

可再生能源 建筑一体化利用关键技术研究



华东建筑集团股份有限公司 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

可再生能源建筑一体化 利用关键技术研究

华东建筑集团股份有限公司 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书的主要内容来源于华东建筑设计研究院有限公司承担的国家“十二五”科技支撑计划课题“可再生能源利用建筑一体化设计研究与示范”(2013—2016)的研究成果。全书介绍了中国能源消耗以及可再生能源利用的现状、太阳能光伏建筑一体化集成设计研究、太阳能热水系统建筑一体化设计研究、基于计算机技术的辅助设计工具开发研究以及可再生能源利用建筑一体化设计指南等。

本书可供从事建筑工程设计、可再生能源系统生产安装企业以及绿色建筑咨询等人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

可再生能源建筑一体化利用关键技术研究/华东建筑集团股份有限公司编著. —上海:同济大学出版社,2017.12

ISBN 978-7-5608-7575-0

I. ①可… II. ①华… III. ①再生能源—应用—生态建筑—建筑设计—研究 IV. ①TU201.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 321771 号

可再生能源建筑一体化利用关键技术研究

华东建筑集团股份有限公司 编著

责任编辑 张平官 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、建筑书店

印 刷 常熟市大宏印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 12.75

字 数 318000

版 次 2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7575-0

定 价 40.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

编委会

主 编:	夏 麟	田 炜
编 委:	范昕杰	刘 剑
	闫 芳	叶少帆
	马光柏	封安华
	李海峰	

前 言

本书的主要内容来源于华东建筑设计研究院有限公司承担的国家“十二五”科技支撑计划课题“可再生能源利用建筑一体化设计研究与示范”(2013—2016)的主要研究成果。该课题基于“十一五”期间可再生能源建筑利用的实践经验、设计图集标准和研究成果,研究太阳能光伏、光热系统建筑一体化设计关键技术,研究多种可再生能源应用于不同类型建筑的组合设计关键技术,并进行工程示范。课题主要承担单位包括华东建筑设计研究院有限公司、山东力诺瑞特新能源有限公司、上海临港松江科技城投资发展有限公司、上海通正铝业工程技术有限公司。

本书共分为5个章节。第1章主要阐述了中国能源消耗以及可再生能源利用的现状。第2章论述了太阳能光伏建筑一体化空间布置技术参数推荐值的主要研究过程和研究结论,包括布置间距推荐值(表)、不同间距平屋面光伏组件的横向遮挡率速查表、平屋面光伏组件方位角度变化范围推荐值(表)、弧形屋面倾角的法线角度推荐值(表)以及光伏一体化时通风腔高度及布置间距推荐值(表)。第3章论述了太阳能热水系统关键设备选型技术参数值(表)、改进技术措施的主要研究过程和研究结论以及新型一体化的太阳能热水集热产品的研发内容。第4章介绍了两种基于一体化设计的研发软件,基于SketchUp软件环境下二次开发的太阳能光伏、光热建筑一体化设计软件平台和在计算机辅助设计软件环境下二次开发的“基于计算模拟分析的多种可再生能源集成设计平台”。第5章基于“十二五”科技支撑计划课题“可再生能源利用建筑一体化设计研究与示范”研究成果,提出适用于可再生能源建筑一体化应用的设计指南。

