



典型公共建筑太阳能综合利用研究 ——太阳能资源较丰富地区

中国建筑西南设计研究院有限公司
中国建筑设计院有限公司
2016.12.31

项目信息

项目资助号: G-1506-23331

Grant Number

项目期: 2015 年 6 月 1 号—2016 年 5 月 31 号

Grant period: 6/1/2015-5/31/2016

所属领域: 低碳城市项目

Sector: China Low Carbon Cities Program

项目概述: 本研究分别针对太阳能供暖与太阳能发电的基础问题与应用问题开展了研究。同时,在太阳能资源较丰富地区(II 区)选择了三个代表性城市作为研究对象(西宁—严寒地区、银川—寒冷地区、西昌—温和地区),分别对三地的三类典型公共建筑:办公建筑、酒店建筑以及商业建筑的太阳能综合利用进行了研究。

项目对各典型建筑能耗进行了调研,与当地项目业主以及政策制定者进行充分的沟通与座谈,掌握了建筑发展现状。结合建筑功能、使用特点和建筑用能负荷特征,建立了典型建筑模型,结合气象数据(包含太阳辐射、温度、湿度等气象要素),分析了各建筑在不同的气候条件下的负荷特征和用能曲线。最终利用所建立的典型公共建筑太阳能综合利用的分析评价模型,针对太阳能丰富区域典型公共建筑进行分析计算,分别得出太阳能丰富区(二区)典型公共建筑太阳能综合利用的优化组合模式。

Project Discription: This project is researched based on the problem and application of solar heating and solar power. At the same time, the abundant solar energy region (II) chose three representative cities as the research object (xining-severe cold region, yinchuan- cold region, xichang-moderate area), the comprehensive utilization of solar energy is studied by office buildings, hotels and commercial buildings.

At the same time, this project has analyzed different typical buildings energy performance and has communicated sufficiently with local project owners and policy makers which gains the knowledge of present status for buildings. Typical building models were built through the analyzing of building function, utilization characteristic and building energy loads characteristic. The energy loads characteristic and energy consumption curve for different typical buildings under different climate conditions which includes solar radiation, temperature, humidity etc., were analyzed. It gains the essential parameter such as property and efficiency for equipment in different size for different buildings. From the analyzing models of comprehensive utilization of Solar Energy for typical public buildings, aimed at calculating for public buildings in solar resource-rich region, the optimization combination model of comprehensive utilization of solar energy on typical public buildings in solar resource-rich region (Zone two) were obtained respectively.

项目成员: 中国建筑西南设计研究院有限公司, 中国建筑设计院有限公司

Project team: China Southwest Architectural Design and Research Institute Corp. LTD

关键词: 太阳能、供暖、光伏、综合利用

Key Word: Solar energy, Heating, PV, Comprehensive utilization

本报告由能源基金会资助。

报告内容不代表能源基金会观点。

This report is funded by Energy Foundation.

It does not represent the views of Energy Foundation.

摘要

本课题结合太阳能资源丰富区（二区）的资源与气候特征，以太阳能资源最优化利用为目的，综合考虑能源品味、能源效率、气候条件、太阳能资源、使用功能、太阳能收集面积比等因素，基于所确定的典型建筑模型、太阳能利用设备基础参数、太阳能资源分布、不同热工气候分区的气象条件，建立太阳能能源综合利用（光热和光伏）效率最大化的优化分析组合模型。

本研究分别针对太阳能供暖与太阳能发电的基础问题与应用问题开展了研究。同时，在太阳能资源较丰富地区（II 区）选择了三个代表性城市作为研究对象（西宁—严寒地区、银川—寒冷地区、西昌—温和地区），分别对三地的三类典型公共建筑：办公建筑、酒店建筑以及商业建筑的太阳能综合利用进行了研究。

项目对各典型建筑能耗进行了调研，与当地项目业主以及政策制定者进行充分的沟通与座谈，掌握了建筑发展现状。结合建筑功能、使用特点和建筑用能负荷特征，建立了典型建筑模型，结合气象数据（包含太阳辐射、温度、湿度等气象要素），分析了各建筑在不同的气候条件下的负荷特征和用能曲线。最终利用所建立的典型公共建筑太阳能综合利用的分析评价模型，针对太阳能丰富区域典型公共建筑进行分析计算，分别得出太阳能丰富区（二区）典型公共建筑太阳能综合利用的优化组合模式。

针对所研究地区的新建建筑，太阳能综合利用系统可以实现多能互补，明显提高项目的节能性（以西宁办公建筑为例，该主动式建筑可实现全年节能率约为 24%），其中光伏驱动压缩式制冷系统节能优势非常明显，应作为太阳能综合利用系统优先采用的太阳能制冷方式。

开展新型的民用建筑主动式太阳能综合利用技术研究，利用太阳能进行供热、采暖和制冷是实现规模化、低成本利用太阳能的重要途径。通过给出太阳能二区的光伏和光热综合利用模型，制定出适合城镇化的低能耗建筑实施方案，推动太阳能产业规模化发展，为实现我国非化石能源发展目标和经济社会可持续发展开辟新途径。

项目按照建议书中的承诺，提交了详细的成果和报告。利用了所建立的典型公共建筑太阳能综合利用的分析评价模型，针对不同区域典型公共建筑进行分析计算，分别提出了太阳能丰富区（二区）典型公共建筑太阳能综合利用的优化组合模式。对研究地区转变发展方式、突破建筑太阳能利用技术的瓶颈制约、推动传统建筑产业升级具有重要意义。

Summary

This study bases on the climate characteristic of solar resource-few rich region (Zone two) aimed to best utilize the solar energy. It considers the factors of energy grade, energy efficiency, climate conditions, solar energy resource, usable function and solar collector area ratio, built the analyzing model for solar energy best comprehensive utilization under a setting solar collector area and obtained the optimization model of comprehensive utilization of solar energy on typical public building in solar resource-few rich region.

This project is researched based on the problem and application of solar heating and solar power. At the same time, the abundant solar energy region (II) chose three representative cities as the research object (xining-severe cold region, yinchuan-cold region, xichang-moderate area), the comprehensive utilization of solar energy is studied by office buildings, hotels and commercial buildings.

At the same time, this project has analyzed different typical buildings energy performance and has communicated sufficiently with local project owners and policy makers which gain the knowledge of present status for buildings. Typical building models were built through the analyzing of building function, utilization characteristic and building energy loads characteristic. The energy loads characteristic and energy consumption curve for different typical buildings under different climate conditions which includes solar radiation, temperature, humidity etc., were analyzed. It gains the essential parameter such as property and efficiency for equipment in different size for different buildings. From the analyzing models of comprehensive utilization of Solar Energy for typical public buildings, aimed at calculating for public buildings in solar resource-rich region, the optimization combination model of comprehensive utilization of solar energy on typical public buildings in solar resource-rich region (Zone two) were obtained respectively.

In view of the new buildings in the study area, comprehensive utilization of solar energy system can complement each other. The energy-saving efficiency comes a long way, for example, the active construction can realize the annual energy rate is about 24% for xining office buildings. The advantage of energy-saving efficiency is very obvious for photovoltaic drive compression refrigeration system, this system should be used as preferred way of solar refrigeration for the comprehensive utilization of solar energy system.

This is important way ,which develops active utilization of solar energy comprehensive technology, to come true the utilization of solar energy at low-cost . The low energy consumption building implementation plan is developed by the comprehensive utilization of solar photovoltaic and thermal model for solar resource-rich region (Zone two), to realize the goal of non-fossil energy development in China and open up new ways of sustainable economic and social development.

From the analyzing models of comprehensive utilization of Solar Energy for typical public buildings, aimed at calculating for public buildings in solar resource-rich region, the optimization combination model of comprehensive

utilization of solar energy on typical public buildings in solar resource-rich region (Zone two) were obtained respectively. It is great significance for transformation of the mode of development in research area, breakthrough the bottleneck of building solar energy utilization technology and promote traditional architecture industry upgrading.

1 前言	6
1.1 研究背景	6
1.2 国内外研究现状	8
1.2.1 研究现状	8
1.2.2 国内外研究问题	10
1.3 研究目的	12
1.4 研究内容	12
1.4.1 总体研究内容	12
1.4.2 本年度的研究内容	13
1.5 研究框架与技术路线	15
2 研究地区的选取	20
2.1 建筑气候区域划分	20
2.2 我国太阳能资源分区	23
2.3 典型地区的选取	25
2.4 本章小结	31
3 典型民用建筑模型与用能特性分析	32
3.1 典型公共建筑分析模型确定	32
3.1.1 建筑分析模型	32
3.1.2 冷/热、电负荷分析设定条件	34
3.1.3 热水负荷分析设定条件	43
3.2 典型公共建筑负荷特性分析	48
3.2.1 冷/热负荷特性	48
3.2.2 电负荷特性	52
3.2.3 热水负荷特性	53
3.3 本章小结	54
4 太阳能供热系统研究（供暖、热水）	55
4.1 太阳能集热器	55
4.1.1 集热设备效率方程	55
4.1.2 太阳能集热系统的有效集热量	56
4.1.3 典型集热设备效率曲线	57
4.1.4 基于有效集热量的太阳能集热器安装优化	60
4.2 太阳能供暖系统	66
4.3 太阳能热水系统	67
4.3.1 太阳能热水系统的分类	67
4.3.2 太阳能热水系统的特点及适用性	68
4.4 太阳能蓄热系统容量确定	69
4.4.1 太阳能供热蓄热容积优化方法	70
4.4.2 准弹性多级蓄热容积系统设想	74
4.5 辅助热源	77
4.5.1 辅助热源位置设置	78
4.5.2 空气源热泵性能参数	78

4.6 本章小结	80
5 太阳能制冷系统研究	81
5.1 太阳能制冷系统	81
5.1.1 太阳能吸收式制冷	81
5.1.2 太阳能吸附式制冷	82
5.1.3 太阳能光伏直驱压缩式制冷	84
5.2 太阳能制冷系统性能	86
5.2.1 太阳能吸收式制冷性能	86
5.2.2 太阳能吸附式制冷性能	86
5.2.3 光伏直驱离心制冷机性能	87
5.3 太阳能空调技术对比分析	89
5.4 本章小结	90
6 太阳能光伏系统基础研究	91
6.1 太阳能光伏组件的性能	91
6.2 太阳能光伏系统应用适宜性分析	91
6.2.1 典型的太阳能光伏系统	91
6.2.2 光伏组件在建筑中的安装位置	93
6.3 太阳能光伏系统的安装优化	93
6.3.1 不同安装倾角时的太阳辐照量研究	94
6.3.2 不同安装倾角下的安装峰值瓦研究	98
6.3.3 光伏系统的首年发电量研究	101
6.3.4 光伏组件的经济性研究	105
6.4 本章小结	110
7 太阳能光伏系统应用研究	111
7.1 基于节能性评价的光伏系统优化	111
7.2 光伏系统经济性优化	113
7.2.1 经济性评价边界条件的确定原则	113
7.2.2 基于“投资回收期”评价基准下的不同地区典型建筑优化	114
7.2.3 基于“年度费用”评价基准下的不同地区典型建筑优化	116
7.2.4 小结	120
7.3 太阳能光伏在绿色建筑设计中的应用	120
7.4 本章小结	121
8 太阳能综合利用优化分析	123
8.1 太阳能综合利用优化模型	123
8.1.1 物理模型	123
8.1.2 数学模型	126
8.1.3 求解方法	132
8.2 综合利用优化结果与分析	133
8.2.1 节能性与经济性的归一化表述	133
8.2.2 基于节能性评价的综合利用优化结果	135
8.2.3 基于经济性评价的综合利用优化结果	138
8.3 综合利用系统优化结果影响因素分析	141

8.3.1 财政补贴对系统年计算费用的影响	141
8.3.2 税收对光伏系统年计算费用的影响	141
8.3.3 楼层数量对最优系统光伏/光热面积比的影响	142
8.4 典型系统整体性能特征分析	144
8.5 本章小结	145
9 结论与建议.....	147
9.1 结论	147
9.2 建 议	148

1 前言

1.1 研究背景

近年来，太阳能技术得到了快速发展，同时太阳能利用设备价格呈现逐年下降的趋势，导致太阳能光热、光电等单项技术在高原建筑中得到了广泛的应用。图 1.1 和图 1.2 分别表明太阳能光伏和光热的发展趋势，相比其他可再生能源类型，开发太阳能资源具有较多优势：①太阳能资源的巨大性，每年到达地球表面上的太阳辐射能约相当于 130 万亿吨标煤，其总量属现今世界上可以开发的最大能源；②太阳能资源的持久性，根据目前太阳产生的核能速率估算，其贮量足够维持上百亿年，而地球的寿命约为几十亿年，所以从这个意义上讲，太阳能是取之不尽、用之不竭的。

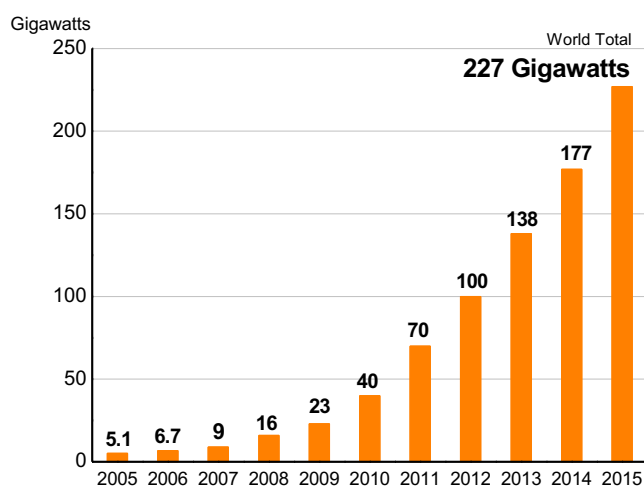


图1.1 全球太阳能光伏装机容量

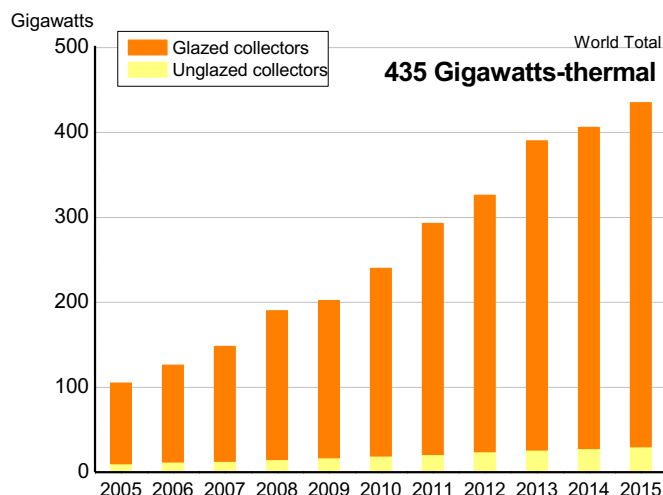


图1.2 全球太阳能光热装机容量

虽然中国已经连续 15 年成为全球最大的能源增长市场，但是能源消费增长幅度大幅下降，二氧化碳排放量自 1998 年以来首次下降，该成绩与中国大力发展可再生能源政策密不可分。我国太阳能资源非常丰富（如图 1.3 所示），全国有 2/3 以上的地区水平面上年辐照总量大于 5000MJ/m²，除了两湖地区、四川盆地、秦巴山地以外，绝大部分地区的太阳资源相当或超过国外同纬度地区的太阳能资源，具有很好的开发应用条件 and 价值。

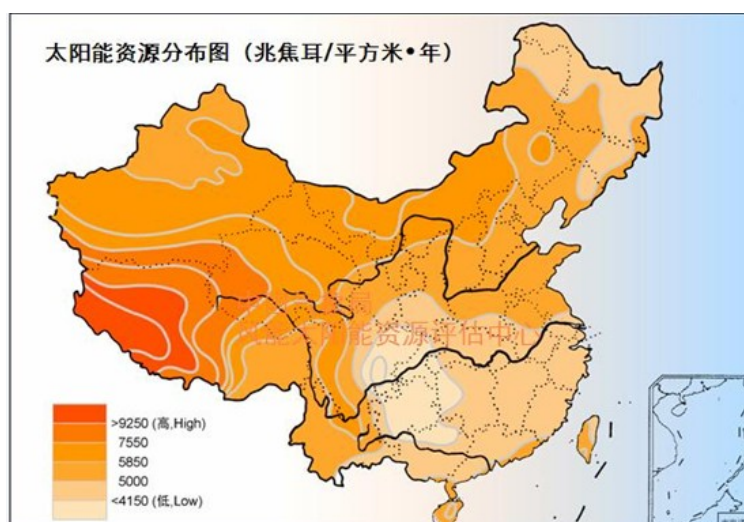


图1.3 我国太阳能资源分布

近几年中国太阳能资源得到大力发展，伴随着技术的进步和国家鼓励政策的出台，中国在太阳能光伏和光热领域迅速发展，2015 年中国太阳能光伏发电量超越德国和美国成为世界最大太阳能发电国（图 1.4 所示）。

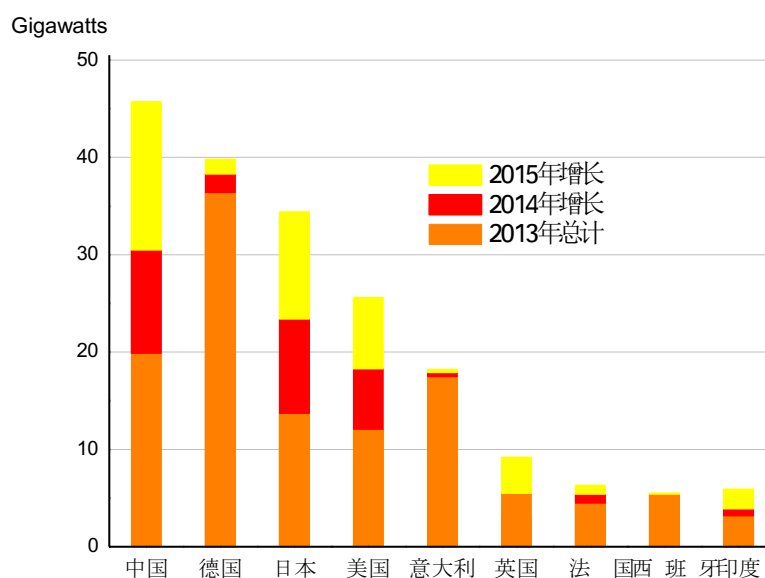


图 1.4 太阳能光伏发电量 (Top 9)

相较于光伏发电，我国太阳能光热产业起步较早，得益于国家可再生能源领域的诸多政策，光热保有量始终处于世界领先地位，但是伴随着新建建筑面积下降以及部分国家鼓励项目结束，2015 年中国太阳能光热量大幅下滑(如图 1.5)。基于太阳能资源分区及建筑热工气候分区，结合不同建筑特点，综合利用太阳能光热、光伏技术是太阳能领域可持续发展的重要技术手段。

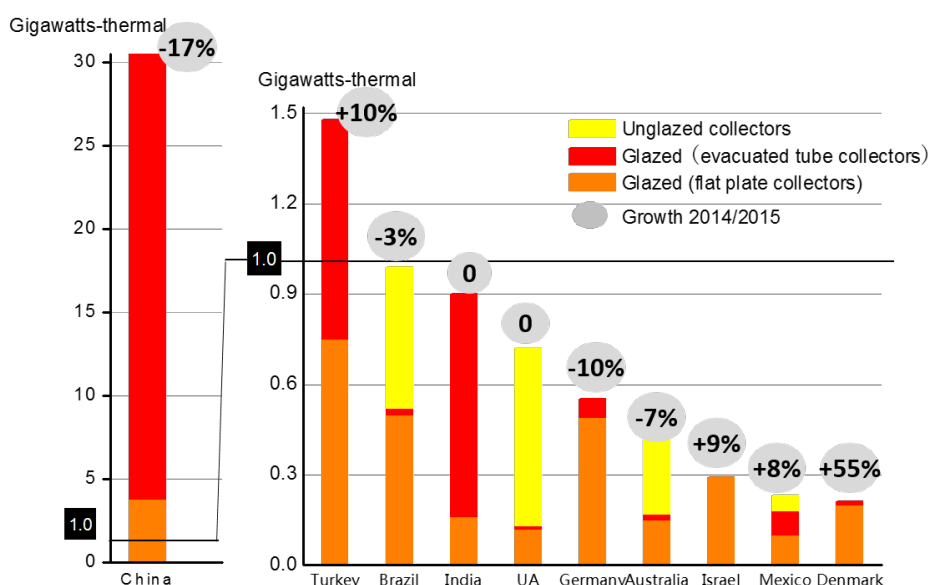


图 1.5 太阳能集热器容量 (Top 10)

1.2 国内外研究现状

1.2.1 研究现状

(1) 太阳能光伏利用

50 年代末太阳能光伏电池在太空中的成功应用，之后太阳能电池逐渐在人们生活及建筑中得到应用。Taeyon[6]对一栋光伏办公建筑，从建筑朝向、倾斜角度以及安装面积的角度分析对光伏发电性能的影响。Vats[7]针对建筑采用半透明和非透明光伏电池光伏光热系统，给出了房间空气计算模型。为了使太阳能光伏和建筑更好结合，太阳能光伏建筑一体化作为建筑设计的一种新技术被重视。Peng[8]总结了中国的太阳能光伏建筑一体化的示范案例，对光伏建筑的一体化设计给出了一些改善意见。易旷怡[9]从太阳能光伏建筑一体化协同设计的准则、前提、基础与工作机制四个层面，深入剖析数字信息技术支持的建筑设计多学科联动，可以有效地促使建筑设计中各个专业之间协同合作。任建波[10]建立了 3 种不同形式光伏屋顶和普通屋顶的一维非稳态模型，采用天津地区典型年的气象数据，考察了不同屋顶形式对建筑冷热负荷的影响，并对 3 种不同光伏屋顶系统中光伏组件的电性能进行了研究。尹宝泉[11]对多种聚光形式的 CPV/T 装置在建筑中的应用现状进行总结与分析，介绍了其中几种在建筑中应用的 CPV/T 建筑供用能系统，最后对与建筑结合的 CPV/T 系统进行了展望。

(2) 太阳能空调利用

根据不同的能量转换方式，太阳能驱动制冷主要有以下两种方式，一是先实现光—电转换，再以电力制冷；二是进行光—热转换，再以热能制冷。目前主要

有太阳能吸收式制冷、太阳能吸附式制冷和太阳能光伏直驱压缩式制冷。

吸收式制冷技术是利用吸收剂的吸收和蒸发特性进行制冷的技术，根据吸收剂的不同，分为氨-水吸收式制冷和溴化锂-水吸收式制冷两种。它以太阳能集热器收集太阳能产生热水或热空气，再用太阳能热水或热空气代替锅炉热水输入制冷机中制冷。由于造价、工艺、效率等方面的原因，这种制冷机不宜做得太小。所以，采用这种技术的太阳能空调系统一般适用于中央空调，系统需要有一定的规模。

吸附式制冷技术是利用固体吸附剂对制冷剂的吸附作用来制冷。基本的太阳能吸附式制冷系统主要由吸附床（集热器）、冷凝器、蒸发器和阀门等构成。理想的吸附工质对要求吸附量大，吸附热小，吸附质气化潜热大、热稳定性好、无污染，对太阳能吸附制冷系统，解吸温度是一个重要的性能指标。目前研究的吸附工质对主要有：沸石-水、硅胶-水、活性炭-甲醇 / 氨和氯化钙 / 氯化铬-氨等。为克服吸附式制冷基本循环间歇性制冷和能量利用率低的缺点，国内外学者提出各种先进的吸附式制冷循环，目前主要有连续回热回质型、多级复叠型、热波型和对流热波型。

太阳能光伏直驱压缩式制冷太阳能发电的一种应用，利用装置将太阳能转换为电能，然后上网发电或者直接驱动压缩机制冷。采用光伏直驱压缩式制冷时光伏发电效率为 15-18%，压缩制冷 COP 为 6.0-7.0，在非空调季节太阳能转换的电能进行余电上网。太阳能光伏直驱压缩式制冷可分为双向供电工作模式、光伏空调工作模式、纯发电模式和纯空调模式。其中双向供电工作模式是太阳能被转换为电能以后既驱动压缩机制冷，又进行上网；光伏空调工作模式是太阳能光伏转换后的电全部用于压缩机制冷；纯发电模式是太阳能光伏转换后的电全部用于上网；纯空调模式是空调直接用电，不采用太阳能光伏发电后的电。

（3）太阳能光热利用

太阳能光热利用分为被动式光热利用和主动式光热利用，其中主动式光热利用又包括采暖系统和热水系统，由于两个系统的基本构成非常相似，为此，国外太阳能界将二个系统建成一套系统，并将其称为 Solar Combisystem。

国内外学者对于太阳能在建筑中利用的研究最早侧重于太阳能被动利用。法国学者 Felix. Trombe 提出了著名的集热蓄热墙式太阳房被动式采暖方式，清华大学李元哲、甘肃省科学院王德芳、南京航空航天大学方贤德、西安建筑科技大

学刘加平、刘艳峰等在太阳房建筑热过程、被动太阳房热工原理和优化设计方法等方面取得了众多研究成果[12-17]，国内外学者开发出多种被动太阳房计算分析程序和软件。被动式太阳能利用在建筑中利用技术日益成熟。

随着主动太阳能产品的不断发展，太阳能热水和主动太阳能采暖技术在建筑中应用逐渐成为研究重点。Chung[18]给出了太阳能跨季蓄热水箱容积、集热器面积、太阳能保证率之间的计算关系。Cuadros[19]提出了可用来通过气候变量比较太阳能集热器的集热效率，以及确定供应用户生活热水和采暖的太阳能供热系统的计算程序。

中国建筑科学研究院[20]通过对太阳能集热器测试分析，给出了动态和静态测试测试方法的差异性。同济大学[21]通过数值模拟对太阳能主动系统进行了优化分析，给出了城镇住宅建筑太阳能系统与辅助能源匹配方式和以年节省费用最多为目标函数确定系统的最佳集热器面积方法。西安建筑科技大学[22-23]通过对太阳能富集地区典型城市太阳辐射及建筑热负荷日变化规律、太阳能采暖系统所需蓄热量模拟研究分析，在不同蓄热水箱平均温度与采暖系统供水温度下，给出了单位集热器面积所需蓄热水箱容积的推荐值。通过数值模拟方法，给出了间歇运行时太阳能系统末端地板辐射蓄放热过程变化特性[24]。山东建筑大学[25-26]对寒冷地区村镇学校和住宅建筑通过测试、问卷调查和数值模拟方法对太阳采暖系统相关参数进行了优化设计。

（4）太阳能主被动结合光热利用

主被动太阳能采暖技术结合是综合利用太阳能采暖的有效方式。西安建筑科技大学给出了被动和主动太阳能建筑间歇运行时热负荷特性，为主被动太阳能采暖结合利用提供了基础[27-28]。在被动太阳房动态负荷特征基础上，给出了与之匹配的间歇供暖蓄放热特性，获得间歇供暖系统运行控制策略[29]。西南交通大学[30]对西藏主被动太阳能采暖的动态设计方法、辅助热源负荷及采暖末端选择进行了分析研究，指出当采用地板辐射采暖系统时在采暖系统的控制手段上，除了采用室内温度反馈控制，还应增设太阳辐射强度、室外气温等前馈控制方式。哈尔滨工业大学和天津大学分别[31-32]针对寒冷地区村镇住宅建筑的特点对村镇建筑太阳能采暖系统设计方法和主被动结合设计进行了分析研究。

1.2.2 国内外研究问题

（1）单项技术研究方面

对于光热或光伏单项应用技术，尽管目前已经有了众多的研究，但仍然还

存在一些问题。

现有太阳能热水供暖系统的研究中对于太阳能集热量的计算方法，多以日平均或者月平均辐照量为依据（详见《太阳能供热采暖工程技术规范》）。该方法对于需要一定品质（供暖系统供水温度）要求的热水供暖系统，并不是完全适合的。原因如下：光热集热器的集热量，除了与辐照量有关外，还和室外空气温度、集热器水温以及水流量等参数相关，一些低强度的辐照量（例如早晚时段），并不能确保集热器对供暖回水进行升温（甚至还可能降温），然而现有计算方法却将其统计到了集热量之中，由此可能会导致集热面积与实际需求不一致，使得实际设计和安装的系统与项目的需求不符。

在现有的光伏系统研究中，采用的太阳辐照参数是逐月的日平均辐照强度，而未按照全年逐时进行计算。由于太阳逐时的辐照量变化剧烈，这样基于月平均或者日平均辐照值得到的光伏组件的设计与安装的最优化参数，从理论上会存在一定的误差与不足。其次，目前行业普遍提出的光伏安装最佳倾角，大都是以“峰值日照小时数”为基准来得到的，例如拉萨，按照“峰值日照小时数”得到的最佳倾角为 21.7° （当地纬度角 $29.7^{\circ}-8^{\circ}$ ）；但对这一“最佳倾角”存在质疑的两个问题是：（1）是针对发电量最大还是经济性最好所评价的“最佳”？（2）只考虑峰值日照小时数不考虑其他辐射情况是否合理？从应用研究来看，对于建筑光伏系统，如何让光伏发电与不同类型建筑不同的用电负荷匹配，在有限的建筑面积上最大限度地利用太阳能，深入研究的资料较少；同时，不同光伏组件（晶硅组件和非晶硅组件）的经济性比较，尚没有一个明确的结论。

（2）太阳能综合利用的研究方面

建筑太阳能光热光伏综合利用技术是指：根据太阳能资源富集程度、建筑气候特征以及建筑使用功能和用能特点，将太阳能光热、太阳能光伏等技术集成应用于建筑采暖、空调、照明等能源供应系统中。尤其是对于大部分建筑可利用的屋面资源有限的条件下，如何通过对多种太阳能主动利用技术的优化组合，来提高建筑太阳能的综合利用效率及经济性。

目前，关于建筑太阳能主动利用技术的相关研究，大多局限于针对上述单一技术的研发、设计与适宜性评判。而结合太阳能资源分区、建筑热工气候分区以及不同建筑特点的太阳能光热、光伏综合利用技术的研究开展尚不深入。事实上，建筑太阳能综合利用与建筑所在地区的太阳能资源状况、建筑气候特征以

及建筑使用功能密切相关。

综上所述,我国太阳能资源及其丰富,太阳能单项利用技术的研究有待进一步优化,太阳能综合利用技术尚未开展,故研究不同区域(太阳能资源分区与建筑热工分区)典型建筑太阳能光热光伏的综合利用技术,对太阳能的规模化应用与推广,以及建筑节能具有重大意义,是一项有着重要研究价值和市场应用价值的关键技术。

1.3 研究目的

按照加快培育和发展战略性新兴产业以及建立现代能源体系的要求,把加快发展太阳能作为优化能源结构、推进能源生产方式变革的重要举措。开展新型的民用建筑主动式太阳能综合利用技术研究,利用太阳能进行供热、采暖和制冷是实现规模化、低成本利用太阳能的重要途径。通过给出太阳能二区的光伏和光热综合利用模型,制定出适合城镇化的低能耗建筑实施方案,推动太阳能产业规模化发展,为实现我国非化石能源发展目标和经济社会可持续发展开辟新途径。

1.4 研究内容

1.4.1 总体研究内容

(1) 确定太阳能利用的典型建筑类型,并分析其负荷特征和用能曲线

通过调研、文献搜集,并结合建筑功能、使用特点和建筑用能负荷特征,建立典型建筑模型,结合气象数据(包含太阳辐射、温度、湿度等气象要素),分析各建筑在不同的气候条件下的负荷特征和用能曲线。建筑模型的设置综合考虑不同地区、不同建筑模型建筑围护结构、人员密度、新风量等影响建筑负荷特征因素的变化。根据所确定的典型建筑,通过计算分析,得到建筑全年逐时用能数据(或曲线)。

(2) 调研收集太阳能利用设备基础参数

通过对目前常采用的集热设备(平板集热器、真空管集热器、聚光型集热器)、光伏发电设备及其它太阳能利用设备(太阳能吸收式热泵、太阳能吸附式制冷设备、太阳能喷射式制冷设备、太阳能照明设备等),进行调研,获得适用于不同建筑各规格设备的性能、效率等基础参数,为太阳能光热、光伏综合利用评价模型建立提供基础数据。

(3) 建立不同区域典型公共建筑太阳能综合利用评价模型

基于所确定的典型建筑模型、太阳能利用设备基础参数、太阳能资源分布、不同热工气候分区的气象条件，建立太阳能能源综合利用（光热和光伏）效率最大化的优化分析模型。如图 1.6 所示。该评价模型主要用以评价建筑中使用不同比例的太阳能光伏、太阳能热水、太阳能采暖以及太阳能制冷的综合用能效率，即评价太阳能综合利用技术的总体效能，为后期推荐出太阳能综合利用的优化组合模式提供理论基础。

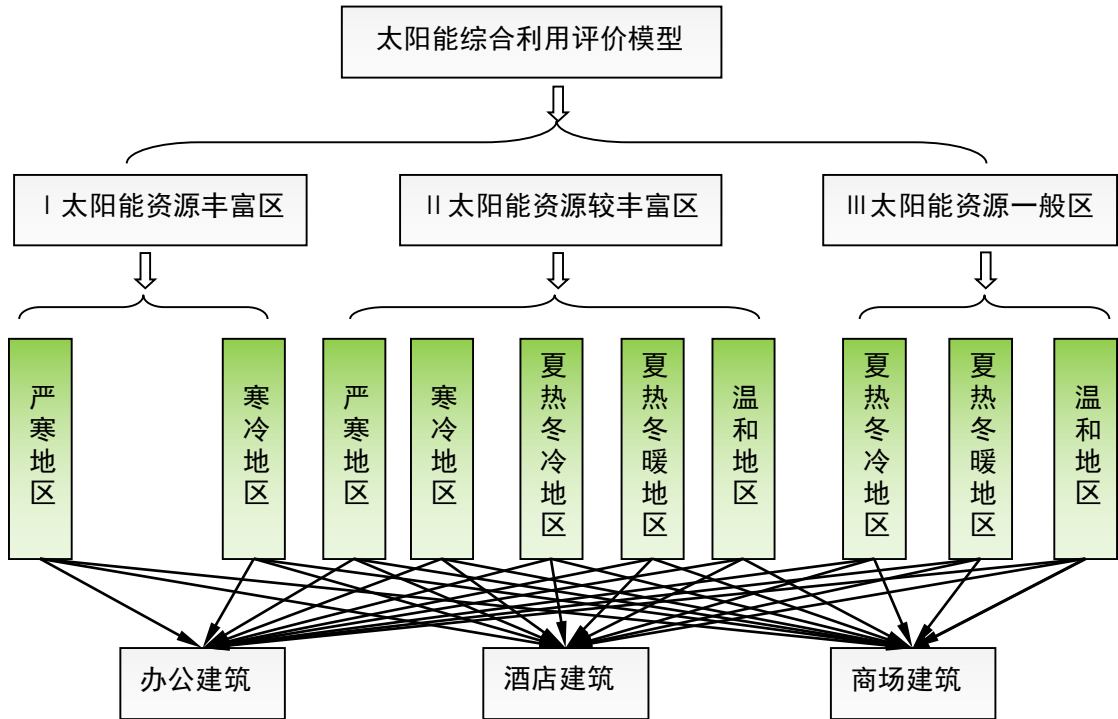


图 1.6 太阳能综合利用评价模型分类图

(4) 推荐出典型公共建筑太阳能综合利用的优化组合模式

利用所建立的典型公共建筑太阳能综合利用的分析评价模型，针对不同区域（按照太阳能资源分区与建筑热工分区分类）典型公共建筑（办公建筑、酒店建筑、商场建筑）进行分析计算，分别给出不同区域（不同太阳能资源和建筑热工气候区）典型公共建筑太阳能综合利用的优化组合模式。

1.4.2 本年度的研究内容

图 1.6 所开展研究内容非常多，为了保证研究深度与进度，需要分步骤来进行。因此本年度仅针对太阳能资源丰富区（II 区）进行研究（如图 1.7 所示）：

- (1) II 区太阳能利用的典型建筑模型及用能曲线；
- (2) 开展太阳能利用系统的基础参数研究；
- (3) 建立太阳能能源综合利用（光热和光伏）效率(考虑了能源品味)最大

化的优化分析模型；

(4) 完成太阳能资源Ⅱ区综合利用优化组合模式。

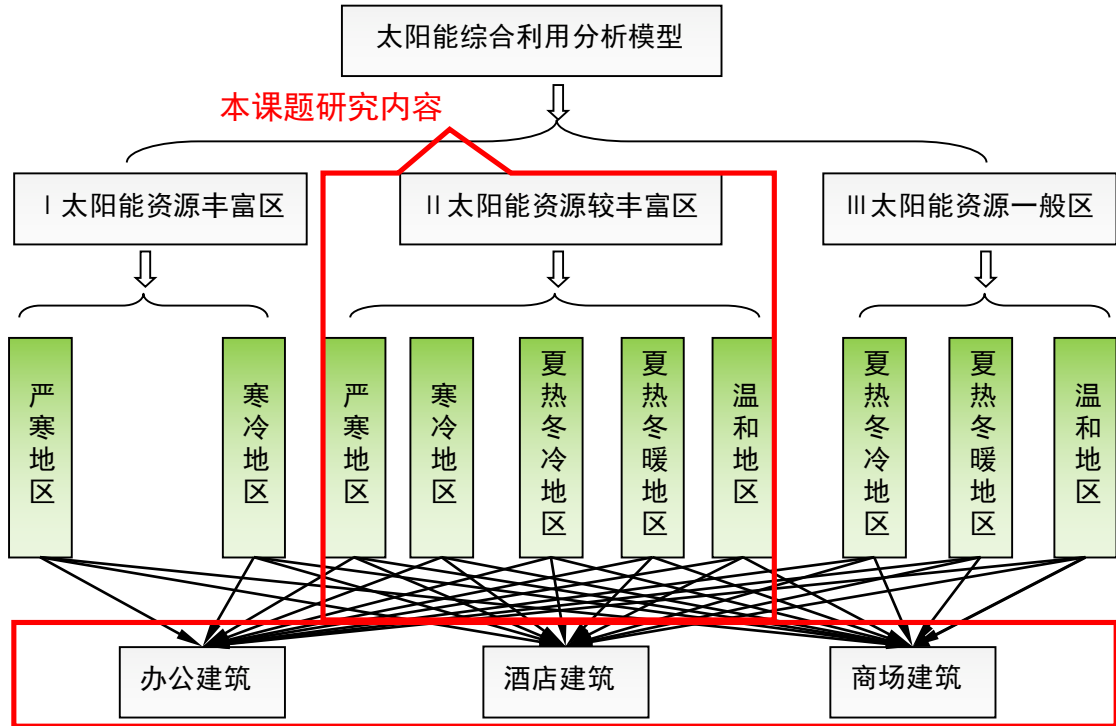
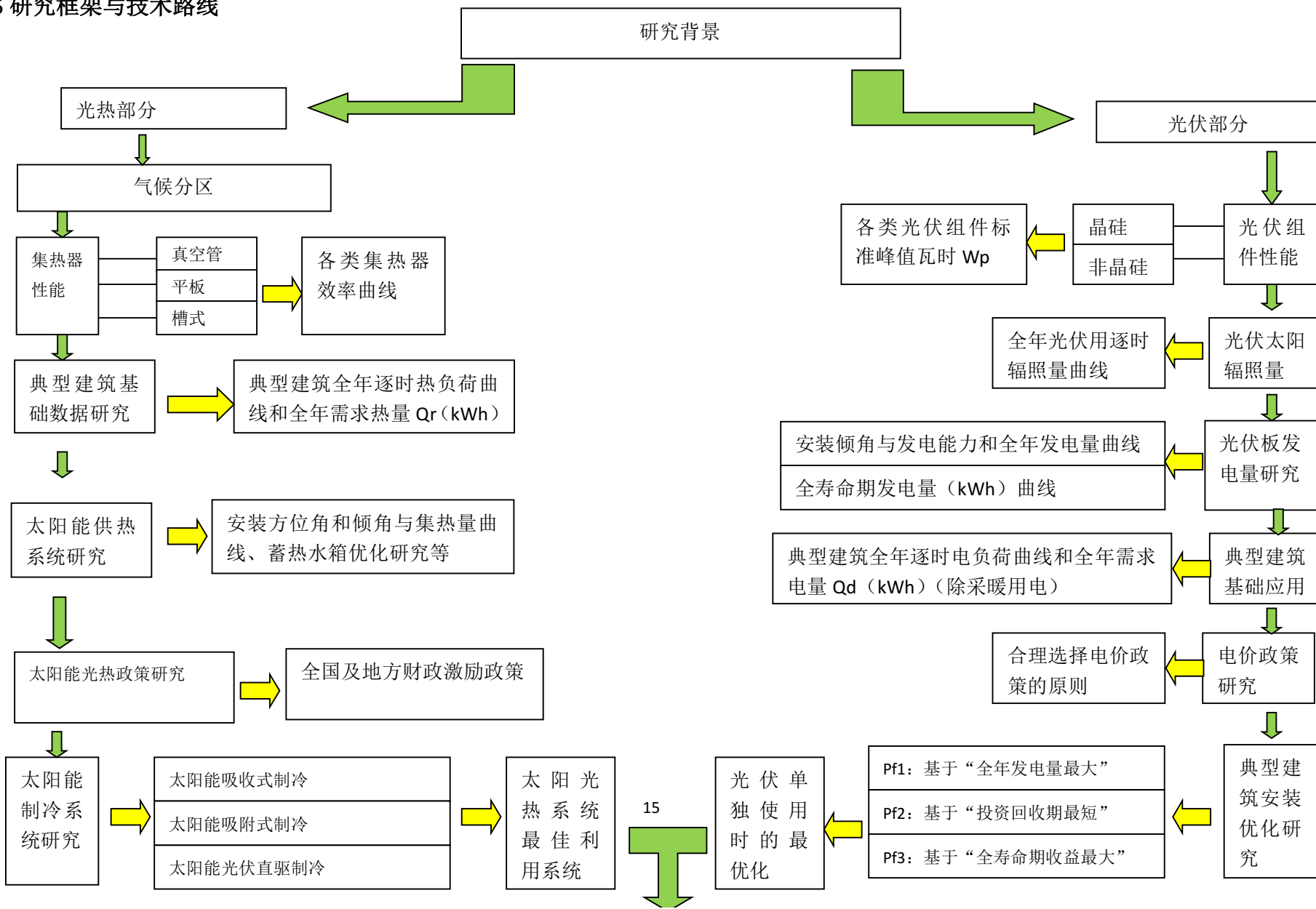
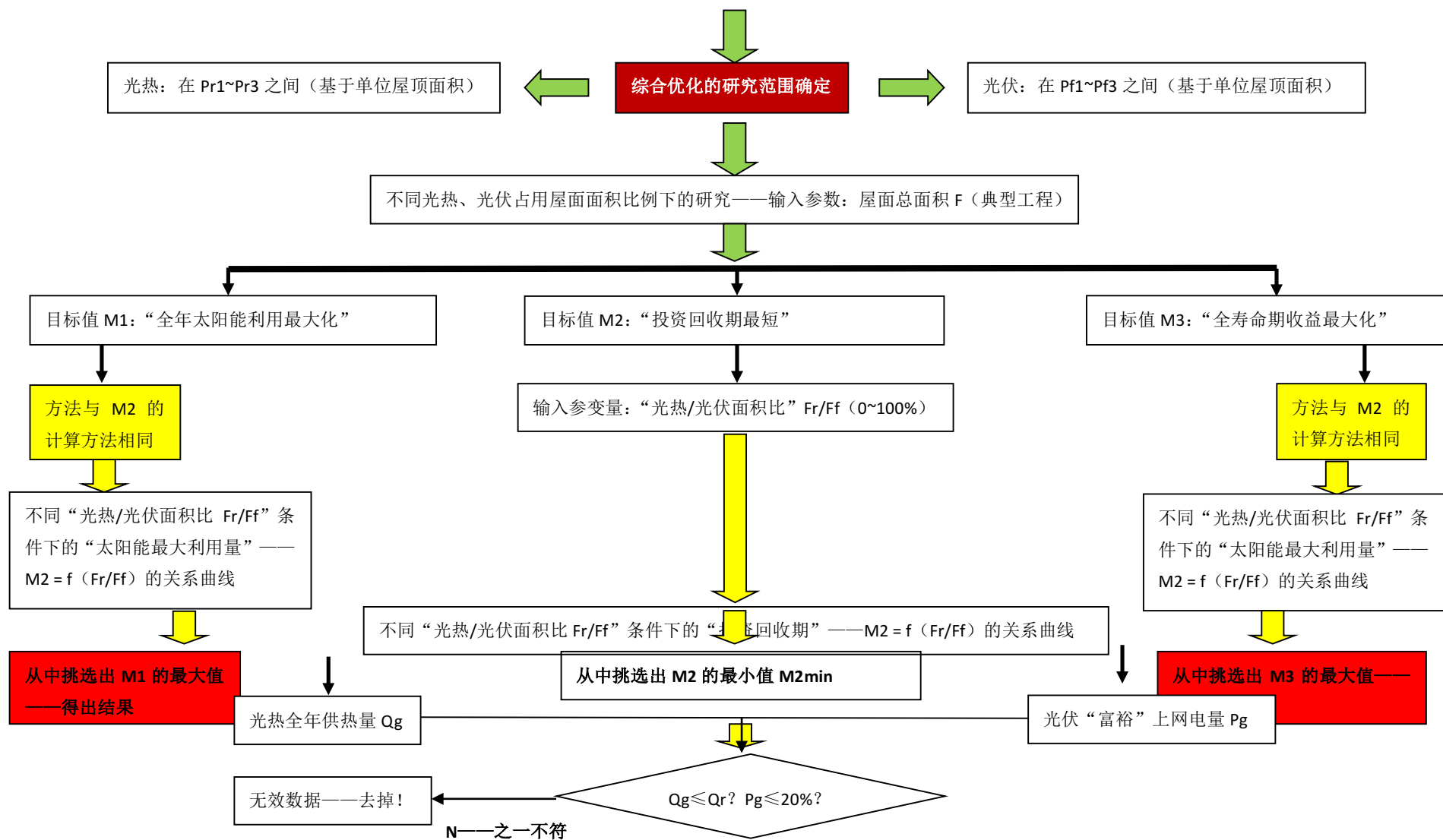
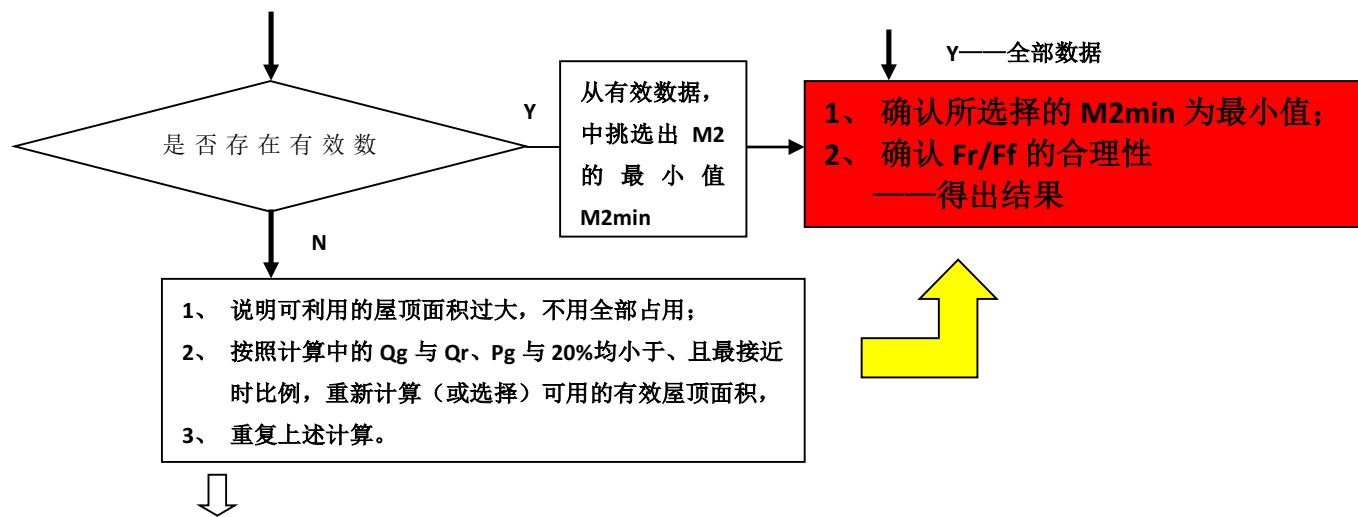


图 1.7 本年度研究任务

1.5 研究框架与技术路线







*注: 从目前的计算结果看, 这个情况可能不会出现。以为即使光伏系统上网电量超过 20%, 其全寿命期的效益也是在增加的 (单位屋面面积的效益有所下降——见后面的图, 但总效益“面积 x 单位面积效益”还是在不断增加的。因此, 也可以只对 $Q_g \leq Q_r$? 进行评价即可。前面第 3 部分中, 关于光伏容量的限值可能是不尽合理的——光热与光伏不同, 光热无法通过输出销售得到效益。

参考文献

- [1] 江亿, 冯雅, 戎向阳等. 对拉萨城市供暖模式的探讨[J].暖通空调, 2013,43 (6): 1-7.
- [2] 罗继杰, 张蔚东, 李靖等.严寒条件下边防营区及哨所点位供暖技术的探索与应用[J].暖通空调, 2013,43 (6): 8-14.
- [3] T.T.Chow, A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology[J].Applied Energy, 2010,87 (2): 265-379.
- [4] Bin Jiang, Jie Ji, Hua Yi.The influence of PV coverage ratio on thermal and electrical performance of photovoltaic-Trombe wall[J].Renewable Energy, 2008,33 (11): 2491-2498.
- [5] 郭志球, 沈辉, 刘正义等.太阳电池研究进展[J].材料导报, 2006,20 (3): 41-43.
- [6] Taeyon H, Seokyojin K, Jeong Tai K. Optimization of the building integrated photovoltaic system in office buildings-Focus on the orientation, inclined angle and installed area[J].Energy and Buildings, 2012,46:92-104.
- [7] Vats K, Tiwari G N. Performance evaluation of a building integrated semitransparent photovoltaic thermal system for roof and facade[J]. Energy and Buildings, 2012,45:211-218.
- [8] Changhai P, Ying H, Zhishen W. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(12): 3592-3598.
- [9] 易旷怡. 太阳能光伏建筑一体化协同设计研究[D]. 北京交通大学学位论文, 2013.
- [10] 任建波, 李忠伟, 王一平等.屋顶光伏与建筑负荷之间的相互影响[J].太阳能学报, 2008,29 (7): 849-854.
- [11] 尹宝泉, 王一平, 朱丽等.聚光光伏电热联用系统在建筑中的应用现状及展望[J]. 太阳能学报, 2012,33 (增刊): 77-82.
- [12] 李元哲, 等. 被动式太阳房的原理及设计. 北京: 能源出版社, 1989.
- [13] 王德芳, 午锁平, 喜文华. 被动式太阳能采暖房数学模型及模拟计算程序—直接受益型和集热墙型 PSHDC (上篇) [J].甘肃科学学报, 1989, 1 (1): 1-8.
- [14] 方贤德. 被动式太阳房的通用模拟程序[J]. 太阳能学报, 1994, 15 (4): 363-367.
- [15] 刘加平. 被动式太阳房动态模型研究[J].西安冶金建筑学院学报, 1994, 26 (4): 343-348.
- [16] Liu Yanfeng,Wang Dengjia, Ma Chao, Liu Jiaping. A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of a trombe wall[J]. Solar Energy, 2013, 91:1-10.
- [17] J.D.Balcomb,J.C.Hedstrom,R.D.McFarland. Simulation analysis of passive solar heated buildings Preliminary results[J]. Solar Energy, 1977, 19(3):277-282.

- [18] Mo. Chung, Jlin-un Park, Hyung-kee Yoon. Simulation of a Central Solar Heating System with Seasonal Storage In Korae[J]. Solar Energy, 1998, 64:163-178.
- [19] F. Cuadros, F. Lopez-Rodriguez, C. Segador, et al. A simple procedure to size active solar heating schemes for low-energy building design[J]. Energy and Buildings, 2007, 39: 96-104.
- [20] 孙峙峰, 郑瑞澄. 太阳能集热器热性能动态测试方法研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(11): 1194-1199.
- [21] 卜亚明. 太阳能采暖系统在小城镇住宅建筑中应用技术的研究[D]. 同济大学学位论文, 2006.
- [22] 刘艳峰, 王登甲. 太阳能地面采暖系统蓄热水箱容积分析[J]. 太阳能学报 2009 (12): 1636-1639.
- [23] 王登甲. 太阳能富集地区主动太阳能热水采暖蓄热系统优化设计[D]. 西安建筑科技大学学位论文, 2009.
- [24] Wang Dengjia, Liu Yanfeng, Wang Yingying, Liu Jiaping. Numerical and experimental analysis of floor heat storage and release during an intermittent in-slab floor heating process[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 398-406.
- [25] 王新彬. 寒冷地区村镇学校建筑太阳能采暖技术应用研究[D]. 山东建筑大学学位论文, 2010.
- [26] 康玉东. 寒冷地区村镇住宅建筑太阳能采暖系统研究[D]. 山东建筑大学学位论文, 2011.
- [27] 汪海涛. 主动式太阳能采暖间歇运行热负荷特性研究[D]. 西安建筑科技大学, 2010.
- [28] 袁伟. 拉萨市太阳能建筑间歇采暖负荷特性研究[D]. 西安建筑科技大学, 2011.
- [29] 王登甲. 间歇采暖太阳能建筑热过程及设计优化研究[D]. 西安建筑科技大学, 2010.
- [30] 王磊. 西藏地区被动太阳能建筑采暖研究[D]. 西南交通大学学位论文, 2008.
- [31] 张思思. 村镇住宅太阳能采暖与热水供应技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [32] 王凯中. 寒冷地区农村住宅太阳能采暖技术利用[D]. 天津大学, 2010.

