

摘要

随着建筑面积的扩张及人们对室内舒适度要求的提高，建筑能耗问题日益凸显。新能源利用及节能监控系统应用是解决建筑能耗问题最行之有效的方法。本文详细探讨了本人在担任 2013 中国国际太阳能十项全能竞赛厦门大学代表队技术负责人期间，承担设计的零能耗小屋 Sunny Inside 光伏发电系统、能耗监测系统和智能控制系统的设计实现过程，并深入分析了实际运行数据和性能。本文主要完成以下工作：

光伏发电系统部分：通过光伏设计组与建筑设计组协同工作的方式，结合山西省大同市气象数据，对光伏并网发电系统进行了详细设计，并使用模拟软件进行了能耗平衡分析。

能耗监测系统部分：通过 CC-Link 现场总线网络和以太网，将设备层的实时能耗监测设备、控制层的 PLC 和节能服务器以及信息层的远程 PC 和移动终端结合为能耗监测系统，并对系统进行了硬件、通信和软件设计。

智能控制系统部分：通过 Q PLC，实现了能耗监测系统与智能控制系统的有机融合，并通过 PLC 的扩展模块，构建了兼容标准 Modbus 协议、无顺序通信协议及以太网协议的系统通信网络，以实现对环境数据的采集及对外设的控制；给出了中央空调和主动式相变储能系统节能控制方案；进行了硬件、通信、软件和人机交互界面设计。

对竞赛期间 Sunny Inside 的运行数据进行了分析，给出了光伏发电系统性能曲线；节能监控系统运行性能曲线；能耗平衡统计图。今后将在该平台基础上，展开更多零能耗住宅节能增效研究。

关键词：光伏并网；能耗监测；智能控制

ABSTRACT

With the rapid expansion of building scale and the increased comfort requirements for residential buildings, energy consumption issues become increasingly prominent. New energy acquisition and intelligent energy saving control are effective technological applications to reduce building energy consumption. The thesis demonstrates the zero-energy consumption of Sunny Inside in Solar Decathlon China 2013. As a technical team leader of Xiamen University, the author designed the photovoltaic system, energy monitoring system, intelligent control system and distribution system of Sunny Inside. The practical operating data and performance of the systems mentioned above are discussed. The main research works are as follows:

Photovoltaic system: Photovoltaic system was designed by photovoltaic division and architecture division with the meteorological data from Datong city, Shanxi province and the help of simulation software for the energy balance analysis.

Energy monitoring system: Use CC-Link fieldbus network and Ethernet combining with real-time energy monitoring equipment from device layer, PLC and energy saving server from control layer, remote PC and mobile terminal from information layer as an energy monitoring system. And design the hardware, software and communication for this system.

Intelligent control system: Combining the energy monitoring system and intelligent control system by a Q PLC, and build a communications network that compatible with standard Modbus protocol, no protocol and Ethernet protocol; An energy saving solution to control central air conditioning and active phase change material system was advanced; Hardware, software, communication and man-machine interface for this system were designed.

The performance curves of photovoltaic power generation system, the performance curves of energy-saving monitoring system and the energy balance statistics are given on the basis of the operating data of the Sunny Inside during competition. We will do more zero energy house energy saving research based on this platform in the future.

Key Words: Grid-connected Photovoltaic; Energy Monitoring; Intelligent Control

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 光伏发电与节能监控系统发展现状	2
1.3 本文主要研究内容	4
1.4 本文结构	5
第二章 光伏发电与节能监控系统整体方案分析	7
2.1 竞赛规则及参赛作品简介	7
2.2 零能耗建筑关键技术	10
2.3 系统总体设计	18
2.4 本章小结	21
第三章 光伏发电系统设计	22
3.1 系统需求分析	22
3.2 光伏阵列安装方式分析	22
3.3 光伏发电系统设计与优化	24
3.4 能耗平衡仿真分析	36
3.5 本章小结	36
第四章 能耗监测系统设计	37
4.1 系统需求分析	37
4.2 系统结构	37
4.3 系统硬件设计	40
4.4 系统通信设计	44
4.5 系统软件设计	48
4.6 本章小结	52

第五章 智能控制系统设计	53
5.1 系统需求分析	53
5.2 系统结构	54
5.3 节能子系统设计	55
5.4 系统硬件设计	61
5.5 系统通信设计	64
5.6 系统 PLC 主程序设计	68
5.7 人机交互界面设计	74
5.8 本章小结	76
第六章 实验与分析	77
6.1 系统搭建	77
6.2 调试与网络诊断	82
6.3 系统性能测试	83
6.4 SDC2013 参赛作品性能对比与分析	88
6.5 本章小结	90
第七章 总结和展望	91
7.1 总结	91
7.2 本人承担的工作	92
7.3 展望	92
参考文献	94
攻读硕士学位期间取得的科研成果	97
致谢	98

Content

Chapter1 Introduction	1
1.1 Research Background	1
1.2 Research status	2
1.3 The main research contents of this paper.....	4
1.4 The structure of this paper	5
Chapter2 Analysis of the the whole program of photovoltaic and energy saving monitoring system	7
2.1 Brief introduction of competition rules and the entry	7
2.2 The key technology of zero energy consumption buildings	10
2.3 The overall design of the system.....	18
2.4 The summary of this chapter.....	21
Chapter 3 Design of photovoltaic system design	22
3.1 System requirements analysis.....	22
3.2 Analysis of photovoltaic array installation.....	22
3.3 Design and optimization of photovoltaic system.....	24
3.4 Energy balance simulation.....	36
3.5 The summary of this chapter.....	36
Chapter 4 Design of energy monitoring system	37
4.1 System requirements analysis.....	37
4.2 System structure	37
4.3 System hardware design.....	40
4.4 System communication design.....	44
4.5 System software design.....	48
4.6 The summary of this chapter.....	52

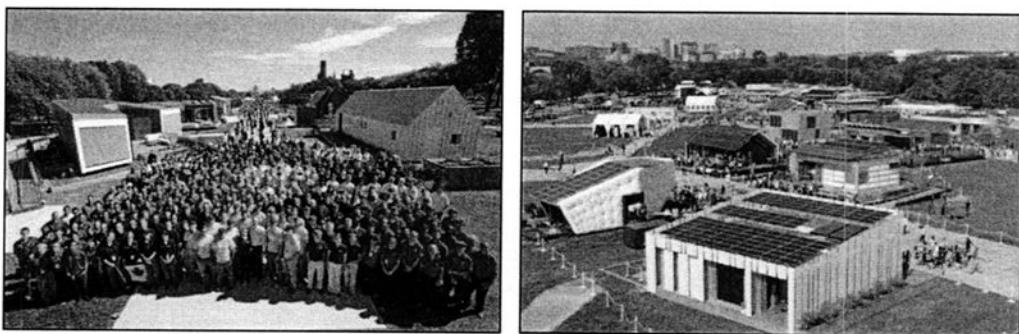
Chapter 5 Design of intelligent control system	53
5.1 System requirements analysis	53
5.2 System structure	54
5.3 Energy saving subsystem design	55
5.4 System hardware design	61
5.5 System communication design	64
5.6 System main plc program design	68
5.7 Human-computer interface design	74
5.8 The summary of this chapter	76
Chapter 6 The experiment and analysis	77
6.1 Build of the system	77
6.2 Debugging and network diagnosis	82
6.3 System performance test	83
6.4 SDC2013 entries' performance comparison and analysis	88
6.5 The summary of this chapter	90
Chapter7 Summary and Outlook	91
7.1 Summary	91
7.2 Content of work	92
7.3 Outlook	92
Reference	94
Introduction of Achievement in Scientific Research	97
Acknowledgements	98

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着建筑规模的增长及人民对住宅舒适度要求的提高，建筑能耗问题日益凸显。目前，我国建筑单位面积采暖能耗为发达国家新建建筑的 3 倍以上，建筑能耗已占社会总能耗的近 1/3^[1]。在能源日益短缺的今天，在保证居住舒适的前提下，如何实现建筑节能，成为当今的重要课题^[2]。随光伏发电技术和信息技术快速发展而诞生的住宅新能源获取和住宅智能化节能监控技术作为降低建筑能耗，使建筑实现低能耗、零能耗，甚至负能耗的有效技术手段，受到了越来越多的关注，随着国家节能减排和分布式电网政策的制定，该技术将在未来建筑节能中扮演重要角色。

欧美等发达国家较早就意识到了太阳能获取与智能节能监控对建筑节能的重要性，自 1980 年代末，就有多个欧洲国家提出了基于建筑能源管理的低能耗建筑概念^[3]，近年来，欧盟议会、英国政府、美国能源部等都纷纷制定了零能耗建筑计划^{[4][5]}。美国能源部为推进太阳能技术及建筑节能新技术在零能耗建筑中的深度应用，发起并主办了国际太阳能十项全能竞赛（Solar Decathlon），该竞赛已于 2002 至 2012 年在美国及欧洲成功举办六届（比赛现场如图 1-1 所示），历届大赛共吸引了来自世界各地的 100 多所大学参加比赛，技术水平高，影响广泛，被誉为“太阳能建筑领域的奥运会”。



(a) SD2009

(b) SD2011

图 1-1 国际太阳能十项全能竞赛现场

为加快我国建筑节能与新能源应用技术发展，2011 年，时任中国国家主席胡锦涛在对美国进行国事访问期间签署了第一个中美能源合作项目——2013 中国国际太阳能十

项全能竞赛（SD2013）。该竞赛由中国能源局和美国能源部联合主办，竞赛地点设在山西大同。来五大洲 35 所大学的 21 支团队经过严格筛选进入了决赛。

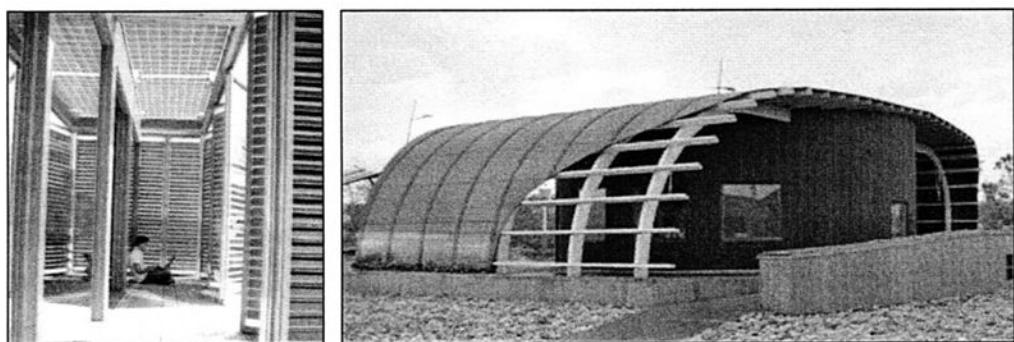
本人作为 2013 年该赛事厦门大学代表队技术组负责人，承担设计了参赛作品“Sunny Inside”的光伏发电系统、能耗监测系统、智能控制系统及配电系统，本文将对 Sunny Inside 的光伏与建筑一体化并网发电系统、能耗监测与智能控制一体化系统的设计和优化过程进行详细探讨。旨在让 Sunny Inside 在竞赛中能实现能耗平衡、室内舒适，同时，也希望通过对着一设计案例的思路和方法探讨，对将来零能耗住宅新能源获取与节能监控系统设计者起到抛砖引玉的作用。

1.2 光伏发电与节能监控系统发展现状

1.2.1 光伏发电系统发展现状

（1）光伏阵列安装形式

光伏阵列安装形式逐渐由在常规住宅上附加光伏发电系统向光伏与建筑融合的方式转变：早期的示范项目，多数是在常规住宅上方附加光伏发电系统，光伏阵列与建筑不协调，有些项目为避免这一点特意对阵列进行了隐藏。在近期项目中，光伏与建筑深入融合成为一种趋势^{[6][7]}。达姆施达特大学将采用光伏组件做遮阳百叶（图 1- 2（a）），一方面可以利用可调整角度的遮阳百叶发电，另一方面，还可以遮挡阳光，减少空调热负荷^[8]；瑞典查尔莫斯科技大学的零能耗小屋“HALO”利用薄膜光伏组件构造了弧形屋顶（图 1- 2（b）），同时满足了建筑美学、能源获取与建筑节能要求。



（a）达姆施达特大学参赛作品 （b）瑞典查尔莫斯科技大学参赛作品

图 1- 2 光伏与建筑融合设计方案

(2) 电能存储形式

电能存储形式由独立型向并网型转变：早期零能耗建筑需设储能系统对光伏发电系统产生的电能进行存储，系统投入回收期长，市场推广性较差；近年来随着各国分布式发电政策的出台，光伏并网系统的优越来越来越明显，零能耗住宅项目的能量存储形式逐步转变为直接并网式或混合式，SD2013 中，21 个作品都采用了直接并网式^[9]。

1.2.3 节能监控系统发展现状

(1) 能耗监测系统

能耗监测系统意义在于使用户了解各设备能耗状况，便于用户提高节能意识和制定节能计划，可视化节能概念是日本三菱电机提出的，该公司从 20 世纪 90 年代开始在三菱电机福山制作所使用可视化节能系统，截止 2004 年，以节约了约 1 亿日元电费；国外近期建设的零能耗建筑，有过半数使用了能耗监控系统^[10]。在零能耗建筑中，能耗监测系统也越来越普及，以 SD2009 为例，在有可查询资料的 11 支队伍中，就有 10 支队伍采用了能耗监测系统^[11]。

(2) 智能控制与节能

①智能控制节能

零能耗住宅智能控制系统近年来越来越普及，其功能主要为远程控制或自动控制灯光、遮阳、空调等设备，使小屋使用更加方便，运行更加节能^{[12][13]}。例如在 SD2007 中，达姆施达特大学设计了自控通风和遮阳系统；在 SD2009 中，爱荷华州立大学设计了和空调一体化的干燥系统^[14]。

②主动式相变储能节能

在昼夜温差较大的地区，合理的利用相变储能技术，可有效减轻制冷采暖负荷。主动式相变储能由于换热时间受系统控制，因此效率高，目的性强，近年来逐渐被采用，Weinlaeder H 在办公室天花板上安装了如图 1-3 所示的主动式相变系统，实验表明，该主动式相变系统可将室内气温控制的十分平稳^[15]。

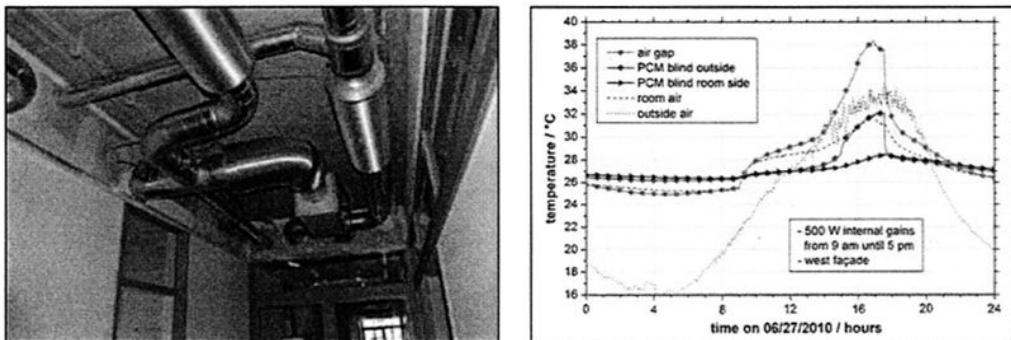


图 1-3 主动式相变节能

(图片来源: <http://pcm-demo.info/objective.htm>)

③空调整节能

目前国外对零能耗建筑空调整节能的研究和应用主要包括空调的远程或定时控制和空调改造两种形式, 空调的远程控制或定时控制可以减少空调的工作时间, 从而降低能耗, 该技术目前已经在零能耗建筑中得到广泛应用^[16]; 空调的改造有多种形式, 最典型的是应用热交换技术, 进行余热回收或将存储的热能提供给空调制热, 如 SD2011 中, 同济大学的“阳光集装箱”。

1.2.3 发展趋势及存在的问题

经过对发展现状的分析可知: 光伏与建筑一体化并网发电系统具有节能、经济、美观等优点, 是零能耗建筑能源获取的趋势; 采用能耗监测和智能控制系统, 对住宅的主动式和被动式设备进行控制, 可有效降低建筑能耗; 目前零能耗建筑采用的能耗监测与智能控制系统是相互独立的, 限制了其在建筑节能中的作用, 若能对将两个系统融合, 实现数据共享, 将能在建筑节能中发挥更大作用。

1.3 本文主要研究内容

本课题目的是为 2013 中国国际太阳能十项全能竞赛厦门大学参赛作品“Sunny Inside”设计一套具有市场推广价值的光伏发电、能耗监测和智能系统, 使该小屋实现零能耗甚至负能耗, 改善室内舒适度。主要完成了以下工作:

- (1) 光伏与建筑一体化并网发电系统设计: 光伏设计与建筑设计穿插进行, 设计出与建筑高度融合, 高效、美观、经济的光伏并网发电系统。
- (2) 能耗监测与智能控制一体化系统设计: 以 Q PLC 为核心, 构建能耗监测与智

能控制一体化系统，使能耗监测系统与智能控制系统实现数据共享，在建筑节能中发挥更有效的作用。

（3）兼容多协议的系统通信网络系统构建：将来自不同厂家、不同通信协议的的电流检测设备、环境监测设备、智能执行设备通过构建网络，形成一个有机整体。

（4）多联机中央空调开机时间预测：通过准确预测开机时间，减少空调开机时间，降低空调能耗。

（5）主动式相变储能系统控制：合理控制主动式相变储能系统白天和夜间通风时间，使其辅助空调进行室内温度调节，进一步降低空调能耗。

1.4 本文结构

本论文组织结构如下：

第一章是绪论部分，主要介绍项目背景，分析了发展现状，找出了零能耗建筑光伏发电和能耗监控系统发展趋势和存在的问题，并提出本课题的研究目标。

第二章是系统总体设计部分，首先分析了 2013 中国国际太阳能十项全能竞赛比赛规则、参赛作品 Sunny Inside 的建筑设计概况、零能耗建筑关键技术，初步确立设计要求和技术路线；随后对系统总体需求进行了分析，明确了设计目标，并按照设计目标，对系统进行了总体设计，建立了系统总体框架。

第三章是光伏发电系统设计部分，首先分析光伏发电系统设计要求和设计要点，明确设计目标，并对系统总体结构进行了设计；其次依据参赛地点山西大同气象数据结合零能耗小屋 Sunny Inside 建筑外型，进行了气象数据分析、电负荷分析与仿真、主要设备选型、倾角计算及组件布置、组/串设计，设计出了光伏并网发电系统；最后对小屋进行了能耗平衡分析与仿真，确定了该方案实现能耗平衡的可行性。

第四章是能耗监测系统设计，首先分析了能耗监测系统的系统功能需求，明确了设计目标，并给出了该子系统的总体结构；接着对系统硬件、通信、软件进行了详细设计；最后对节能服务软件进行了设计。

第五章是智能控制系统设计，首先针对明确智能控制系统的功能需求，并设计了该子系统总体结构；其次对系统的硬件、通信、软件及底层控制系统进行了详细设计；最后设计了人机交互界面。

第六章是实验与分析，首先介绍了系统搭建接线过程、展示了系统硬件实物；其次

进行了调试、网络诊断和传感器校准；最后通过比赛期间采集的实验数据，对光伏发电系统、智能控制系统的进行了功能测试和性能分析，并通过发电、用电和能耗平衡数据统计，比较了各参赛作品的性能。

第七章是总结与展望，首先总结了本论文研究内容和研究过程中的创新点；其次介绍了本人在项目中承担的工作，最后找出了前期工作的遗漏或不足，提出了后续工作的改进方向和展望。

第二章 光伏发电与节能监控系统整体方案分析

光伏发电与节能监控系统的设计都需要结合住宅的建筑特点和功能需求进行，本章将分析 2013 国际太阳能十项全能竞赛规则和零能耗小屋 Sunny Inside 的建筑特点，结合现有零能耗建筑关键技术，对小屋进行光伏发电与节能监控系统进行总体设计。

2.1 竞赛规则及参赛作品简介

2.1.1 2013 中国国际太阳能十项全能竞赛规则

为客观评价参赛作品的创新性、节能性、实用性及可推广性，SDC2013 主委制定了以下参赛规则：决赛队需于 2013 年 7 月 16 日到 7 月 31 日，在参赛地点山西省大同市建造一座建筑建筑面积 60~100m²，以太阳能作为该住宅运行和生活能源的唯一来源，并配有洗衣机、洗碗机、空调、冰箱、电磁炉、热水器等日常家用电器，能完全满足日常生活要求的零能耗小屋。

表 2-1 SDC2013 竞赛评分细则

序号	评分项	分数	小项	分数	备注
1	建筑设计	100			主观评分（美学、生物气候学）
2	太阳能应用	100			主观评分（太阳能利用、一体化）
3	工程技术	100			主观评分（水、电、暖通的节能）
4	能耗平衡	100			发电量大于用电量
5	舒适程度	100	室内温度	75	22°C~25°C
			室内湿度	25	小于 60%
6	热水供应	100			10 分钟内放 60L 水，共 16 次
7	家用电器	100	冰箱保鲜	10	1°C~4°C
			保鲜冷冻	10	-29°C~-15°C
			洗衣机	20	清洗 6 条浴巾，共 8 次
			烘干机	40	烘干 6 条湿浴巾，共 8 次
			洗碗机	20	清洗 6 餐位餐具，共 5 次
8	家庭娱乐	100	家用电器	25	在规定时间内使用电视和电脑
			灯光照明	40	规定时间内所有灯具开到最亮
			烹饪	20	2h 内蒸发 2L 水，共 4 次
			聚会	10	邀请客人进行 8 人晚宴，共 2 次，互评
			电影之夜	5	按视听效果打分
9	宣传展示	100			主观评分（网页和媒体推广）
10	市场推广	100			主观评分（成本及推广价值）

主委会于 8 月 1 日至 8 月 11 日, 针对建筑设计、太阳能应用、工程技术、能耗平衡、舒适程度、热水供应、家用电器、家庭娱乐、宣传展示、市场推广十项指标进行评分^[17]。每项分数为 100 分, 总分 1000 分, 具体评分细则可归纳为表 2-1。

竞赛期间, 各参赛队要按人们日常生活习惯, 让家用电器及暖通设备在规定的时间内按规定的参数运行。如: 冰箱冷冻室温度控制在 $-29^{\circ}\text{C} \sim 15^{\circ}\text{C}$, 保鲜室温度控制在 $1^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$; 19:00~23:00 所有灯具需开启并调到最亮; 16:30~6:30 室内温度控制在 $22^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$, 湿度保持小于 60%; 需进行 8 次洗衣、烘干, 5 次洗碗; 需在规定时间内进行烹饪、播放视频等。

在十个评分项中, 与光伏发电及节能监控关系最密切的有:

(1) 能耗平衡: 要保证光伏发电系统在竞赛期间能提供充足的电能, 并且节能监控系统尽可能降低建筑能耗, 以实现竞赛期间发电量要大于用电量, 即能耗平衡。

(2) 太阳能应用: 选择合理的安装方式、组件、逆变器、倾角, 使光伏发电系统美观、高效、经济。

(3) 舒适程度: 节能监控系统需对小屋的温湿度进行闭环控制, 保证在规定的测试时间内室内温度控制在 $22^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$, 湿度保持小于 60%。

(4) 市场推广: 光伏发电系统和节能监控系统的设计过程中, 始终要将系统成本和可靠性考虑在内, 以保证其具有市场推广潜力。

2.1.2 Sunny Inside 建筑设计概况



图 2-1 Sunny Inside

如图 2-1 所示, Sunny Inside 建筑面积 90m^2 , 设有卧室、客厅、餐厅、卫生间和设

备间。作品取名为 **Sunny Inside**，意为让阳光成为建筑的一部分，建筑可通过自身需求，自由支配太阳能：一方面，可高效吸收太阳能，产生建筑所需的电能和热能；另一方面，还可通过合理的建筑结构，过滤掉不需要的热量和光照，使室内光照均匀，温度适中。

Sunny Inside 采用了主动式和被动式相结合设计理念，以最大限度降低建筑能耗：

（1）被动式节能

①中庭和外遮阳

Sunny Inside 采用了缓冲空间的被动式设计，在小屋中设计了如图 2-1 所示的独具特色的“生态中庭”：T 型的中庭联系起各部分居住空间，作为建筑室内与室外之间的微气候缓冲区域，智能遮阳系统能根据室外气候的变化对建筑的采光、通风、蓄热进行调节，改善建筑内的微气候环境，保持室内主要使用空间的舒适性。

②建筑保温

Sunny Inside 采用了聚氨酯和玻璃棉双重保温材质做墙体，三层双中空充氩气 Low-E 玻璃做门窗，以保证小屋的良好保温性能。为客观评估小屋的保温性能，根据维护结构材质，运用 Designbuilder 软件进行了围护结构热阻值模拟，其模拟结果如表 2-2 所示。

表 2-2 围护结构构造层次及热工参数

部位	构造层次（由外至内）及厚度（mm）	传热系数 K 值($m^2 \cdot K/W$)	遮阳系数	透光率(%)
墙体	饰面板 15——顶板条 15，铺防水膜——OSB 板 12——木龙骨 140，空腔内填玻璃棉——OSB 板 12——聚氨酯 50——防火内饰面板 7	0.24	—	—
地板	OSB 板 12，下铺防水膜——木龙骨 184，空腔内填玻璃棉——OSB 板 12——木垫块 18——木地板 15	0.25	—	—
屋面板	玻纤瓦——高分子防水卷材——OSB 板 12——木龙骨 140，空腔内填玻璃棉——OSB 板 12——岩棉 50	0.26	—	—
门窗	三层双中空充氩气 Low-E 玻璃： 5L+14Ar+5+14Ar+5L	0.8	0.58	70
天窗	XIR 夹胶玻璃：6+1.5XIR+6	1.7	0.24	46

(2) 主动式节能

针对山西大同昼夜温差大气候特点, Sunny Inside 采用了主动式相变储能系统, 利用相变材料在相变过程中可吸收或放出大量热量, 储热和放热过程中温度基本保持不变等优点, 通过对相变材料进行主动式通风, 使其白天蓄热为夜间供暖, 夜间蓄冷为白天降温, 替代部分空调功能, 降低空调能耗。

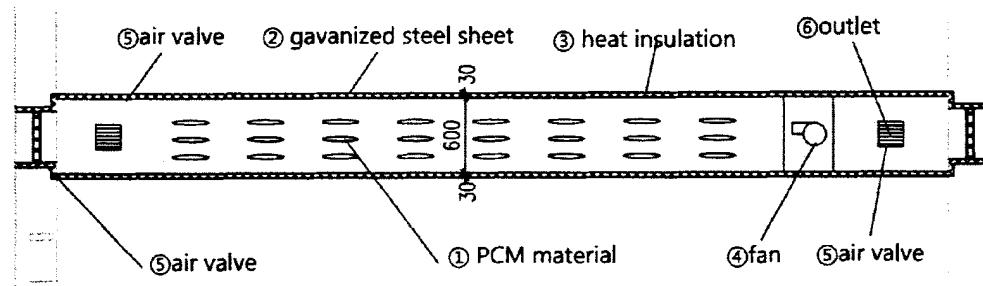


图 2-2 相变系统

2.2 零能耗建筑关键技术

2.2.1 光伏与建筑一体化技术

光伏发电是大部分零能耗建筑的主要能量来源。目前, 零能耗建筑常用的光伏发电系统可分独立光伏发电系统、并网光伏发电系统和混合型光伏发电系统三种类型, 其中并网光伏发电系统具有建造成本低、稳定性好、可调峰等优点, 随着各国分布式能源并网激励政策的发布而倍受青睐, 发展迅速, 已成为主流。

零能耗建筑并网光伏发电系统的系统简图如图 2-3 所示: 光伏组件方阵在太阳辐射下产生直流电, 经光伏逆变器转换为交流电, 产生的交流电可直接提供给住宅本身使用, 剩余或不足的电能反馈给电网或从电网补充。

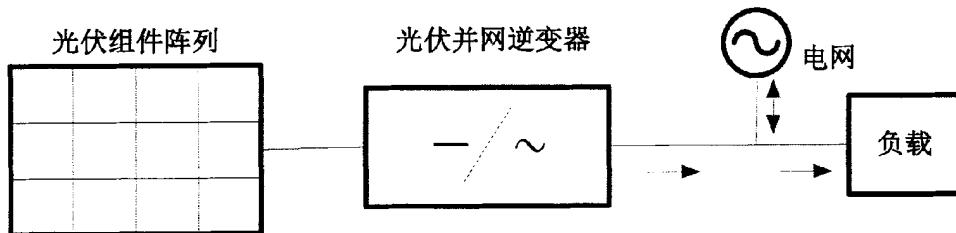


图 2-3 零能耗建筑并网光伏发电系统

光伏并网发电系统设计要点：

（1）合理的光伏组件安装方式

在光伏并网发电系统中，光伏组件的安装形式对系统接收太阳辐射量有很大影响，从而影响系统的发电能力。光伏组件有固定式和跟踪式两种安装方式，两种安装方式各有优缺点：固定式安装成本低、系统可靠、容易与建筑一体化，但全年光电转换效率较低；自动跟踪式安装可提高全年光电转换效率，但成本较高、系统易出现故障、不容易与建筑融合，影响建筑整体美观。设计光伏阵列时，要结合具体建筑造型、系统规模，充分分析年发电量、系统成本、稳定性、美观性后再做出综合判断^[18]。此外，设计光伏阵列时，还需预留安装和维修空间，便于组件安装、接线及局部损坏维修。

（2）合适的光伏组件朝向和倾角

并网光伏发电系统的特点是：在太阳辐射强时，光伏发电系统可将多余的电能输送到电网，而在阴雨天或夜晚，太阳辐射弱，光伏发电系统产生的电能不能满足负载需求时又自动从电网补给^[19]。因此，在安装条件允许的情况下，对于采用固定倾角安装的光伏阵列，应选择合适的朝向和倾角使系统全年的发电量最大。而对于光伏与建筑一体化并网发电系统，组件倾角的选择还要考虑建筑的美观度，需要根据实际需要对倾角进行小范围的调整，但这种调整不应导致太阳辐射吸收的大幅降低。

（3）组件无遮挡

光伏组件上的局部阴影会造成输出功率的明显减少，一个单电池被完全遮挡就可使组件输出功率减少 75%，进行光伏系统设计时，若低估了阴影的影响，设计出的系统发电效果可能会和预期有着巨大差别^[20]。因此，通过计算和模拟，以避免组件在全年都不被遮挡在光伏系统设计中至关重要。

（4）合理的散热

光伏组件的工作效率随温度升高而下降。在温度 20-100°C 范围内，温度每升高 1°C 每片电池的电压约减小 2mV；而光电流随温度升高略有增加，每升高 1°C 每片电池的光电流约增加千分之一，即 $0.03\text{mA}/^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^2$ ，综合计算可知，温度每升高 1°C，功率会下降 0.3%~0.5%，因此，在光伏系统设计中，保证光伏阵列上下表面的自然通风，以较小温升对组件性能的影响^[21]。

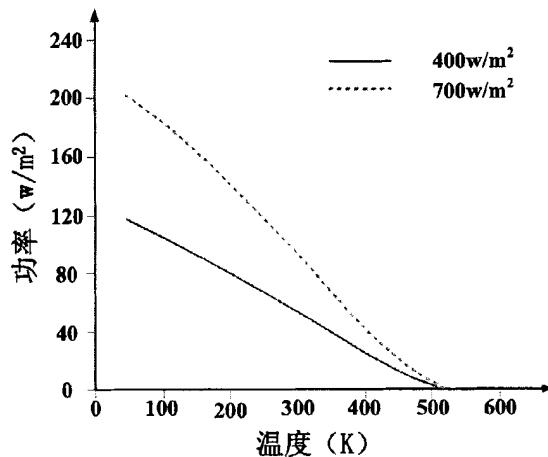


图 3-1 温度对光伏组件输出功率的影响

(5) 最大功率跟踪

在光伏发电系统中，接入逆变器的每个直流回路都是由多块光伏组件串联或并联形成的，而每块光伏组件又由多个单体太阳能电池串联形成。进行合理的组、串设计，保证在温度和辐照变化时，光伏阵列电压工作在逆变器的最大功率跟踪（MPPT）范围内，减小逆变器故障率，保证光伏发电系统高效输出^[22]。

(6) 合适的逆变器

目前投入市场的逆变器产品主要可分集中式逆变器和微型逆变器两类，集中式逆变器技术成熟，可靠性好，单位容量成本低但输出功率受阴影或光照不均匀影响大；微型逆变器组建的光伏发电系统受光照不均匀影响小，无高电压，操作安全，但技术还不够成熟，寿命和转换效率都偏低，单位容量成本较高。两种逆变器各有优势和不足，需根据具体光照情况作出选择^[23]。

