

DOI: 10.7667/PSPC151803

一种应用于 PT 间隔过程层合智一体装置研制

朱建斌¹, 崔琳琳², 马冠群², 任红旭¹, 赵应兵¹, 郑拓夫¹, 胡彦民¹, 张群玲¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 吉林省长春电力勘测设计院有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 研究了母线 PT 间隔合并单元和智能终端一体化。结合实际, 给出了产品装置的软硬件架构图, 详细介绍了应用于 PT 间隔以 PowerPC MPC8377 为核心处理芯片的模拟量合智一体装置的研制。给出了硬件方案和软件设计方案, 实现了合智一体装置 GOOSE 的订阅与发布, 通过开关量的采集实现了对 PT 间隔刀闸状态监视, 通过模拟量的采集和合并实现了 SV 的上送。最终满足了工程对合并单元和智能终端集约化需求, 并且达到了节省空间、减少光口、节约成本的效果。实验结果表明, 研制的母线合智一体装置成本低廉、功能强大、性能优良, 较好地完成了对 PT 刀闸的状态监视和控制、对母线电压的采集合并及其规约转换功能。该装置完全满足智能化变电站 IEC 61850 通信规约。

关键词: 合并单元; 智能终端; 合智一体; IEC 61850; GOOSE; SV

Development of the integrated and combined intellectual device of process layer applied to PT interval

ZHU Jianbin¹, CUI Linlin², MA Guanqun², REN Hongxu¹, ZHAO Yingbing¹, ZHENG Tuofu¹, HU Yanmin¹, ZHANG Qunling¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China;

2. Changchun Electric Power Exploration & Design Institute, Changchun 130000, China)

Abstract: This paper researches the integration of merging unit and intelligent terminals on the bus PT interval. Combined with practical engineering, it gives the product hardware and software architecture diagram, describes in detail the design of analog to combined wisdom of one device applied to PT interval relying on PowerPC MPC8377 core processing chip. This paper gives the hardware and software design solutions, and achieves subscription and publishing GOOSE by a combined wisdom of one device. The switches of PT status monitoring is achieved through the signal of switch collected, and the delivery of SV is implemented through analog acquisition and merger, which can eventually meet the project for merging units and intelligent terminals intensive needs, and saves space and cost and reduces optical port. Experimental results show that the developed bus one device combined wisdom has low cost, powerful function, high performance, and better completes the state monitoring and controlling of PT switch, bus voltage merger and acquisition protocol converter functions. The device can fully meet intelligent substation IEC 61850 communication protocol.

Key words: merging unit; intelligent terminal; integration of merging unit and intelligent terminals; IEC 61850; GOOSE; SV

0 引言

随着智能电网的发展以及变电站通信网络和系统协议 IEC 61850 标准的不断推广, 智能变电站的建设^[1]已在工程实践阶段得到飞速发展。智能变电站按照逻辑结构分为过程层、间隔层和站控层, 而合并单元和智能终端是智能变电站过程层^[2]的重要

设备, 是体现智能化水平的重要标志。

目前, 过程层母线 PT 间隔工程配置如图 1 所示, 选用合并单元接入电压互感器^[3], 选用智能终端接入刀闸位置和遥控刀闸^[4], 通过电缆或者光纤进行通信, 装置之间进行状态监测及其逻辑判断。工程配置复杂, 电缆、光纤使用较多, 调试复杂, 维护不便, 具有一定的瓶颈^[5]。

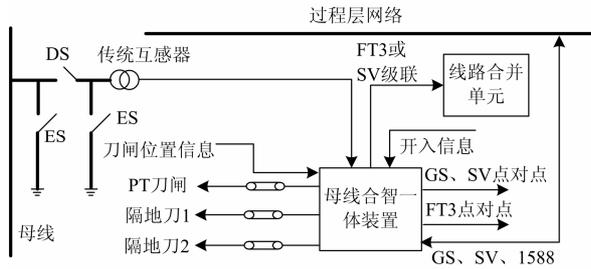


图3 未来工程配置图

Fig. 3 Diagram of project configuration in future

在单母线、双母线、双母单分段的工程应用中，PT 间隔配置该母线合智一体装置，实现了合并单元和智能终端的功能，颠覆了以往的分别配置合并单元和智能终端的工程应用，大大节约了成本，减小了安装空间，提高了智能变电站的集成度。