2 研究地区的选取

2.1 建筑气候区域划分

民用建筑的规划、设计应与各地的气候条件相适应。根据各地温度、湿度、降水量等气候参数的不同，将全国划分为不同建筑气候区。本研究参考《民用建筑热工设计规范》和《建筑气候区划标准》两个规范。

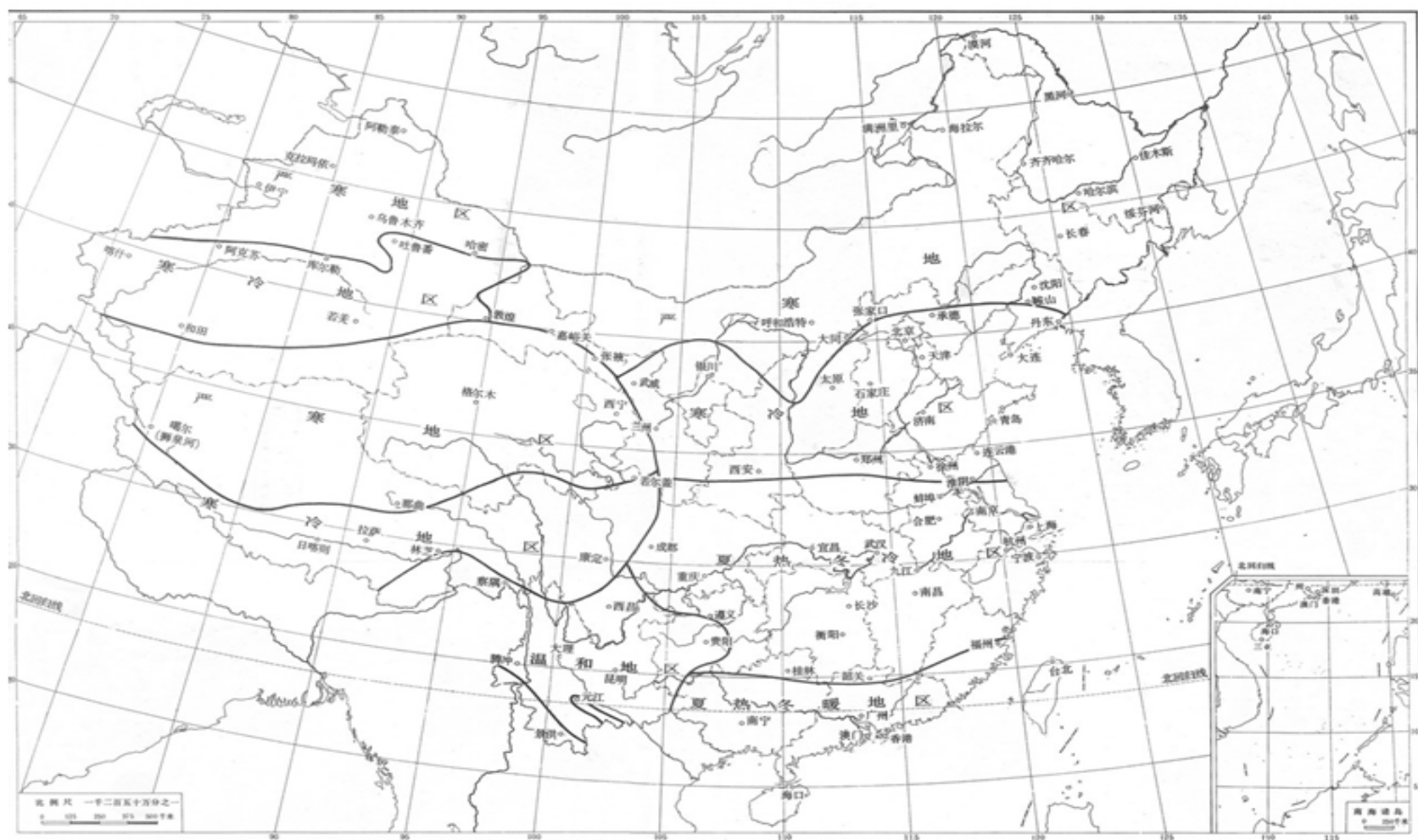
《民用建筑热工设计规范》将我国分为 5 个地区，如图 2.1 所示。建筑热工设计分区为两级。一级分区的区划指标及设计要求应符合表 2.1 的规定。

表 2.1 建筑热工设计一级分区区划指标及设计要求

一级分区 名称	区划指标		设计要求
	主要指标	辅助指标	
严寒地区（1）	$t_{\min\cdot m} \leq -10^{\circ}\text{C}$	$145 \leq d_{\leq 5}$	必须充分满足冬季保温要求，一般可以不考虑夏季防热
寒冷地区（2）	$-10^{\circ}\text{C} < t_{\min\cdot m} \leq 0^{\circ}\text{C}$	$90 \leq d_{\leq 5} < 145$	应满足冬季保温要求，部分地区兼顾夏季防热
夏热冬冷地区（3）	$0^{\circ}\text{C} < t_{\min\cdot m} \leq 10^{\circ}\text{C}$	$0 \leq d_{\leq 5} < 90$	必须满足夏季防热要求，适当兼顾冬季保温
	$25^{\circ}\text{C} < t_{\max\cdot m} \leq 30^{\circ}\text{C}$	$40 \leq d_{\geq 25} < 110$	
夏热冬暖地区（4）	$10^{\circ}\text{C} < t_{\min\cdot m}$	$100 \leq d_{\geq 25} < 200$	必须充分满足夏季防热要求，一般可不考虑冬季保温
	$25^{\circ}\text{C} < t_{\max\cdot m} \leq 29^{\circ}\text{C}$		
温和地区（5）	$0^{\circ}\text{C} < t_{\min\cdot m} \leq 13^{\circ}\text{C}$	$0 \leq d_{\leq 5} < 90$	部分地区应考虑冬季保温，一般可不考虑夏季防热
	$18^{\circ}\text{C} < t_{\max\cdot m} \leq 25^{\circ}\text{C}$		

注： $t_{\min\cdot m}$ 表示最冷月平均温度； $t_{\max\cdot m}$ 表示最热月平均温度

$d_{\leq 5}$ 表示日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数； $d_{\geq 25}$ 表示日平均温度 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 的天数



附图A.0.1 全国建筑热工设计分区图

本图上中国国界线系按中国地图出版社1989年出版的《中华人民共和国地形图》绘制

图 2.1 全国建筑热工设计分区

全国建筑热工设计分区在各一级分区内，采用 HDD18、CDD26 作为二级分区的区划指标，将各一级分区细化。各二级分区的区划指标应符合表 2.2 的规定，全国主要城市的二级分区区属应符合表 2.2 的规定。

表 2.2 建筑热工设计分区二级区划指标及设计要求

二级分区名称	区划指标	设计要求
严寒 A 区 (1A)	$6000 \leq \text{HDD18}$	冬季保温要求极高
严寒 B 区 (1B)	$5000 \leq \text{HDD18} < 6000$	冬季保温要求非常高
严寒 C 区 (1C)	$3800 \leq \text{HDD18} < 5000$	冬季保温要求较高
寒冷 A 区 (2A)	$2000 \leq \text{HDD18} < 3800$ $\text{CDD26} \leq 90$	冬季保温要求高，无夏季防热要求
寒冷 B 区 (2B)	$2000 \leq \text{HDD18} < 3800$ $\text{CDD26} > 90$	冬季保温要求高，有夏季防热要求
夏热冬冷 A 区 (3A)	$1200 \leq \text{HDD18} < 2000$	冬季保温、夏季防热兼顾
夏热冬冷 B 区 (3B)	$700 \leq \text{HDD18} < 1200$	夏季防热为主、冬季保温为辅
夏热冬暖 A 区 (4A)	$500 \leq \text{HDD18} < 700$	夏季防热为主，有冬季保温要求
夏热冬暖 B 区 (4B)	$\text{HDD18} < 500$	夏季防热为主，无冬季保温要求
温和 A 区 (5A)	$10 > \text{CDD26}$ $700 \leq \text{HDD18} < 2000$	有冬季保温需求，无夏季防热要求
温和 B 区 (5B)	$10 > \text{CDD26}$ $\text{HDD18} < 700$	保温、隔热要求不突出

《建筑气候区划标准》中建筑气候区的划分适用于一般的民用建筑的规划、设计与施工，标准中将建筑气候的区划系统分为一级区和二级区两级：一级区划分为 7 个区，二级区划分为 20 个区。一级区划以 1 月平均气温、7 月平均气温、7 月平均相对湿度为主要指标；以年降水量、年日平均气温低于或等于 5℃ 的日数和年日平均气温高于或等于 25℃ 的日数为辅助指标；在各一级区内，分别选取能反映该区建筑气候差异性的气候参数或特征作为二级区划指标。

第 I 建筑气候区：该区冬季漫长严寒，夏季短促凉爽；西部偏于干燥，东部偏于湿润；气温年较差很大；冰冻期长，冻土深，积雪厚；太阳辐射量大，日照丰富；冬半年多大风。

第 II 建筑气候区：该区冬季较长且寒冷干燥，平原地区夏季较炎热湿润，高原地区夏季较凉爽，降水量相对集中；气温年较差较大，日照较丰富；春、秋季短促，气温变化剧烈；春季雨雪稀少，多大风风沙天气，夏秋多冰雹和雷暴；

第 III 建筑气候区：该区大部分地区夏季闷热，冬季湿冷，气温日较差小；年降水量大；日照偏少；春末夏初为长江中下游地区的梅雨期，多阴雨天气，常有大雨和暴雨出现；沿海及长江中下游地区夏秋常受热带风暴和台风袭击，易有暴雨大风天气。

第 IV 建筑气候区：该区长夏无冬，温高湿重，气温年较差和日较差均小；雨量丰沛，多热带风暴和台风袭击，易有大风暴雨天气；太阳高度角大，日照较小，太阳辐射强烈；

第 V 建筑气候区：该区立体气候特征明显，大部分地区冬温夏凉，干湿季分明；常年有雷暴、多雾，气温的年较差偏小，日较差偏大，日照较少，太阳辐射强烈，部分地区冬季气温偏低；

第 VI 建筑气候区：该区长冬无夏，气候寒冷干燥，南部气温较高，降水较多，比较湿润；气温年较差小而日较差大；气压偏低，空气稀薄，透明度高；日照丰富，太阳辐射强烈；冬季多西南大风；冻土深，积雪较厚，气候垂直变化明显；

第 VII 建筑气候区：该区大部分地区冬季漫长严寒，南疆盆地冬季寒冷；大部分地区夏季干热，吐鲁番盆地酷热，山地较凉；气温年较差和日较差均大；大部分地区雨量稀少，气候干燥，风沙大；部分地区冻土较深，山地积雪较厚；日照丰富，太阳辐射强烈；

两本标准的基本目的均为在保证建筑室内环境的同时尽量节约能源，且建筑热工设计分区与建筑气候区域的划分主要指标很一致，故两者的区域划分是可以相互兼容的。

2.2 我国太阳能资源分区

太阳是一个巨大的炽热球体，不断的进行热核反应，从而释放出巨大能量。人们肉眼所见到光耀夺目的太阳表面叫“光球”，“太阳能”的绝大部分是由此发射出来的。光球以电磁波的形式向宇宙空间辐射能量，总称为太阳辐射。太阳辐射的总功率为 $3.86 \times 10^{26} \text{ W}$ ，而到达地球表面的太阳能辐射总功率为 $1.7 \times 10^{17} \text{ W}$ ，仅占太阳总能量的二十亿分之一。

我国，西藏西部太阳能资源最丰富，有 2/3 以上的地区的年太阳辐照量超过 5000 MJ/m^2 ，年日照小时数在 2200h 以上。最高达 2333 KWh/m^2 （日辐射量 6.4 KWh/m^2 ），居世界第二位，仅次于撒哈拉大沙漠。

根据各地接受太阳总辐射量的多少，可将全国划分为五类地区。我国不同太阳能资源等级的水平面上年太阳辐照量、年日照小时数以及主要的代表地区，如下表所示：

表 2.3 全国太阳能利用区划特征

等级分区	年太阳辐照量 (MJ/m ² ·年)	主要地区
I 太阳能资源 丰富区	>6280	新疆南部、甘肃西北一角
		新疆南缘、西藏北部、青海西部
		甘肃西部、内蒙古巴彦淖尔盟西部、青海一部分
		青海南部、西藏大部分
		青海西南部
		内蒙古乌兰察布盟、巴彦淖尔盟及伊克昭盟一部分

等级分区	年太阳辐照量 (MJ/m ² ·年)	主要地区
II 太阳能资源 较丰富区	5020~6280	新疆北部
		黑龙江、吉林大部分、内蒙古呼伦贝尔盟、陕北及甘肃东部一部分
		内蒙古锡林郭勒盟、乌兰察布、河北北部
		吉林、辽宁、长白山地区
		山西北部、河北北部、辽宁大部分、河北大部分、北京、天津、山东西北部
		山西南部、河南大部及安徽、山东、江苏部分、四川南部、云南南部一部分
		内蒙古伊克昭盟大部分
		青海东部、甘肃南部、四川西部
		西藏东部、四川西部和云南北部一部分
		云南南部、福建、广东沿海一带
III 太阳能资源一般区	4190~5020	海南
		湖南、安徽、江苏南部、浙江、江西、福建、广东北部
		湖南东部和广西大部分
		湖南西部、广西北部一部分、湖北、河南西部
IV 太阳能资源贫乏区	<4190	陕西南部、四川西部、贵州西部、云南东南一隅、广西西部
		四川、贵州大部分 成都平原

图 2.2 表示的是我国太阳能资源分布图,可以直观地了解我国太阳能资源的划分情况,其中蓝线表示太阳能资源分区、红线表示气候分区。由图可知,我国太阳能资源的丰富区、较丰富区的总和占全国国土面积的一半以上。尤其是采暖地区大部分处于资源丰富区,且大部分的采暖地区太阳能日照主峰值的出现月与采暖期同现,因此我国拥有优越的利用太阳能采暖得自然条件。

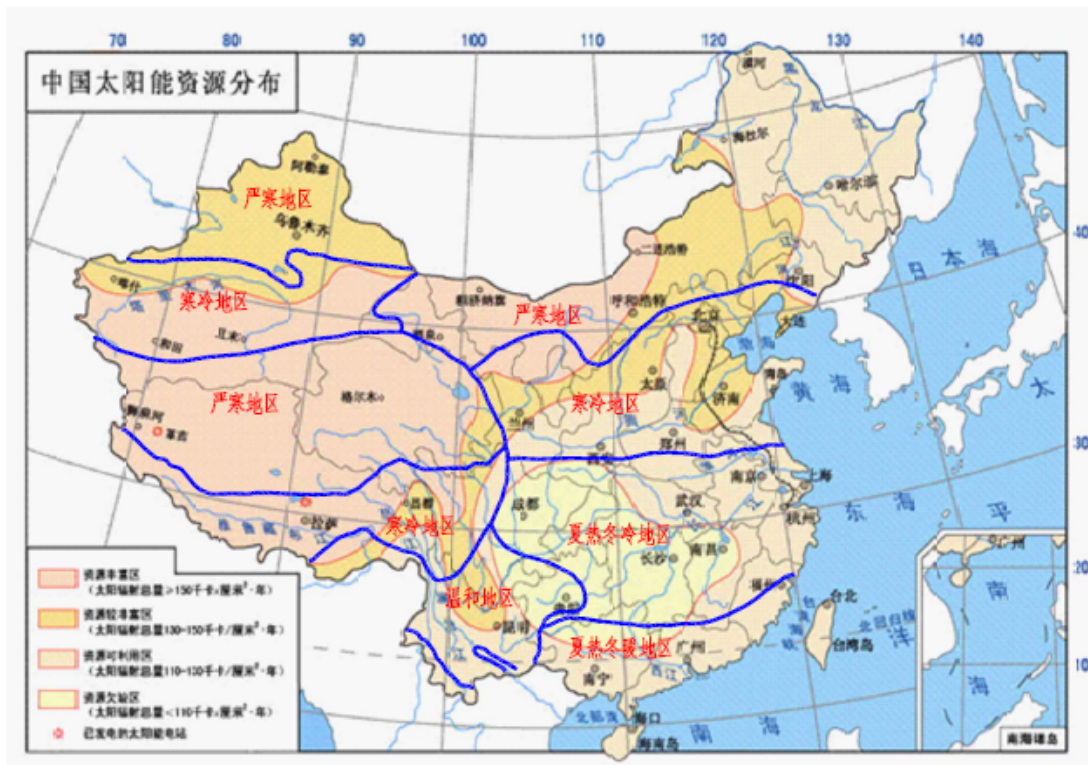


图 2.2 中国太阳能资源分布图

2.3 典型地区的选取

根据总体研究项目的安排和计划，本子项研究主要针对太阳能资源丰富区（Ⅱ区）进行研究，从气候特征分析可知，太阳能资源丰富区（Ⅱ区）包括的热工气候区为严寒、寒冷、温和地区，如图 2.2 所示。

根据前述介绍，西宁的年日照时数为 2400-3000 小时，年日照百分率为 62%；银川的年日照时数为 2800-3000 小时，年日照百分率 69%；西昌的年日照时数为 2423.1，年日照百分率为 55%；西宁、西昌和银川属于太阳能资源较丰富区（Ⅱ区），三地区的日照率均达到了 55%以上，具有一定典型性。由于太阳能在过高的建筑甚至超高层建筑的利用上，体现不出明显的优势和特点，因此，本研究在选取地点时，并没有完全选择国内经济最发达的城市（如北京），而是选择一些中等经济发展的城市，这样无论对于太阳能利用还是本研究在国内应用成果的推广范围的扩大，都具有更好的意义。

其中西宁最冷月平均气温为-7.4℃，极端最低温度为-24.9℃，日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数为 162 天，属于建筑热工分区的严寒地区；银川最冷月平均气温为-8.0℃，极端最低温度为-27.7℃，日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数为 137 天，属于建筑热工分区的寒冷地区；西昌最冷月平均气温为 9.8℃，极端最低温度为-3.8℃，日平均温度 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ 的天数为 14 天，属于建筑热工分区的温和地区；选取这三个地区对太阳能资源较丰富区（Ⅱ区）的严寒、

寒冷和温和地区太阳能综合利用特征分别展开研究，具有较好的代表意义。

综上所述，本项研究决定选取西宁、银川、西昌地区的酒店、办公与商场建筑作为研究对象，研究地区如下图所示。

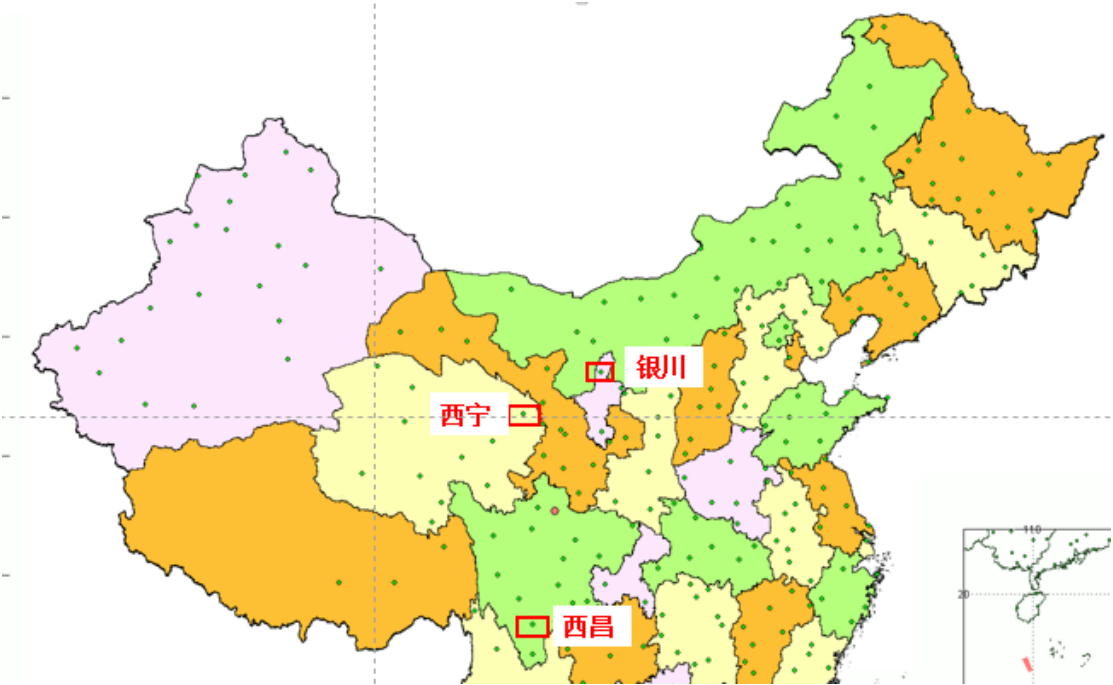


图 2.3 研究地点选取

《建筑气候区划标准》中提供了西宁、西昌和银川三个城市的基本气候参数，如下表所示，可以看出，三个城市年日照率较为接近，年日照时数基本达到了 2000 小时，日照率均达到了 50%以上。

表 2.4 主要气候参数表

地名	气象台站位置			大气压力（hpa）			
	北纬	东经	海拔 高度（m）	年平均	夏季 平均	冬季 平均	
西宁	36.62	101.77	2296	771.99	773.40	770.57	
西昌	27.90	102.27	1591	837.45	834.23	840.67	
银川	38.47	106.20	1112	889.35	881.37	897.33	
地名	温度/辐照				平均风速		
	最冷月 平均气温	最热月平 均气温	1 月总辐射 （MJ/m ² ）	7 月总辐射 （MJ/m ² ）	年最多 风向	夏季	冬季
西宁	-6.9	17.7	289.5	700.4	SE	1.5	0.7
西昌	9.8	22.5	370.6	447.1	N	2.2	1.4
银川	-6.0	23.7	312.0	684.5	N	2.4	1.4

此次研究采用《建筑节能气象参数标准》JGJ/T346-2014 及《中国建筑热环境分析专用气象数据集》提供的拉萨与格尔木地区典型气象年数据。

西宁市东经 101°77'、北纬 36°62'，位于青海省东北部，青藏高原东北部，地处湟水及三条支流的交汇处境内最高海拔 4394 米，市区中心海拔 2275 米。年平均日照为 1939.7 小时，气候干燥，日照时间长，太阳辐射强，平均气温低，日温差大。西宁地区水平面总辐射强度及散射辐射强度如下图所示：

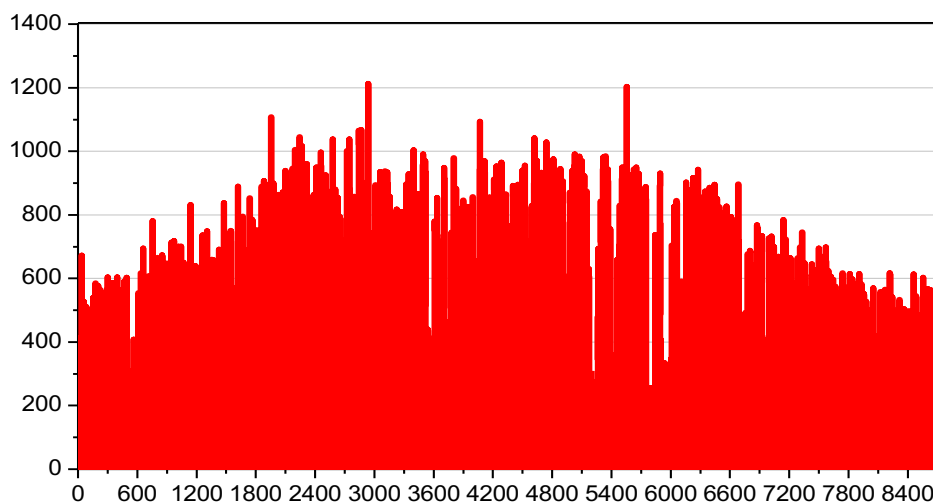


图 2.4 西宁水平面逐时总辐射强度 (W/m^2)

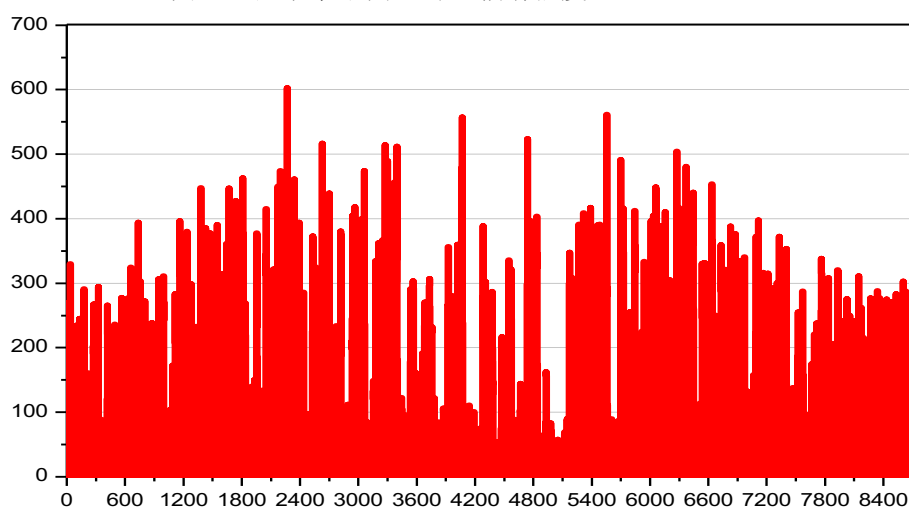


图 2.5 西宁水平面逐时散射辐射强度 (W/m^2)

西宁市属大陆性高原半干旱气候。其特点是：气压低、日照长，雨水少，蒸发量大，太阳辐射强，日夜温差大，无霜期短，冰冻期长，冬无严寒，夏无酷暑。全年平均气温为 6°C 左右，这里为黄河湟水谷地暖区，冬季受冷空气影响较少，因而冬无严寒，一月份的平均气温为零下 7°C 左右；夏无酷暑，6-8 月的月平均温度只有 $15\sim 17^{\circ}\text{C}$ ，平均最高气温在 25°C 以下。逐时干球温度变化如下图所示：

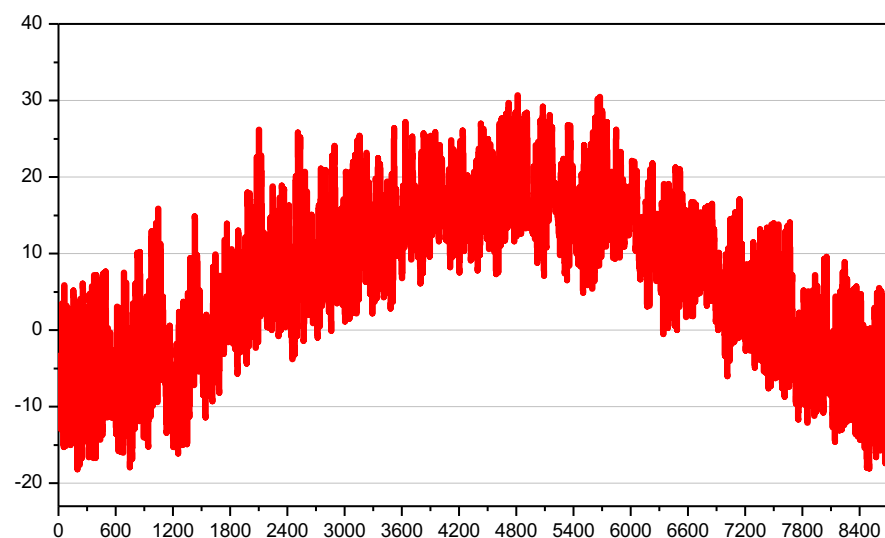


图 2.6 西宁地区逐时干球温度

银川位于东经 $106^{\circ}20'$ 、北纬 $38^{\circ}47'$ ，地处中国西北地区宁夏平原中部，年平均日照时数 2800 小时~3000 小时，是中国太阳辐射和日照时数最多的地区之一。银川地区水平面总辐射强度及散射辐射强度如下图所示：

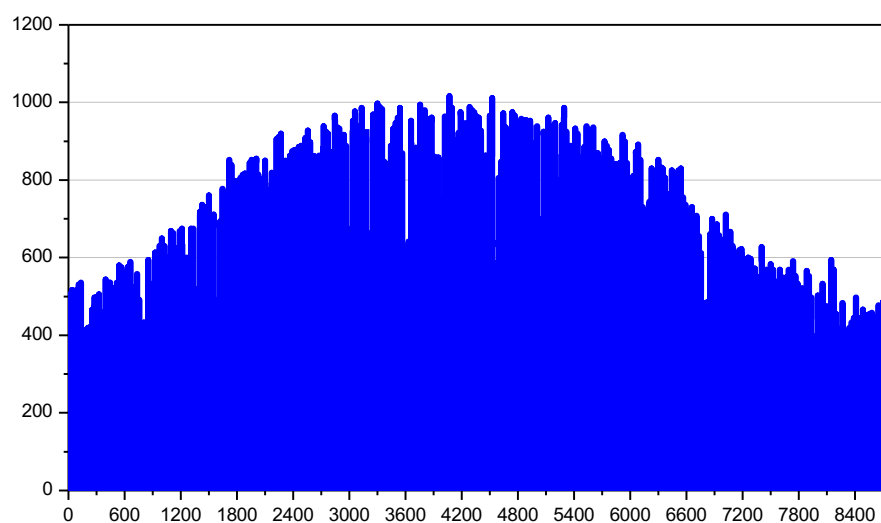


图 2.7 银川水平面逐时总辐射强度 (W/m^2)

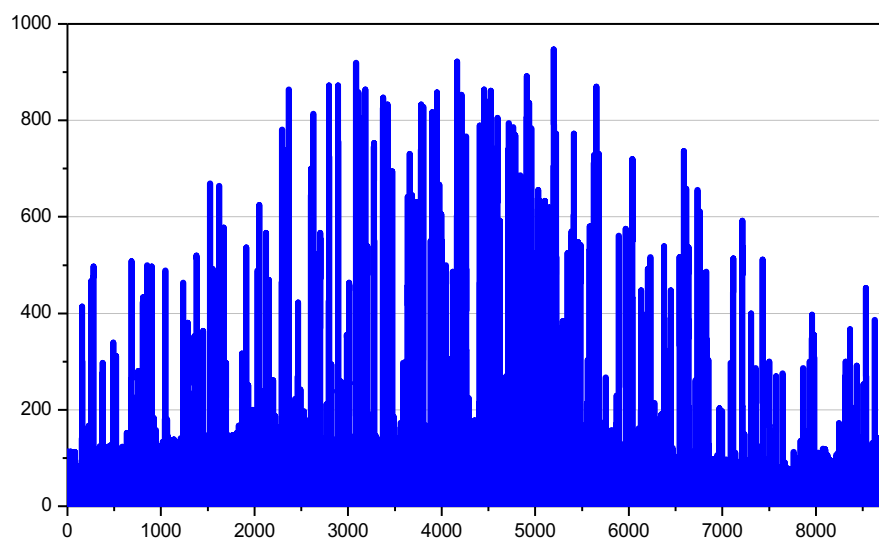


图 2.8 银川水平面逐时散射辐射强度 (W/m^2)

银川属中温带大陆性气候，年平均气温 8.5°C ，日温差 $12\text{--}15^\circ\text{C}$ ，年平均降水量 203 毫米，无霜期 157 天左右。主要气候特点是：冬寒长、春暖快、夏热短、秋凉早，干旱少雨，日照充足，蒸发强烈，昼夜温差大等。银川地区逐时干球温度变化如下图所示：

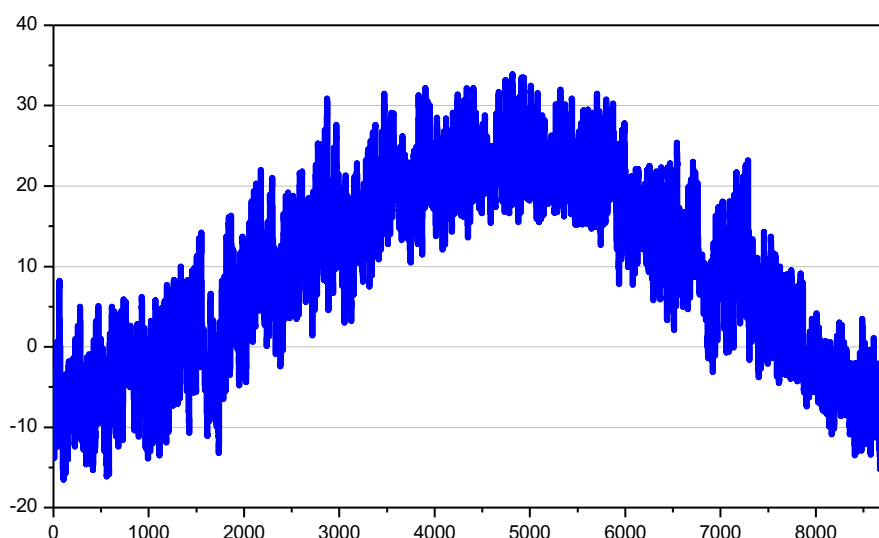


图 2.9 银川逐时干球温度

西昌东经 $102^\circ27'$ 、北纬 $36^\circ60'$ ，位于川西高原的安宁河平原腹地，年平均日照 2423.1 小时，占可照时数的 55%。白天太阳辐射强，昼夜温差大。西昌地区水平面总辐射强度及散射辐射强度如下图所示：

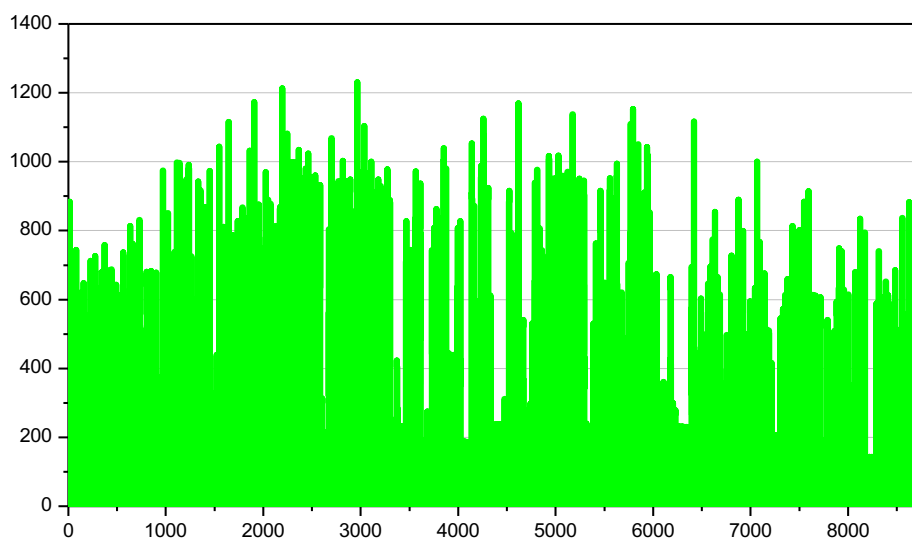


图 2.10 西昌水平面逐时总辐射强度 (W/m^2)

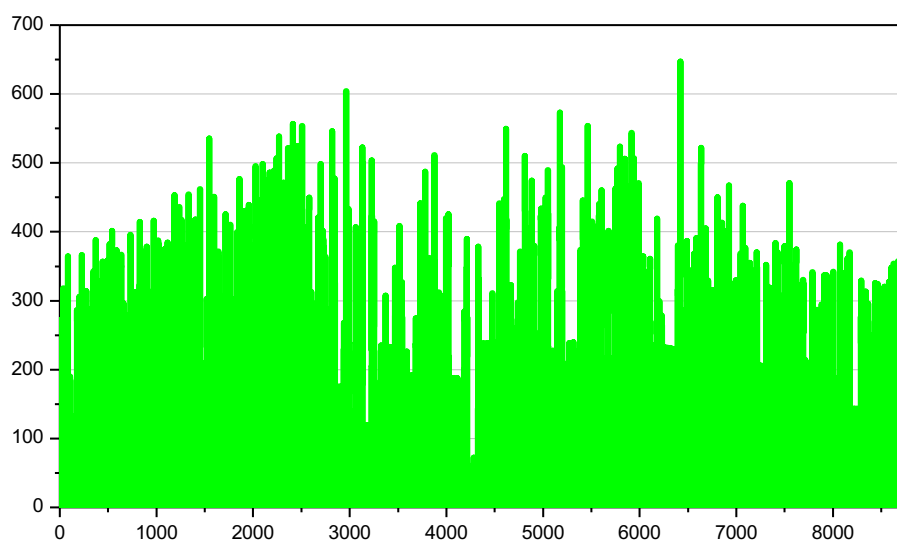


图 2.11 西昌水平面逐时散射辐射强度 (W/m^2)

西昌气候属亚热带高原季风气候区，夏半年受西南和东南暖湿季区控制，雨量充沛；冬半年受极地大陆气团影响，晴暖干燥。主要气候特点是：干湿季分明，降雨集中，气温年较差小，日较差大。逐时干球温度变化如下图所示：

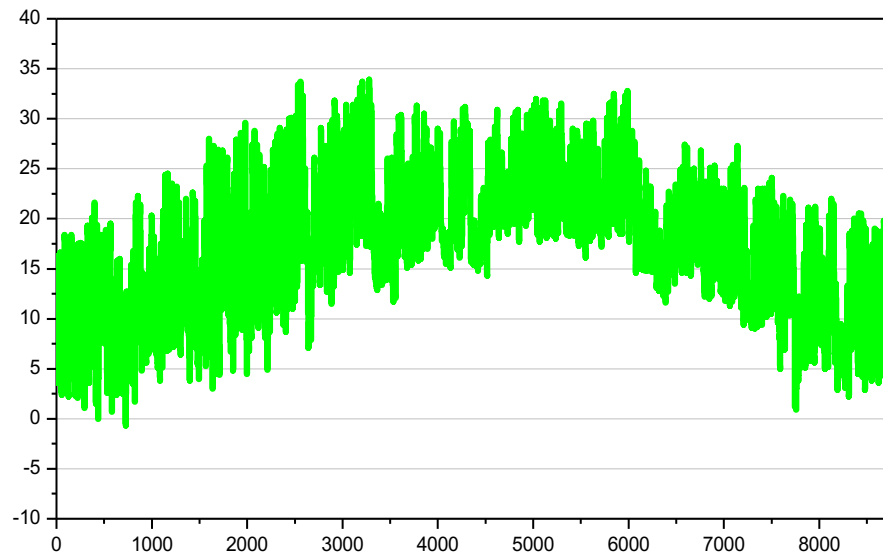


图 2.12 西昌逐时干球温度

2.4 本章小结

本章对研究地区选取原因，及典型地区气象特征进行了详细分析，结果表明：西宁可作为太阳能资源丰富区（Ⅱ区）覆盖的严寒地区作为典型代表，银川可作为太阳能资源丰富区（Ⅱ区）覆盖的寒冷地区作为典型代表，西昌可作为太阳能资源丰富区（Ⅱ区）覆盖的温和地区作为典型代表，进行系统研究。

3 典型民用建筑模型与用能特性分析

3.1 典型公共建筑分析模型确定

3.1.1 建筑分析模型

公共建筑按功能划分非常繁多，如办公、宾馆、商场、体育馆、影剧院、博览建筑等等，但量大面广的建筑类型主要为办公建筑、宾馆建筑、商场建筑。本研究重点对这三类典型公共建筑进行分析。

选取的典型办公建筑为四层，建筑层高为 4.5m，建筑面积为 4785.7m²，建筑三维模型如图 3.1 所示，办公建筑标准层平面图如图 3.2 所示），屋面可利用面积约为 700m²。

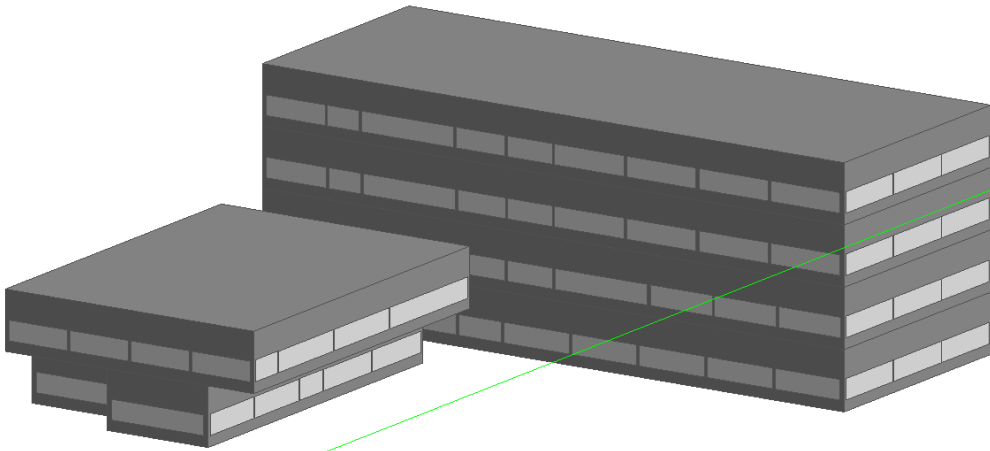


图 3.1 办公建筑负荷模拟三维模型

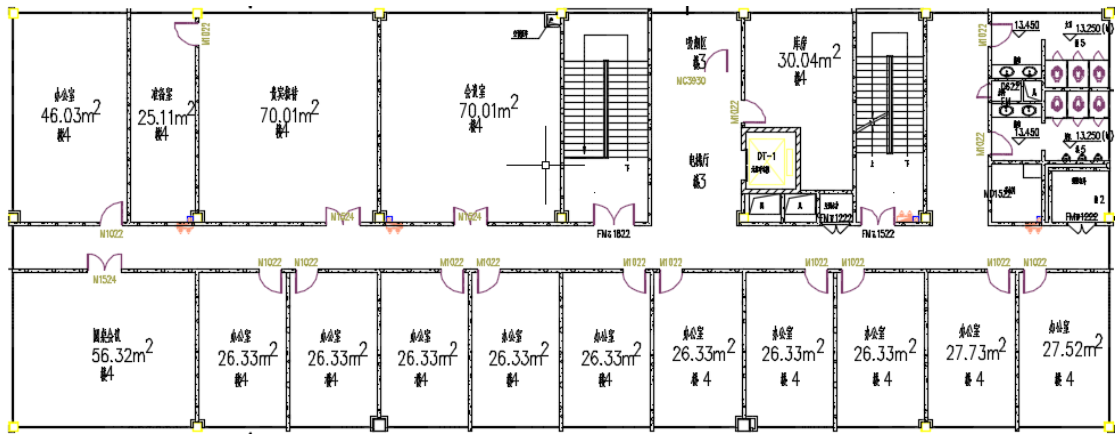


图 3.2 办公建筑标准层平面图

选取的典型酒店建筑为十五层，建筑层高为 4.3m，建筑面积为 52585.2m²，（建筑三维模型如图 3.3 所示，建筑标准层平面图如图 3.4 所示），屋面可利用面积约为 3200m²。

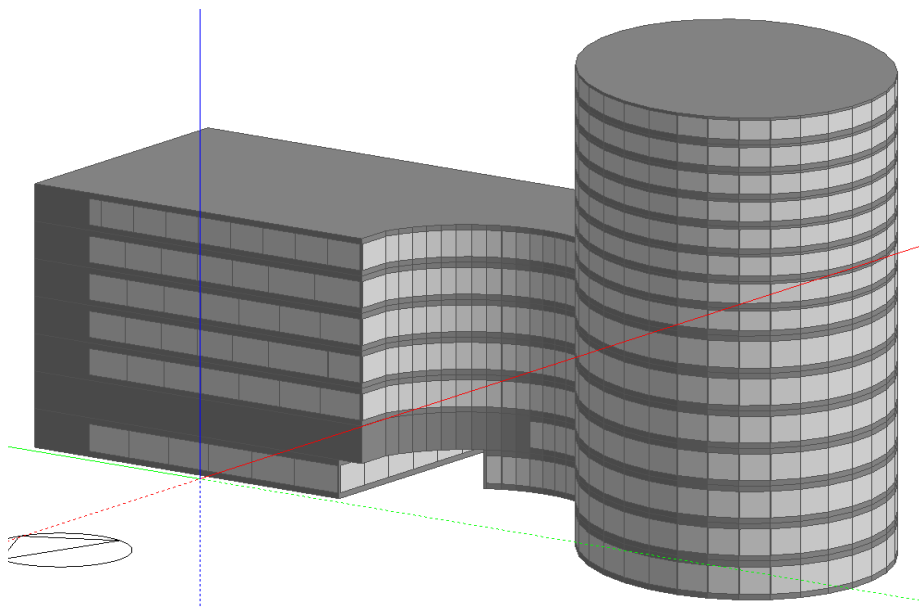


图 3.3 酒店建筑负荷模拟三维模型

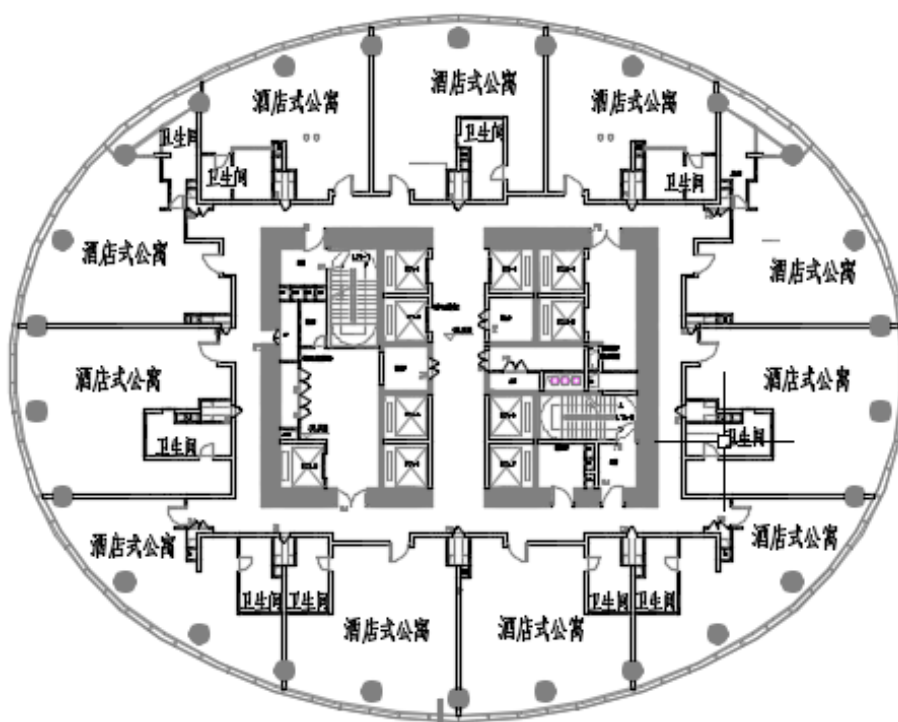


图 3.4 酒店建筑平面图

选取的典型商业建筑为三层，建筑层高为 5.2m，建筑面积为 83300m^2 ，（建筑三维模型如图 3.5 所示，建筑标准层平面图如图 3.6 所示），屋面可利用面积约为 12000m^2 。

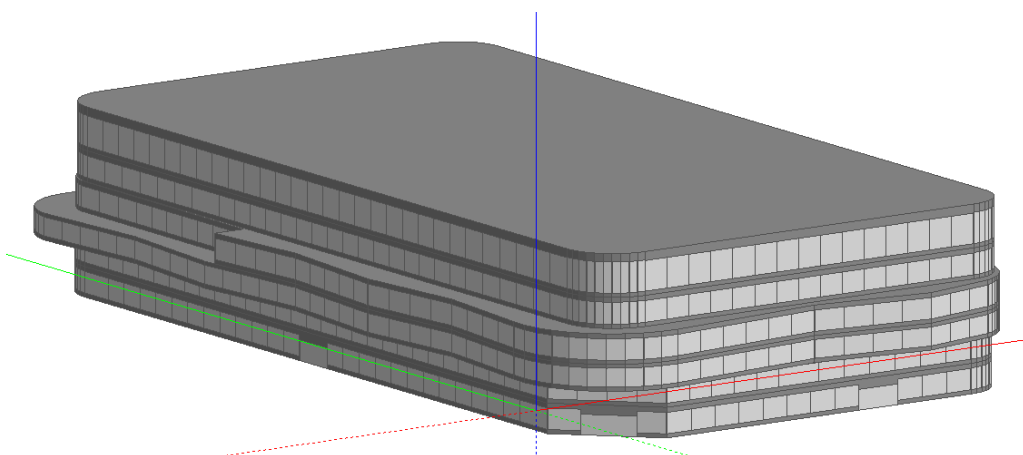


图 3.5 商业建筑负荷模拟三维模型

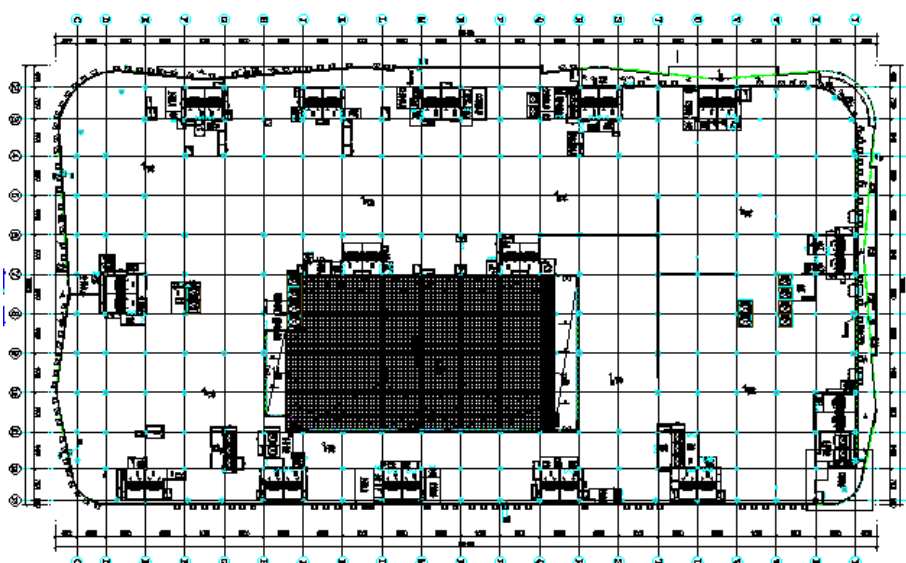


图 3.6 商业建筑标准层平面

3.1.2 冷/热、电负荷分析设定条件

3.1.2.1 建筑围护结构体系

本研究所针对的地区气候分区分为严寒和寒冷地区，建筑围护结构体系参考该地区常用的围护结构构造作法，并满足《公共建筑节能设计标准》（GB50189-2005）的相关节能要求进行设置。

1.严寒地区

(1) 屋面构造措施与热工参数如表所示：

表 3.1 屋面构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 $W/(m \cdot K)$	材料厚度 (mm)	热阻值 R $(m^2 \cdot K)/W$	修正系数
1	钢筋混凝土结构层	1.74	100	0.057	1.0
2	防水涂料		不计入		
3	水泥膨胀珍珠岩找坡	0.26	30	0.077	1.5

4	挤塑聚苯板 XPS (B1 级)	0.03	100	2.778	1.2
5	水泥砂浆找平层	0.93	25	0.027	1.0
6	防水卷材		不计入		
7	水泥砂浆保护层	0.93	20	0.022	1.0

屋面热阻 $R_0=R_i+\sum R+R_e$: 3.111 ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)

屋面传热系数: 0.321W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$)

满足《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015) 中 3.3.1 条 $K\leq 0.35$ 的要求。

(2) 外墙构造措施与热工参数如表所示:

表 3.2 外墙构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	材料厚度 (mm)	热阻值 R $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$	修正系数
1	外饰面层		不计入		
2	金属钢龙骨		不计入		
3	岩棉	0.045	100	1.852	1.2
4	页岩多孔砖墙体	0.58	220	0.379	1.0
	混凝土墙体	1.74	200	0.115	1.0

墙体热阻 $R_0=R_i+\sum R+R_e$: 2.346($\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$

墙体传热系数: 0.426W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$)

满足《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015) 中 3.3.1 条 $K\leq 0.43$ 的要求。

(3) 非采暖空调房间与采暖空调房间隔墙或楼板

表 3.3 隔墙或楼板构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	材料厚度 (mm)	热阻值 R $(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$	修正系数
1	外饰面层		不计入		
2	岩棉	0.045	60	1.111	1.2
3	钢筋混凝土楼板	1.74	100	0.057	1.0

墙体热阻 $R_0=R_i+\sum R+R_e$: 1.319 ($\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$

墙体传热系数: 0.758W/($\text{m}^2\cdot\text{K}$)

满足《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015) 中 3.3.1 条 $K\leq 0.8$ 的要求。

(5) 外窗 (普通外窗/玻璃幕墙)

表 3.4 外窗 (普通外窗/玻璃幕墙) 的传热系数

朝向	设计传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	标准规定值 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	外窗、幕墙设计技术要求
东	1.9	2.0	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
南	1.9	2.0	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
西	1.9	2.0	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
北	1.9	2.0	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)

表 3.5 外窗（普通外窗/玻璃幕墙）的遮阳系数(SC)及技术要求

朝向	SC 标准 规定值	设计遮阳系数 (SC)	可见光透射比	气密性
东	——	≤ 0.40	——	6/3
南	——	≤ 0.40	——	6/3
西	——	≤ 0.40	——	6/3
北	——	≤ 0.40	——	6/3

2.寒冷地区

(1) 屋面构造措施与热工参数如表所示:

表 3.6 屋面构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 $W/(m \cdot K)$	材料厚度 (mm)	热阻值 R $(m^2 \cdot K)/W$	修正系数
1	钢筋混凝土结构层	1.74	100	0.057	1.0
2	防水涂料		不计入		
3	水泥膨胀珍珠岩找坡	0.26	30	0.077	1.5
4	挤塑聚苯板 XPS (B1 级)	0.03	70	1.944	1.2
5	水泥砂浆找平层	0.93	25	0.027	1.0
6	防水卷材		不计入		
7	水泥砂浆保护层	0.93	20	0.022	1.0

屋面热阻 $R_0 = R_i + \sum R + R_e$: $2.277 (m^2 \cdot K)/W$ 屋面传热系数: $0.439 W/(m^2 \cdot K)$ 满足《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015) 中 3.3.1 条 $K \leq 0.45$ 的要求。

(2) 外墙构造措施与热工参数如表所示:

表 3.7 外墙构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 $W/(m \cdot K)$	材料厚度 (mm)	热阻值 R $(m^2 \cdot K)/W$	修正系数
1	外饰面层		不计入		
2	金属钢龙骨		不计入		
3	岩棉	0.045	90	1.667	1.2
4	页岩多孔砖墙体	0.58	200	0.345	1.0
	混凝土墙体	1.74	200	0.115	1.0

墙体热阻 $R_0 = R_i + \sum R + R_e$: $2.161/1.932 (m^2 \cdot K)/W$ 墙体传热系数: $0.487 W/(m^2 \cdot K)$ 满足《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015) 中 3.3.1 条 $K \leq 0.5$ 的要求。

(3) 非采暖空调房间与采暖空调房间隔墙或楼板

表 3.8 隔墙或楼板构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 W/(m·K)	材料厚度 (mm)	热阻值 R (m ² ·K)/W	修正系数
1	外饰面层		不计入		
2	岩棉	0.045	30	0.556	1.2
3	钢筋混凝土楼板	1.74	100	0.057	1.0
墙体热阻 $R_0=R_i+\sum R+R_e$: 0.763(m ² ·K)/W					
墙体传热系数: 1.310W/(m ² ·K)					

满足《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015)中 3.3.1 条 $K \leq 1.5$ 的要求。

(4) 外窗(普通外窗/玻璃幕墙)

表 3.9 外窗(普通外窗/玻璃幕墙)的传热系数

朝向	设计传热系数 W/(m ² ·K)	标准规定值 W/(m ² ·K)	外窗、幕墙设计技术要求
东	1.9	2.2	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
南	1.9	2.2	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
西	1.9	2.2	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
北	1.9	2.2	断热桥铝合金双银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)

表 3.10 外窗(普通外窗/玻璃幕墙)的遮阳系数(SC)及技术要求

朝向	SC 标准 规定值	设计遮阳系数 (SC)	可见光透射比	气密性
东	——	≤0.40	——	6/3
南	——	≤0.40	——	6/3
西	——	≤0.40	——	6/3
北	——	≤0.40	——	6/3

3.温和地区

(1) 屋面构造措施与热工参数如表所示:

表 3.11 屋面构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 W/(m·K)	材料厚度 (mm)	热阻值 R (m ² ·K)/W	修正系数
1	钢筋混凝土结构层	1.74	100	0.057	1.0
2	防水涂料		不计入		
3	水泥膨胀珍珠岩找坡	0.26	30	0.077	1.5
4	挤塑聚苯板 XPS (B1 级)	0.03	40	1.111	1.2
5	水泥砂浆找平层	0.93	25	0.027	1.0
6	防水卷材		不计入		
7	水泥砂浆保护层	0.93	20	0.022	1.0
屋面热阻 $R_0=R_i+\sum R+R_e$: 1.294 (m ² ·K)/W					
屋面传热系数: 0.773W/(m ² ·K)					

满足《公共建筑节能设计标准》（GB50189-2015）中 3.3.1 条 $K \leq 0.8$ 的要求。

(2) 外墙构造措施与热工参数如表所示：

表 3.12 外墙构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 $W/(m \cdot K)$	材料厚度 (mm)	热阻值 R $(m^2 \cdot K)/W$	修正系数
1	外饰面层		不计入		
2	金属钢龙骨		不计入		
3	岩棉	0.045	30	0.556	1.2
4	页岩多孔砖墙体	0.58	25	0.043	1.0
	混凝土墙体	1.74	200	0.115	1.0
墙体热阻 $R_0 = R_i + \sum R + R_e$: 2.161/1.932($m^2 \cdot K$)/W					
墙体传热系数: 0.487W/($m^2 \cdot K$)					

满足《公共建筑节能设计标准》（GB50189-2005）中 4.2.2 条 $K \leq 1.5$ 的要求。

(3) 非采暖空调房间与采暖空调房间隔墙或楼板

表 3.13 隔墙或楼板构造措施与热工参数

序号	材料名称	导热系数 $W/(m \cdot K)$	材料厚度 (mm)	热阻值 R $(m^2 \cdot K)/W$	修正系数
1	外饰面层		不计入		
2	岩棉	0.045	30	0.556	1.2
3	钢筋混凝土楼板	1.74	100	0.057	1.0
墙体热阻 $R_0 = R_i + \sum R + R_e$: 0.763($m^2 \cdot K$)/W					
墙体传热系数: 1.310W/($m^2 \cdot K$)					

满足《公共建筑节能设计标准》（GB50189-2005）中 4.2.2 条 $K \leq 1.5$ 的要求。

(4) 外窗（普通外窗/玻璃幕墙）

表 3.14 外窗（普通外窗/玻璃幕墙）的传热系数

朝向	设计传热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	标准规定值 $W/(m^2 \cdot K)$	外窗、幕墙设计技术要求
东	2.5	2.7	断热桥铝合金单银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
南	2.5	2.7	断热桥铝合金单银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
西	2.5	2.7	断热桥铝合金单银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)
北	2.5	2.7	断热桥铝合金单银 Low-E 中空玻璃窗 (6+12A+6)

表 3.15 外窗（普通外窗/玻璃幕墙）的遮阳系数(SC)及技术要求

朝向	SC 标准 规定值	设计遮阳系数 (SC)	可见光透射比	气密性
东	——	≤ 0.45	——	6/3
南	——	≤ 0.45	——	6/3
西	——	≤ 0.45	——	6/3
北	——	≤ 0.45	——	6/3