(7) 合适的光伏组件

光伏组件可分为晶硅和非晶两大类，晶硅组件光电转换效率高，技术成熟，使用寿命长，但成本较高；非晶组件弱光性好，成本低，可制成柔性组件，适应建筑造型需求，但光电转换效率低，寿命较短。需根据当地气候，组件安装条件作出选择。

2.2.2 主动式相变系统节能技术

(1) 相变材料节能原理

相变材料是指在某一特定温度（相变温度）附近，环境温度变化会使其物理状态发

生改变，同时吸收或放出大量潜热，使其周围温度维持在相变温度附近的物质。

在日常生活中，太阳辐射强度在每天 24 小时内分布是不均匀的，中午太阳辐射强时环境温度较高；夜晚没有太阳辐射时环境温度逐渐降低，即形成了所谓的昼夜温差，在北方地区，昼夜温差尤为明显。然而，人体需求的舒适环境温度却是基本恒定的，为保持建筑室内温度符合人体舒适度要求，传统方法是在建筑中安装空调设备，但空调设备耗能高，给能源供应带来了严重挑战。相变材料的诞生为室内温度调节提供了新思路，可将相变材料安装于建筑内，白天温度较高时，可通过相变吸收能量，使室内温度降低，并将吸收的能量以相变潜热的形式进行储存，夜间温度较低时，可将能量以相变潜热的形式放出，并通过放出热量，使自身物理状态发生改变，便于第二天温度较高时再次相变吸收热量。通过潜热储存于释放的过程，可有效减小室内温差^[24]。

（2）主动式相变节能

主动式相变节能的一个重要应用是相变新风系统：将相变材料封装成小袋后均匀固定在新风管道中，在管道中设置风机，开启风机时，在管道内流动的气体可与小袋中的相变材料进行充分的热交换，利用相变材料的潜热对室内气温进行调节^[25]。

2.2.3 网络技术

1、CC-Link 通信

（1）CC-Link 简介

现场总线网络诞生于 20 世纪 80 年代末，是当今自动化领域的技术热点之一。现场总线可实现双向、多节点、总线式全数字化通信，因此在智能楼宇、生产自动化和过程控制自动化领域得到广泛应用，被誉为自动化领域的计算机局域网^[26]。

CC-Link（Control&Communication Link）是以三菱电机为主的多家公司于 1996 年推出的开放式现场总线，在亚洲、欧洲和北美都有较广泛的应用，并于 2005 年被中国批准为国家标准指导性技术文件^[27]。

CC-Link 具有以下特点：

①省线：使用现场总线网络结构，一条现场总线即可连接现场多种设备，简化了现场配线，节约了配线成本，提高了使用和维护效率。

②开放：CC-Link 在工业自动化设备中应用广泛，因此，支持 CC-Link 的产品类别也很丰富，目前 CC-Link 已经有超过 1000 家会员生产厂商，兼容产品超过 900 种。

③高速：CC-Link 可实现最高 10Mbps 的高速通信，且在高速通信时还可保证输入

输出的可靠性。

④远距离: CC-Link 的最大传输距离可达 1.2km(156kbps), 若使用中继器或光纤中继器, 最大传输距离可扩展到 13.2km。

⑤高可靠, 易维护: 具有死机预防, 自动复位, 待机主站, 保留主站, 扫描同步, 数据链接停止, 站号重合检测等功能, 使网络可靠性高, 易于维护^[28]。

(2) CC-Link 协议构成

CC-Link 协议分为物理层、数据链路层、应用层和用户层四个层次, 其中, 数据链路协议支持测试传输、循环传输和瞬时传输 3 种类型传输协议。

(3) CC-Link 结构

CC-Link 网络由主站、从站、本地站、备用主站、智能设备站、远程站、远程设备站、远程 I/O 站通过 CC-Link 专用电缆连接而成, 常用的站名和功能如表 2-3 所示。

表 2-3 通用术语说明

通用术语	说明
主站	控制数据链接系统的站, 每个系统需一个主站, 站号固定为 0
本地站	有一个 PLC CPU 并具有和主站与其它本地站通信能力的站
远程设备站	仅处理以位为单位和以字为单位的数据的远程站
智能设备站	可以执行瞬时传送的站, 例如 AJ65BT-R2 (包括本地站)
智能功能模块	安装于基板之上的除了 CPU 模块、电源模块和 I/O 模块之外的 Q 系列模块

(4) 系统配置

在满足式 2-1 和式 2-2 的情况下, 每个 CC-Link 单独主站共可连接 64 个远程 I/O 站、远程设备站、本地站、备用主站或智能设备站。

$$\{(1 \times a) + (2 \times b) + (3 \times c) + (4 \times d)\} \leq 64 \quad (2-1)$$

$$\{(16 \times A) + (54 \times B) + (88 \times C)\} \leq 2304 \quad (2-2)$$

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| a: 占用 1 个站的模块数 | b: 占用 2 个站的模块数 |
| c: 占用 3 个站的模块数 | d: 占用 4 个站的模块数 |
| A: 远程 I/O 站的数量 ≤ 64 | B: 远程设备站的数量 ≤ 42 |
| C: 本地站、备用主站和智能设备站的数量 ≤ 26 | |

CC-Link 网络使用三层屏蔽双绞线的专用电缆进行连接, 其传送速率和电缆最大总长度的关系如表 2-4 所示^[29]。

表 2-4 CC Link 通信速度和线缆长度的关系

通信速度	156kbps	625kbps	2.5Mbps	5Mbps	10Mbps
站间电缆长度	>20cm	>20cm	>20cm	>20cm	>20cm
最大传输距离	1200m	900m	400m	160m	100m

(5) QJ61BT11N CC-Link 扩展模块

QJ61BT11N 是三菱 Q 系列 PLC 对外设进行控制和通信链接的主/本地模块，在 CC-Link 网络中既可以作为主站也可以作为本地站使用，该模块的主要功能有：可与远程 I/O 站、远程设备站、本地站、智能设备站进行通信；具有从站切断功能，总线上某个从站出现故障不影响总体通信；具有自动复位功能。^[30]

2、Modbus 通信

(1) Modbus 简介

Modbus 协议是 Modicon 公司于 1978 年发布的世界上第一个真正用于工业现场的总线协议，在工业网络中具有里程碑意义，它可实现不同生产商设备间的通信，从而将这些设备连接成一个工业网络，进行集中监控。该协议已成为一种工业标准协议^[31]。

Modbus 具有以下几个特点：

①标准、开放，所有用户均可以免费使用 Modbus 协议，目前，支持 Modbus 的厂家超过 400 家，支持 Modbus 的产品超过 600 种。

②Modbus 可以支持多种电气接口，如 RS-232、RS-485 等，还可以在各种介质上传送，如双绞线、光纤、无线等。

③Modbus 的帧格式简单、紧凑，通俗易懂，用户使用容易，厂商开发简单。

Modbus 协议定义了一台控制器能认识和使用的消息结构，标准的 Modbus 接口是 RS-232C 兼容接口，它定义了接口针脚、信号位、传输波特率、奇偶校验、电缆^[32]。

(2) Modbus 传输模式

控制器可设置为 ASCII 或 RTU 传输模式。ASCII 是美国信息交换码的缩写，该模式可打印字符，便于故障检测，适用于采用高级语言编程的主计算机。RTU 为远程终端设备的缩写，该模式适用于使用机器语言编程的计算机及其他主机设备^[33]。

在进行传输模式设置时，应遵循每个 Modbus 系统只能使用一种模式的原则，不允许两种模式混用。

(3) 三菱 Modbus 现场总线的主站通信模块 QJ71C24N-R4 简介

三菱 Q PLC 提供了支持 RS485/422 接口的扩展模块 QJ71C24N-R4，该模块有以下特点：

①作为主站

自动通信功能：通过设置自动通信参数，就可利用 QJ71C24N-R4 的缓存与从站进行 Modbus 通信，也可以使用实用工具包 GX Configurator-MB 的自动刷新功能实现 Q PLC 的 CPU 与 QJ71C24N-R4 模块间的数据传输^[34]。

专用指令通信：使用 MBRW、MBREQ 专用指令，可在顺口程序的任意时刻通信。

②作为从站

自动响应功能：QJ71C24N-R4 可自动响应和接收来自主站的数据请求。

设备分配功能：可通过参数分配，使 Modbus 设备与 Q PLC 的 CPU 软元件内存对应起来。

③支持高速通信

两个通道的通信速度均可达 115200bit/s。

④可使用实用软件包

使用软件包 GX Configurator-MB 提供了初始化设置和自动刷新设置，减轻了顺控程序编制工作，并且检查运行状态变得更方便。

3、以太网通信

(1) 以太网概述

以太网是 Xerox 公司创建并由 Xerox、Intel 和 DEC 公司联合开发的，当今现有局域网采用的最普遍通信协议标准，具有应用广泛、通信速率高、资源共享能力强、可持续发展潜力大等特点^[35]，常用的以太网规格如表 2-5 所示

表 2-5 常用以太网规格

以太网规格	10BASE5	10BASE2	10BASE-T	100BASE-TX
传输速度	10Mbps	10Mbps	10Mbps	100Mbps
最大节点间隔	2500m	925m	-	-
最小节点间隔	2.5m	0.5m	-	-
最大传送段长	500m	185m	100m	100m
电缆	同轴 50 Ω， 直径 12mm	同轴 50 Ω， 直径 5mm	非屏蔽双绞线 (UTP) 3 号	非屏蔽双绞线 (UTP) 5 号或屏蔽双绞线 (STP) IBM 1,2 类型
网络形状	总线	总线	星形	星形

(2) 地址

以太网上连接的设备间要实现网络通信，必须有可识别的地址，包括 MAC 地址和 IP 地址等。

①MAC 地址

MAC 地址是给各网络设备分配的固有物理地址，任何设备的 MAC 地址都是唯一的。对于以太网设备，用户一般无需了解 MAC 地址，该地址可从用户指定 IP 地址中自动获取。

②IP 地址

IP 地址是为了区别连接在因特网或局域网等 IP 网络设备而为它们分配的号码，在因特网中存在的网络都使用的是国际统一的地址。常用的 IPV4 网络采用的是 32 位数值表示 IP 地址。

(3) QJ71E71-100 以太网拓展模块概述

Q PLC 基本上可安装 QJ71E71-100 以太网扩展模块，通过该模块，可实现 PLC 与上位机（计算机或服务器）、PLC 和 PLC、PLC 和触摸屏间的通信^[36]。该模块就有以下几个特点：

①支持 TCP 和 UDP 两种通信方式。

支持 TCP 和 UDP 两种通信方式两种通信方式，且可以根据对象选择通信方式，其中 TCP 协议最适用于需将数据准确地传送到目的地的场合，而 UDP 协议适用于在计算机中进行实时监视的场合。

②支持送信数据代码选择

可进行二进制码或 ASC II 码的数据通信。其中，二进制码通信的优点是，送信/收信流量只有 ASC II 的一半，可减少通信线路负荷，同时，该通信方式可处理 00H 和 FFH 的数据，缺点是表示数字数据是，需将其转换为 ASC II 码。而 ASC II 的优点是外设得到的数据可以直接显示，不需要经过转换，缺点是送信/收信流量是二进制码的两倍，需要数据处理时需先将其转换为二进制码。

③支持根据通信目的选择三种通信功能

该模块具有 MC 协议通信、固定缓冲存储区通信、随机读写用缓冲存储器通信三种通信功能。其中，MC 协议的功能是，计算机可以通过以太网扩展模块，对 PLC 的 CPU 中软元件数据进行读写，计算机只要通过编写 MC 协议数据收发程序，便可以访问 PLC

的 CPU；固定缓冲存储区通信是，利用以太网扩展模块缓冲存储区中的固定缓冲存储区与其他 PLC 的 CPU 或者计算机通信；随机访问缓冲存储区通信是，利用以太网扩展模块内缓冲存储区中的用于随机读写的缓冲存储区，与进行计算机通信^[37]。

2.3 系统总体设计

2.3.1 系统需求分析

(1) 光伏并网发电系统

- ①建立光伏并网发电系统，该系统需实现比赛期间能耗平衡；
- ②光伏系统与建筑一体化，既实现光伏系统高效发电，又使建筑更加美观、节能；
- ③控制系统成本，使其具有市场推广价值。

(2) 能耗监测及智能控制系统

- ①将能耗监测和智能控制系统融合，实现数据共享；
- ②构建兼容多协议的系统通信网络，将不同厂家的仪表、传感器等有机整合；
- ③设计友好的人机交互界面，实现本地、远程控制设备；实时了解能耗状况；
- ④设计中央空调开机时间预测控制方案；
- ⑤设计主动式相变储能系统自动控制方案；
- ⑥设计对遮阳、新风等其他执行机构控制方案。

2.3.2 系统总体设计

(1) 光伏发电系统总体设计

根据设计需求，给出的 Sunny Inside 光伏并网发电系统总体结构如图 2- 4 所示，光伏组件阵列产生的直流电经过串/并联后汇总到光伏并网逆变器直流输入端，经逆变后产生的交流电一方面可供负载使用，另一方面可将多余的电能直接馈入电网。在微电网进线侧、逆变器输出侧及负载侧分别安装了电能监测设备 M1, M2, M3。其中 M1 为双向智能电表，是主委会监测小屋净能耗的计量设备；M2 和 M3 为两个电能监测模块，用于监测小屋光伏发电系统的发电数据及小屋总能耗数据。

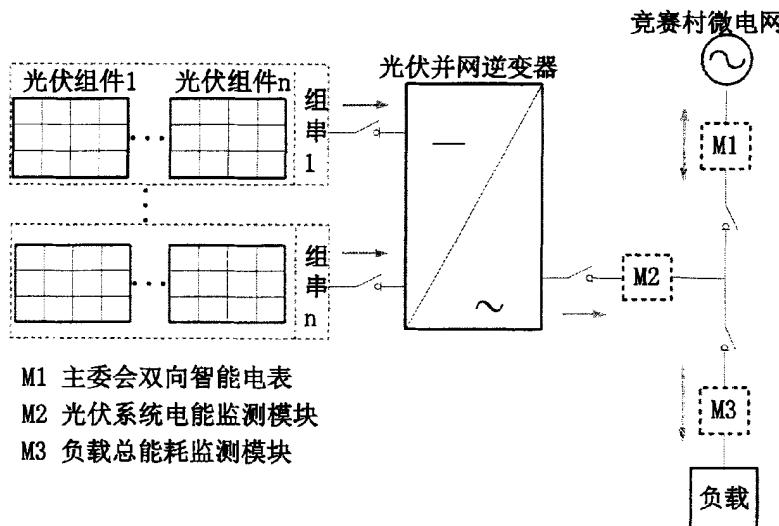


图 2-4 光伏发电系统总体结构

(2) 能耗监测与智能控制系统总体设计

系统的总体设计思路是：将能耗监测系统与智能控制系统设备进行有机融合，实现数据共享，将智能控制系统由传统的开环系统变为闭环系统。

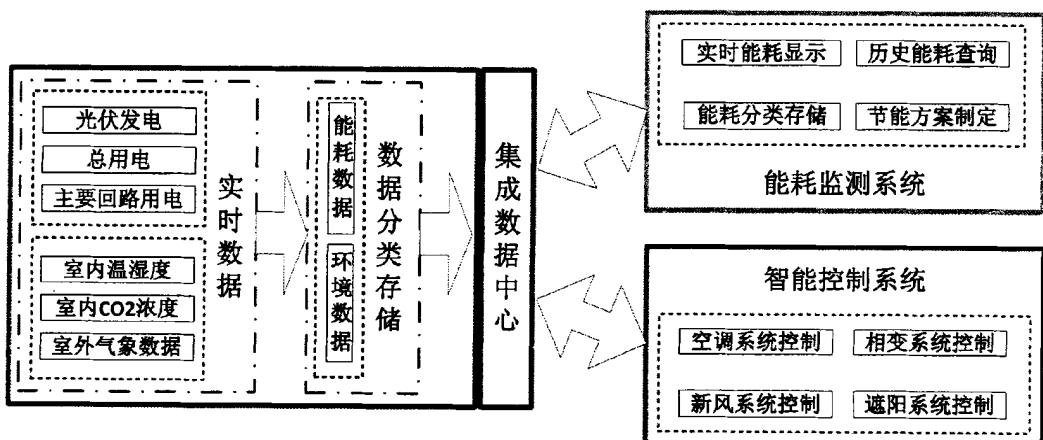


图 2-5 能耗监测与智能控制系统总体结构

具体实施方案如图 2-5 所示：电能监测模块采集到的光伏发电、总用电、主要回路用电等实时能耗数据；温湿度传感器、CO₂传感器及小型气象站采集到的实时环境数据都通过同一系统进行分类存储，形成一个集成数据中心。能耗监测系统可通过访问该中心，获取实时能耗和历史能耗数据，并通过可视化节能设备，实现实时能耗显示、历史能耗查询、能耗分类存储、节能方案制定等功能；智能控制系统可通过访问该中心，获

取环境及能耗数据, 将这些数据反馈给预先写入节能程序的控制器中, 实现对空调系统、相变系统、新风系统和遮阳系统的节能控制。

2.3.3 系统网络分层设计

根据上文所述的系统总体结构及设计需求可知, 可将 Sunny Inside 能耗监测系统与智能控制系统整合为节能监控系统, 其系统网络可划分为三层: 设备层、控制层和应用层, 如图 2-6 所示。

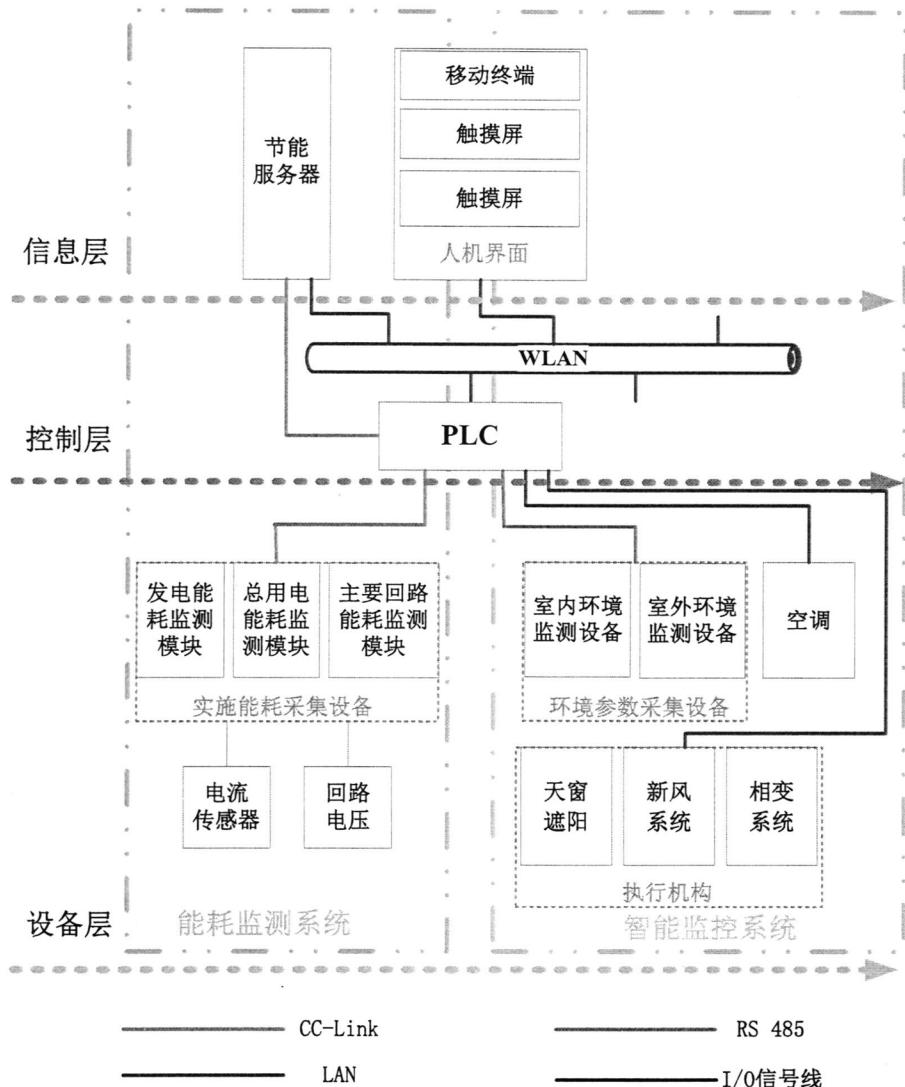


图 2-6 网络总体结构

(1) 设备层

设备层主要包括各类能耗采集模块、环境参数采集设备及执行机构，其主要功能包括：能耗采集模块、环境参数采集设备对现场能耗和环境数据的进行实时采集，并将数据传输到控制层；执行机构接收控制层发出的指令，并按照指令进行相应的操作。Sunny Inside 的智能控制、能耗分析、节能优化等所有功能都建立在设备层反馈的获取现场的能耗及环境数据的基础上，为正确、准确、及时的传输现场数据，设备层采用了 CC-Link 和 RS485 现场总线。

(2) 控制层

控制层主要设备是 PLC，其主要任务包括：通过 CC-Link，RS485 扩展模块，接收设备层发送的现场数据，并将数据进行计算和存储；执行智能控制层序，根据现场反馈数据进行运算，得出操作指令，并通过网络或 I/O 信号线对设备层的执行机构发出；将处理过的现场数据经过 CC-Link 和网络分别发送给节能服务器和触摸显示终端。

(3) 信息层

信息层的主要设备是节能服务器和移动终端，其主要任务包括：节能服务器通过 CC-Link 接收控制层发送的现场能耗数据，并对这些数据进行分类存储、统计分析、生成报表，最终通过以太网进行发布，用户可通过网络对能耗统计结果及实时能耗进行查询；触摸屏通过以太网接收设备层发送的现场能耗及环境数据，并对这些数据进行分类与显示，同时，触摸屏还通过以太网，向 PLC 发送手动控制指令。

2.4 本章小结

本章首先分析了 2013 中国国际太阳能十项全能竞赛比赛规则、参赛作品 Sunny Inside 的建筑概况及零能耗建筑关键技术，初步确立光伏发电与节能监控系统的设计要求和技术路线；随后对系统总体需求进行了分析，明确了设计目标；最后按照设计目标，对光伏发电和能耗监测及智能控制系统进行了总体设计，对能耗监测和智能控制系统进行了网络分层设计，建立了系统总体框架。

第三章 光伏发电系统设计

光伏发电系统是大部分零能耗住宅的主要能量来源，更是 SD2013 参赛作品唯一的电能来源，因此，设计一套合理的光伏发电系统对于 *Sunny Inside* 至关重要。由前面章节分析可知，光伏与建筑一体化并网发电系统具有美观、高效、经济等优点，是零能耗住宅能源获取系统的应用趋势。本章将探讨如何根据 SD2013 竞赛规则、参赛地点气候数据、小屋建筑特点及小屋负荷特点，对小屋光伏发电系统进行设计与优化。

3.1 系统需求分析

（1）采用光伏并网发电系统

小屋不设大容量电能存储设备，而是采用光伏并网发电形式，即在太阳辐射强，系统发电功率大于用电功率时，可将多余的电能输送到电网，在阴雨天或夜晚，太阳辐射弱，光伏发电不足以满足负载需求时又从电网取电。

（2）为小屋实现能耗提供充足的能量来源

光伏发电是小屋的唯一电能来源，比赛期间光伏发电系统向微电网输送的电量大于小屋从微电网获取的电量，即要使小屋实现零能耗。

（3）易于市场推广

光伏发电系统设计和设备选型时，要充分考虑系统造价、可靠性、易维护性，使其易于在市场推广使用。

3.2 光伏阵列安装方式分析

零能耗建筑光伏组件布置既需考虑系统发电效率，设计成本，还需兼顾建筑美学，建筑节能等，是建筑设计人员和光伏系统设计人员经过不断的假设、验证、分析后得出的综合性能最优结果。

Sunny Inside 是一座木结构建筑，建筑设计原型如图 3-2(a)所示，该建筑原型为平屋顶，一个 L 型中庭将屋顶分割为两个独立单元，屋顶可使用面积共约 $80m^2$ ，需选择一种合适的安装方式，使光伏阵列铺设在屋顶既美观实用又经济高效。

（1）固定式和跟踪式安装方式的对比分析

由上文分析可知，光伏组件的安装方式有固定式和跟踪式，固定式安装和跟踪式安

装各有利弊，需要根据建筑实际情况及当地气候条件做合理选择。表 3-1 给出了大同地区采取固定式支架可调支架、单轴水平跟踪支架、双轴跟踪支架的年发电总量及建造成本对比，可知，相同的安装容量，使用单轴跟踪系统可使年发电量增加 15%，系统建造成本相应的要增加 18.1%；使用双轴跟踪系统可使年发电量增加 40%，系统建造成本需相应增加 34.7%。由此可知，固定安装、单轴跟踪安装或双轴跟踪安装的投入产出比基本相同。然而，Sunny Inside 是一个民用住宅，安装在该住宅中的光伏发电系统除了考虑发电效率和投入产出比还需考虑系统的可靠、易用和美观性，采用跟踪式一方面会使系统可靠性变差，另一方面也和建筑难以融为一体，影响建筑的整体美观性，因此，Sunny Inside 光伏组件采用了固定式安装。

表 3-1 不同安装方式效果及成本对比

序号	安装方式	年发电量增加 (%)	单 Wp 成本增加 (%)
1	单轴水平跟踪	15	18.1
2	双轴跟踪	40	34.7

（2）安装角度对比分析

图 3-2 (b) 和 (c) 是采用固定式安装的两个设计方案，方案一，将阵列分为两组，小屋前方的部分安装角度为 0°，小屋后方的部分安装角度为 30°；方案二中小屋前方的部分和后方部分都采用 30° 角安装，经仿真分析，采用方案一系统年发电量比方案二约少 16%，由此可知，安装倾角对系统发电量影响较大，在山西大同，不适合采用水平安装。

（3）光伏与建筑一体化和独立支架两种安装方式对比分析

图 3-2 (c) 和 (d) 是采用固定式有倾角安装的两个设计方案，方案二中，光伏阵列通过固定在平屋顶的支架安装，而方案三的光伏阵列则是安装在斜屋顶上方，成为斜屋顶的一部分。经对比分析可知，采用光伏与建筑一体化安装的方案三比采用独立式支架安装的方案，建筑整体更为美观，同时，光伏组件使建筑形成了双层屋顶结构，有利于阻挡太阳辐射，减少屋内空调制冷能耗。

因此，Sunny Inside 采用了图 3-2 (d) 的光伏与建筑一体化设计方案。光伏阵列采用合理的角度安装在斜屋顶上，与形成双层屋顶，组件和屋顶间留有 800mm 的间隙，便于组件散热及安装维护。

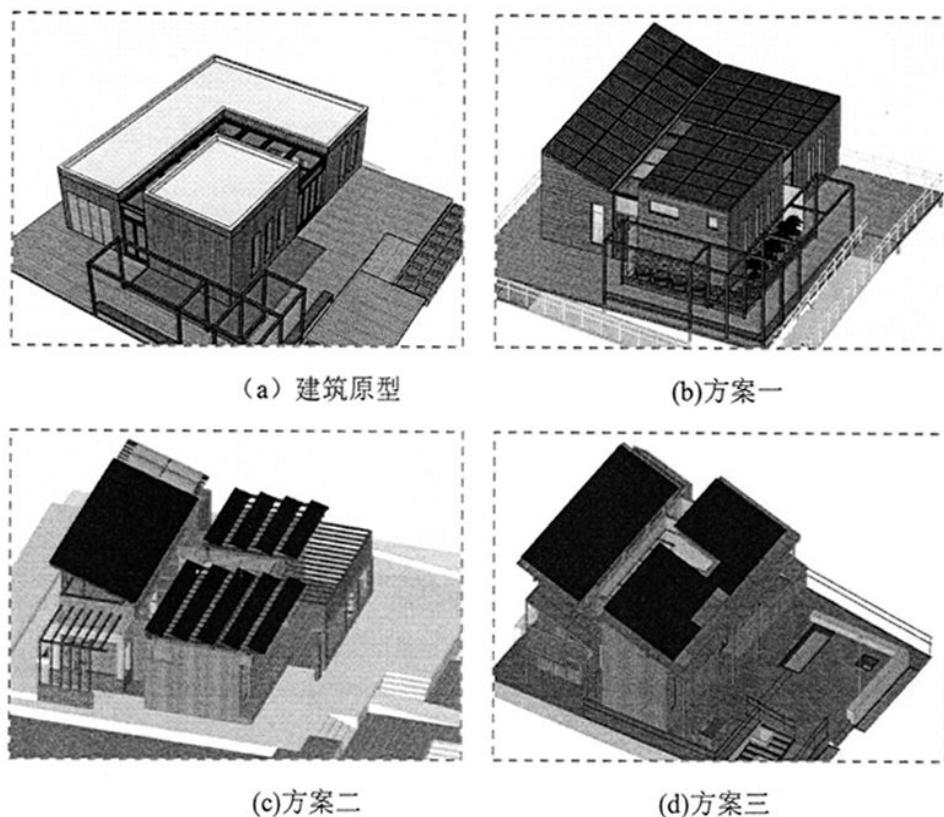


图 3-2 安装方式演变

3.3 光伏发电系统设计与优化

3.3.1 气象数据分析

(1) 气候数据分析

参赛地点大同市，位于山西省最北端，北纬 113° ，东经 40° ，海拔 1000m，是温带大陆性季风气候，冬季漫长且寒冷干燥，夏季短暂且温热多雨，春秋凉爽，温差较大。年均气温 5.5°C ，极端最高气温 37.7°C ，极端最低气温 -29.1°C ；年平均降雨量在 400 毫米；无霜期 $100\sim156$ 天^[38]。图 3-3 由大同 1971 年-2010 年气象资料统计数据整理而得。

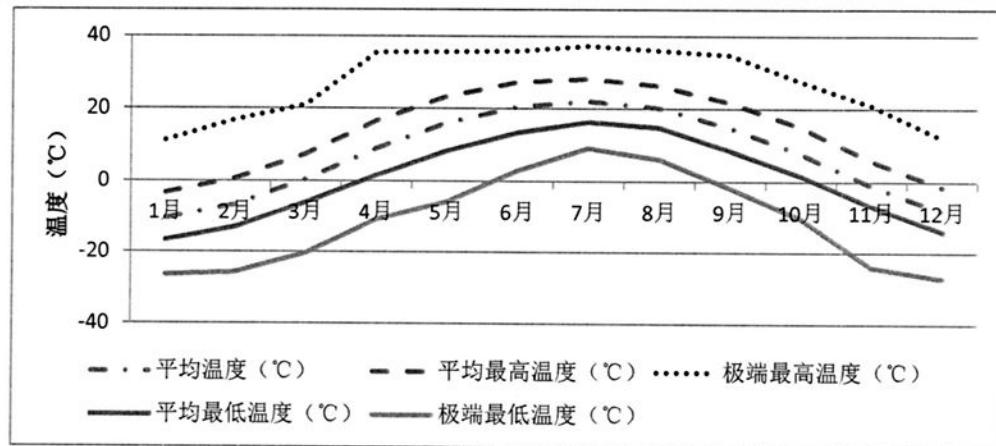


图 3-3 大同市 1971-2010 年气象数据统计

(2) 太阳辐射分析

图 3-4 是由大同市 8 个国家级气象站点, 1960-2009 的太阳辐射统计数据整理而得。分析统计数据可知, 在 1960-2009 年间, 大同平均日照时数为 2763.95h, 年日照百分率为 63%, 日照时数较长, 属于太阳能资源丰富的地区, 平均各月地面接收太阳辐射呈现单峰变化趋势, 最高点出现在 5 月, 辐射值为 679.42 MJ/m^2 , 之后逐月递减; 最低值出现在 12 月, 辐射值只有 229.61 MJ/m^2 [39]。

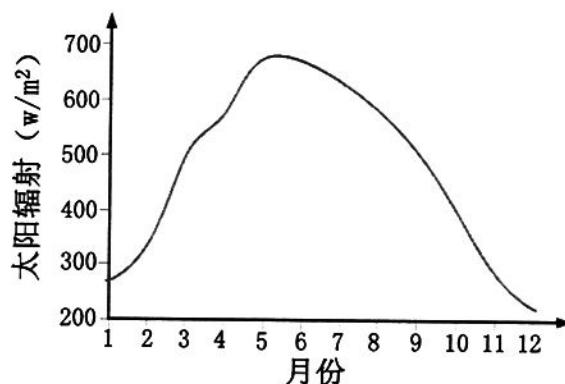


图 3-4 大同市 1960-2009 年平均逐月太阳辐射值分布

3.3.2 电负荷计算与仿真分析

Sunny Inside 按人们日常生活习惯, 配备了齐全的家用电器, 为降低家电能耗, 选用的大部分为型家电。同时, 小屋还安装了相变系统、中央空调系统、能耗监控和智能控制系统等, 以进一步降低建筑能耗。