3 硬件平台设计

依据母线合智一体装置所实现的合并单元和智能终端的功能，合并单元和智能终端的 CPU 硬件架构一致，装置的 CPU 架构如图 4 所示，均是以支持强大通信能力的 MPC8377 为核心处理器^[8]，考虑兼容性和处理数据较多，需要扩展程序存储器和 Flash 来存储程序、数据，电气以太网口用于装置调试使用，USBTAP 接口用于程序的调试，光纤以太网口通过时钟同步芯片可以完成 1588 对时，对时精度 $\leq 1 \mu s$ ，扩展的 I²C 的接口用于告警指示灯的驱动，I/O 口通过 CPU 总线和 FPGA 进行无缝总线连接，完成装置的 GOOSE、SV、FT3、对时数据的通信交互。

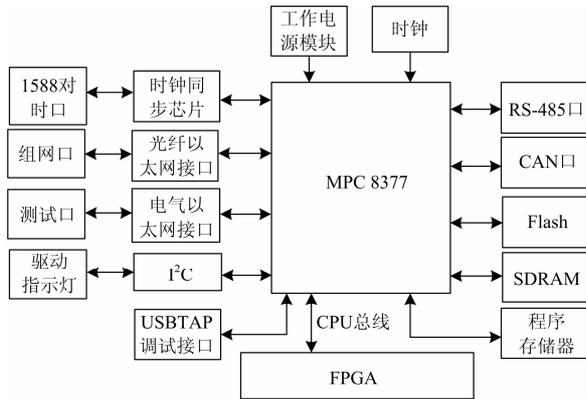


图4 MPC8377 架构图

Fig. 4 Diagram of MPC8377

装置中的公共板架构如图 5 所示，装置中的双 CPU 通过以 FPGA 为核心的高速接口和公共板来进行通信，接收公共板的光 B 码对时数据和 1588 网

络对时数据，同时支持 GOOSE 收发、SV 点对点及其扩展 SV 点对点的功能。公共板采用 FPGA+PHY 的架构，利用 FPGA 通过 MII 接口直接控制 PHY 芯片，利用 FPGA 的并行处理特性实现网络收发全双工，实时的实现 SV 发送时刻的精确控制、GOOSE 的收发功能、对时功能。

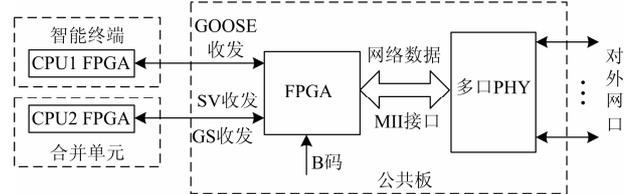


图5 公共板架构图

Fig. 5 Architecture of public board

装置的硬件系统架构图如图 6 所示，装置中的包含开入开出板，开入板主要接智能设备的硬开入，直接转 GOOSE 状态发出去；开出板主要是接收到 GOOSE 开入命令时，符合逻辑出口条件时，可驱动继电器动作出口，完成对智能设备节点的控制。装置中包含采集板和交流板，实现互感器信号的采集转换，供装置的合并单元 CPU 进行重采样处理。