3.1.2.2 照明及设备功率汇总

(1) 商业、酒店、办公采暖季及空调季时间

商业供暖时间为 11 月~3 月，空调时间为 5 月~9 月。

表 3.16 供暖、空调室内设定温度及每日使用的时间段划分

建筑类型	供暖、空调使用时间段	供暖室内设定温度	空调室内设定温度
商业	08: 00~22: 00	20	25
酒店餐厅	05: 00~23:00	18	25
酒店公寓	24 小时	20	25
办公	06: 00~19:00	20	26

供暖季除上述使用时间段外，其余时间保证室内最低温度 12℃。办公建筑周末节假日不进行供暖及空调。

(3) 人员密度、照明及设备功率设定情况说明

表 3.17 商业人员密度、照明及设备功率设定情况汇总

	商业区	走道	其他非空调区域
人员密度（人/m ² ）	0.25	0.1	略
照明（kw/m ² ）	12	12	略
设备（kw/m ² ）	13	5	略

表 3.18 酒店人员密度、照明及设备功率设定情况汇总

	商业区	大厅及 走道	餐厅	茶吧	厨房	公寓	其他非空 调区域
人员密度 （人/m ² ）	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2	0.05	略
照明（kw/ m ² ）	12	15	20	12	12	15	略
设备（kw/ m ² ）	13	5	10	10	45	13	略

表 3.19 办公人员密度、照明及设备功率设定情况汇总

	办公区	餐厅	厨房	报告厅	档案室、展览室、门厅等	其他非空调区域
人员密度 (人/m ²)	0.2	0.6	0.1	0.2	0.1	略
照明 (kw/m ²)	12	10	12	12	12	略
设备 (kw/m ²)	20	10	45	10	5	略

(4) 人员逐时在室率、照明及设备逐时使用率说明:

1) 商业人员逐时在室率、照明及设备逐时使用率汇总:

表 3.20 人员逐时在室率:

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	0	0	0	50	50	50
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	75	75	100	100	100	75
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	75	100	100	50	0	0

表 3.21 照明逐时使用率:

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	10	10	50	100	100	100
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	100	100	100	100	100	100
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	100	100	100	50	10	10

表 3.22 设备逐时使用率:

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	5	5	5	5	5	5
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	5	5	100	100	100	100
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	100	100	100	100	100	100
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	100	100	100	50	5	5

2) 酒店人员逐时在室率、照明及设备逐时使用率汇总:

表 3.23 酒店餐厅人员逐时在室率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	0	25	25	50	50	75
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	100	75	50	10	10	50
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	100	100	75	50	0	0

表 3.24 酒店公寓人员逐时在室率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	100	100	100	100	100	100
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	100	100	50	10	10	10
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	30	30	10	10	10	10
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	10	30	50	50	75	100

表 3.25 酒店餐厅照明逐时使用率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	20	50	100	100	100	100
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	100	100	75	50	50	100
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	100	100	100	50	0	0

表 3.26 酒店公寓照明逐时使用率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	20	20	50	20	0	0
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	0	20	50	75	100	75

表 3.27 酒店餐厅设备逐时使用率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	30	77	100	100	100	100
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	100	100	77	30	30	77
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	100	100	100	30	0	0

表 3.28 酒店公寓设备逐时使用率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	5	5	5	5	5	5
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	5	50	100	50	10	10
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	10	10	10	10	10	30
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	50	75	100	100	75	30

3) 办公人员逐时在室率、照明及设备逐时使用率汇总:

表 3.29 人员逐时在室率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	0	25	50	100	100	100
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	75	75	100	100	100	50
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	25	10	0	0	0	0

表 3.30 照明逐时使用率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	0	0	0	0	0	0
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	0	10	50	100	100	100
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	75	75	100	100	100	100
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	50	20	0	0	0	0

表 3.31 设备逐时使用率

时间段:	1	2	3	4	5	6
在室率:	5	5	5	5	5	5
时间段:	7	8	9	10	11	12
在室率:	5	50	75	100	100	100
时间段:	13	14	15	16	17	18
在室率:	100	100	100	100	100	100
时间段:	19	20	21	22	23	24
在室率:	75	50	5	5	5	5

(5) 新风量:

根据查询相关规范及手册得到餐厅、公寓、办公室、商场最小新风量为 $10\text{l/s} \cdot \text{p}$ 。其他区域根据相关规范及手册作相应设定。

3.1.3 热水负荷分析设定条件

3.1.3.1 基本设计参数

本次热水负荷计算主要针对研究地区的酒店，其参数的设定依照《建筑给水排水设计规范》(GB50015-2003) 的相关要求进行设置。

表 3.32 负荷计算参数

房间类型	酒店式公寓	餐厅	淋浴	桑拿	茶座
最高日用水定额 $L/(\text{人} \cdot \text{d})$	90	18	60	80	5
小时变化系数 K_h	4	1.5		2	1.52

表3.33 负荷计算参数

	当地大气压 (KPa)	热水设计温度(°C)	冷水设计温度(°C)
西宁	77.4	60	10
银川	88.4	60	10
西昌	83.5	60	15

注：淋浴热水设计温度：40°C

3.1.3.2 设计小时耗热量

(1) 设计小时耗热量

$$\textcircled{1} \quad Q_h = K_h \frac{mq_r C(t_r - t_1) \rho_r}{T}$$

式中： Q_h ——设计小时耗热量 (kJ/h)； m ——用水计算单位数 (人数或床位数)； q_r ——热水用水定额 (L/人·d 或 L/床·d)； C ——水的比热， $C=4.187$ (kJ/kg·°C)； t_r ——热水温度， $t_r=60$ (°C)； t_1 ——冷水温度； ρ_r ——热水密度 (kg/L)； T ——每日使用时间 (h)； K_h ——小时变化系数。

$$\textcircled{2} \quad Q_h = \sum q_h (t_r - t_1) \rho_r n_o b C$$

式中: Q_h ——设计小时耗热量 (kJ/h); q_h ——卫生器具热水的小时用水定额 (L/h), 取 250L/h; C ——水的比热, $C=4.187$ (kJ/kg·°C); t_r ——热水温度, $t_r=40$ (°C); t_1 ——冷水温度; ρ_r ——热水密度 (kg/L); n_o ——同类型卫生器具数; b ——卫生器具同时使用的百分数 (100%)。

(2) 设计小时热水量

$$q_{rh} = \frac{Q_h}{(t_r - t_1) C \rho_r}$$

式中: q_{rh} ——设计小时热水量 (L/h); Q_h ——设计小时耗热量 (kJ/h); t_r ——热水温度, $t_r=60$ (°C); t_1 ——冷水温度; ρ_r ——热水密度 (kg/L); C ——水的比热, $C=4.187$ (kJ/kg·°C)。

(3) 游泳池热水负荷计算

① 设计小时热水量

$$q_{rh} = 240.5 \text{ L/h}$$

② 水面蒸发热损失

$$Q_z = \alpha v (0.0229 + 0.0174 v_f) (P_b - P_q) A \frac{760}{B}$$

式中: Q_z ——池水面蒸发损失的热量 (kJ/h); α ——水的比热, $\alpha = 4.187$ (kJ/kg·°C); v ——与游泳池水温相等的饱和蒸汽的蒸发汽化潜热; v_f ——游泳池水面上的风速, v_f 取 0.3m/s; P_b ——与游泳池水温相等的饱和蒸汽的水蒸气压力 (133.32Pa); P_q ——游泳池的环境空气的水蒸气压力 (133.32Pa); A ——游泳池水面面积 (m²); B ——当地的大气压力(133.32Pa)。

③ 游泳池的水表面、池底、池壁、管道和设备等传导热量损失, 应按游泳池水表面蒸发热量损失的 20%计算。

④ 补充水加热需要的热量

$$Q_b = \frac{\alpha v q_b (t_r - t_b)}{t}$$

式中: Q_b ——补充水加热所需的热量 (kJ/h); q_b ——每天补充水量 (L); t_r ——池水温度 (°C); t_b ——补充水温度 (°C); t ——每天加热时间 (h); v ——水的密度 (kg/L); α ——水的比热, $\alpha = 4.187$ (kJ/kg·°C)。

⑤ 游泳池总耗热量

$$Q_z + Q_s + Q_b = Q$$

(4) 设计小时耗热量计算结果

表3.34 西宁酒店设计小时热水负荷

	餐厅	酒店式公寓	桑拿	茶座	淋浴
$Q_{\dot{h}}/KW$	214.6	23.0	15.5	5.4	255.9
	水面蒸发热损失	传导热量损失	补充水加热的热量	总耗热量	
$Q_{\dot{h}}/KW$	33.9	6.8	4.5	45.1	
总耗热量：559.5KW					

表3.35 银川酒店设计小时热水负荷

	餐厅	酒店式公寓	桑拿	茶座	淋浴
Q _h /KW	214.6	23.0	15.5	5.4	255.9
	水面蒸发热损失	传导热量损失	补充水加热的热量	总耗热量	
Q _h /KW	29.6	5.9	4.5	40	
总耗热量：554.5KW					

表3.36 西昌酒店设计小时热水负荷

	餐厅	酒店式公寓	桑拿	茶座	淋浴
Q _h /KW	187.8	20.2	13.6	4.8	223.9
	水面蒸发热损失	传导热量损失	补充水加热的热量	总耗热量	
Q _h /KW	31.4	6.3	3.1	40.7	
总耗热量：490.8KW					

3.1.3.3 动态热水负荷

为了更加准确的反应热水负荷的动态变化，对三个研究地区的酒店采取了逐月的热水动态负荷计算，为后续的研究提供科学依据。其中负荷计算公式如下：

$$Q_h = \frac{mq_r C(t_r - t_l) \rho_r}{3600T}$$

式中： Q_h ——设计小时耗热量（KW）； m ——用水计算单位数（人数或床位数）； q_r ——热水用水定额（L/人·d 或 L/床·d）； C ——水的比热， $C=4.187$ （kJ/kg·℃）； t_r ——热水温度， $t_r=60$ （℃）； t_l ——冷水温度； ρ_r ——热水密度（kg/L）； T ——每日使用时间（h）。

其中游泳池热水负荷计算方式与设计小时耗热量计算公式相同。

（1）冷水温度的确定

在逐月动态计算中，冷水温度（ t_l ）发生动态变化，由于水温与气温具有显著的正相关关系，同时气温资料较容易获得，为了较为准确的获取研究地区的每月冷水温度，本文利用已有的成都市某自来水厂全年水温数据及当地气温资料的统计分析，并根据它们之间的相关关系，尝试得出一种利用气温估算水温的新公式，为研究区域逐月的冷水温度选取提供科学依据。

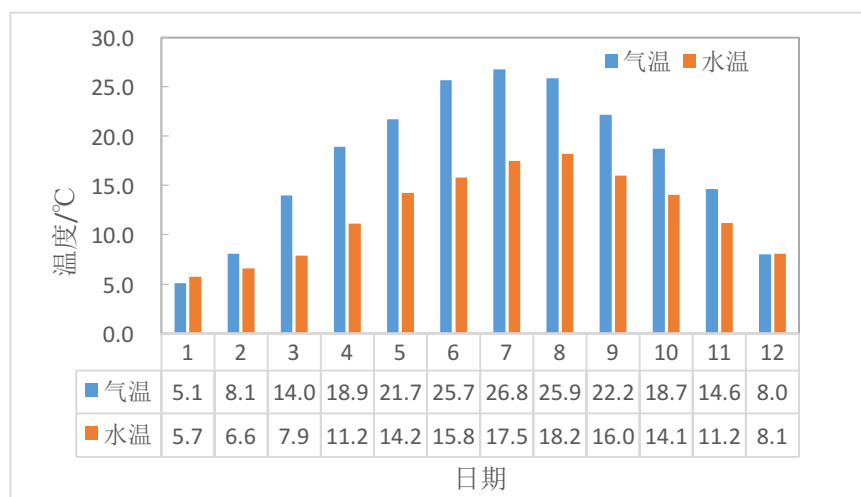


图 3.7 水温与气温变化关系

该图为成都市逐月平均水温和平均气温直方图，从全年的情况来看，水温与气温的变化趋势相同。

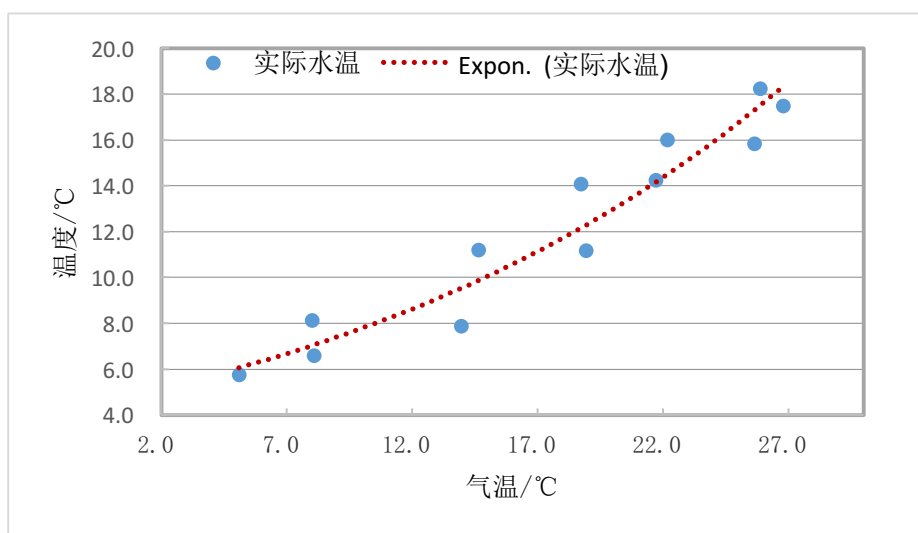


图 3.8 气温与水温相关关系

根据水温与气温的实测资料，并结合气温与水温的相关关系图，可以看出气温与水温呈非线性函数关系，通过大量的试算并分析图中数据的变化规律，应用最小二乘法拟合出气温的计算公式：

$$t = 4.6731e^{0.0511T}$$

式中， t 为水温， $^{\circ}\text{C}$ ； T 为气温， $^{\circ}\text{C}$ 。

利用公式估算该成都某自来水厂的水温，计算结果与实测结果对比如下：

表 3.37 计算与实测自来水温度对比

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
实测值/℃	5.7	6.6	7.9	11.2	14.2	15.8	17.5	18.2	16.0	14.1	11.2	8.1
计算值/℃	6.1	7.1	9.5	12.3	14.2	17.3	18.4	17.5	14.5	12.2	9.9	7.0
绝对误差	-0.3	-0.5	-1.7	-1.1	0.1	-1.5	-0.9	0.7	1.5	1.9	1.3	1.1
相对误差/%	10.0	10.0	20.0	10.0	10.0	10.0	10.0	0.0	10.0	10.0	10.0	10.0

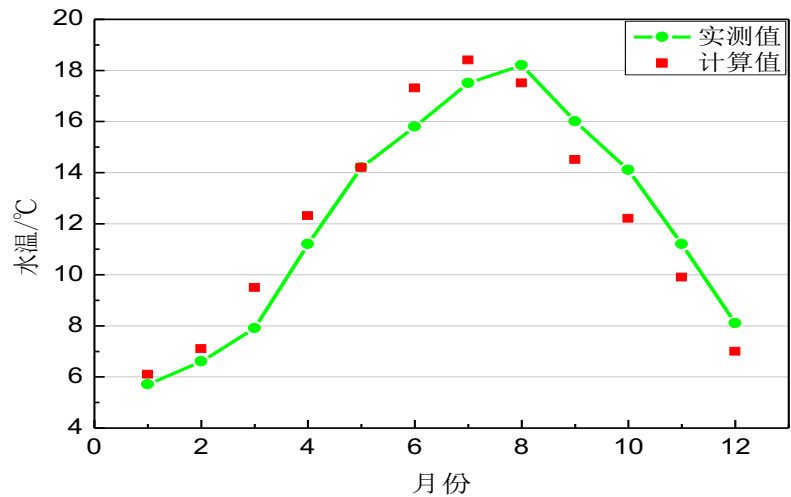


图 3.9 计算值与实测值对比

从图表中可以看出，估算公式的计算值的相对误差一般都在 10%以内，因此该估算公式具有较高精度，能够满足工程需要，可用于研究地区的自来水温度的水温估算。

(2) 日热水负荷计算结果

通过利用日耗热量及水温估算公式可得研究地区逐月的动态热水负荷如下：

表 3.38 西宁酒店逐月动态热水负荷计算结果

西宁	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
气温/℃	-8.8	-4.2	3.6	9.6	12.2	15.8	17.1	16.3	13.0	7.6	2.6	-5.2
冷水温度/℃	3.0	3.8	5.6	7.6	8.7	10.5	11.2	10.7	9.1	6.9	5.3	3.6
日热水负荷 /KW	272.9	268.9	259.6	249.2	243.7	234.8	231.1	233.6	241.8	253.1	260.9	269.9

表 3.39 银川酒店逐月动态热水负荷计算结果

银川	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
气温/℃	-7.9	-2.7	6.3	14.4	17.7	22.7	25.1	22.4	17.7	10.3	4.3	-2.7
冷水温度/℃	3.1	4.1	6.4	9.8	11.5	14.9	16.8	14.7	11.5	7.9	5.8	4.1

日热水负荷	267.2	262.3	250.3	233.4	224.4	207.3	197.6	208.4	224.4	242.8	253.4	262.3
/KW												

表 3.40 西昌酒店逐月动态热水负荷计算结果

西昌	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
气温/℃	9.9	10.2	17.4	19.5	21.8	24.0	22.9	22.4	21.0	18.6	16.7	9.6
冷水温度/℃	7.7	7.9	11.4	12.6	14.3	15.9	15.1	14.6	13.6	12.1	11.0	7.6
日热水负荷	245.7	245.1	227.3	220.8	212.6	204.3	208.5	210.6	215.8	223.7	229.4	246.3
/KW												

（3） 逐时热水负荷

为进一步完善热水负荷计算，对酒店 24 小时不同类型房间的工作时间进行设定，其设定结果如下表：

表 3.41 酒店不同类型房间工作设定

房间类型 时刻	酒店式公寓	餐厅	桑拿	茶座	游泳	淋浴
7-9	√	√				
9-11	√		√	√	√	√
11-1	√	√	√	√	√	√
1-18			√	√	√	√
18-22	√	√	√	√	√	√
22-24	√					
24-7						

3.2 典型公共建筑负荷特性分析

3.2.1 冷/热负荷特性

利用 DesignBuilding 负荷模拟软件，分别对研究地区三类典型建筑进行了供暖负荷模拟计算。照明开关时间、人员逐时在室率、电器设备逐时使用率、空气调节和采暖房间的温度、照明功率密度、人员密度、设备功率密度及时刻表按照《公共建筑节能设计标准》并结合实际工程情况确定。供暖期为 11 月至次年 3 月，空调期为 5 月至次年 9 月。计算得出供暖期逐时热负荷分布特征如图 3.5-3.7 所示。

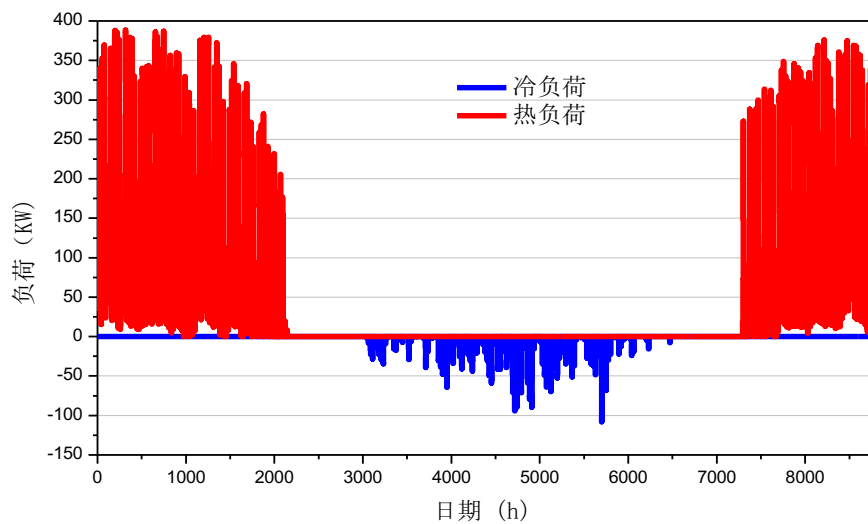


图 3.10 西宁办公建筑逐时冷/热负荷

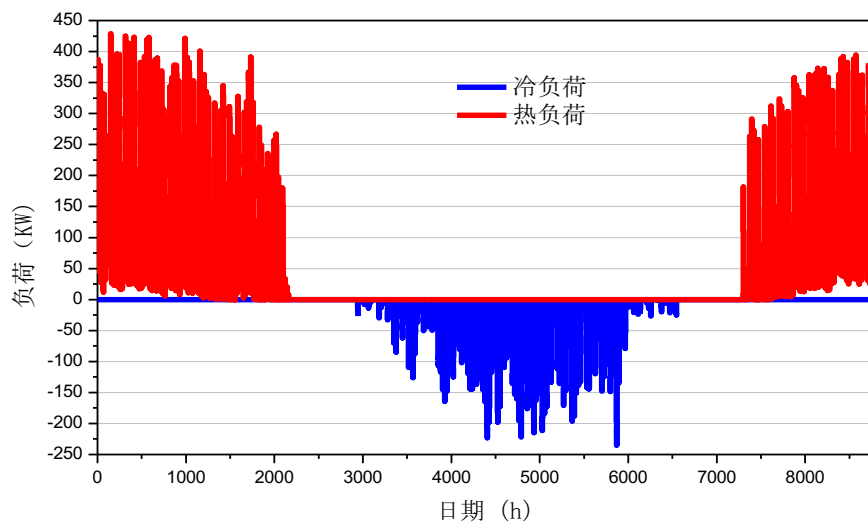


图 3.11 银川办公建筑逐时冷/热负荷

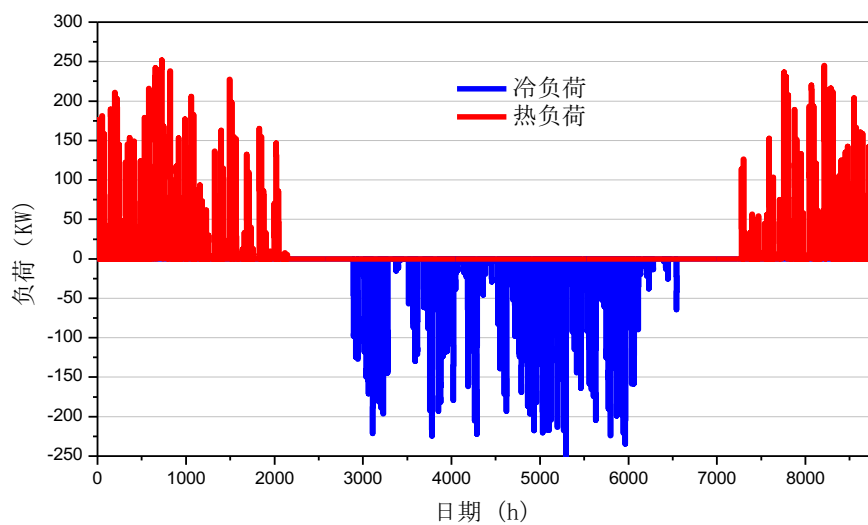


图 3.12 西昌办公建筑逐时冷/热负荷

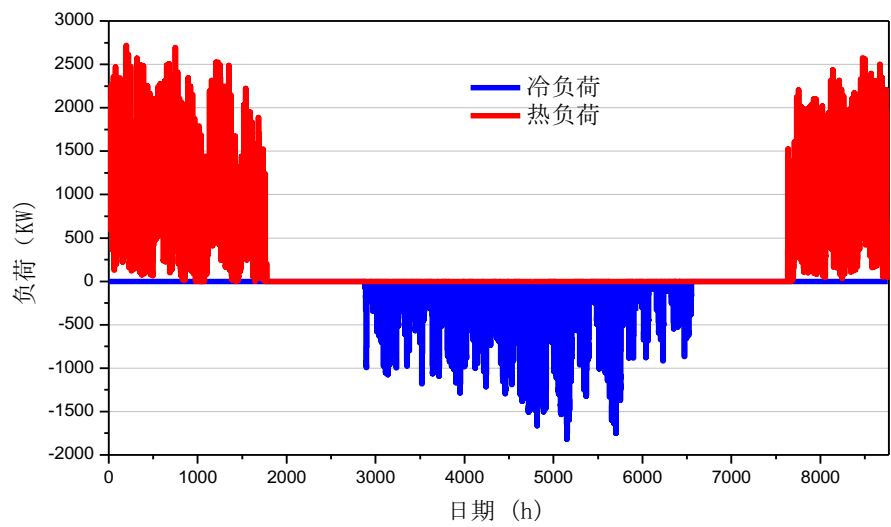


图 3.13 西宁酒店建筑逐时冷/热负荷

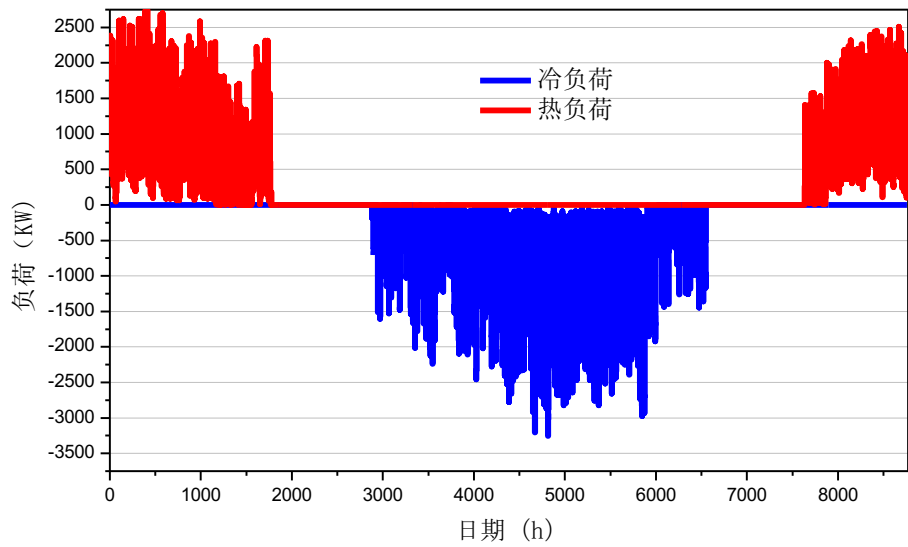


图 3.14 银川酒店建筑逐时冷/热负荷

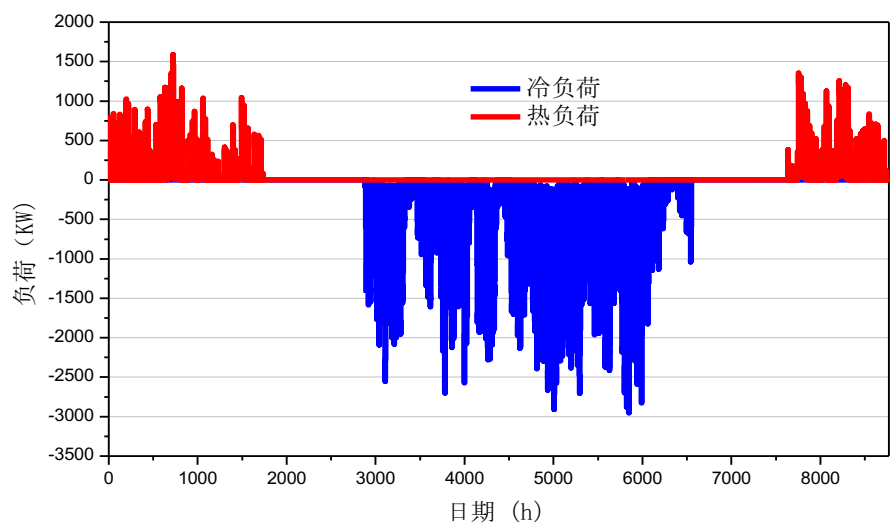


图 3.15 西昌酒店建筑逐时冷/热负荷

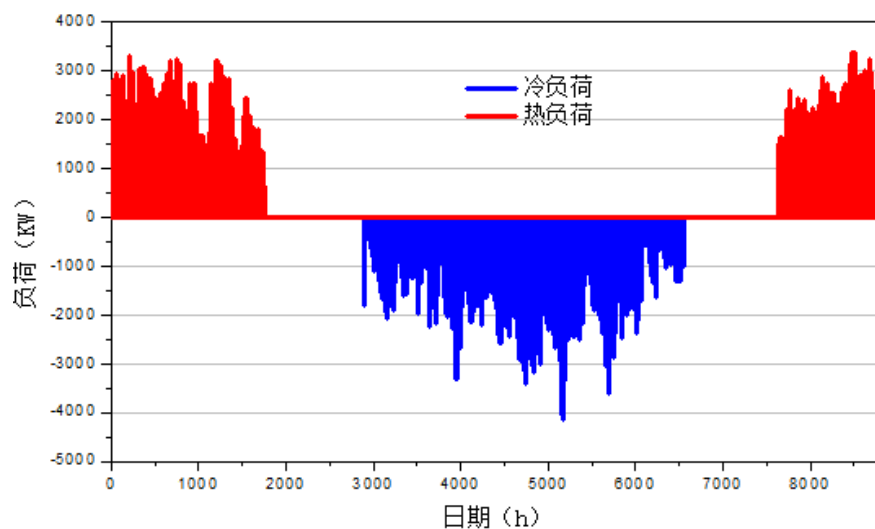


图 3.16 西宁商场建筑逐时冷/热负荷

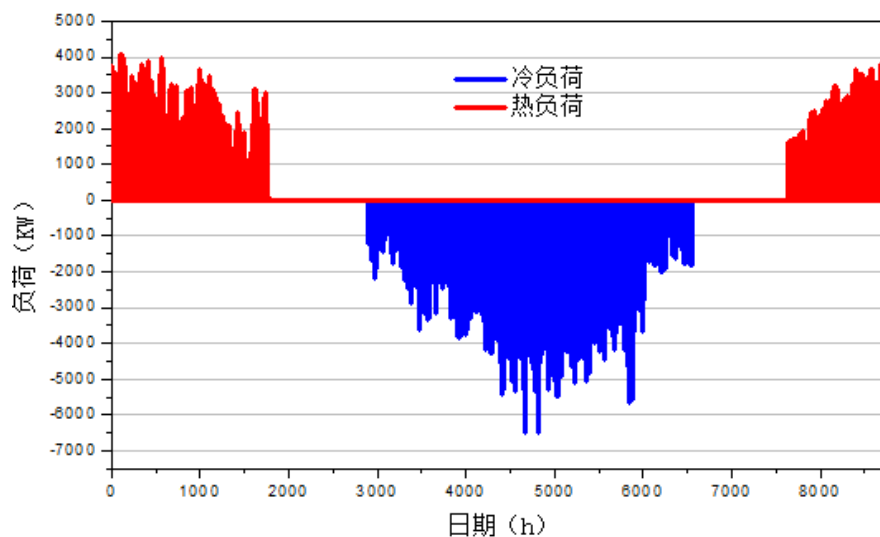
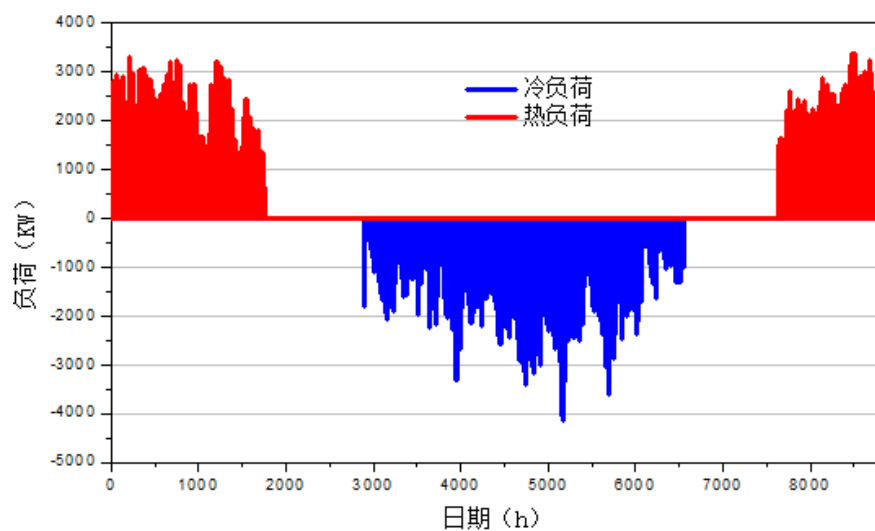


图 3.17 银川商场建筑逐时冷/热负荷

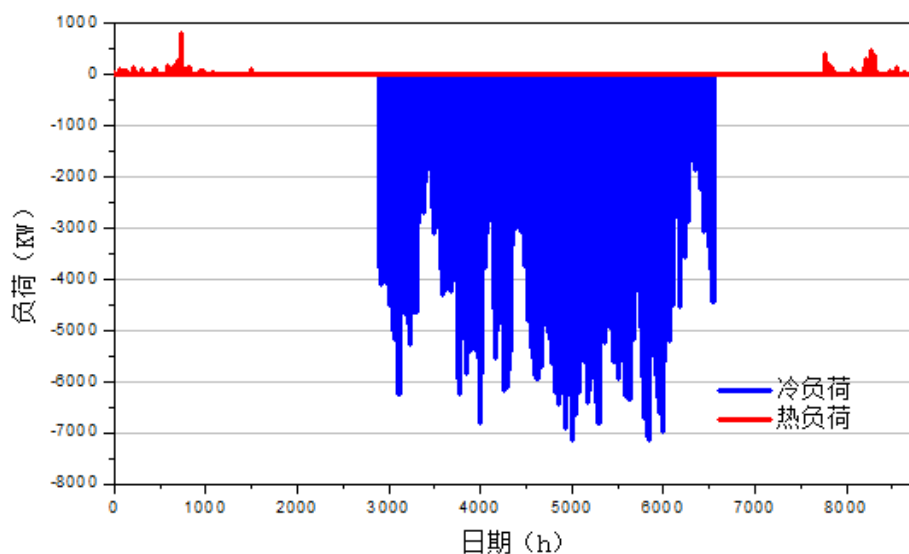


图 3.18 西昌商场建筑逐时冷/热负荷

3.2.2 电负荷特性

对除采暖空调设备外的其他用电负荷进行了详细模拟计算，典型日商业建筑、办公建筑、酒店建筑其他用电设备电负荷曲线如下图所示。

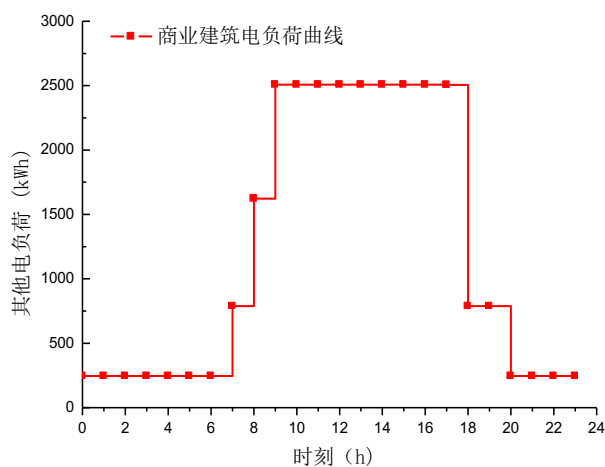


图 3.19 商场建筑典型日逐时电负荷

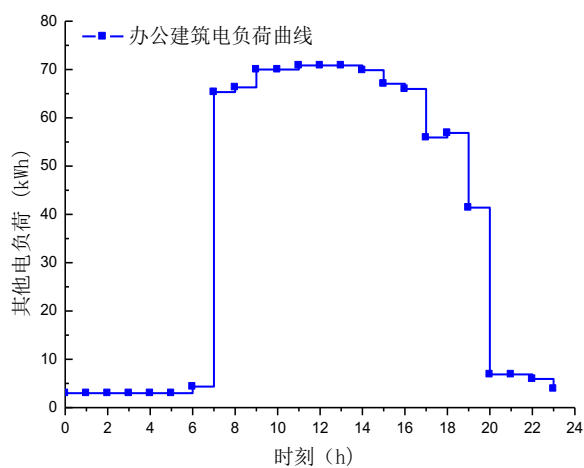


图 3.20 办公建筑典型日逐时电负荷

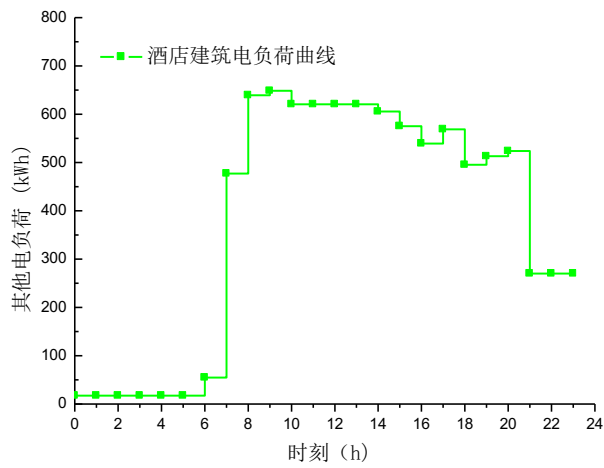


图 3.21 酒店建筑典型日逐时电负荷

3.2.3 热水负荷特性

利用 3.1.4 节所设定的热水负荷条件，分别对三个研究地区的酒店典型建筑进行了逐时热水负荷计算。用水单位人数、热水用水定额、热水温度、小时变化系数等均按照《建筑给水排水设计规范》并结合实际工程情况确定。计算得出逐时热水负荷特征如图所示。

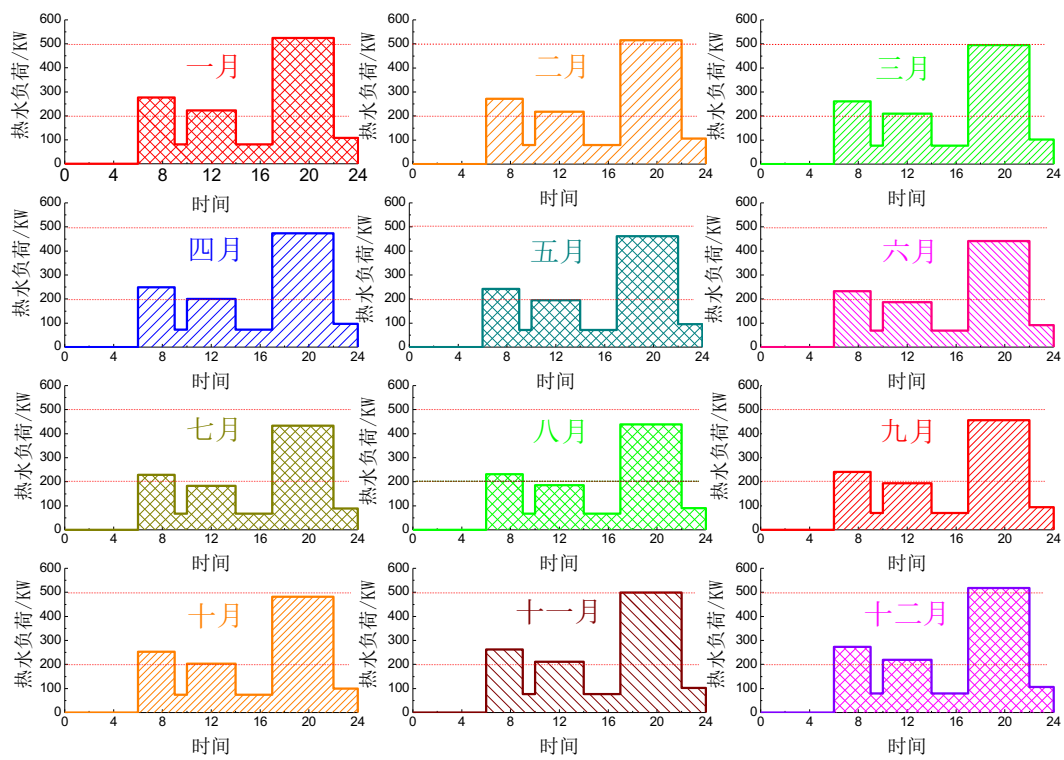


图 3.22 西宁酒店建筑逐月热水负荷

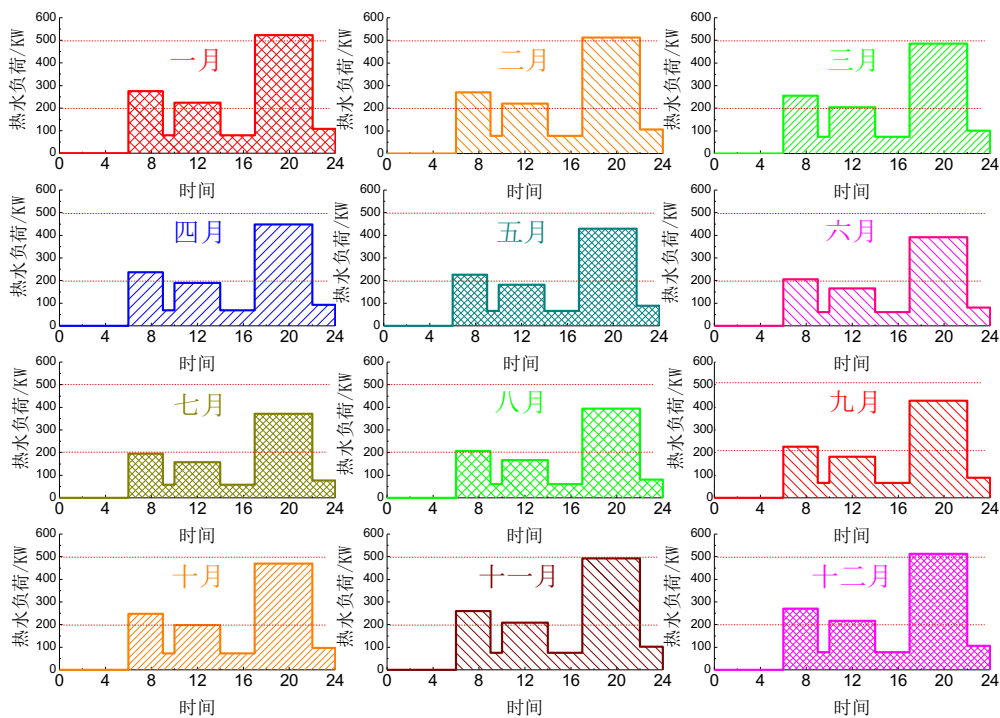


图 3.23 银川酒店建筑逐月热水负荷

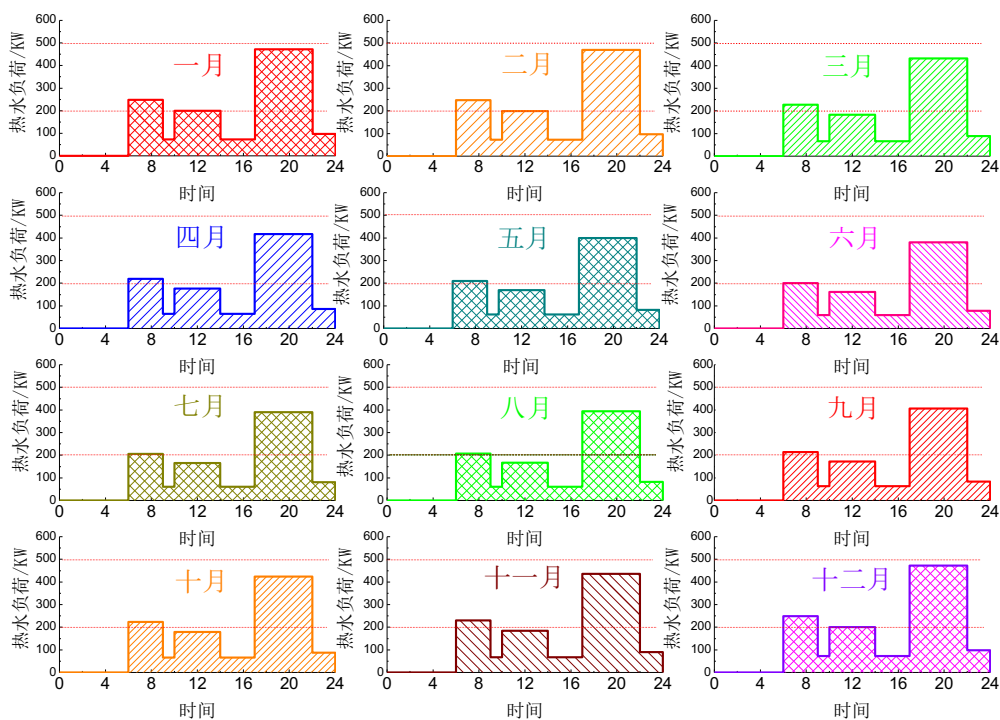


图 3.24 西昌酒店建筑逐月热水负荷

3.3 本章小结

本章给出了典型建筑冷热电负荷模拟设定条件，分析了建筑冷、热、电负荷特征，为后面章节的研究提供了基础数据。

4 太阳能供热系统研究（供暖、热水）

4.1 太阳能集热器

太阳能热利用的基本方式是利用光热转换材料将太阳辐射能转换为热能，产生的热能可应用于采暖、干燥、烹饪等各个领域，也可进行太阳能热发电、空调制冷等。太阳能供暖集热系统分为直接式与间接式两种。直接式太阳能集热系统在太阳能集热器中直接加热水并供给用户；间接式太阳能集热系统即太阳能集热器中加热液体传热工质，再通过换热器由该种传热工质加热水供给用户的系统。

太阳能集热系统常采用的集热器类型包括，全玻璃真空集热器、平板式集热器、聚光式集热器三种类型。

考虑到研究地区的区域与气候特征，对不同类型集热器的特征与适用性进行了归纳总结，结果于表 4.1 所示。由于研究地区日较差大，辐照强度大，而目前真空管的耐候性较差，现有技术条件下，真空管集热器不适宜在高原寒冷地区推广使用，而聚光式集热器初投资较高，运行维护复杂，故本研究主要以平板集热器为研究对象。

表 4.1 不同太阳能集热技术对比

常用集热技术	集热温度	结构特点	安装形式	集热效率	夏季过热问题
全玻璃真空集热器	低温集热 (低于 60℃)	结构简单、制造方便	屋面安装 外墙安装	低于平板型集热器	夏季存在过热问题
平板式集热器	低温集热 (低于 60℃)	工艺简单,加工成本低	屋面安装 外墙安装	略高于真空管	夏季存在过热问题
聚光式集热器	高温集热 (约 200℃)	技术要求高	屋面安装	高于其他两种	无过热问题

4.1.1 集热设备效率方程

集热器是太阳能供热系统中最重要组成部分,其性能和成本对整个系统的成败起着决定性作用。为了更好的了解集热器的运行特性,必须区别集热器的瞬时性能(即在给定的某个时刻的集热器性能,它是那个时刻的气象和运行条件的函数)和集热器全年运行性能。

某时间从集热器得到的有用的能量是吸收器吸收的太阳能量与散失到周围环境的能量之差,其中吸收的太阳能量是指到达集热器表面的太阳能减去由于集热器发射等造

成的光学损失，如图4.2所示。众多研究表明，大多数集热器都适用如下方程：

$$Q_u = F_R A [I_T (\tau\alpha)_n - U_L (T_i - T_a)]$$

$$\eta = Q_u / A I_T = F_R (\tau\alpha)_n - F_R U_L (T_i - T_a) / I_T$$

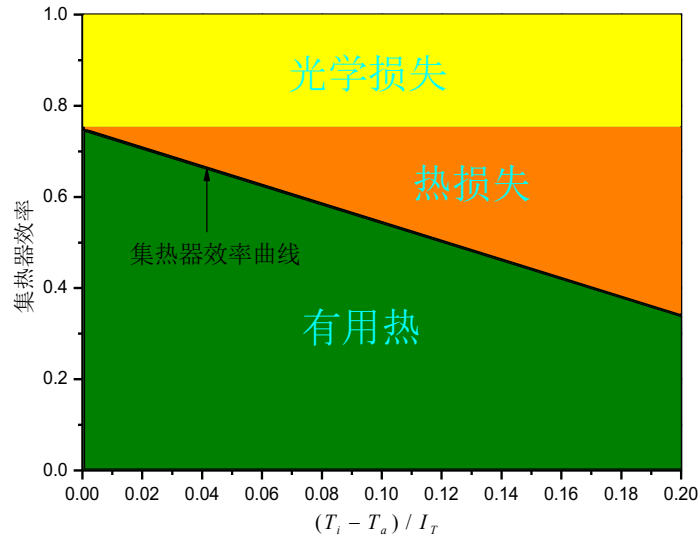


图 4.1 太阳能集热设备能量平衡原理示意

太阳能光热利用中常将工质进口温度（或工质平均温度）和环境温度的差值与太阳辐照度之比 $(T_i - T_a) / I_T$ 定义为归一化温差。

4.1.2 太阳能集热系统的有效集热量

太阳能集热量受到太阳辐照强度、环境温度以及太阳能集热器性能等的影响。当某时刻太阳能集热器所吸收的太阳辐射能量与集热器散失到周围环境的能量之差为正值时，集热器获得有效热量，当某时刻吸收的太阳能小于热损失时，集热器反向散热（如图 4.2 所示）。

令集热器的效率 $\eta = 0$ ，则定义 $[(T_i - T_a) / I_T]_c$ 为临界归一化温差，在临界归一化温差条件下，吸收的太阳能等于热损失。当 t 时刻的归一化温差 $[(T_i - T_a) / I_T]_t \leq [(T_i - T_a) / I_T]_c$ 时， $\eta \geq 0$ ，吸收的太阳能大于热损失，集热器获得有效热量；当 t 时刻的归一化温差 $[(T_i - T_a) / I_T]_t \geq [(T_i - T_a) / I_T]_c$ 时， $\eta \leq 0$ ，吸收的太阳能小于热损失，集热器反向散热。故太阳能集热系统的有效集热量可定义为：某时刻，当归一化温差小于临界归一化温差时，太阳能集热器所吸收的太阳辐射能量与集热器散失到周围环境的能量之差，称为该时刻的有效集热量。

所以 t 时刻有用能可表示为 $Q_u(T) = \eta_t \cdot A \cdot I_T$ ，则整个供暖季获得的有用能为 $Q_u = \sum \eta_t^+ \cdot A \cdot I_T$ ，上标+表示在累加中使用正值。

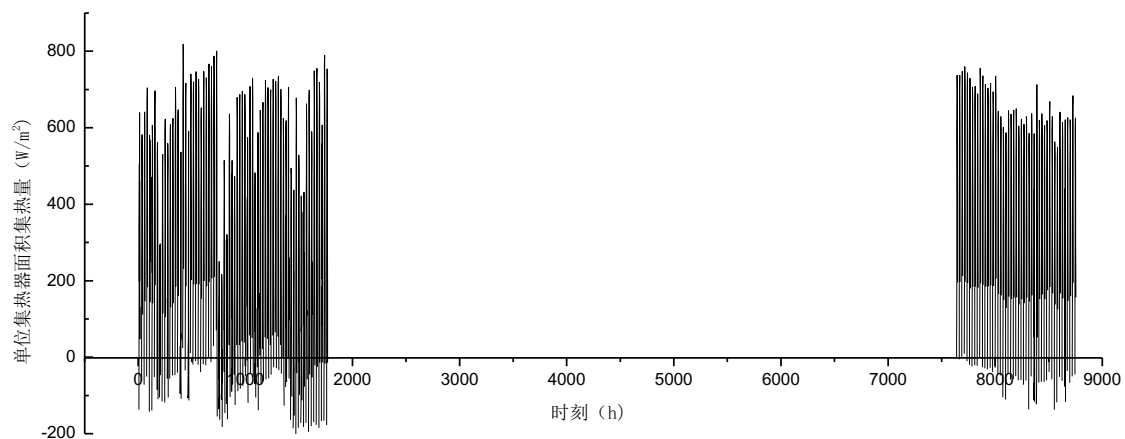


图 4.2 某安装倾斜角度下集热器单位面积集热量

4.1.3 典型集热设备效率曲线

通过详细调研后,可得平板太阳能集热器与真空管太阳能集热器两种典型设备的效率曲线图,如图 4.3 与 4.4 所示。从图中可以看出,集热器盖板材质与涂装均对集热器效率方程有影响,同时还可以看出,两种类型集热器效率曲线的也各自存在不同的特点,平板集热器的临界归一化温差明显小于真空管集热器。这主要是由于真空管集热器相对于平板集热器而言散热损失较小造成的。

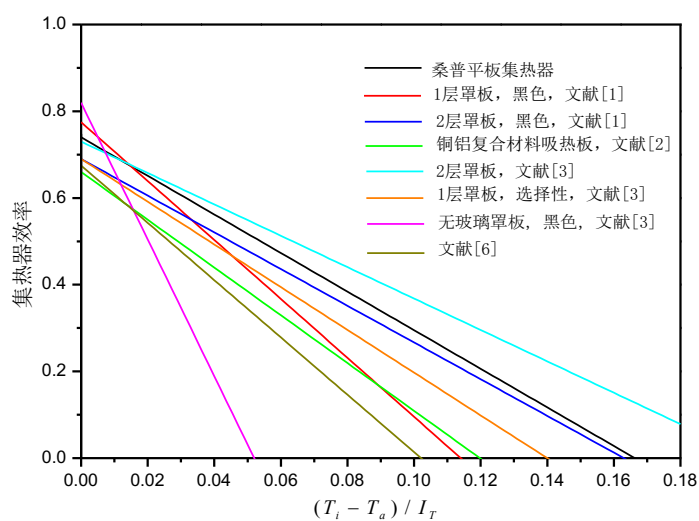


图 4.3 平板太阳能集热器效率曲线

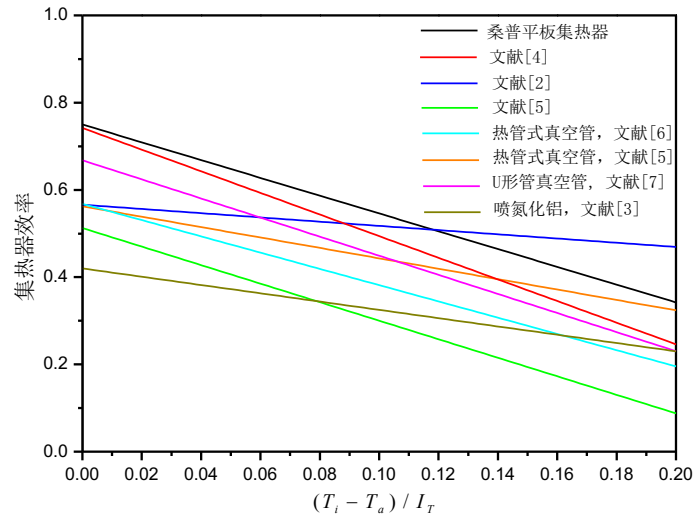


图 4.4 真空管太阳能集热器效率曲线

为了研究成果更符合现阶段设备制造工艺水平，满足工程实际需要，本研究调研了桑普、四季沐歌和力诺瑞特三家厂家某种型号的平板集热器和真空管集热器的三条效率曲线，分别为：

● 平板集热器：

桑普： $y_1 = 0.758 - 5.230x$

四季沐歌： $y_2 = 0.744 - 2.585x$

力诺瑞特： $y_3 = 0.75 - 2.040x$

● 真空管集热器：

桑普： $y_1 = 0.742 - 2.480x$

四季沐歌： $y_2 = 0.716 - 2.367x$

力诺瑞特： $y_3 = 0.709 - 1.430x$

为了使研究成果更具普遍意义，本研究采用了下述数学方法对集热器的性能进行了平均化处理。下面以平板集热器为例，说明平均化处理过程进行说明。

(1) 取散点

①以 0.001 为一个单位，取 x 点从 0—0.08，并分别取三条曲线对应的 y 值，共 3 组(x,y)值。

②将 y1 从点 x=0,y=0.758 开始每隔 0.002 取一个点，共取 27 个点；将 y2 去掉 x=0, y=0.744，从 x=0.001,y=0.741 开始取点，每隔 0.002 取一个点，共取 27 个点；从 y3 的 x=0.002,y=0.748 开始取点，每隔 0.002 取一个点，共取 27 个点。