表 3-2 Sunny Inside 电负荷

	设备	电能(W)	运行时间	用电需求(kWh)	
				每天	每周
家电	1 冰箱	110	——	0.63	4.41
	2 洗衣机	2050	一个运行周期	0.30	2.10
	3 干衣机	1650	一个运行周期	0.90	6.30
	4 洗碗机	2400	——	0.74	5.18
	5 电磁炉	3600	90min	2.00	14.00
	6 吸油烟机	150	90min	0.23	1.58
	7 投影仪	100	2h	0.20	1.40
	8 电视	50	6h	0.30	2.10
	9 电脑	45*2	5h	0.45	3.15
	10 电饭煲	825	40min	0.55	3.85
	11 除湿机	280*2	大同8月份	0.84	5.88
暖通空调	12 空调系统	3500	大同8月份	1.50	10.50
	13 PCM 系统	90	大同8月份	1.08	7.60
	14 新风系统	70	大同8月份	0.56	4.00
	15 低压喷雾系统	90	大同8月份	0.54	3.78
	16 浴室风扇	12	2h	0.03	0.48
自动化系统	17 智能控制系统	120	24h	2.88	20.16
灯光	18 日常	286	4h	0.85	4.25
	聚会日	450	4h	1.80	3.60
总能耗(kWh)	平均日消耗			16.38	
	平均周消耗			104.32	
	平均年消耗			5978.7	

表 3-2 是根据人们日常生活的用电习惯,结合建筑设备电气参数,做出的电负荷统计表,其中空调能耗是根据大同的气候数据,结合建筑保温性能,经过 Designbuilder 模拟得出的。由该统计数据可知,建筑日均能耗 16.38Wh, 年均能耗 5978.7 kWh。因此,光伏发电系统的年发电量需大于 5978.7 kWh, 才能使建筑实现能耗平衡。

图 3-5 是 Sunny Inside 用电设备用电情况按月统计图,由该图也可看出,空调和家电是建筑最主要耗能设备,其中,空调能耗随季节变化而变化,1月和7月,分别由于采暖和制冷要求,分别达到两个耗能高峰;而家电的使用基本不随季节变化,每月能耗基本相同。

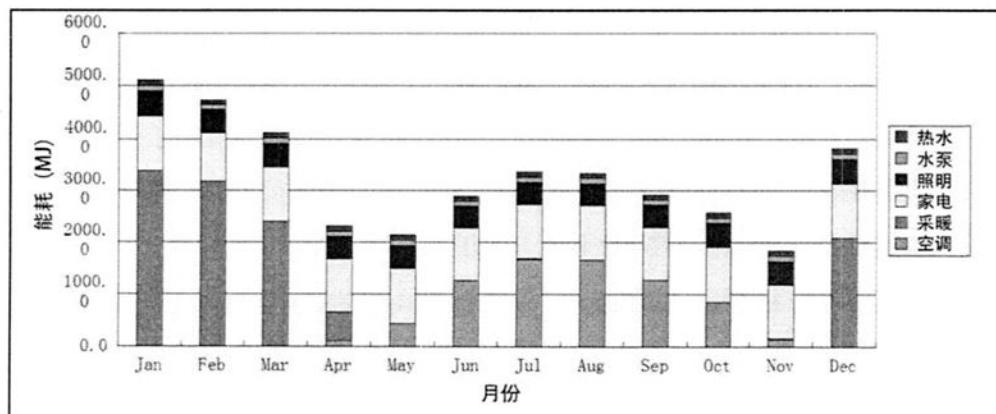


图 3-5 电负荷统计

3.3.3 主要设备选型

(1) 光伏组件选型

表 3-3 是目前市场上常见的几种组件性能对比，由该表可知，单晶硅、多晶硅组件制造技术成熟、性能稳定好、使用寿命长、光电转化效率较高，在大型并网光伏电站等项目中被广泛使用；非晶硅薄膜光伏组件稳定性较差、光电转化效率较低、使用寿命较短，但有良好的弱光发电能力和温度特性。

表 3-3 各类太阳能电池特点对比^[40]

电池种类	电池类型	商用效率	实验室效率	使用寿命	特点	应用情况
晶硅电池	单晶硅	14~17%	24.7%	25 年	技术成熟 效率高	发电站、独立电源、民用消费品
	多晶硅	13~15%	20.3%	25 年	技术成熟 效率高	发电站、独立电源、民用消费品
薄膜电池	非晶硅	6~8%	13%	25 年	成本较低 弱光性好	发电站、民用消费品
	碲化镉	9~11%	16.5%	25 年	成本较低 弱光性好	民用消费品
	铜铟镓硒	9~11%	19.5%	20 年	成本较低 弱光性好	独立电源、民用消费品

独立式光伏系统设计时，需考虑连续阴雨天能耗平衡，选用弱光性好的薄膜电池，在阴雨天也可以有较高的光电转换效率，与选用晶硅的独立型系统相比，其系统容量和蓄电池容量都可降低，对降低系统成本有利。而 Sunny Inside 采用光伏并网发电系统，

在太阳辐射强，系统发电功率大于用电功率时，可将多余的电能输送到电网，而连续阴雨天，太阳辐射弱，光伏发电不足以满足负载需求时又从电网取电，系统设计时无需过于关注短时间能耗平衡，而是考量全年能耗平衡。因此，对于 Sunny Inside 光伏并网发电系统，薄膜组件的弱光性好的优势并不能得到发挥。并且小屋屋顶面积有限，若选用光电转化效率较低的薄膜组件，难以实现能耗平衡。

综上所述，本项目选用了晶硅组件，考虑到建筑造型的美观性及建造成本，Sunny Inside 选用了颜色可选、成本较低的多晶硅组件作为光伏发电组件，其型号为 NOVA_CHSM6610M，峰值功率 250 W_p，尺寸 1652×994×40mm，组件效率 15.2%。

（2）逆变器选型

逆变器是并网光伏发电系统的重要组成部分，它的两个重要功能是：（1）将光伏组件产生的直流电转换为交流电，并将电能输送到电网；（2）找到光伏组件最佳输出电流和电压，实现对光伏组件发电的最大功率跟踪。

目前市场上的逆变器按规模可分为集中式逆变器和微型逆变器。集中式逆变器有着较长的发展历史，因此技术上较成熟，市场占有率高；微型逆变器是在近几年才发展起来并走向市场的，相比传统逆变器，技术上还不够成熟，但也有其明显优势。

与传统逆变器相比，微型逆变器的优点主要有：

①可实现对单块组件的最大功率跟踪

传统光伏并网系统都是由多块光伏组件经串并联后再汇总到集中式逆变器直流输入端的，逆变器只能跟踪到直流母线上的最大功率，当光伏阵列接受的日照辐射不均匀，某些组件有局部阴影时，系统无法跟踪到每块电池板的最大功率，整体输出功率会大幅降低，而微型逆变器可实现对单块组件的最大功率跟踪，因此应用在阵列存在阴影的场合优势明显。

②可实现对单块组件的监控

每一个光伏组件配置的微型逆变器，都可实时监控该组件的工作状态，因此，容易快速找到故障组件，同时，实时反馈的直流和交流侧参数，使得对该系统的发电情况进行实验和统计分析变得更加便捷^[41]。

③无高电压

采用集中式逆变器的光伏并网系统，其直流侧电压较高，有几百甚至上千伏，因此，存在一定的危险性，而采用微型逆变器，其直流侧只有几十伏，使用更为安全。

微型逆变器作为诞生的时间短，技术还不够成熟，相比集中式逆变器，存在以下几点不足：

①效率较低

由于技术不够成熟、功率元件和控制元件优化不足，目前市场上的微逆变器的转换效率与集中式逆变器相比相对较低。

②成本较高

每个微型逆变器都需配备其独立的控制芯片、功率器件、通信模块，导致逆变器单位容量成本较高。

③集中控制相对困难

由微型逆变器组成的光伏系统，包含大量的微型逆变器，要对其进行集中控制，变量多，操作困难。

④寿命较短

相比集中式逆变器，微型逆变器寿命较短，可靠性也较低。

Sunny Inside 光伏阵列安装在屋顶，整体规模较小，太阳辐射较均匀，且设计过程中充分考虑到了阴影问题，可保证一年四季组件不被遮挡，因此微型逆变器对单块组件最大功率跟踪的优势在该系统的并没有得到发挥，而微型逆变器效率低、集中控制困难、寿命短、成本高的缺点却会降低系统效率、降低系统可靠性、提高系统造价。

经以上分析可知，微型逆变器虽可实现对单块组件的最大功率跟踪、提高阵列被遮挡时系统效率，但在光照条件良好，无遮挡，规模较小的民用建筑中，并不适用，因此，Sunny Inside 最终选用了集中式逆变器。

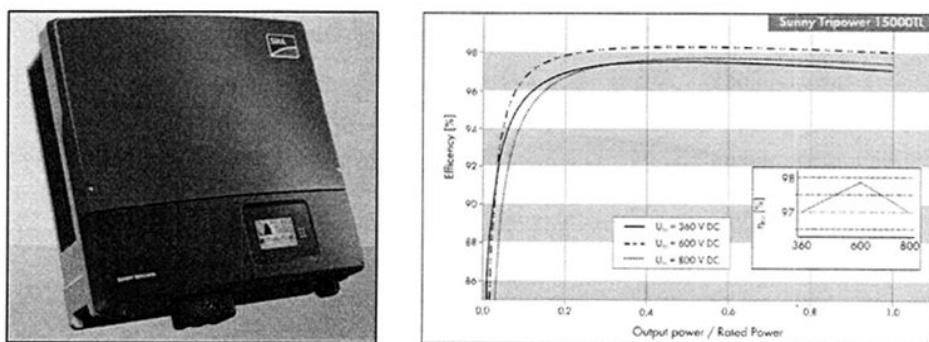


图 3-6 Sunny Tripower 15000TL 逆变器

将小屋能耗数据、历史气象数据、太阳辐射数据、光伏组件数据等代入软件 PVSYST 中，初步估算出可保证 Sunny Inside 全年能耗平衡的系统装机容量为 8kWp，考虑到小

屋屋面安装条件好；提高容量可降低单位容量安装成本；盈余电量可输送到电网，并无电能浪费等因素，最终将系统容量设为 15.25kWp。

根据以上分析和计算结果，选择了 SMA 公司生产 15kWp 的三相光伏并网逆变器 Sunny Tripower 15000TL（图 3-6），其转换效率可达 98.2%，能对两个单独直流回路进行最大功率跟踪(MPPT)，MPPT 范围为 360~800V，内部集成直流断路器和防雷装置，具孤岛检测能力。

3.3.4 倾角计算及组件布置

如上文所述，Sunny Inside 采用了光伏与建筑一体化(BIPV)的设计方案。对于 BIPV 建筑，在进行光伏阵列倾角设计时，要对系统的全年发电量和建筑美观性进行综合考虑，在对系统发电量影响不大的情况下，允许调整倾角，以满足建筑造型要求。

（1）不考虑建筑造型的最佳倾角计算

根据山西大同太阳辐射数据，计算出了 0~90° 范围内不同角度倾斜面一年中接收太阳辐射情况，计算结果经统计后形成图 3-7，由仿真结果可知，是系统全年接收太阳辐射量最大的角度（最佳角度）约为 37°，倾斜角超过 10° 后，倾斜角对全年发电量的影响逐渐变小。

（2）考虑建筑造型及高度后倾角选择

SDC2013 对建筑高度有限制，若采用 37° 倾斜角安装，要保证建筑不超出高度，则室内层高过低，同时，37° 倾斜角安装也使建筑整体造型不美观，经多方面比较与计算，最终选定屋面安装倾角为 12°，采用 12° 安装会使全年发电量有所减少，但在允许范围内，且比赛期间该系统发电量与采用最佳倾角设计的系统基本相同。

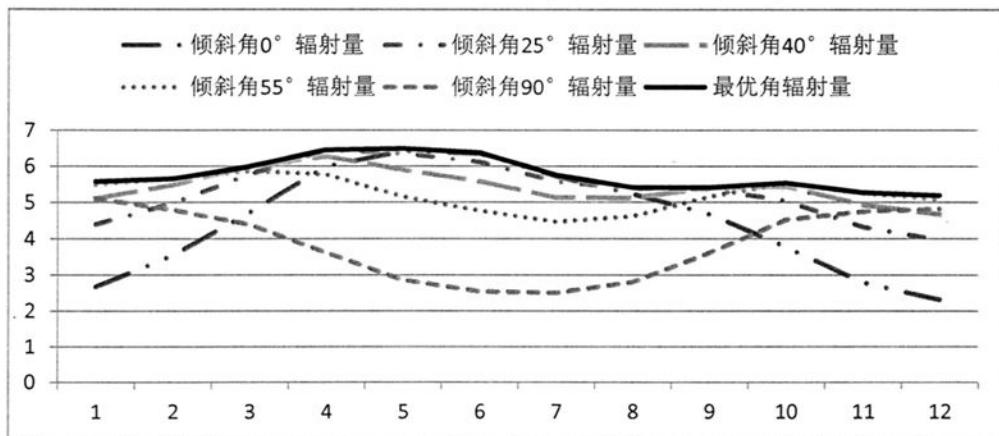


图 3-7 山西大同不同倾角接受太阳光情况

(3) 组件间距设计

对于周围无树木或高楼遮挡的屋顶光伏阵列，阵列中的阴影主要来自于前后排阵列的阴影遮挡及建筑本身对方阵的遮挡。Sunny Inside 屋顶光伏阵列中，中庭前方阵列留下的阴影可能会对中庭后方阵列造成遮挡，如图 3-8 所示，下面将通过计算对其遮挡情况进行分析。

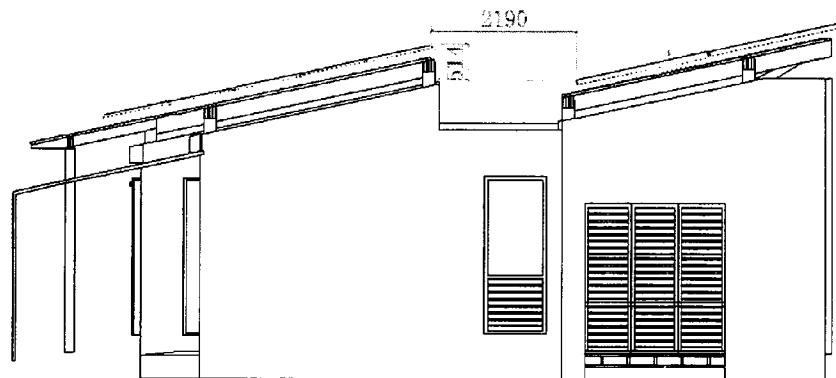


图 3-8 两个光伏阵列的间距

遮挡的确定原则是：冬至日的早上 9:00 至下午 15:00，光伏方阵不应被遮挡。图 3-9 所示为光伏组件方阵前后间距计算参考。

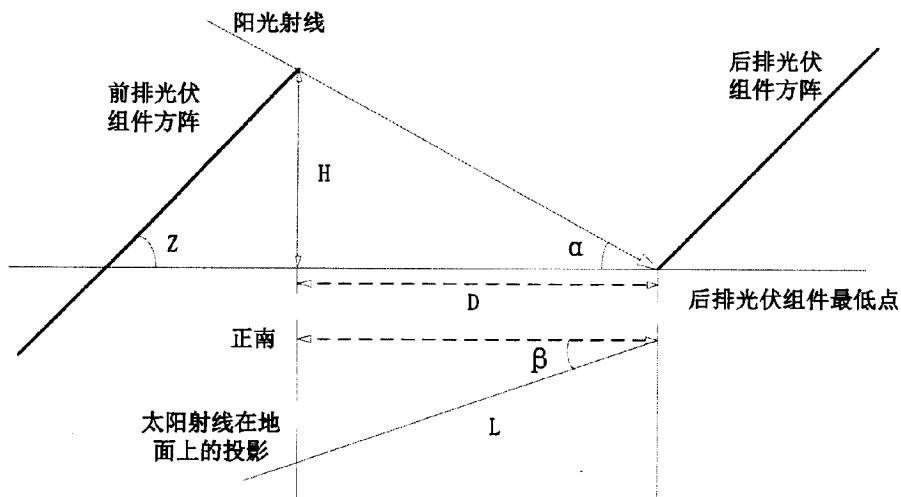


图 3-9 光伏组件方阵前后间距计算参考

可能遮挡物与可能被遮挡方阵的底边最小垂直距离 D 可由下列公式求得：

$$D = L \cos \beta \quad (3-1)$$

$$L = H / \tan \alpha \quad (3-2)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad (3-3)$$

$$\beta = \sin^{-1}(\cos \delta \sin \omega / \cos \alpha) \quad (3-4)$$

D: 可能遮挡物与可能被遮挡方阵的底边垂直距离, 单位 (m);

H: 遮挡物与可能被遮挡组件底边的高度差, 单位 (m);

ϕ : 光伏阵列安装地纬度, 单位 (deg);

δ : 光伏阵列安装地太阳赤纬角, 单位 (deg);

β : 光伏阵列安装地太阳方位角, 单位 (deg);

ω : 光伏阵列安装地时角, 单位 (deg)。

冬至日赤纬角 δ 为 -23.45° , 上午 9:00 的时角 ω 为 45° , 将数值代入式(3-3)和式(3-4)可算出太阳高度角 α 和方位角 β :

$$\alpha = \sin^{-1}(-0.399 \sin \phi + 0.648 \cos \phi) \quad (3-5)$$

$$\beta = \sin^{-1}(0.648 / \cos \alpha) \quad (3-6)$$

求得高度角 α 和方位角 β 后, 即可求得前排阵列的投影长度 L, 通过三角形关系, 计算出最小水平距离 D:

$$D = L \cos \beta = H \cos \beta / \tan \alpha \quad (3-7)$$

根据大同气象数据及建筑尺寸可知:

$$\phi = 40^\circ, \delta = -23.45^\circ, \omega = 45^\circ, H = 0.514\text{m}.$$

将这些数据代入 (3-5) (3-6) 计算出:

$$\alpha = 14^\circ; \beta = 42^\circ$$

将此计算结果代入 (3-7) 式可得:

$$D = 1.53\text{m} \quad (3-8)$$

此结果说明两个阵列只需保持 1.53m 的间距就可避免发生遮挡, 而 Sunny Inside 中两阵列的实际距离是 2.19m, 大于 1.53m, 因此不会发生遮挡。

(4) 散热及安装维修空间设计

Sunny Inside 光伏发电系统采用的是多晶硅组件, 由于多晶硅组件发电效率受温度影响较大, 设计时, 需采用一定的技术手段使组件表面保持较低的温度, 从而使系统保持较高的光电转化效率。本项目采用了背面设置通风夹层的方式对组件进行被动式散热,

在光伏组件与屋面留 800mm 的通风空间，实验证明该设计对组件散热有明显效果。同时，800mm 的间距也使组件的安装、维护、测试更为便捷。

3.3.5 组串设计

(1) 光伏组件串、并联的数量计算

根据组件尺寸、建筑屋顶尺寸，可统计出屋顶可摆放的组件数量为 61 块(图 3-10)，将该数据和组件型号一起输入光伏辅助设计软件 Sunny Design 中，可设计出初步方案：系统含 61 块 250kwp 的 CHSM6610P 多晶硅组件，装机容量 15.25kW；为实现对所有光伏组件的最大功率跟踪，将系统直流侧分成了两个独立回路：回路 A 含 40 块组件，回路 B 含 21 块组件，A,B 两个回路分别接入可实现对两个独立回路进行最大功率跟踪的 SUNNY TRIPOWER 15000TL 三相并网逆变器的 A、B 输入端。

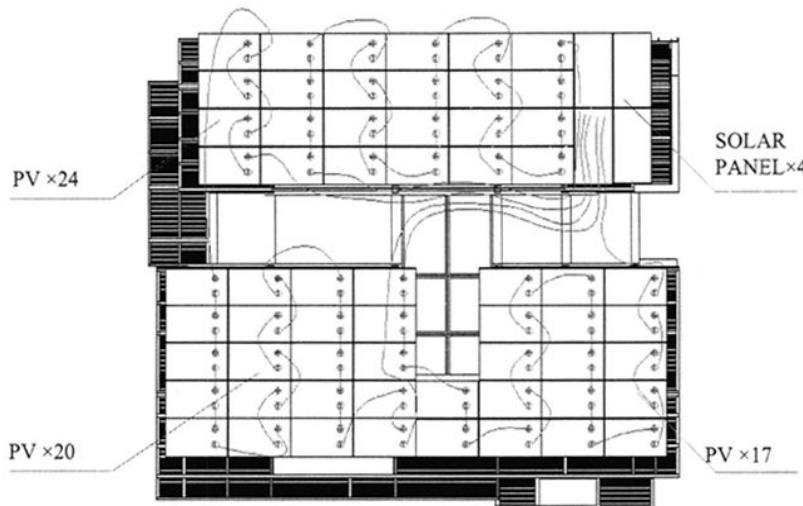


图 3-10 光伏组件布置和接线

下面，将对初步方案进行计算和验证。本项目采用集中式逆变器，组件需经过串、并联后再接入逆变器，光伏组件串联的数由逆变器的最高输入电压和最低工作电压及光伏组件允许的最大系统电压决定；光伏组件并联数由逆变器的额定容量确定，单块光伏组件的峰值电压、开路电压和短路电流可由式 (3-9)、(3-10) 和 (3-11) 算出。

$$V_{mp}(T) = c_V(T - T_{STC}) + V_{mp,STC} \quad (3-9)$$

$$V_{oc}(T) = c_V(T - T_{STC}) + V_{oc,STC} \quad (3-10)$$

$$I_{sc}(T) = c_I(T - T_{STC}) + I_{sc,STC} \quad (3-11)$$

大同历史极端最低温度为 -29.1°C ，极端最高气温 37.7°C ，考虑到光伏组件受光照后的温升，将电池板所处的环境最高温度设为 80°C ，即 $T_{\max} = 352\text{K}$ ，最低温度设为 -30°C ，即 $T_{\min} = 243\text{K}$ ，而 $T_{STC} = 298\text{K}$ ，光伏组件的参数如表 3-4 所示。

表 3-4 组件在地面光伏组件标准测试条件 (STC) 条件下性能参数^[42]

型号	NOVA_CHSM6610M	质量	19.5 kg
尺寸	$1652 \times 994 \times 40\text{mm}$	组件效率	15.2%
峰值功率(Pmpp)	250 Wp	$C_{(P_{mpp})}$	- 0.469%/K
峰值电压 (Vmpp)	30.48 V	$C_{(I_{sc})}$	+0.035%/K
峰值电流 (Impp)	8.23 A	$C_{(I_{mpp})}$	- 0.042%/K
开路电压 (Voc)	38.09 V	$C_{(V_{mpp})}$	- 0.433%/K
短路电流(Isc)	8.64 A	$C_{(V_{oc})}$	- 0.328%/K

将以上参数代入 (3-9)、(3-10) 和 (3-11) 中，可计算出单块组件的最大峰值电压，最小峰值电压，最大开路电压和最大短路电流：

$$V_{mp,\max} = V_{mp}(T = 243\text{K}) = c_V(T - T_{STC}) + V_{mp,STC} = 30.72V$$

$$V_{mp,\min} = V_{mp}(T = 353\text{K}) = c_V(T - T_{STC}) + V_{mp,STC} = 30.24V$$

$$V_{oc,\max} = V_{oc,\max}(T = 243\text{K}) = c_V(T - T_{STC}) + V_{oc,STC} = 38.27V$$

$$I_{sc,\max} = I_{sc}(T = 353\text{K}) = c_I(T - T_{STC}) + I_{sc,STC} = 8.66A$$

组串 A 由 40 块光伏组件 20 串 2 并组成，根据考虑温度影响因素计算出的单块光伏组件最高工作电压 $V_{mp,\max}$ ，最低工作电压 $V_{mp,\min}$ ，最高开路电压 $V_{oc,\max}$ 即最大短路电流 $I_{sc,\max}$ 可计算出组串 A 的最高工作电压：

$$V_{\text{strA.mp},\max} = 20V_{mp,\max} = 614.4V$$

$$V_{\text{strA.mp},\min} = 20V_{mp,\min} = 604.8V$$

$$V_{\text{strA.oc},\max} = 20V_{oc,\max} = 765.4V$$

$$I_{dcA,\max} = 2I_{sc,\max} = 17.32A$$

组串 B 由 21 块光伏组件串联而成，其考虑温度影响因素的最高工作电压、最低工作电压、最高开路电压、最大短路电流的计算如下：

$$V_{\text{strB.mp},\max} = 21V_{mp,\max} = 645.12V$$

$$V_{\text{strB,mp,min}} = 21V_{\text{mp,min}} = 635.04V$$

$$V_{\text{strB,oc,max}} = 21V_{\text{oc,max}} = 803.67V$$

$$I_{\text{dcB,max}} = I_{\text{sc,max}} = 8.66A$$

表 3-5 逆变器性能参数^[43]

型号	Sunny Tripower 15000TL	额定输出功率	15000 W
最高效率	98.2 %	最大直流输入功率	15340 W
输出	3 / N / PE	最大输出电流	24 A
功率因素	1	最高输入电压	1000V
MPPT 电压范围/额定输入电压	360 V ~ 800 V / 600 V		
最小输入电压/初始化电压	150 V / 188 V		
最大输入电流 A 回路/B 回路	33 A / 11 A		

由表 3-5 可知, 逆变器的最大功率跟踪电压范围是 $360 V \sim 800 V$, 最佳工作电压为 $600 V$, 直流输入端 A、B 允许最大回路电流分别为 $33 A$ 和 $11 A$, 由组串计算结果可知, 组串的输出电压范围是 $604.8V \sim 645.12V$, 刚好在逆变器的最佳工作电压值附近, 而 A 回路的最大短路电流为 $17.32A < 33A$, B 回路的最大短路电流为 $8.66A < 11A$, 最大开路电压为 $803.67V < 1000V$, 因此本组串设计方案是合理的。

(2) 电气设计

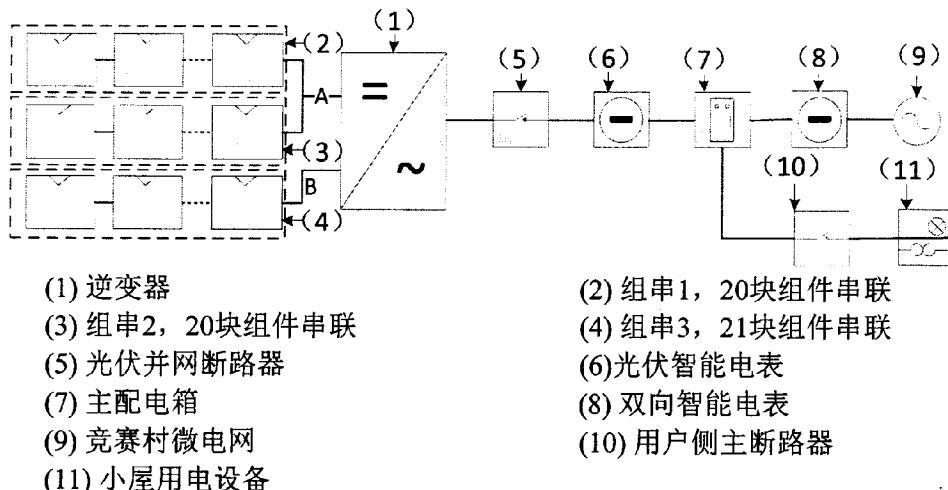


图 3-11 光伏发电系统电气系统

将上文分析计算结果结合第二章的光伏发电系统总体结构, 可得出

图 3-11 所示的光伏发电系统电气系统图: 由 40 块组件组成的直流回路 A, 和由 21

块组件组成的直流回路 B, 分别接入 SUNNY TRIPOWER 15000TL 三相并网逆变器的 A、B 输入端, 经逆变器转换成交流电经过光伏并网断路器和光伏电表, 最后在主配电柜实现并网。

3.4 能耗平衡仿真分析

图 3-12 所示的是小屋全年能耗平衡情况模拟, 从图中可看出, 全年只有 1 月份发电量略低于用电量, 其余时间均实现了负能耗, 光伏发电系统全年发电量为 17202 kWh, 建筑全年用电量为 10875 kWh, 盈余为 6327 kWh, 满足零能耗设计要求。

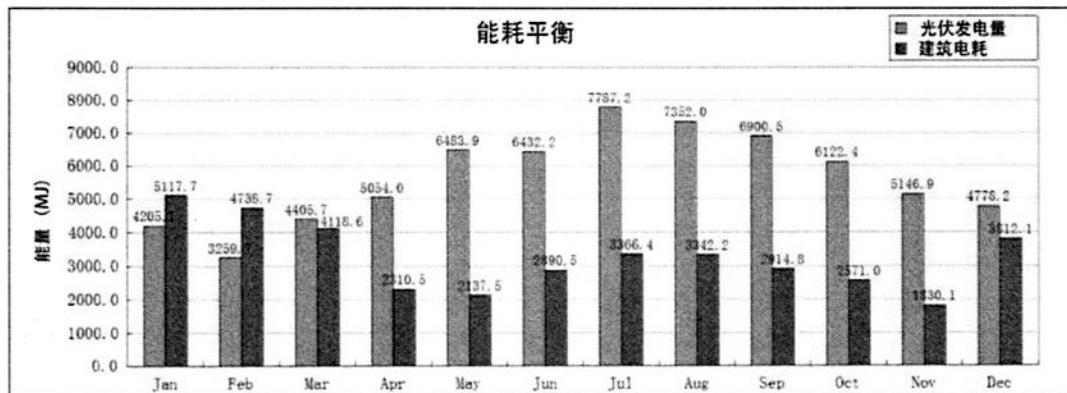


图 3-12 全年能耗平衡模拟

3.5 本章小结

本章首先分析光伏发电系统设计要求, 明确设计目标。根据设计目标, 结合 Sunny Inside 建筑外型, 进行了光伏组件安装方式探讨, 确定了采用光伏与建筑一体化的安装方式, 并对系统总体结构进行了设计; 其次依据参赛地点山西大同气象数据, 结合建筑结构, 进行了气象数据分析、电负荷分析与仿真、逆变器和组件选型、阵列安装倾角确定, 并经过计算, 确定了阵列的无遮挡距离及组件的串并联数量关系, 得出光伏系统设计方案; 最后采用光伏模拟软件 PVSYST 对小屋发电量进行模拟, 将该数据与小屋能耗数据进行综合分析, 确定该方案可实现小屋能耗平衡。

第四章 能耗监测系统设计

能耗监测系统将能源可视化，有助于用户了解能源流向、提高节能意识并制定合理节能计划，从而实现建筑节能。由第二章可知，Sunny Inside 的能耗监测系统需对小屋的主要回路能耗进行实时采集、统一管理、统计分析及可视化呈现，同时，还要与智能控制系统实现数据共享。本章构建包括设备层、信息层和控制层的三层网络结构实现小屋对能耗监测系统的功能需求。

4.1 系统需求分析

(1) 能耗数据实时采集

能耗监控的第一步也是最重要的一步就是数据实时采集，本项目需采集光伏系统、用户侧、空调系统、照明系统、主要家电、控制系统的实时能耗数据，并及时的传递给用户和自动系统。

(2) 能耗统一集成管理

Sunny Inside 存在多个能耗监测子系统，能耗监测系统需将这些分散的子系统进行集成、数据分类汇总，构建一个能耗数据统一管理平台，以便于用户小屋对能耗数据进行统一管理和综合节能分析。

(3) 能耗统计分析

对采集的能耗数据进行存储、统计、分析、计算，并将统计和计算的结果以图表的形式展示给用户，用户通过这些客观统计数据和图表，分析各用电设备的能源利用效率及其节能潜力。

(4) 能耗数据共享

将能耗监测系统的能耗数据与智能控制系统的环境参数数据进行统一存储，实现两个系统间的数据共享。

4.2 系统结构

(1) 电气系统设计

Sunny Inside 配电系统如图 4-1 所示，为实现建筑零能耗，采用了可再生能源太阳能为小屋提供电能，并采用了主动式相变系统、中央空调等一系列的节能设备辅助小屋

节能降耗，因此，配电系统与普通住宅相比复杂许多，为实现对建筑能耗的全面监控，针对设备的功能和工作特点，将配电系统分为了光伏发电、总用电两个主回路及插座、热水、空调、照明和智能系统5个主要用电回路进行能耗监测。

