、导线温度、覆冰等运行状态，并及时反馈控制，还可以监测电网运行环境温度、湿度、安全监控等信息，使得全网状况可知可控，从而全面保障智能电网的安全可靠运行。图 1-1 所示为智能电网中涉及的技术及芯片。

按照电力输送及控制环节的不同，通常可对智能电网按照发、输、变、配、用、调度和通信信息专业方向进行划分。在每个环节中都有不同功能的智能终端和系统进行支撑，这些设备和系统都要依靠芯片提供不同的功能，如数据采集、模数和数模变换、逻辑运算与判断、计算算法、调度控制、数据传输、信息安全等，根据这些功能需求必要时还要开发出特定的专用芯片。目前智能电网用芯片已经是一类特定的种类，并且根据智能电网的发展还在不断地推陈出新。

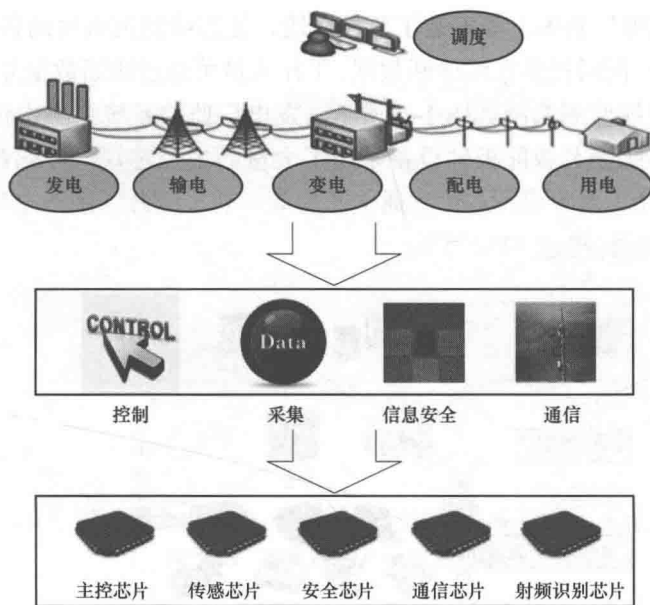


图 1-1 智能电网中涉及的技术及芯片

1.3.1 智能电网对芯片的需求

1.3.1.1 发电环节

中国是世界上装机容量最大的国家，截至 2017 年年底，我国全口径装机总容量达到 17.77 亿 kW，以太阳能和风能为代表的清洁能源发电已经超过国家“十三五”规划目标，并在装机容量和发电量上已经位居世界首位。在这些发电设备上，需要安装各种监控和监测设备，以便于设备的安全运行和并网。

在传统的火电和水电设备上，近些年有针对性地对新投设备和运行多年的设备安装了大量的运行参数和故障诊断的状态监测设备。如在对发电机定子开展监测过程中，需要监测定子的局部放电、定子段部振动情况、转子匝间短路、转子轴电压电流参数等。在监测这些参量时会产生大量的数据，并对硬件提出了较高的要求，应用嵌入式 CPU 及数字信号处理（DSP）芯片技术，已经广泛应用在上述监测系统中。在太阳能光伏发电设备上应用的大量的逆变器设备，将太阳能电池板产生的微弱直流电流汇集逆变后变成交流电然后升压送出，在这个过程中逆变器的触发控制就需要应用各种专用芯片。同样，在风电设备上，需要通过芯片控制风机的旋转速度。在生物质发电中，需要利用传感器芯片监测可燃气体浓度，以提高生物质的发电效率。

目前，发电厂基本上都安装了监控系统，能连续监测机组的各种重要参数，保证机组安全，同时提供在线诊断数据，工作人员可通过诊断数据分析机器故障，发电厂设备在线监测系统如图 1-2 所示。发电厂监控系统主要由传感器及智能板件组成。传感器及智能板件设备采用了大量的主控芯片、传感器芯片、模拟/数字转换芯片、射频识别芯片、通信芯片等。初步统计，用于电站型设备各类芯片的总需求量将超过 3000 万颗。

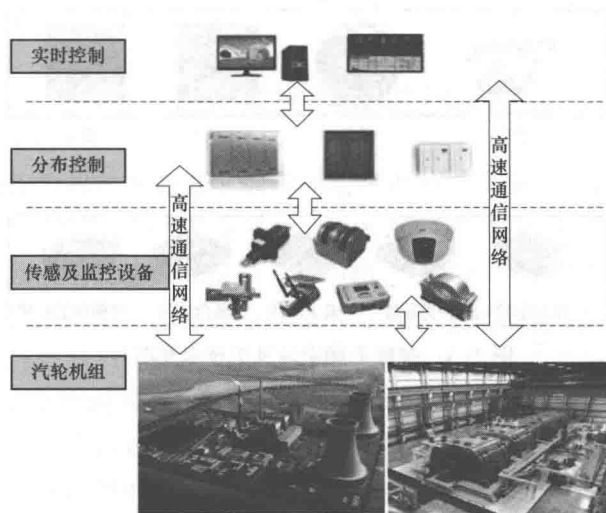


图 1-2 发电厂设备在线监测系统

1.3.1.2 输电环节

中国地域广阔，经济的快速发展和西电东送促使中国建设了世界最大的输电网络，既运营着全世界电压等级最高、送电里程最远的特高压线路，同时又在像北京、上海这样的特大型城市的地下运行着数百千米的高压及特高压电力电缆。雷、雨、风、雪、山火等各种自然灾害以及外力都在不同程度影响着输电线路的安全运行。据统计，输电线路故障的 90% 以上来自于自然灾害，因此对输电线路的在线监测对保障电网的安全运行具有重要的意义。

架空输电线路在线监控系统主要用于监测输电线路的温度、倾角、相位、振动、风偏等物理量的变化，从而实现预警分析和智能控制，如图 1-3 所示。输电线路在线监测系统需要大量温度、湿度、风偏、舞动、故障电流、杆塔倾斜和拉力等传感器，包含大量的传感芯片、通信芯片、射频识别芯片等。目前全国电网 35kV 及以上输电线路长度超过 183 万 km，按平均每 0.5km 安装 3 类传感器，传感器需求量将达到 900 万颗。