(2) 拟合

①通过步骤 (1) 共可取得 81 个散点，并且 x 和 y 为一一对应的关系。保证了三条

曲线在拟合过程中取点的均匀性和同等地位。

②将 81 个点做出散点图，并且拟合出直线（拟合原理为最小二乘法）
 $y_{\text{平板}} = 0.753 - 3.358x$ 。

拟合曲线如图 4.5 所示。本研究采用上述方法拟合得到的效率方程作为研究基础，
 下述计算均采用该曲线方程。

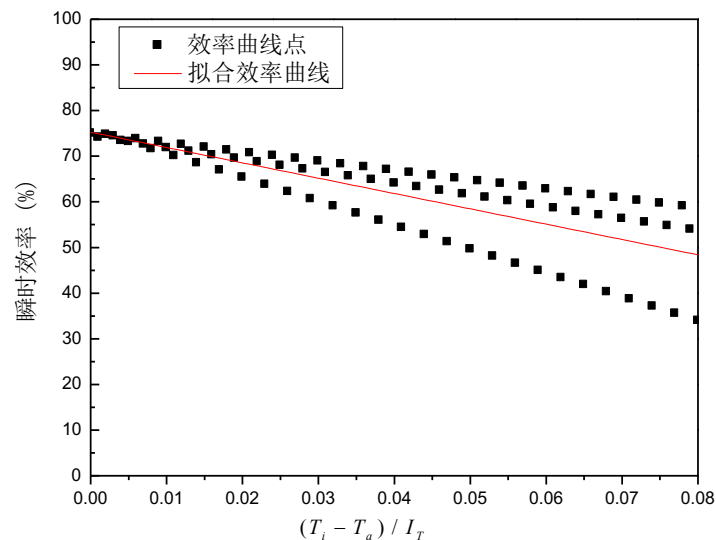


图 4.5 平板集热器拟合图

同样的方法，可以拟合真空管集热器 $y_1 = 0.742 - 2.480x$ ， $y_2 = 0.716 - 2.367x$ ， $y_3 = 0.709 - 1.430x$ 三条直线，得到拟合直线（拟合原理为最小二乘法）：
 $y_{\text{真空管}} = 0.752 - 2.160x$ 。

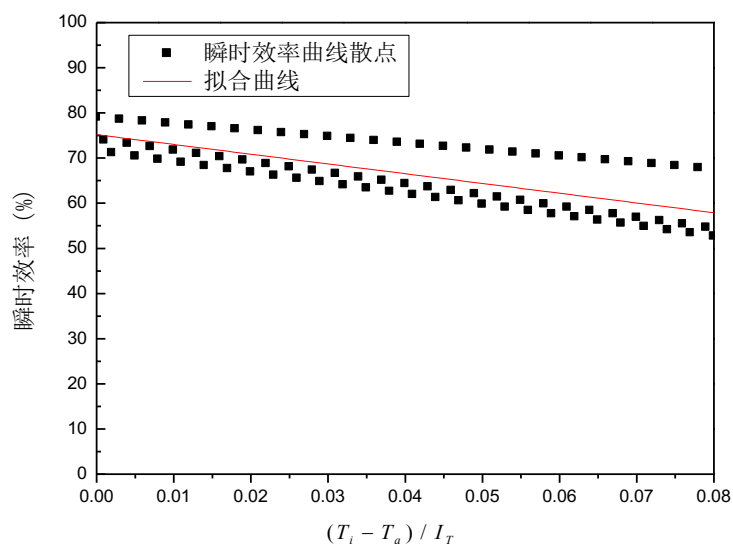


图 4.6 真空管集热器拟合图

4.1.4 基于有效集热量的太阳能集热器安装优化

令集热器的效率 $\eta=0$ ，则定义 $[(T_i-T_a)/I_r(S, \gamma_f)]_c$ 为临界归一化温差，在临界归一化温差条件下，吸收的太阳能等于热损失。当 t 时刻的归一化温差 $[(T_i-T_a)/I_r(S, \gamma_f)]_t \leq [(T_i-T_a)/I_r(S, \gamma_f)]_c$ 时， $\eta \geq 0$ ，吸收的太阳能大于热损失，集热器获得有效热量；当 t 时刻的归一化温差 $[(T_i-T_a)/I_r(S, \gamma_f)]_t \geq [(T_i-T_a)/I_r(S, \gamma_f)]_c$ 时， $\eta \leq 0$ ，吸收的太阳能小于热损失，集热器反向散热，临界归一化温差为所选定的集热器效率曲线在横坐标轴上的截距，如图4所示。故可定义太阳能集热系统的有效集热量为：某时刻，当归一化温差小于临界归一化温差时，太阳能集热器所吸收的太阳辐射能量与集热器散失到周围环境的能量之差，称为该时刻的有效集热量。

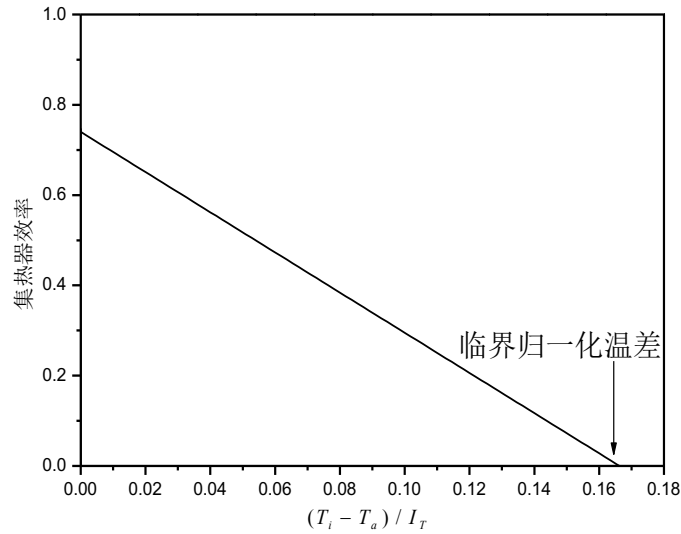


图 4.7 太阳能集热临界归一化温差

太阳能集热器获得有效集热量时所对应的太阳辐照强度成为有效太阳辐照量，其余时段的太阳辐照并不能加热集热器中的热水，产生有用热量。

4.3.4.1 优化模型建立

倾斜面太阳辐照量计算方法：

在进行太阳能集热器安装优化时，经常需要将水平面上太阳辐照量转换成倾斜面上太阳辐照量，或者将水平面上太阳辐照度转换成倾斜面上太阳总辐照度。

(1) 基本参数

①太阳赤纬角 δ 、时角 ω 、高度角 α_s

日地中心连线与赤道的夹角成为赤纬角 δ ，赤道以北为正、以南为负，可由 Cooper 近似公式计算得到：

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right)$$

式中：n 为一年中的日期序号。

时角 ω 为太阳在一天内的变化情况，每小时对应的时角为 15° ，从正午算起，上午为负，下午为正，数值等于离正午的时间（h）乘以 15° 。日出、日落时的时角最大，正午时为零。

高度角 α_s 为某地的太阳光线与当地地平面所交的最小线面角，它是太阳光线与当地地平面所交的最小线面角，计算方法如下：

$$\sin \alpha_s = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos \omega$$

式中： Φ 为地理纬度。

②计算模型

直射辐射：

设倾斜面与水平面之间的夹角，即倾角为 S ，太阳入射光线与接收表面法线之间的夹角 θ 的计算公式为：

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \Phi \cos S - \sin \delta \cos \Phi \sin S \cos \gamma_f + \cos \delta \cos \Phi \cos S \cos \omega + \cos \delta \sin \Phi \sin S \cos \gamma_f \cdot \cos \omega + \cos \delta \sin S \sin \gamma_f \sin \omega$$

倾斜表面上的太阳直射辐射照度为 $I_{D,\theta}$ ：

$$I_{D,\theta} = I_{DH} \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \alpha_s}$$

式中： I_n 为垂直与太阳光线表面上的太阳直射辐射照度 W/m^2 ； γ_f 为集热器表面安装方位角，对于朝向正南的倾斜表面为 0° ； I_{DH} 为水平面上的直射辐射照度， W/m^2 。

散射辐射：

关于散射辐射照度的计算模型有 Ray 异质分布模型、Liu-Jordan 模型、Page 模型、Alfonso Solar 模型以及 Iqbal 模型等，其中 Ray 异质分布模型更接近实际情况，该模型认为：倾斜面上天空散射辐照量是有太阳的辐照量和其余天空穹顶均匀分布的散射辐照量两部分组成，倾斜表面上的太阳散射辐射照度 $I_{d,\theta}$ ，按下式计算：

$$I_{d,\theta} = \frac{I_{dH}(1 + \cos S)}{2}$$

式中： I_{dH} 为水平面上的太阳散射辐射照度 W/m^2 。

地面反射辐射：

地面的反射辐射一般运用 Lambert 定律，把地面的反射辐射看成是各向同性的，地面反射的太阳辐射照度 $I_{R,\theta}$ ，按下式计算：

$$I_{R,\theta} = \rho_G \frac{(I_{DH} + I_{dH})(1 - \cos S)}{2}$$

式中： ρ_G 为地面反射比，取平均值 0.2， I_{DH} 为水平面上的直射辐射照度， W/m^2 。

倾斜面上总辐射：

倾斜表面上的太阳总辐射照度 $I_T(S, \gamma_f)$ ，按下式计算：

$$I_T(S, \gamma_f) = I_{D\cdot\theta} + I_{d\cdot\theta} + I_{R\cdot\theta}$$

集热系统运行策略：

通过采集室外空气干球温度、室外太阳辐射强度、太阳能集热器进口的工质温度等参数，计算集热器该时刻的归一化温差。用计算所得的归一化温差与临界归一化温差进行对比，当计算的归一化温差小于临界归一化温差时，开启集热器循环水泵，集热系统正常工作；当计算的归一化温差大于临界归一化温差时，关闭集热器循环水泵，集热系统停止工作，运行逻辑如图 5 所示。

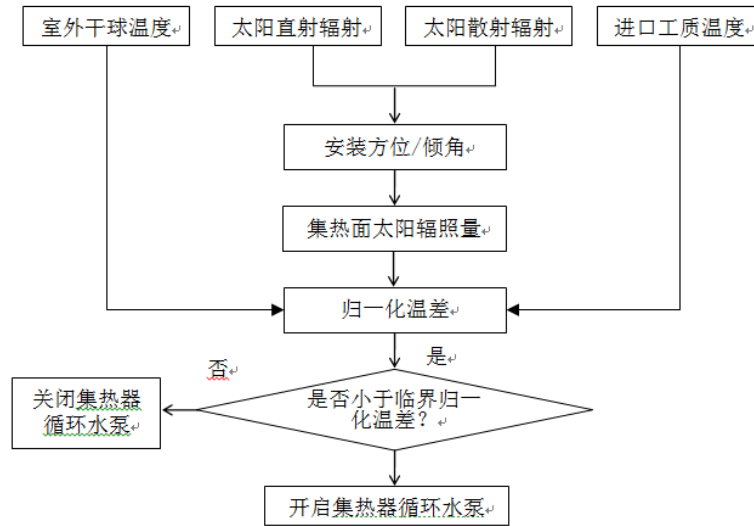


图 4.8 太阳能集热系统运行策略

优化数学模型：

传统的太阳能集热器最佳倾角与最佳方位角优化，均是通过计算不同倾角与不同安装方位角情况下的太阳辐照量，将辐照量最大的安装倾角与方位角作为最佳的安装倾角与方位角。例如对于全年使用的太阳能热水系统，通过计算不同安装方位角情况下的全年太阳辐照量来进行优化计算，对于季节性使用的太阳能供暖系统，则通过计算不同安装方位角情况下的供暖季节太阳辐照量来进行优化计算。

事实上，由前述的太阳能集热器的有效集热量可知，当 t 时刻的归一化温差 $[(T_i - T_a) / I_T(S, \gamma_f)]_t \geq [(T_i - T_a) / I_T(S, \gamma_f)]_c$ 时， $\eta \leq 0$ ，吸收的太阳能小于热损失，集热器反向散热。故这些时段内，太阳能集热系统停止工作，集热器表面所获得的太阳辐照量并不能转化为有用的供暖热量，故本研究根据计算不同倾角与不同安装方位角情况下的有效集

热量，将供暖季节有效集热量累加量最大的安装倾角与方位角作为最佳的安装倾角与方位角。供暖季节有效集热量的数学描述为：

$$Q_u(S, \gamma_f) = \sum \frac{3600 \eta_T^+ \cdot A \cdot I_T(S, \gamma_f)}{1000}$$

式中： $Q_u(S, \gamma_f)$ 为供暖季节的有效集热量，kJ； A 为集热器采光面积， m^2 ； $I_T(S, \gamma_f)$ 为供暖季节倾斜面逐时太阳辐照强度， W/m^2 ； S, γ_f 分别为集热器倾角与集热器表面安装方位角，°； η_T^+ 为集热器瞬时效率，%，上标+表示在累加中使用正值。所以优化目标函数应为使得集热器在供暖季节获得的有效集热量最大，即：

$$MAX[Q_u(S, \gamma_f)] = MAX \left[\sum \frac{3600 \eta_T^+ \cdot A \cdot I_T(S, \gamma_f)}{1000} \right]$$

4.3.4.2 优化模型求解

根据图 4.9 给出的求解流程，利用 MATLAB 软件编制求解程序进行求解。

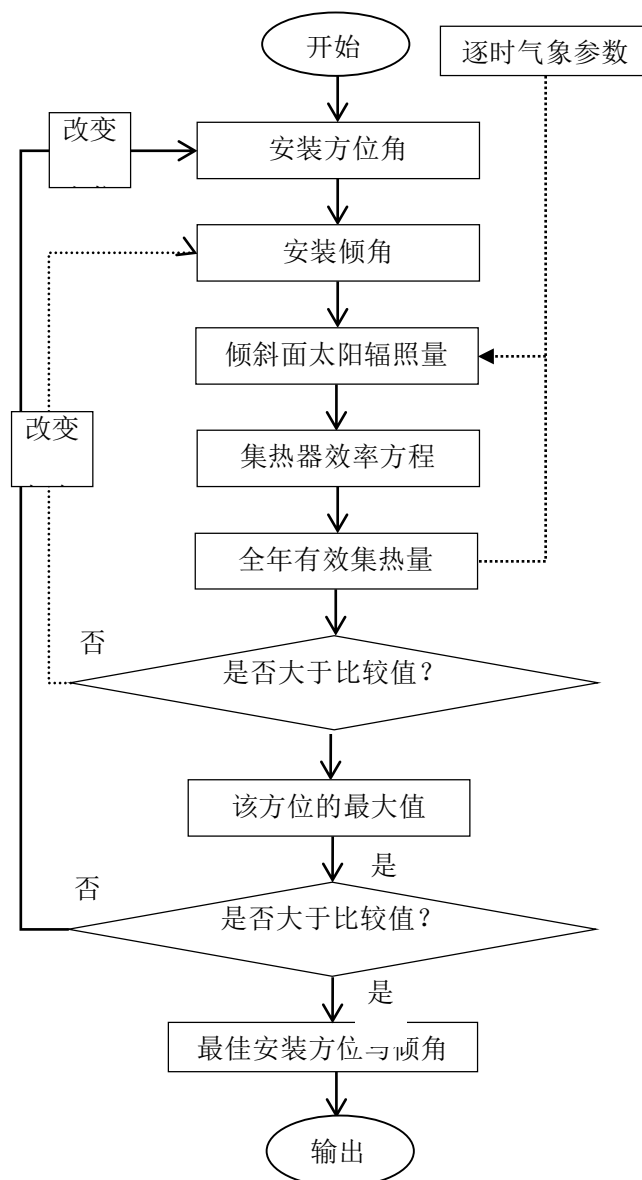


图 4.9 求解流程

4.3.4.3 优化结果

利用上述优化模型，对拉萨太阳能集热器安装方位与安装倾角进行了模拟优化计算，结果如图 4.10 所示。从图中可以看出，集热器最优的安装参数为：安装方位角 5° 、安装倾角 55° 。

从图中可以看出，集热器朝向在 $-20^{\circ} \sim +20^{\circ}$ 的朝向范围内时，有效集热量波动在 10% 以内，且偏东对有效集热量影响较大；安装倾角选择在当地纬度 $\sim$ 当地纬度 $+25^{\circ}$ 的范围内，有效集热量波动在 15% 以内。故在太阳能集热设计中，为了不受建筑使用条件的制约，可以适当拓展集热器安装方位及倾角。

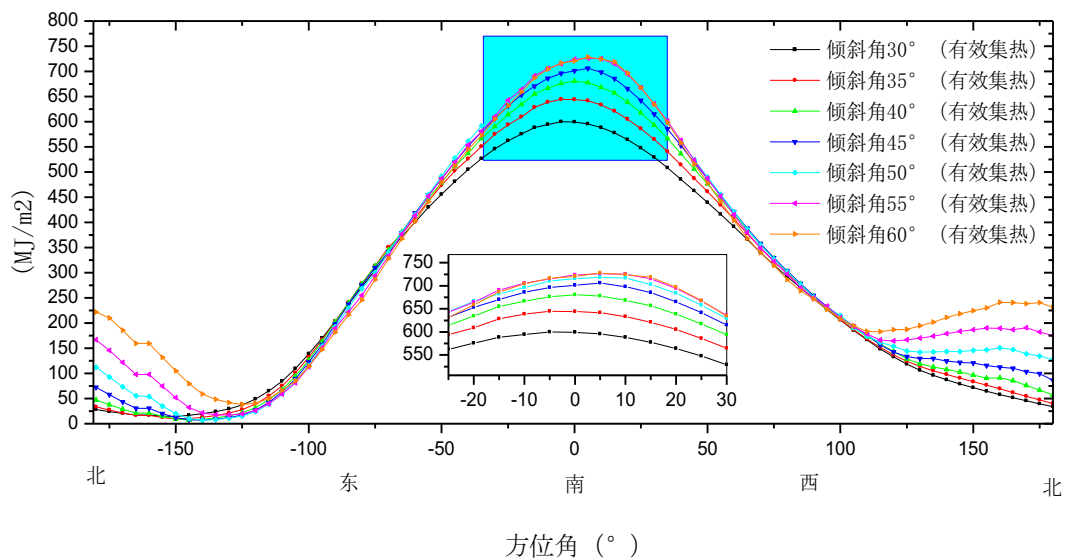


图 4.10 银川地区集热器安装方位与倾角优化

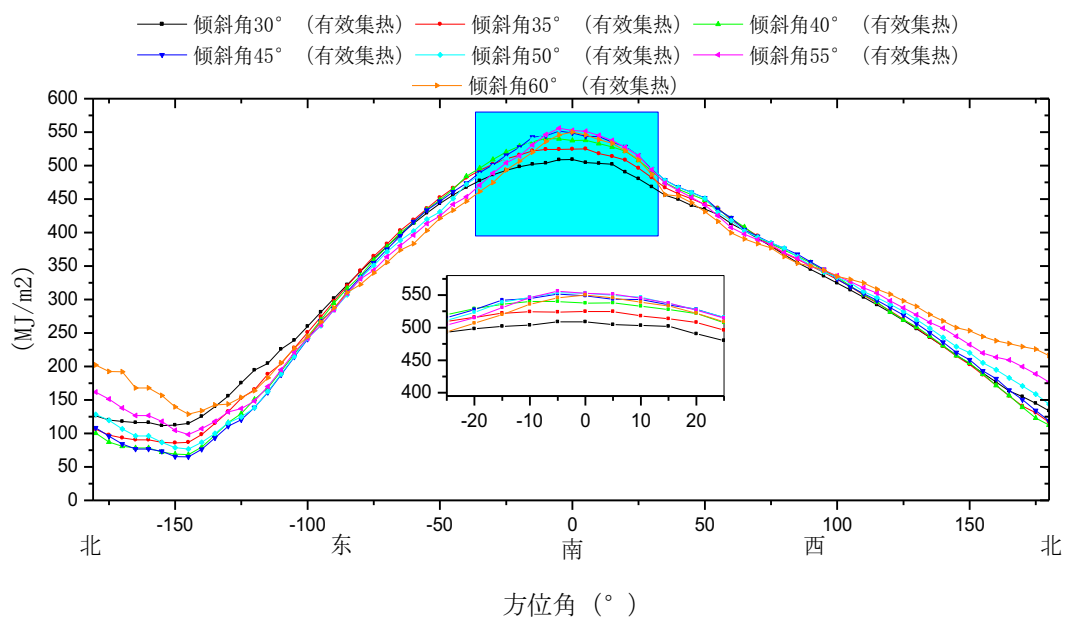


图 4.11 西昌地区集热器安装方位与倾角优化

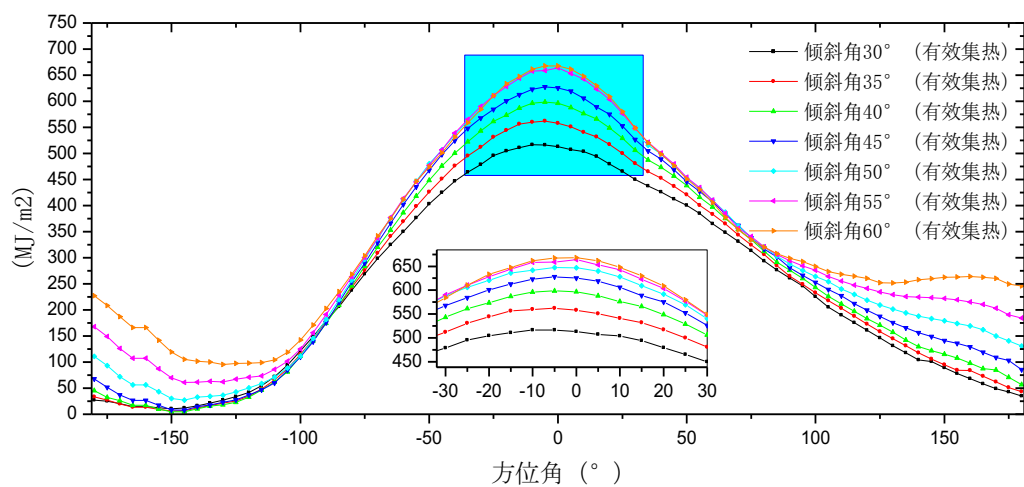


图 4.12 西宁地区集热器安装方位与倾角优化

4.2 太阳能供暖系统

太阳能热水采暖是利用太阳能的辐射能量，代替常规能源（煤、石油、天然气）为建筑提供采暖热水，使房屋达到一定的热舒适要求（如图 4.13 所示）。其一般由太阳能集热系统、蓄热系统、末端供热采暖系统、自动控制系統和其他能源辅助加热/换热设备集合组成。

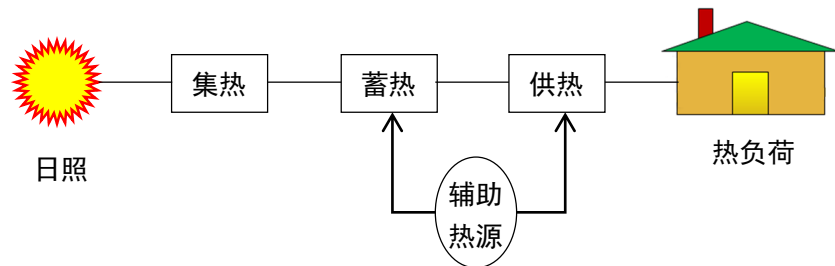
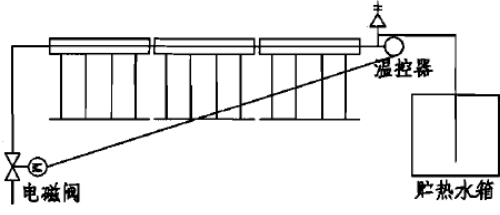
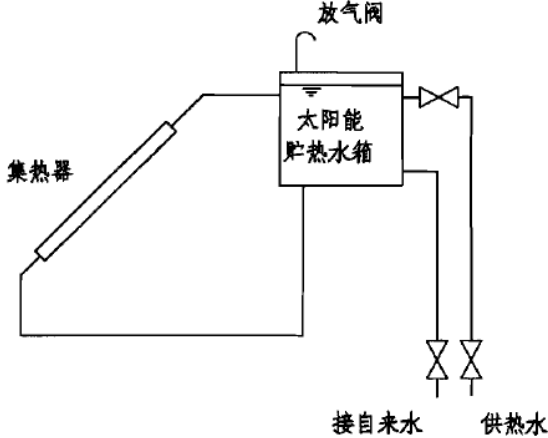


图 4.13 太阳能热水供暖系统

典型的太阳能供暖系统如表 4.2 所示。根据系统不同循环的特点，可以将其分为强制循环间接系统、强制循环直接系统、直流式系统、自然循环系统等形式。

表 4.2 典型太阳能供暖系统

号	系统形式	图式	系统特点	适用范围
1	强制循环间接系统		太阳能集热器加热传热工质，通过热交换器加热供给使用端的系统；利用水泵使传热工质循环加热；易保证系统水质和防冻；管线布置灵活；系统复杂，造价高	适用于规模较大的热水供应和空调采暖系统，对供热质量建筑外观、水质、防冻要求严格的场合
2	强制循环直接系统		利用水泵使水在太阳能集热器中直接循环加热供给使用端的系统；要求算来水水质较高；集热系统效率高；系统较复杂，效率高	适用于规模较大的热水供应系统，初期投资低，对建筑物的外观要求严格的场合

3	直流式系统		水在集热器中不经过循环直接加热；系统简单，等价较低；维护管理方便；要求自来水水质较高；对贮热水箱位置有限制，建筑立面较难处理；无法通过系统运行控制实现防冻	适用于规模较小的热水供应系统，自来水水质较好，对热水质量和建筑物外观要求不太高的场合
4	自然循环系统		依靠液体温度差引起液体密度差导致的热虹吸作用循环；维护管理方便，开式系统，水质不易保证；贮热水箱位置须高于集热器系统，建筑立面较难处理；无法通过系统运行控制实现防冻和过热防护	适用紧凑型太阳能热水器和系统供应规模较小的热水供应系统，对建筑物外观要求不高的场合

4.3 太阳能热水系统

太阳能热水系统主要由太阳能集热系统和热水供应系统构成，包括太阳能集热器、贮水箱、循环管道、支架、控制系统、热交换器和水泵等设备和附件。太阳能集热系统是太阳能热水系统特有的组成部分，是太阳能是否得到合理利用的关键。

4.3.1 太阳能热水系统的分类

根据不同的分类方式，太阳能热水系统可以分成不同的形式。结合本次研究论述的内容，太阳能热水系统主要可分为以下几种。

- (1) 按太阳能集热系统与太阳能热水供应系统的关系分为直接式系统和间接式系统。

直接式系统是指在太阳能集热器中直接加热水供给用户的系统；间接式系统是指在太阳能集热器中加热某种传热工质，再利用该传热工质通过热交换器加热水供给用户的系统。由于热交换器阻力较大，间接式系统一般采用强制循环系统。考虑到用水卫生、减缓集热器结垢以及防冻因素，在投资允许的条件下，一般优先推荐采用间接系统；直接系统最好根据当地水质要求探讨是否需要自来水上水进行软化处理。

- (2) 按有无辅助热源划分为有辅助热源系统和无辅助热源系统。

有辅助热源系统是指太阳能和其他水加热设备联合使用来提供热水，在没有太阳能

时，仅依靠系统配备的其他能源的水加热设备也能提供建筑物所需热水的系统。在保证生活热水供应质量的场合，辅助热源是必不可少的。无辅助热源系统是指仅依靠太阳能来提供热水的系统。该系统中没有其他水加热设备，在太阳辐照量不足的情况下，系统无法产出足够的热水，热水供应的可靠性较差。

(3) 按供热水范围划分为集中供应热水系统、集中-分散系统和分散供热水系统。

集中供热水系统是指为几栋建筑、单栋建筑或多个用户供水的系统；集中-分散系统是采用集中的太阳能集热器和分散的贮水箱供给单栋建筑或建筑物内某一局部单元或单个用户所需热水系统；分散供热水系统是指为建筑物内某一局部单元或单个用户供应热水的系统。

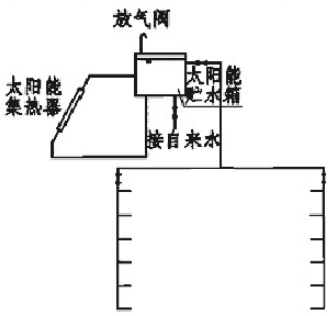
(4) 按太阳能集热系统运行方式划分为自然循环系统、直流式系统和强制循环系统。

自然循环系统是指太阳能集热系统仅利用传热工质内部的温度梯度产生的密度差进行循环的太阳能热水系统，也称为热虹吸系统；直流式系统是指传热工质一次流过集热器系统加热后，进入贮水箱或用热水处的非循环太阳能热水系统；强制循环系统是指利用机械设备等外部动力迫使传热工质通过集热器进行循环的太阳能热水系统。

4.3.2 太阳能热水系统的特点及适用性

通过根据具体情况将各种基本热水供应系统和太阳能集热系统进行优化组合，设计成综合方案，将不同形式的太阳能集热系统和热水供应系统的特点、流程和适用性进行总结后，将集中供热水系统，分散供热水系统和热水供应方式及表征归纳如下：

表 4.3 常用集中供热水太阳热水系统表征表

系统形式	简图	系统特点	适用范围
单水箱系统 自然循环		1. 采用开式系统，设有安全阀，运行安全可靠 2. 热水与外界空气接触，水质易受污染 3. 贮水箱位置必须高于集热器，建筑外立面较难处理 4. 热水供应系统没有循环管路，不利节水 5. 全部依靠太阳能，没有辅助能源，供水温度较难保证	适用于太阳辐射较好，缺少辅助热源，热水供应规模较小对热水质量和建筑外观要求不高

直流式 单水箱系统		1. 水箱可放在阁楼、技术夹层或地下室，不影响建筑外观设计 2. 系统采用开式系统，不需要安全阀，运行安全可靠 3. 热水与外界空气连接，水质易受污染 4. 采用定温放水方式，供水不连续，防水垫温度设置需随太阳辐射变化调节 5. 热水供应系统没有循环管路，不利节水和提高热水供应质量	适用于热水供应规模较小，对热水质量要求不高，建筑物外观要求严格，生活热水水质要求和系统防冻要求不高的场合
直流式 双水箱系统		1. 配备供热水箱和辅助热源，热水温度有较大保障 2. 采用开式系统，不需要安全阀，运行安全可靠 3. 才用了干管循环的方式，水供应质量进一步提高 4. 热水与外界空气连接，水质易受污染 5. 采用定温放水方式，供水不连续，防水垫温度设置需随调养辐射变化调节	适用于热水供应规模较大，对热水质量要求较高，建筑物外观要求严格，水质要求和防冻要求不高的场合
强制循环 单水箱直接系统		1. 水箱放置在地下机房，不影响建筑外观设计 2. 热水供应质量有保障，太阳能集热系统运行效率较高 3. 采用了干管和立管循环的方式，热水供应质量需进一步提高 4. 热水与外界空气连接，水质易受污染 5. 系统需要循环水泵，投资和运行费用较高，且需占用部分机房面积	适用于自来水压力稳定，热水供应规模较大，对热水质量和建筑物外观要求严格的场合
强制循环 单水箱间接系统		1. 水箱可放在阁楼、技术夹层或地下室，不影响建筑外观设计 2. 热水供应质量有保障，太阳能集热系统运行效率较高 3. 采用了干管和立管循环的方式，热水供应质量需进一步提高 4. 采用闭式系统，水质不易污染，有保障，可采用防冻液防冻 5. 系统需要循环水泵，投资和运行费用较高，且需占用部分机房面积	适用于热水供应规模较大，建筑外观要求严格，且水质要求高，有防冻要求的建筑

4.4 太阳能蓄热系统容量确定

蓄热容积过大会造成水箱温度明显低于设计供水温度，系统需长时间启动辅助热源

进行供热，降低了系统的节能性，蓄热容积过小则会造成集热器回水温度偏高，降低集热器的集热量，同样会降低系统的节能性。可见，如何确定蓄热水箱的容积，成为太阳能热水供暖系统设计的重要环节。国家标准《太阳能供热采暖工程技术规范》GB50495-2009 中指出，各类太阳能供热采暖系统对应每平方米太阳能集热器采光面积的储热水箱应按照表 1 进行选取，但是由于不同地区、不同建筑类型以及不同建筑参数的差异，导致最佳蓄热容积不同，现有技术并未给出准确的蓄热容积确定方法。

表 4.4 太阳能集热器采光面积的储热水箱

系统类型	小型太阳能供热采暖系统	短期蓄热太阳能供热采暖系统	季节蓄热太阳能供热采暖系统
容积范围 (L/m ²)	40-100	50-150	1400-2100

4.4.1 太阳能供热蓄热容积优化方法

4.4.1.1 优化方法

针对现有存在的问题，提供一种能够以辅助热源全年能耗最低为优化目标函数，获得太阳能热水供暖系统最优蓄热容积的确定方法。

优化方法是通过以下技术方案实现的：一种太阳能热水供暖系统蓄热容积确定方法，其特征在于：以太阳能供暖系统能流平衡关系为约束条件，蓄热系统容积为优化决策变量，辅助热源全年能耗最低为优化目标函数，建立优化模型，具体为：

a)、约束条件

①系统逐时热量平衡关系：

第 h 时刻集热器直接供热量可表示为：

$$Q_{j.g}(h) = \begin{cases} Q_j(h), & Q_f(h) > Q_j(h) \\ Q_f(h), & Q_f(h) \leq Q_j(h) \end{cases}$$

第 h 时刻水箱余热量的热平衡方程可表示为：

$$Q_y(h, V) = \begin{cases} Q_y(h-1, V) + \hat{Q}(h, V) - Q_{g.q}(h), & Q_y(h-1, V) \geq Q_{g.q}(h) \\ 0, & Q_y(h-1, V) < Q_{g.q}(h) \end{cases}$$

第 h 时刻由太阳能集热直接供热后不足的热量可表示为（不足热需求将由蓄热量与辅助热源供热）：

$$Q_{g,q}(h) = \begin{cases} Q_j(h) - Q_f(h), & Q_f(h) - Q_j(h) < 0 \\ 0, & Q_f(h) - Q_j(h) \geq 0 \end{cases}$$

第 h 时刻水箱即时蓄热量可表示为：

$$\hat{Q}(h, V) = \begin{cases} Q_j(h) - Q_f(h), & Q_j(h) - Q_f(h) > 0 \\ 0, & Q_j(h) - Q_f(h) \leq 0 \end{cases}$$

第 h 时刻辅助热源供热量可表示为：

$$\hat{Q}_{fz}(h) = \begin{cases} Q_{g,q}(h) - Q_y(h-1, V), & Q_y(h) = 0 \\ 0, & Q_y(h) \neq 0 \end{cases}$$

式中：\$Q_j(h)\$ 为第 h 时刻集热器集热量，

$$Q_j(h) = \int_{h-1}^h \frac{3600\eta_h^+ \cdot A_{r,w} / \cos\theta \cdot I(h)}{1000} dt, \text{ kJ};$$

\$\theta\$ 为集热器安装倾角，°；

\$I(h)\$ 为第 h 时刻倾斜面的太阳辐照强度，W/m²；

\$Q_f(h)\$ 为第 h 时刻供暖所需热量，kJ；

②全年能耗量（以电量来算）：

$$Q(V) = \sum_{h=0}^{8760} \frac{\hat{Q}_{fz}(h)}{COP(h)}$$

式中，\$Q(V)\$ 为全年能耗量（以电量来算），kWh；

\$COP(h)\$ 为第 h 时刻空气源热泵的制热性能系数，W/W；

③水箱水温上限约束：

$$t \leq t_{\max}$$

式中，\$t_{\max}\$ 为水箱的最大水温，°C；

b)、目标函数

辅助热源全年能耗最小：

$$S = \min Q(V) = \min \sum_{h=0}^{8760} \frac{\hat{Q}_{fz}(h)}{COP(h)}。$$

本发明所述的太阳能热水供暖系统蓄热容积确定方法，其通过所述优化模型，利用 MATLAB 软件编制求解程序进行求解，具体为：

- a)、根据建筑参数及逐时气象参数，计算用户负荷需求；
- b)、由集热器光热面积与安装角度初步确定太阳能热水供暖系统的蓄热容积；
- c)、结合逐时气象参数以及设备热力特性，得出集热量，形成系统能流平衡关系；
- d)、根据辅助热源逐时消耗电量，计算建筑年能耗；

e)、判断建筑年能耗是否小于设定值，若年能耗小于设定值，则获得太阳能热水供暖系统的最优蓄热容积，并输出，若年能耗大于设定值，则返回步骤 b)，重新确定太阳能热水供暖系统的蓄热容积。

本发明主要以太阳能供暖系统能流平衡关系为约束条件，蓄热系统容积为优化决策变量，辅助热源全年能耗最低为优化目标函数，建立优化模型，最终确定太阳能热水供暖系统的最优蓄热容积，有效解决了因不同地区、不同建筑类型以及不同建筑参数的差异，而导致的最佳蓄热容积不同的问题，从而起到了良好的节能作用。

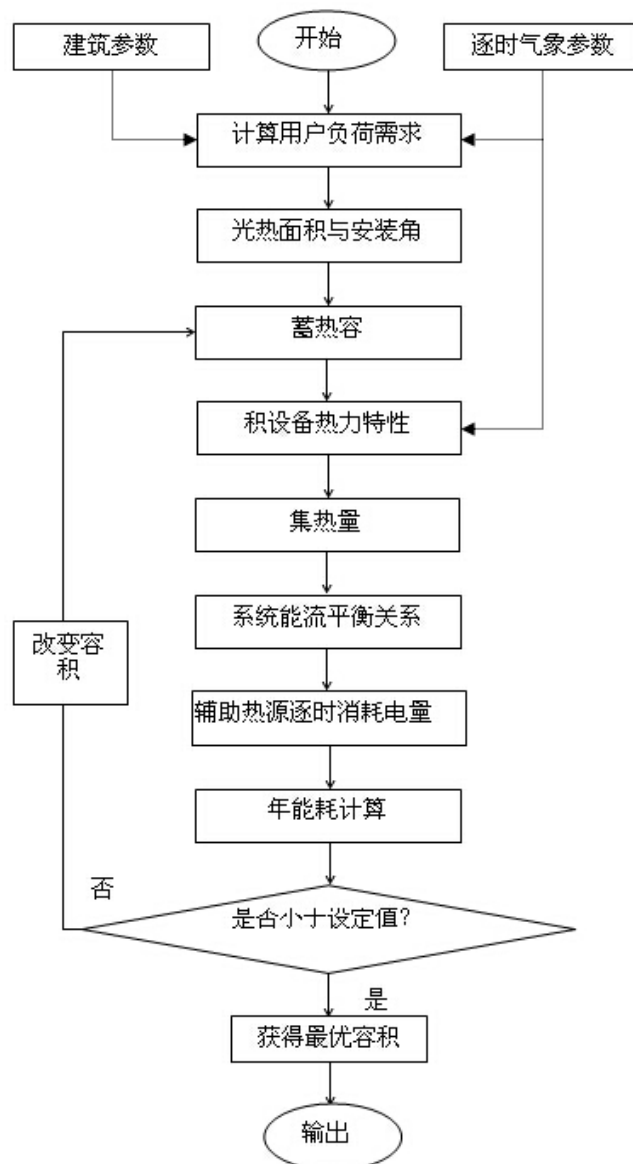


图 4.14 优化求解流程

4.4.1.2 案例分析

(1) 工程简介

某三层酒店建筑，建筑总面积约为 3000m^2 ，建筑围护结构满足《公共建筑节能设计标准》。利用 Dest 负荷模拟软件可计算得，全年建筑供暖负荷为 142178.56kWh 。建筑太阳能集热面积为 350m^2 ，项目采用空气源热泵作为辅助热源，供暖回水温度为 50°C ，供水温度为 60°C ，供回水温差为 10°C 。

(2) 优化结果

利用上述蓄热容积优化方法得出的结果与《规范》推荐值所得的能耗结果对照，如表 4.5 所示。

表 4.5 蓄热容积优化对照

指标 (L/m ²)	203	50	100	150
能耗 (kWh)	21667	33489	23256	21967

该结果与拉萨火车站太阳能供暖工程，蓄热水箱容积设计指标较为接近，由此可见，拉萨火车站太阳能供暖工程蓄热水箱偏大的主要原因是施工与运行管理不当造成的。具体表现为：施工中未按照设计确定集热器安装面积，所安装集热器面积偏小；运行中未采取集热器防晒过热措施，导致集热器大量爆管，进一步减少了集热器面积。

表 4.6 拉萨火车站太阳能供暖工程水箱指标

	集热器面积（m ² ）	水箱容积（m ³ ）	容积指标（L/m ² ）	备注
设计值	6720	1500	223	目前约有一半爆管（766L/m ² ）
实际值	3916	1500	383	
文献来源：《暖通空调》2007 年第 6 期，2009 年第 7 期，2013 年第 6 期。				

4.4.2 准弹性多级蓄热容积系统设想

理想的蓄热系统应满足两个条件：①水温满足设计要求；②不影响集热器集热效率。但要在强波动非稳态的集热/用热条件下实现上述条件，则要求蓄热容积具有蓄热容积可根据蓄热量变化进行不断调整的特点，将能实现该特点的蓄热系统定义为弹性理想蓄热系统。

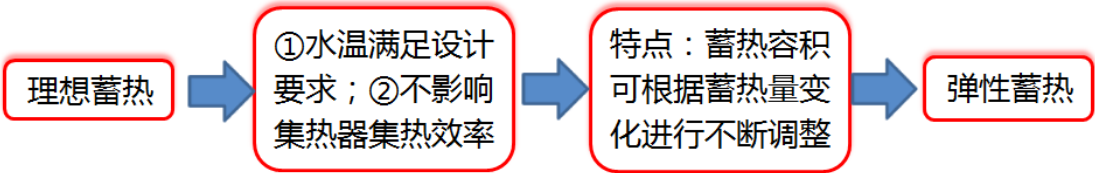
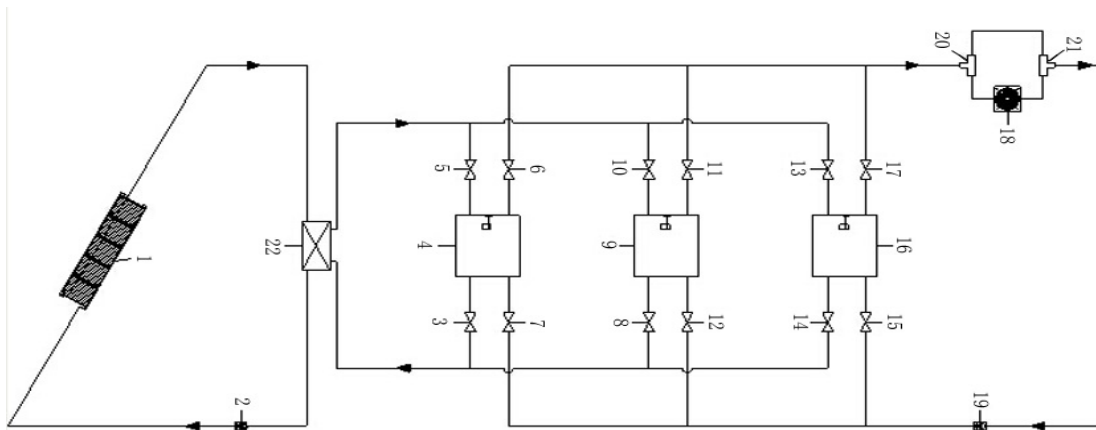


图 4.15 弹性理想蓄热系统理念

但是，实际水箱热水蓄热系统不可能连续实现蓄热容积可根据蓄热量变化进行不断调整（弹性）的特点，因此本研究提出了，可根据蓄热量变化阶梯状改变蓄热水箱容积的准弹性多级蓄热系统，以不断趋近弹性蓄热系统，具体工作原理如图 4.16 所示。



图中标记：1 为太阳能集热器，2 为集热循环水泵，3 为阀门十二，4 为第一蓄热水箱，5 为阀门一，6 为阀门二，7 为阀门十一，8 为阀门十，9 为第二蓄热水箱，10 为阀门三，11 为阀门四，12 为阀门九，13 为阀门五，14 为阀门八，15 为阀门七，16 为第三蓄热水箱，17 为阀门六，18 为辅助热源，19 为供暖循环水泵，20 为第一三通阀，21 为第二三通阀，22 为换热器。

图 4.16 准弹性多级蓄热系统工作原理

太阳能集热器获得太阳集热量，将热量传递给集热器中的工作介质（乙二醇水溶液），启动集热循环水泵，将经过太阳能集热器加热的换热介质送至换热器中，在换热器内加热蓄热水箱中的回水。

控制阀门一和阀门十二，使换热器与第一蓄热水箱连通形成循环通路，被换热器加热的回水通过阀门一流入第一蓄热水箱，低温回水由阀门十二不断流入换热器，由此不断获得太阳能集热量；当第一蓄热水箱的蓄热量高于设定值，即水温高于设定值时，关闭阀门一和阀门十二，控制阀门三和阀门十，使换热器与第二蓄热水箱连通形成循环通路，被换热器加热的回水通过阀门三流入第二蓄热水箱，低温回水由阀门十不断流入换热器，由此不断获得太阳能集热量；当第二蓄热水箱的蓄热量高于设定值，即水温高于设定值时，关闭阀门三和阀门十，控制阀门五和阀门八，使换热器与第三蓄热水箱连通形成循环通路，被换热器加热的回水通过阀门五流入第三蓄热水箱，低温回水由阀门八不断流入换热器，集热系统所获得的热量，不断通过第三蓄热水箱进行蓄积，由此不断完成集热、蓄热循环；在蓄热过程中，所述被换热器加热的回水能够同时对多个蓄热水箱进行蓄热。

控制阀门二和阀门十一，使用户末端与第一蓄热水箱连通形成循环通路，供暖回水通过阀门十一进入第一蓄热水箱获取热量，加热回水，被加热的供暖回水通过阀门二供出，若出水温度不满足设计要求，则控制其他蓄热水箱的阀门开启同时进行供水，若出水温度还是不满足设计要求，再将供水通过第一三通阀流入辅助热源，由辅助热源将其加热至设计供水温度，再通过第二三通阀供给用户，若出水温度满足设计要求，则供水通过第一三通阀与第二三通阀直接供给用户；当第一蓄热水箱无有效的热量被取用后，关闭

阀门二和阀门十一，控制阀门四和阀门九动作，使用户末端与第二蓄热水箱连通形成循环通路，则供暖回水通过阀门九动作，将其注入第二蓄热水箱进行加热，然后由阀门四流出，若出水温度不满足设计要求，则控制其他蓄热水箱的阀门开启同时进行供水，若出水温度还是不满足设计要求，再将供水通过第一三通阀流入辅助热源，由辅助热源将其加热至设计供水温度，再通过第二三通阀供给用户，若出水温度满足设计要求，则供水通过第一三通阀与第二三通阀直接供给用户；当第二蓄热水箱无有效的热量被取用后，关闭阀门四和阀门九，控制阀门六和阀门七动作，使用户末端与第三蓄热水箱连通形成循环通路，则供暖回水通过阀门七动作，将其注入第三蓄热水箱进行加热，然后由阀门六流出，若出水温度不满足设计要求，则控制其他蓄热水箱的阀门开启同时进行供水，若出水温度还是不满足设计要求，再将供水通过第一三通阀流入辅助热源，由辅助热源将其加热至设计供水温度，再通过第二三通阀供给用户，若出水温度满足设计要求，则供水通过第一三通阀与第二三通阀直接供给用户，完成蓄热供热。

本研究基于 4.4.1 节所述案例，利用 matlab 编制模拟计算程序，对理想蓄热水箱、刚性蓄热水箱以及双级准弹性蓄热水箱系统进行了模拟仿真计算。其中刚性水箱（水箱容积 70m^3 ）、双级准弹性水箱（2 个 35m^3 水箱）供热系统逐时供水水温如图 4.17 所示。

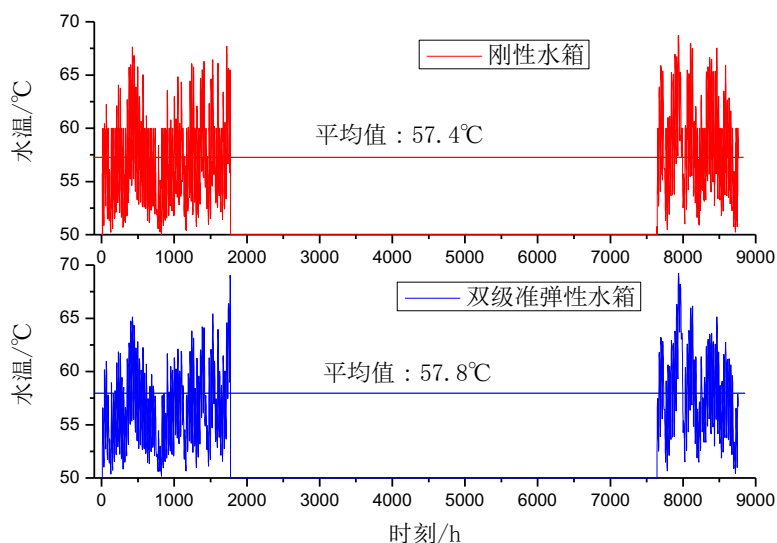


图 4.17 供水水温曲线

从图 4.17 可以看出，准弹性水箱系统的平均供水温度约为 57.8°C ，刚性水箱系统平均供水温度约为 57.4°C 。三种蓄热模型情况下，所计算的辅助热源能耗如图 4.18 所示。从图中可以看出，双级蓄热系统相比单级刚性蓄热系统能耗降低了约 5%，但仍然高于理想水箱供热系统辅助热源能耗。造成双级准弹性蓄热系统能耗降低的原因是，逐时供热热水品质得以提高（但由于双级系统仍然达不到理想弹性模型，提升有限），降低了由于温度不满足设计要求补热的辅助热源能耗，减少了水箱的废热留存。从图中还

可以看出，即使是经优化的刚性蓄热系统与理想蓄热模型供热系统相比，仍然有近 16% 左右的有效集热量无法被有效利用，降低了系统的节能性与经济性。

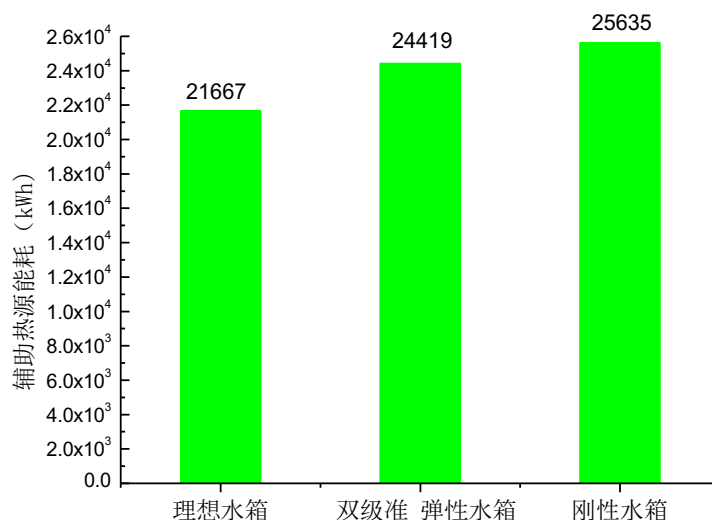


图 4.18 辅助热源能耗

图 4.19 给出了准弹性蓄热供热系统，第一水箱与第二水箱供热曲线。从图中可以看出，第一水箱全年供热量为 38905.2kWh，第二水箱全年供热量为 40072.4kWh，辅助热源全年供热量为 63200.9 kWh，该太阳能供热系统全年太阳能贡献率 f 约为 55.5%。

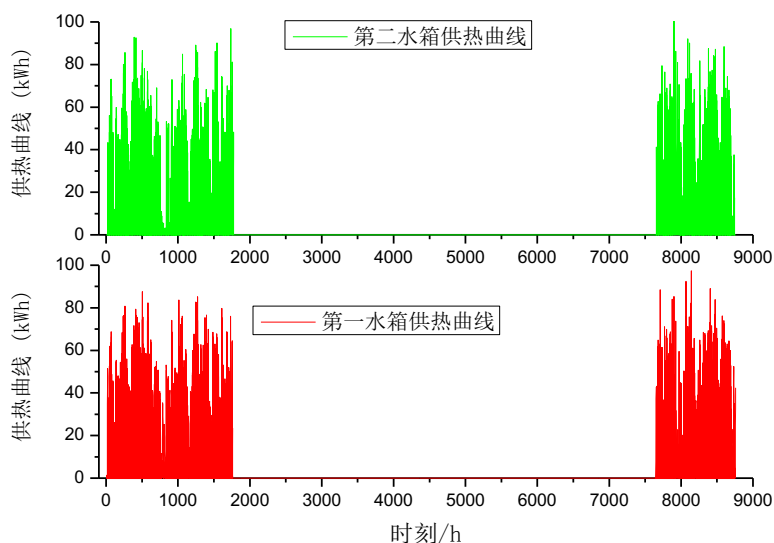


图 4.19 第一水箱与第二水箱供热曲线

4.5 辅助热源

4.5.1 辅助热源位置设置

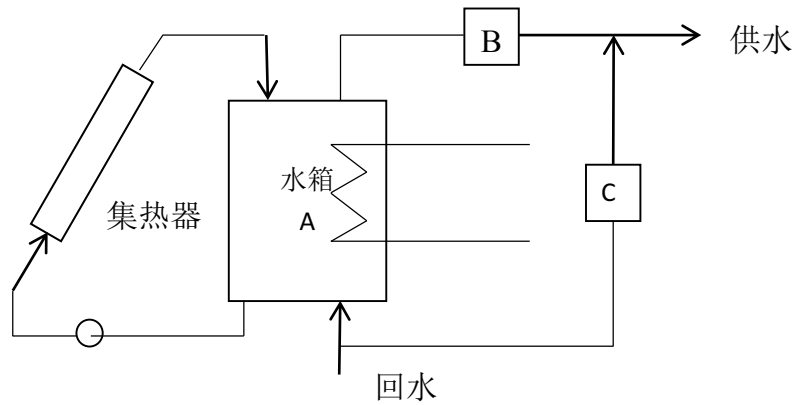


图 4.20 辅助热源设置位置

辅助热源在系统中的布置方式主要有三种，如图 4.20 所示。

- A：布置在水箱内，直接对水箱加热（A 位置）；
- B：布置在水箱出水管上，对供水直接加热（B 位置）；
- C：布置在水箱旁通管上（C 位置）。

改变辅助热源设置的位置会引起系统性能的变化，这主要与集热器最佳工作温度有关。采用第一种方法，能量直接加入至水箱，造成水箱内水温过高，从而集热器内部温度升高，造成集热器集热性能下降。方法二直接对水箱供水加热，该方式最大限度的利用了太阳能集热器的输出能量，利用了集热器在最低平均温度下的工作状态，具有较高的效率；当采用方法三时，辅助热源位于旁通侧，与水箱处于并联位置，当水箱的供水温度较低时，为满足供热需求，只能极大限度地提高热泵出水温度以保证混合后的水温达到要求，导致热泵性能严重下降，造成系统的经济性及节能性均变差。

4.5.2 空气源热泵性能参数

空气源热泵作为太阳能供暖系统的辅助热源可以采用两种不同的方式，一种是利用空气源热泵热风机组直接对房间补热，如分体式房间空调器等；另一种形式则是利用空气源热泵热水机组对太阳能供暖系统进行补热。这也是太阳能供暖系统通常采用的一种形式。

本研究通过对设备厂家调研，获得了螺杆式空气源热泵机组变工况性能数据，如表 4.7-4.9 所示。

表 4.7 负荷率对性能的影响（型号：LSBLGRF760M/NbA）

COP	35℃环温度，7℃出水	7℃环温度，50℃出水
100%负荷	3.2	3.18
75%负荷	3.52	3.5
50%负荷	3.48	3.44
25%负荷	3.04	3.01

表 4.8 环境温度对性能的影响（制冷工况）

环境温度℃	制冷量 kW	轴功率 kW	制冷 COP
25	675	201	3.36
30	635	201	3.16
35	600	201	2.99
40	560	201	2.79
45	525	201	2.61

表 4.9 环境温度对性能的影响（制热工况）

环境温度℃	制热量 kW	轴功率 kW	制热 COP
-10	400	193	2.07
-5	455	193	2.36
0	510	193	2.64
5	555	193	2.88
7	580	193	3.01
10	615	193	3.19
15	680	193	3.52

利根据上述数据，利用 origin 拟合工具，对该型空气源热泵主机性能参数模型进行了回归分析，得到了该主机变工况条件下制冷与制热的 COP 关系式。如表 4.10 所示。

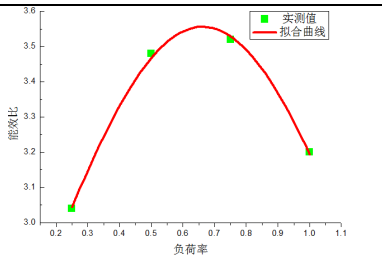
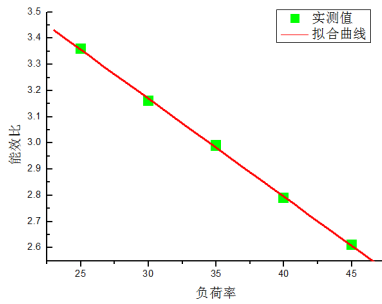
制冷工况主机性能参数模型：