本书旨在推动可再生能源建筑利用的健康发展,共享本研究所形成的科研成果,与同行专家们共勉,希望本书的出版能为从事工程建筑的相关人员提供帮助和指导。

限于时间和水平,有不妥之处,敬请读者批评指正。

“可再生能源利用建筑一体化设计研究与示范”课题组

2017年3月

目 录

前言

第 1 章 可再生能源利用概述	1
1.1 中国能耗知多少	1
1.2 可再生能源利用	2
第 2 章 太阳能光伏建筑一体化集成设计研究	4
2.1 平屋面间距布局优化研究	4
2.2 平屋面横向遮挡布局影响研究	9
2.3 方位角对遮挡影响分析研究	15
2.4 弧形屋面的布置优化研究	20
2.5 光伏板背板通风腔的高度优化研究	27
第 3 章 太阳能热水系统建筑一体化设计研究	41
3.1 超薄多彩集热器的设计和一体化研究	41
3.2 新型阳台栏板式聚光集热器的建筑一体化应用研究	48
3.3 水箱容积的确定方法研究	54
3.4 过热控制方法研究	65
3.5 过多冷水放出的处理技术研究	72
3.6 保持水箱温度波动较少的补水方法研究	77
3.7 集中式系统形式的计量收费方法研究	84
3.8 集中式系统适用全年多种工况的设计方法研究	87
第 4 章 基于计算机技术的辅助设计工具开发研究	94
4.1 基于三维模型环境下的光伏光热一体化设计软件平台的开发	94
4.2 基于计算模拟分析的多种可再生能源集成设计软件平台开发	112

第 5 章 可再生能源利用建筑一体化设计指南	150
5.1 概述	150
5.2 可再生能源利用建筑一体化设计流程	150
5.3 应用案例	177
参考文献	195

第 1 章 可再生能源利用概述

1.1 中国能耗知多少

国家“十三五”能源规划已提出了能源消耗总量控制在 45 亿吨标准煤左右。在能源消耗总量控制和环境影响改善的双重刺激下,去产能等产业结构调整、推动绿色建筑和新能源利用的战略正在实施中。

2014 年中国能源消费总量已达 42.6 亿吨标准煤,是世界第一大能源消费国。根据 BP 的统计数据^[1],中国 2013 年的能源消费总量已约占全球的 22.4%,超过排名第二的美国 4.6 个百分点,是排名第五的日本的 6 倍多。

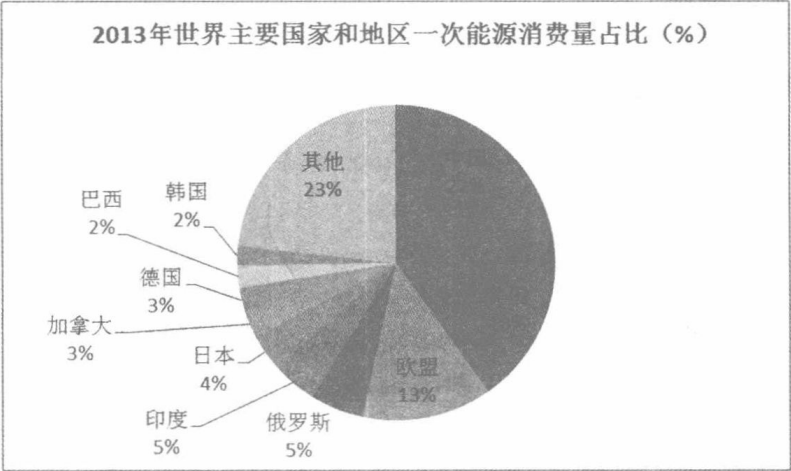


图 1-1 2013 年世界主要国家和地区一次能源消费量占比 (%)

2014 年的能源消费总量相对于 1996 年增长了 215%,相对于 2005 年增长了 81%。

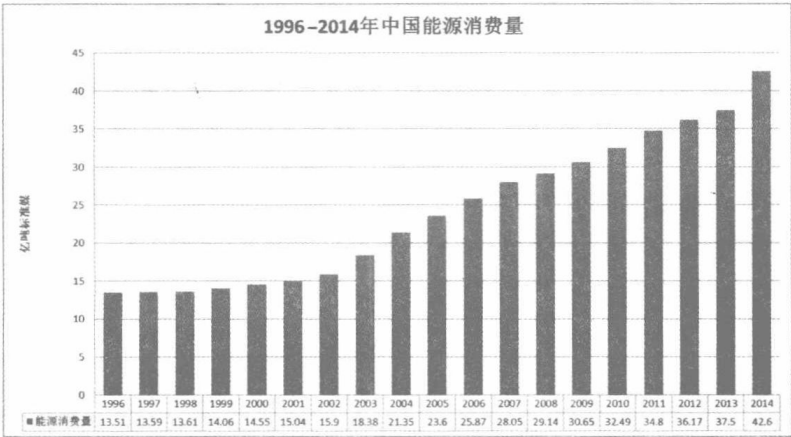


图 1-2 1996—2014 年中国能源消费量 (亿吨标准煤)