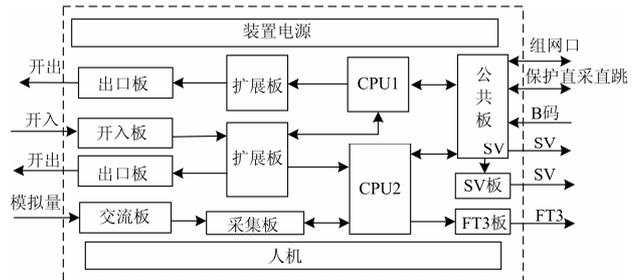


图6 硬件系统架构图

Fig. 6 Architecture of hardware system

4 软件设计

4.1 装置软件系统框架

母线合智一体装置软件设计的实现分为五大部分，即智能终端软件设计、合并单元软件设计、公共板程序设计、扩展板程序设计、采集板程序设计，五者之间的关联框架如图 7 所示。智能终端软件设计实现智能终端的功能及其对合并单元 CPU 运行状态的监测；合并单元软件设计实现合并单元的功能及其对智能终端 CPU 运行状态的监测；公共板程序设计实现对双 CPU 的通信和扩充外围接口的功能；扩展板程序实现和双 CPU 的通信，完成装置开入和开出功能；采集板程序实现对互感器信号的采集，并打包采样数据上送给合并单元 CPU。

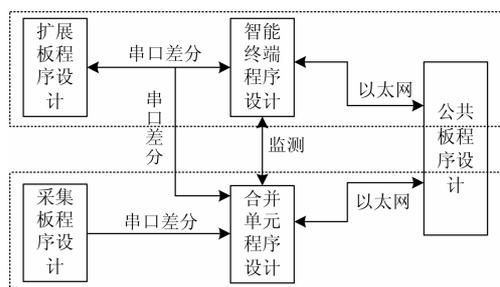


图 7 软件系统框架

Fig. 7 Software system framework

4.2 智能终端软件设计

智能终端软件设计包括嵌入式软件平台设计、应用程序设计、FPGA 程序设计三部分，三者之间的关联框架如图 8 所示。软件平台主要实现一些基本功能，主要包括开入信息读取、开出的驱动、温湿度的采集及其以太网口功能的实现，还包括与 FPGA 接口的定义等；FPGA 主要实现收发串口信息、对时性能和扩充 I/O 口等；应用程序主要实现数据库点值初始化、GOOSE 信息处理、开关量信息处理、出口动作处理、异常信号处理、点灯逻辑处理、IEC 61850 通信模型建立、GOOSE 的接收和发送等。

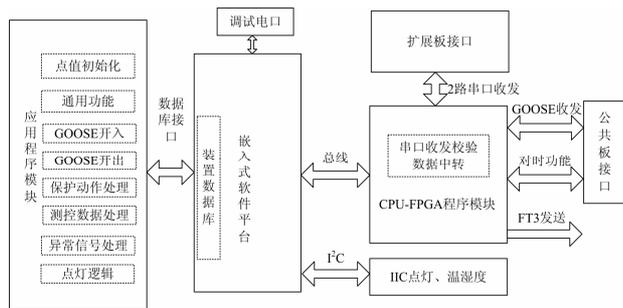


图 8 智能终端软件框架

Fig. 8 Intelligent terminal software framework

4.3 合并单元软件设计

合并单元软件设计包括嵌入式软件平台设计、应用程序设计、FPGA 程序设计三部分，三者之间的关联框架如图 9 所示。该软件设计在智能终端软件设计上增加模拟量采集、重采样、电压并列、IEC 61850 9-2 的发送、“支持通道可配置的扩展 IEC 60044-8”的 FT3 数据发送功能，实现软件架构框架一致，便于软件功能的增加和维护，提高程序的重用性。

4.4 公共板软件设计

公共板软件设计就是 FPGA 程序设计，通过 FPGA 模拟 MAC 芯片，由 FPGA 直接控制 PHY 芯

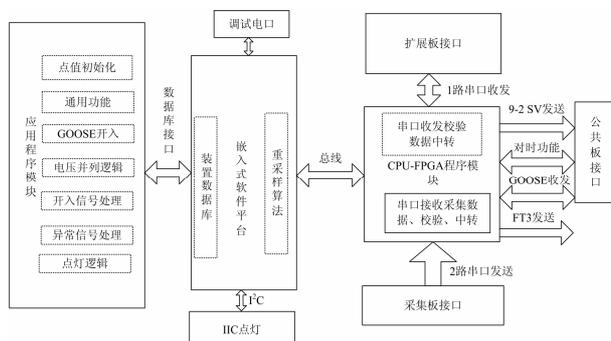


图 9 合并单元软件框架

Fig. 9 Merging unit software framework

片，实现盲发盲收机制，并对 GOOSE 收发和 SV 发送做共网共口处理，并且支持可配置，装置的 GOOSE 接收走特定回路，装置的数据发送流程如图 10 所示。在程序初始化完成后，若无 SV 数据发送，则直接检查并发送 GOOSE 报文，防止在没有 SV 发送时发不出 GOOSE。发送一帧数据后再检查是否有 SV 发送数据，在检查到有 SV 发送数据后，则按 SV 发送节拍查缓冲区内的 GOOSE 报文，利用 SV 发送间隔发送 GOOSE 报文。