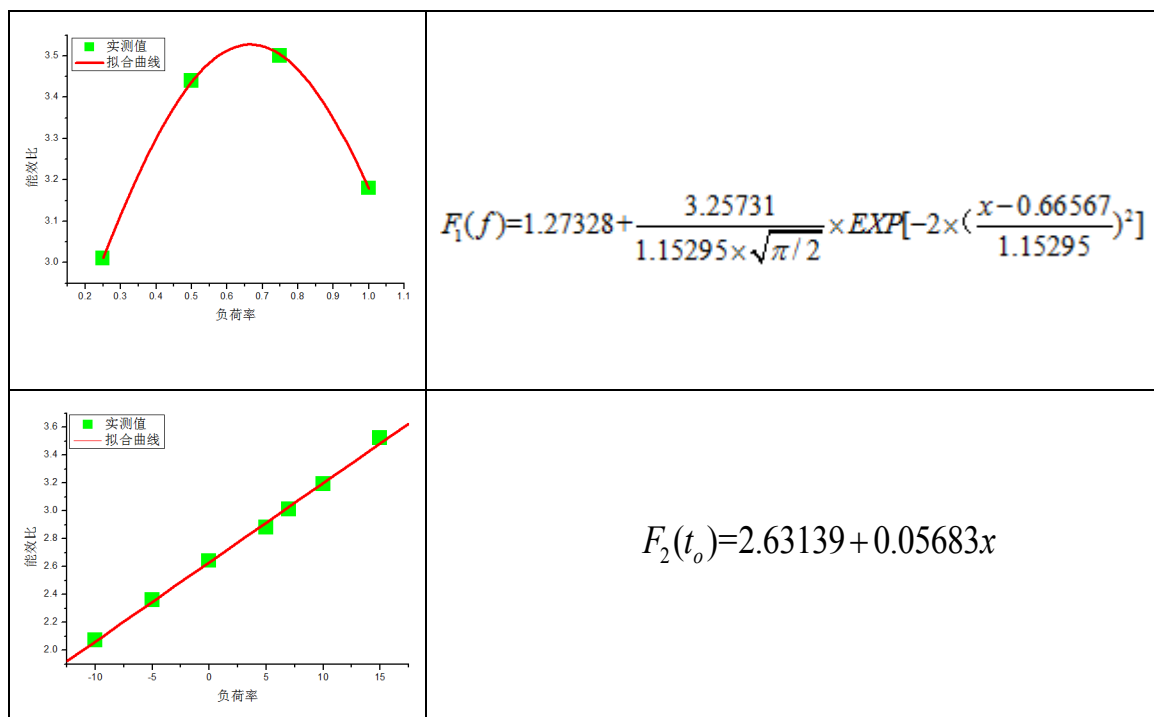
$$COP(f,t_o)=F_1(f)\cdot F_2(t_o)/3.2$$

制热工况主机性能参数模型：

$$COP(f,t_o)=F_1(f)\cdot F_2(t_o)/3.18$$

表 4.10 辅助热源设置位置

图示	拟合公式
	$F_1(f)=1.55794+\frac{2.67927}{1.06978\times\sqrt{\pi/2}}\times EXP[-2\times(\frac{x-0.66177}{1.06978})^2]$
	$F_2(t_o)=4.291-0.0374x$



4.6 本章小结

本章分析了太阳能集热设备热线，提出了有效集热量概念，并给出了基于有效集热量的太阳能集热器安装优化方法；分析了太阳能蓄热系统容量确定难点，提出了一种能够以辅助热源全年能耗最低为优化目标函数，获得太阳能热水供暖系统最优蓄热容积的确定方法，并利用实际工程案例进行了验证，发明了准弹性多级蓄热容积系统，给出了具体工作原理；通过设备调研获得了空气源热泵作为辅助热源的变工况性能参数模型，为太阳能综合利用优化提供基础。

5 太阳能制冷系统研究

普通空调耗电大、热岛效应严重，太阳能空调、节约能源、没有污染、工作寿命长等优点。现在太阳能空调的实现方式主要有两种，一是先实现光-电转换，再用电力驱动常规压缩式制冷机进行制冷；这种实现方式原理简单、容易实现。二是利用太阳的热能驱动进行制冷，这种制冷方式技术要求高，但成本低、无噪音、无污染。现采用的主要是这种方式。这种方式的太阳能空调一般又可分为吸收式和吸附式两种。

利用太阳能作为能源的空调系统，它的诱人之处还在于越是太阳能辐射强烈的时候，环境气温越高，人们的生活越需要空调，此时，太阳能空调的制冷能力就越强。这是人和自然和谐的理想境界。使用太阳能空调的结果，既创造了室内宜人的温度，又能降低大气的环境温度，还减弱了城市中的热岛效应。更为可取的是，它既节约了能源，还不使用破坏大气层的氟里昂等有害物质，是名副其实的绿色空调，在节能和环境方面有很大的发展潜力。

5.1 太阳能制冷系统

根据不同的能量转换方式，太阳能驱动制冷主要有以下两种方式，一是先实现光-电转换，再以电力制冷；二是进行光-热转换，再以热能制冷。太阳能半导体制冷和光电压压缩式制冷属于光-电转换形式的太阳能制冷。太阳能光热转换制冷，首先是将太阳能转换成热能，再利用热能作为外界补偿来实现制冷目的。光-热转换实现制冷主要从以下几个方向进行，即太阳能吸收式制冷、太阳能吸附式制冷、太阳能除湿制冷、太阳能蒸汽压缩式制冷和太阳能蒸汽喷射式制冷。

5.1.1 太阳能吸收式制冷

太阳能吸收式制冷系统是指系统中发生器的高温热源来自太阳能，而非传统系统采用的燃油或燃气锅炉加热热源。目前吸收式制冷空调主要有溴化锂-水吸收式空调系统和氨-水吸收式制冷系统。溴化锂-水吸收式制冷系统是目前研究最多、应用最广泛的吸收式制冷系统。以溴化锂-水吸收式空调为例，其工作原理如图 5.1 所示，即利用从太阳能集热器出来的高温热水加热发生器中的溴化锂水溶液，汽化出高温高压水蒸气，溴化锂溶液浓度增大，溴化锂浓溶液进入吸收器中，而高温高压水蒸气进入冷凝器，经过换热后变成低温高压液态水，低温高压液态水进入节流阀后变成低温低压液态水，再进入蒸发器。吸热汽化成高温低压水蒸气，高温低压水蒸气被吸收器中的溴化锂浓溶

液吸收，溶液变稀后经溶液泵送回发生器中，如此反复，实现循环制冷的目的。图 5.1 所示的系统为单效太阳能吸收式制冷，据有关研究成果发现其制冷 COP 达到 0.7。

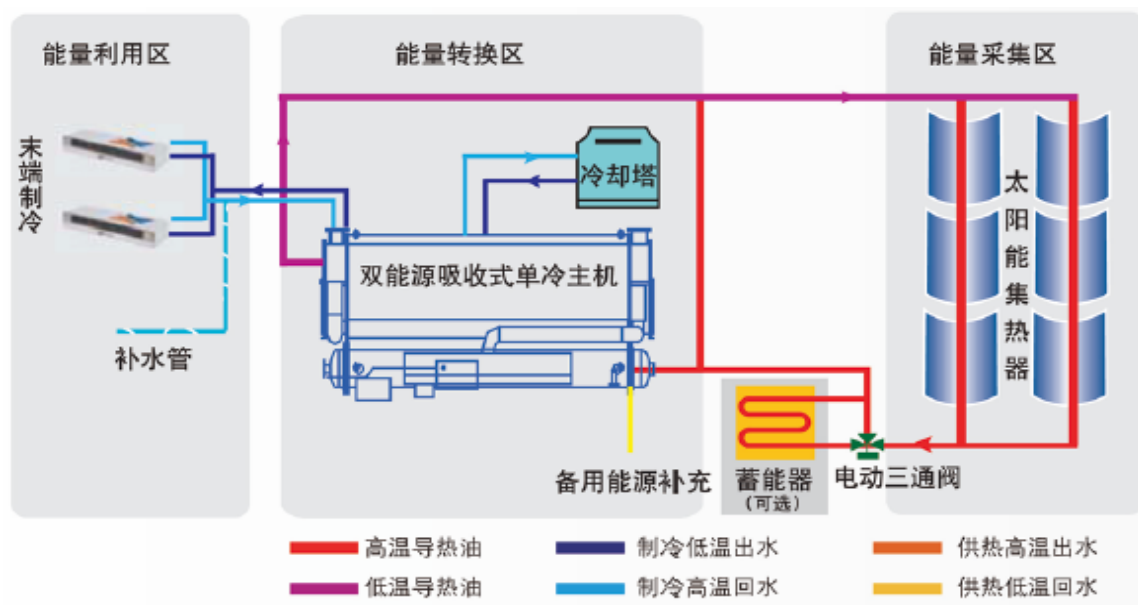


图 5.1 吸收式太阳能空调原理图

太阳能吸收式空调的主要组成部分有集热系统和吸收式制冷系统。反应吸收式制冷机性能的主要性能指标是制冷机的制冷系数 COP，反映集热器性能的是集热效率，故用系统的整体效率来评价太阳能空调系统的性能高低。

5.1.2 太阳能吸附式制冷

许多具有微孔结构的固体物质能在较低温度时吸附气体，在较高温度时解吸气体。太阳能吸附式制冷就是利用这种吸附原理，以太阳能作为驱动热源实现制冷。基本的太阳能吸附式制冷系统主要由吸附床（集热器）、冷凝器、蒸发器和阀门等构成。如图 5.2 所示。其基本的工作过程由解吸和冷却吸附组成：具体工作流程如下：白天吸附床被太阳能加热，吸附质开始从吸附剂中解吸脱附，当吸附质蒸汽压力达到冷凝压力时，进入冷凝器冷凝，凝结液经节流阀进入蒸发器储存起来；晚上吸附床被环境空气冷却，吸附剂开始吸附制冷剂蒸汽，当系统压力下降到蒸发温度下的饱和压力时，蒸发器中的液体开始蒸发制冷，产生的蒸汽继续被吸附剂吸附，直到吸附结束，完成一个吸附制冷循环。

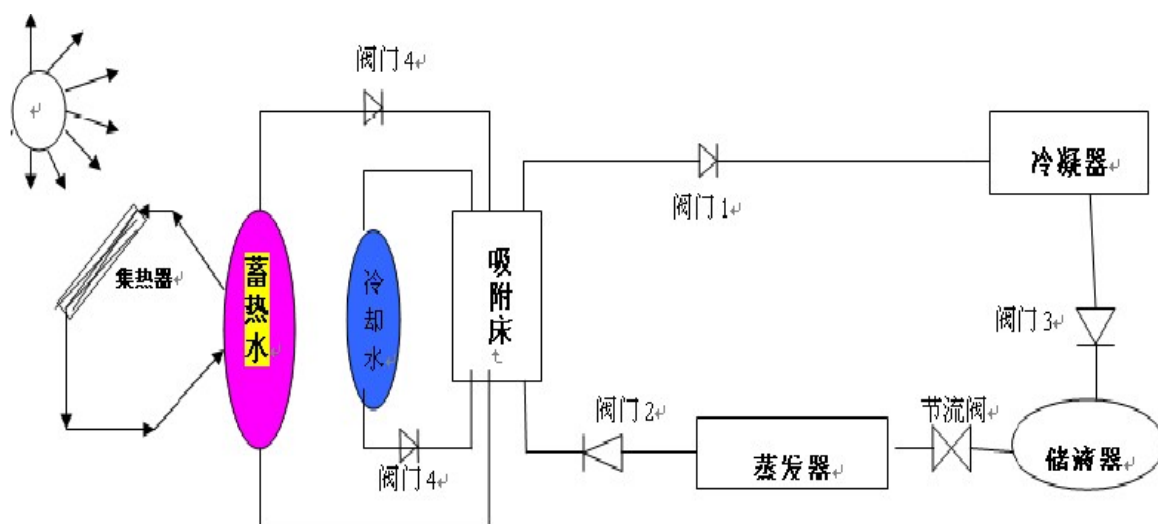


图 5.2 吸附式太阳能空调原理图

理想的吸附工质对要求吸附量大，吸附热小，吸附质气化潜热大、热稳定性好、无污染，对太阳能吸附制冷系统，解吸温度是一个重要的性能指标。目前研究的吸附工质对主要有：沸石—水、硅胶—水、活性炭—甲醇 / 氨和氯化钙 / 氯化铬—氨等。

沸石—水工质对的解吸温度范围较宽（ $70^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$ ），使系统对环境的适应能力强，但需要在高驱动温度下才具有较高的解吸速度，用于太阳能制冷不很理想。硅胶—水工质对的解吸温度较低（ 100°C 以下），解吸性能好，但超过 120°C 硅胶将被烧毁，且吸附量较小，制冷能力低。活性炭—甲醇是太阳能吸附制冷较理想的工质对，其吸附量较大，解吸温度不高（ 100°C 左右），吸附热也较小，甲醇的冰点低（ -98°C ），使得系统可用于制冰。但甲醇超过 150°C 将发生分解，且甲醇有毒，不利于广泛应用。

为克服吸附式制冷基本循环间歇性制冷和能量利用率低的缺点，国内外学者提出各种先进的吸附式制冷循环，目前主要有连续回热回质型、多级复叠型、热波型和对流热波型。

吸附床作为吸附制冷系统的核心，其传热传质性能对整个系统性能有决定性的影响。吸附床传热传质性能提高的主要途径是对吸附剂进行物化改性和优化吸附床结构。

太阳能吸附式制冷系统的集热器和吸附床有两种布置方式一种是分离方式，另一种是一体型。分离方式一般通过集热器吸收太阳能后将热量传递给传热介质作为吸附床的驱动热源，太阳能利用率较小，热源温度低。做成一体的方式减少了能量传递环节，有利于提高太阳能的利用率和热源温度，目前的研究趋向于采用这种方式。

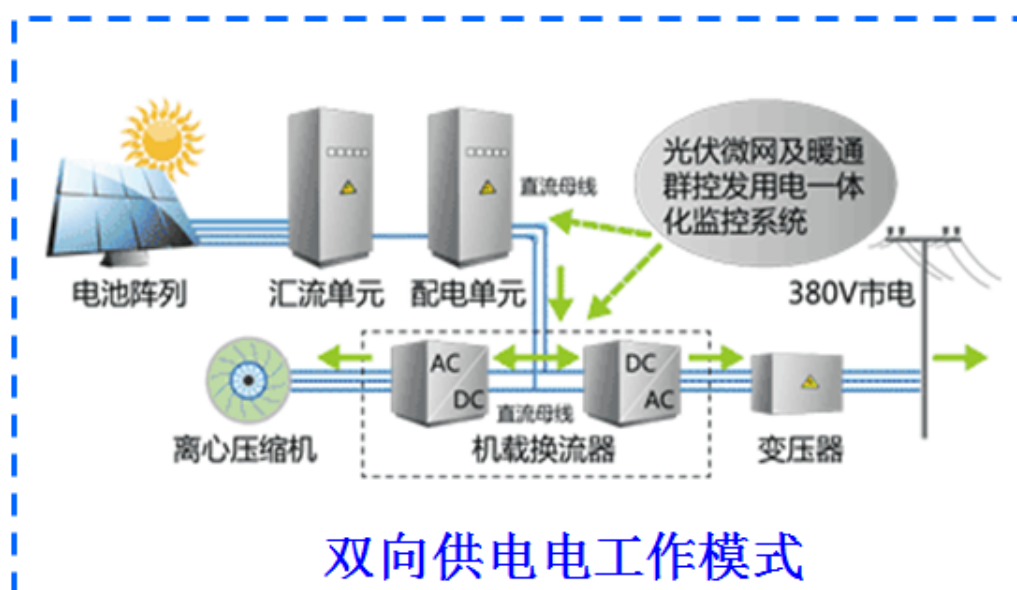
优点：结构简单、初投资少、运行费用低、无运动部件、噪音小、寿命长、不消耗常规能源、对环境完全友好。

吸收式制冷技术是利用吸收剂的吸收和蒸发特性进行制冷的技术，根据吸收剂的

不同，分为氨-水吸收式制冷和溴化锂-水吸收式制冷两种。它以太阳能集热器收集太阳能产生热水或热空气，再用太阳能热水或热空气代替锅炉热水输入制冷机中制冷。由于造价、工艺、效率等方面的原因，这种制冷机不宜做得太小。所以，采用这种技术的太阳能空调系统一般适用于中央空调，系统需要有一定的规模。吸附式制冷技术是利用固体吸附剂对制冷剂的吸附作用来制冷，常用的有分子筛-水、活性炭-甲醇吸附式制冷。

5.1.3 太阳能光伏直驱压缩式制冷

太阳能光伏直驱压缩式制冷与吸附式制冷不同，它是实际上是太阳能发电的一种应用，利用装置将太阳能转换为电能，然后上网发电或者直接驱动压缩机智能。采用光伏直驱压缩式制冷时光伏发电效率为 15-18%，压缩制冷 COP 为 6.0-7.0，在非空调季节太阳能转换的电能进行余电上网。太阳能光伏直驱压缩式制冷可分为双向供电工作模式、光伏空调工作模式、纯发电模式和纯空调模式。其中双向供电工作模式是太阳能被转换为电能以后既驱动压缩机制冷，又进行上网；光伏空调工作模式是太阳能光伏转换后的电全部用于压缩机制冷；纯发电模式是太阳能光伏转换后的电全部用于上网；纯空调模式是空调直接用电，不采用太阳能光伏发电后的电。如图 5.3 所示。



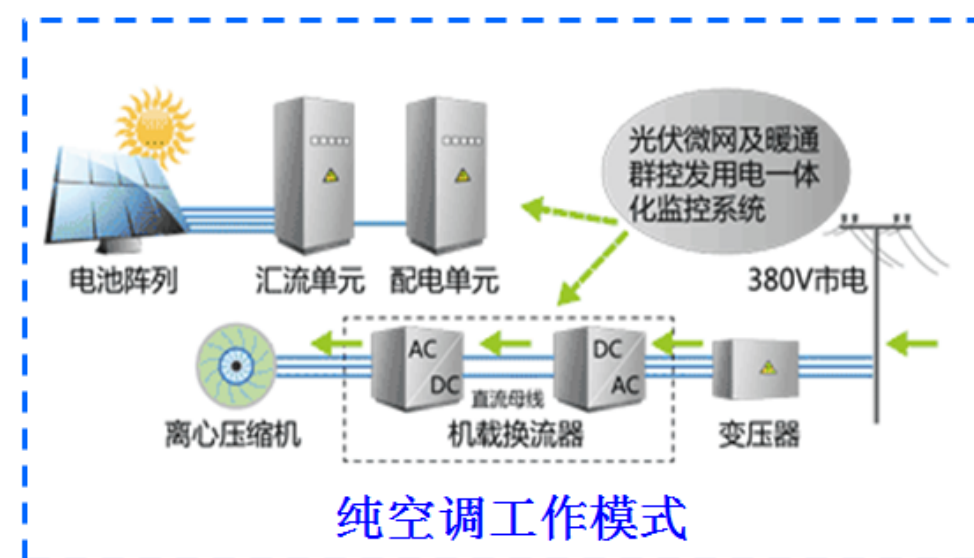
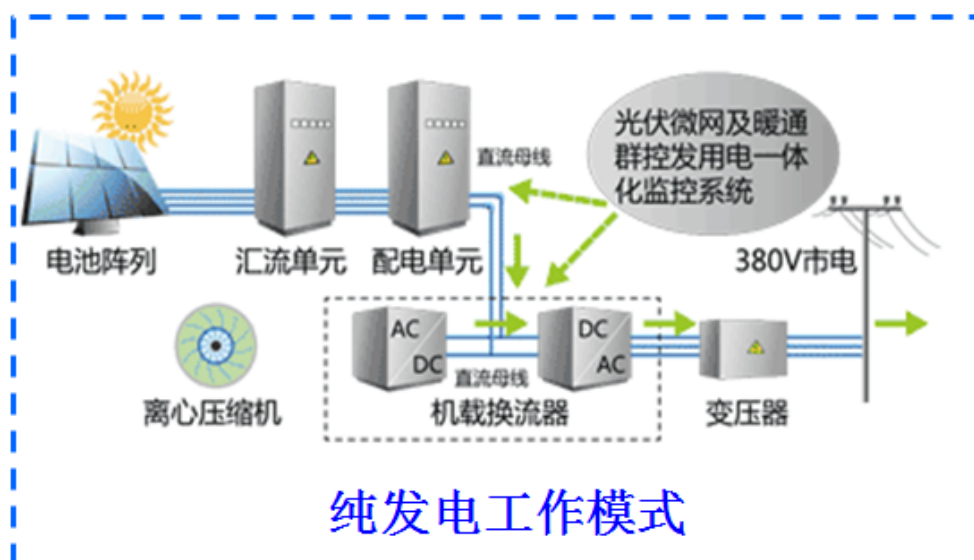
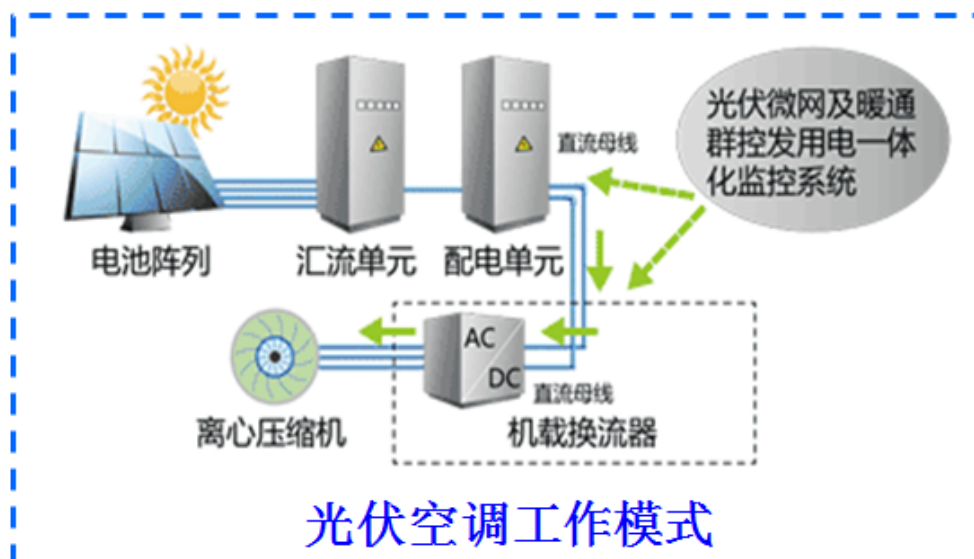


图 5.3 太阳能光伏直驱压缩式制冷工作模式

5.2 太阳能制冷系统性能

5.2.1 太阳能吸收式制冷性能

图 5.4 是吸收式太阳能空调热源与 COP 值对应关系图，从图中可以看出，吸收式太阳能空调热源温度 88–90℃，COP 约为 0.7。

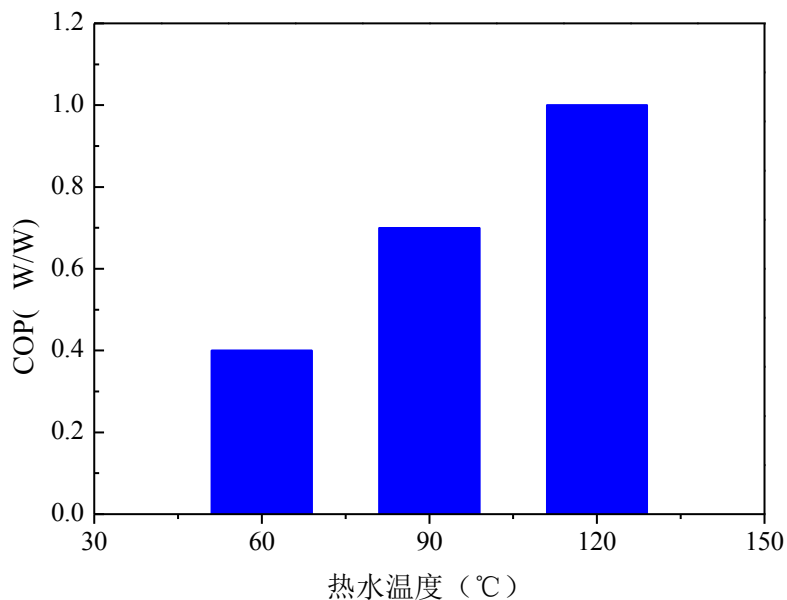


图 5.4 吸收式太阳能空调热源与 COP 值

5.2.2 太阳能吸附式制冷性能

图 5.5 是吸附式太阳能空调热源与 COP 值对应关系图，从图中可以看出，吸附式热源温度 80–85℃，COP 约为 0.4。

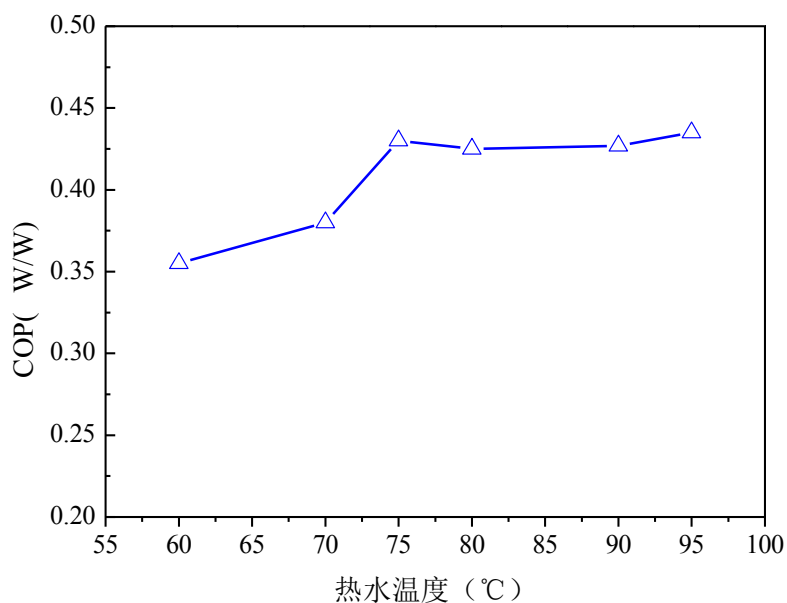


图 5.5 吸附式太阳能空调热源与 COP 值

5.2.3 光伏直驱离心制冷机性能

由于光伏直驱制冷具有更明显的优势，为此，本研究的太阳能综合利用中的制冷方式采用光伏直驱制冷方式。为了进行太阳能综合利用优化模拟计算，本研究对对太阳能光伏直驱制冷机变工况性能参数进行了调研，结果如下表所示。

表 5.1 离心机变工况性能参数（型号 1）

负荷	冷冻出水	冷却进水	制冷量	输入功率	COP
100%	7	30	3516	496.0	7.09
90%	7	29	3164	419.0	7.55
80%	7	27	2813	340.4	8.26
75%	7	26	2637	305.2	8.64
70%	7	26	2461	274.7	8.96
60%	7	24	2110	218.2	9.67
50%	7	23	1758	171.5	10.25
40%	7	21	1406	132.5	10.61
30%	7	20	1055	97.5	10.82
25%	7	19	879	80.7	10.89
20%	7	18	703	64.7	10.87
15%	7	18	527	48.8	10.81
IPLV					9.57

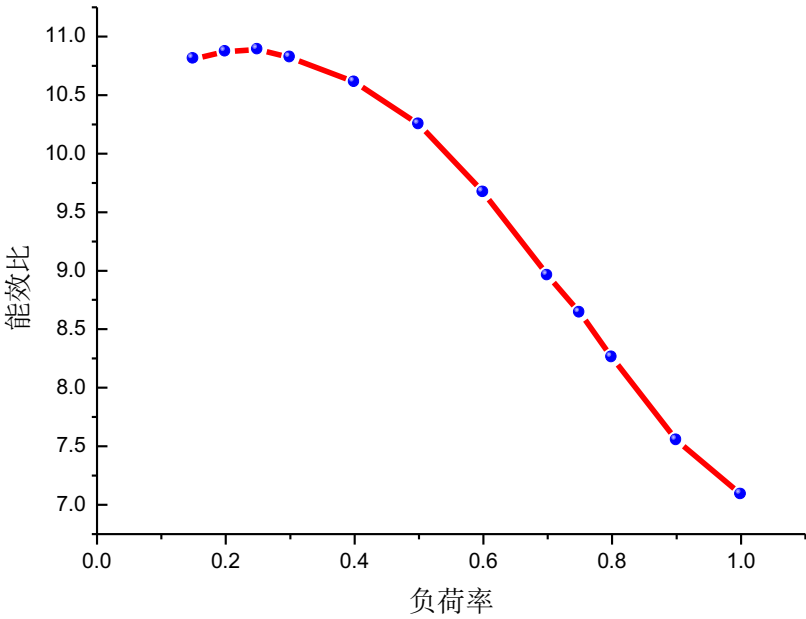


图 5.6 离心机变工况性能参数（型号 1）

表 5.2 离心机变工况性能参数（型号 2）

负荷	冷冻出水	冷却进水	制冷量	输入功率	COP
100%	7	30	2989	439.0	6.81
90%	7	29	2690	355.1	7.58
80%	7	27	2391	288.5	8.29
75%	7	26	2242	258.4	8.68

70%	7	26	2092	232.5	9.00
60%	7	24	1793	184.7	9.71
50%	7	23	1495	145.7	10.26
40%	7	21	1196	112.8	10.60
30%	7	20	897	82.8	10.83
25%	7	19	747	67.8	11.01
20%	7	18	598	54.9	10.89
15%	7	18	448	40.9	10.95
IPLV					9.60

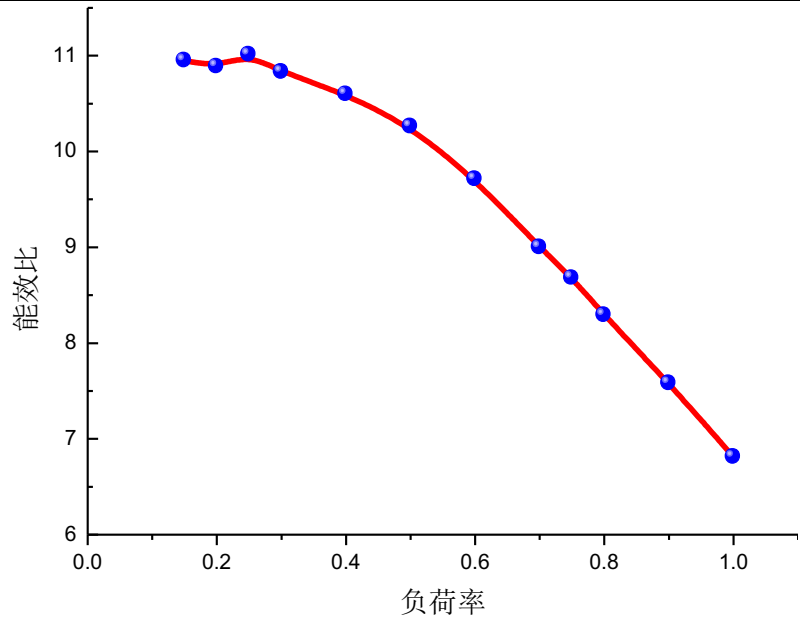


图 5.7 离心机变工况性能参数（型号 2）

表 5.3 离心机变工况性能参数（型号 3）

负荷	冷冻出水	冷却进水	制冷量	输入功率	COP
100%	7	30	1055	174.0	6.06
90%	7	29	950	140.9	6.74
80%	7	27	844	114.1	7.40
75%	7	26	791	102.9	7.69
70%	7	26	739	92.0	8.03
60%	7	24	633	73.0	8.67
50%	7	23	528	57.9	9.12
40%	7	21	422	45.0	9.38
30%	7	20	317	33.0	9.61
25%	7	19	264	26.9	9.81
20%	7	18	211	21.9	9.65
15%	7	18	158	16.5	9.58
IPLV					8.53

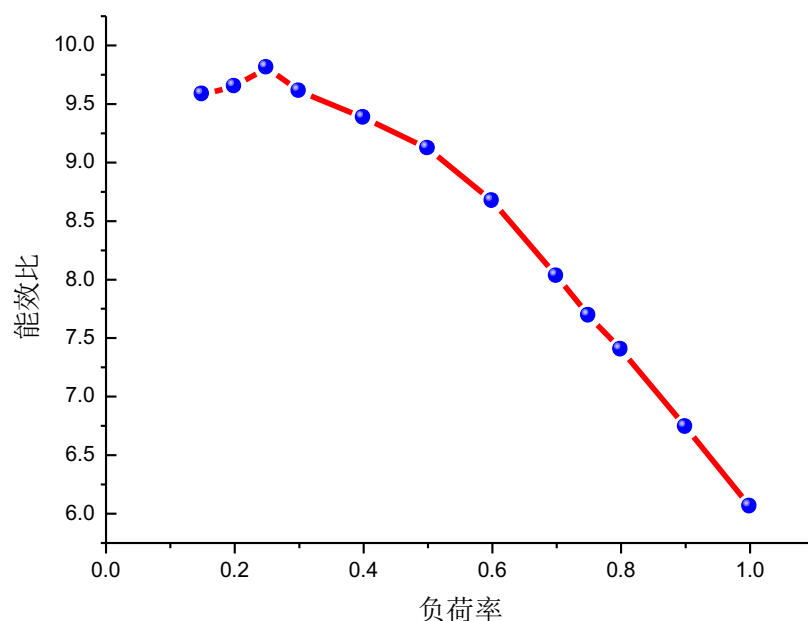


图 5.8 离心机变工况性能参数 (型号 3)

5.3 太阳能空调技术对比分析

图 5.9、5.10 和图 5.11 分别是太阳能吸附式/吸收式制冷效率转换图和光伏驱动压缩式制冷效率转换图。从图中看看出，太阳能吸收式制冷系统对于 1kW 太阳能最终可以提供 0.245kW 的冷量，太阳能吸附式制冷系统对于 1kW 太阳能最终可以提供 0.18kW 的冷量，而光伏驱动压缩式制冷系统对于 1kW 太阳能最终可以提供 0.915kW 的冷量，优势非常明显。因此，若考虑蓄能系统的限制以及非空调季节余电上网等因素，光伏驱动压缩制冷优势更明显！

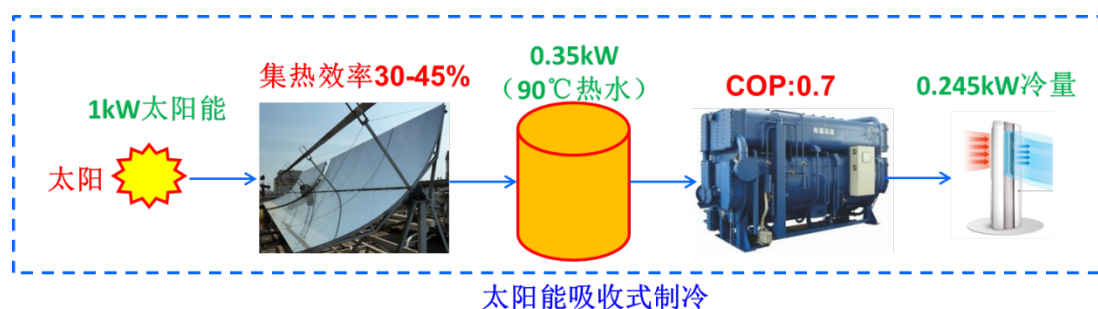


图 5.9 太阳能吸收式制冷效率转换图

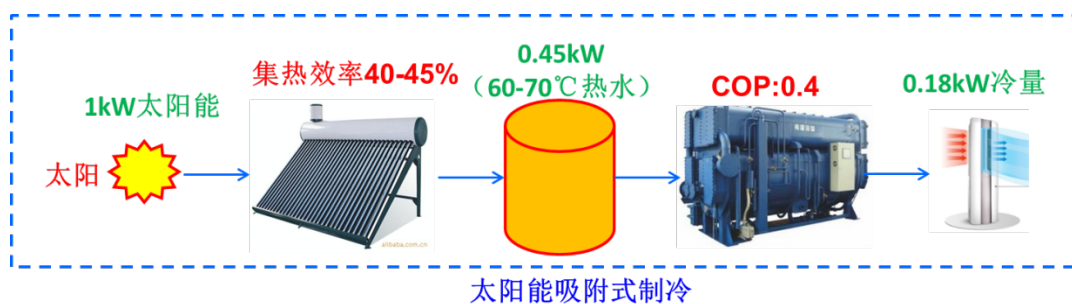


图 5.10 太阳能吸附式制冷效率转换图

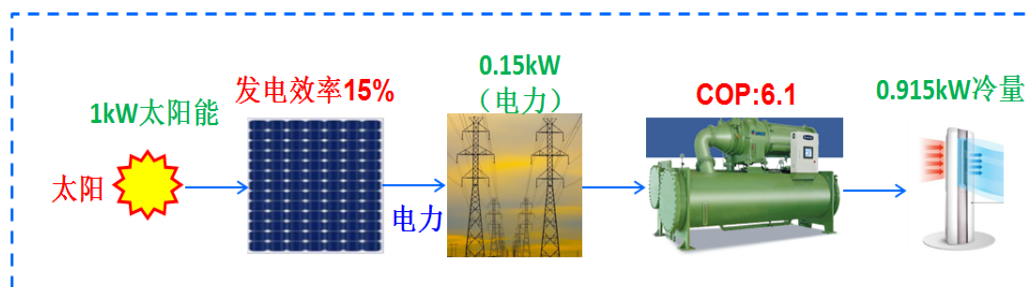


图 5.11 光伏驱动压缩式制冷效率转换图

5.4 本章小结

本章对不同太阳能制冷方式进行了对比研究，结果表明：光伏驱动压缩式制冷系统节能优势非常明显，应作为太阳能综合利用系统优先采用的太阳能制冷方式。同时，本研究通过对光伏直驱离心机调研，获得了光伏直驱离心机变工况性能参数，为后续研究提供了基础。

6 太阳能光伏系统基础研究

6.1 太阳能光伏组件的性能

为了便于比较和对比研究，本期课题，沿用前期（《典型太阳能综合利用研究——太阳能资源丰富的寒冷、严寒地区》，本研究中简称“I期课题”）I期课题所研究的光伏电池组件。对于晶硅组件，以 250W_p 组件为研究对象；对于非晶硅组件，以 100W_p 为研究对象。组件性能详见 I 期课题的《研究报告》，本报告不再赘述。

6.2 太阳能光伏系统应用适宜性分析

6.2.1 典型的太阳能光伏系统

（1）太阳能光伏在建筑电力系统的应用

光伏发电系统应用分类如下图所示。

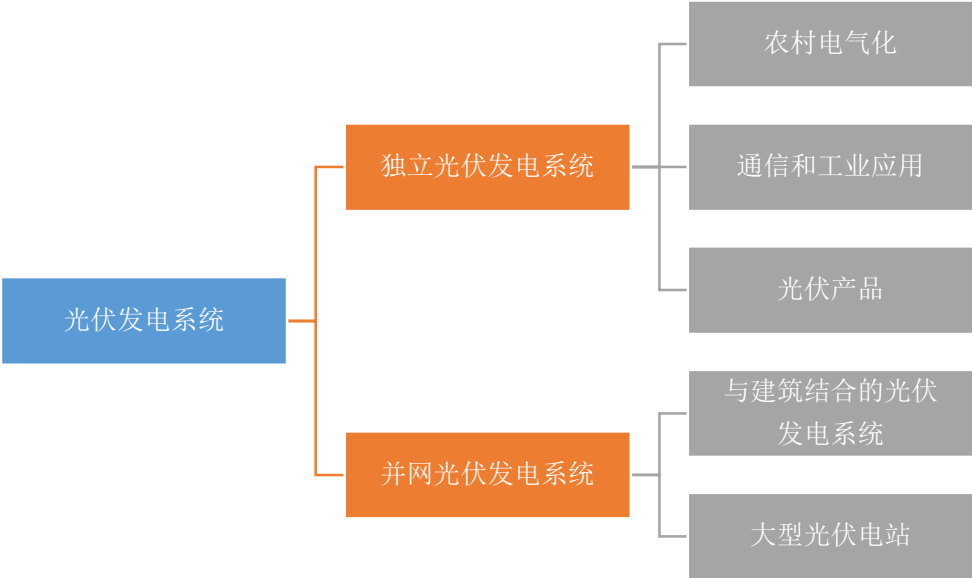


图 6.1 光伏发电系统应用分类

与建筑结合的光伏发电系统一般采用并网形式，故划分到并网发电系统里。该系统所发的电，既可负担建筑本身的电力负荷，也可将多余部分的电量输送到电网，分配给电网上其它负荷使用（这时可以认为电网具有“无限”的容量），这样可以最大限度利用太阳能。建筑光伏系统示意如下：

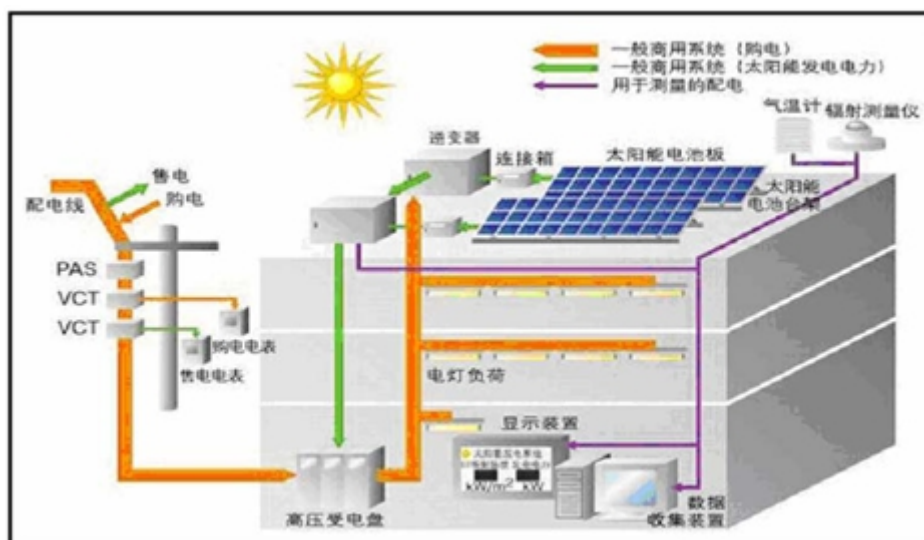


图 6.2 建筑光伏系统示意图

其中光伏发的电（绿线）自用时应流向负荷端，上网时流向售电端。由此构成建筑光伏系统原理如下图。

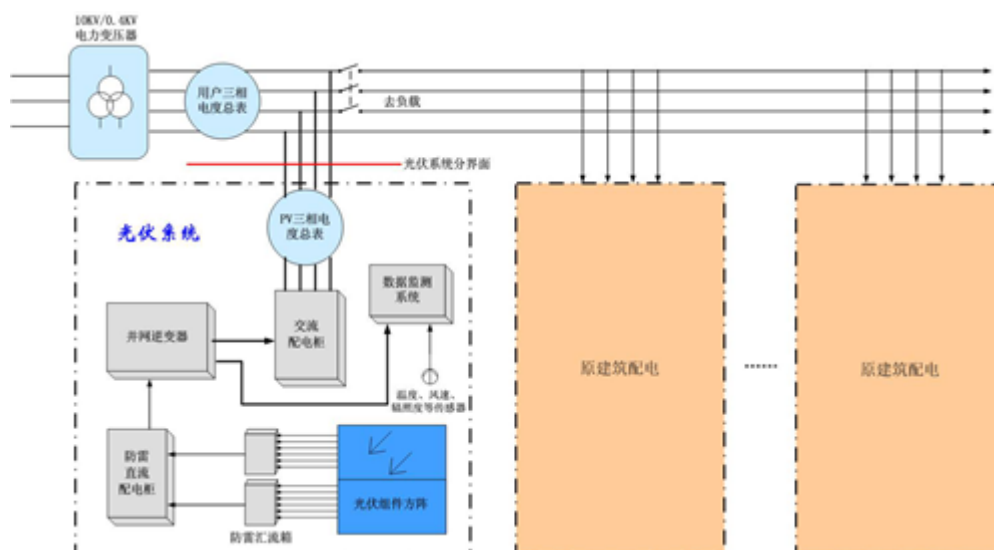


图 6.3 建筑光伏系统原理

光伏发电系统主要由光伏组件组成的方阵、防雷汇流箱、防雷直流配电柜、并网逆变器、交流配电柜及环境监测设备组成，太阳光经过光伏电池组件将光能转换成直流电能，防雷汇流箱进行一次汇流送到直流配电柜，直流配电柜进行二次汇流，输出送到逆变器的输入端，逆变器将直流电逆变成交流电，并入建筑配电网，供建筑负荷使用。

（2）典型建筑的应用特点

根据本期课题的统一安排和研究内容，太阳能光伏应用研究针对太阳能资源较丰富区（Ⅱ区）典型公共建筑。如前文所述，选取西宁、银川和西昌三个城市作为典型城市，

分别代表太阳能资源较丰富区中严寒、寒冷与温和气候分区。与 I 期同样思路，选取办公、酒店和商业这三类量大面广的公共建筑作为典型建筑进行研究。

所选取的这三个典型城市，太阳能资源较丰富，综合利用太阳能的潜力大；因其处于不同的气候分区，各城市的同类型建筑，由于暖通空调系统的配置与能耗不同，其建筑的全年能耗也不尽相同。综合分析和对比，研究对应于不同气候分区的太阳能综合利用的策略，有较大的技术和经济效益。

办公建筑和商业建筑，并非全天使用的，属于间歇性使用的建筑，且太阳能光伏的发电时间与这些建筑的使用时间是比较一致的（白天使用），这样有利于“自发自用”的原则，能得到的效益也是最大的。但根据前面的建筑电力负荷研究结果可以看到：办公建筑与商业建筑的用电负荷曲线有着一定区别，主要因为两者在使用时间、逐时负荷变化的特点、空调内区的存在与否等等因素方面，都存在明显的不同。

酒店建筑与上述两类又有不同。由于全天使用，使得其全天电力负荷曲线比较平坦，变化不如商场剧烈。

与 I 期相比，本期研究的建筑，在夏季采用空调制冷系统来降温，这与 I 期研究对象的夏季电力负荷特性，也存在显著的区别。

正是因为这样一些不同的特点，选定不同气候区，且需要冬季供暖、夏季机械供冷空调的这些建筑类型，对于研究这些气候区的光伏系统应用来说，具有一定的代表性。我们认为这样的针对性研究的方法，可以为其他类似公共建筑的光伏应用研究提供参考。

6.2.2 光伏组件在建筑中的安装位置

本部分内容主要设计光伏组件安装位置和方位角的优化问题。对于我国的地理而言，这与地点的关系不大，在 I 期课题中已经进行了深入研究，其结论也适合于本期的研究。

因此，为了更好的分析和推广太阳能的应用，提高应用的经济技术合理性，研究中仍然与 I 期结论一样，将建筑的屋顶作为光伏组件的设置位置，并设定 $\gamma=0^\circ$ ，即光伏组件的方位角为 0° （朝正南），来研究不同安装倾角对光伏组件性能的影响，从而得出相关优化参数。

6.3 太阳能光伏系统的安装优化

在上面确定了屋顶为光伏组件安装位置的基础上，本节主要研究光伏组件的安装角度的优化问题。由于建筑屋顶面积通常都是有限的，不同的安装倾角，不但影响光伏系统的发电效率，而且还要考虑在组件不相互遮挡的条件下对光伏组件安装面积的影响。

因此，安装优化的主要目的是：通过分析研究，使得基于目标参数下的光伏组件安装倾角最优化。通常的目标参数有：全年得到的辐照量、全年发电量、经济性评价等参

数。

6.3.1 不同安装倾角时的太阳辐照量研究

上一期课题的研究结果表明，对于单位面积的太阳能光伏板，当 $S \approx \Phi$ 时（即倾角约等于当地纬度时），得到的太阳能辐照量最大。通过对 2.4 节中逐时数据进行整理，可得到西宁、银川和西昌的每月太阳辐照总量，分别选取四个安装倾角： $S=0^\circ$ ， $S=\Phi-15^\circ$ ， $S=\Phi$ ， $S=\Phi+15^\circ$ ， $S=90^\circ$ （太阳能光伏研究与应用常用该系列角度），得到各月辐照量如图 6.4~6.6 所示。

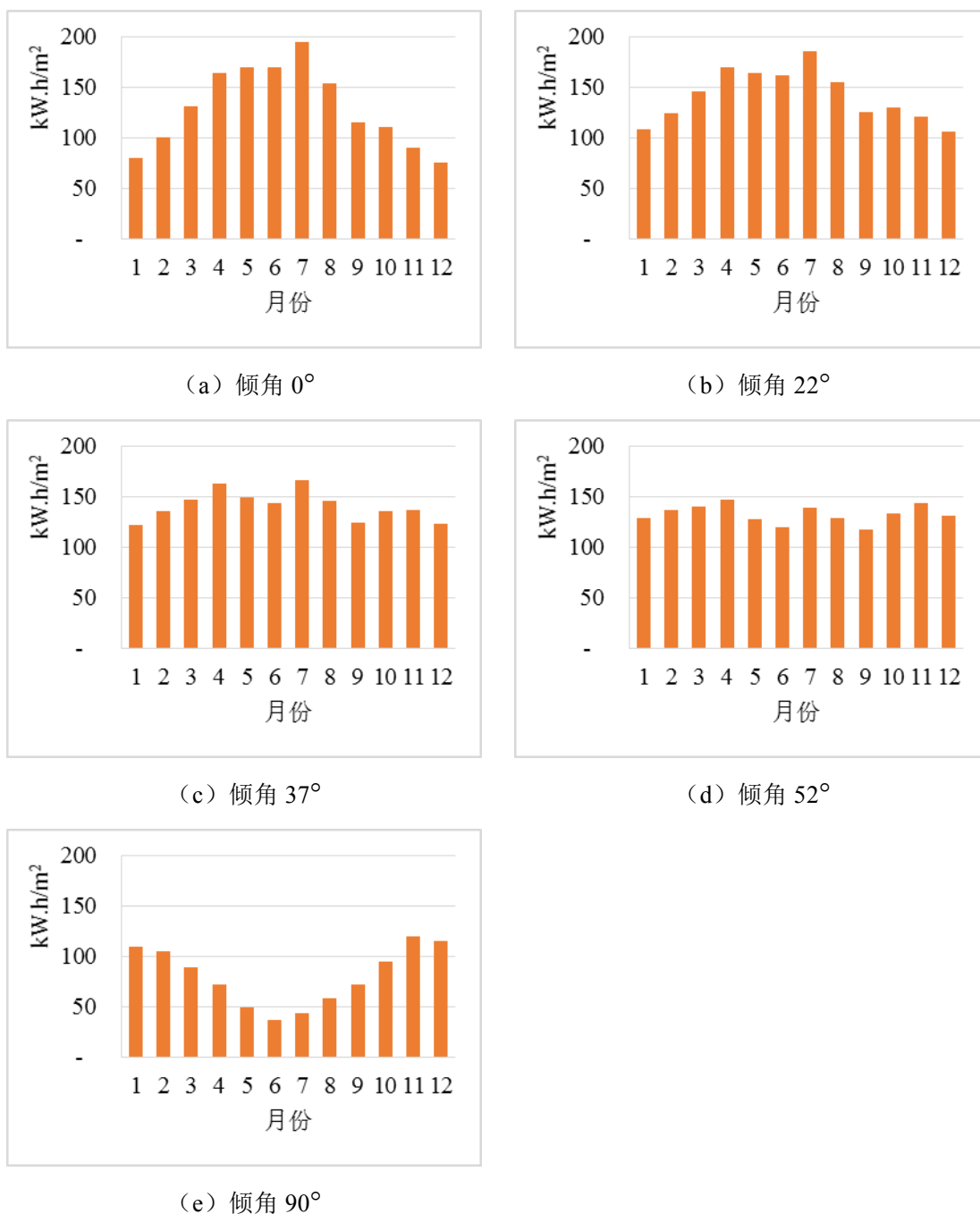
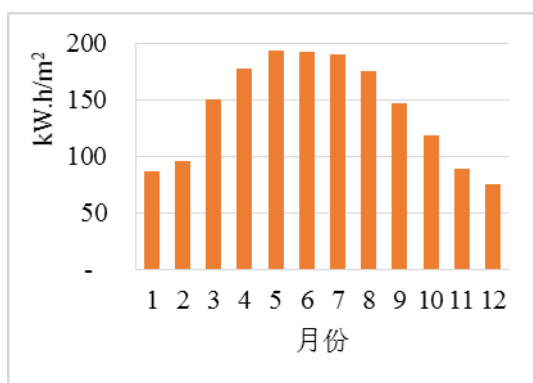
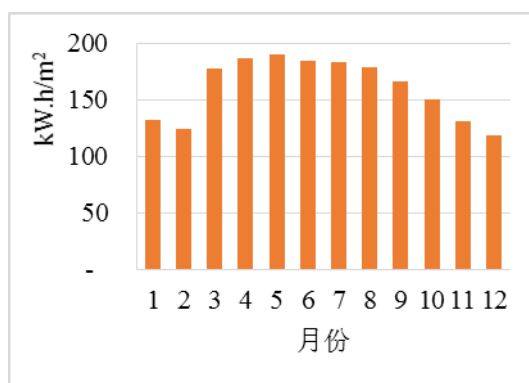


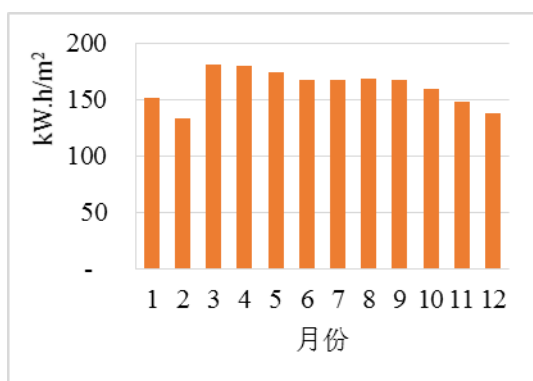
图 6.4 西宁各月太阳总辐照量 (kWh/m^2)



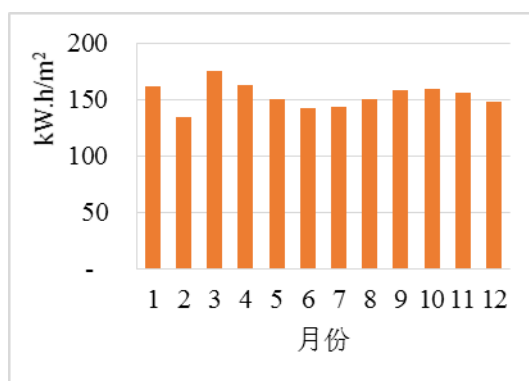
(a) 倾角 0°



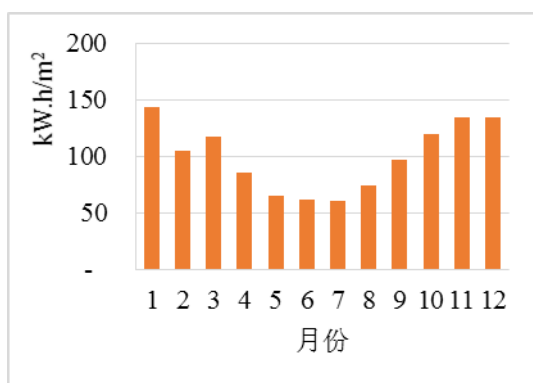
(b) 倾角 23°



(c) 倾角 38°

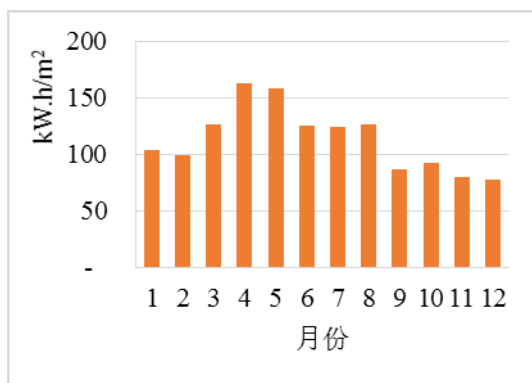


(d) 倾角 53°

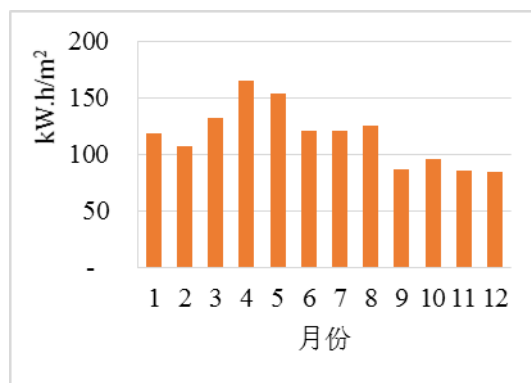


(e) 倾角 90°

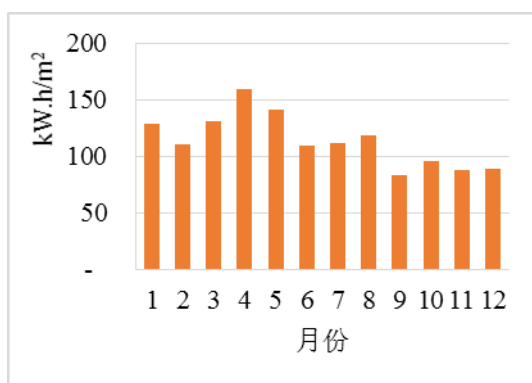
图 6.5 银川各月太阳总辐照量 (kWh/m²)