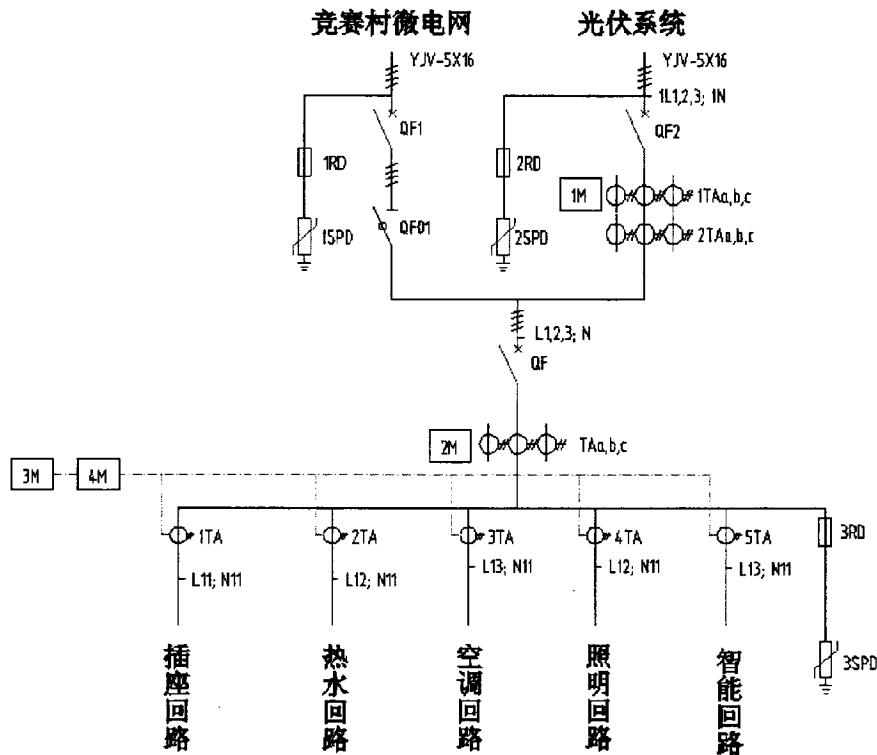


图 4-1 Sunny Inside 配电系统

两个主回路为三相四线制交流电，5个主要用电回路为单相交流电，根据设备电气参数，估算出最大电流，并选择相应的传感器如表 4-1 所示。

表 4-1 能耗测量设备清单

回路	电能测量模块	通讯协议	监控回路	传感器
1	EcoMonitorPro	CC-Link	暖通	EMU-CT50
2			照明	EMU2-CT5
3			热水器	EMU-CT50
4			家电	EMU-CT50
5			智能系统	EMU2-CT5
6	ME 96		光伏发电（三相）	CT100
7	ME 96		总用电（三相）	CT100

(2) 能耗监控系统设计

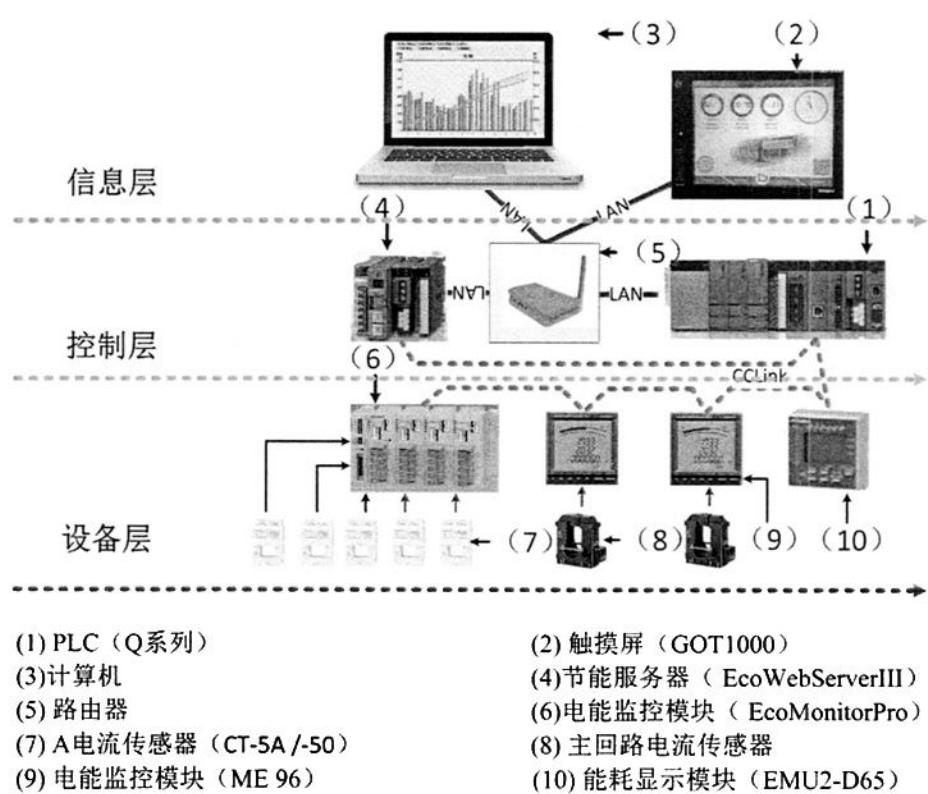


图 4-2 能耗监测系统

根据设计需求,结合监测回路情况,设计了如图 4-2 所示的能耗监控系统,整个系统按其功能和通信方式划分为设备层、控制层和信息层三层。系统工作原理如下:

设备层主要负责现场能耗数据实时采集,主要包括:(1)以电能监控模块(ME96NSR)为核心的光伏发电能耗数据采集,光伏发电系统输出的三相电压电流信号经传感器传递到电能监控模块上,经处理得到的电流、电压、功率、谐波等数据将通过 CC-Link 总线发送给 PLC;(2)以电能监控模块(ME96NSR)为核心的总用电能耗数据采集,其工作原理与第一部分相同,采集到的能耗数据也通过 CC-Link 总线发送给 PLC;(3)以电能监测模块(EcoMonitorPro)为核心的主要回路耗数据采集,插座、热水、空调、照明和智能系统 5 个主要回路电流电压信号传送给电能监测模块,经电能检测模块处理后的数据同样通过 CC-Link 总线发送给 PLC。

控制层主要负责实时能耗数据的分析处理, PLC 通过 CC-Link 接收到现场实时能耗数据后, 进行了以下处理: (1) 实时发电、用电功率数据通过网络 (LAN) 传送给触摸屏; (2) 将设备层发送的所有能耗数据 CC-Link 总线发送给节能服务器 EcoWebServerIII; (3) 将设备能耗数据进行分析处理, 并将相应参数反馈给智能控制系统, 为智能控制提供判断条件。

信息层主要负责能耗数据的统计分析和显示, 主要包括: (1) 触摸屏 (GOT1000) 以友好的人机交互界面, 实时显示由控制层发送的实时功率数据, 便于用户了解实时能耗状况; (2) 节能服务器将从控制层获取的能耗数据数据进行统计分析, 并生成各回路能耗每日图表、每月图表等, 用户可从图表中直观的了解各回路能耗状况, 并制定相应的节能计划。

4.3 系统硬件设计

(1) 电气设计

①光伏发电能耗监测电气设计

光伏发电系统输出的为三相四线制, 为实现对发电功率、电压、电流、谐波等数据的实时监测, 选用了一个智能监测模块 ME96NSR, 其电气接线如图 4-3 所示。P1、P2、P3 为智能监测模块电压信号输入端子, C1, C2, C3 为智能模块电流输入端子。

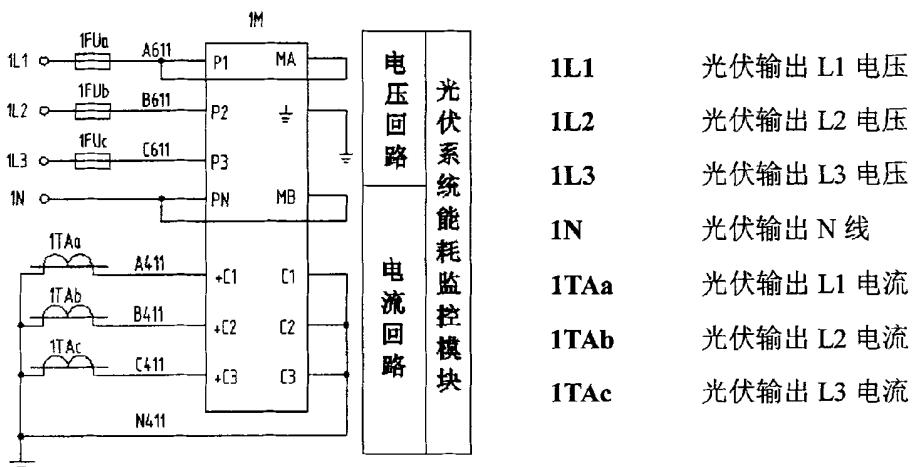


图 4-3 光伏输出能耗监测模块(ME96)电气接线图

②用户侧能耗监测电气设计

用户侧的用电总回路也是采用三相四线制, 同样选用一个 ME96NSR 能耗监测模块

对其进行实时能耗监测，其接线方法和光伏发电监测类似（图 4-4）。

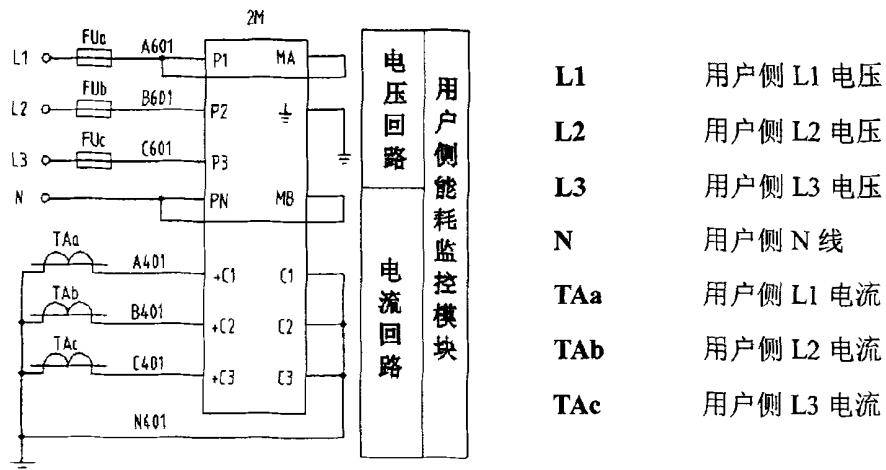
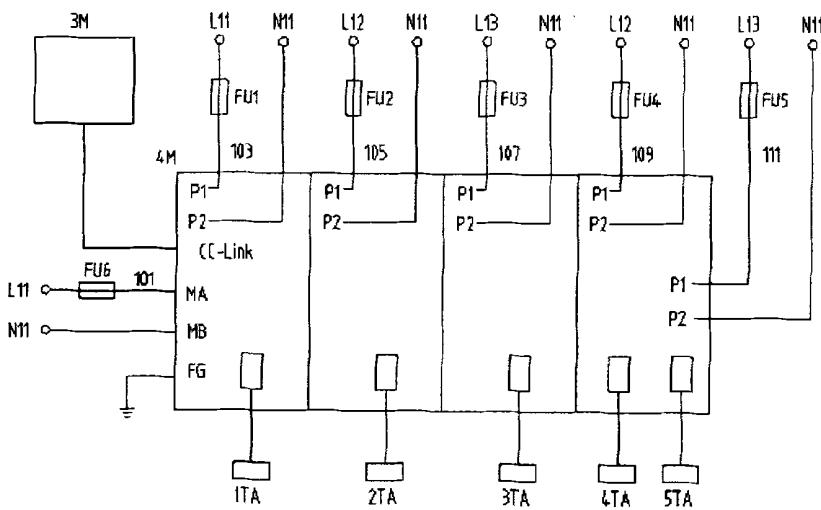


图 4-4 用户侧能耗监测模块(ME96)电气接线图

③主要回路能耗监测电气设计



1TA	插座回路电流	L11(103)	插座回路电压
2TA	热水回路电流	L12(105)	热水回路电压
3TA	空调回路电流	L13(107)	空调回路电压
4TA	照明回路电流	L12(109)	照明回路电压
5TA	智能系统电流	L13(111)	智能回路电压
L11(101)	监控模块电源	N11	零线

图 4-5 用户侧能耗监控模块 (EcoMonitorPro) 电气接线图

为了详细了解各用电设备能耗状况，将 Sunny Inside 的主要用电设备分 5 个回路，并使用 1 个可监测 7 个回路的智能监测模块 EcoMonitorPro 对其进行分别监测（目前只

监测 5 个回路, 剩余两个可用检测回路预留, 以备后续扩充)。其接线方法如图 4-5 所示, P1、P2 为电压信号输入端子、电流输入端则分别与 5 个回路电流传感器 1TA、2TA、3TA、4TA、5TA 相连。3M 为一个智能显示模块, 安装在配电柜面板上, 可现实 5 个回路的实时能耗数据, 给调试带来很大方便。在选择电流传感器时, 选用了三菱可分离式电流传感器, 可避免传统电流传感器安装和拆除工作量大的问题。MA 和 MB 为模块的供电输入端。

(2) CC-Link 网络设计

为实现对 Sunny Inside 能耗数据的实时、准确的采集和传输, 构建了如图 4-6 所示的 CC-Link 网络, 由于能耗采集模块采集到的数据需先发传输给 PLC, 经 PLC 分类存储后, 再将部分数据发送给节能服务器, 系统需要两个 CC-Link 子网络, 才可以实现该功能。本系统的 CC-Link 包含的两个子网络分布为: 以 PLC 的 CC-Link 扩展模块为主站, 以三个现场能耗采集模块为远程设备站能耗采集子网络; 以节能服务器为主站, PLC 上的 CC-Link 扩展模块为本地站的能耗传输子网络。

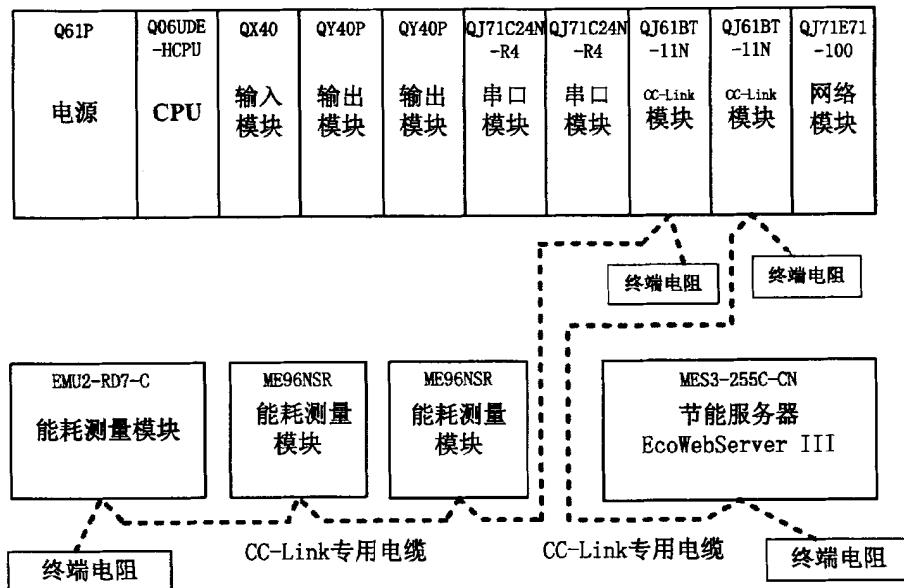


图 4-6 能耗监测系统中的 CC-Link 网络

(3) 系统接线

CC-Link 的主站、本地站、远程设备站间采用 CC-Link 专用电缆串接, 由于 CC-Link 底层基于 RS-485, 其连接方式与 RS-485 较相似, 具体接线方式如图 4-7 所示, 为了消除在通信电缆中的信号反射, 还需在 CC-Link 网络两端加终端电阻, 本项目选用的是普

通 CC-Link 专用电缆，在两端加的终端电阻应为 110Ω $1/2W$ 。

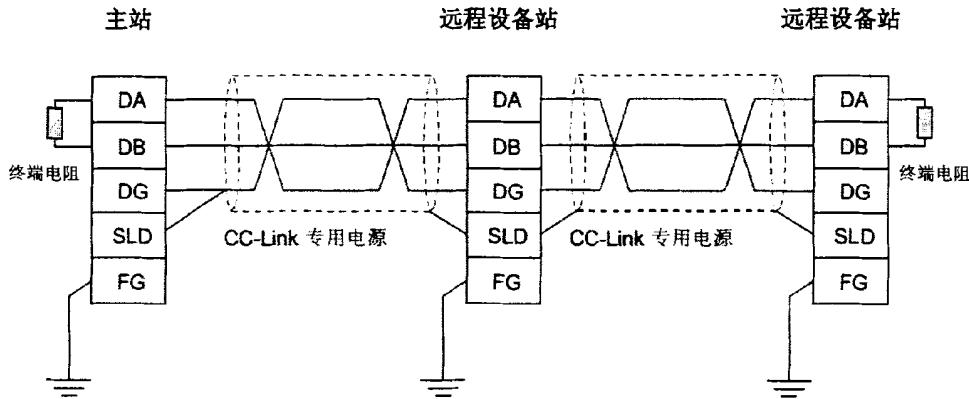


图 4-7 CC-Link 线路连接方式

(4) 模块设置

对 CC-Link 网络配置和编程前，首先要对各个站点的站号进行设置，由 2.2.3 介绍可知，一个 CC-Link 网络必须存在一个主站，站号固定为 0，其余站号可按系统配置规则，进行设置。CC-Link 站号设置时通过该模块上的拨码开关实现的，Sunny Inside 能耗监控系统的 CC-Link 站号配置如下：

① 能耗采集 CC-Link 网络站号设置

PLC 上的 CC-Link 扩展模块作为主站，将其站号设置为 0，光伏发电回路电能监测模块 ME96NSR、总用电回路电能监测模块 ME96NSR，及 5 个主要回路电能监测模块 EMU2-RD7-C 上的 CC-Link 通信模块作为远程设备站，由于这些远程设备站占用的站号都是一个，因此，将三个模块站号分别设置为 1、2、3，如表 4-2 所示。

表 4-2 PLC 上的 CC-Link 扩展模块作为主站的站号设置

设备名称	QJ61BT11N	ME96NSR	ME96NSR	EMU2-RD7-C
站号	0	1	2	3

② 能耗传输 CC-Link 网络站号设置

节能服务器 MES3-255C-CN 作为主站，站号必须设定为 0，PLC 上的 CC-Link 扩展模块 QJ61BT11N 作为本地站，本方案中将其站号设置为 1，如表 4-3 所示。

表 4-3 PLC 上的 CC-Link 扩展模块作为本地站的站号设置

设备名称	MES3-255C-CN	QJ61BT11N
设备名称	0	1

③ 传送速率设置

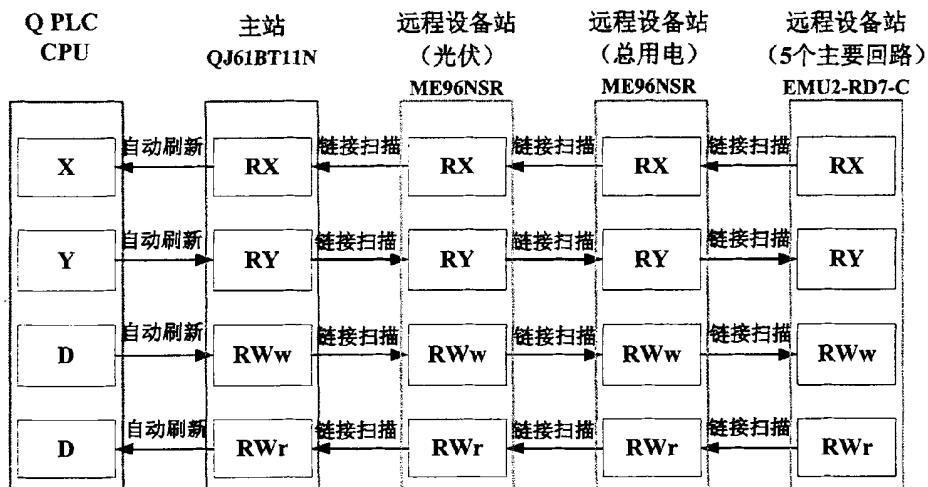
对于 CC-Link 网络而言，通信速率越高，传输距离越短，通信准确率越差，因此，设置通信速率并不是越快越好，而是要根据具体使用情况确定，Sunny Inside 为民用建筑，对系统的可靠性要求较高，而实时性可以相对低些。因此，将 CC-Link 网络通信速率设置为 156kbps，即进行系统设置时，将 CC-Link 网络上的所有站点通信速率拨码开关都拨到 156kbps 档（传输速率/模式设置快关“0”）。

4.4 系统通信设计

4.4.1 能耗采集 CC-Link 网络通信设计

（1）数据刷新方案设计

CC-Link 有测试传输、循环传输和瞬时传输 3 种传输类型，PLC 与能耗检测设备的 CC-Link 通信属于主站与远程设备站的通信，数据刷新可选用循环传输。具体传输流程如图 4-8 所示，主站 QJ61BT11N 将刷新数据（RY/RWr）发送到所有远程设备站，与此同时轮询远程设备站（光伏）ME96NSR；远程设备站（光伏）ME96NSR 对主站 QJ61BT11N 的轮询做出响应（RX/RWr），同时将响应告知其他远程设备站；然后主站轮询远程设备站（总用电）ME96NSR，远程设备站（总用电）ME96NSR 对轮询做出响应，并将该响应告诉其他远程设备站；以此类推，循环往复。数据刷新可在三菱 PLC 编程环境 GX Developer 下，通过软件设定、站信息设置和顺控程序编写实现。



- SB** 链接特殊继电器，以位为单位的信息，表示主站/本地站的模块运行状态和数据链接状态
- SW** 链接特殊寄存器，以 16 位为单位的信息，表示主站/本地站的模块运行状态和数据链接状态。
- RX** 远程输入，从远程站向主站输入的以位为单位的信息
- RY** 远程输出，从主站向远程站输出的以位为单位的信息
- RWw** 远程寄存器，从主站向远程设备站输出的以 16 位为单位的信息
- RWr** 远程寄存器，从远程设备站向主站输入的以 16 位为单位的信息

图 4-8 PLC 与能耗监测模块的数据刷新

(2) 软件设定

① 网络参数/自动刷新参数设定

在三菱的 PLC 的编程环境 GX Developer 下，对能耗采集 CC-Link 网络的主站模块进行如图 4-9 所示的网络参数/自动刷新参数设定，将模块类型设定为主站，并定义了远程输入 (RX)、远程输出 (RY)、远程寄存器 (RWr)、远程寄存器 (RWw) 进行数据刷新时关联的软元件值。

模块块数	2	块	空白:无设置	<input type="checkbox"/> 在 CC-Link 配置窗口中设置站信息
起始I/O号		1	0090	2 0080
运行设置		运行设置		运行设置
类型	本地站	▼	主站	▼
数据链接类型		▼	主站CPU参数自动起动	▼
模式设置	远程网络(Ver.1模式)	▼	远程网络(Ver.1模式)	▼
总连接台数				3
远程输入(RX)			X1500	X1000
远程输出(RY)			Y1500	Y1000
远程寄存器(RWr)			D1500	D1000
远程寄存器(RWw)			D2500	D2000
Ver.2远程输入(RX)				

图 4-9 网络参数/自动刷新参数设置

② 站信息设置

主站模块网络参数/自动刷新参数设置结束后，还需对从站进行信息设置，能耗采集 CC-Link 网络包含三个远程设备站，每个远程设备站占用的站数都是 1，站信息设置如图 4-10 所示，完成设置后需将参数下载到 Q CPU 中。

台数/站号	站类型	扩屏循环设置	占用站数	远程站点数	保留无效站指定	智能缓冲区指定(字)		
						发送	接收	自动
1/1	远程设备站	1倍设置	占用1站	32点	无设置			
2/2	远程设备站	1倍设置	占用1站	32点	无设置			
3/3	远程设备站	1倍设置	占用1站	32点	无设置			

图 4-10 站信息设置

③远程设备站初始化

远程设备站需先进行初始化操作，所谓初始化，就是在使用模块下，对主站向该模块写入部分数据，对该模块的参数进行设置。本课题采用了顺控程序的方式对远程设备进行初始化，具体编程实现在本章软件设计部分做详细说明。由于主站 PLC 为 Q 系列，也可以选择直接通过设置网络参数的方式自动实现远程设备站初始化。

4.4.2 能耗传输 CC-Link 网络设计

(1) 数据刷新方案设计

在 PLC 与节能服务器间的 CC-Link 的通信中，节能服务器为主站，PLC 的 CC-Link 扩展模块为本地站，本项目选用循环传输。具体传输流程如图 4-11 所示。数据刷新可在三菱 PLC 编程环境 GX Developer 下，通过软件设定、站信息设置和顺控程序编写实现。



图 4-11 PLC 与节能服务器的数字刷新

PLC 与节能服务器通过 CC-Link 总线通信时，节能服务器为主站，PLC 为本地站。建立连接的具体过程如下：

(2) 本地站网络参数/自动刷新参数

三菱的 PLC 的编程环境 GX Developer 下, 对能耗传输 CC-Link 网络的本地站模块进行如图 4- 9 所示的网络参数/自动刷新参数设定, 将模块类型定义为本地站, 并定义了远程输入 (RX)、远程输出 (RY)、远程寄存器 (RWr)、远程寄存器 (RWw) 进行数据刷新时关联的软元件值。

(3) 设备初始化

本 CC-Link 网络的主站是节能服务器, 只需在上位机软件的终端登录界面中选择相应的检测设备 (图 4- 12), 并做相应的设置, 即可实现通信。



图 4- 12 终端登录设置

4.4.3 以太网参数设置

(1) 触摸屏和 Q PLC 通信

触摸屏与 Q PLC 与通过本地局域网建立连接后, 只需在 PLC 的编程软件 GX Developer 及触摸屏编程软件 GT Designer2 上做如图 4- 13 所示的设置, 即可实现通信。

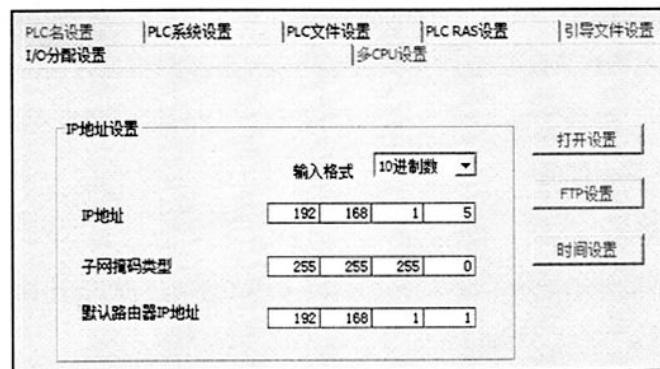


图 4-13 以太网参数设置

(2) 节能服务器通信

节能服务器通信设置非常方便,只需新建项目,并输入其 IP 地址,即可实现与以太网的互联,具体设置界面如图 4-14 所示。

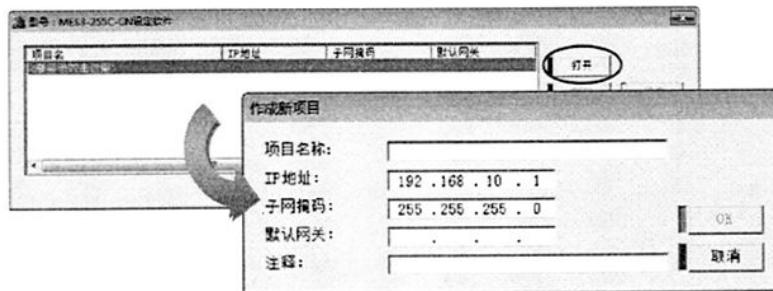


图 4-14 节能服务器设置

4.5 系统软件设计

4.5.1 节能监控系统软件设计

(1) PLC 组态

在进行 PLC 程序编写前,要先对硬件进行组态,本项目中,能耗监测系统和智能控制系统共用一个 PLC,因此扩展模块较多,其硬件组态如图 4-15 所示,其中, QX40 为输入模块, QY40P 为输出模块, QJ71C24N-R4 为 485 通信模块, QJ71E71 为以太网模块, QJ61BT11N 为 CC-Link 模块。

I/O模块、智能功能模块详细设置						
	插槽	类型	型号	错误时输出模式	H/W错误时CPU运行模式	I/O响应时间
0	CPU	CPU		▼	▼	▼
1	0 (0-0)	输入	QX40	▼	▼	10ms ▼
2	1 (0-1)	输出	QY40P	清除 ▼	▼	▼
3	2 (0-2)	输出	QY40P	清除 ▼	▼	▼
4	3 (0-3)	智能	QJ71C24N-R4	清除 ▼	停止 ▼	▼
5	4 (0-4)	智能	QJ71C24N-R4	清除 ▼	停止 ▼	▼
6	5 (0-5)	智能	QJ71E71	清除 ▼	停止 ▼	▼
7	6 (0-6)	智能	QJ61BT11N	清除 ▼	停止 ▼	▼
8	7 (0-7)	智能	QJ61BT11N	清除 ▼	停止 ▼	▼
9	8 (0-8)	空		▼	▼	▼

图 4- 15 硬件组态

(2) PLC 程序组成

节能监控系统的软件组成如图 4- 16 所示,含 1 个主程序 MAIN 和 6 个子程序: MK_III 为无线气象站通信程序; ME96_No2 为光伏发电系统发电能耗监测模块通信程序; ME96_No3 为用电总能耗监测模块通信程序; EcoM_No1 为 5 个主要回路能耗监测模块通信程序; Modbus 为二氧化碳传感器和温湿度传感器通信程序; Air_Cond 为空调网络远程控制程序。这些子程序都采用了 FB 模块形式进行编程。



图 4- 16 节能监控系统 PLC 程序组成

4.5.2 能耗数据实时采集 PLC 程序设计

(1) 软元件分配

在对能耗数据实时采集模块进行 PLC 编程前, 首先根据 ME96 和 ECO-monitor 的 CC-Link 通信说明对软元件进行定义, 本项目软元件分配如图 4-17 所示。

元件初始值 ME96参数				元件初始值 ECO					
	点数	起始	结束		点数	起始	结束	注释	
1	2	D3000	D3001	平均电流	1	2	D2500	D2501	通道1电流
2	2	D3002	D3003	A相电流	2	2	D2502	D2503	通道1电压
3	2	D3004	D3005	B相电流	3	2	D2504	D2505	通道1功率因素
4	2	D3006	D3007	C相电流	4	2	D2506	D2507	通道1功率(有功)
5	2	D3008	D3009	N相电流	5	2	D2508	D2509	通道1功率(无功)
6	2	D3010	D3011	平均相电压	6	2	D2510	D2511	通道1频率
7	2	D3012	D3013	AB相间电压	7	2	D2512	D2513	通道2电流
8	2	D3014	D3015	BC相间电压	8	2	D2514	D2515	通道2电压
9	2	D3016	D3017	AC相间电压	9	2	D2516	D2517	通道2功率因素
10	2	D3018	D3019	平均线电压	10	2	D2518	D2519	通道2功率(有功)
11	2	D3020	D3021	AN线电压	11	2	D2520	D2521	通道2功率(无功)
12	2	D3022	D3023	BN线电压	12	2	D2522	D2523	通道2频率
13	2	D3024	D3025	CN线电压	13	2	D2524	D2525	通道3电流
14	2	D3026	D3027	总功率(有功)	14	2	D2526	D2527	通道3电压
15	2	D3028	D3029	总功率(无功)	15	2	D2528	D2529	通道3功率因素
16	2	D3030	D3031	总功率(视在)	16	2	D2530	D2531	通道3功率(有功)

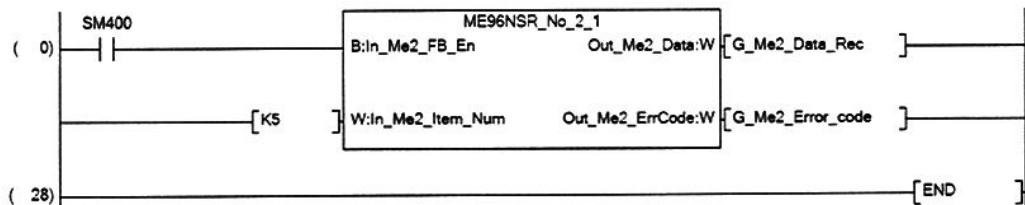
(a) ME96 软元件分配

(b) ECO-monitor 软元件分配

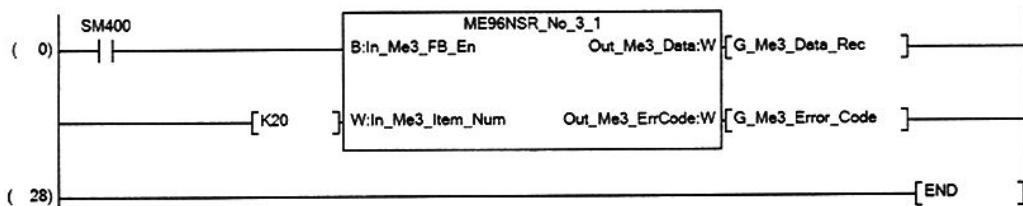
图 4-17 ME96 和 ECO-monitor 软元件分配

(2) 顺序控制设计

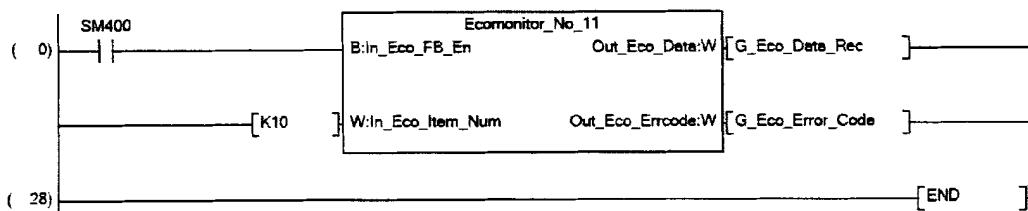
为提高程序开发效率, 较少编程错误, 改善程序质量, 本项目采用了功能块 (FB) 的方式进行编程, 所谓 FB, 是指将中反复使用的梯形图块转换为通用部件, 并在顺序控制程序中使用。三个能耗监测模块能耗采集 FB 程序如图 4-18 所示。具体 FB 程序梯形图见附件。