2014 年中国煤炭消费量为 41.2 亿吨,根据 BP 的统计数据^[1],2013 年中国的煤炭消费量占到世界煤炭消费总量的 50.3%,是第二名美国的 4.2 倍,是第三名印度的 5.9 倍。

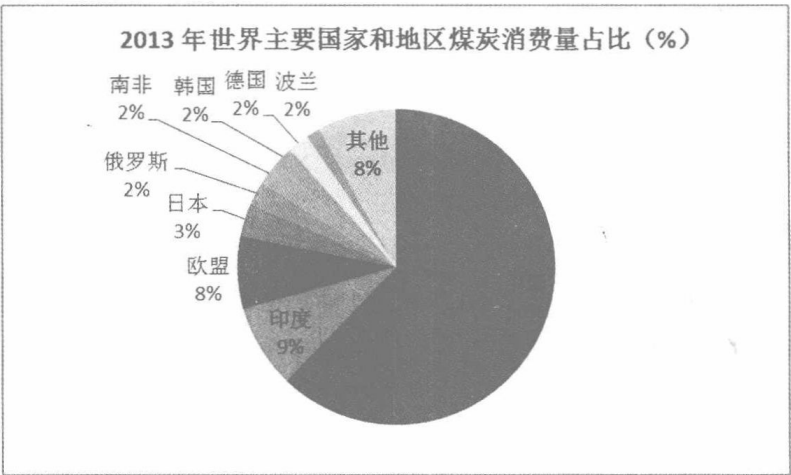


图 1-3 2013 年世界主要国家和地区煤炭消费量占比 (%)

依据《IEA 世界能源平衡表 2014》^[1]可知,除了煤炭消费总量最高之外,与发达国家相比,中国发电用煤炭比例也偏低,仅占 51%,而美国达到 92%,终端消费占比偏高占到总用量的 31.1%,较世界平均水平(24.7%)高出 6.4 个百分点。

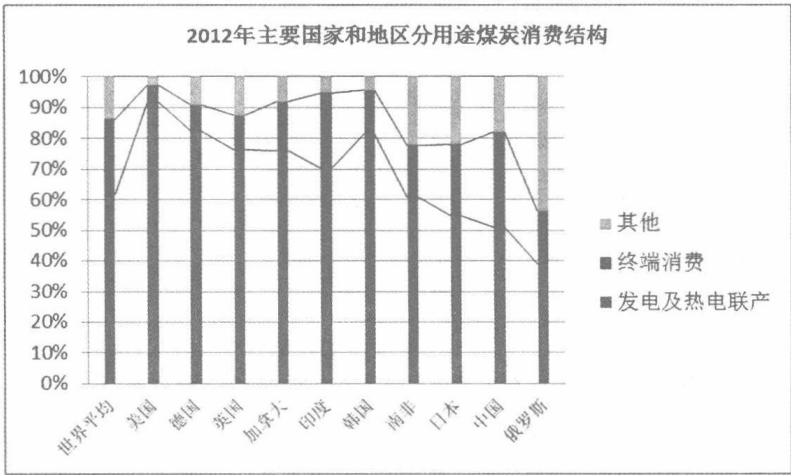


图 1-4 2012 年主要国家和地区分用途煤炭消费结构

据《财经国家周刊》^[2]报道,“十三五”期间,煤炭依然是我国的主要能源,但是越来越严重的环境问题使得必须更加重视煤炭清洁高效开发利用。规划提出到 2020 年将有超过 60%的煤炭消费量用于发电,原煤入选率提升至 80%以上,同时大幅减少煤炭分散使用。煤炭开发将划分优先次序,按照控制东部、稳定中部、发展西部的原则。