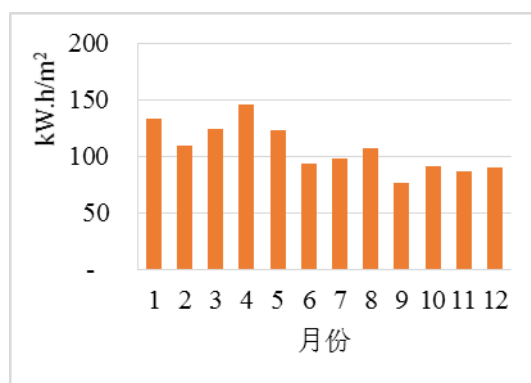
(a) 倾角 0°



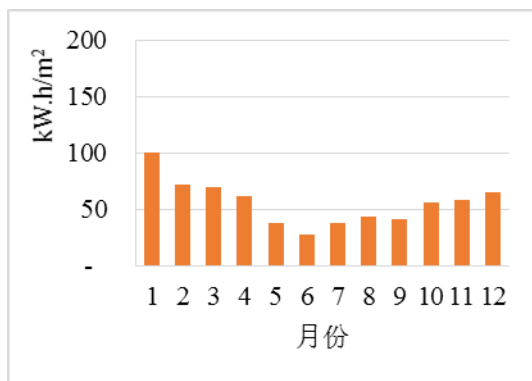
(b) 倾角 13°



(c) 倾角 28°



(d) 倾角 43°



(e) 倾角 90°

图 6.6 西昌各月太阳总辐照量 (kWh/m²)

由图 6.4~6.6, 可以看出: 随着角度的增加, 这三个城市的夏季太阳辐照量逐渐下降, 冬季则呈现出先增大后减少的波动情况。

为了更进一步分析太阳辐射与安装倾角的关系, 为全年充分利用太阳辐照量打下基础, 通过计算数据的整理, 可以得到西宁、银川和西昌这三个城市各斜面上全年太阳辐照量与安装倾角的关系, 如图 6.7~6.9 所示。

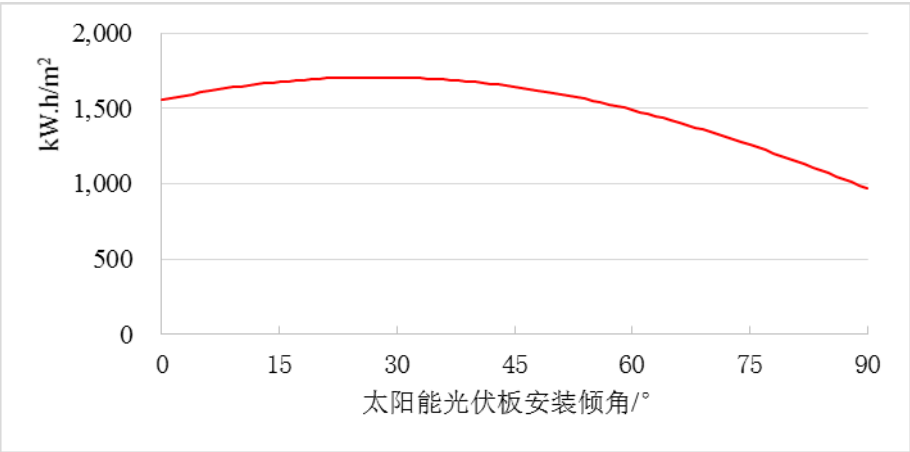


图 6.7 西宁全年太阳辐照量与倾角的关系曲线

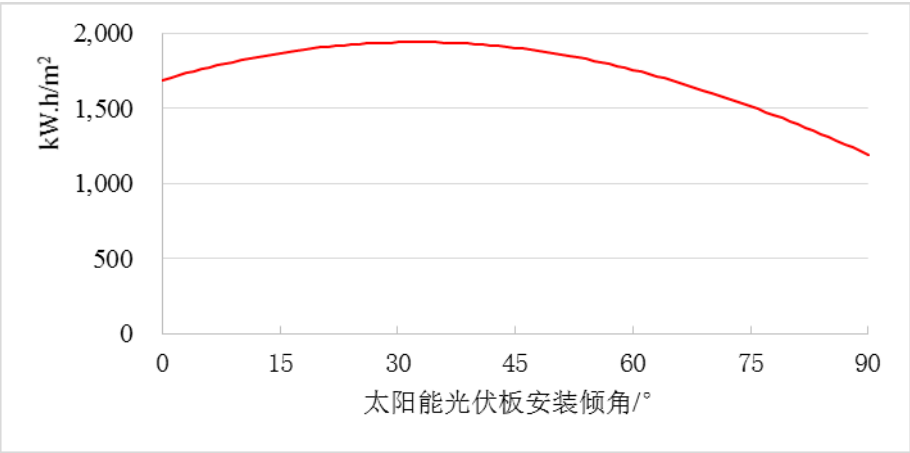


图 6.8 银川全年太阳辐照量与倾角的关系曲线

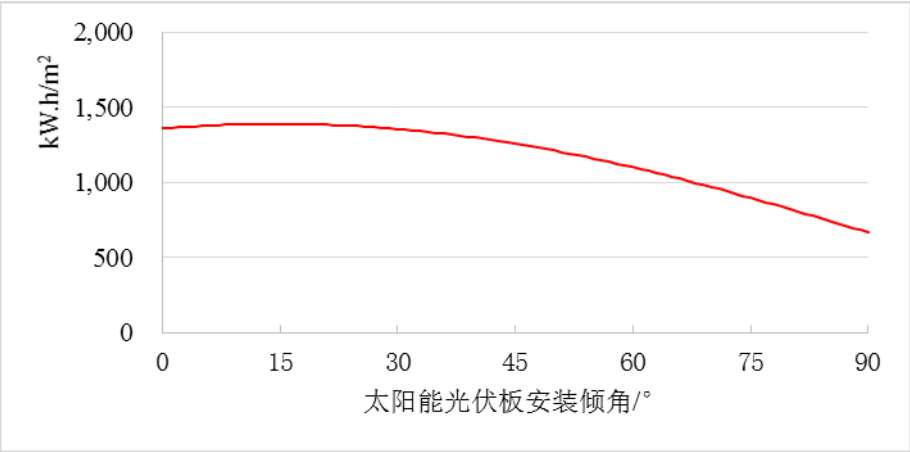


图 6.9 西昌全年太阳辐照量与倾角的关系曲线

从图 6.7~9 可以得出：基于单位光伏组件面积，对于西宁，在安装倾角为 27°时，全年可获得最大的太阳辐照量，其数值为 1707kWh/m²；对于银川，在安装倾角为 32°时，全年可获得最大的太阳辐照量，其数值为 1940kWh/m²；对于西昌，在安装倾角为 14°时，全年可获得最大的太阳辐照量，其数值为 1390kWh/m²。因此，从基于单位光伏

组件面积获取最大辐照量的角度来说，这三个安装倾角是最合理的。换句话说，如果以这个安装倾角来设置光伏组件，光伏组件单位面积在全年所能够得到的发电量可能将是最大的。本研究把这个安装倾角称为“效率最优化倾角”，用 S_{η} 来表示。

6.3.2 不同安装倾角下的安装峰值瓦研究

光伏组件安装时必须考虑阵列间的间距，因为光伏电池产生电流的大小与辐射量息息相关，有遮挡时会使发电功率下降，特别是晶体硅组件，遮挡 10% 就会损失 50%-90% 的发电量。目前系统间距设计确定原则为冬至日当天早 9:00 至下午 3:00（均指当地时间）太阳电池方阵不应被遮挡，间距与所在地区纬度、安装角度等相关，是诸多个变量的函数。以下以目前常用规格的光伏组件为例进行分析：

晶硅 250Wp 组件（长×宽=1.65m×0.99m）2 块横排， $L_z=0.99 \times 2 + 0.02 = 2\text{m}$ ；

非晶薄膜 100Wp 组件（长×宽=1.3m×1.1m）1 块竖排， $L_z=1.3\text{m}$ 。

（1）安装倾角与安装间距

从实际应用来看，光伏组件大都采用了沿着屋顶平面布置的方式（即：每个光伏单元的安装底标高与屋面标高相同），很少采用阶梯式布置的方式（即每后一个光伏组件的底标高与前一个而组件的顶标高相同）（除非设置量非常小）。因此，本课题研究以平面布置方式为基础来进行，如图 6.11。

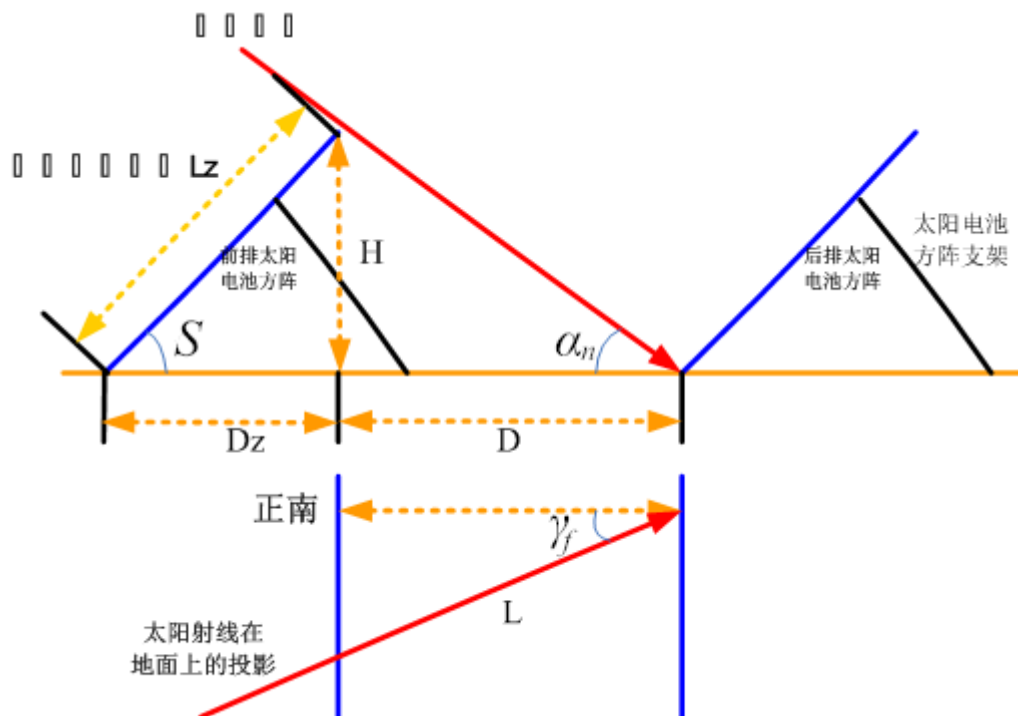


图 6.10 太阳电池方阵前后间距的计算参考图

计算太阳电池方阵间距 D ，可以从下面 4 个公式求得：

$$L=H/\tan a_n$$

$$a_n=\arcsin(\sin\Phi\sin\delta+\cos\Phi\cos\delta\cos\omega)$$

$$\gamma_f=\arcsin(\cos\delta\sin\omega/\cos a_n)$$

$$D=L\times\cos\gamma_f=H\cos\gamma_f\cot a_n$$

式中 Φ 为纬度角, ω 为时角, δ 为赤纬角, γ_f 为太阳方位角, a_n 为太阳高度角, S 为光伏组件安装倾角。冬至时, $\delta=-23.45^\circ$, 上午 9:00 (当地时间) 时, $\omega=45^\circ$ 。

按上述公式可分别计算出各城市在 0° , 纬度角, 纬度角- 15° , 纬度角+ 15° , 90° 及最优倾角均值时组件安装阵列的前后排间距。

(2) 实际安装峰值瓦

根据组件规格和面积, 我们可以计算出: 在标准测试条件 (大气质量 AM1.5, 辐照度 $1000\text{W}/\text{m}^2$, 电池温度 25°C) 下, 晶硅和非晶硅标准组件的单位组件面积实际安装峰值瓦分别为:

1) 晶硅 250Wp 组件, 规格: $1.65\times 0.99=1.6335\text{m}^2$, 单位组件安装峰值瓦: $151.52\text{Wp}/\text{m}^2$, 因此其标准测试条件下的光电转换效率约为 15%;

2) 非晶薄膜 100Wp 组件, 规格: $1.3\times 1.1=1.43\text{m}^2$, 单位组件安装峰值瓦: $69.93\text{Wp}/\text{m}^2$, 因此其标准工况下的光电转换效率约为 7%。

图 6.8~图 6.10, 均是以光伏组件的单位面积为基础来给出的。在建筑太阳能应用时, 由于光伏组件的尺寸规格不同, 如果以光伏组件本身的尺寸来评价, 则无法统一标准, 也与光热应用中的相关基础不一致。因此, 仅仅以光伏组件单位面积来评价是不够的, 还需要结合以光伏组件所占用的屋顶面积为基础来评价。

以本小节前文规定的安装倾角来为例来计算, 则西宁、银川和西昌这三个城市的光伏组件在不同倾角下, 基于占用屋顶面积的安装分别如表 6.1~6.3 所示。

表 6.1 西宁地区光伏组件安装峰值瓦 (W/m^2 屋顶建筑面积)

安装倾角 $^\circ$	多晶硅系统	非晶薄膜系统
0	151.52	69.93
22	81.20	37.48
27	74.68	34.47
37	65.68	30.31
52	58.49	26.99
90	60.46	27.90

表 6.2 银川地区地区光伏组件安装峰值瓦 (W/m^2 屋顶建筑面积)

安装倾角 $^\circ$	多晶硅系统	非晶薄膜系统
---------------	-------	--------

0	151.52	69.93
23	75.97	35.06
32	65.75	30.34
38	61.09	28.20
53	54.17	25.00
90	55.13	25.44

表 6.3 西昌地区地区光伏组件安装峰值瓦（W/m²屋顶建筑面积）

安装倾角°	多晶硅系统	非晶薄膜系统
0	151.52	69.93
13	111.81	51.60
14	109.81	50.68
28	90.31	41.68
43	80.35	37.08
90	89.51	41.31

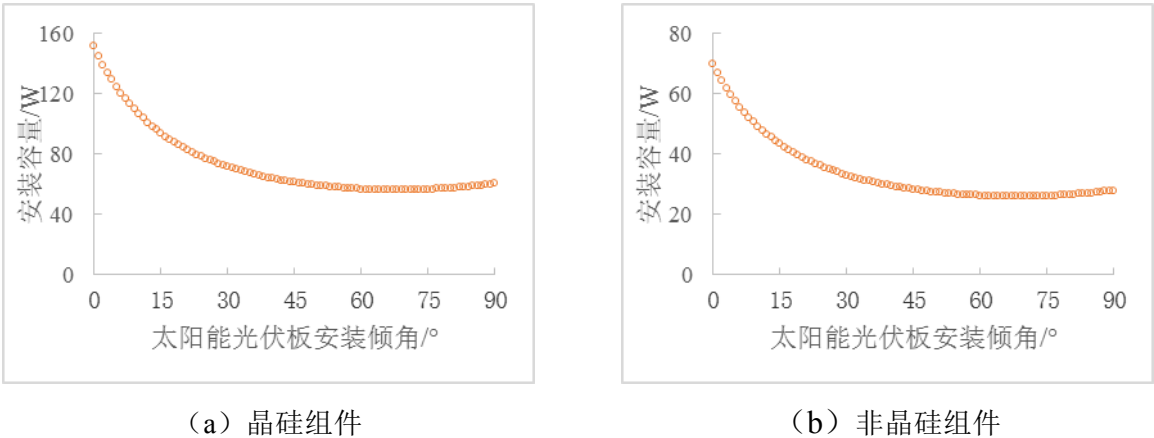


图 6.11 西宁光伏设备安装容量（单位屋顶建筑面积）

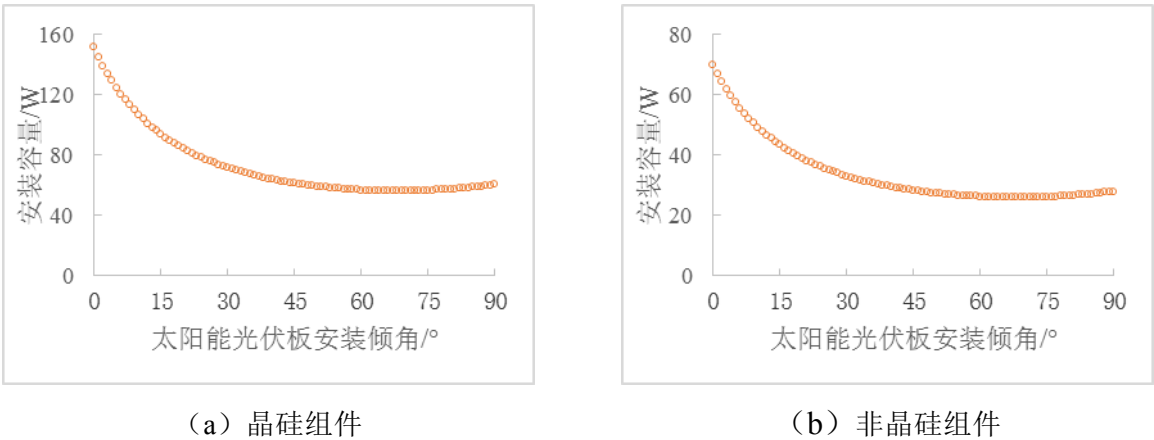


图 6.12 银川光伏设备安装容量（单位屋顶建筑面积）

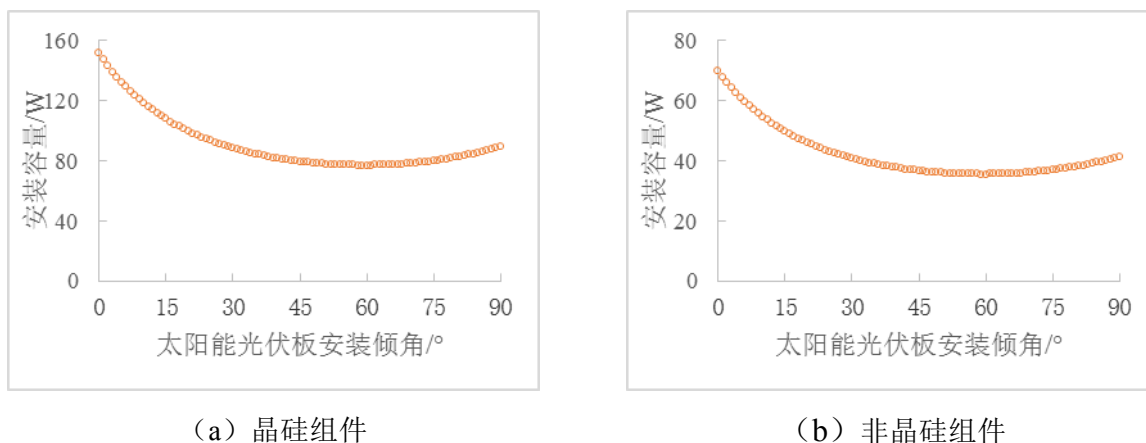


图 6.13 西昌光伏设备安装容量（单位屋顶建筑面积）

由图 6.11~6.13，对于相同的太阳能组件类型，显然有：①太阳能光伏板安装倾角为 0° 时，因为不存在遮挡，各地区光伏组件的单位建筑面积安装容量相同，且为最大值；②太阳能光伏板安装倾角不为 0° 时，西昌的光伏组件的单位建筑面积安装容量大于西宁和银川，后两者的差距不大；③安装倾角从 0° 变大时，单位屋顶面积的光伏组件安装容量逐渐减小，同时减小的速率逐渐减慢，到一定角度 $S_{cap.min}$ 后，安装容量逐渐变大。

分析本小节前文设定的限值条件，各地光伏设备的安装容量，与当地经度、气象条件无关，与当地纬度、光伏板安装倾角、光伏板材质有关。当 $S \approx \Phi + \delta_w + C_1$ （式中， S —光伏板倾角， Φ —当地纬度， δ_w —冬至日赤纬角， C_1 —冬至日 9:00 和正午太阳高度角和方位角不同引起的差值）时，单位屋顶面积的光伏组件安装容量最小；且当地纬度 Φ 越大，该光伏组件倾角 $S_{cap.min}$ 越大，为满足“不遮挡”（见本小节前文的配图和公式），光伏板的间距越大，单位屋顶建筑面积的光伏组件安装容量越小。当地纬度角越小，单位屋顶建筑面积的光伏组件安装容量的最小值越大。对于西宁， $S_{cap.min} = 68^\circ$ ，对于西昌， $S_{cap.min} = 59^\circ$ ，推导得 $C_1 \approx 8^\circ$ 。

6.3.3 光伏系统的首年发电量研究

光伏系统和相应的组件，随着使用年限的增加，其发电能力会逐渐衰减。这对于光伏系统地经济性评价将起到重要的作用，此部分将在后面的小节中给出。这里先考虑投入运行首年的发电情况，不考虑衰减因素。

（1）光伏系统整体效率

为了得到光伏系统的有效发电量，先对光伏系统的整体效率进行相应的评估和计算，结果如表 6.3 所示。

表 6.4 光伏系统整体效率计算表

影响系统效率的参数	描述和影响因素	最优指标	计算值
入射光能的损失			

遮挡损失	光伏方阵之间和周边物体的遮挡	1.00%	0.99
反射衰减	由于入射角不同造成的	0.20%	0.998
灰尘和污渍	当地条件和维护水平	2.00%	0.98
非线性度损失	光强-功率变化是非线性的，包括早晚非有效光能	0.20%	0.998
光谱偏差	偏离 AM1.5 光谱的功率偏差	0.50%	0.995
直流侧损失			
光伏组件温升损失	晶体硅 0.44%/℃， 薄膜电池 0.22%/℃	8.80% (温升 20℃)	0.912
光伏组件性能衰减	晶体硅 0.3-0.5%/年， 薄膜电池 1%/年	0.50% (第一年)	0.995
直流电路损失	< 3% (包括直流设备和电缆)	1.00%	0.99
系统失配损失	组件电性能不一致 (木桶效应)	1.00%	0.99
MPPT 跟踪误差	跟踪方法，电网/天气条件	0.50%	0.995
交流侧损失			
逆变器效率	逆变器的设计、器件和制造	98%	0.98
变压器效率	变压器的材料、设计和制造	99%	0.99
交流线损	包括其它交流设备和电缆	0.50%	0.995
其它因素			
故障检修/弃光， 本身/电网	取决于电站质量和电网	2.0%/0%	0.98
最佳 PR 值 (第一年)			0.805

根据上表，取光伏系统的整体效率为 $\eta=80\%$ (首年)。

(2) 首年发电量计算方法

光伏系统的逐时发电能力计算按照公式 (6.1)。

$$P_i = R_{\gamma} / 1000 \times W_p \times \eta \quad (6.1)$$

式中： P_i -每平方米屋顶面积的发电量， W/m^2 ； R_{γ} -逐时辐照量， W/m^2 ； W_p -每平方米屋顶面积的安装容量， W/m^2 ； η -系统效率 (取 80%)。

光伏系统的月发电量和年发电量，分别按式 (6.2)、式 (6.3) 计算。

$$\text{月发电量: } P_m = \sum_{i=1}^n P_i \quad (n\text{——计算月的小时数}) \quad (6.2)$$

$$\text{首年发电量: } P_y = \sum_{i=1}^{8760} P_i \quad (6.3)$$

利用实验平台系统 (如图 6.14 所示)，对上述模型进行了验证，结果如图 6.15 所示，从图 6.15 可以看出，理论预测发电量与实测发电量之间差距较小，利用典型气象年计算得到的全年发电量与实验系统 2014 年实测发电量之间的差距在 5% 以内，可见上述预测模型完全满足实际工程计算精度要求，可作为发电量计算预测模型。



图 6.14 试验平台系统

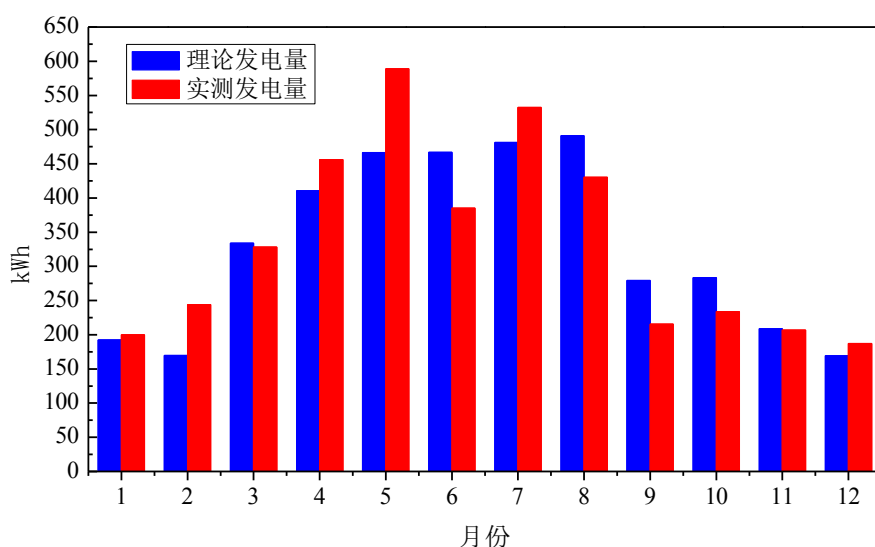
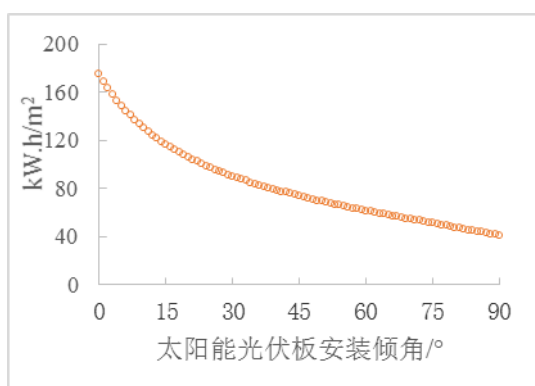


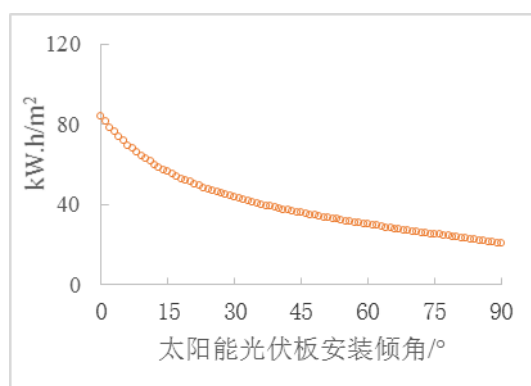
图 6.15 计算结果对照

(3) 基于节能目标（年发电量最大化）的安装倾角优化

由于节能评价指标（光伏全年发电量）是评价与优化的关键指标之一，因此，根据计算结果统计，或按照式（6.3）计算可得到全年的发电能力，见图 6.16~图 6.18。

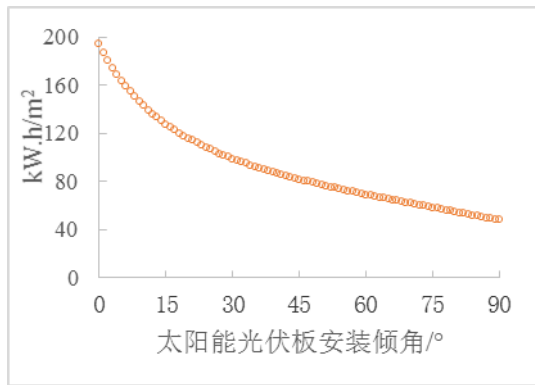


(a) 晶硅组件

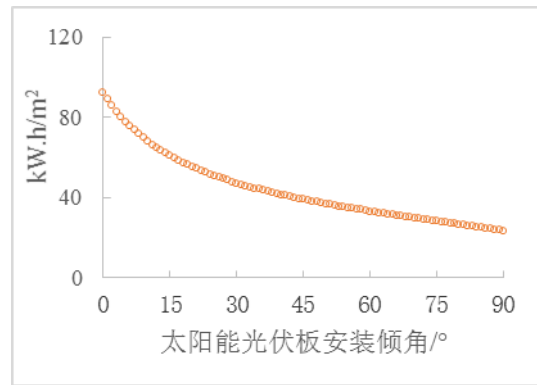


(b) 非晶硅组件

图 6.15 西宁光伏组件全年发电量随安装倾角的变化曲线（单位屋顶建筑面积）

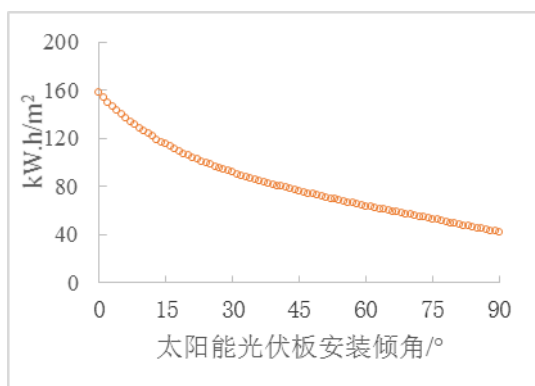


(a) 晶硅组件

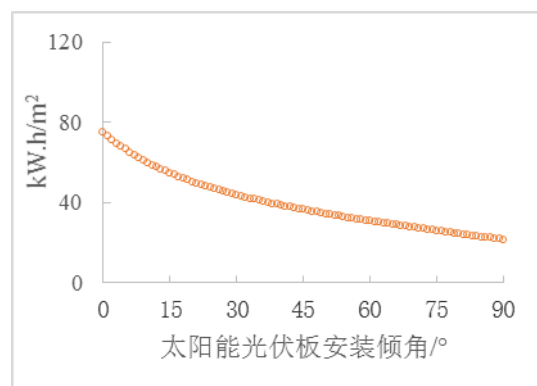


(b) 非晶硅组件

图 6.16 银川光伏组件全年发电量随安装倾角的变化曲线（单位屋顶建筑面积）



(a) 晶硅组件



(b) 非晶硅组件

图 6.17 西昌光伏组件全年发电量随安装倾角的变化曲线（单位屋顶建筑面积）

显然，安装倾角为 0° 时，基于单位屋顶面积的光伏组件所得到的全年发电量是最大的。这里，我们把这个安装倾角称为“发电量最优化倾角”，用 s_{power} 来表示。

汇总上述研究成果，得到在两种“优化倾角”下的全年发电量，见表 6.4 所示。

表 6.5 不同“优化倾角”下的光伏组件年发电量（kWh/单位屋顶面积 m^2 ）

地点		西宁		银川		西昌	
安装倾角		S_{power} (0°)	S_η (27°)	S_{power} (0°)	S_η (32°)	S_{power} (0°)	S_η (14°)
光伏组件	晶硅组件	175.11	94.14	194.31	96.11	157.98	117.04
	非晶硅组件	84.22	45.45	92.44	45.86	75.00	55.59

综上可得如下结论：当光伏组件按照图 6.11 的方式排列时，在占用相同屋顶面积（如果光伏板倾斜安装，则包括了遮挡阴影的面积）的条件下，其全年发电量（kWh）随着安装倾角的加大而变小。因此，如果以追求全年发电量为最大值的目标，这时以安装倾角为 0° ，将是最优化的。

当光伏组件安装倾角增大时，一方面单位建筑面积上可安装的光伏板面积逐渐减小（为了防止相互遮挡）；另一方面光伏板上的太阳能辐照强度先增大后减小。经比较可知，前者影响的权重更大，因此全年发电量（kWh）随着安装倾角的加大而变小，该趋势与所研究的三个地区和光伏组件类型无关。

6.3.4 光伏组件的经济性研究

6.3.3 节中，重点研究了光伏系统对太阳能利用最大化的问题，并得到了所研究的三个地区的最优化安装倾角。为充分利用太阳能的目标，提供了依据。同时，这也为国家制定太阳能利用的相关经济性政策法规，提供了参考依据。

但是，在利用太阳能的过程中，太阳能发电最大化，并不一定意味着在当前具有最好的经济性，而经济性又是投资者考虑的一个重要问题。因此，本节将针对当前的相关经济性政策，对太阳能光伏应用，进行技术经济的进一步分析和研究。

同 I 期一样，本课题的经济性研究，仍然采用“年度费用”和“投资回收期”两个评价指标。由于“年度费用”与建筑的使用功能特点相关，如果仅仅作为通用的理论研究，是无法给出答案的。因此，本节讨论的经济性分析，重点放在系统的“投资回收期”指标上。同时，为了进一步评价其经济性，也将光伏系统的“全寿命期总收益”作为评价指标之一。优化的目标是研究相应评价指标下的最优化安装倾角。同时，经济性研究与光伏组件的系统寿命、当地电价政策，初投资、运行维护费用等等，都是密切相关的。

（1）光伏组件的使用寿命与发电能力的衰减

对目前几家主流光伏组件厂商调研可以得到：

1) 目前的光伏组件产品，年衰减性能基本上是分两个阶段的线性曲线，在 0~10 年阶段总衰减 $\leq 10\%$ ；11~25 年阶段总衰减 $\leq 20\%$ ，即保证 25（仅有一家为 20 年）年后组件功率仍有标称功率的 80%。

2) 光伏组件的寿命期可按照 25 年计算。

由此，光伏组件在全寿命期内的各年发电量 P_{yi} 和总发电量 P 分别可按式下式计算：

第 1~11 年发电量： $P_{yn} = P_y (1.01 - 0.01n)$ ($n=1、2、\dots、10、11$)；

第 12~25 年发电量： $P_{yn} = P_y (137-n) / 140$ ($n=12、13、\dots、24、25$)；

总发电量： $P = \sum_{n=1}^{25} P_{yn}$ 。

（2）电价政策

由于区域与资源的不同，中国各地区的电价政策呈现出较大的差异。经调研可知，西宁一般商业电价为 0.6501 元/kWh，银川和西昌的一般商业用电实施峰谷电价标准，如下表所示：

表 6.6 银川峰谷电价（元/kWh）

	峰	平	谷
时间段	8:00-12:00 18:30-22:30	6:30-8:00 12:00-18:30	22:30-6:30
电价	0.9097	0.6654	0.4211

表 6.7 西昌峰谷电价（元/kWh）

	峰	平	谷
时间段	7:00-11:00 19:00-23:00	11:00-19:00	23:00-7:00
基本电价	1.14735	0.7649	0.38245
附加费用	0.0648	0.0648	0.0648
电价	1.21215	0.8297	0.44725

从国家整体层面来看，为了鼓励太阳能等可再生能源的应用，在采用分布式光伏发电时，又出台了两种可供光伏发电供应商选择的光伏发电补贴标准：

1) “光伏标杆电价”法——本方法直接计量按照光伏的发电量或用电量，并按照相应的优惠价格计算电费。

2) “分布式光伏收益”法——针对分布式光伏可能具有发电上网的特点，分别按照光伏发电的自用电量 and 上网电量，计算不同的电费。

上述两种方法的计价方式见表 6.7 所示。

表 6.8 光伏发电计价与补贴价格(元/kWh)

太阳能资源分区	光伏标杆电价	包括地区	分布式光伏收益	
			自用电量度电补贴	富余上网电量度电补贴
I	0.90	宁夏、青海海西等		
II	0.95	北京、天津、黑龙江等	商业用电电价+ 0.42	脱硫标杆电价+ 0.42
III	1.00	除 I、II 类资源区		

注：本表来自《国能新能[2014]406 号—“国家能源局关于进一步落实分布式光伏发电有关政策的通知”》

根据现有资料，本研究中涉及到的三个城市对应的“脱硫煤标杆电价”分别为西宁——0.3247 元/kWh，银川——0.2978 元/kWh，西昌——0.4012 元/kWh。

以下对表 6.11、表 6.12 的使用方法通过举例来说明。假定西宁市（太阳能资源 II 类地区），某光伏发电系统的总发电量为 100kWh，其中 80%为自用电量，20%为富余上网销售电量，R=20%（R 为富裕上网电量与总发电量的比值）。以下计算两种方式下的光

伏发电收益:

- 1) 按照“光伏标杆电价”法, 获取的收益为: $100 \times 0.95 = 95$ 元。
 - 2) 按照“脱硫煤标杆电价+电价补贴”法, 获取的收益包括以下两部分:
 - A) 自用电部分: $80 \times (0.6501 + 0.42) = 85.608$ 元;
 - B) 上网电部分: $20 \times (0.3247 + 0.42) = 14.894$ 元;
- 总收益为: $85.608 + 14.894 = 100.502$ 元。

经过与 I 期研究同样的分析可以得出, 对于单体建筑而言, 光伏发电上网的比例 R 值将远低于两种不同光伏发电补贴方法的平衡点 (收益相同时) 的临界值 R_c 。因此, 在以下分析各项经济性指标时, 按“自用电量补贴”方式计算电价, 发电量优先自用, 富裕的电量上网 ($R=0$)。

(3) 经济性分析的边界条件

根据目前的投资、贷款、运行费用等实际情况的调研, 光伏发电系统经济效益分析所采用的边界条件如表 6.13 所示。

表 6.9 经济分析的边界条件

单位静态投资 (万元/kW.Wp)	0.85	折旧期	15 年
运营期	25 年	固定资产形成率	90.0%
年运行费用	2.0%	合理资金回收期	< 12 年

(4) 分析计算结果

根据上述条件和所确定的方式, 全年逐时计算并考虑全寿命期的费用和发电能力变化的情况下, 得到了不同城市、不同光伏组件类型的“投资回收期”(“静态投资回收期”)随光伏组件安装倾角的变化结果 (暂不考虑建筑耗电曲线, 按发电全都能够自用考虑), 如图 6.19~6.21 所示。

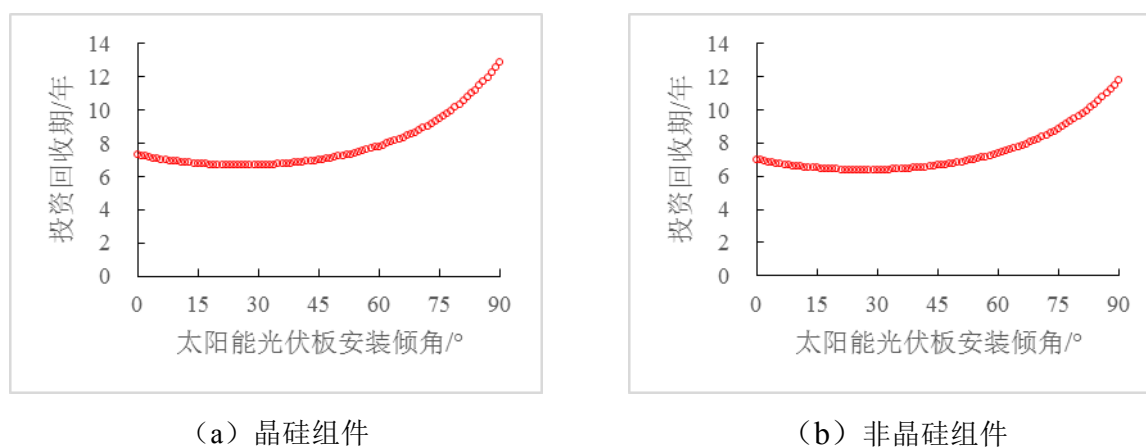
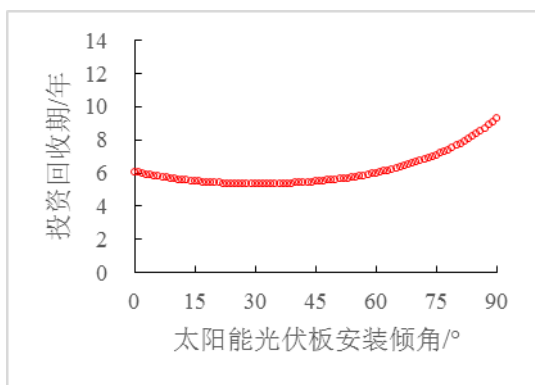
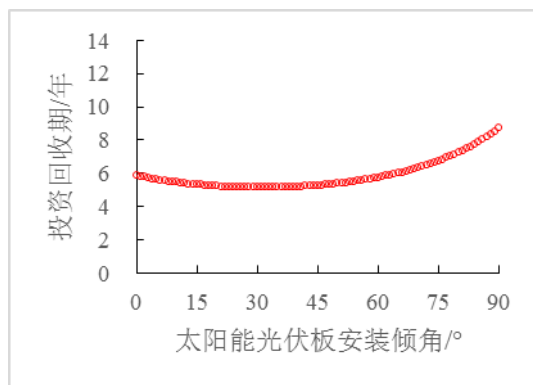


图 6.18 西宁光伏系统投资回收期分析曲线

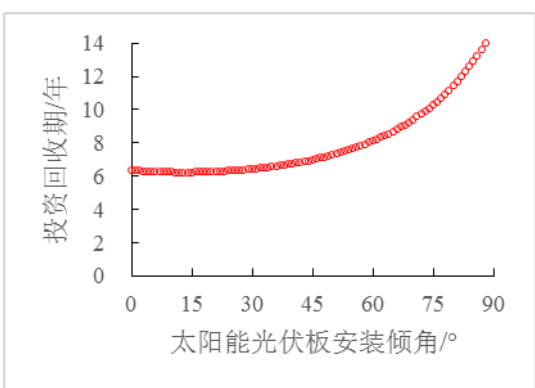


(a) 晶硅组件

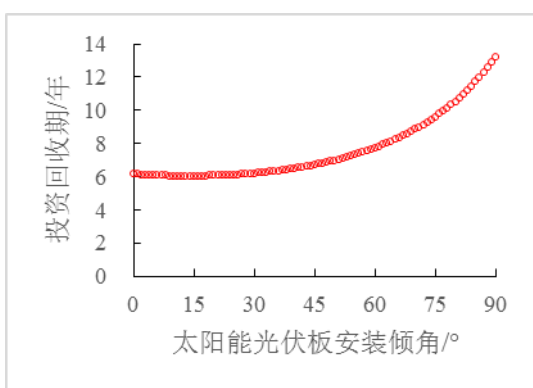


(b) 非晶硅组件

图 6.20 银川光伏系统投资回收期分析曲线



(a) 晶硅组件



(b) 非晶硅组件

图 6.21 西昌光伏系统投资回收期分析曲线

从图 6.18~6.20 中可以看到：投资回收期最优化的安装倾角 S_{year} 都与光伏组件的类型无关。且有以下结论：

(1) 对于西宁、银川和西昌三个城市，安装倾角最优角度为 27° 、 31° 和 14° ，这与图 6.12~6.14 中计算得到的全年太阳辐照量最大值的安装最优倾角 27° （西宁）、 32° （银川）和 14° （西昌）是基本一致的——其中银川地区两个角度相差 1° ，处于合理误差范围内。从定性来分析，全年得到太阳辐照量最大的安装倾角，也是投资回报率最好的角度，是合理的。

(2) 西宁的纬度为 37°N ，计算得到的投资回收期最优倾角 27° ，二者差值为 10° ；银川的纬度 38°N ，计算得到的投资回收期最优倾角 31° ，二者差值为 7° ；西昌的纬度 28°N ，计算得到的投资回收期最优倾角 14° ，二者差值为 14° 。这些差值小于，符合现今太阳能光伏应用规律，产生原因如下：太阳能辐照分直射辐照和散射辐照两部分，两者对地表倾斜面上的辐照强度的计算方法不同，相加得到太阳能对倾斜面的总辐照强度，如 4.3 小节中所阐述。以西宁为例，如图 6.21 所示，直射辐照强度最大时，对应的倾斜表面倾角为当地纬度值；散射辐照强度最大时，对应的倾斜表面倾角为 0° ；二者相加，

太阳能对倾斜面的总辐照强度最大时，倾角在 0°和当地纬度角之间。由于直射辐照强度的权重更大，因此对于总辐照强度，其最优值对应倾角接近并小于当地纬度角。西宁、银川和西昌三个城市中，参照 2.4 小节中给出的基础气象数据，西昌地区的太阳能散射辐照的强度比例相对较大，因此最有倾角和当地纬度角的差值在三者中最大，如图 6.22 所示。

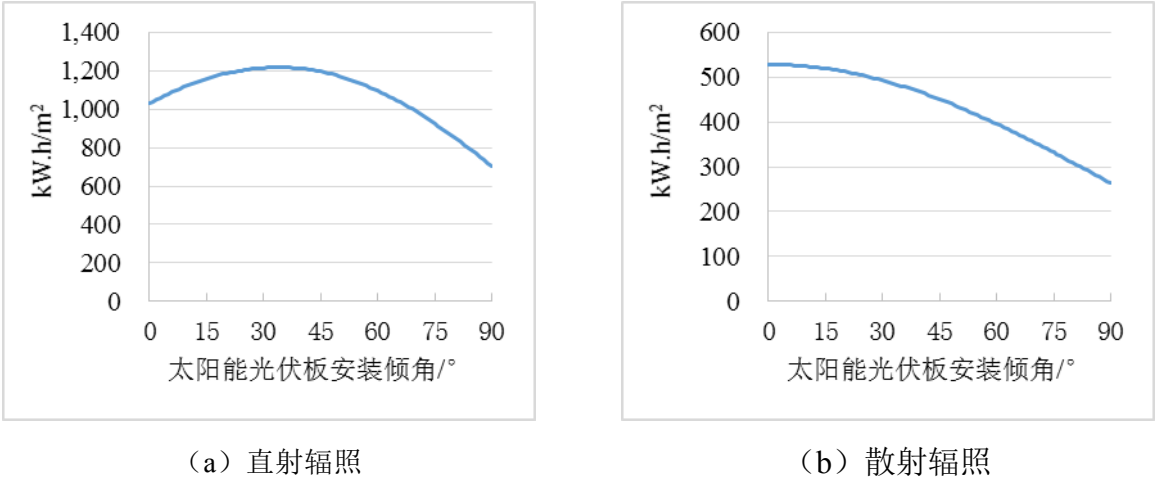


图 6.19 西宁地区太阳能对倾斜表面的辐照强度曲线

表 6.10 各优化指标及最优安装倾角

城市	光伏组件类型	评价指标	最优安装倾角	最优化值
西 宁	晶硅	投资回收期（年）	27°	6.68
		全寿命期发电量（kWh/m ² ）	0°	3880
		全寿命期总收益（元/m ² ）	0°	2781
	非晶硅	投资回收期（年）	27°	6.37
		全寿命期发电量（kWh/m ² ）	0°	1886
		全寿命期总收益（元/ m ² ）	0°	1363
银 川	晶硅	投资回收期（年）	31°	5.33
		全寿命期发电量（kWh/m ² ）	0°	4306
		全寿命期总收益（元/ m ² ）	0°	3588
	非晶硅	投资回收期（年）	31°	5.14
		全寿命期发电量（kWh/m ² ）	0°	2048
		全寿命期总收益（元/ m ² ）	0°	1729
西 昌	晶硅	投资回收期（年）	14°	6.20
		全寿命期发电量（kWh/m ² ）	0°	3501
		全寿命期总收益（元/ m ² ）	0°	3381
	非晶硅	投资回收期（年）	14°	6.02
		全寿命期发电量（kWh/m ² ）	0°	1662
		全寿命期总收益（元/ m ² ）	0°	1622

注：上表中面积为单位屋顶建筑面积。

6.4 本章小结

本章重点研究了不涉及到建筑的用电负荷的前提下，光伏系统安装倾角的优化问题。与目前行业采用月日平均辐照量数据来应用相比较，本研究采用了全年逐时辐照强度的数据，使得分析结果更为准确可靠。

（1）研究和给出了基于经济性评价（投资回收期 and 全寿命周期总收益）和节能量评价（全寿命周期总发电量）指标基础上的太阳能光伏组件的不同最优化安装倾角；

（2）基于节能量评价的安装倾角和经济性评价的最优化安装倾角都与光伏组件的类型无关；

（3）基于节能量评价指标和全寿命周期总收益评价指标（经济性指标之一）的最优安装倾角为 0° ；

（4）基于投资回收期评价指标的最优化安装倾角，西宁、银川和西昌三个城市，分别为 27° 、 31° 和 14° ，和全年太阳辐照量最大值的安装最优倾角基本一致，分别小于当地纬度 10° 、 7° 和 14° ，研究并解释了这个角度差值的产生原因。

（5）在确定采用“分布式光伏收益”法作为电价计费方法之后，随着 R 值的增加，经济性下降。当 $R=0$ （太阳能发电全部自用）时，各项目标参数的计算结果汇总如下表。

7 太阳能光伏系统应用研究

第 6 章对光伏系统的应用进行了理论分析，得到了基于相关评价目标参数下的优化安装倾角。但第 6 章的结论是以单位屋面面积为基础来分析的。对于具体的建筑，无论是节能型还是经济性，除了和单位屋顶面积下的指标相关外，还和总的屋顶面积、建筑电力负荷以及总的光伏安装容量（发电量和发电能力）密切相关。因此本章重点结合典型工程，研究在实际应用过程中的优化问题。优化目标参数为：光伏组件占用的屋顶面积。

7.1 基于节能性评价的光伏系统优化

基于节能性评价的主要指标是：全年或者全寿命期内，光伏系统的总发电量。这一评价指标反映了对太阳能的利用程度。

从前面的研究中可以看出：全年获得总发电量（kWh）最大的光伏组件最优安装倾角为 0° 。由于光伏组件的衰减特性基本上是线性的，因此可以得出结论：就单独光伏系统而言，光伏组件辐射的面积越大，则全寿命期内系统的发电能力也就越大。

因此，按照所有屋顶面积都有效利用，并以光伏组件安装倾角为 0° ，可以计算出本研究范围内的不同光伏组件类型、不同城市、不同类型典型建筑的相关结果，如表 7.1 所示。

对表 7.1 的计算结果数据做如下的说明：

（1）对建筑贡献率，分别计算第 1、6、12、18、25 年，中间用“/”分隔。

（2）其余数据按照首年计算。

由于光伏发电能力逐年存在衰减，因此 25 年寿命期中，光伏系统每年的总发电量（kWh/年）、上网电量（kWh/年）及其比例也是变化的。以西宁的办公建筑采用晶硅光伏组件为例，光伏系统发电对建筑贡献率及光伏发电上网比例随使用年的变化曲线如图 7.1 所示。

表 7.1 基于节能性评价时的典型建筑电力指标

城市	光伏组件类型	建筑类型	电力指标				
			建筑总用电量 (kWh/年)	光伏总发电量 (kWh/年)	对建筑的贡献率 (%)	上网电量 kWh/年	上网电量比例首年 (%)
西 宁	晶硅组件	办公	385,195	122,575	26.84/25.51/24.26 /23.30/22.17	103,384	15.66
		酒店	5,038,221	560,341	11.12/10.45/9.86/ 9.42/8.90	69	0
		商业	12,615,882	2,101,279	13.91/13.08/12.34/ 11.78/11.13	0	0
	非晶硅组件	办公	385,195	67,377	14.22/13.46/12.78/ 12.27/11.66	5,748	8.5
		酒店	5,038,221	269,508	5.35/5.03/4.74/ 4.53/4.28	0	0
		商业	12,615,882	1,010,656	6.69/6.29/5.93/ 5.67/5.35	0	0
银 川	晶硅组件	办公	409,771	136,018	28.80/27.39/26.07/ 25.04/23.82	17,996	13.23
		酒店	3,463,082	621,798	17.96/16.88/15.92/ 15.20/14.36	0	0
		商业	13,549,193	2,331,741	14.54/13.67/12.89/ 12.31/11.63	0	0
	非晶硅组件	办公	409,771	64,705	14.95/14.13/13.40/ 12.85/12.19	3,433	5.31
		酒店	3,463,082	295,796	8.54/8.03/7.57/ 7.23/6.83	0	0
		商业	13,549,193	1,109,233	6.92/6.50/6.13/ 5.86/5.53	0	0
西 昌	晶硅组件	办公	294,038	110,588	32.40/30.82/29.37 /28.24/26.90	15,323	13.86
		酒店	3,347,349	505,544	15.10/14.20/13.39/ 12.97/12.08	42	0
		商业	12,764,808	1,895,791	12.43/11.69/11.02/ 10.53/9.95	80	0
	非晶硅组件	办公	294,038	52,498	16.99/16.05/15.21/ 14.58/13.83	2,544	4.84
		酒店	3,347,349	239,991	7.17/6.74/6.36/ 6.07/5.74	0	0
		商业	12,764,808	899,968	5.90/5.55/5.23/ 5.00/4.72	0	0

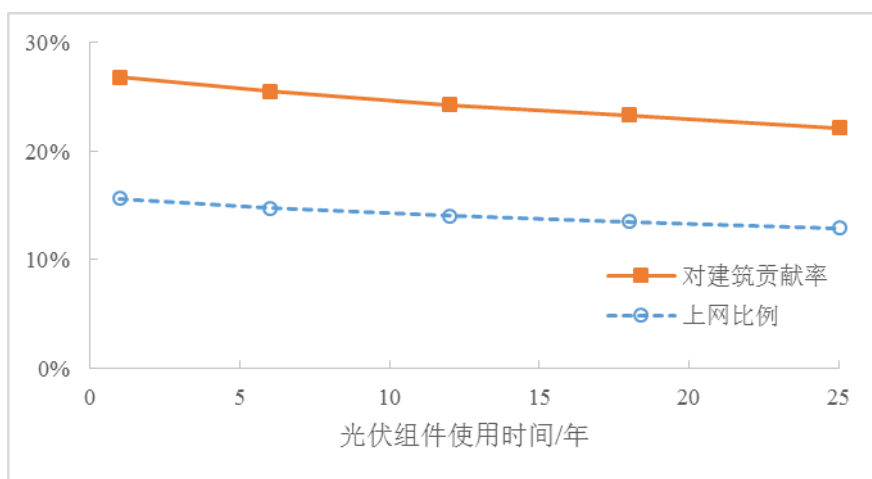


图 7.1 贡献率及上网比例随使用年的变化（西宁-办公-晶硅）

7.2 光伏系统经济性优化

基于经济性评价，有两个主要指标：“年度费用”和“投资回收期”。这两个评价指标反映了太阳能光伏系统投入的经济性，前者体现了投资回报的数量，后者关注投资回报的效率。

由于计算过程是一个耦合过程，因此这里采用的计算方法是：先确定光伏组件占用屋顶面积的边界条件（最大值和最小值）——优化后的屋顶面积，必定在此边界条件之内；然后由小到大，输入不同的安装面积，计算相应的经济指标，就可以从中得到优化的面积参数。

7.2.1 经济性评价边界条件的确定原则

（1）经济最优值与最大限值

从前面的计算中可以看出，当 $R=0$ 并采用“分布式光伏收益”法计算电价时，单位屋顶面积的经济效益最好。在经济性最合理情况、尽可能提高光伏发电能力、并尽可能做到“自发自用”，这三者综合的要求就是：全年任何时刻光伏系统的发电能力均不超过同一时刻该建筑的电力负荷需求（确保上网电量的比例 R 的最低值为 0），这就构成了确定光伏所占用屋顶面积最优值条件。最大可利用的屋面面积，就是面积边界条件的最大限值。

（2）建筑电力负荷的确定

前面第 3 章已经研究了建筑电力负荷，并给出了全年逐时电力负荷的计算结果。由于本章的研究只针对光伏系统，因此在研究过程中，不考虑光热系统的影响，这样所有的供暖系统均由空气源热泵提供，建筑电力负荷包含了热泵系统的用电负荷需求，当然也包括了其他机电系统。

（3）光伏发电年的选择

由于光伏系统每年存在一定的发电能力衰减，因此在确定光伏系统的最低发电能力时，采用首年的发电曲线作为确定依据。

（4）光伏组件的安装倾角

前面已经对经济性评价的光伏组件安装倾角进行了优化，因此在这里研究面积优化时，选取前面得到的经济性最优安装倾角下的光伏系统发电能力曲线作为本阶段的依据，即：以“投资回收期”为评价基准时，取各地区的光伏板安装倾角：西宁— 27° ，银川— 31° ，西昌— 14° 。