(a) ME96_No2 能耗采集功能块



(b) ME96_No3 能耗采集功能块



(c) EcoM_No1 能耗采集功能块

图 4-18 ME96 和 ECO-monitor 能耗采集 FB 程序

4.5.3 节能服务器软件开发

EcoWebServerIII节能服务器提供了软件项目管理与开发基础平台，可根据项目需要对节能服务器软件进行定制和开发。根据 Sunny Inside 能耗监控需求，将软件划分为项目管理、系统配置、数据访问和系统维护四个模块，如图 4-19 所示。

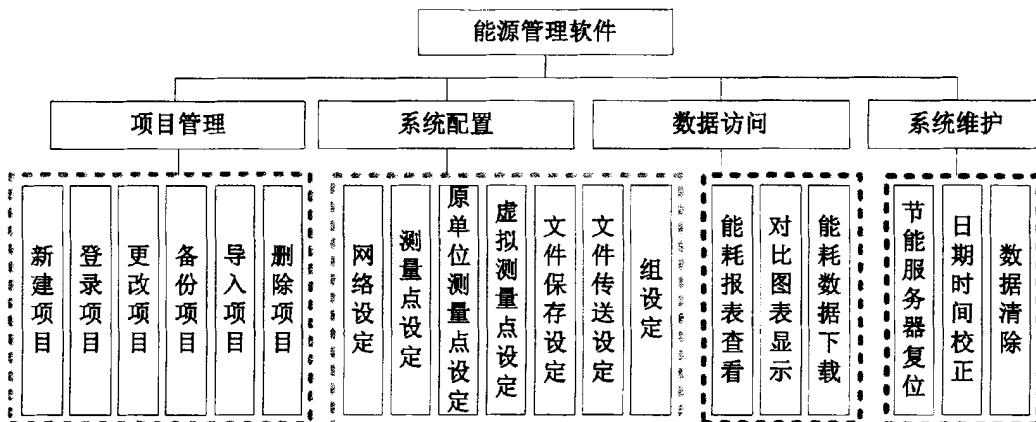


图 4-19 节能服务器软件结构

项目管理模块主要是实现多用户项目管理。该模块的主要功能是：一方面，通过项目 ID、项目名称、项目备注、项目密码等登录信息实现对项目的识别，以实现对项目的新建、登录、更改、备份、导入和删除操作，另一方面，可将项目导入或导出，便于将该项目设置应用于其他项目中。

系统配置模块主要是建立计算机与测量点、虚拟测量点、原单位测量点的链接以及实现文件保存、文件传送、组设定等方面的配置。

数据访问模块是与用户直接交互的界面，该模块主要有三方面功能，(1) 系统通过 Web 的形式将日、月能耗展示给通过计算机网络访问该网页的用户；(2) 按照预设方式，

生成对比图表，便于用于对能耗数据进行对比以制定合理节能措施；（3）将分类存储的能耗数据通过 CSV 格式导出。

系统维护模块主要实现对节能服务器进行的系统复位、时间校正与数据清除。能源管理软件主界面如图 4-20 所示。

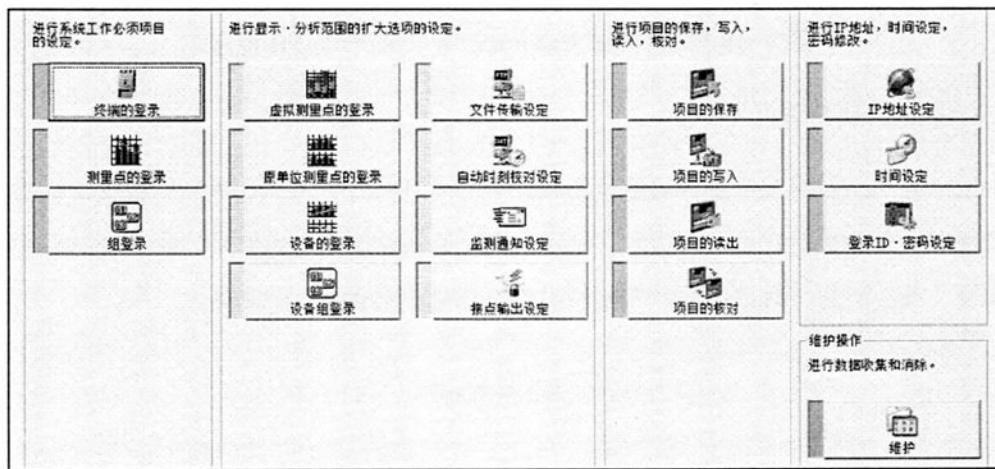


图 4-20 能源管理软件主界面

4.6 本章小结

本章通过 CC-Link 现场总线网络和以太网，将设备层的实时能耗监测模块、控制层的 PLC 和节能服务器以及信息层的远程 PC 和移动终端结合为能耗监测系统，并通过硬件设计、通信设计、系统软件设计，实现系统对现场实施能耗监测设备采集的数据的统一管理、分类存储、实时显示和报表显示；通过共用的 Q PLC，实现了与智能控制系统的数据共享。

第五章 智能控制系统设计

智能控制系统是 Sunny Inside 的控制核心，它需要采集实时环境参数，并以该环境参数及能耗监测系统提供的能耗数据为反馈，运行节能自控程序，实现小屋节能降耗。本章将以三菱 Q PLC 为核心，构建智能控制系统，并给出中央空调、主动式相变、新风、遮阳的控制策略和实现方法。

5.1 系统需求分析

（1）环境参数采集

反馈是自动控制系统的重要组成部分，系统需根据反馈信息，来评估控制效果，并作出相应的调节。Sunny Inside 智能控制系统需实时采集室内各单元的温湿度、CO₂浓度；相变管道出风口温度；室外温湿度、光照强度、风速等。

（2）中央空调开启时间预测

近年来，随着互联网技术的发展，对空调设备可远程控制，在回家前可提前远程打开空调，这样，一到家就可以享受舒适的室内环境了，但人为无法准确判断应提前多长时间开空调，若开启时间过早，则浪费电能，过开启时间过迟，又没达到预期效果，需设计一套自动控制方案，准确预测空调开启时间。

（3）相变储能系统控制

相变材料在相变过程中会吸收或释放大量潜热，可利用相变材料的这一优点，设计主动式相变通风系统，同时，要为该储能系统配备一套自动控制系统，以实现其白天蓄热，夜间蓄冷的功能，辅助空调进行室内气候调节，降低空调能耗。

（4）遮阳控制

合理的控制中庭遮阳，可实现小屋的采光和采暖。智能控制系统需根据气象站采集的室外温湿度、光照数据及室内传感器采集到的温湿度数据，进行综合判断，合理控制遮阳开启关闭时间。

（5）新风系统控制

为保持室内空气清新，需对室内进行定期通风。智能控制系统需根据室内 CO₂浓度值判断室内空气质量，并控制全热交换机和电动风阀联合运行。

（6）人性化人机交互界面

人机交互界面作为 Sunny Inside 用户与智能控制系统交互的直接通道, 应具备美观、易用、人性化的特点。

5.2 系统结构

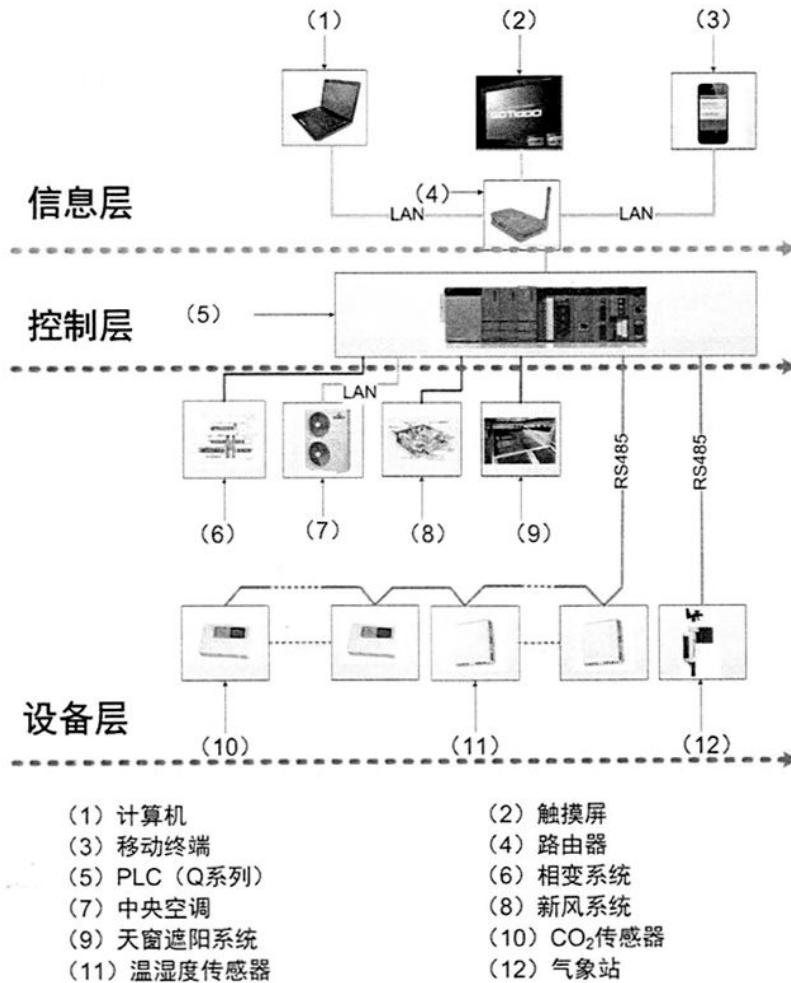


图 5-1 智能控制系统

根据 Sunny Inside 的节能和控制需求, 设计了如图 5-1 所示的智能控制系统, 该系统通过设备层、控制层和信息层的三层结构实现系统设计目标:

(1) 设备层

设备层由传感器和子系统通过 RS485 网络、局域网及 IO 信号线连接而成, 主要负责环境参数的采集及子系统对控制层发送的信号做相应的响应。环境参数采集由分布在卧室、客厅、厨房、中庭及相变管道的温湿度传感器、CO₂ 传感器及室外气象站完成,

采集到的数据通过 485 网络传输数据给控制层；对控制层指令做出响应的子系统包括中央空调、相变系统、新风、遮阳，控制层发送出的控制信号将通过网络、IO 信号线传送到这些执行子系统中。

（2）控制层

控制层由 PLC 及相关扩展接口构成，主要负责环境数据接收、节能算法实现及控制指令发送。环境数据接收由 PLC 的 Modbus 扩展模块通过 485 网络线与设备层的环境数据采集设备通信实现；节能算法由 PLC 根据环境数据、能耗数据，结合编制好的节能控制算法程序实现；控制指令发送由 PLC 的输出模块及网络模块通过对子系统发出 IO 信号或网络信号实现。

（3）信息层

信息层有触摸屏、计算机和移动终端组成，主要负责人机交互及远程控制。信息层通过局域网与控制层的 Q PLC CPU 上的网络接口相连，触摸屏（GOT1000）可通过局域网接收到控制层 PLC 上的实时数据，并进行统计与显示，同时也可通过局域网向控制层 PLC 发送命令，实现对相关设备的控制；触摸屏可通过软件设置为一个远程服务器，计算机和移动终端可通过远程访问触摸屏构建的服务器，实现对小屋设备状态的远程查看及对设备运行的控制。

5.3 节能子系统设计

5.3.1 中央空调设计与开机时间预测控制

（1）中央空调选型

① 空调类型选择

太阳能十项全能竞赛对参赛建筑的室内温湿度有着较严格的要求，根据竞赛规则，在规定的监测时间内，室内温度需控制在 22-25°C，湿度需控制在 60% 以内。空调能耗占建筑能耗很大部分，因此，选用节能空调和采用节能技术调控室内舒适度对建筑节能极其重要，目前市场上广泛运用的有家用单体空调、大型中央空调及多联机家用中央空调。其中，小型家用多联机中央空调诞生时间较短，但由于其技术优势明显，在近些年取得了快速发展。

所谓多联机中央空调，也称一拖多，是指一台室外机通过配管和多台室内机连接，室外机采用风冷形式换热、室内机采用直接蒸发形式换热。与传统的中央空调相比，多联

机中央空调具有体积小、安装方便、系统可靠等优点，更适用于民用住宅；而与单体家用空调相比，多联机中央空调能耗低，且可以网络控制，使用更加灵活便捷，还可通过智能系统控制多联机实现节能^[44]。因此，Sunny Inside 选用了三菱空调一拖三的多联机家用中央空调，并为该中央空调选配了一个网络控制模块，智能控制系统可通过网络，按照节能程序对中央空调进行控制。

②空调容量计算

将上文表 2-2 中的热工参数及其山西到大同气象数据代入 Designbuilder^[45]，可模拟出客厅、餐厅及卧室的冷指标，并依据冷指标，选择容量合适的室内机，计算和选型结果如表 5-1 所示。根据三个室内机容量，最终确定室外机型号为 MXZ-4B80VA。

表 5-1 冷指标计算及室内机选型

	客厅	餐厅	卧室	合计
面积 (m ²)	21	15	11	46
冷指标 (W)	2183	1943	1481	5606
室内机制冷量 (W)	3500	2500	2500	8500
室内机制热量 (W)	4000	3600	3600	11200
室内机型号	MSZ-GE35VA	MSZ-GE25VA	MSZ-GE25VA	

（2）中央空调开机预测控制

在日常生活中，人们到家后开启空调，往往需要相当长一段时间，才能使室内温度达到舒适要求，随着互联网技术的发展，目前比较流行的是空调远程控制，即在回家前的一段时间，通过手机等移动终端或 PC 远程控制空调的开启，这样，回家时就可以立即享受舒适的室内空间了，然而，由于室内外温度不是定值，因此，提前多长时间开启是人为很难判断的，若过早开启，则白白浪费了大量电能，而开启太迟，到家时舒适度还没达到要求^[46]。为了解决这一问题，本文给出了具有自学习功能的中央空调开机预测控制方案，将室内外可能出现的温度值离散化为一个个数据区间，每个室外温度和室内温度组合对应一个提前开机时间数据存储区域，这一系列的室内温度、室外温度组合便组成了及对应的提前开机时间便形成了一个查找表。系统为每个室内温度、室外温度组合分配的提前开机时间默认为 30 分钟，在应用过程中，系统可读取室内温度、室外温度组合所对应的实际开机时间，并将此数据覆盖默认的 30 分钟，即空调可每个室内温度、室外温度组合的开机时间进行自动学习。

5.3.2 主动式相变储能系统控制方案

(1) 相变系统结构

相变系统结构及实物如图 5-2 所示：在客厅吊顶上方安装一根相变风管，该风管内装有用铝箔袋封装的相变材料，外部用保温棉进行包裹，防止其与外界发生热交换，风管内装有相变点温度分别为 19℃ 和 23℃ 的相变材料各 90kg，相变潜热值为 187kJ/kg，风管内配一台风机，并在两端设有 4 个电动风阀，在两个出风口安装了温度传感器，当自动控制系统通过温度传感器反馈的信号判断出风管内相变材料需要热交换时，会自动打开风机与相应的风阀。

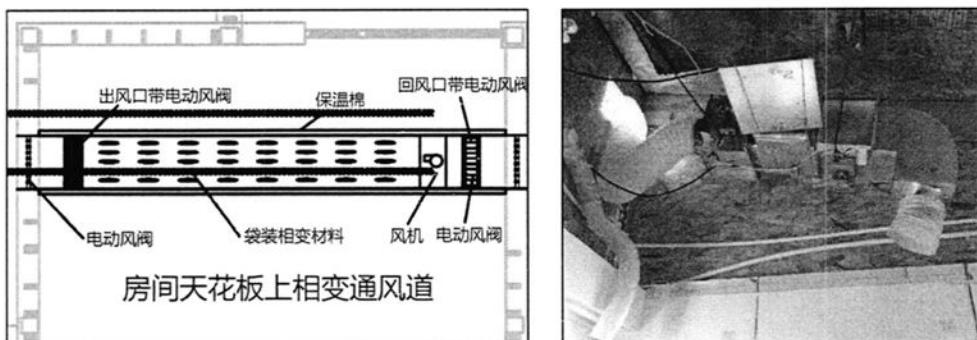


图 5-2 相变系统结构及实物

(2) 相变系统运行模式

Sunny Inside 的相变储能系统有内循环和外循环两种循环模式，通过智能控制系统控制相变系统在合适的时间内轮流运行这两种模式，即可使该系统夜间蓄冷、白天蓄热的功效。

系统的两种运行模式如图 5-3 所示：内循环即开启室内风阀，关闭室外风阀，启动风机，将相变管道存储的热或冷释放，为调节室内气温所用的过程；外循环即关闭室内风阀，开启室外风阀，开启风机，将室外的热或冷存储到相变管道的储能过程。

为系统启动内循环设置了两种工况：(1) 夜间室外温度低于 21℃ 时，启动内循环模式，释放相变材料储存的热量，使室内升温，经过一段时间的循环，相变材料会逐渐由液态变为固态，便将潜热大部分放出，此时，对比室内温度和相变管道出风口温度，若相差小于 0.5℃，则风机停止运行、关闭所有阀门；(2) 白天室外温度高于 26℃ 时，也启动内循环模式，通过热交换，夜间蓄冷的相变材料可以吸走室内的热量，使室内降温，经过一段时间的热交换，相变材料会由固态转变为液态，若室内温度和相变管道出风口

温度相差小于 0.5°C ，说明相变材料已基本融化，可关闭风机和所有阀门。

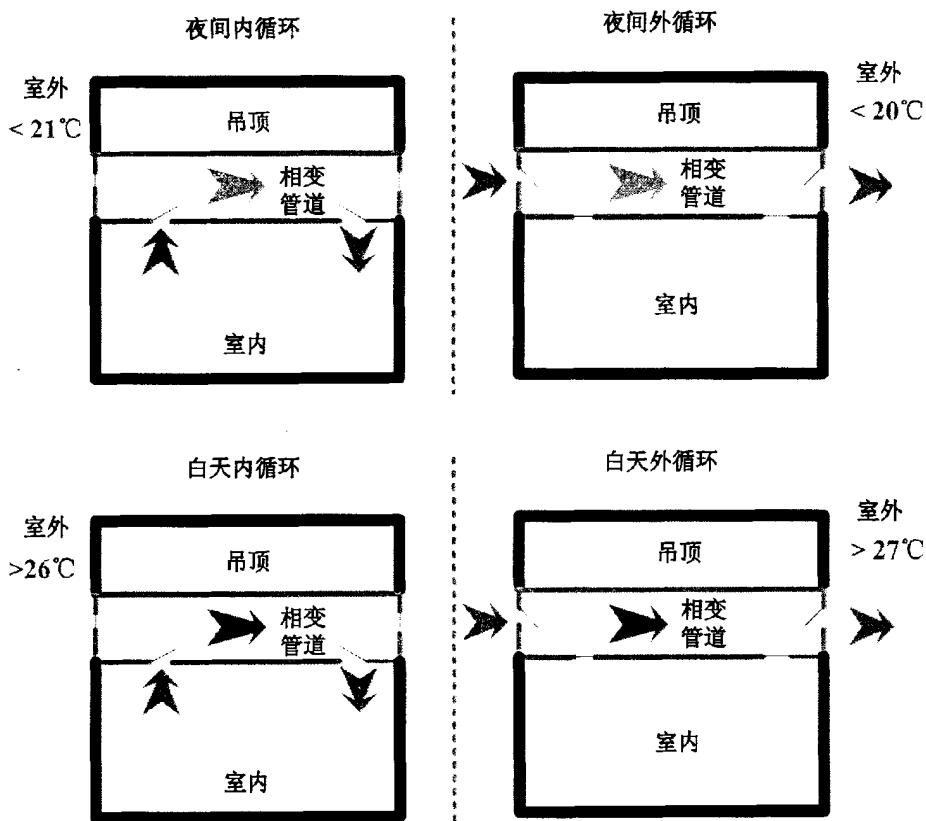


图 5-3 相变系统循环模式

为系统启动外循环设置了两种工况：(1) 夜间室外温度低于 20°C ，启动外循环模式，使相变管道内的相变材料受冷由液态转换为固态，当室外温度与相变管道出风口温度相差 0.5°C ，说明相变系统蓄冷过程已完成，关闭所有阀门及风机；(2) 白天室外温度高于 27°C 时，启动外循环模式，使相变管道内的材料经过热交换从固态变为液态，若室外温度和相变管道出风口温度相差小于 0.5°C ，说明相变系统蓄热过程已完成，关闭所有阀门及风机。以上四种循环的每个循环过程每天最多只运行 1 次，四种循环交替进行。

5.3.3 遮阳系统控制方案

Sunny Inside 中庭 L 型阳光房（图 5-4）有采光和调温功能。通过对外遮阳的合理控制，一方面可将阳光均匀分布到各个室内空间，保证小屋良好的采光，节约照明能源；另一方面，还可以作为能量存储及温差缓冲空间，降低空调能耗。

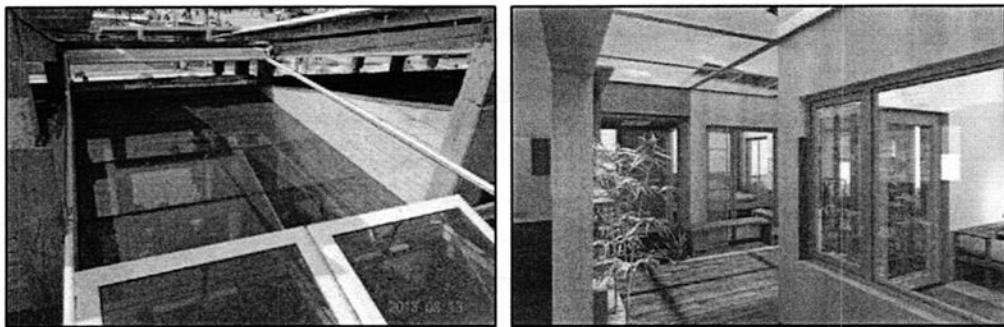


图 5-4 Sunny Inside L 型中庭

为保证室内所有空间的采光良好,首先运用 Ecotect 软件进行了采光分析辅助设计^[47],图 5-5 是 Sunny Inside 的采光模拟结果,由该模拟结果可知,Sunny Inside 的各个房间光线分布都较为均匀,其中,采光系数最低的是卧室的西北角,采光系数为 5.03%,本系统的照度传感器安装在室外,因此,要通过外遮阳自动控制系统,保证室外照度的 5.03% 满足 500lux 的采光要求。

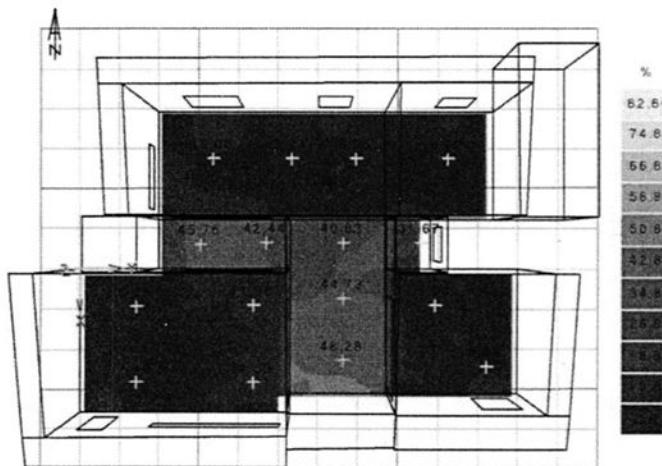


图 5-5 Ecotect 采光模拟结果

5.3.4 新风系统控制方案

(1) 新风设备选型

三菱多联机中央空调只能用于控制室内温湿度,不具备调节室内空气质量的能力,而为了减小空调能耗,不能采用开启门窗通风的方式来保证室内空气清新,因此,需为小屋配置新风系统。热回收风机可对新风进行预热或预冷,在实现室内外空气交换的同时,还能回收部分室内排风的冷量或热量,对建筑节能效果显著^[48]。按照客厅、厨房、卧室的容积,结合日常居住及活动情况,选用了三菱的热回收风机 LGH-15RS4-C 作为

Sunny Inside 的新风系统主机，该热回收风机的详细参数如表 5- 2 所示。

表 5- 2 热回收风机参数

型号：LGH-15RS4-C	风量 150m ³ /h
电源	单相, 220V,50HZ
通风模式	Lossnay 通风
电流 (A)	0.50
输入功率 (W)	103
机外静压 (pa)	75
温度回收效率 (%)	72.5
制冷焓值回收效率 (%)	55.0
制热焓值回收效率 (%)	63.5

(2) 新风系统布置

Sunny Inside 新风系统如图 5-6 所示，全热交换机安装在设备间，其进风和回风管道分别通往客厅、餐厅和卧室，在每个房间的进风和排风口分别设置了电动风阀，每个房间的风阀都可以根据该单元内部的空气质量进行独立控制，PLC 还可依据需提供新风的房间数量设定风速，避免传统新风系统只要一个房间开新风，所有房间都会开新风造成的能源浪费。

CO₂ 浓度是检验室内空气质量的重要指标，Sunny Inside 需要提供新风的三个独立单元都安装了 CO₂ 传感器，用于对新风系统控制效果提供反馈，根据标准可知，室内 CO₂ 浓度应低于 800ppm，即当室内 CO₂ 浓度高于 800ppm 时，新风系统将自动开启。

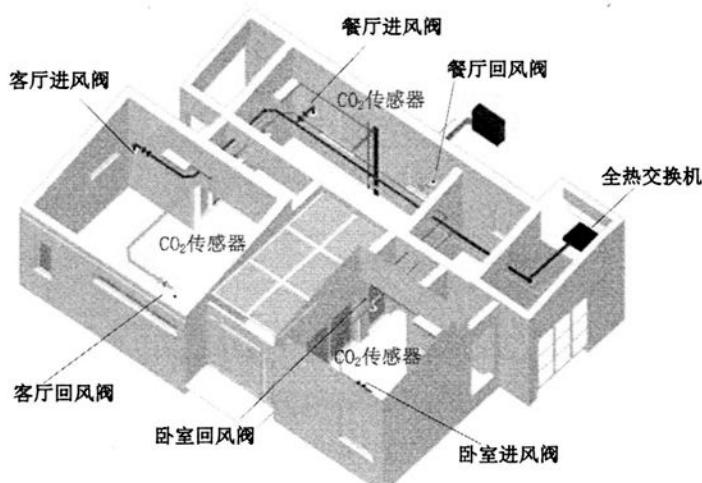


图 5- 6 Sunny Inside 新风系统

5.4 系统硬件设计

5.4.1 环境参数采集

(1) 环境参数采集部分结构

智能控制系统的环境数据采集框图如图 5-7 所示, 由于温湿度及 CO₂ 传感器使用的是 Modbus 标准通信协议, 而气象站使用的是无顺序通信协议, 因此, 环境数据采集分两条 485 总线进行, 第一条总线连接气象站通讯模块 CC-3000, 第二条总线连接所有温湿度及 CO₂ 传感器。这些环境数据采集设备都通过 RS485 用带屏蔽双绞线与 PLC 上的 Modbus 扩展模块 QJ71C24-R4 相连。

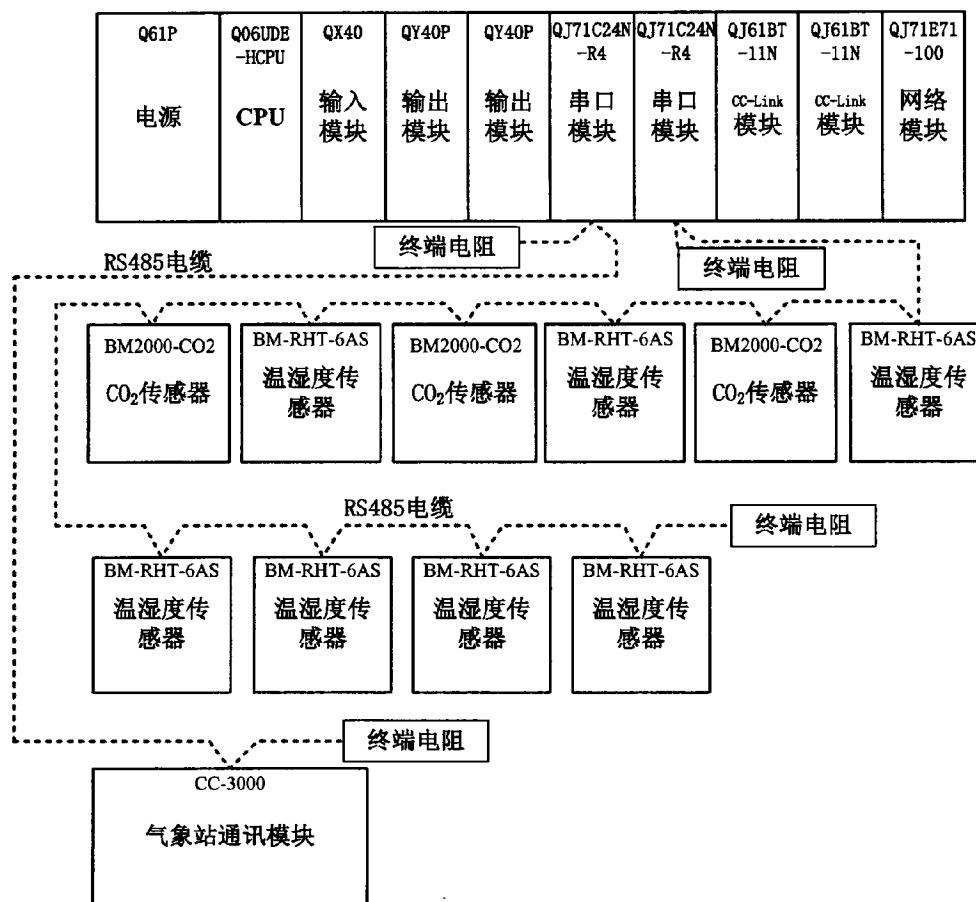


图 5-7 环境数据采集框图

(2) 线路连接

在环境参数采集通信中, Modbus 扩展模块 QJ71C24-R4 为主站, 其余环境参数采

集设备为从站，两条总线采用的都是半双工通信，其连线如图 5-8 所示，为了消除在通信电缆中的信号反射，还需在网络两端加 110Ω $1/2W$ 的终端电阻，同时，为防止信号干扰，屏蔽层必须接地。

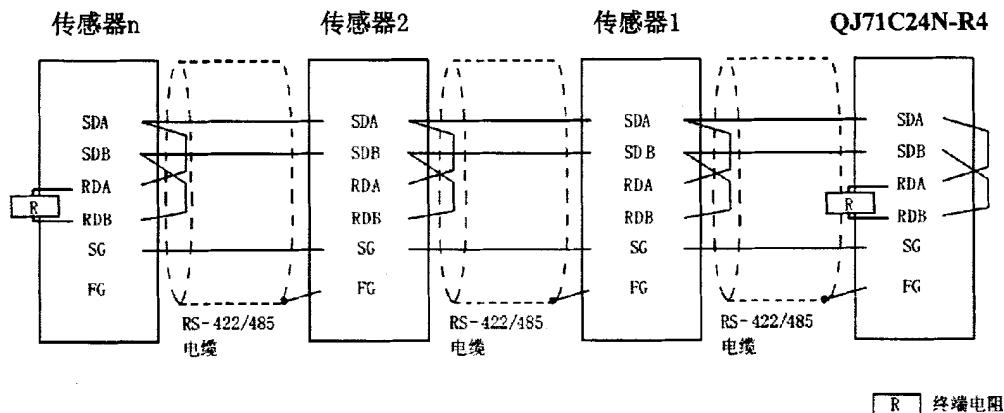


图 5-8 PLC 扩展串口模块和传感器的连线

5.3.2 控制子系统设计

(1) 控制子系统结构

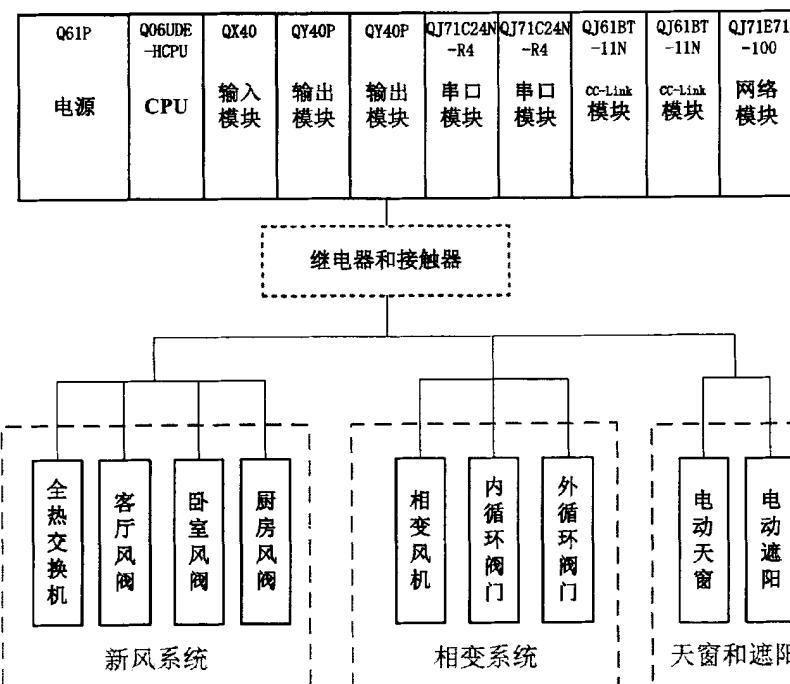


图 5-9 子系统框图

智能控制系统的子系统框图如图 5-9 所示, 包含新风系统、相变系统、遮阳, 智能控制系统通过 PLC 上的输出模块 QY40P 控制继电器和接触器, 间接控制子系统的运行。