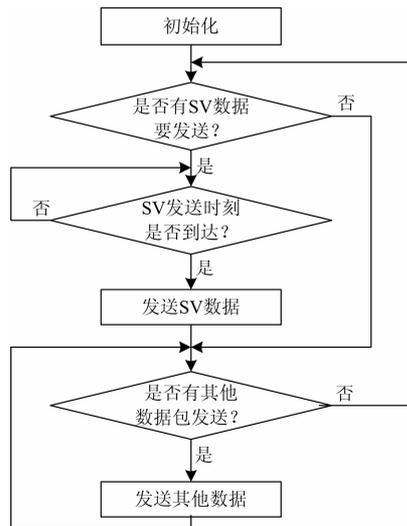


图 10 公共板 FPGA 设计流程图

Fig. 10 Design diagram of public board FPGA

4.5 扩展板软件设计

扩展板软件设计也是 FPGA 程序设计，完成装置的开入开出功能，并且完成开出回路的自检功能，软件设计框架如图 11 所示。时钟管理模块对硬件时钟进行分频优化，并提供各个软件模块使用；开入采集模块通过总线方式对多路开入进行采集，并按照许继私有协议进行组帧后，移交 CRC 校验模块进行校验，最后将数据按照串口协议进行发送；串口接收到 CPU 的数据后，检查开出自检模块有无异

常, 若正常, 执行正常的出口控制。

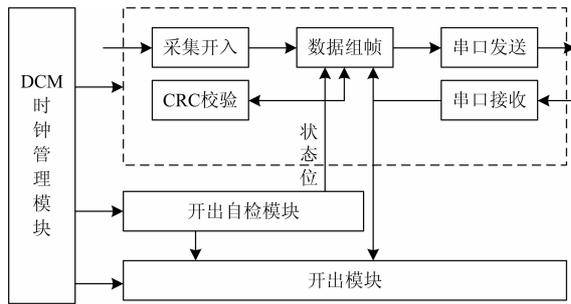


图 11 扩展板 FPGA 软件设计图

Fig. 11 Design diagram of expansion board FPGA software

串口传输采用标准 UART 协议^[9], 通信格式包括 1 个起始位, 8 个数据位, 1 奇效验位, 1 个停止位。链路层帧格式是我们自定义私有规约, 起始符固定为 4'h0564, 内容为: 起始符 4'h0564(2 字节)+数据包长度 2'h0d(1 字节)+数据(12 个字节)+和校验(1 字节)+ CRC 帧校验(1 字节)。

4.6 采集板软件设计

采集板软件设计也是 FPGA 程序设计, 整个系统的控制和数据处理工作由 FPGA 完成, 软件框架如图 12 所示。软件主要由 DCM 模块、AD 采样模块、AD 自检模块、数据组帧模块、CRC 校验模块、串口发送模块等部分组成。时钟管理模块实现对硬件时钟分频优化, 提供给软件各个模块功能使用; AD 采样模块实现对 AD 芯片及其 PGA 的采样控制, 将采样数据和 AD 自检结果进行组帧并进行 CRC 校验, 按照特定的时间间隔启动串口数据发送 FT3 报文。采集板发送的 FT3 协议同扩展板的通信一致, 链路层帧格式按照《DLT 282-2012 合并单元技术条件》第 6 部分技术要求的数据传输帧格式 IV 进行数据传输。