7.2.2 基于“投资回收期”评价基准下的不同地区典型建筑优化

（1）安装面积的经济最优值和最大限值

1) 安装面积的最大限值

本研究的典型建筑中，考虑人员检修等通道、空间之后，可利用屋顶面积的最大值为：办公建筑—— 700m^2 ，酒店建筑—— 3200m^2 ，商业建筑—— 12000m^2 。

2) 安装面积的经济最优值

显然，对于同一城市，在不上网送电的前提下，任何光伏组件安装面积的“投资回收期”都是相同的（只与安装倾角有关）。因此这里研究的面积优化，主要是研究：在全年得到最大经济收益条件下，最大安装面积的优化值——在不大于此优化面积时，投资回收期均相同且收益最大；由于发电上网的收益显然不如“自发自用”的收益显著，一旦大于此优化面积之后，投资回收期就会加长。

通过对个城市不同类型建筑的电力负荷曲线与不同光伏组件类型的发电能力曲线的对比分析，我们可以得到相应的结果。

下面以西宁地区的办公建筑，采用晶硅组件（安装倾角 27° 、首年）为例，分析计算过程如下：

a) 计算整个屋面安装光伏系统对应的 8760h 逐时发电量；

b) 逐时计算用电负荷与光伏系统发电量之差，其结果如下图所示；

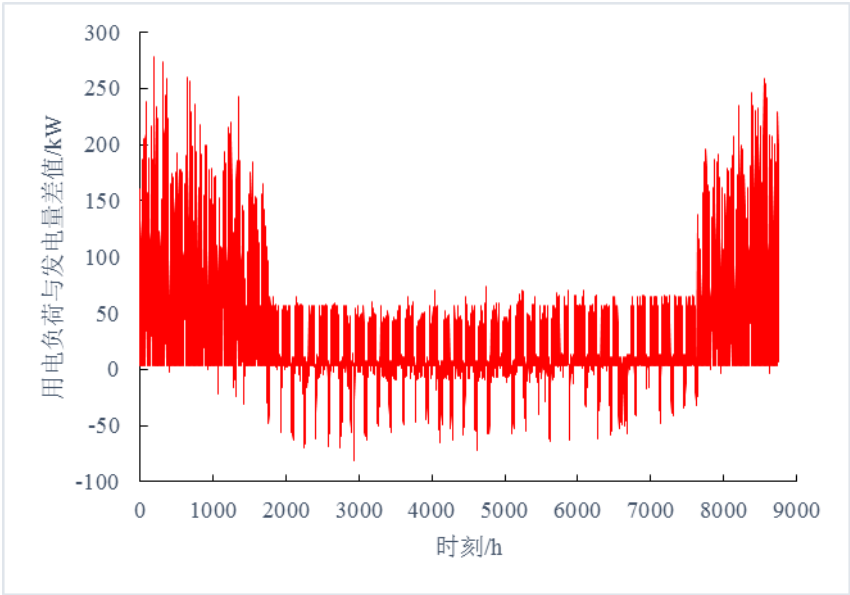


图 7.2 全年电力逐时差值（西宁-办公-晶硅）

c) 从上图的详细计算数据中可以看出：逐时的最大差值为-81.53kW（负号表示该时刻发电量大于用电负荷），此时的建筑电力负荷为 14.17kW，出现时刻为 5 月 3 日（休息日）11:00；

d) 如果建筑用电负荷与光伏发电能力的全年曲线的变化比较平滑，则要求此时刻的最大差值为零，即可符合 7.2.1 的原则——光伏系统的发电能力不超过此时刻建筑的用电负荷 14.17kW，此时要求单位屋面面积的光伏发电能力为 136.7W/m²；

e) 由此可得出光伏组件占用的最优屋面面积为

$$S_y = 14.17 \times 1000 / 136.7 = 103(\text{m}^2)$$

f) 光伏组件占用的最优屋面面积比例为：103/700=14.71%；

g) 光伏系统全年的最大时刻发电量为：103*136.7/1000=14.08 (kW)。

因此可以认为：以上步骤计算出的光伏组件最优屋顶面积 Sy 是相对合理的。

按照上述同样的计算过程，可以得到不同情况下的计算结果，如下表所示：

表 7.2 光伏组件占用屋顶面积最大优化值（以“投资回收期”为评价基准）

城市	光伏组件类型	建筑类型	可用屋面面积(m ²)	最大优化屋面面积(m ²)	最大优化面积比
西宁 (37°N)	晶硅组件	办公	700	207	29.57%
		酒店	3200	≥3200	≥100%
		商业	12000	≥12000	≥100%
	非晶硅组件	办公	700	432	61.71%
		酒店	3200	≥3200	≥100%
		商业	12000	≥12000	≥100%
银川	晶硅组件	办公	700	251	35.86%
		酒店	3200	≥3200	≥100%

(38°N)	非晶硅组件	商业	12000	≥12000	≥100%
		办公	700	534	76.28%
		酒店	3200	≥3200	≥100%
		商业	12000	≥12000	≥100%
西昌 (28°N)	晶硅组件	办公	700	134	19.14%
		酒店	3200	2816	88%
		商业	12000	≥12000	≥100%
		办公	700	285	40.71%
(28°N)	非晶硅组件	酒店	3200	≥3200	≥100%
		商业	12000	≥12000	≥100%
		商业	12000	≥12000	≥100%

根据表 7.2 和计算过程得出以下分析：

- 1) 对于本研究中的办公建筑，无论采用晶硅组件还是非晶硅组件，西宁、银川和西昌这三个城市的光伏组件占用屋顶最大优化面积都是有限的（19.14~76.28%）；
- 2) 对于本研究中的酒店建筑，只有西昌采用晶硅组件时，最大优化屋顶面积比为 88%，其他情况下现有屋顶面积都小于最大优化面积；
- 3) 对于本研究中的商业建筑，只有西昌采用晶硅组件时，最大优化屋顶面积比为 75.23%，其他情况下现有屋顶面积都小于最大优化面积；
- 4) 上述 2)、3) 结论可以说明：即使屋顶面积全部用于设置光伏组件，也是具有较好的投资回收效益的。

7.2.3 基于“年度费用”评价基准下的不同地区典型建筑优化

“年度费用”优化方法与 7.2.2 是不同的。因为它与建筑的类型、上网送电带来的经济效益、设置的光伏组件安装面积等直接相关，不存在单位面积“年度费用”的概念。因此，此处的优化需要结合建筑类型来进行。首先应进行安装角度的优化，在此基础上，进行安装面积的优化计算。

(1) 无光伏系统时的“年度费用”计算

当建筑不设置光伏系统时，其“年度费用”主要是考虑全年建筑的用电量所产生的费用（注：由于本课题只针对电源供应，因此没有考虑建筑用电设备投资等相关费用）。其结果如表 7.3 所示。

表 7.3 用电系统各建筑的年度费用（元）

建筑类型	办公	酒店	商场
西宁	250,414	3,275,341	8,206,788
银川	314,048	2,689,120	10,290,688
西昌	277,324	3,274,499	11,821,514

(2) 安装倾角的优化计算结果

图 7.3~图 7.11 反映了年度费用与安装倾角的关系，均为在整个可用屋面面积布置光

伏组件的条件下（办公建筑—700m²，酒店建筑—3200m²，商业建筑—12000m²）。

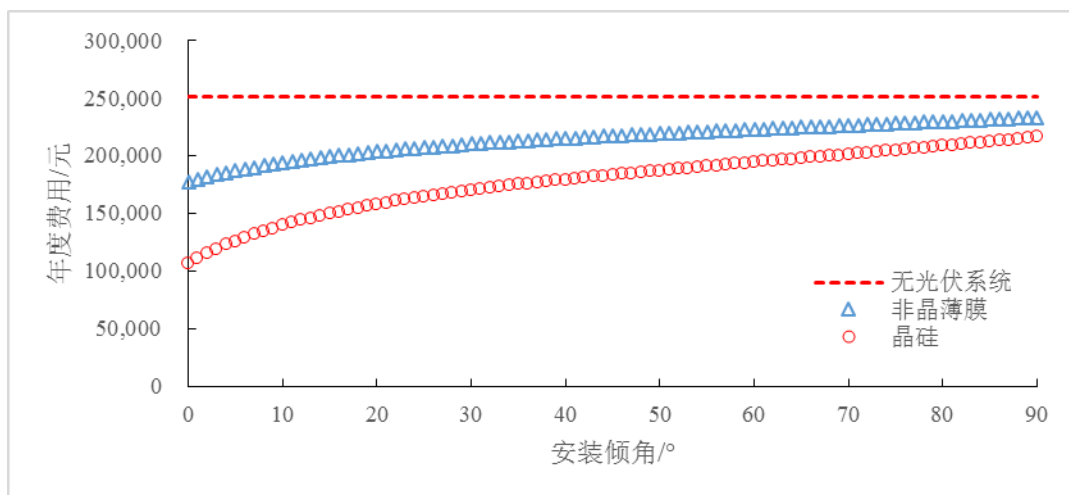


图 7.3 西宁-办公建筑年度费用随安装倾角的变化

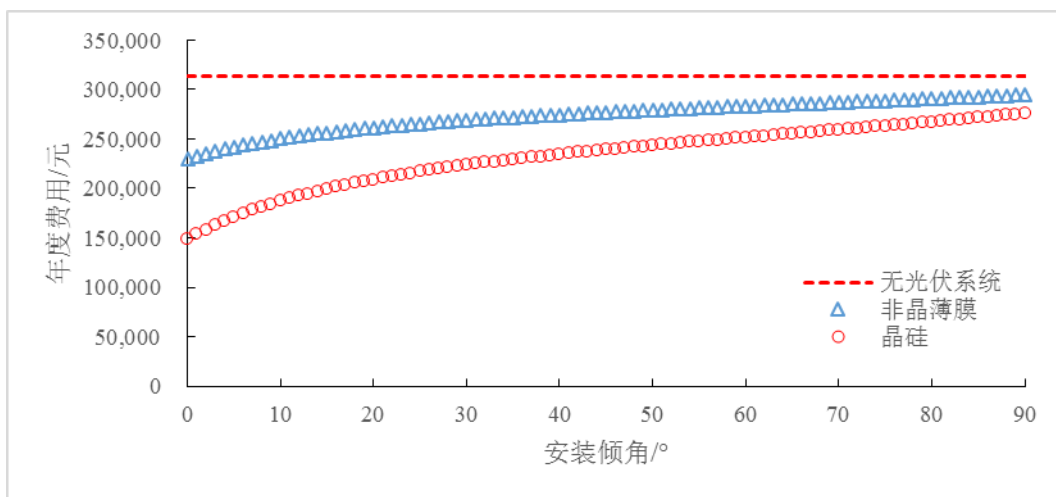


图 7.4 银川-办公建筑年度费用随安装倾角的变化

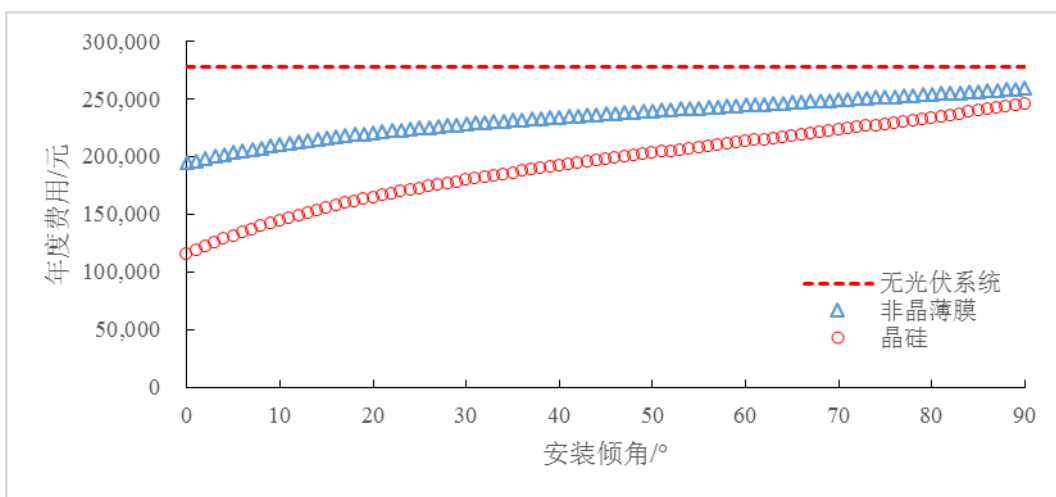


图 7.5 西昌-办公建筑年度费用随安装倾角的变化

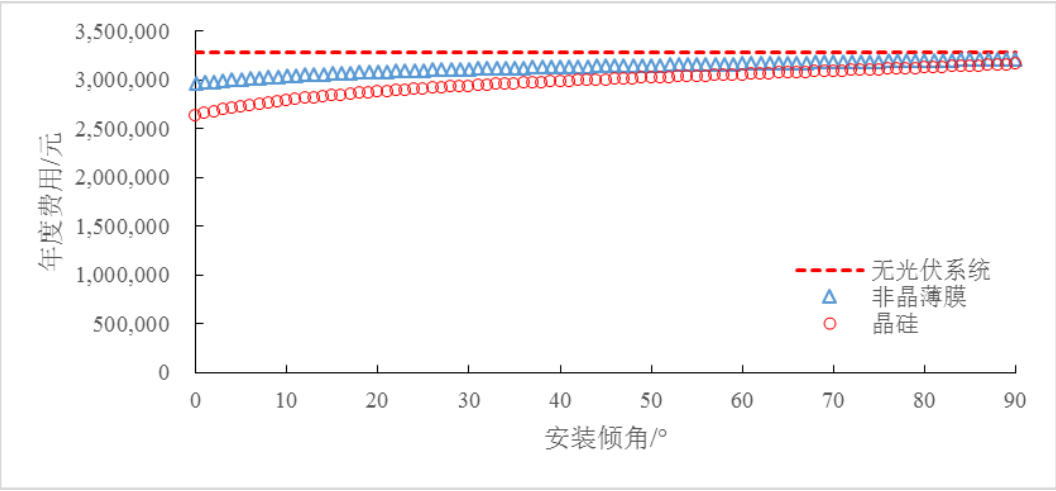


图 7.6 西宁-酒店建筑年度费用随安装倾角的变化

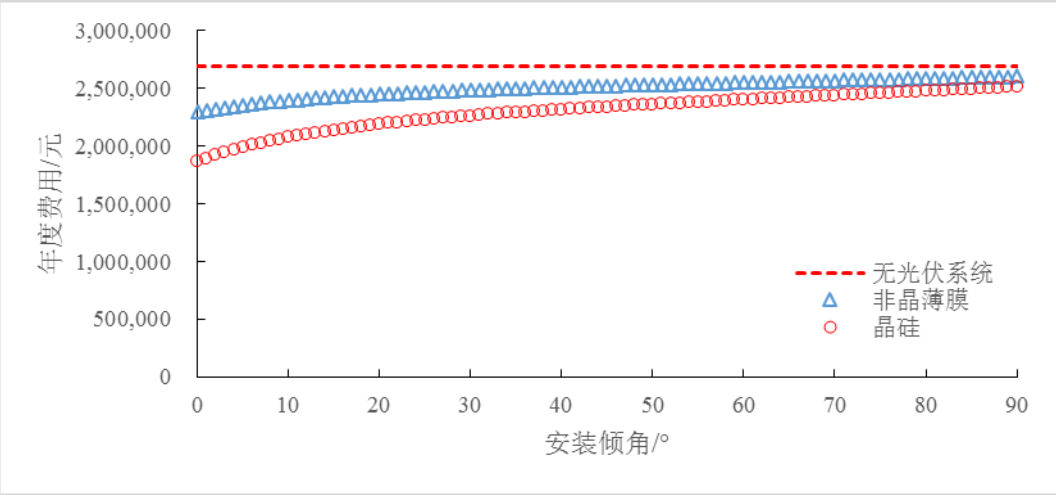


图 7.7 银川-酒店建筑年度费用随安装倾角的变化

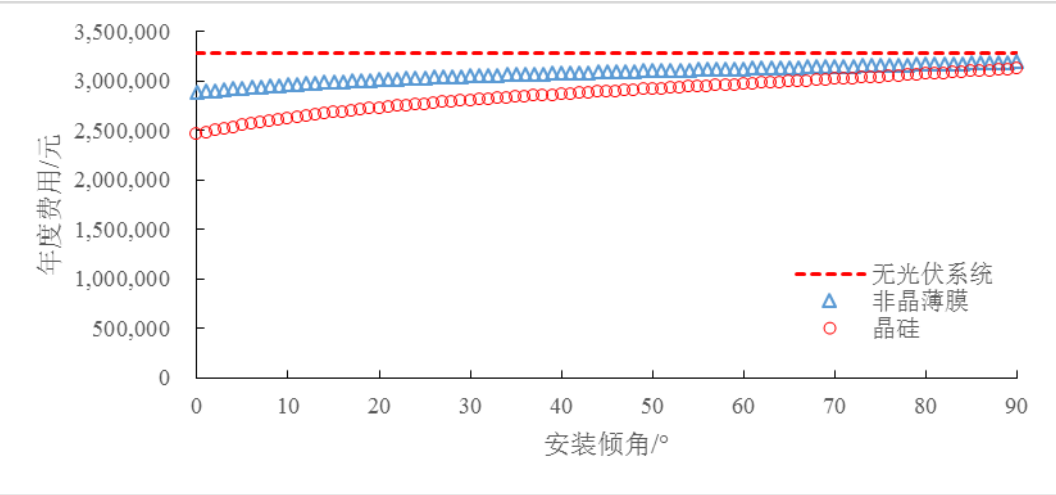


图 7.8 西昌-酒店建筑年度费用随安装倾角的变化

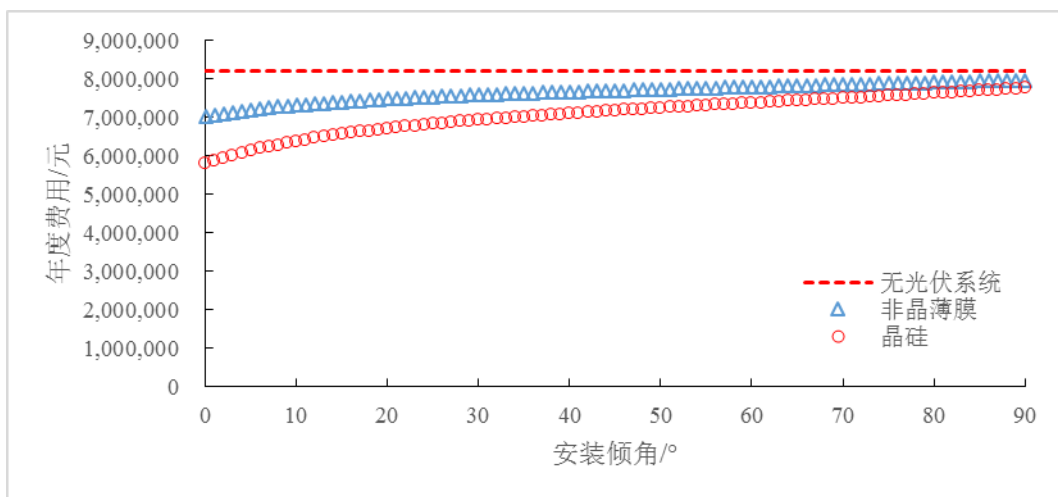


图 7.9 西宁-商业建筑年度费用随安装倾角的变化

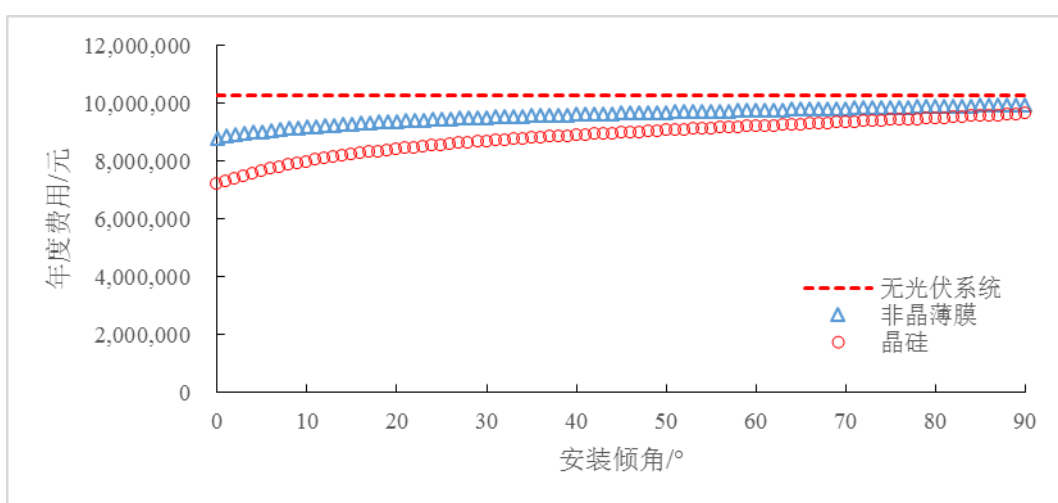


图 7.10 银川-商业建筑年度费用随安装倾角的变化

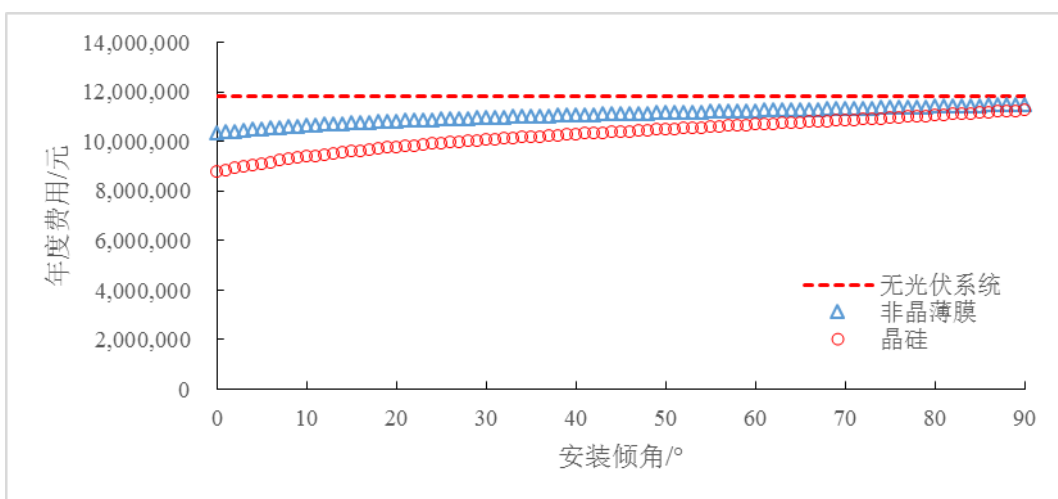


图 7.11 西昌-商业建筑年度费用随安装倾角的变化

从上图可以看出：当安装倾角为 0° 时，各项年度费用均为最低。因此，从降低年度费用这一经济性指标来看，光伏组件的安装倾角 0° 为最优。将其与表 6.14 对比分析，也可以看出：（1）“年度费用”与“投资回收期”的优化安装倾角是不同的，原因

是后者是一个相对比较值，而前者是总绝对值。因此前者与全寿命期总收益以及总发电量相关性非常密切，得到的安装倾角也是相同的。

(3) 不同建筑安装面积的优化计算

在前面得到了安装倾角的优化后，以光伏组件安装倾角为 0° ，分别可计算出不同的光伏安装面积和由此产生的“年度费用”。以“西宁-办公-晶硅”组合为例，计算结果如图 7.12 所示。光伏组件倾角为其它角度时，不改变该规律，只是具体数值有变化。

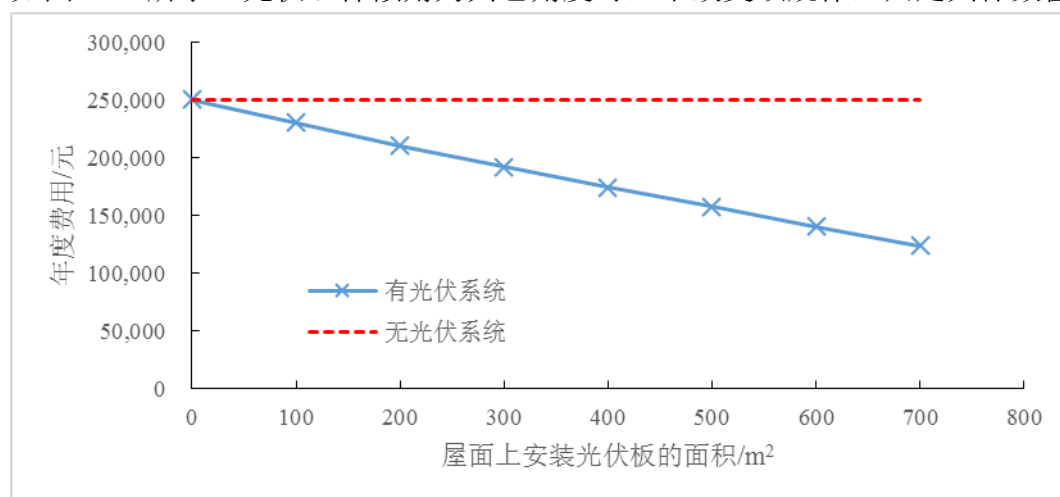


图 7.12 “西宁-办公-晶硅”组合的年度费用随安装面积的变化

图 7.12 只是本课题研究中的一个案例。通过对全部组合（城市、建筑类型、光伏组件类型等）的计算，可以得到的定性结论是：所有组合的“年度费用”随安装面积变化的趋势，与图 7.12 相同——光伏组件屋顶安装面积越大，年度费用越低。因此，就光伏系统本身而言，如果追求年度费用最低，则应使得设置的光伏系统面积最大化。即：按照全部屋顶可用的面积来设置光伏系统，是最优的。

7.2.4 小结

本节重点研究了结合建筑用电负荷和屋顶面积的前提下，光伏系统安装倾角的优化问题。

- (1) 确定了经济性评价边界条件，并针对“投资回收期”最优，对不同建筑类型、不同城市、不同光伏组件类型，计算得到了光伏组件最优屋顶面积；
- (2) 计算得出，太阳能光伏板安装面积增大时，年度费用减小（更优）；
- (3) 计算得出，太阳能光伏板倾角为 0° 时，年度费用最小（最优），太阳能光伏板倾角由 0° 逐渐增大时，年度费用逐渐增大（更差）。

7.3 太阳能光伏在绿色建筑设计中的应用

现在施行的 GB/T 50378-2014《绿色建筑评价标准》中，第 5 章“节能与能源利用”

中 5.2.16 款规定：“根据当地气候和自然资源条件，合理利用可再生资源，评价总分为 10 分，按下表评分”。

表 7.4 可再生资源利用评分规则

可再生资源利用类型和指标		得分
由可再生能源提供的生活用热水比例 R_{hw}	略	略
由可再生能源提供的空调用冷量和热量比例 R_{ch}	略	略
由可再生能源提供的电量比例 R_e	$1.0\% \leq R_e < 1.5\%$	4
	$1.5\% \leq R_e < 2.0\%$	5
	$2.0\% \leq R_e < 2.5\%$	6
	$2.5\% \leq R_e < 3.0\%$	7
	$3.0\% \leq R_e < 3.5\%$	8
	$3.5\% \leq R_e < 4.0\%$	9
	$R_e \geq 4.0\%$	10

结合表 7.2~表 7.4 可以看出，在本文的算例中，当利用整个屋面来安装太阳能光伏板，且安装倾角为 0° 时，太阳能光伏发电提供的建筑用电电量比例，均 $>4.0\%$ ，能够在绿色评价该项指标中得到满分；而如果以“投资回收期”为基准，按照表 7.3 中的最优安装面积和对应的安装倾角（不等于 0° ），则太阳能光伏发电提供的建筑用电电量比例会显著降低，该项指标得分不能拿到满分。

在建筑设计中，屋顶面积往往有限，同时还要安装其他设备和设施。由前文所述，当屋顶面积为定值时，安装倾角为 0° 时，光伏系统的安装容量最大，绝对的经济收益最大；安装倾角为

7.4 本章小结

本章研究了不同建筑结合太阳能光伏系统时，对屋面安装面积的优化，得到如下结论：

（1）从节能性评价指标来看，光伏组件安装的屋顶面积越多，其对太阳能的利用越大，节能效果也越大，年度费用也越低。

（2）表 7.2 提出了以“投资回收期”为评价基准条件下，光伏组件安装的最大优化屋顶面积。同样的“投资回收期”情况下，光伏系统收益最大。

（3）本章和第 6 章提到的最优安装倾角整理如下表所示

表 7.5 “最优化倾角”汇总

	西宁	银川	西昌
效率最优化倾角 S_{η} 单位面积光伏组件全年发电量最大	27°	32°	14°

发电量最优化倾角 S_{power} 单位屋顶面积的光伏组件全年发电量最大	0°	0°	0°
投资回收期最优化倾角 S_{year} 投资回收期最小	27°	31°	14°
年度费用最优化倾角 S_{cost} 年度费用最小	0°	0°	0°

8 太阳能综合利用优化分析

太阳能光热采暖系统和光伏系统,是建筑利用太阳能的基本方式。在前面的研究中,就他们各自的特点,分别针对典型建筑的情况进行了优化。但在典型建筑中,如何合理搭配光热和光伏系统,使得我们所追求的目标达到最优,这是本节需要解决的问题。

本章以前述研究为依据,对光热和光伏系统结合的典型建筑进行综合优化研究,得到在有限的屋顶面积资源的情况下,两者所占用的屋顶面积的最佳比例,并分析相关因素对综合利用系统性能的影响。

8.1 太阳能综合利用优化模型

本研究基于该地区常采用的两种冷热源模式(空气源热泵作为冷热源模式、天然气锅炉+冷水机组作为冷热源模式),对西宁、西昌、银川三个地方的三种典型公共建筑(办公、酒店、商场)太阳能综合利用进行了优化研究。

8.1.1 物理模型

图 8.1 给出了空气源热泵为冷热源的太阳能综合利用物理模型。该系统的工作原理为:冬季工况时,由太阳能和空气源热泵产生 50℃ 的热水,满足建筑供暖与热水用热需求,光伏系统发电量一方面满足空气源热泵用电需求,另一方面满足建筑其他耗电设备用电需求,电力不足部分由市政电网供给,发电富余部分将上传至市政电网;夏季工况时,由太阳能和空气源热泵产生 50℃ 的热水,满足建筑供冷与热水用热需求,由空气源热泵产生 7℃ 的冷水,满足空调系统用冷需求,光伏系统发电量一方面满足空气源热泵用电需求,另一方面满足建筑其他耗电设备用电需求,电力不足部分由市政电网供给,发电富余部分将上传至国家电网。

该模型中热力和电力存在较强的耦合关系(如图 8.2 所示),太阳能集热面积的大小将影响辅助热源的电负荷,进而影响光伏系统电量平衡关系和太阳能光伏电池的安装面积,而太阳能光伏面积的变化也会反过来影响太阳能光热系统集热量与蓄热特征;二者的相互作用既体现在太阳能热/电转换以及蓄热/蓄电过程上,又体现在建筑全年用能过程方面,同时对综合利用系统的经济性方面也造成重要影响。建筑用能、建筑产能与建筑蓄能三者之间的耦合关系,再加上气象参数的动态变化,最终形成复杂的多变量动态耦合过程。

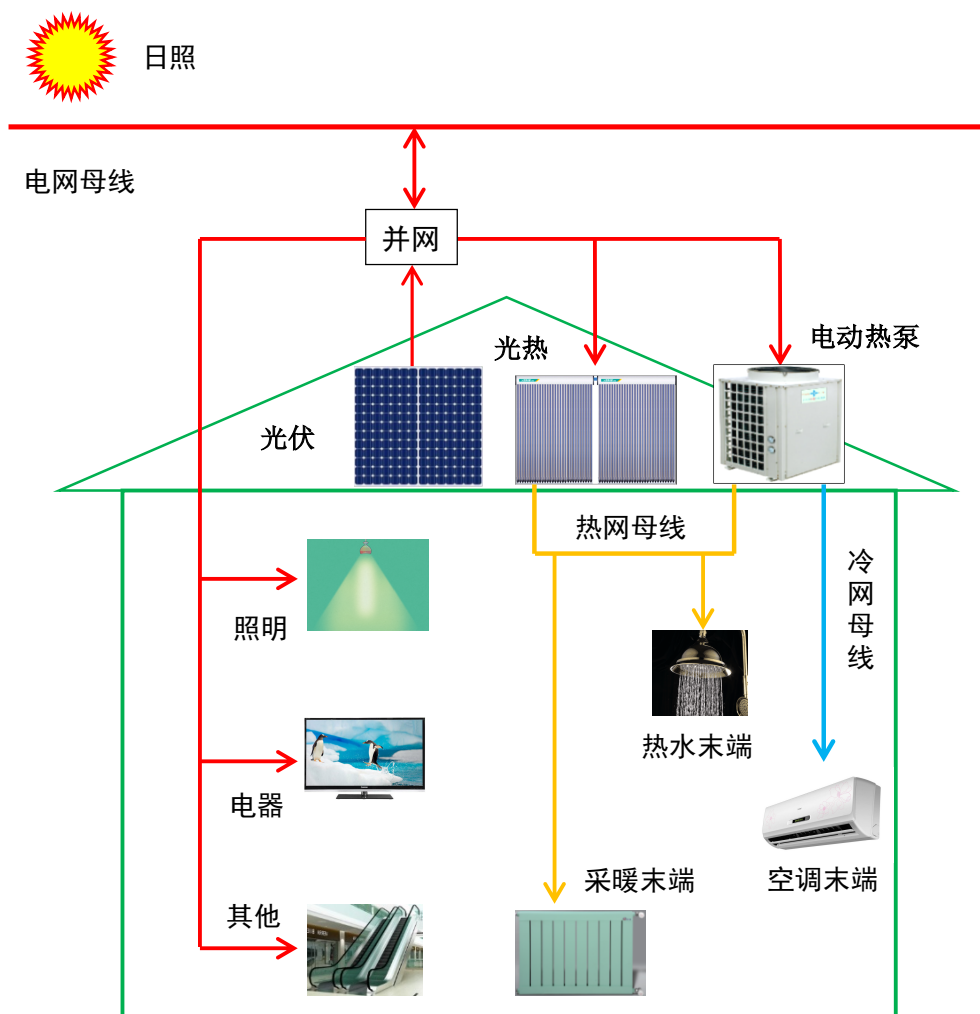


图 8.1 空气源热泵为冷热源的太阳能综合利用物理模型

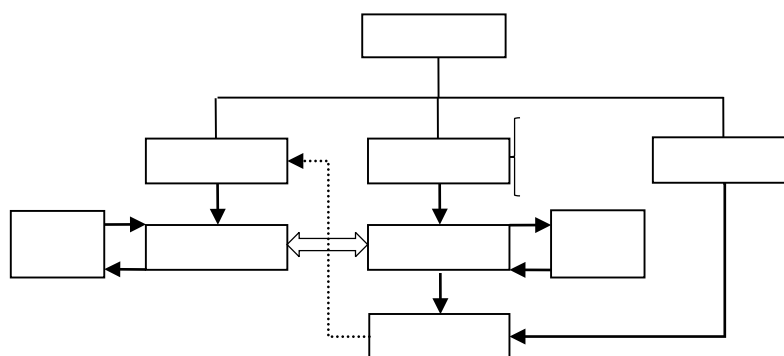


图 8.2 空气源热泵为冷热源的太阳能综合利用耦合关系

图 8.3 给出了天然气锅炉+冷水机组为冷热源的太阳能综合利用物理模型。该系统的工作原理为：冬季工况时，由太阳能和天然气锅炉产生 50℃ 的热水，满足建筑供暖与热水用热需求，光伏系统发电量一方面满足输配系统用电需求，另一方面满足建筑其他耗电设备用电需求，电力不足部分由市政电网供给，发电富余部分将上传至国家电网；夏季工况时，由太阳能和天然气锅炉产生 50℃ 的热水，满足建筑供冷与热水用热需求，

由冷水机组产生 7℃ 的冷水，满足空调系统用冷需求，光伏系统发电量一方面满足冷水机组用电需求，另一方面满足建筑其他耗电设备用电需求，电力不足部分由市政电网供给，发电富余部分将上传至国家电网。

相比第一种系统，该模型中热力和电力耦合关系相对弱一些（如图 8.4 所示）。其耦合关系主要体现在光热面积与光伏安装面积的相互制约，其次是天然气锅炉的引风机用电对建筑电负荷的影响。

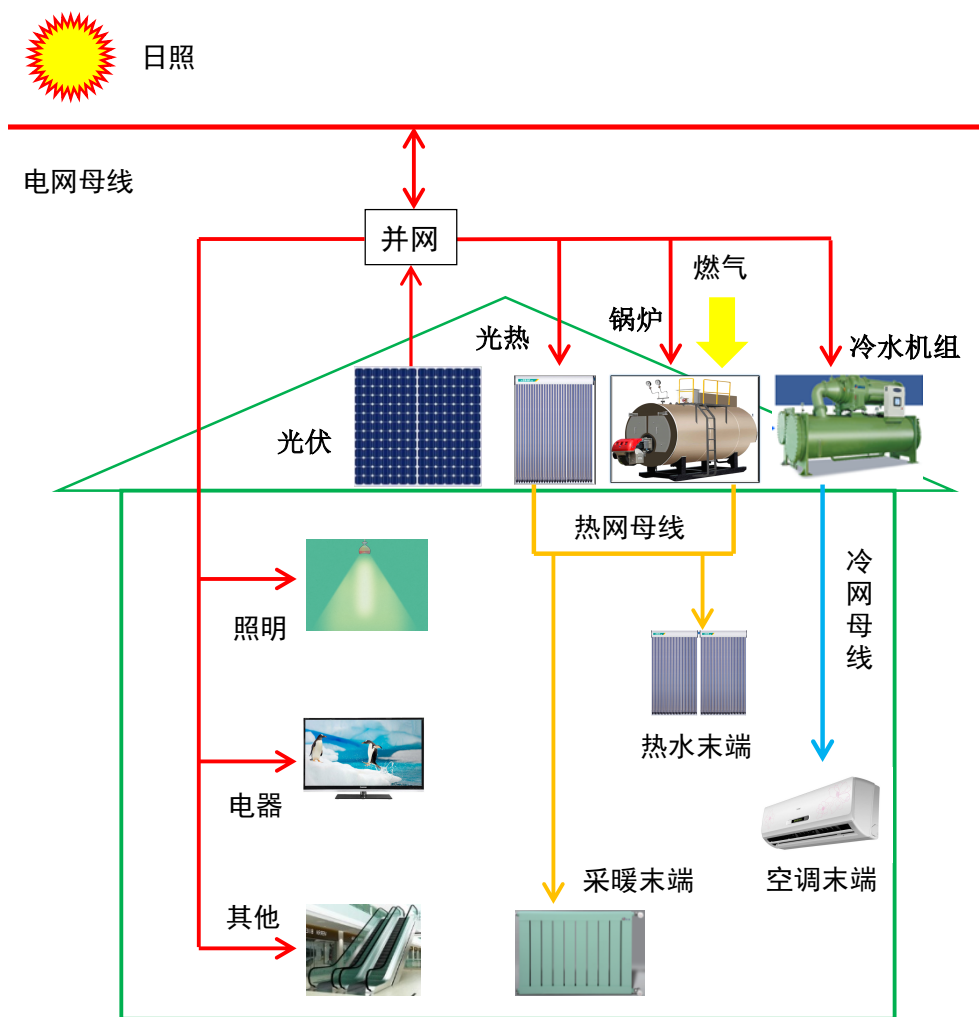


图 8.3 天然气锅炉+冷水机组为冷热源的太阳能综合利用物理模型

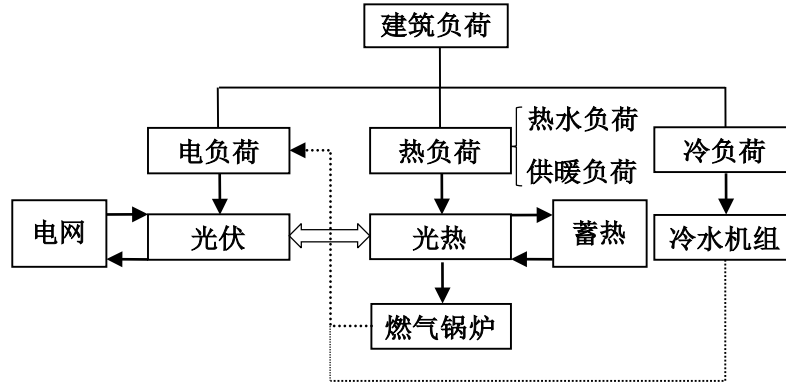


图 8.4 天然气锅炉+冷水机组为冷热源的太阳能综合利用耦合关系

8.1.2 数学模型

对于热泵为冷热源综合利用系统评价模型的基本思想：将建筑看作一个开口系统，这个系统的特点是全年电、冷、热需求量是恒定的，外界与系统发生的商品能源交换的接口仅为电力并网点；在满足建筑用热、用冷与用电的需求前提下，外界全年向其输入的商品能源（市网消耗电量与发电上网电量差值）越少，则从能源利用角度评价，太阳能综合利用系统越好；在满足建筑用热与用电的需求前提下，全年费用（综合费用年值）最少，则从经济性角度评价，太阳能综合利用系统越好。

对于冷水机组+燃气锅炉为冷热源综合利用系统评价模型的基本思想：将建筑看作一个开口系统，这个系统的特点是全年电、冷、热需求量是恒定的，外界与系统发生的商品能源交换的接口为电力并网点与天然气接入点；在满足建筑用热、用冷与用电的需求前提下，外界全年向其输入的商品能源（市网消耗电量与发电上网电量差值和天然气消耗量经折标煤计算后的能耗）越少，则从能源利用角度评价，太阳能综合利用系统越好；在满足建筑用热与用电的需求前提下，全年费用（综合费用年值）最少，则从经济性角度评价，太阳能综合利用系统越好。

8.1.2.1 热泵为冷热源综合利用系统的数学优化模型

(1) 约束条件：

①系统逐时电量平衡关系：

$$Q_f(h, A_{d,w}) - Q_q(h) - Q_g(h, A_{r,w}) = Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w})$$

式中， $Q_f(h, A_{d,w})$ ——光伏设备逐时发电量，kWh； $Q_q(h)$ ——除供热与供冷设备以外的

其他设备逐时用电量, kWh; $Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w})$ ——正值时代表逐时上网电量, 负值时代表逐时消耗城市电网电量, kWh; $Q_g(h, A_{d,w}, A_{r,w})$ ——供热与供冷系统逐时消耗电量, kWh; $A_{d,w}$ ——光伏发电设备占用屋顶面积, m^2 ; $A_{r,w}$ ——光热设备用屋顶面积, m^2 。

第 h 时刻供热与供冷系统逐时消耗电量可表示为:

$$Q_g(h, A_{d,w}, A_{r,w}) = Q_{l,d}(h) + Q_{r,d}(h) + Q_{sp}(h)$$

式中: $Q_{r,d}(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供热工况耗电量, kJ; $Q_{l,d}(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供冷工况耗电量, kJ; $Q_{sp}(h)$ 为第 h 时刻输配系统耗电量, kJ。

②系统逐时供热量平衡关系:

第 h 时刻集热器直接供热量可表示为:

$$Q_{j,g}(h) = \begin{cases} Q_j(h), & Q_f(h) > Q_j(h) \\ Q_f(h), & Q_f(h) \leq Q_j(h) \end{cases}$$

第 h 时刻水箱余热量的热平衡方程可表示为:

$$Q_y(h) = \begin{cases} Q_y(h-1) + \hat{Q}(h) - Q_{g,q}(h), & Q_y(h-1) \geq Q_{g,q}(h) \\ 0, & Q_y(h-1) < Q_{g,q}(h) \end{cases}$$

第 h 时刻由太阳能集热直接供热后不足的热量可表示为 (不足热需求将由蓄热量与辅助热源供热):

$$Q_{g,q}(h) = \begin{cases} Q_j(h) - Q_f(h), & Q_f(h) - Q_j(h) < 0 \\ 0, & Q_f(h) - Q_j(h) \geq 0 \end{cases}$$

第 h 时刻水箱即时蓄热量可表示为:

$$\hat{Q}(h) = \begin{cases} Q_j(h) - Q_f(h), & Q_j(h) - Q_f(h) > 0 \\ 0, & Q_j(h) - Q_f(h) \leq 0 \end{cases}$$

第 h 时刻辅助热源供热量可表示为:

$$\hat{Q}_{fz}(h) = \begin{cases} Q_{g,q}(h) - Q_y(h-1), & Q_y(h) = 0 \\ 0, & Q_y(h) \neq 0 \end{cases}$$

式中: $Q_j(h)$ 为第 h 时刻集热器集热量, $Q_j(h) = \int_{h-1}^h \frac{3600\eta_h^+ \cdot A_{r,w} / \cos\theta \cdot I(h)}{1000} dh$,

kJ; θ 为集热器安装倾角, $^\circ$; $I(h)$ 为第 h 时刻倾斜面的太阳辐照强度, W/m^2 ; $Q_f(h)$ 为第 h 时刻供暖与热水所需热量, kJ。

第 h 时刻辅助热源供热量可表示为:

$$Q_f(h) = Q_{f,g}(h) + Q_{f,r}(h) = Q_{r,d}(h) / COP_r(h)$$

式中： $Q_{f, g}(h)$ 为第 h 时刻供暖所需热量， kJ ； $Q_{f, r}(h)$ 为第 h 时刻供暖所需热量， kJ ；

$Q_{r, d}(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供热工况耗电量， kJ ； $COP_r(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供热工况性能系数， W/W 。

③系统逐时供冷量平衡关系：

第 h 时刻供冷量可表示为：

$$Q_l(h) = Q_{l, d}(h) / COP_l(h)$$

式中： $Q_{l, d}(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供冷工况耗电量， kJ ； $COP_l(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供冷工况性能系数， W/W 。

④全年上网电量：

$$Q_{s, w}(A_{d, w}, A_{r, w}) = \sum_{h=0}^{h=8765} \begin{cases} Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}), Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) > 0 \\ 0, Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) < 0 \end{cases}$$

式中， $Q_{s, w}(A_{d, w}, A_{r, w})$ ——全年上网电量， kWh 。

⑤全年市网消耗电量：

$$Q_{s, x}(A_{d, w}, A_{r, w}) = \sum_{h=0}^{h=8765} \begin{cases} |Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w})|, Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) < 0 \\ 0, Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) > 0 \end{cases}$$

式中， $Q_{s, x}(A_{d, w}, A_{r, w})$ ——全年城市电网消耗电量， kWh 。

⑥全年能耗量（以电量来算）：

$$Q_{n, h}(A_{d, w}, A_{r, w}) = Q_{s, x}(A_{d, w}, A_{r, w}) - Q_{s, w}(A_{d, w}, A_{r, w})$$

式中， $Q_{n, h}(A_{d, w}, A_{r, w})$ ——全年能耗量（以电量来算）， kWh 。

⑦屋顶面积有限约束：

$$A_{d, w} + A_{r, w} \leq A_w$$

式中， A_w ——屋顶面积， m^2 。

⑧运行费用：

运行费用可用下式表示：

$$P(A_{d, w}, A_{r, w}) = P_w(A_{d, w}, A_{r, w}) + \sum_{h=0}^{h=8765} \left\{ \left[Q_f(h, A_{d, w}) - \begin{cases} Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}), Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) > 0 \\ 0 \end{cases} \right] \times 0.42 + \begin{cases} Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) \cdot (\text{标杆电价} + 0.42), & Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) > 0 \\ 0, & Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) \leq 0 \end{cases} - \begin{cases} |Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w})| \cdot (\text{市网电价}), & Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) < 0 \\ 0, & Q_s(h, A_{d, w}, A_{r, w}) \geq 0 \end{cases} \right\}$$

式中, $P(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——年运行费用, 元; $P_w(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——年维护费用 (光伏系统与供暖系统), 元。

⑨年计算费用:

利用动态分析法进行技术经济分析。年计算费用公式如下式:

$$Z(A_{d,w}, A_{r,w}) = \theta_g K(A_{d,w}, A_{r,w}) + P(A_{d,w}, A_{r,w}) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} K(A_{d,w}, A_{r,w}) + P(A_{d,w}, A_{r,w})$$

中, Z 为年计算费用, 元/a; K 为初投资, 元; i 为利率/收益率, %, 本研究取 8%; n 为生产期, 这里取集热器的寿命/a, 15 年; P 为运行费用; θ_g 为资金回收系数。

(2) 目标函数:

①从节能最优角度考虑, 目标函数为:

$$S = \min[Q_{n,h}(A_{d,w}, A_{r,w})] = \min[Q_{s,x}(A_{d,w}, A_{r,w}) - Q_{s,w}(A_{d,w}, A_{r,w})]$$

②从经济最优角度考虑, 目标函数为:

$$S = \min[Z(A_{d,w}, A_{r,w})] = \min\left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} K(A_{d,w}, A_{r,w}) + P(A_{d,w}, A_{r,w})\right]$$

(3) 决策变量:

光伏发电设备占用屋顶面积: $A_{d,w}$

光热设备用屋顶面积: $A_{r,w}$

8.1.2.2 冷水机组+燃气锅炉为冷热源综合利用系统的数学优化模型

(1) 约束条件:

①系统逐时电量平衡关系:

$$Q_f(h, A_{d,w}) - Q_q(h) - Q_g(h, A_{r,w}) = Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w})$$

式中, $Q_f(h, A_{d,w})$ ——光伏设备逐时发电量, kWh; $Q_q(h)$ ——除供热与供冷设备以外的其他设备逐时用电量, kWh; $Q_g(h, A_{d,w}, A_{r,w})$ ——正值时代表逐时上网电量, 负值时代表逐时消耗城市电网电量, kWh; $Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w})$ ——供热与供冷系统逐时消耗电量, kWh; $A_{d,w}$ ——光伏发电设备占用屋顶面积, m^2 ; $A_{r,w}$ ——光热设备用屋顶面积, m^2 。

第 h 时刻供热与供冷系统逐时消耗电量可表示为:

$$Q_g(h, A_{d,w}, A_{r,w}) = Q_{l,d}(h) + Q_{lqt,d}(h) + Q_{sp}(h)$$

式中: $Q_{lqt,d}(h)$ 为第 h 时刻冷却塔耗电量, kJ ; $Q_{l,d}(h)$ 为第 h 时刻冷水机组供冷工况耗电量, kJ ; $Q_{sp}(h)$ 为第 h 时刻输配系统耗电量, kJ 。

②系统逐时供热量平衡关系:

第 h 时刻集热器直接供热量可表示为:

$$Q_{j,g}(h) = \begin{cases} Q_j(h), & Q_f(h) > Q_j(h) \\ Q_f(h), & Q_f(h) \leq Q_j(h) \end{cases}$$

第 h 时刻水箱余热量的热平衡方程可表示为:

$$Q_y(h) = \begin{cases} Q_y(h-1) + \hat{Q}(h) - Q_{g,q}(h), & Q_y(h-1) \geq Q_{g,q}(h) \\ 0, & Q_y(h-1) < Q_{g,q}(h) \end{cases}$$

第 h 时刻由太阳能集热直接供热后不足的热量可表示为 (不足热需求将由蓄热量与辅助热源供热):

$$Q_{g,q}(h) = \begin{cases} Q_j(h) - Q_f(h), & Q_f(h) - Q_j(h) < 0 \\ 0, & Q_f(h) - Q_j(h) \geq 0 \end{cases}$$

第 h 时刻水箱即时蓄热量可表示为:

$$\hat{Q}(h) = \begin{cases} Q_j(h) - Q_f(h), & Q_j(h) - Q_f(h) > 0 \\ 0, & Q_j(h) - Q_f(h) \leq 0 \end{cases}$$

第 h 时刻辅助热源供热量可表示为:

$$\hat{Q}_{fz}(h) = \begin{cases} Q_{g,q}(h) - Q_y(h-1), & Q_y(h) = 0 \\ 0, & Q_y(h) \neq 0 \end{cases}$$

式中: $Q_j(h)$ 为第 h 时刻集热器集热量, $Q_j(h) = \int_{h-1}^h \frac{3600\eta_h^+ \cdot A_{r,w} / \cos\theta \cdot I(h)}{1000} dh$,

kJ ; θ 为集热器安装倾角, $^\circ$; $I(h)$ 为第 h 时刻倾斜面的太阳辐照强度, W/m^2 ; $Q_f(h)$ 为第 h 时刻供暖与热水所需热量, kJ 。

第 h 时刻辅助热源供热量可表示为:

$$Q_f(h) = Q_{f,g}(h) + Q_{f,r}(h) = 3600 \times 9.5 \cdot Q_{r,q}(h) \cdot \eta(h)$$

式中: $Q_{f,g}(h)$ 为第 h 时刻供暖所需热量, kJ ; $Q_{f,r}(h)$ 为第 h 时刻供热水所需热量, kJ ;

$Q_{r,q}(h)$ 为第 h 时刻天然气锅炉耗气量, Nm^3 ; $\eta(h)$ 为第 h 时刻天然气锅炉的效率, 取 0.9。

③系统逐时供冷量平衡关系:

第 h 时刻供冷量可表示为:

$$Q_l(h) = Q_{l,d}(h) / COP_l(h)$$

式中: $Q_{l,d}(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供冷工况耗电量, kJ ; $COP_l(h)$ 为第 h 时刻空气源热泵供冷工况性能系数, W/W 。

④全年上网电量:

$$Q_{s,w}(A_{d,w}, A_{r,w}) = \sum_{h=0}^{h=8765} \left\{ \begin{array}{l} Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}), Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) > 0 \\ 0, Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) < 0 \end{array} \right\}$$

式中, $Q_{s,w}(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——全年上网电量, kWh 。

⑤全年市网消耗电量:

$$Q_{s,x}(A_{d,w}, A_{r,w}) = \sum_{h=0}^{h=8765} \left\{ \begin{array}{l} |Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w})|, Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) < 0 \\ 0, Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) > 0 \end{array} \right\}$$

式中, $Q_{s,x}(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——全年城市电网消耗电量, kWh 。

⑥全年能耗量 (以电量来算):

$$Q_{n,h}(A_{d,w}, A_{r,w}) = Q_{s,x}(A_{d,w}, A_{r,w}) - Q_{s,w}(A_{d,w}, A_{r,w})$$

式中, $Q_{n,h}(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——全年能耗量 (以电量来算), kWh 。

⑦屋顶面积有限约束:

$$A_{d,w} + A_{r,w} \leq A_w$$

式中, A_w ——屋顶面积, m^2 。

⑧运行费用:

运行费用可用下式表示:

$$\begin{aligned} P(A_{d,w}, A_{r,w}) = & P_w(A_{d,w}, A_{r,w}) + \sum_{h=0}^{h=8765} \left\{ \left[Q_f(h, A_{d,w}) - \begin{cases} Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}), Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) > 0 \\ 0 \end{cases} \right] \times 0.42 + \right. \\ & \left. \begin{cases} Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) \cdot (\text{标杆电价} + 0.42), & Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) > 0 \\ 0, & Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) \leq 0 \end{cases} - \begin{cases} |Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w})| \cdot (\text{市网电价}), & Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) < 0 \\ 0, & Q_s(h, A_{d,w}, A_{r,w}) \geq 0 \end{cases} \right\} \\ & + \text{气价} \cdot \sum_{h=0}^{h=8765} Q_{r,q}(h) \end{aligned}$$

式中, $P(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——年运行费用, 元; $P_w(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——年维护费用 (光伏系统与供暖系统), 元。

⑨年计算费用：

利用动态分析法进行技术经济分析。年计算费用公式如下式：

$$Z(A_{d,w}, A_{r,w}) = \theta_g K(A_{d,w}, A_{r,w}) + P(A_{d,w}, A_{r,w}) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} K(A_{d,w}, A_{r,w}) + P(A_{d,w}, A_{r,w})$$

中， Z 为年计算费用，元/a； K 为初投资，元； i 为利率/收益率，%，本研究取 8%； n 为生产期，这里取集热器的寿命/a，15 年； P 为运行费用； θ_g 为资金回收系数。

（2）目标函数：

①从节能最优角度考虑，目标函数为：

$$\begin{aligned} S &= \min \left[Q_{n,h}(A_{d,w}, A_{r,w}) \cdot 0.315 + 1.2143 \cdot \sum_{h=0}^{h=8765} Q_{r,q}(h) \right] \\ &= \min \left[Q_{s,x}(A_{d,w}, A_{r,w}) - Q_{s,w}(A_{d,w}, A_{r,w}) \right] + 1.2143 \cdot \sum_{h=0}^{h=8765} Q_{r,q}(h) \end{aligned}$$