1.2 可再生能源利用

1.1.1 太阳能热水系统

2015 年底,中国太阳能热利用总保有量达到 4.42 亿 m^2 (309GWh),同比增长 6.9%,

保持着全球制造和应用大国地位。2015 年 1—12 月份太阳能热水器行业运行主要数据显示,真空管型集热器及系统占到销售总量的 87%,平板型集热器及系统占 13%。太阳能中低温热利用仍以生活热水为主,但逐渐开始向太阳能采暖、制冷、工农业应用、海水淡化等领域扩展。

1.1.2 地源热泵系统

1995 年全国地源热泵应用面积为 4 000m²,1999 年达到 6 万 m²,2000 年是 10 万 m²,2009 年为 1 亿 m²,2013 年达到 3 亿 m²。我国地源热泵行业发展进入快速车道^[4]。

1.1.3 太阳能光伏系统

依据《全球新能源发展报告 2015》^[1],2014 年太阳能光伏新增装机容量排名前十的国家依次为中国、日本、美国、英国、德国、法国、南非、澳大利亚、印度和加拿大。中国新增装机容量占到世界新增总量的 27.7%,是美国的 2 倍。

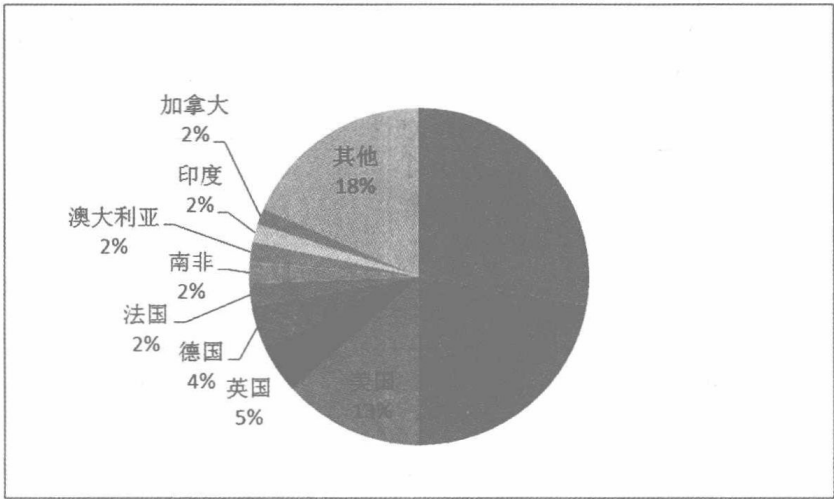


图 1-5 2014 年太阳能光伏新增装机容量占比

第2章 太阳能光伏建筑一体化集成设计研究

2.1 平屋面间距布局优化研究

针对一般设计方法中合理间距设计在建筑应用中的不足,深度分析平屋面布置中的合理间距优化方法和光伏布置横向长度对于光伏板总获得辐照量的影响。考虑到我国南北跨度较大,不同地区太阳辐照量有较大差异,选取上海、北京、沈阳、广州 4 个城市作为分析对象。

太阳能光伏组件一般都倾斜放置于平屋面,通过合理的倾角、间距与方位角布置以获得最优的发电量,倾角与方位角在目前太阳能业界已经达成广泛共识。在间距的布置上,工程中一般选用的间距都引自《光伏电站设计规范》(GB50797—2012),规范要求布置间距:冬至日太阳时 9:00—15:00 不被遮挡。但是这存在一个问题,此规范是针对地面电站设计所用,地面电站往往建设于地广人稀之地,布置面积不是主要考虑因素,而建筑屋顶面积有限,仅有部分可利用,面积成为布置的一个重要考虑因素,从合理利用的角度出发,适当减小间距以获得最合理的装机量将是必要举措。