(2) 接线方式子系统接线方式如图 5-10 所示, PLC 输出模块 QY40P 与中间继电器线圈相连, 中间继电器输出再与接触器线圈相连, 这样, 就可实现 PLC 输出模块对子系统上交流回路的开断控制。

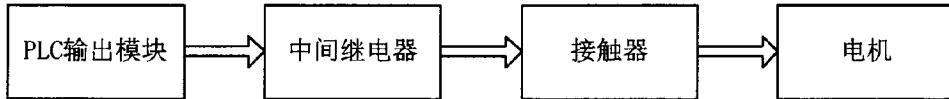


图 5-10 子系统接线方式

5.3.3 中央空调网络控制

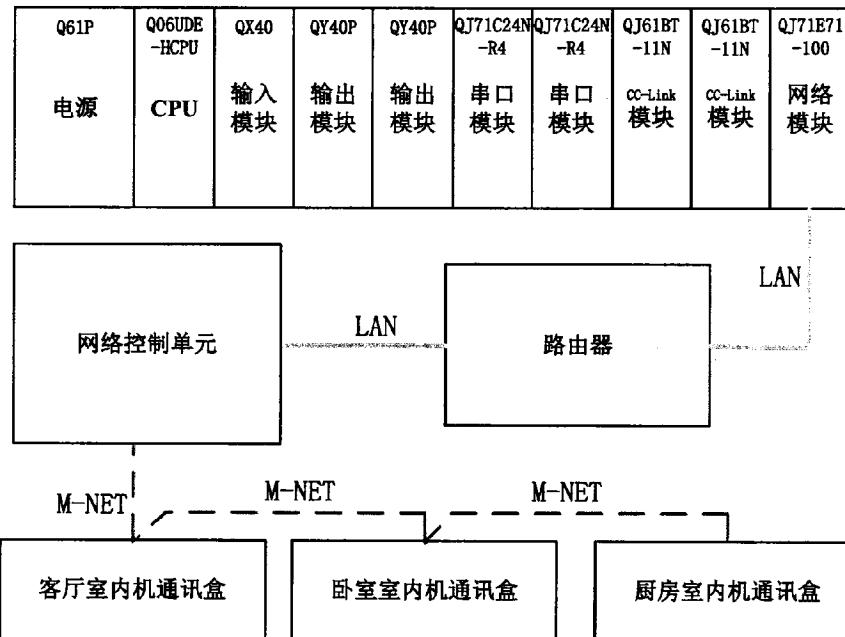


图 5-11 中央空调网络控制框图

Sunny Inside 选用的是三菱多联机, 其网络控制框图如图 5-11 所示, 三个室内机都配有通讯盒, 并通过 M-NET 总线与网络控制单元相连, PLC 网络扩展模块 QJ71E71-100 通过路由器与网络控制单元相连。这样, PLC 通过网络扩展模块即可实现对中央空调及各室内机的控制。

5.5 系统通信设计

5.5.1 环境参数采集通信

(1) 基于标准 Modbus 总线的温湿度计 CO2 数据采集

① QJ71C24-R4 在标准 Modbus 协议下的通信设置

由于温湿度及 CO2 传感器遵循标准 Modbus 协议，采用其中的 04（读取温湿度）和 06 号（设置地址）命令，因此，读取温湿度的通信较为简便，只需对作为主站的串行通信扩展模块 QJ71C24-R4 在 GX Developer 上做软件设置，并编写读取顺控程序，即可完成温湿度及 CO2 数据的读取。

首先进行主站模块开关设置，在本串行通信网络中，主站 QJ71C24-R4 属于智能功能模块，CPU 为其分配的 I/O 为 0030。如图 5-12 所示，在工程栏中找到该模块，并对其参数设定，其中，数据位、奇偶校验位、停止位、波特率依据传感器协议规定进行设置，由于采用的是标准通信协议，在通信协议设置栏中选择“通信协议”，该模块为主站，因此站号设置为 0。

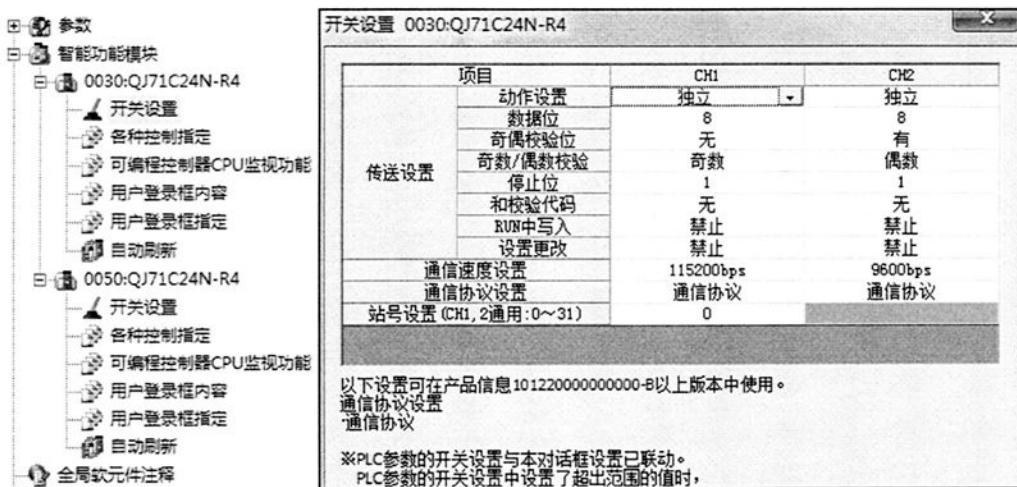


图 5-12 主站开关设置

GX Developer 的智能功能模块工具可实现 QJ71C24-R4 模块进行初始化，减少模块初始化工作量，具体操作方法如图 5-13 所示，在 GX Developer 环境下调用智能功能模块中的串行通信模块协议支持功能软件，添加一个施耐德公司的 Modbus 协议，协议名为 03: RD Holding Register，并对相应的寄存器对应的软元件进行设置。设置后其下载

到 QJ71C24-R4 模块中，即完成了该模块的初始化。

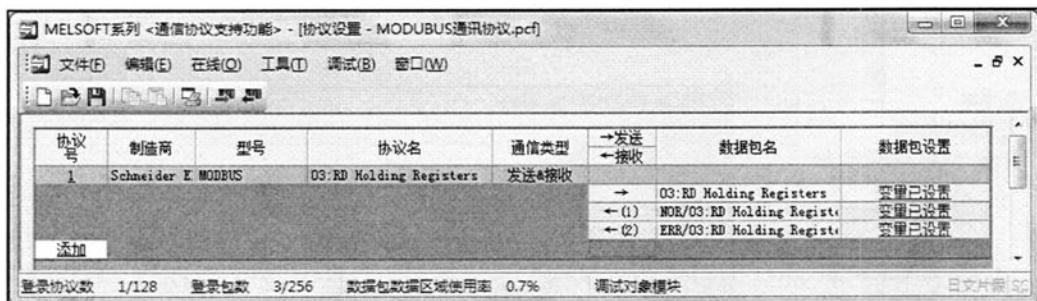


图 5-13 QJ71C24-R4 模块初始化

②顺控程序编写

PLC 需通过顺控程序读取温湿度及 CO2 传感器的数据，为了提高程序开发效率，较少编程错误，改善程序质量，同样采用了 FB 的编程方式，编制完成的顺控程序块如图 5-14 所示。

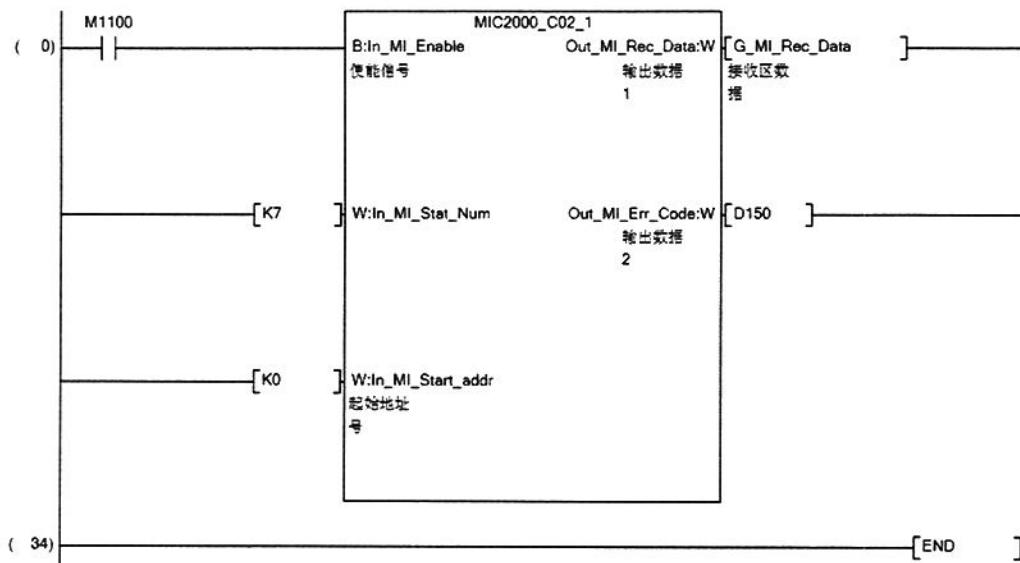


图 5-14 温湿度及 CO2 数据读取顺控程序

(2) 基于无顺序通信协议的气象数据采集

① QJ71C24-R4 在无顺序通信协议下的通信设置

MK-III-LR 无线自动气象站的通信模块 CC-3000 采用基于 RS485 的非标准通信协议

^[49]，要读取该气象站的数据，需采用无顺序协议通信方式。

首先在 GX Developer 环境下对作为主站的串行通信扩展模块 QJ71C24-R4 进行开关设置，具体设置与上文相似，设置结构如图 5-15 所示。

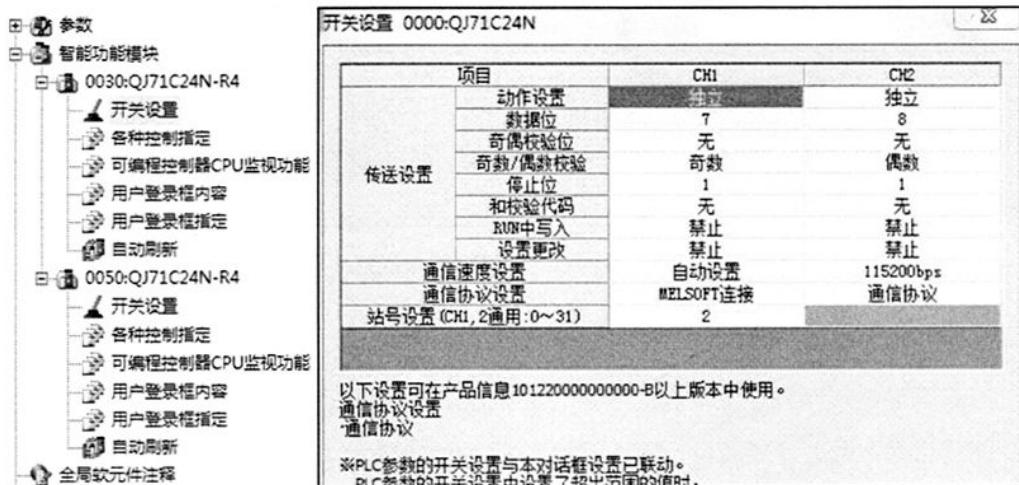


图 5-15 主站开关设置

同样使用 GX Developer 智能功能模块中的串行通信模块协议支持功能软件对主站进行初始化，协议号设置为 10，并同时对帧头、无转换变量、有转换变量、固定数据进行了定义，定义结果如图 5-16 所示，设置结束后，将这些参数下载到 QJ71C24-R4 模块中。

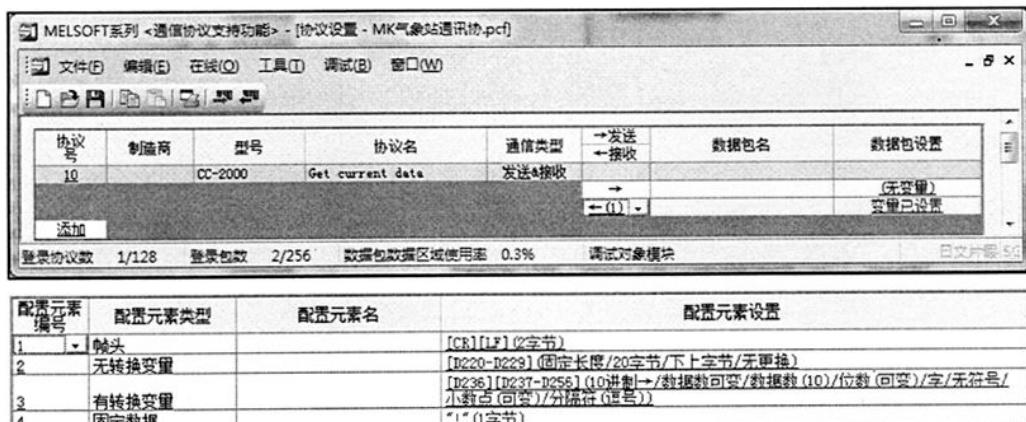


图 5-16 QJ71C24-R4 模块初始化

②顺控程序编写

按照 MK-III-LR 无线自动气象站的通信模块 CC-3000 的通信规约, 采用 FB 功能块的方式, 编制了如图 5-17 所示的无顺序协议顺控程序。

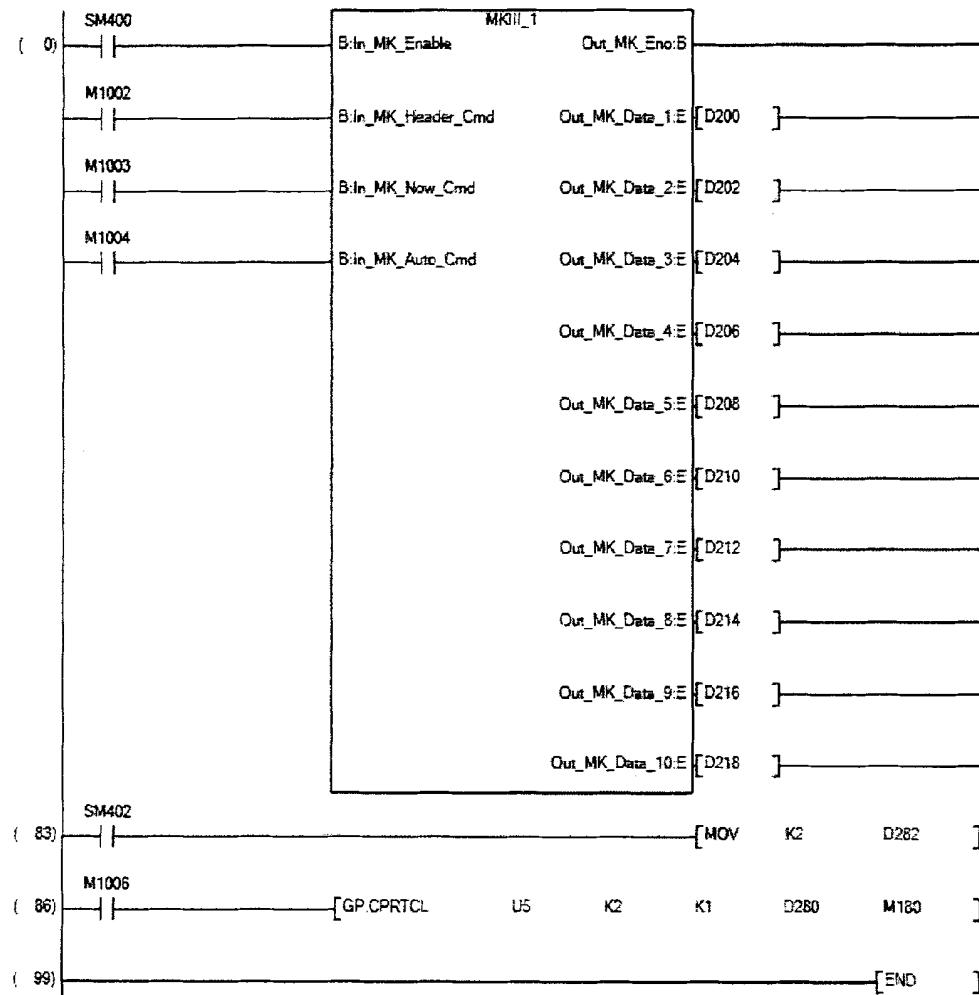


图 5-17 无顺序通信协议顺控程序

5.5.2 空调以太网控制通信

PLC 通过 QJ71E71-100 以太网扩展模块实现对小型多联机中央空调的控制, 在编写控制程序前, 需先对以太网模块进行设定。首先对以太网模块网络参数做如图 5-18 所示的设定, 并在运行设置项中设置好输入格式和 IP 地址。

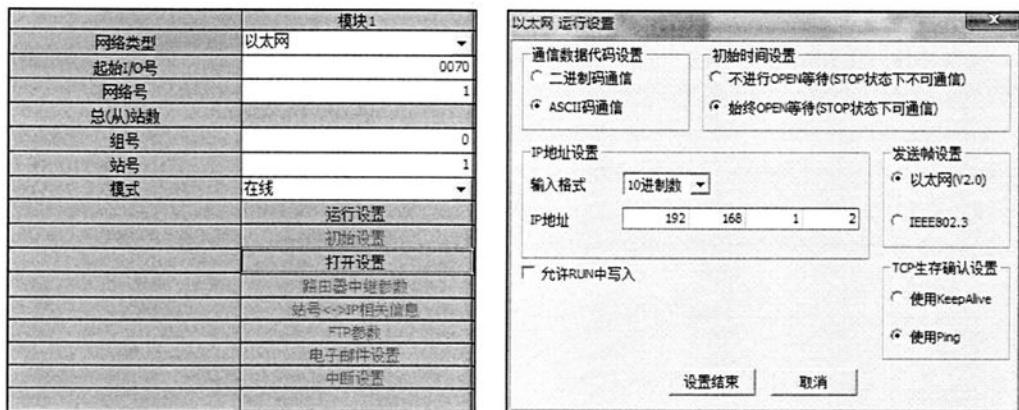


图 5-18 网络参数设置

其次对其进行打开设置，包括设置协议、打开方式、固定缓冲、固定缓冲通信同步、成对开放、生产确认、端口号及通信对象 IP 地址等，具体设置如图 5-19 所示。

	协议	打开方式	固定缓冲	固定缓冲 通信步骤	成对 开放	生存确认	本站 端口号	通信对象 IP地址	通信对象 端口号
1	TCP	Active	接收	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
2	TCP	Active	发送	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
3	TCP	Active	接收	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
4	TCP	Active	发送	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
5	TCP	Active	接收	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
6	TCP	Active	发送	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
7	TCP	Active	接收	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
8	TCP	Active	发送	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
9	TCP	Active	接收	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
10	TCP	Active	发送	无顺序	成对	不确认	49152	192.168.1.3	1026
11									
12									

图 5-19 打开设置

5.6 系统 PLC 主程序设计

主程序的作用是对子程序采集到的数据进行操作，或对子程序及相关 IO 接口发送数据或逻辑命令，上文已详细介绍了各子程序的编写过程，本节将简要介绍主程序的编写，由于主程序步数较多，本文将按控制对象，将主程序分为若干段进行说明。

5.6.1 中央空调的控制

PLC 通过以太网和中央空调控制盒通信，以实现对中央空调的控制，根据中央空调通讯规约，编制了 PLC 通信程序，由于程序太长，在此不做详细介绍，网络通信程序与主程序通过软元件进行数据交换，主程序只要对网络通信程序的软元件赋值，即可通

过通信程序将命令发送至中央空调，从而对中央空调进行控制，软元件分配如表 5-3 所示。

表 5-3 空调网络控制软元件分配

功能	软元件号	值（十进制）	描述
空调号	D4	1	客厅空调
		2	卧室空调
		3	餐厅空调
运行状态	D130	1	OFF 状态
		2	ON 状态
		3	TRUN 状态
运行模式	D131	1	Heat
		2	Cool
		3	Fan
温度设定	D132		设定温度
风速设定	D134	1	High
		2	MID
		4	Low
		9	Auto
初始化	M10	----	初始化以太网
指令执行	M40	---	参数设定执行

有自学习功能的中央空调开机时间预测控制程序框图如图 5-20 所示，用户回家前可通过手机或 PC 远程终端向 PLC 发送预约开机信号，预约开机信号包括到家时间和需开启的单元空调号，空调软元件和对应的控制内容如表 5-3 所示，收到时间和空调号参数后，PLC 首先根据空调号来确定需要提前开启空调的单元，随后读取该单元当前室内和室外温度值，并根据当前温度值所处的温度区间，在查找表中找出存储该温度区域的提前开机时间（编程时，为各个室内机开辟了 600 个数据存储单元，用于存储室内 0~40℃，室外-20~40℃，每个查找区间范围为 2℃的温度组合对应的提前开机时间），查找到与当前室内、室外温度匹配的温度组合后，读取其对应的存储单元提前开机数据，若对应的值是 30（编程时，将所有值都初始化为 30min），说明该温度组合还未经历过自学习，空调将默认提前 30min 开启，并开始计时，在温度达到舒适度要求 22℃或 25℃（达到舒适度要求）时，将此计时数据覆盖存储单元中原有的 30，下次若是再遇到相同的室内室外温度组合，系统便可以按照最优开机时间进行控制；若对应的值不是 30，说明该温度组合已经参加过自学习，则直接调用该最佳开机时间对空调进行预测控制。

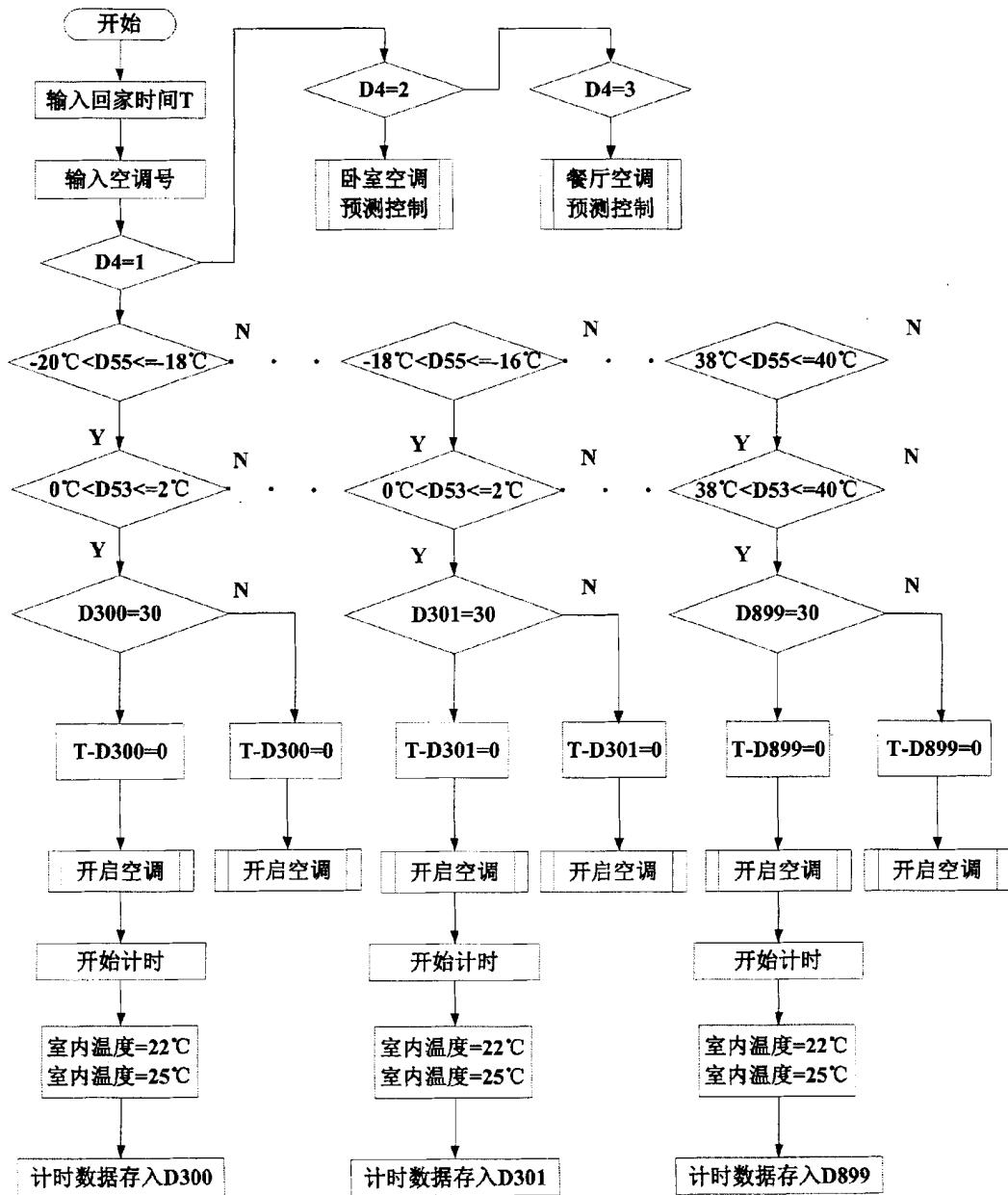


图 5-20 有自学习功能的中央空调开机时间预测控制程序框图

5.6.2 相变储能系统控制

由第二章可知，主动式相变储能系统有内循环风阀、外循环风阀、相变风机 3 个受控对象；室外温度、室内温度、出风口温度、时间、手动/自动切换按钮 5 个输入，以及一个用于控制循环进行的状态标识，在开始编程前，要先对系统 I/O 和软元件进行分配。根据硬件连接，对 3 个受控对象进行 I/O 分配，分配结果如表 5-4 所示。

表 5- 4 I/O 分配表

控制类型	I/O 口	控制类型	I/O 口
内循环阀门	Y18	相变风机	Y17
外循环阀门	Y19		

输入参数软元件分配如表 5- 5 所示，其中时间 D10 为系统默认，状态标识软元件人为定义为 D80，手动/自动切换按钮定义为 X100。

表 5- 5 软元件分配表

变量	软元件	变量	软元件
室外温度	D55	出风口温度	D60
客厅温度	D53	状态标志	D80
手动/自动	X100	时间	D13

系统启动时，由于状态标志位为 0，无法判断应该运行那种模式，应首先对系统进行初始化，根据当前环境对状态标志位赋值，其程序流程如图 5- 21 所示。

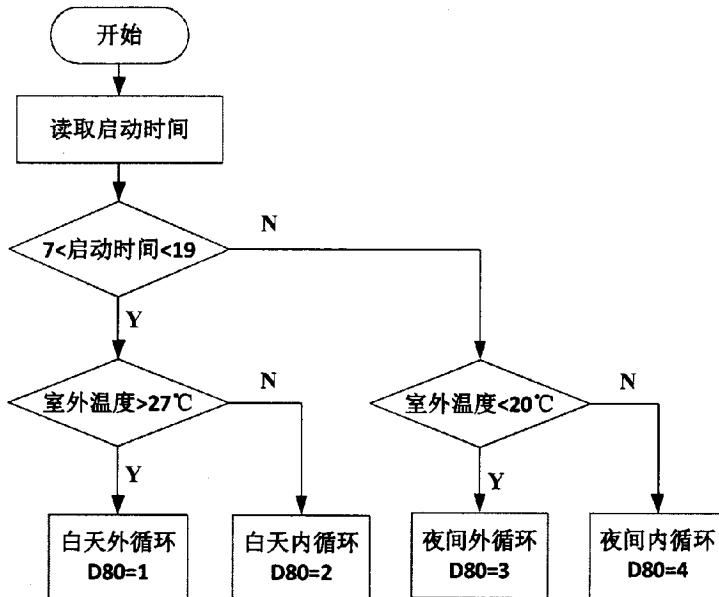


图 5- 21 主动式相变储能自控系统初始化

初始化后，系统将执行如图 5- 22 所示的顺控程序，该顺控程序根据初始化的状态标志选择初始循环类型，随后便按照白天外循环，夜间内循环，夜间外循环，白天内循

环，白天外循环的顺序循环执行顺控程序，直至触摸屏通过手动模式，将标志位 D80 置 0，才关闭该系统，并结束程序。

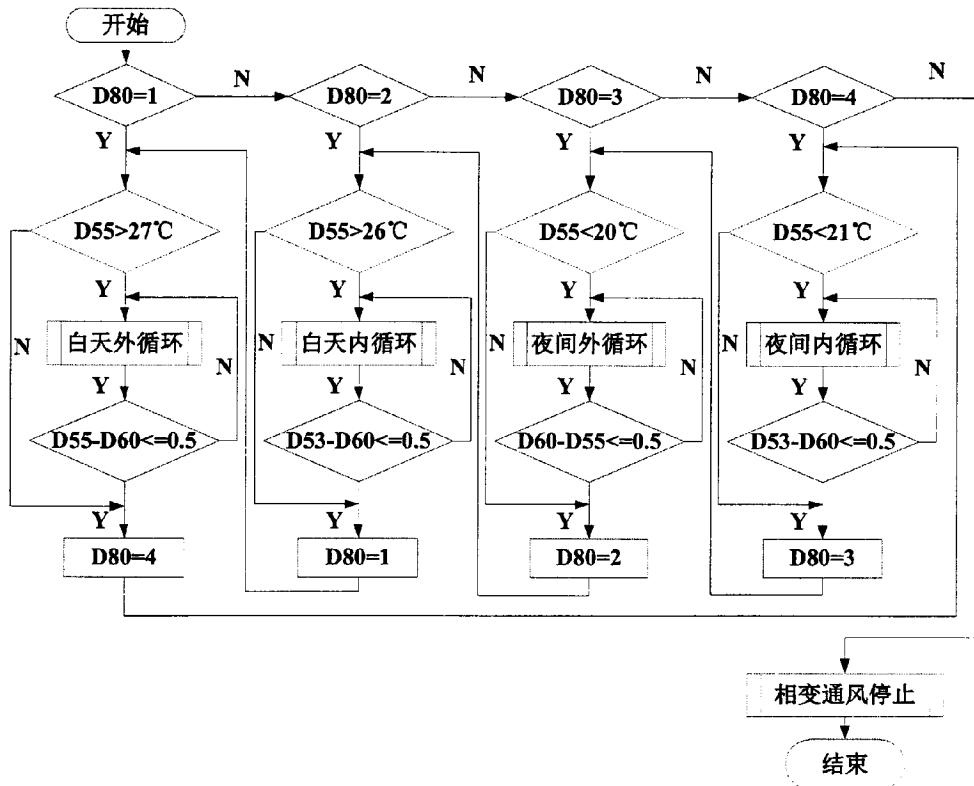


图 5-22 主动式相变储能自控系统程序流程图

5.6.3 新风系统控制

新风系统的执行设备有：客厅新风阀门、卧室新风阀门、餐厅新风阀门、新风机。这些设备所需的控制信号都为开关量信号，具体 I/O 分配如表 5-6 所示。

表 5-6 I/O 分配表

控制类型	I/O 口	控制类型	I/O 口
客厅新风阀门	Y1F	卧室新风阀门	Y21
餐厅新风阀门	Y23	新风机高速	Y22
新风机中速	Y27	新风机低速	Y28