②从经济最优角度考虑，目标函数为：

$$S = \min [Z(A_{d,w}, A_{r,w})] = \min \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} K(A_{d,w}, A_{r,w}) + P(A_{d,w}, A_{r,w}) \right]$$

（3）决策变量：

光伏发电设备占用屋顶面积： $A_{d,w}$

光热设备用屋顶面积： $A_{r,w}$

8.1.3 求解方法

根据图 8.5 给出的求解流程，利用 MATLAB 软件编制求解程序进行求解。

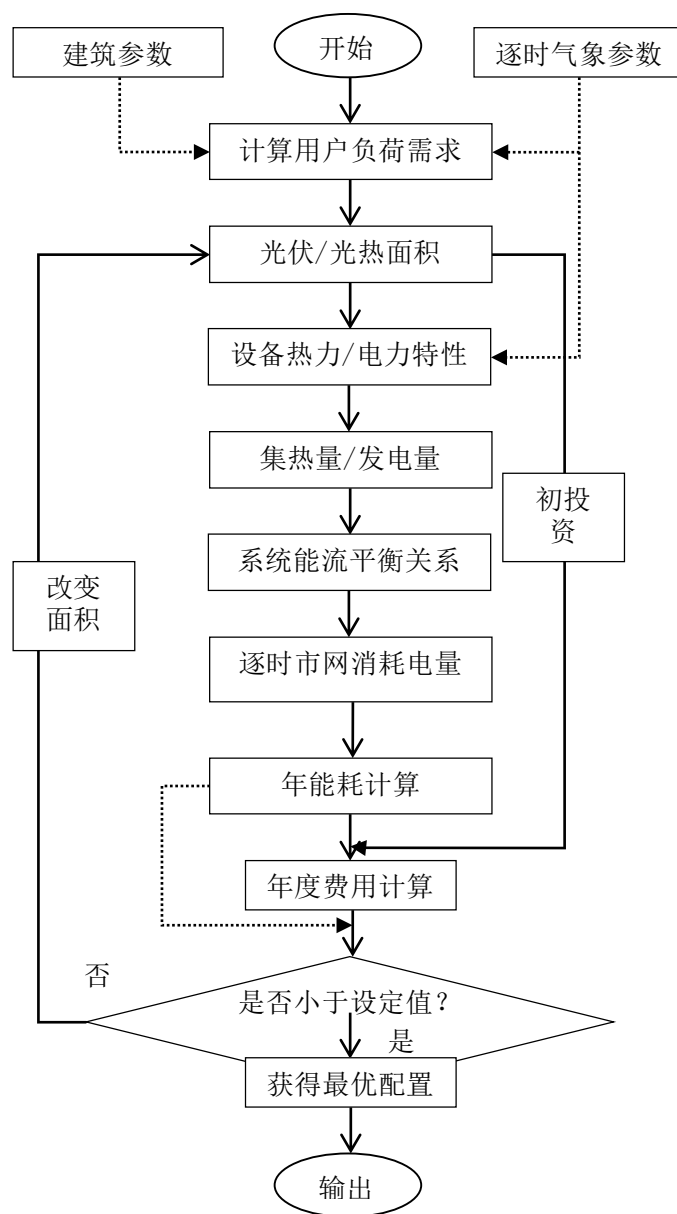


图 8.5 太阳能综合利用系统数学求解流程

8.2 综合利用优化结果与分析

由于采用节能性与采用经济性双目标优化的结果可能会不同，为此，本研究采用了节能性与经济性的归一化方法。

8.2.1 节能性与经济性的归一化表述

为了使得节能性与经济性统一，需将二者转换为量纲单位一致的物理量，如图 8.6 所示。

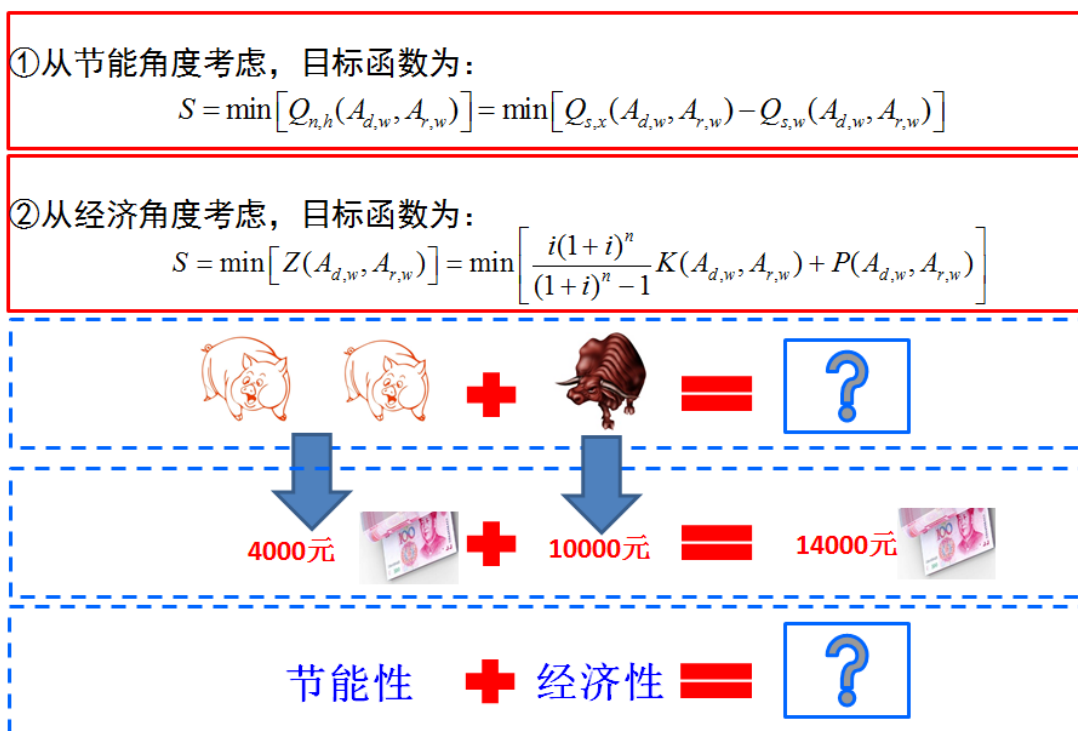


图 8.6 节能性与经济性归一化表述思路

节能性与经济性的归一化表述的总体思路：将项目相比于传统系统的节能量，折合标准煤后，根据排放因子转换为减少碳的排放量，利用碳交易市场价格，将其转换为节约的运行费用，加入年计算费用目标函数，则可获得新的综合经济性优化目标函数：

$$S = \min [Z(A_{d,w}, A_{r,w})] = \min \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} K(A_{d,w}, A_{r,w}) + P(A_{d,w}, A_{r,w}) + P_t(A_{d,w}, A_{r,w}) \right]$$

式中， $P_t(A_{d,w}, A_{r,w})$ ——节能量所获得的碳交易费用，kWh。

碳排放系数如表 8.1 所示。

表 8.1 排放系数

污染物类型	CO ₂	C
排放系数 t/tce	2.7725	0.68

碳交易价格如图 8.7 所示。本研究采用平均值（30 元/吨）作为项目分析的依据。

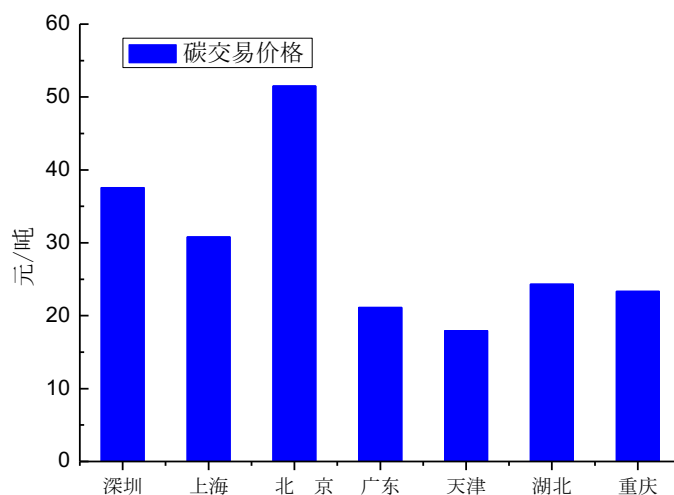


图 8.7 不同地区碳交易价格

利用上述方法，本研究给出了西宁酒店建筑光热/光电面积对年计算费用与综合费用的影响，结果如图 8.8 所示。从图 8.8 中可以看出，由于建筑年能耗量较低（年能耗量通常低于 1000tce），以及碳交易价格不高（30 元/吨），导致节能量转换为经济性后，对项目最优分析产生的影响很小（节能性产生的经济效益通常低于 3 万元/年），即以考虑了节能性的综合费用为目标与年计算费用为目标并不影响项目最优配比。为此，本研究最终仍然以年计算费用最低作为主要的优化目标函数。

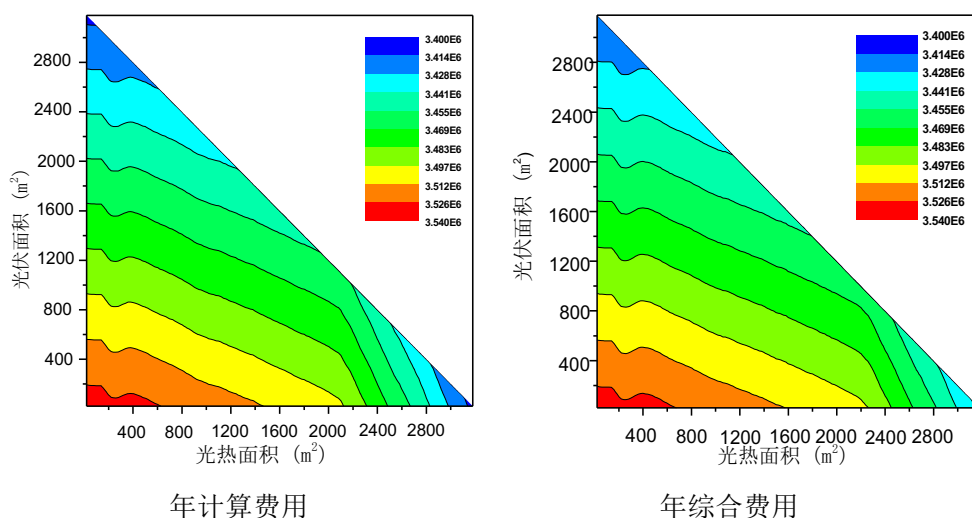


图 8.8 西宁酒店建筑光热/光电面积对年计算费用与综合费用的影响（空气源热泵）

8.2.2 基于节能性评价的综合利用优化结果

利用 8.1 节给出的数学优化方法以及前述研究给出的基础数据，对以空气源热泵为冷热源的太阳能综合利用系统进行了模拟优化计算。

8.2.2.1 空气源热泵为冷热源综合利用系统优化结果（节能性）

图 8.9–8.11 分别给出了基于节能性的典型建筑太阳能综合利用系统优化结果。从图中可以看出，地处严寒地区的西宁与地处寒冷地区的银川优化结果较为一致：两地的

办公建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w}/A_{r,w}$ ）约为 2:1 的区域；两地的酒店建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋顶全部采用光热设备的区域；两地的商业建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w}/A_{r,w}$ ）约为 4:1 的区域。

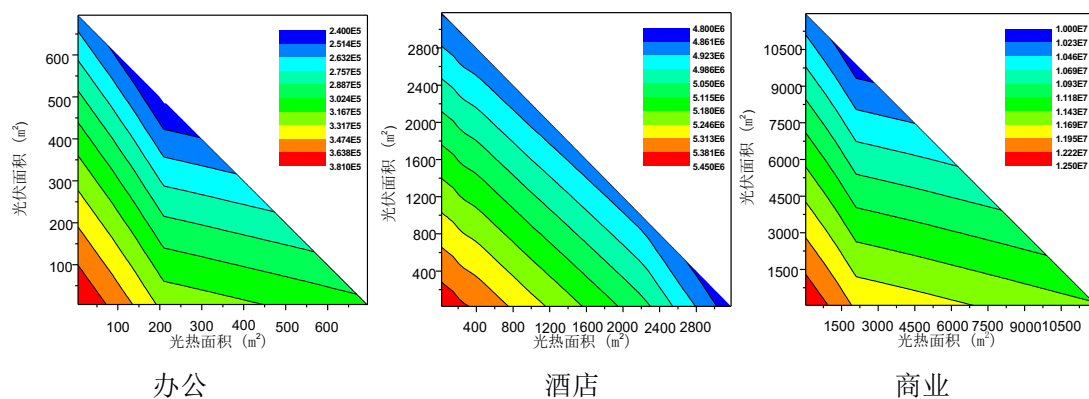


图 8.9 西宁典型建筑光热/光电面积对年耗电量的影响（空气源热泵）

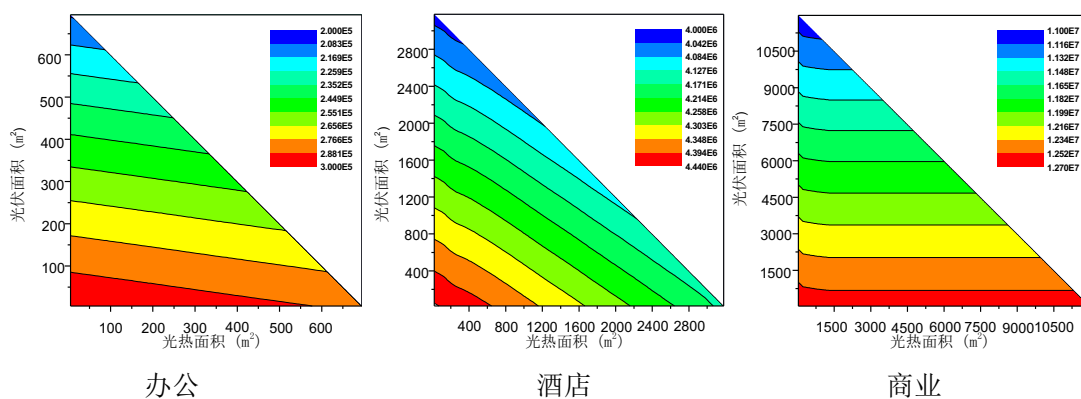


图 8.10 西昌典型建筑光热/光电面积对年耗电量的影响（空气源热泵）

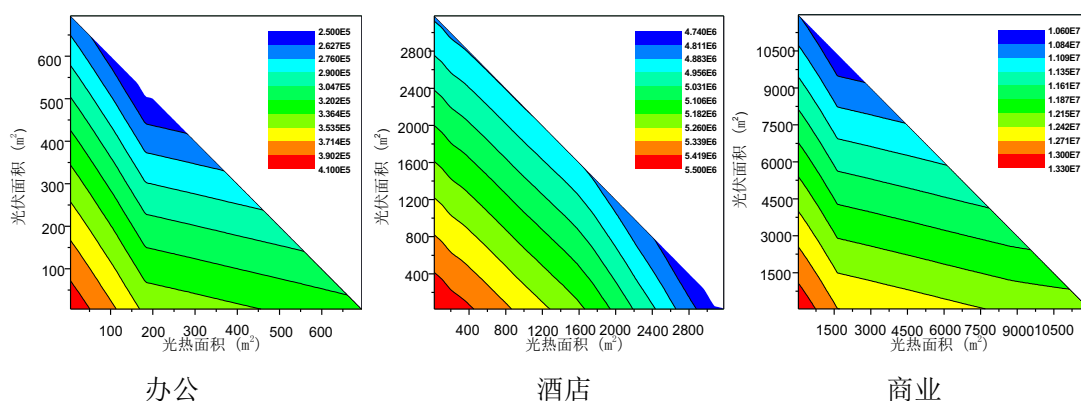


图 8.11 银川典型建筑光热/光电面积对年耗电量的影响（空气源热泵）

但是，地处温和地区的西昌优化结果较为与上述两个地区存在明显不同，西昌三类典型建筑最佳的太阳能综合利用系统均为全部采用光伏太阳能设备的区域。

造成上述现象的主要原因是：西昌地区为温和地区，太阳能热需求相比另外两个地区小的多，容易导致太阳能光热集热量未能得到充分利用，降低了太阳能光热系统的利用效率，虽然太阳能光热集热效率高于太阳能光伏发电效率，但考虑了光伏发电驱动空气源热泵产热的能量倍增作用后，光热设备节能性低于光伏设备。

对比西宁和银川不同类型建筑可以发现，由于酒店建筑具有大量的热水负荷需求，建筑层数较多（15 层），导致太阳能光热设备集热量可充分利用，同时由于该地区气温低，空气源热泵制热性能系数较低，造成这两个地区最佳的太阳能综合利用系统为屋面铺满光热设备。

8.2.2.2 天然气锅炉+冷水机组为冷热源综合利用系统优化结果（节能性）

图 8.12-8.14 分别给出了基于节能性的典型建筑太阳能综合利用系统优化结果。从图中可以看出，地处严寒地区的西宁与地处寒冷地区的银川优化结果较为一致：两地的办公建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w}/A_{r,w}$ ）约为 2.5:1 的区域；两地的酒店建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋顶全部采用光热设备的区域；两地的商业建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w}/A_{r,w}$ ）约为 5:1 的区域。

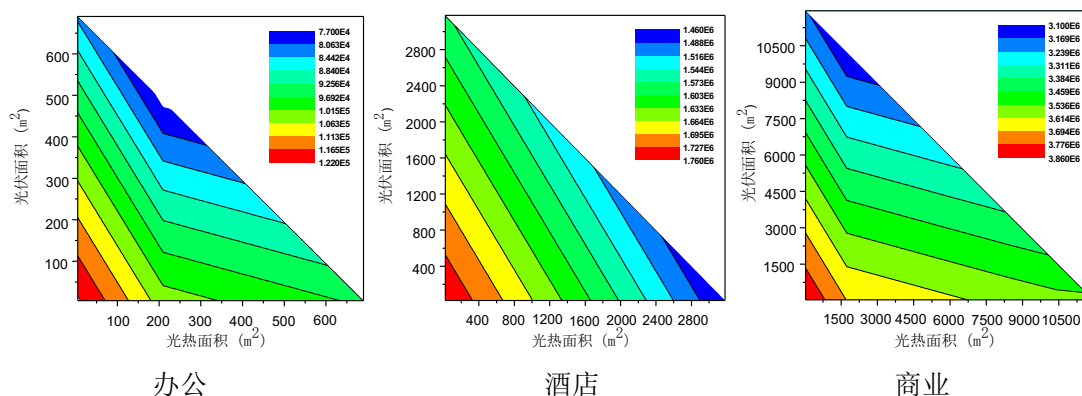


图 8.12 西宁典型建筑光热/光电面积对年耗电量的影响（天然气锅炉+冷水机组）

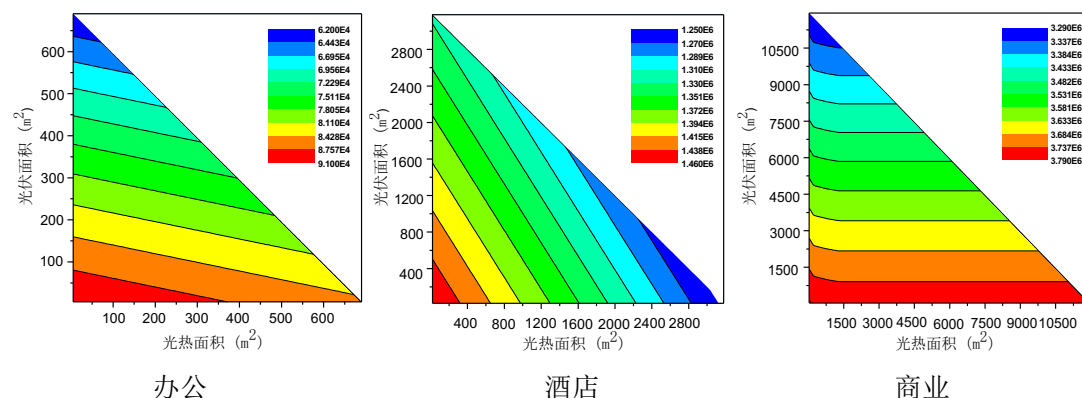


图 8.13 西昌典型建筑光热/光电面积对年耗电量的影响（天然气锅炉+冷水机组）

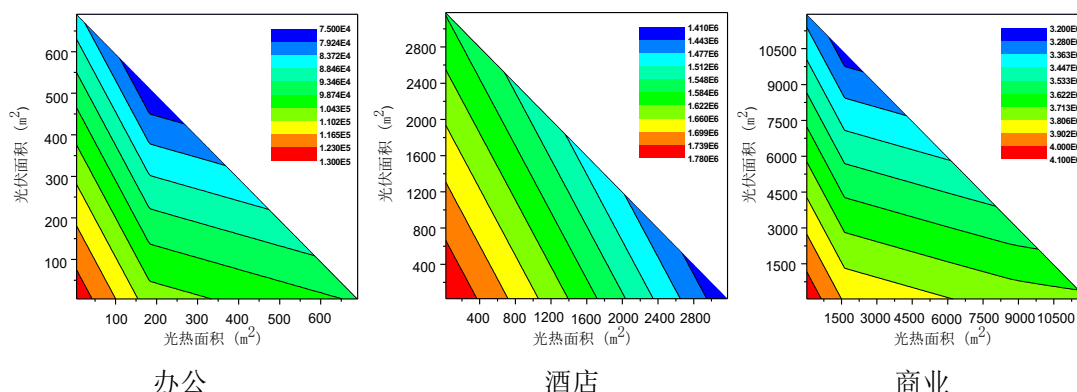


图 8.14 银川典型建筑光热/光电面积对年耗电量的影响（天然气锅炉+冷水机组）

但是，地处温和地区的西昌优化结果较为与上述两个地区存在明显不同，西昌没有热水负荷的办公与商业建筑最佳的太阳能综合利用系统均为全部采用光伏太阳能设备的区域；而拥有大量热水负荷的酒店建筑最佳的太阳能综合利用系统为全部采用光热太阳能设备的区域。

由于采用天然气锅炉的节能性低于空气源热泵，导致太阳能光热系统的优势有所上升，所以本小节的优化结果中可以看出，最优系统太阳能热利用设备的使用量有所上升，尤其是西昌地区的酒店建筑。

8.2.3 基于经济性评价的综合利用优化结果

8.2.3.1 空气源热泵为冷热源综合利用系统优化结果（经济性）

图 8.15–8.17 分别给出了基于经济性的典型建筑太阳能综合利用系统优化结果。从图中可以看出，地处严寒地区的西宁与地处寒冷地区的银川优化结果趋势较为一致，但由于两地能源价格存在明显的差异（电力价格、标杆电价），导致两地具体结论数据差别明显。西宁与银川办公建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w} / A_{r,w}$ ）分别约为 2:1、2.5:1 的区域；两地的酒店建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋顶全部采用光伏设备的区域；两地的商业建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w} / A_{r,w}$ ）约为 4:1 的区域。

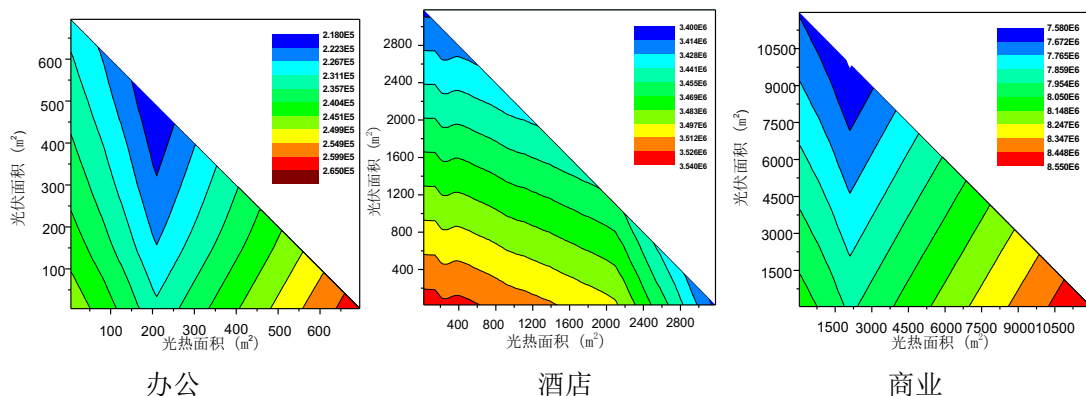


图 8.15 西宁典型建筑光热/光电面积对年计算费用的影响（空气源热泵）

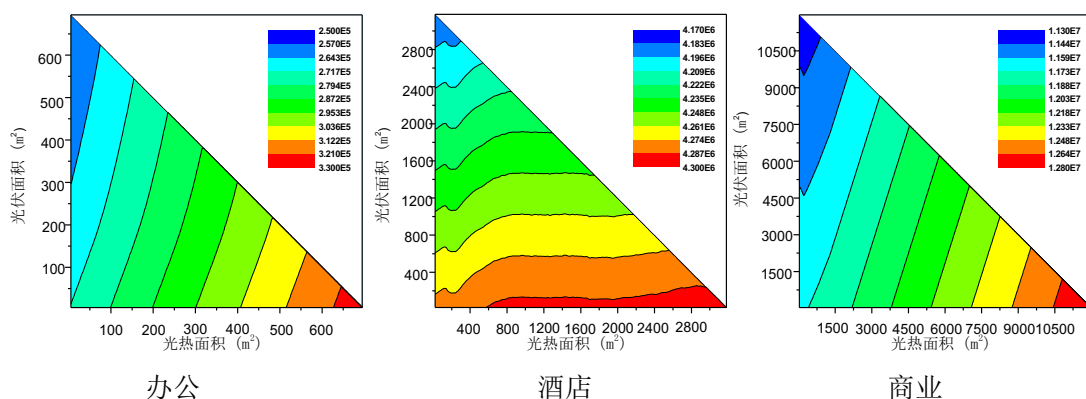


图 8.16 西昌典型建筑光热/光电面积对年计算费用的影响（空气源热泵）

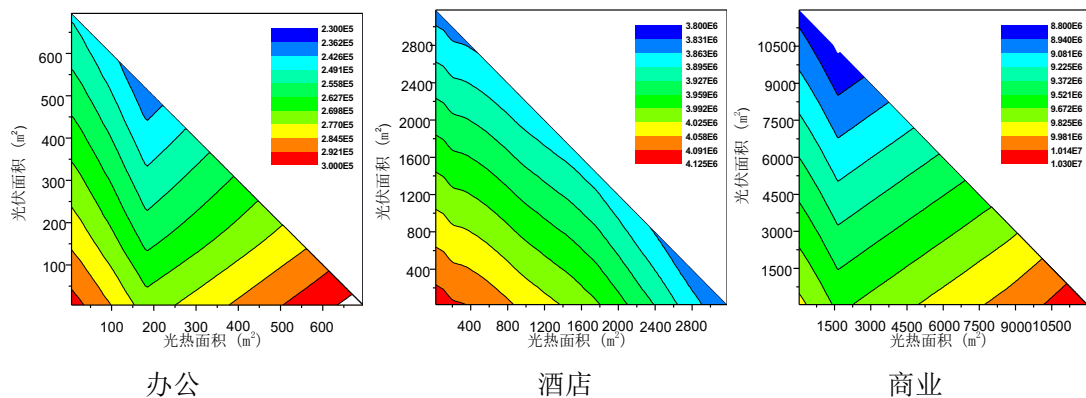


图 8.17 银川典型建筑光热/光电面积对年计算费用的影响（空气源热泵）

但是，地处温和地区的西昌优化结果较为与上述两个地区存在明显不同，西昌三类典型建筑最佳的太阳能综合利用系统均为全部采用光伏太阳能设备的区域。

8.2.3.2 天然气锅炉+冷水机组为冷热源综合利用系统优化结果（经济性）

图 8.18-8.20 分别给出了基于经济性的典型建筑太阳能综合利用系统优化结果。从图中可以看出，地处严寒地区的西宁与地处寒冷地区的银川优化结果趋势较为一致，但由于两地能源价格存在明显的差异（电力价格、标杆电价），导致两地具体结论数据差

别明显。西宁与银川办公建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w}/A_{r,w}$ ）分别约为 2:1、2.5:1 的区域；两地的酒店建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋顶全部采用光伏设备的区域；两地的商业建筑最佳的太阳能综合利用系统为屋面近乎布满太阳能设备，且光伏/光热面积比（ $A_{d,w}/A_{r,w}$ ）约为 4:1 的区域。

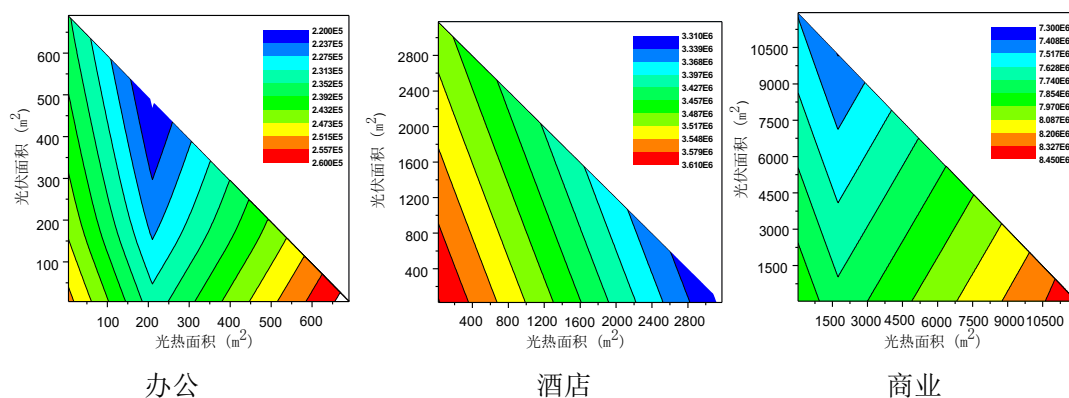


图 8.18 西宁典型建筑光热/光电面积对年计算费用的影响（天然气锅炉+冷水机组）

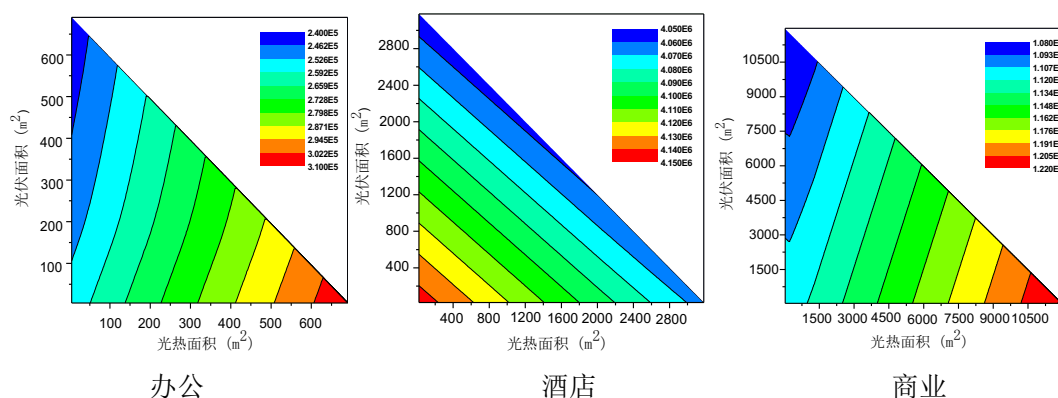


图 8.19 西昌典型建筑光热/光电面积对年计算费用的影响（天然气锅炉+冷水机组）

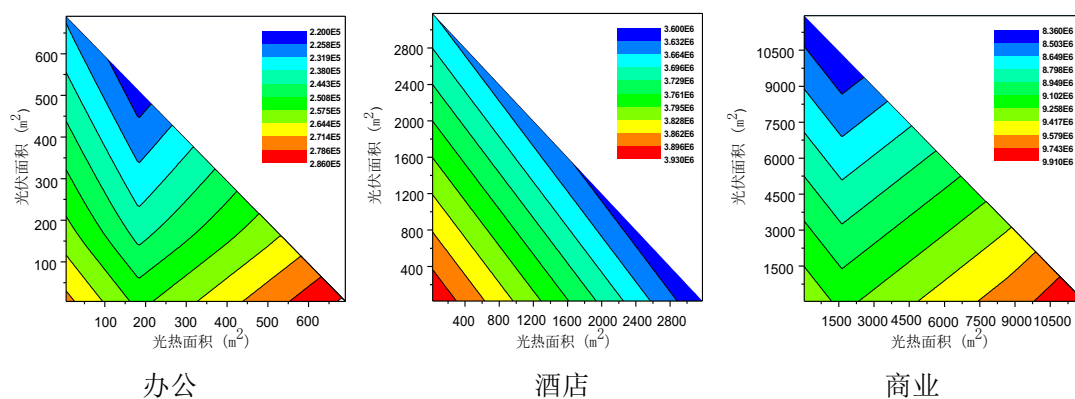


图 8.20 银川典型建筑光热/光电面积对年计算费用的影响（天然气锅炉+冷水机组）

但是，地处温和地区的西昌优化结果较为与上述两个地区存在明显不同，西昌三类典型建筑最佳的太阳能综合利用系统均为全部采用光伏太阳能设备的区域。

8.3 综合利用系统优化结果影响因素分析

为了了解不同因素对太阳能综合利用系统优化结果的影响，本研究分析了财政补贴、税收、楼层数量对综合利用系统性能的影响。

8.3.1 财政补贴对系统年计算费用的影响

图 8.21 给出了财政补贴对西宁办公建筑太阳能系统经济性的影响，从图中可以看出，当光伏发电的财政补贴取消后，年计算费用上升了约 20%，表明对于以光伏利用为主的太阳能综合利用系统，财政补贴对系统经济性具有重要影响。

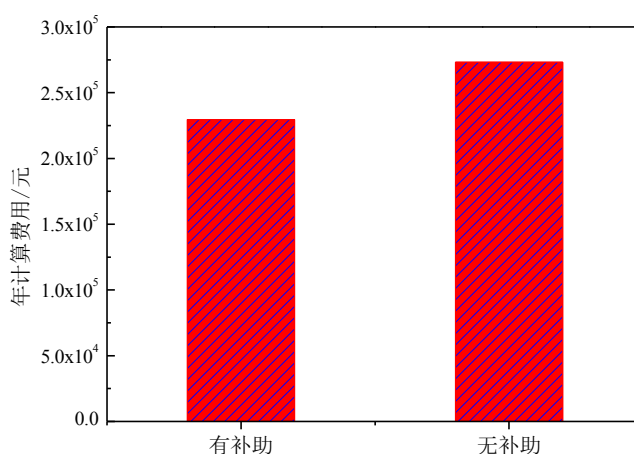


图 8.21 补贴对太阳能系统经济性的影响（西宁办公建筑、空气源热泵）

8.3.2 税收对光伏系统年计算费用的影响

图 8.22 给出了税收对西宁办公建筑太阳能系统经济性的影响，从图中可以看出，当光伏发电取消交税后，年计算费用下降了约 5%，表明对于以光伏利用为主的太阳能综合利用系统，财政补贴对系统经济性有一定影响，但其影响程度远小于财政补贴。

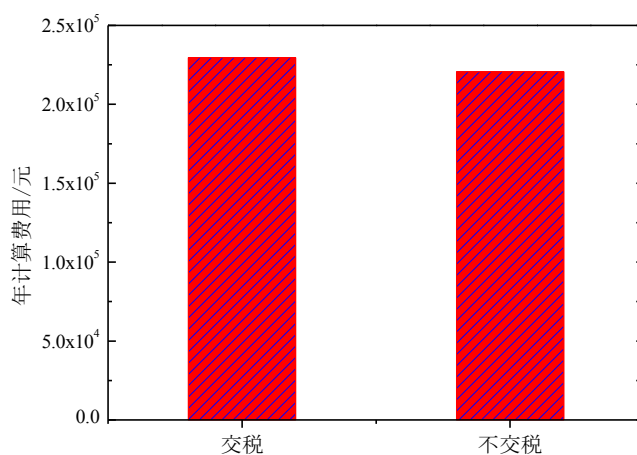


图 8.22 税收对太阳能系统经济性的影响（西宁办公建筑、空气源热泵）

8.3.3 楼层数量对最优系统光伏/光热面积比的影响

图 8.23 给出了楼层变化对西宁酒店建筑太阳能系统经济性的影响，从图中可以看出，当楼层层数增多到 15 层后，太阳能综合利用系统最优结果由屋面全部安装光热系统变为全部安装光伏系统。这是因为，随着楼层的增加，光伏系统发电中的自用比例不断上升，而光伏发电自用产生的经济效益高于上网发电（自用电价为 0.42+售电价格，上网电价为标杆电价 0.3247+0.42），导致其经济效益增强。

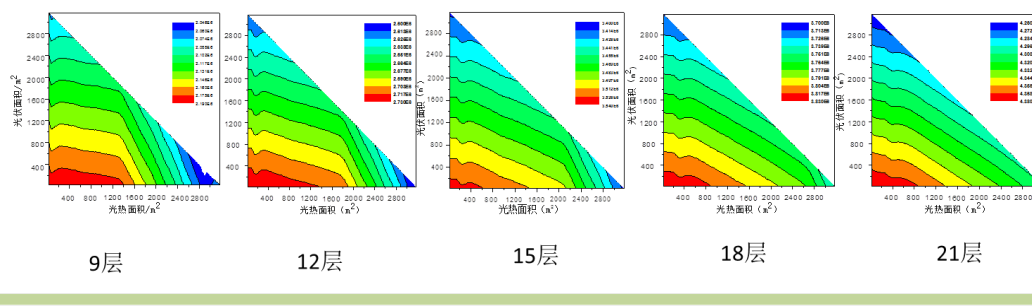


图 8.23 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（西宁酒店建筑、空气源热泵）

图 8.24 给出了楼层变化对西宁办公建筑太阳能系统经济性的影响，从图中可以看出，当楼层层数增多后，太阳能综合利用系统最优结果逐渐向屋面安装太阳能集热器的方向移动，光伏/光热面积比 ($A_{d,w} / A_{r,w}$) 从 5:1 过渡到 1:2。

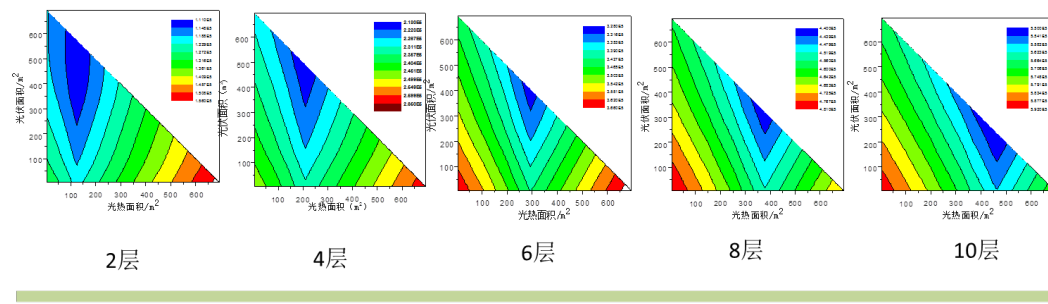


图 8.24 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（西宁办公建筑、空气源热泵）

图 8.25 给出了楼层变化对西宁商业建筑太阳能系统经济性的影响，从图中可以看出，当楼层层数增多后，太阳能综合利用系统最优结果逐渐向屋面安装太阳能集热器的方向移动，光伏/光热面积比（ $A_{d,w}/A_{r,w}$ ）从 7:1 过渡到 3:1。

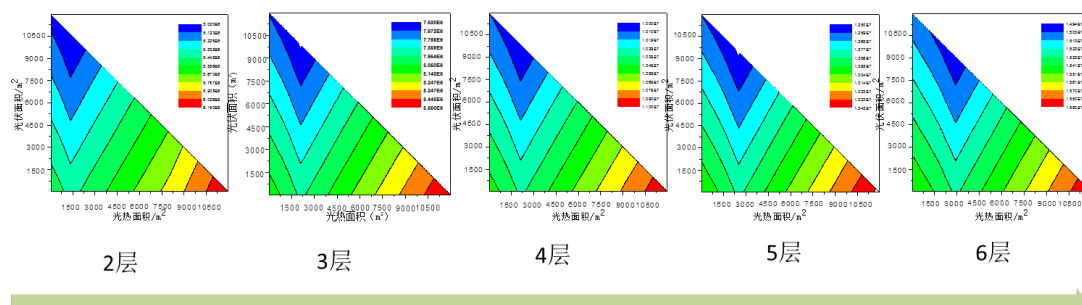


图 8.25 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（西宁商场建筑、空气源热泵）

图 8.26–8.31 给出了其余地区不同建筑楼层变化对系统最优配置结果的影响，具体结果不再一一阐述。

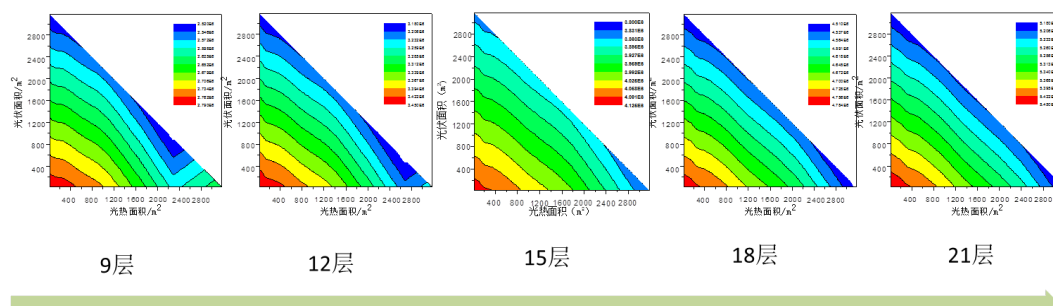


图 8.26 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（银川酒店建筑、空气源热泵）

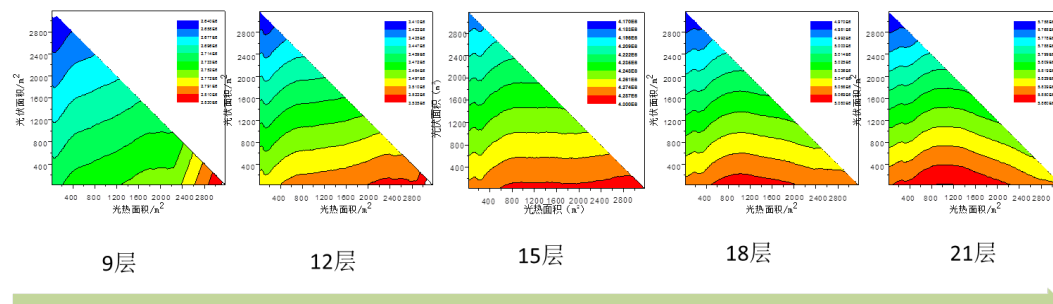


图 8.27 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（西昌酒店建筑、空气源热泵）

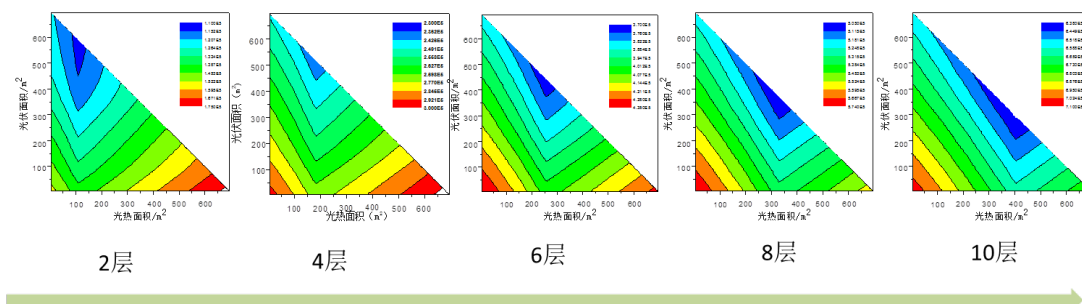


图 8.28 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（银川办公建筑、空气源热泵）

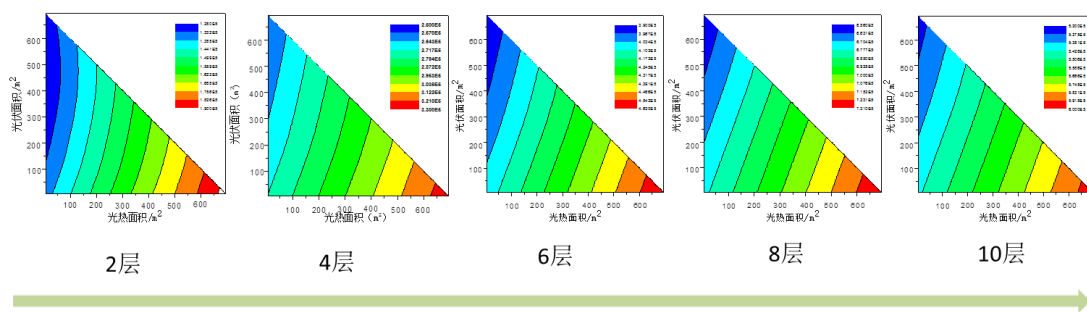


图 8.29 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（西昌办公建筑、空气源热泵）

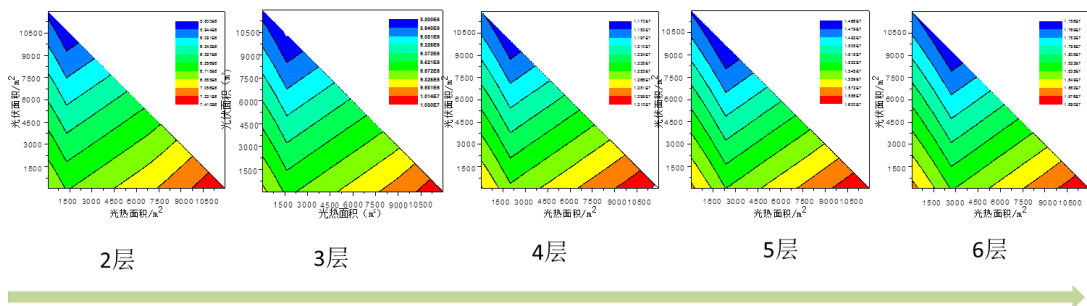


图 8.30 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（银川商场建筑、空气源热泵）

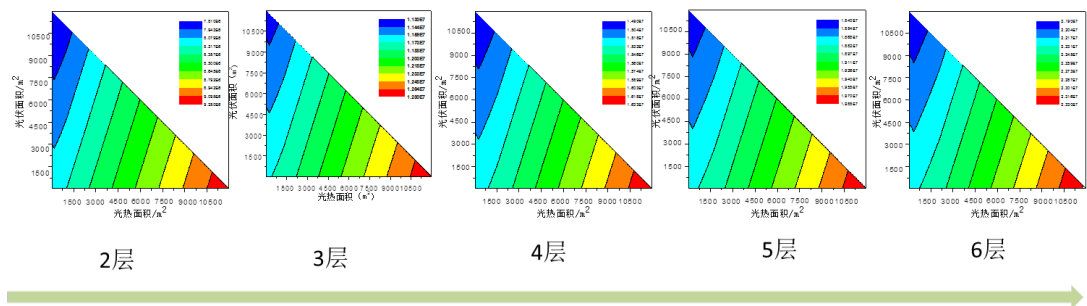


图 8.31 楼层变化对太阳能系统经济性的影响（西昌商场建筑、空气源热泵）

对上述结果进行综合分析后可知：

①地处温和地区的西昌，由于建筑热负荷较小，光热系统不能充分发挥其效能，同时气温较适宜热泵机组高效运行，导致典型建筑（办公、商业、酒店）的最佳太阳能利用方式均为屋面铺满光伏系统；

②地处严寒与寒冷地区的西宁和银川，对于没有热水负荷的商业建筑与办公建筑，均存在一定的光伏/光热面积比，使得太阳能利用方式最佳，而且最佳比值随着楼层数的增加而减小；对于酒店建筑，光伏和光热设备造成的系统经济性差距缩小（非供暖季节存在热水负荷，延长了集热系统利用时间），随着建筑特征的变化，最佳的太阳能利用方式可能是屋面全部铺满光伏设备，也可能是屋面全部铺满光热设备，需根据具体项目单独进行计算确定。

8.4 典型系统整体性能特征分析

图 8.24 给出了西宁办公建筑最优化系统的全年性能评估结果。从图中可以看出，

上网电量占光伏系统发电量的比例约在 5.9%–14.8%之间变化,其中在供暖季节该比值较小,非供暖季节该比值较大,全年上网电量占光伏系统发电量的比例的平均值为 10.0%。这一方面是因为供暖季节光伏发电能力低于非供暖季节,另一方面供暖季节由于存在供暖系统用电量,整个建筑的用电需求也高于非供暖季节。

整个建筑全年耗电量指标为 67.77kWh/m²,其中消耗市电网的耗电量指标为 53.13kWh/m²,太阳能光伏自用电量指标为 14.64kWh/m²,若扣除太阳能光伏系统输送至市网的电量反馈,则整个建筑实际消耗电力指标为 66.0kWh/m²。光伏系统发电自用部分占建筑总用电量的比例在 9.9–30.6%之间,其中非供暖季节光伏系统发电自用部分占建筑用电量的比例高于供暖季节,建筑全年耗电量的 21.6%由光伏发电系统供给。这表明若与采用常规电力和空气源热泵形式的建筑相比,该主动式太阳能建筑全年实际消耗电力减少了约 22%。

光伏发电全年上网电量与建筑全年消耗市网电量的比值约为 3.1%,若以全年为一个周期进行评价,扣除上网电量后,实际市网耗电量为建筑全年合计耗电量的 76%,即若考虑主动式太阳能建筑对市网的贡献,则该主动式建筑全年节能率约为 24%。

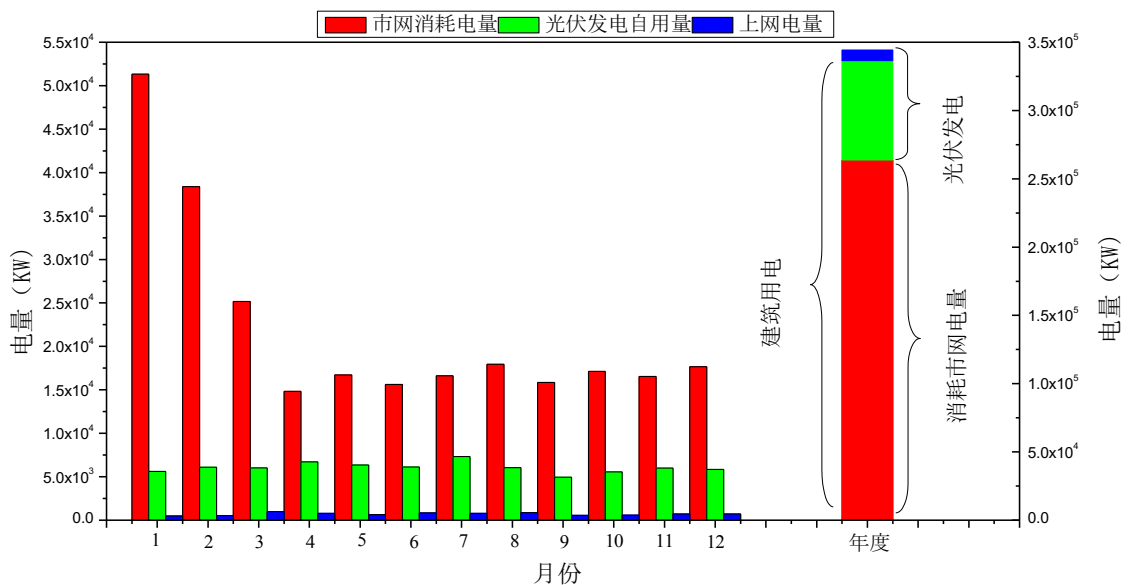


图 8.32 西宁办公建筑最优化系统的全年性能评估（空气源热泵）

8.5 本章小结

本章以前述研究为依据,对光热和光伏系统结合的典型建筑进行综合优化研究,得到在有限的屋顶面积资源的情况下,两者所占用的屋顶面积的最佳比例,并分析相关因素对综合利用系统性能的影响,优化结果如表 8.所示:

表 8.2 优化结果

地点	办公建筑	酒店建筑	商业建筑
西宁	光伏/光热面积比（2-3）:1	全部光伏（空气源热泵） 全部光热（锅炉+冷水机）	光伏/光热面积比（4-5）:1
西昌	全部采用光伏	全部采用光伏	全部采用光伏
银川	光伏/光热面积比（2-3）:1	全部光伏（空气源热泵） 全部光热（锅炉+冷水机）	光伏/光热面积比（4-5）:1

通过分析优化结果后可以得出如下结论：①太阳能热需求小，容易导致太阳能光热集热量未能得到充分利用，降低了太阳能光热系统的利用效率，虽然太阳能光热集热效率高于太阳能光伏发电效率，但考虑了光伏发电驱动空气源热泵产热的能量倍增作用后，光热设备节能性低于光伏设备；②能源价格、财政补贴、税收等经济性因素对太阳能综合利用系统的经济性具有重要影响；③地处温和地区的西昌，由于建筑热负荷较小，光热系统不能充分发挥其效能，同时气温较适宜热泵机组性能提高，导致典型建筑（办公、商业、酒店）的最佳太阳能利用方式均为屋面铺满光伏系统；地处严寒与寒冷地区的西宁和银川，对于没有热水负荷的商业建筑与办公建筑，均存在一定的光伏/光热面积比，使得太阳能利用方式最佳，而且最佳比值随着楼层数的增加而减小；而对于严寒与寒冷地区的酒店建筑，光伏和光热设备造成的系统经济性差距缩小，随着建筑特征的变化，最佳的太阳能利用方式可能是屋面全部铺满光伏设备，也可能是屋面全部铺满光热设备，需根据具体项目单独进行计算确定；④太阳能综合利用系统实现了多能互补，可明显提高项目的节能性。

9 结论与建议

9.1 结论

本研究分别针对太阳能供暖与太阳能发电的基础问题与应用问题开展了研究。同时，在太阳能资源较丰富地区（Ⅱ区）选择了三个代表性城市作为研究对象（西宁—严寒地区、银川—寒冷地区、西昌—温和地区），分别对三地的三类典型公共建筑：办公建筑、酒店建筑以及商业建筑的太阳能综合利用进行了研究。**研究结果表明：**

1、所提出的基于有效集热量的集热器最佳安装方位角和倾角优化方法、基于逐时辐照量的光伏电池最佳安装倾角优化方法、以辅助热源全年能耗最低为优化目标函数获得太阳能热水供暖系统最优蓄热容积的确定方法以及多级准弹性蓄能系统及其优化控制方法，在太阳能供热工程应用中具有有效性，可提升太阳能供热系统能效（比如双级蓄热系统相比经优化的单级刚性蓄热系统能耗降低了约 5%）；

2、光伏驱动压缩式制冷系统节能优势非常明显，应作为太阳能综合利用系统优先采用的太阳能制冷方式；

3、将综合利用系统相比于传统系统的节能量，折合标准煤后，根据排放因子转换为减少碳的排放量，利用碳交易市场价格，将其转换为节约的运行费用，加入年计算费用目标函数，则可获得综合经济性优化目标函数，实现节能性与经济性的归一化表述；

4、太阳能热需求小，容易导致太阳能光热集热量未能得到充分利用，降低了太阳能光热系统的利用效率，虽然太阳能光热集热效率高于太阳能光伏发电效率，但考虑了光伏发电驱动空气源热泵产热的能量倍增作用后，光热设备节能性低于光伏设备；

5、建筑气候、建筑楼层数、建筑功能等通过影响建筑负荷与太阳能设备安装容量等对太阳能综合利用系统的优化匹配产生重要影响：

（1）地处温和地区的西昌，由于建筑热负荷较小，光热系统不能充分发挥其效能，同时气温较适宜热泵机组高效运行，导致典型建筑（办公、商业、酒店）的最佳太阳能利用方式均为屋面铺满光伏系统；

（2）地处严寒与寒冷地区的西宁和银川，对于没有热水负荷的商业建筑与办公建筑，均存在一定的光伏/光热面积比，使得太阳能利用方式最佳，而且最佳比值随着楼层数的增加而减小；

而对于酒店建筑，光伏和光热设备造成的系统经济性差距缩小（非供暖季节存在热水负荷，延长了集热系统利用时间），随着建筑特征的变化，最佳的太阳能利用方式可能是屋面全部铺满光伏设备，也可能是屋面全部铺满光热设备，需根据具体项目单独进

行计算确定；

6、能源价格、财政补贴、税收等经济性因素对太阳能综合利用系统的经济性具有重要影响（当光伏发电的财政补贴取消后，年计算费用上升了约 20%）。

9.2 建 议

太阳能综合利用系统实现了多能互补，可明显提高项目的节能性（以西宁办公建筑为例，该主动式建筑可实现全年节能率约为 24%），应在实际工程项目中推广应用。