图 2-1 光伏板间距示意

2.1.1 上海

先以上海为例,适当减少间距模拟其相互遮挡程度的影响。模拟光伏组件均布置于 10 米见方屋顶,大致模型如图 2-2,图为最大与最小间距的示意。

根据《光伏电站设计规范》(GB50797—2012)布置间距要求:冬至日太阳时 9:00—15:00 不被遮挡,计算所得间距为 650mm。同时按一定间距依次缩短布置间距,形成不同计算工况间距,具体如表 2-1。200mm 间距为考虑到检修及日常维护最小间距。

表 2-1 不同间距的光伏布置规模情况

间距(mm)	代号	650	500	400	300	200
屋顶面积(m ²)	A	100	100	100	100	100
装机容量(kWp)	B	7.56	8.64	9.72	10.8	11.88
光伏组件数量(个)	C	42	48	54	60	66
光伏组件面积(m ²)	D	53.76	61.44	69.12	76.8	84.48

以下是模拟结果,颜色代表不同光照强度,仅以 650mm 与 200mm 为典型代表进行分析。图中 650mm 与 200mm 存在明显的差别,650mm 间距下光伏组件底部辐照强度未出现明显下降,而在 200mm 间距下,光伏组件底部已经出现了明显的差距,这会对发电量造成较大影响。

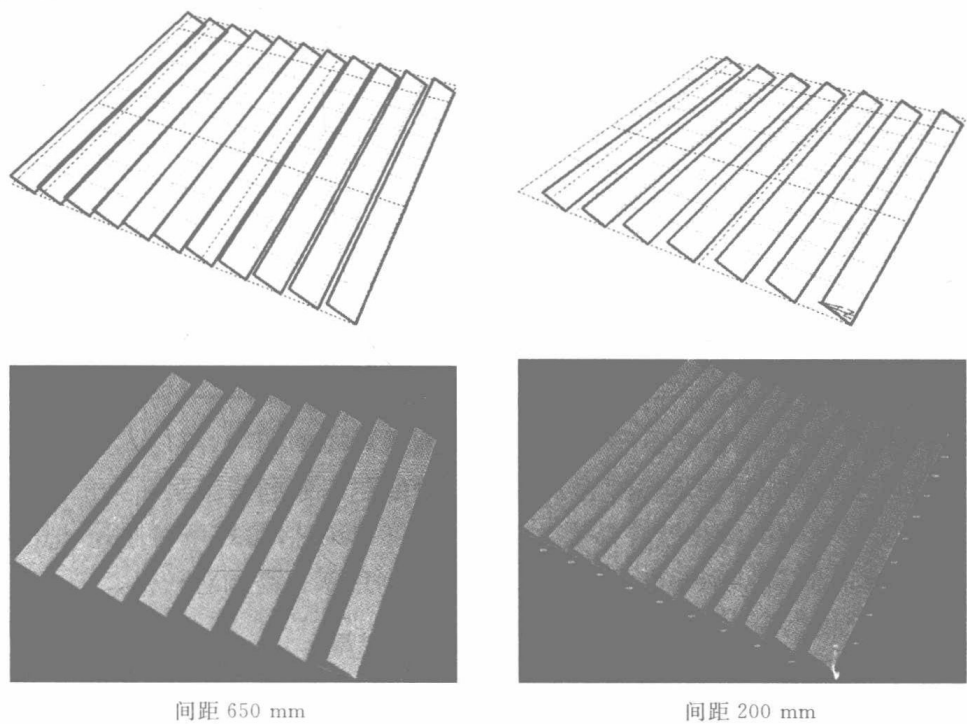


图 2-2 不同间距的辐照量分析结果模型图

表 2-2 为模拟结果的各项数据统计,随着间距的减小,单位光伏板面积的辐照强度逐步下降,且遮挡率直线上升,却相应增加了屋顶单位面积的装机量,使得单位屋顶面积的辐照利用率得到了提升,间距 650mm 下单位屋顶的辐照利用率仅为 $755.9\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,而间距 200mm 下的辐照利用率提高为 $1\,135.2\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,提升辐照量达到 $379.3\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$,对单位屋顶面积的利用率提升了近 50%。