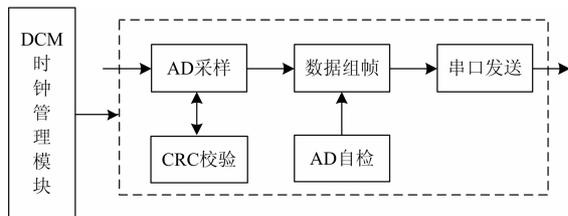


图 12 采集板 FPGA 软件设计图

Fig. 12 Designing diagram of acquisition board FPGA software

5 测试结果及分析

为验证已研制母线合智一体装置的功能及其可靠性, 针对装置全部功能搭建测试系统如图 13 所示。装置支持常规互感器的接入, 任选 1 路保护电压进行精度进行测试, 选 1 母 A 相保护电压对模拟

量电压信号进行精度测试, 交流测试结果数据如表 1 所示, 精度满足 0.2 级要求。装置支持硬开入信号转 GOOSE 处理, 消抖时间可整定, 均能满足 10 ms 的时间要求, 同时装置可以接收间隔层装置 GOOSE 的有效命令, 执行对智能设备节点的控制, 动作时间时间大约为 7 ms, 以 3 母 PT 刀闸动作时间为例, 如表 2 所示, 动作时间满足 ≤ 10 ms(包括继电器的动作时间)的要求。装置支持 SV 数据组网和点对点器离散性均达到 $1\mu\text{s}$ 以内, 远远满足 $\leq 10\mu\text{s}$ 的要求。装置支持屏柜内温湿度的直流采集, 电流输入信号 $4\sim 20\text{ mA}$, 电压输入信号 $0\sim +5\text{ V}$, 直流信号测试的精度数据如表 3 所示, 远远满足 $\pm 0.5\%$ 的要求。

装置在国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心开普实验室及其公司中试通过了严酷的电磁兼容等项目的检验, 部分检验报告如表 4 所示, 满足了入网要求。

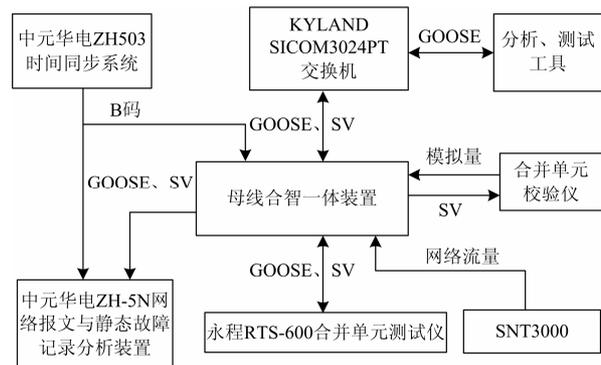


图 13 测试系统框图

Fig. 13 Diagram of test system

表 1 交流精度测试结果

Table 1 Results of the AC accuracy test

精度测试		
施加值	比差/%	相差/分
$2\%U_n$	0.019	1.3
$5\%U_n$	0.012	0.95
$80\%U_n$	0.009	0.831
$100\%U_n$	-0.004	0.595
$120\%U_n$	-0.005	0.601

表 2 动作时间测试结果

Table 2 Results of the action time test

刀闸动作	高温 70°C		低温 -40°C	
	最大值/ms	平均值/ms	最大值/ms	平均值/ms
分 3 母 PT 隔刀	4.652	4.400	4.229	3.968
合 3 母 PT 隔刀	4.704	4.450	4.245	3.995

表 3 直流精度测试结果

Table 3 Results of the DC accuracy test

类型	施加值	理论值	最大幅值	误差/%
电压/V	0.50	0.50	0.498 465	-0.030 7
	1.00	1.00	1.005 741	0.114 82
	3.00	3.00	3.010 930	0.218 6
	5.00	5.00	4.997 493	-0.050 14
电流/ mA	4.00	4.00	4	0
	8	8	8.011 943	0.074 643 75
	13.6	13.6	13.625 968	0.162 3
	20	20	19.995 243	-0.029 731 25

表 4 电磁兼容测试报告

Table 4 Report of EMC

检验项目	检验标准	等级	结论
静电放电	GB/T14598.14-2010	IV	合格
快速瞬变	GB/T 4598.10-2012	IV	合格
浪涌	GB/T 4598.18-2012	IV	合格
工频磁场	GB/T 17626.8-2006	V	合格
辐射发射	GB/T14598.16-2002		合格
传导发射	GB/T14598.16-2002		合格