输入参数软元件主要包括各单元的 CO_2 浓度浓度及与触摸屏关联的手动控制软开关，具体分配如表 5-7 所示。

表 5-7 软元件分配表

变量	软元件	变量	软元件
客厅 CO ₂ 浓度	D71	卧室 CO ₂ 浓度	D72
餐厅 CO ₂ 浓度	D73	客厅新风手动	X271
卧室新风手动	X272	客厅新风手动	X273

新风系统 PLC 程序较为简单，即当某个单元 CO₂ 浓度超过 800ppm 时，该单元的阀门自动打开，反之，则该单元阀门关闭，对于新风机而言，只要有单元一个阀门打开，就需要打开新风机，但新风机的风速由开启单元的数量决定，当只有一个单元开新风时，设置为低速；有两个单元开新风时，设置为中速；全部开新风时，设为高速。

5.6.4 外遮阳控制

外遮阳系统的执行设备需要用两个开关量控制其开启和关闭，具体 I/O 分配如表 5-8 所示。

表 5-8 I/O 分配表

控制类型	I/O 口	控制类型	I/O 口
外遮阳展开	Y1C	外遮阳卷起	Y1D

输入参数软元件主要包括气象站采集的光照强度及两个与触摸屏关联的手动软开关，具体软元件分配如表 5-9 所示。

表 5-9 软元件分配表

变量	软元件	变量	软元件
光照强度	D81	外遮阳展开手动	X281
外遮阳卷起手动	X282	中庭温度	D54

外遮阳控制的 PLC 程序也较为简单，其开启和关闭状态由光照强度和中庭温度共同决定，可分为如表 5-10 所示 4 种工作状态，其中照度和温度留了一定的模糊空间，防止小范围波动造成震旦。

表 5-10 输入输出对应关系表

室内照度	中庭温度	工作模式	外遮阳状态
>600lux	>26	遮阳降温	关闭
>600lux	<24	采暖	开启
<550lux	>26	采光	开启
<550lux	<24	采光采暖	开启

5.7 人机交互界面设计

节能监控系统的人机交互界面选用了一块三菱 GOT-1000 触摸屏，该触摸屏被安装于 Sunny Inside 中庭处的公共空间中，用于反馈小屋实时能耗、温湿度等信息及发送控制指令。

触摸屏界面开发是在三菱 GT-designer 软件平台上进行的，该软件具有界面制作效率高、操作简单、可与三菱产品无缝连接等优点，在工业自动化领域应用广泛^[50]。

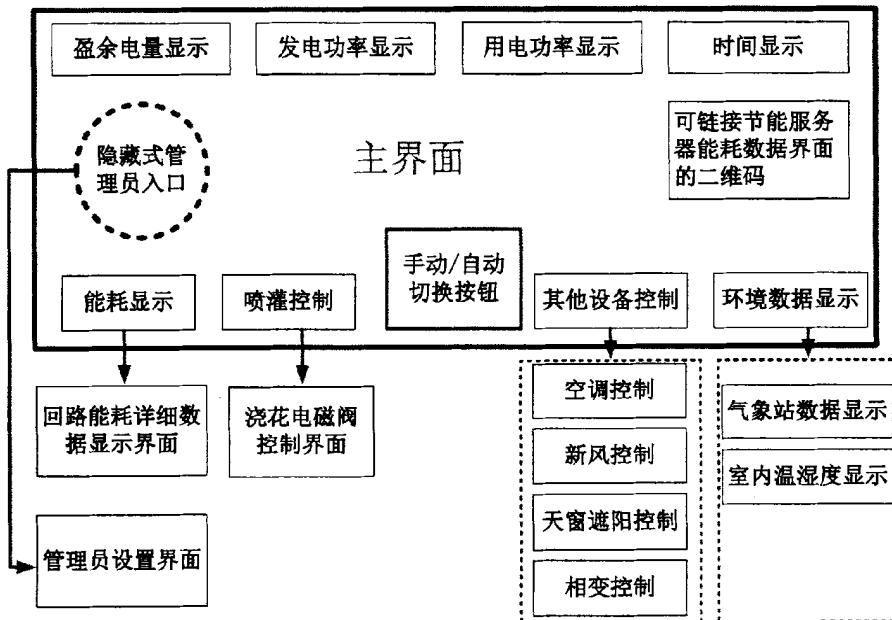


图 5-23 人机交互界面总体结构

(1) 主界面

人机交互界面总体结构如图 5-23 所示，包括一个主界面和 5 个子界面，主界面（图 5-24）主要实现显示和切换功能：显示功能包括实时发电功率、用电功率、盈余电量和时间显示；切换功能包括自动手动模式切换、主界面至各子界面切换。



图 5-24 主界面

（2）子界面设计

①能耗显示界面

能耗显示界面如图图 5- 25 (a) 所示，可显示小屋实时能耗及历史能耗曲线，并可生成按日统计的发电量和用电量报表，使用户对实时用电情况及近期用电情况一目了然。

②喷灌控制界面

喷灌控制界面如图 5- 25 (b) 所示，将建筑模型导入到触摸界面中，用户只需触摸要喷灌的花卉在小屋的方位，该方位喷灌电磁阀就会打开，开始喷灌。该操作是通过触摸屏向 PLC 上的软元件写数据实现的。

③其他设备控制界面

其他设备控制界面如图 5- 25 (c) 所示，包括对遮阳、相变储能系统、空调、新风的手动控制，也是通过触摸屏向 PLC 上的软元件写数据实现的。

④环境数据显示界面

环境数据显示界面可形象的显示房屋各个单元的温湿度数据及室外气象情况，并可将历史温湿度数据进行存储和统计，生成每日报表曲线。

⑤管理员界面如图图 5- 25 (d) 所示，由于触摸屏直接可向 PLC 写数据，若向普通用户开放太多操作权限，由于用户不了解，可能由于操作不当造成设备损坏，因此，本项目只开放了部分操作权限给普通用户。考虑到可能用到一些高级操作，因此在主界面

中开辟了一个隐藏式管理员入口，管理员可长按厦门大学的校徽标志进入该界面，进行更多高级操作。

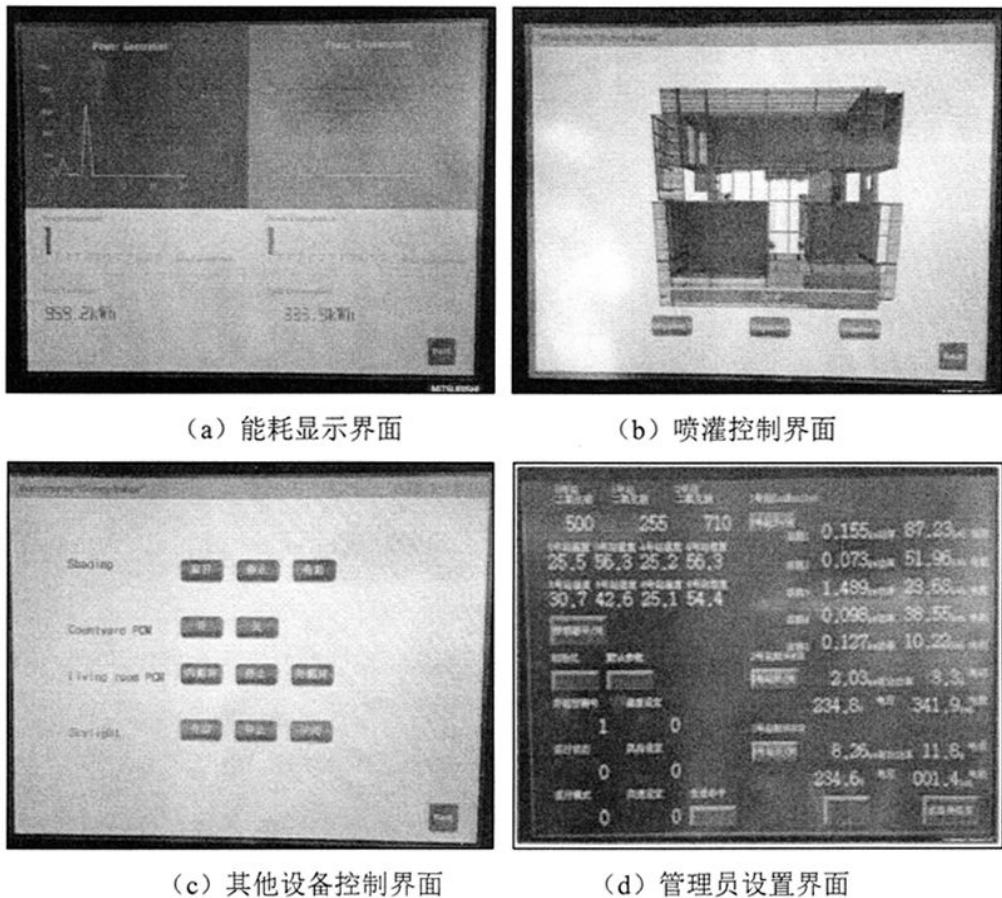


图 5-25 子界面

5.8 本章小结

本章通过系统核心 Q PLC，实现了能耗监测与智能控制系统的有机融合，通过 PLC 扩展模块，构建了兼容标准 Modbus 协议、无顺序通信协议及以太网的等多种协议的系统通信网络，以实现对环境数据的采集与对外设的控制，并进行了硬件、通信、软件和人机交互界面设计。本章还给出了空调开启预测控制策略，并编写了有自学习功能的 PLC 程序；给出了主动式相变储能系统控制策略，并编写了具有跟踪温度最值功能的 PLC 程序。

第六章 实验与分析

经过近两年设计和改进, Sunny Inside 于 2013 年 6 月在学校落成, 完成调试和性能测试后, 被分模块拆装运至山西省大同市竞赛村。7 月 18 日至 7 月 31 日, 经过 13 天紧张的建设施工、装修和设备调试, 最终在竞赛村建成, 主委会于 8 月 2 日至 8 月 11 日对该小屋各项性能进行了测试和评分。本章将对 Sunny Inside 在竞赛村的搭建调试过程做简要介绍, 并对竞赛期间采集的小屋数据进行详细分析, 以评估光伏发电与节能监控系统的实际工作性能。

6.1 系统搭建

如图 6-1 所示, 22 个参赛作品分两列建造在竞赛村“太阳宫”的前方的广场上, Sunny Inside 的正门朝向为正南方向。

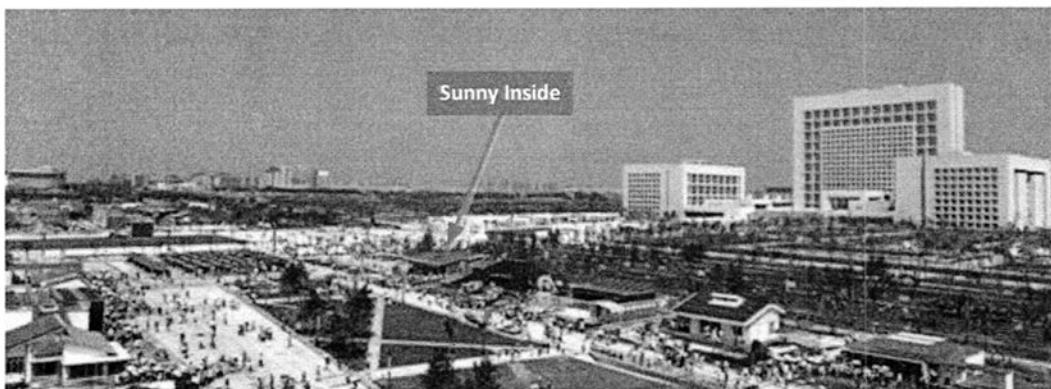


图 6-1 坐落在大同竞赛村的 Sunny Inside

6.1.1 光伏发电系统搭建

(1) 光伏组件安装

如图 6-2 所示, 61 块多晶硅组件通过导轨, 固定在 12° 的 Sunny Inside 斜屋面上, 为避免灰层等附着物对系统发电效率的影响, 完成阵列安装后需对其表面进行清理。

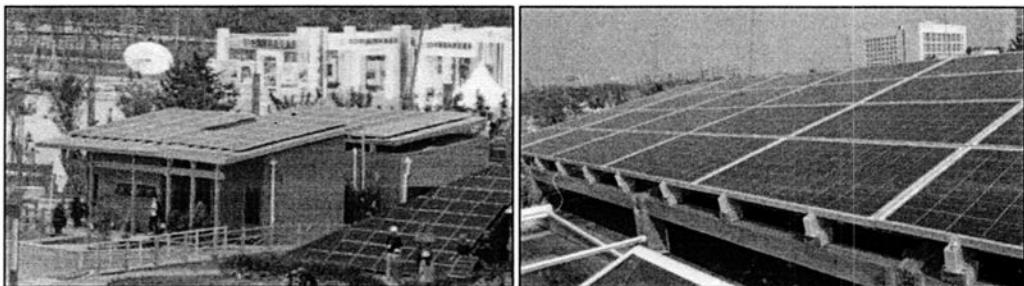


图 6-2 光伏组件阵列安装及接线

(2) 电气连接

光伏组件按照图纸进行如图 6-3 (a) 所示的串并联电气接线, 组件间电气连接需使用光伏专用电缆及光伏专用接头; 光伏专用电缆需使用扎带将其固定在支架上, 防止受风的扰动与周围物体发生摩擦造成自身表皮磨损漏电或线头松动; 所有光伏支架和光伏组件边框需做接地处理, 起到防雷和保护人身安全作用。

光伏发电系统的汇流、逆变及并网设备安装在 Sunny Inside 设备间中, 其接线如图 6-3 (b) 所示, 光伏阵列产生的直流电经 3 个回路汇总到逆变器的直流输入端; 光伏智能电表和双向智能电表安装在交流侧, 用于测量光伏发电及小屋净能耗实时数据。

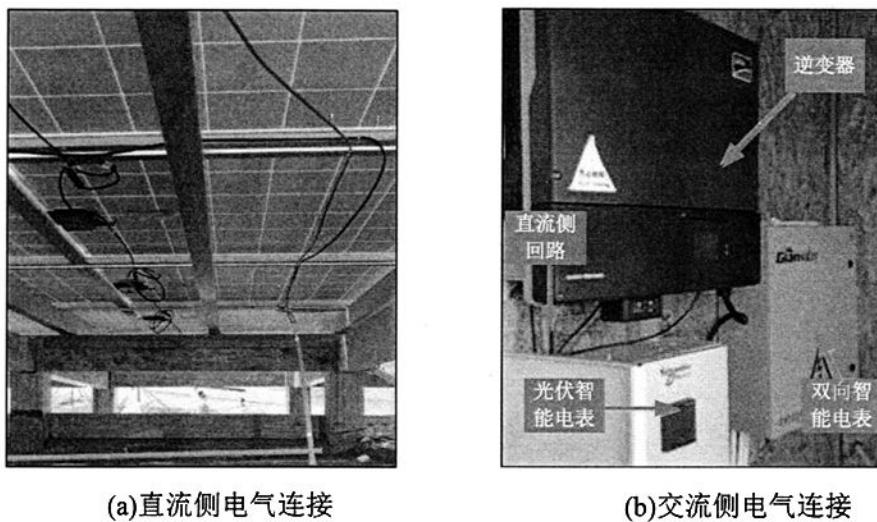


图 6-3 Sunny Inside 电气连接

6.1.2 节能监控系统搭建

① 主配电柜

Sunny Inside 主配电柜如图 6-4 所示, 该主配电柜的功能包括配电、并网、现场实时能耗采集、继保、防雷、接地等。

能耗监控系统的设备层位于主配电柜中: 两个 ME96NSR 能耗监测模块安装在配电柜的门上, 用于采集和显示光伏发电和总用电实时数据; 一个能耗监测模块 EcoMonitorPro 安装于配电柜内, 用于采集 5 个主要用电回路实时能耗数据。采集到的现场实时能耗数据都通过 CC-link 专用电缆, 连接到如图 6-5 所示的节能监控系统弱电箱中。

智能控制系统中间继电器和接触器也位于主配电柜中: 节能监控系统弱电箱中的

PLC 输出模块发出逻辑控制信号, 经过信号线, 接到主配电柜端子排中, 用于控制中间继电器和接触器, 间接控制执行机构的运行。

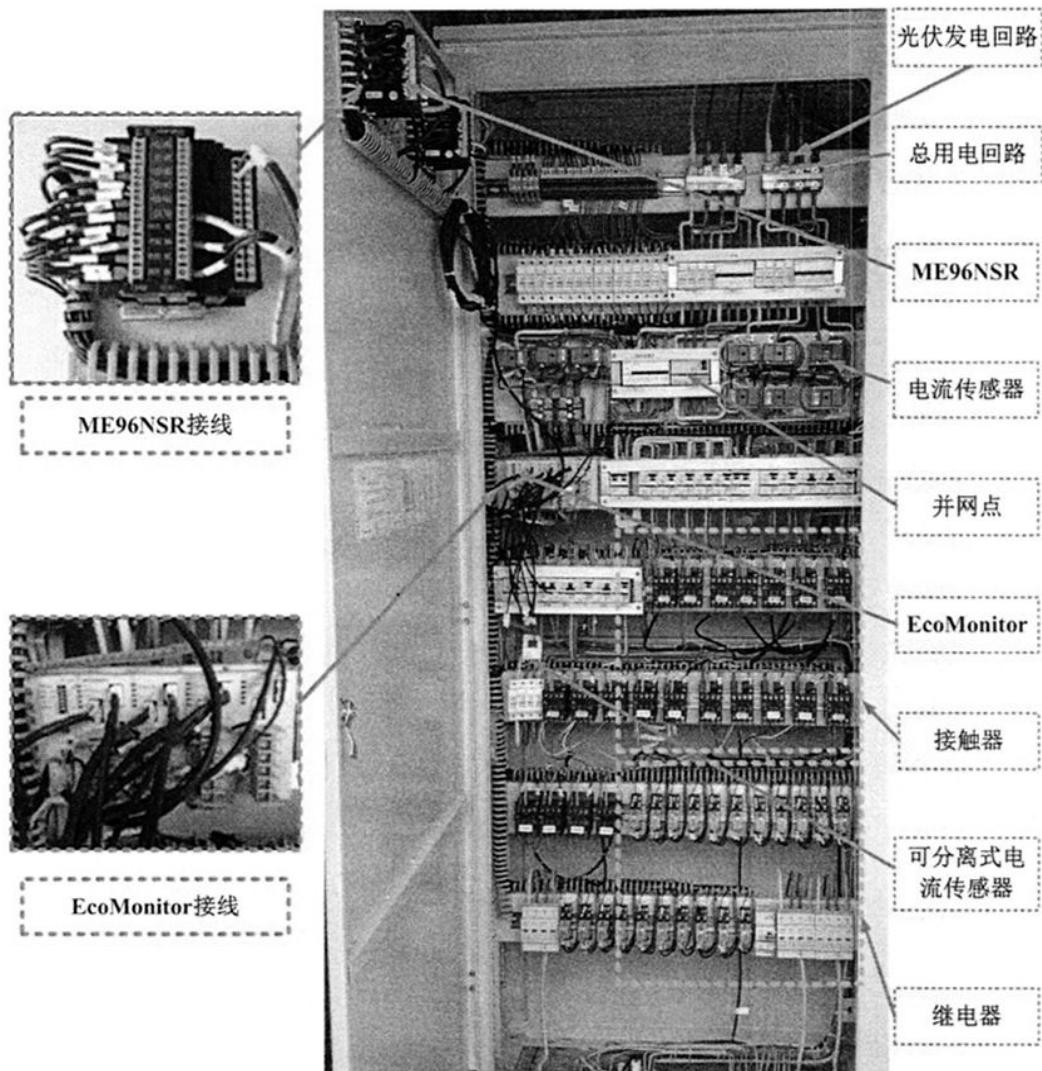


图 6-4 主配电柜

②节能监控系统弱电箱

Sunny Inside 节能监控系统弱电箱如图 6-5 所示, 由 PLC 及其扩展模块、节能服务器、中央空调网络控制模块、电源和端子排组成。

能耗监测系统控制层位于本弱电箱中: 设备层采集的现场实时能耗数据通过 CC-Link 总线连接到本弱电箱 PLC 的 CC-Link 扩展模块中, 经 PLC 处理后的数据, 一部分通过以太网连传输远程触摸屏, 另一部分通过 CC-Link 网络, 传输到本弱电箱的节

能服务器，经节能服务器处理后，通过以太网进行网页发布。

智能控制系统的控制层位于本弱电箱中：设备层传感器采集的信号通过 485 总线连接到本弱电箱的两个 PLC RS485 通信扩展模块中；PLC 产生的控制信号中，逻辑控制信号通过端子排，连接到主配电柜，对继电器进行控制，网络控制信号通过 PLC 中的以太网扩展模块，直接接入中央空调网络控制模块中。PLC 的硬件组态和接线如图 6-5 下方的图片所示。

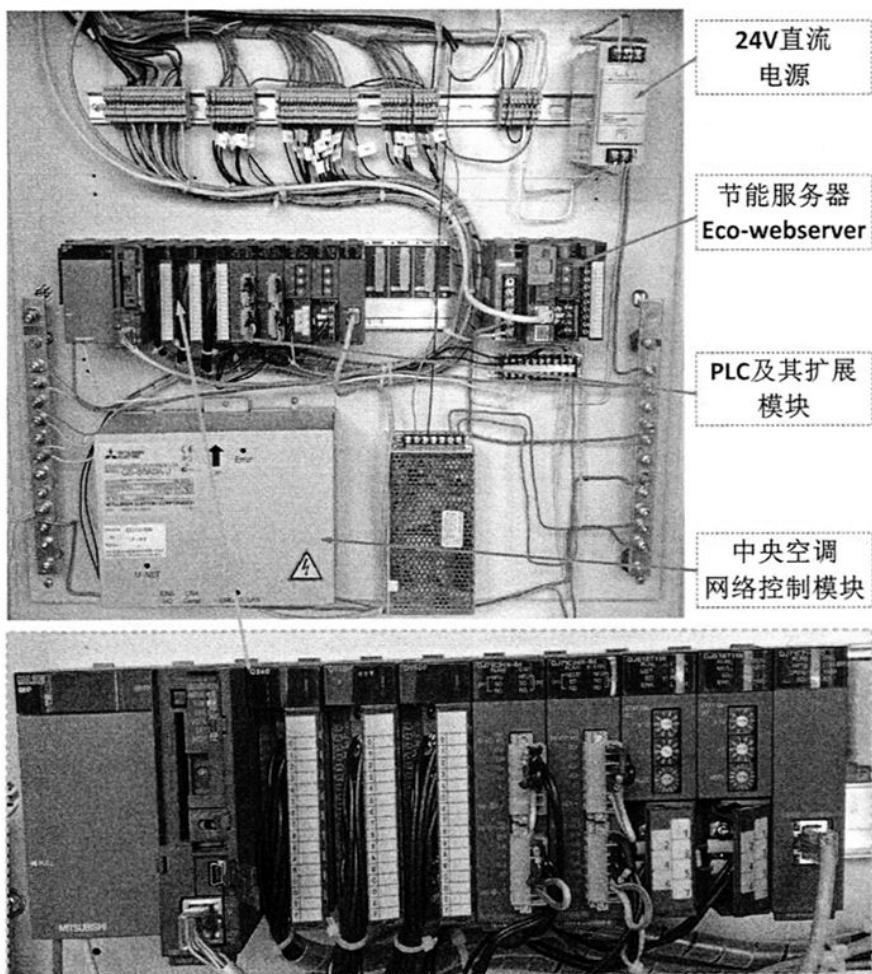


图 6-5 节能监控系统弱电箱

③其他输入输出设备

温湿度传感器及 CO₂ 传感器安装于室内空间的墙面上，其安装效果如图 6-6 所示。该图左侧为 CO₂ 传感器，可实时显示 CO₂ 浓度，并将数据传输到 PLC 中，右侧为温湿

度传感器，这些传感器都通过 485 总线，串联在一起。

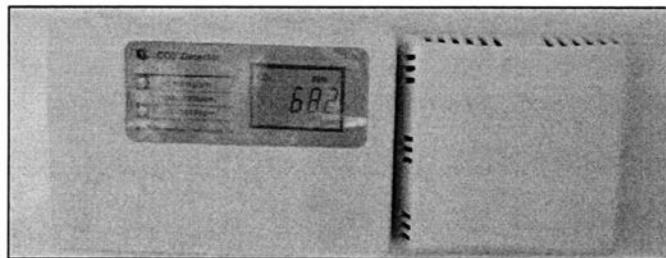
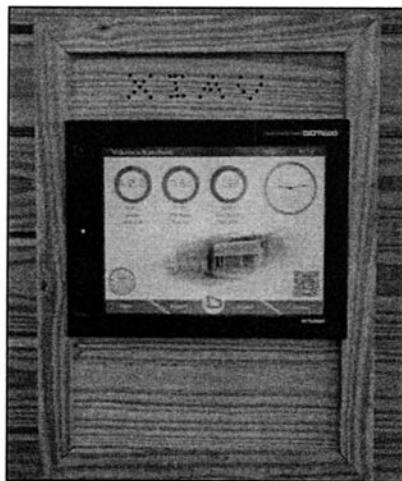


图 6-6 湿湿度及 CO₂ 传感器

图 6-7 (a) 所示的是触摸屏，安装在小屋的公共区中庭中。它是节能监控系统的人机交互界面，可显示能耗监测数据、环境监测数据，同时，还可手动控制各执行设备运行状态。

图 6-7 (b) 所示的是小型气象站，为了使其采集的温湿度、风速、太阳辐射更有代表性，将其安装在小屋东北角的屋顶上。该小型气象站是无线气象站，自带独立光伏系统，可能源自给自足，采集的数据通过无线电波传输到无线接收模块 CC-3000 上，该模块将获取的数据转换为数字信号，通过 RS485 总线，发送到 PLC 上的 RS485 扩展模块中。



(a) 触摸屏



(b) 气象站

图 6-7 建筑智能控制终端和室外气象站

6.2 调试与网络诊断

6.2.1 通信模块状态检查

在配置系统前，需对各模块进行硬件测试，包括各模块的安装状态、供电电压、拨号开关等，检查完毕后再接通电源，将 PLC 的 CPU 进行 RESET，使用 CPU 模块上的 LED 指示灯观察测试结果，若正常，则“ERR”的 LED 灯闪烁；若不正常，则“MST”的 LED 灯亮起，“ERR”的 LED 灯闪烁。

6.2.2 使用 GX Developer 进行网络诊断

(1) CC-Link 网络诊断

CC-Link 网络诊断可使用 GX Developer 环境下的 CC-Link 诊断工具，诊断过程包括上位站监视、其他站监视和线路测试。

上位站监视是用于监视外围设备连接到的站的数据链接状态；其他站监视是用于监视除外围设备连接到的站外的其他站的数据连接状态；线路测试是用于检查连接的远程站、智能设备站、本地站及备用主站的运行状态。

(2) RS485 网络诊断

RS485 网络的通信的诊断可采用 GX Developer 环境下的智能功能模块工具线路跟踪功能，如图 6-8 所示，选择需要跟踪的 RS485 主站通道，即可开始对该总线数据进行跟踪，以判断通信是否正常。

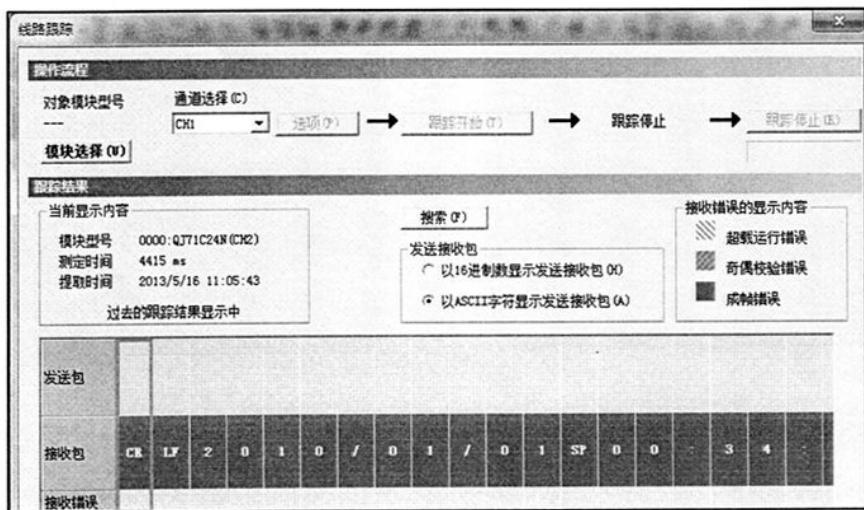


图 6-8 气象站无协议通信线路跟踪

(3) 以太网诊断

使用 GX Developer 提供的 PING 测试对以太网模块状态、参数状态和通信状态进行测试和诊断。

6.2.3 传感器校准

将标准环境参数监测仪器与温湿度传感器、CO₂ 传感器放在同一环境下，将传感器采集的数据与标准仪器采集的数据做对比，对有误差的传感器，通过 PLC 程序对其参数进行线性补偿。

6.3 系统性能测试

SD2013 比赛日是 8 月 2 日到 8 月 11 日，各参赛队需按照竞赛规则，模拟日常起居，定时运行相应家电，组委会相关行业专家通过客观数据和主观感受，对小屋的性能进行评分。本节将对竞赛期间采集到的 Sunny Inside 系统运行数据进行分析。

6.3.1 光伏发电系统分析

(1) 竞赛期间系统运行情况分析

图 6-9 显示的是竞赛期间（8 月 3 日 0:00 至 8 月 9 日 24:00）太阳辐射强度与光伏发电的关系曲线，除 8 月 7 日全天阴雨日照强度较低外，其它几天的日照情况都十分优良，竞赛期间光伏发电系统一直保持高效运行，未出现故障情况。

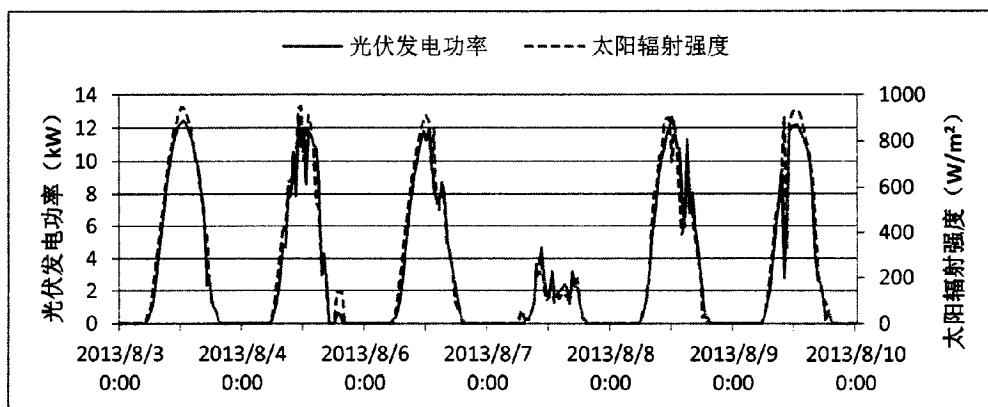


图 6-9 竞赛期间太阳辐射与发电功率曲线

(2) 光伏发电系统单日实时发电曲线分析

图 6-10 是比赛期间 (8 月 3 日) 的 24 小时光伏发电功率与太阳能辐射强度关系曲线。从发电曲线可以看出, 由于当天天气晴朗, 无云层遮挡, 光伏发电系统从早上 5:30 点就自行启动发电, 瞬时功率为 0.38kW, 随着时间推移, 太阳辐射逐渐增强, 系统发电功率也逐渐增加, 到中午 12 点 30 分达到峰值 12.42kW, 接着又随太阳辐射减弱而逐渐减小, 到 19:30 时刻瞬时发电功率为 0.04kW, 随后停止发电。

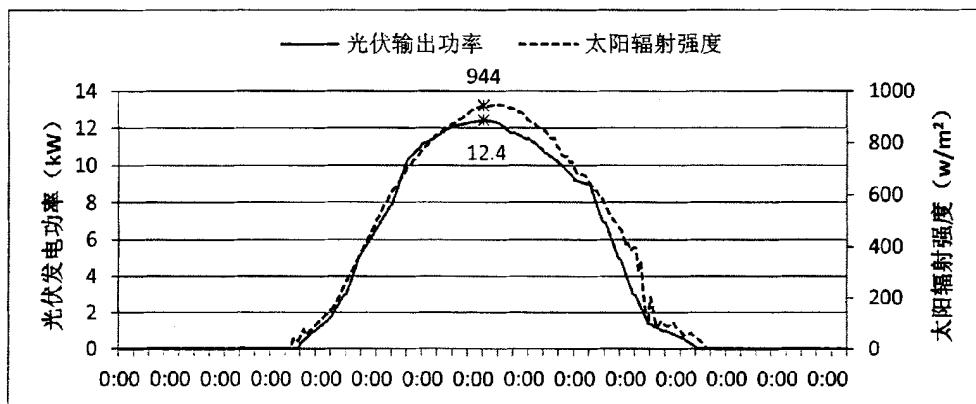


图 6-10 竞赛期间单日 (8 月 3 日) 光伏发电曲线

图 6-10 还可以看出, 从早晨启动发电开始到早上 10:30, 光伏发电系统发电功率与太阳辐射成正比关系, 说明在这段时间段光伏组件表明温升不明显, 基本没引起光电转换效率变化, 而在 10:30-16:00 时间段, 由于温度上升, 组件光电转换效率受到一些影响, 但波动范围在 3% 的合理范围内, 说明屋面的通风散热层设计对防止发电效率损失发挥了有效作用。