表 2-2 不同间距的模拟分析结果

间距(mm)	代号	650	500	400	300	200
单位屋顶面积装机量(W/m^2)	B/A	75.6	86.4	97.2	108	118.8
单位光伏板面积辐照强度/ $(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2)$	E	1 406	1 396.6	1 383.3	1 367.7	1 343.7
单位屋顶面积辐照利用量/ $(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2)$	$F=E\cdot D/A$	755.9	858.1	956.1	1 050.4	1 135.2
单位装机量的辐照利用量($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kWp}$)	$G=E\cdot D/B$	18.60	16.16	14.23	12.66	11.31
遮挡率(%)	$(E_0-E_n)/E_0$	/	0.7%	1.6%	2.7%	4.4%
屋顶利用提高率%/ $(\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2)$	$(F_n-F_0)/F_0$	/	13.5%	26.5%	40.0%	50.2%

从以上数据可以看出,随着间距的减小,单位光伏组件和面积的辐照强度进一步下降,且相互遮挡率进一步上升。但是相应而言,缩小间距后可增加屋顶单位面积的装机量,单位屋顶面积的辐照利用率得到了提升。

2.1.2 北京

根据《光伏发电站设计规范》(GB50797—2012)计算理论间距,即冬至日太阳时 9:00—15:00 不被遮挡。由计算结果得间距为 1 365mm。为了分析间距的影响,依次减小间距。具体模拟工况见表 2-3。

表 2-3 模拟工况

间距(mm)	代号	1 365	900	600	500	200
屋顶面积(m ²)	A	100	100	100	100	100
装机容量(kWp)	B	8.1	9.5	10.8	12.2	16.2
光伏组件数量(个)	C	36	42	48	54	72
光伏组件面积(m ²)	D	46.08	53.76	61.44	69.12	92.16

表 2-4 列出了模拟结果的各项数据,可看出随着间距的减小,单位光伏板面积辐照强度逐渐降低,同时单位屋顶面积装机量和单位屋顶面积辐照利用量呈增大的趋势,与上海规律类似。二者随间距的变化趋势是当间距小于 500mm 时,遮挡率和屋顶利用提高率均有明显上升,基本一致;而 500mm 以上时,其遮挡与利用率提高相对较慢。

表 2-4 不同间距计算结果

间距(mm)	代号	1 365	900	600	500	200
单位屋顶面积装机量(W/m ²)	B/A	81.0	94.5	108.0	121.5	162.0
单位光伏板面积辐照强度/(kW·h/m ²)	E	1 613.0	1 601.5	1 572.2	1 557.4	1 485.8
单位屋顶面积辐照利用量/(kW·h/m ²)	F=E·D/A	743.3	860.9	965.9	1 076.5	1 369.3
单位装机量的辐照利用量(kW·h/kWp)	G=E·D/B	19.9	16.9	14.6	12.8	9.2
遮挡率(%)	(E0-E _n)/E0	/	0.72%	2.53%	3.45%	7.89%
屋顶利用提高率%/(kW·h/m ²)	(F _n -F0)/F0	/	15.8%	30.0%	44.8%	84.2%

2.1.3 沈阳

根据《光伏发电站设计规范》(GB50797—2012)计算理论间距,即冬至日太阳时 9:00—15:00 不被遮挡。由计算结果得间距为 1 675mm,逐渐减小间距,分别进行模拟,见表 2-5。

表 2-5 模拟工况

间距(mm)	代号	1 675	1 000	700	400
屋顶面积(m ²)	A	100	100	100	100
装机容量(kWp)	B	6.8	8.1	10.8	13.5
光伏组件数量(个)	C	30	36	48	60
光伏组件面积(m ²)	D	38.4	46.08	61.44	76.8

表 2-6 列出了模拟结果,从中可看出随着间距从 1 675mm 减小至 400mm,单位光伏组件面积辐照强度降低了 7.1%,单位屋顶面积辐照利用量增大了 86%,单位屋顶面积装机量增大为原来的 2 倍。当间距小于 1 000mm 时,遮挡率、屋顶利用提高率及单位屋顶面积装机量均呈直线上升的趋势,减小间距有利于发电量的提升。在沈阳地区,光伏组件间距为 400mm 时的遮挡率高达 7.1%,而小于 1 000mm 时屋顶辐照强度利用率呈直线上升。