6 结语

本文针对母线 PT 间隔工程应用遇到的瓶颈, 研制了一种新的模拟量输入式合智一体集成装置。该装置采用科学合理的软硬件架构, 合并单元和智能终端模块硬件资源共享, 功能相互独立, 互不影响, 同时实现双 CPU 运行状态的实时监测, 通过一个物理设备完成 PT 间隔的一体化集成功能, 减少了母线 PT 间隔装置数量, 节约了成本, 提高了设备利用率, 减小了安装空间, 缩短了维护时间, 提高了经济性。此外装置通过公共板 FPGA+PHY 的架构, 提高装置数据传输的实时性, 提高了 SV 组网和点对点的均匀性, 增强了采样值发送的可靠性和稳定性。装置完全满足智能变电站 IEC 61850 标准, 是新生的智能变电站过程层设备, 经过测试和工程调试, 装置的功能、性能、指标都完全满足预期要求。随着智能变电站的进一步推广, 集成化程度进一步提高, 母线合智一体将成为母线 PT 间隔的主流配置, 装置的成功研制将对智能变电站的发展带来一定积极影响。

参考文献

- [1] 倪兆瑞, 王延安. 智能变电站合并单元延时特性现场测试仪的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 119-124.
NI Zhaorui, WANG Yanan. Design of field testing instrument for merging unit delay characteristics in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 119-124.
- [2] 王宾, 黄磊, 曹润彬, 等. 智能变电站 126 kV 智能终端设计与测试方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 119-125.

- WANG Bin, HUANG Lei, CAO Runbin, et al. Design and test of 126 kV intelligent terminal in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 119-125.
- [3] 嵇建飞, 袁宇波, 庞福滨. 智能变电站就地智能设备电磁兼容抗扰度实验分析[J]. 电工技术学报, 2015, 29(1): 454-462.
JI Jianfei, YUAN Yubo, PANG Fubin. Experimental analysis of EMC immunity for field installed intelligent equipment of intelligent substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 454-462.
 - [4] 嵇建飞, 袁宇波, 王立辉, 等. 某 110 kV 智能变电站合并单元 异常情况分析及对策[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 255-260.
JI Jianfei, YUAN Yubo, WANG Lihui, et al. Analysis and countermeasure on abnormal operation of one 110 kV intelligent substation merging unit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 255-260.
 - [5] 闫志辉, 周水斌, 郑拓夫. 新一代智能站合并单元智能终端集成装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 117-121.
YAN Zhihui, ZHOU Shuibin, ZHENG Tuofu. Study of device with merging unit and intelligent terminal for new intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 117-121.
 - [6] 王建华, 张国钢, 耿英三, 等. 智能电器最新技术研究及应用发展前景[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 1-11.
WANG Jianhua, ZHANG Guogang, GENG Yingsan, et al. Design of high precision electronic current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 1-11.
 - [7] 朱建斌, 周水斌, 赵应兵, 等. 基于 MPC8377 的主变低压侧隔离开关合并单元设计[J]. 低压电器, 2013(21): 31-35.
ZHU Jianbin, ZHOU Shuibin, ZHAO Yingbing, et al. Design of isolating switch merging unit based on MPC8377 in low voltage side of main transformer[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(21): 31-35.
 - [8] MPC8377E PowerQUICC™ II proprocessor hardware specifications[S].
 - [9] 牟涛, 周丽娟, 周水斌, 等. 高精度电子式电流互感器采集器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 141-144.
MU Tao, ZHOU Lijuan, ZHOU Shuibin, et al. Design of high precision electronic current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 141-144.

收稿日期: 2015-10-13; 修回日期: 2016-01-18

作者简介:

朱建斌(1983-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 从事智能变电站过程层设备研发工作; E-mail: 18839922789@139.com

崔琳琳(1980-), 女, 本科, 助理工程师, 从事智能变电站设计研究;

马冠群(1988-), 男, 本科, 助理工程师, 从事智能变电站设计研究。

(编辑 魏小丽)