(3) 竞赛期间每日发电量分析

图 6-11 所示的是竞赛期间 8 月 3 日至 8 月 9 日的每日发电量统计, 由该统计图可知, 在光照条件良好的情况下, 光伏发电系统每天发电量都大于 70kWh, 在光照最好的 8 月 3 日, 全天发电量达 87.38kWh。8 月 7 日, 由于降雨原因, 全天发电量只有 7.84kWh, 只有正常日照条件下发电量的 10% 左右。

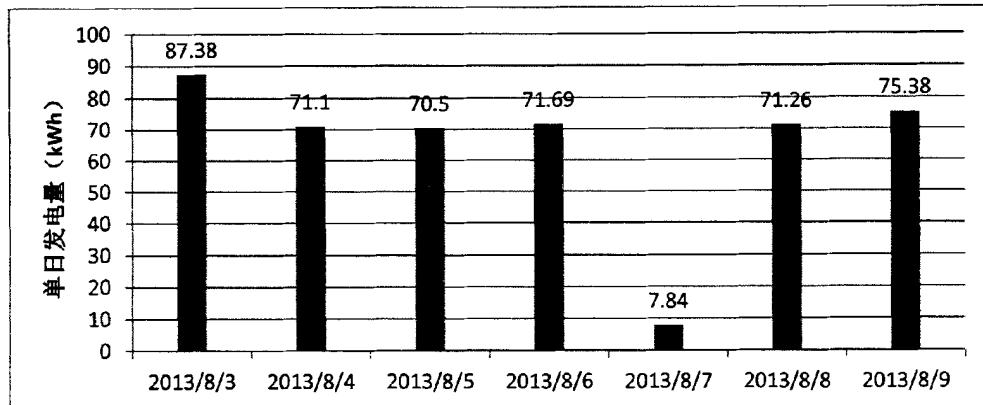


图 6-11 竞赛期间每日发电量统计

6.3.2 节能监控系统分析

(1) 竞赛期间气象数据分析

图 6-12 是气象站测得的竞赛期间室外气温和空气湿度情况，由该温度曲线可知，在竞赛期间，白天最高气温可达 30℃ 左右，而夜间最低气温可低至 16℃ 左右，昼夜的平均气温为 22.7℃，处于温控标准的范围（22℃~25℃）内，适合相变材料的使用；由湿度曲线可以知，竞赛期间大多数时间室外湿度高于 60% 的上限要求，智能控制系统对空调除湿模式的自动控制效果在竞赛中可得到验证。

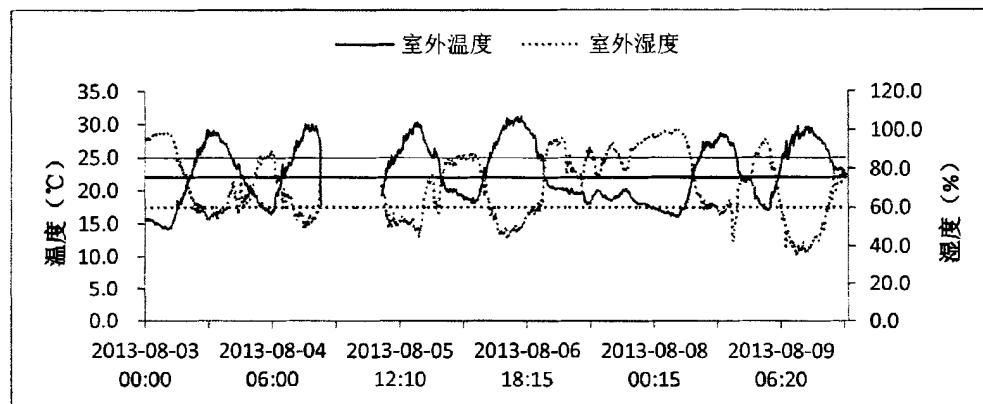


图 6-12 比赛期间室外温湿度曲线

(2) 中央空调和相变系统联合运行效果分析

① 总体控制效果分析

竞赛规定的室内温湿度监测时间是 16:30-7:00，在此期间，室内温度控制在 22-25℃

范围内, 图 6-13 是竞赛期间 (8 月 3 日 0:00 至 8 月 9 日 24:00) Sunny Inside 的室内各单元及室外温度曲线, 从该曲线可看出, 在 16:30-7:00 期间, 中央空调和相变储能系统的运行可使室内温度基本稳定在 22-25℃ 范围内。

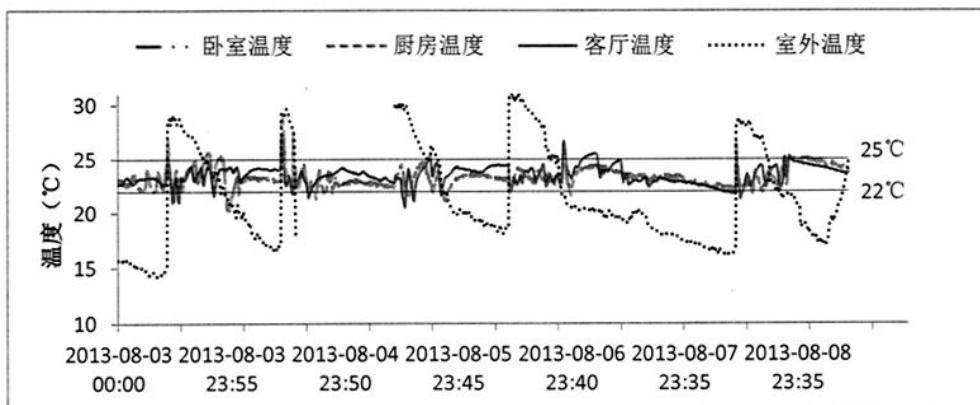


图 6-13 竞赛期间温度控制效果

②湿度控制运行效果分析

图 6-14 是竞赛期间 (8 月 3 日 0:00 至 8 月 9 日 24:00) 客厅及室外湿度曲线, 从该曲线可看出, 在 16:30-7:00 期间, 系统基本可将湿度控制在 60% 以下。

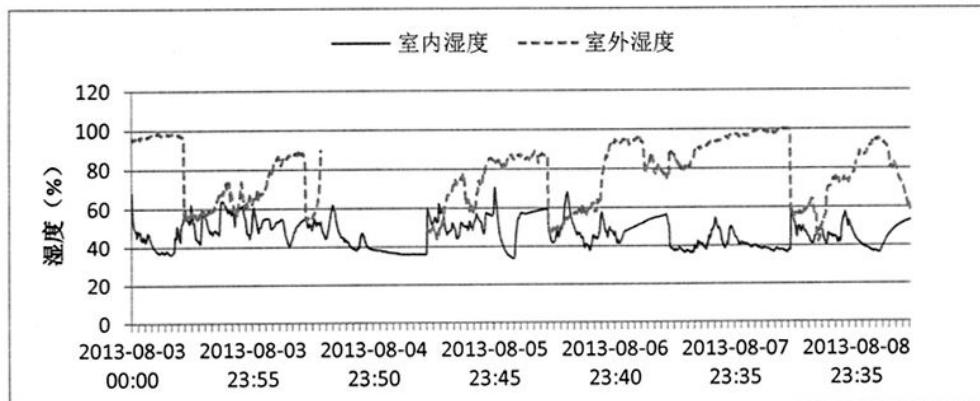


图 6-14 竞赛期间室内外湿度曲线

图 6-15 为竞赛期间 (8 月 8 日 0:00~24:00) 客厅和室外湿度曲线, 由于 8 月 7 日降雨, 室外湿度达到了 100%, 但中央空调在智能控制系统的控制下, 使室内湿度在监测时间 (16:30-7:00) 一直保持在 60% 以内, 由此可知, 智能控制系统的湿度控制方案是可行的。

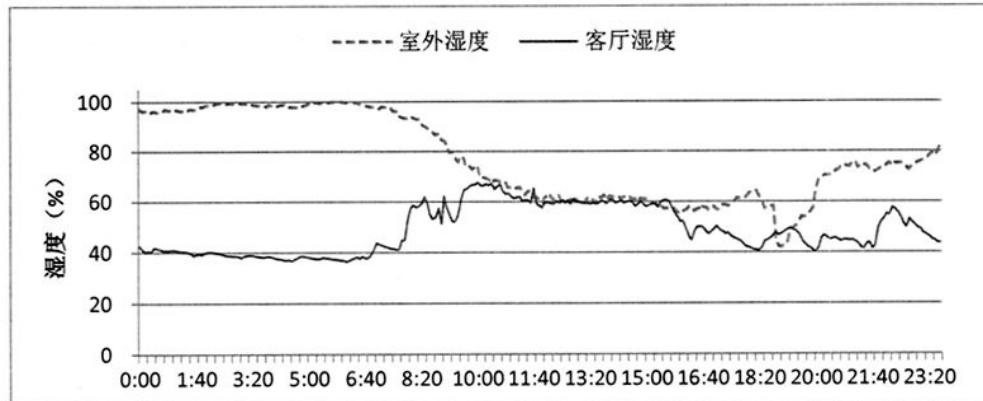


图 6-15 竞赛期间（8月 8 日）湿度曲线

6.3.3 能耗平衡分析

（1）单日能耗平衡情况分析

图 6-16 显示的是竞赛期间（8月 3 日至 8月 9 日）的每日能耗平衡情况，由该图可知，每日用电量为 13.5kWh 左右，最低位 12.12kWh，最高为 19.06kWh（当日有模拟煮饭和洗衣任务），比能耗模拟得出的 16.38kWh 稍低。由于竞赛期间大部分时间天气状况良好，总体上盈余电量较大，只有 8月 7 日由于全天降雨，太阳辐射不足，出现正能耗现象，其余比赛日均为负能耗。

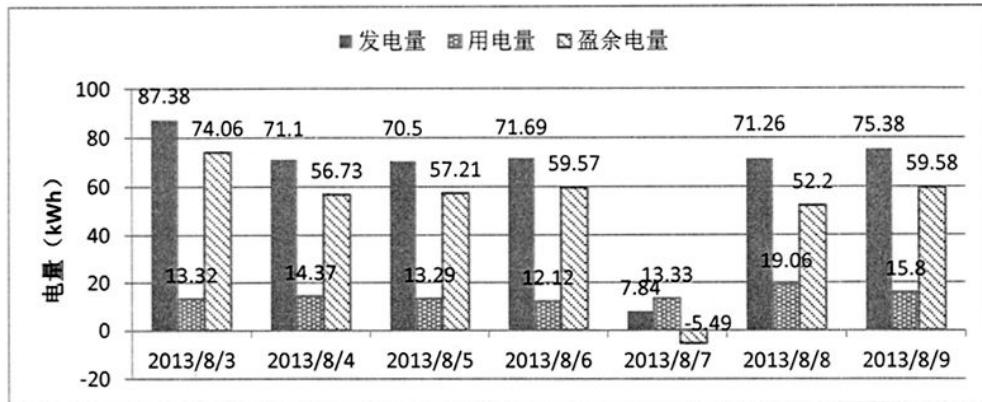


图 6-16 竞赛期间每日能耗平衡情况

（2）竞赛期间总体能耗平衡情况分析

图 6-17 所示为比赛期间（8月 3 日至 8月 9 日）累计发电量、总电量和盈余电量曲线，由该曲线可知，小屋累计盈余电量保持为正值，说明小屋不但实现了能耗平衡，

还实现了负能耗。

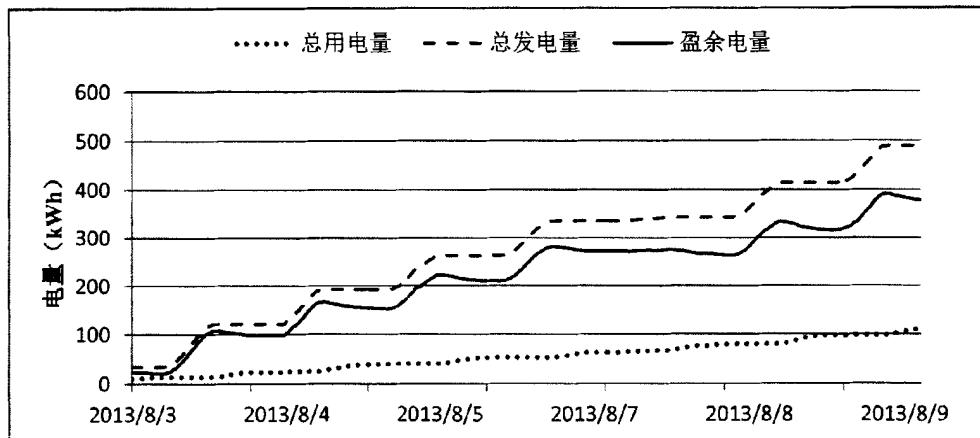


图 6-17 竞赛期间发电量用电量与盈余电量统计

6.4 SDC2013 参赛作品性能对比与分析 (注：各赛队能耗数据由组委会提供)

6.4.1 光伏发电系统效率对比

图 6-18 所示的是各参赛队装机容量及比赛期间每千瓦装机容量的发电量。装机容量最大为 16.1kW，最小为 8.5kW，平均值为 11.73kW，单位容量发电为 BMN 最高，其次为 Sunny Inside 所在的 XIAU 代表队。SWE (瑞典队) 采用了薄膜组件，而竞赛期间天气状况一直较好，所有没发挥薄膜的弱光性优势，单位容量发电较低，但该队也实现了能耗平衡。

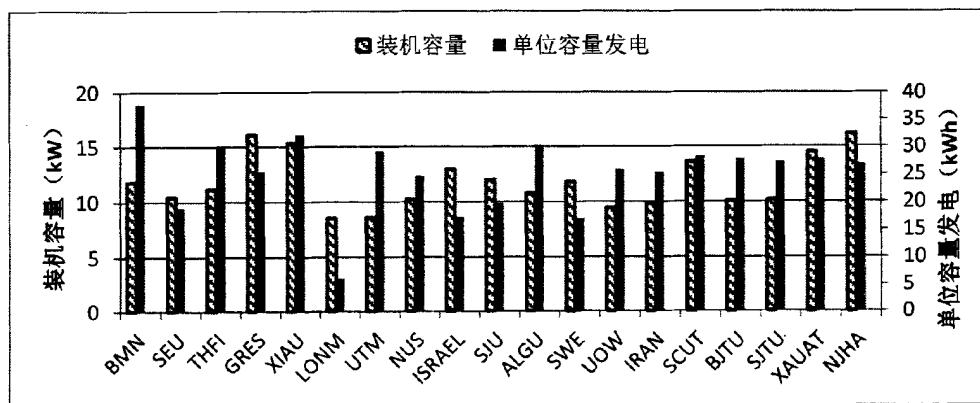


图 6-18 各参赛队发电效率对比

6.4.2 用电及节能性分析

图 6-19 为各参赛队比赛期间（8月3日至8月9日）用电情况统计，LONM 8月5号才完成并网，比其他对晚了5天，因此用电量相对较少；LONM 队竞赛期间空调不能工作，因此耗电量也相对较少，除此之外，能耗最低的就是 Sunny Inside 所在的 XIAU 代表队。由此可知，采用的节能控制对小屋节能效果显著。

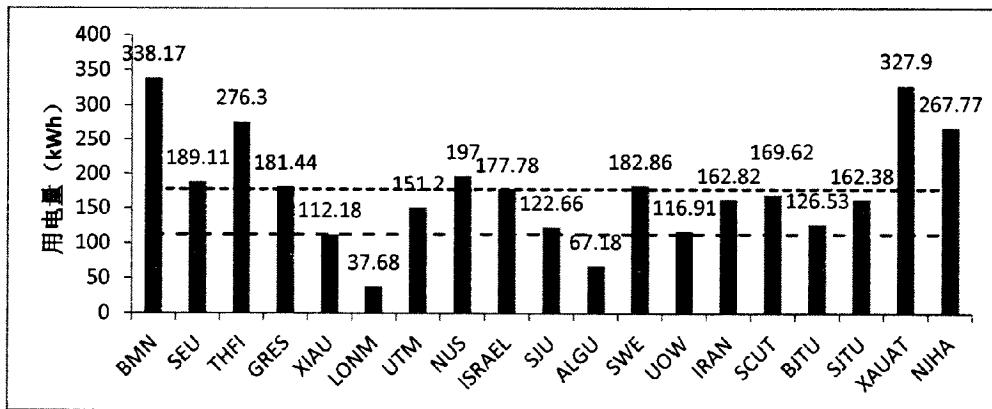


图 6-19 各参赛队用电量对比

6.4.3 能耗平衡对比

图 6-20 显示的是比赛期间（8月3日至8月9日）所有参赛队的发电量、用电量盈余电量的统计图，由于竞赛期间大部分为晴天，所有的队伍都顺利实现了能耗平衡。Sunny Inside（图 6-20 中的 XIAU）能耗平衡表现尤为突出：其光伏发电量在参评的 19 支队伍中位居第一，达 492.33kWh；用电量最少（LONM 和 ALGU 出现故障，不计入比较范围），为 112.18kWh；盈余电量最多，达 380.15kWh，充分证明了本项目中光伏发电及节能监控系统设计方案的可行性。

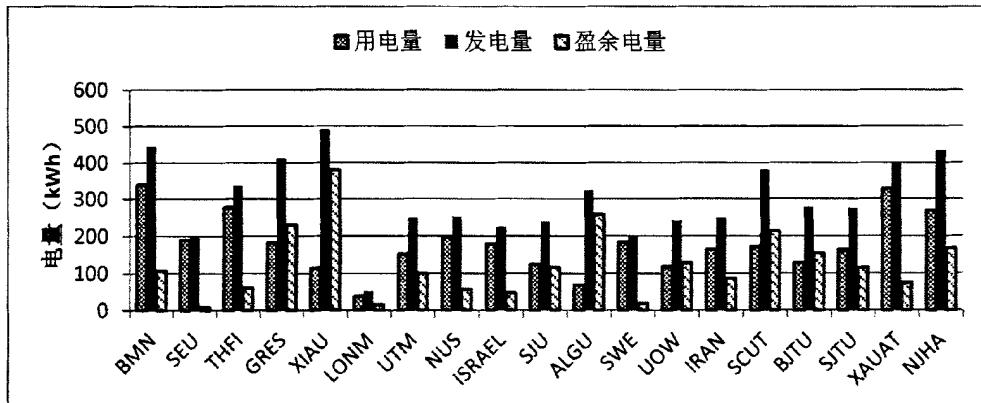


图 6-20 各参赛队能耗平衡结果

6.4.4 SD2013 比赛结果

Sunny Inside 能源管理与智能控制系统在比赛期间运行稳定，各项数据与设计相符。光伏发电系统成本合理，发电效率高；能源管理与智能控制系统在建筑节能和环境调控中作用明显。最终，Sunny Inside 的设计与建造者厦门大学代表队获得了能耗平衡、热水单项第一、工程技术第四、总分第六的成绩。

6.5 本章小结

本章首先介绍了光伏发电系统和节能监控系统的搭建方法并对搭建好的系统进行了调试与网络诊断，随后进行了系统功能测试，光伏发电系统测试包括效率分析、稳定性分析、每日发电量和总发电量分析；节能监控系统测试包括温湿度控制效果分析、空调开机预测控制及主动式相变储能系统控制效果分析；能耗平衡测试包括单日能耗平衡分析和竞赛期间总体能耗平衡分析，最后，对各参赛队的光伏发电系统效率、用电及节能、能耗平衡进行了对比分析，并介绍了比赛结果。

第七章 总结和展望

7.1 总结

随着建筑规模的快速扩张及人们对住宅舒适度要求的提高，建筑能耗问题日益凸显。新能源获取和智能化节能监控是降低建筑能耗，使建筑实现低能耗、零能耗，甚至负能耗的有效技术手段。国际太阳能十项全能竞赛是美国能源部为推进太阳能零能耗建筑产学研结合发起主办的，本人作为 2013 年该赛事厦门大学代表队技术组负责人，承担设计了零能耗小屋“Sunny Inside”的光伏发电系统、能耗监测系统、智能控制系统及配电系统，本文对上述系统进行了详细设计和优化，并对其实际运行结果进行深入分析探讨。

（1）通过对零能耗建筑研究现状进行分析，得出了以下结论：光伏与建筑一体化并网发电系统具有美观、高效、经济特点，是零能耗住宅光伏发电系统发展趋势；现有住宅能耗监测和智能控制系统是独立的，对建筑节能效果有限，构建能耗监测和智能控制系统一体化系统对于建筑节能意义重大。

（2）设计了光伏与建筑一体化并网发电系统：通过光伏设计与建筑设计穿插设计的方法，结合气象数据和建筑结构，进行计算、比较与仿真，最终构建了一个 15.25kWp 的光伏并网发电系统，经过实验表明，该系统运行稳定、光电转换效率高、散热性能好，符合设计要求。

（3）设计了能耗监测与智能控制一体化系统：构建了实现能耗监测与智能控制系统数据共享的三层网络系统，经实验表明，该系统可实现能耗实时监测、能耗报表输出、手动或自动控制执行设备、自动控制遮阳、新风系统工作等预定功能。

（4）给出了空调开机时间预测的控制策略和实现方法：以 PLC 为控制核心，设计了具有自学习功能的 PLC 程序，通过网络控制的方式，控制中央空调的提前开机，经实验得知，该系统可按预定程序工作，操作精度符合要求，有效减少了空调运行时间。

（5）给出了主动式相变储能系统的自动控制策略和实现方法：以 PLC 为核心，客厅和相变出风口的温度传感器为反馈信号，控制相变系统的运行，经实验可知，该系统可起到白天制冷晚上制热的作用，可有效辅助空调，较少空调能耗。

7.2 本人承担的工作

零能耗小屋的设计、建造、运行和测试是一项高度综合的工作，需要由多个学科的师生和工程技术人员协作完成，厦门大学代表队的设计团队组成如图 7-1 所示，来自建筑与土木工程学院、艺术学院、能源研究院、物理与机电工程学院的老师和学生分为设计组和技术组进行协同工作，本人是技术组负责人，在项目中除参与团队管理及技术方案讨论外，还承担了光伏发电系统、能耗监测系统、智能控制系统和建筑配电设计工作，学科交叉协同工作对设计效率和设计质量的提高都起到了很好的促进作用。例如在光伏系统设计过程中，需要建筑能耗模拟数据可从专门进行能耗模拟小组里获得，大大提高了工作效率；光伏阵列布置方案设计过程中，可与建筑设计小组进行充分讨论，使光伏系统与建筑能更好的融合。

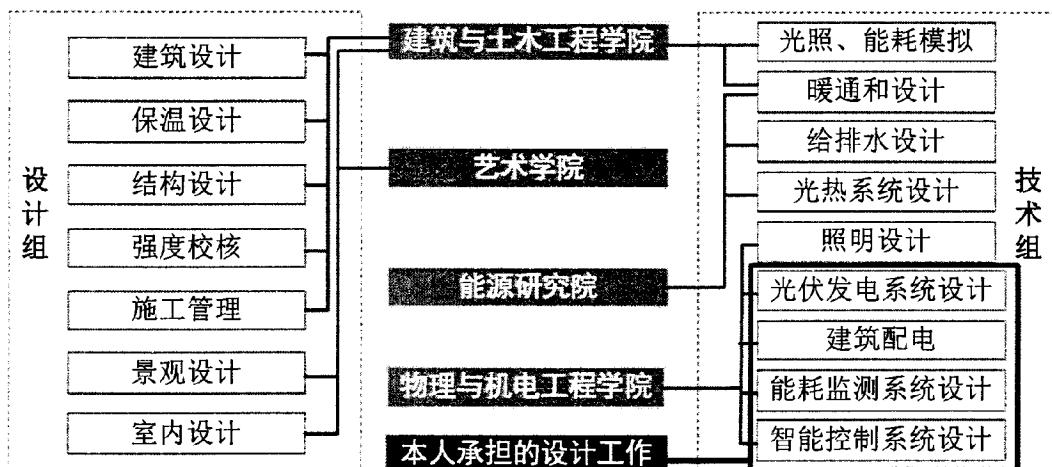


图 7-1 厦门大学代表队设计团队组织结构

7.3 展望

比赛结束后，Sunny Inside 被分模块拆装运回厦门大学，如今，Sunny Inside 已在厦门大学校园内完成主体搭建，近期将可完成系统调试，未来将在该平台上展开更深入的节能增效研究，并进行市场推广：

（1）主动式相变系统深入研究

竞赛期间，相变系统出风口温度只用于做控制，并未对其进行存储，导致无法对系统工作状态做进一步分析，待小屋在学校重建后，应对其出风口温度进行采集和存储，

以便于更为直接的分析相变系统工作情况。

（2）光伏阵列自动清洗系统的设计与研究

利用能耗监测与智能控制系统一体化的优势，设计光伏阵列自动清洗或降温系统，系统对太阳辐射强度和光伏发电系统功率数据进行计算，可得出光伏发电系统实时发电效率，根据发电效率并可判断出组件上的灰尘是否超过了规定额度，若超过额度，系统将开启自动清洗电磁阀对阵列进行自动清洗。由于前期调试时间有限，该功能未得以实现，但在理论上是可行的，而且很有实用价值，在后期可以进行进一步调试和实验。

（3）推广与应用

本项目所设计的光伏发电系统及节能监控系统在设计过程中不但考虑了其系统性能和工作性能，还兼顾了其造价和市场推广性，因此，造价合理，投入回收期较短，可在后期零能耗建筑或低能耗建筑建设中进行推广使用。

参考文献

- [1] 龙惟定, 白玮, 马素贞, 等. 中国建筑节能现状分析[J]. 建筑科学, 2009, 24(10): 1-3.
- [2] 张声远, 杨秀, 江亿. 我国建筑能源消耗现状及其比较[J]. 中国能源, 2008, 30(7): 37-42.
- [3] 杨向群. 零能耗太阳能住宅原型设计与技术策略研究[D]. 天津大学, 2012.
- [4] Laustsen J. Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings[J]. International Energy Agency (IEA), 2008.
- [5] Blengini G A, Di Carlo T. Energy-saving policies and low-energy residential buildings: an LCA case study to support decision makers in Piedmont (Italy)[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(7): 652-665.
- [6] Choudhary R, Augenbroe G, Gentry R, et al. Simulation-enhanced prototyping of an experimental solar house[C]//Building Simulation. Tsinghua Press, 2008, 1(4): 336-355.
- [7] Siebert B. Building integrated photovoltaic—new developments[J]. Structures and Architecture: New concepts, applications and challenges, 2013: 343.
- [8] Zaretsky M. Precedents in zero-energy design: architecture and passive design in the 2007 Solar Decathlon[M]. Routledge, 2009.
- [9] 王成山, 杨占刚, 武震. 一个实际小型光伏微网系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 6-10.
- [10] 秦亚辉. 基于 CC-Link 的可视化节能管理平台的开发 [D]. 华南理工大学, 2011.
- [11] Zhang S, Liu H, Wang Y. New Trends of Green Building's Skin Material: Take the Solar Decathlon Europe 2010 for Example[J]. Advanced Materials Research, 2013, 671: 1905-1908.
- [12] Glass B, Brannon B, Grantham K, et al. Expanding Horizons with Chameleon: Team Missouri's Innovative Home Automation System[J]. Energies, 2010, 3(6): 1142-1153.
- [13] Walker A, King R J, Eiffert P, et al. Advances in solar buildings[J]. Journal of solar energy engineering, 2003, 125(3): 236-244.
- [14] Wang N, Esram T, Martinez L A, et al. A marketable all-electric solar house: A report of a Solar Decathlon project[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2860-2871.
- [15] Weinlaeder H, Koerner W, Heidenfelder M. Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(9): 2468-2475.
- [16] Adams M B. Heating, ventilation, and air conditioning for a superinsulated solar house[J]. 2010.
- [17] Solar Decathlon [EB/OL]. [2012-12-31].
http://cn.sdcchina.org/download/Revised_SDC2013_Rules_V2.0.pdf.
- [18] Riffat S B, Wilson R, Omer S. BIPV design study for renewable energy centre and eco-energy house[M]. Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, 2000.

- [19] 陈维. 户用光伏建筑一体化发电系统及太阳能半导体照明技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2006.
- [20] 丁明, 刘盛, 徐志成. 光伏阵列改进优化设计方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 2-8.
- [21] Ghouari A, Hamouda C, Chaghi A. Performances Analysis of Grid connected PV system in the perspective of use in a smart house in Algeria[C]//Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013 International. IEEE, 2013: 521-524.
- [22] Esram T, Chapman P L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION EC, 2007, 22(2): 439.
- [23] 杨钦超. 基于微逆变器的屋顶光伏并网系统的研究[D]. 西南交通大学, 2012.
- [24] Cabeza L F, Castell A, Barreneche C, et al. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(3): 1675-1695.
- [25] Tyagi V V, Buddhi D, Kothari R, et al. Phase change material (PCM) based thermal management system for cool energy storage application in building: An experimental study[J]. Energy and Buildings, 2012, 51: 248-254.
- [26] Thomesse J P. A review of the fieldbuses[J]. Annual reviews in Control, 1998, 22: 35-45.
- [27] 陈启军, 覃强. CC-Link 控制与通信总线原理及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:12-13
- [28] 覃强. 开放式现场总线 CC—Link 综述[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2002 (2): 7-11.
- [29] 三菱电机通信网络应用指南[M]. 机械工业出版社, 2010.
- [30] QJ61BT11N Manual. [EB/OL]. [2010-08-01]. <http://cn.mitsubishielectric.com/fa/zh/download/.asp>
- [31] 潘悦. Modbus 协议研究及其实验系统的设计[J]. 哈尔滨工业大学, 2007, 41.
- [32] 杨宇慧. Modbus 协议测试规范国家标准草案的制订及测试系统的开发 [D][D]. 北京交通大学, 2007.
- [33] 朱宏超, 于向军, 吕震中. Modbus 协议在智能数据采集系统中的应用[J]. 测控技术, 2006, 25(2): 65-67.
- [34] QJ71C24N-R4 Manual. [EB/OL]. [2010-08-01]. <http://cn.mitsubishielectric.com/fa/zh/download/.asp>
- [35] 习博, 方彦军. 工业以太网中网络通信技术的研究[J]. 微计算机信息, 2005, 21(2): 148-149.
- [36] QJ71E71-100 Manual. [EB/OL]. [2010-08-01]. <http://cn.mitsubishielectric.com/fa/zh/download/.asp>
- [37] 温百东. 基于 Q 系列 PLC 三层网络及冗余控制系统的设计[D]. 西华大学, 2012.
- [38] 大同天气气象 [EB/OL]. [2014-02-22]. <http://www.weather.com.cn/cityintro/101100201.shtml>
- [39] 马琪, 杜继稳, 延军平, 等. 1961—2009 年大同市太阳辐射变化特征及其与气象要素的关系[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(2): 22-27.
- [40] 王惠祥. 太阳能光伏并网发电系统研究[D]. 浙江大学, 2012.
- [41] 高文祥, 王明渝, 王立健, 等. 光伏微型逆变器研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21):

147-155.

- [42] NOVA_CHSM6610M data sheet [EB/OL]. [2013-09-12].
http://www.astronergy.com/attch/product/20130913_NOVA_CHSM6610M_with_40mm_frame.pdf
- [43] SUNNY TRIPower 15000TL data sheet [EB/OL]. [2011-11-22].
<http://files.sma.de/dl/8552/STP17000TL-DEN133118w.pdf>
- [44] 马一太, 王洪利. 多联机空调系统及其能效标准进展[J]. 机械工业标准化与质量, 2008 (2): 21-23.
- [45] 张云, 陈汝东. 上海办公建筑空调系统负荷逐时分析[J]. 制冷技术, 2010 (003): 39-42.
- [46] 计建惠, 王可崇. 基于 Elman 网络的空调预冷时间的预测[J]. 微计算机信息, 2008, 24(13): 261-263.
- [47] 梁智尧, 严钧, 周清会, 等. Ecotect 生态建筑技术在高层办公楼设计中的应用[J]. 建筑技术及设计, 2009 (8): 88-91.
- [48] 袁旭东, 柯莹, 王鑫. 空调系统排风热回收的节能性分析 IJ[J]. 制冷与空调, 2007, 1: 76-81.
- [49] CC-3000 Manual. [EB/OL]. [2011-04-05]. www.rainwise.com
- [50] Ver G T. 5/GT Designer Ver5 图形终端技术参考手册[J]. MITsUBISHI. 2003 年 [73 Fx—Pcs~ DU—wIN/C 操作手册, 2003.