表 2-6 不同间距计算结果

间距(mm)	代号	1 675	1 000	700	400
单位屋顶面积装机量(W/m ²)	B/A	67.5	81.0	108.0	135.0
单位光伏板面积辐照强度/(kW·h/m ²)	E	1 419.86	1 395.46	1 357.54	1 319.09
单位屋顶面积辐照利用量/(kW·h/m ²)	F=E·D/A	545.2	643.0	834.1	1 013.1
单位装机量的辐照利用量(kW·h/kWp)	G=E·D/B	21.0	17.2	12.6	9.8
遮挡率(%)	(E0-E _n)/E0	/	1.72%	4.39%	7.10%
屋顶利用提高率%/(kW·h/m ²)	(F _n -F0)/F0	/	17.94%	52.98%	85.81%

2.1.4 广州

根据《光伏电站设计规范》(GB50797-2012)计算理论间距,即冬至日太阳时 9:00-15:00 不被遮挡,得间距为 350mm。考虑检修及日常维护及安装容量,取最小间距 250mm。具体模拟工况见表 2-7。

表 2-7 模拟工况

间距(mm)	代号	350	280	250
屋顶面积(m ²)	A	100	100	100
装机容量(kWp)	B	12.2	13.5	72
光伏组件数量(个)	C	54	60	92.16
光伏组件面积(m ²)	D	69.12	76.8	118

表 2-8 列出了模拟结果的各项数据。由于广州地区纬度较低,太阳高度角较大,因此理论间距只有 350mm,间距继续减小的幅度很小。这使得光伏板在间距方面优化的空间也较小。从表中可看出,随着间距的减小,单位光伏板面积辐照强度呈下降趋势,这与上海、北京、沈阳地区均相同。单位屋顶面积装机量虽然呈上升趋势,但增加幅度很小,且间距由 280mm 减小至 250mm,装机量已经没有提升空间。从遮挡率来看,当间距减小至 250mm,遮挡率由 0.39% 增加至 0.72%,遮挡率始终很小。从屋顶利用提高率来看,当间距从 280mm 继续减小时,利用率从 10.7% 开始逐渐降低。这是由于广州地区太阳高度角较大,遮挡间距的影响作用较小。

表 2-8 不同间距计算结果

间距(mm)	代号	350	280	250
单位屋顶面积装机量(W/m ²)	B/A	121.5	135.0	135.0
单位光伏板面积辐照强度/(kW·h/m ²)	E	1 096.68	1 092.40	1 088.75
单位屋顶面积辐照利用量/(kW·h/m ²)	F=E·D/A	758.0	839.0	836.2
单位装机量的辐照利用量(kW·h/kW _p)	G=E·D/B	9.0	8.1	8.1
遮挡率(%)	(E ₀ -E _n)/E ₀	/	0.39%	0.72%
屋顶利用提高率%/(kW·h/m ²)	(F _n -F ₀)/F ₀	/	10.7%	10.3%

2.1.5 小结

除广州外,以上四个地域中,上海、北京、沈阳的分析可以发现间距与屋顶利用率的提高几乎成线性关系。以上对分布式屋顶光伏的可行性仅从遮挡程度的角度进行了量化分析,但以上分析的辐照遮挡仅仅是一个方面,电池的光点属性也是影响发电效率的重要因素。根据相关部分阴影条件下光伏组件的发电功率研究,当光伏组件被部分遮挡或者光照不均匀时,会造成阵列的输出效率降低,并容易发生热斑现象,进而损坏电池。

由此看来,遮挡程度的合理性问题实际是如何平衡遮挡与提高屋顶利用率的问题。根据以上分析中组件的排布形式,普通光伏组件内部的电池分布、受遮挡情况示意图 2-3。

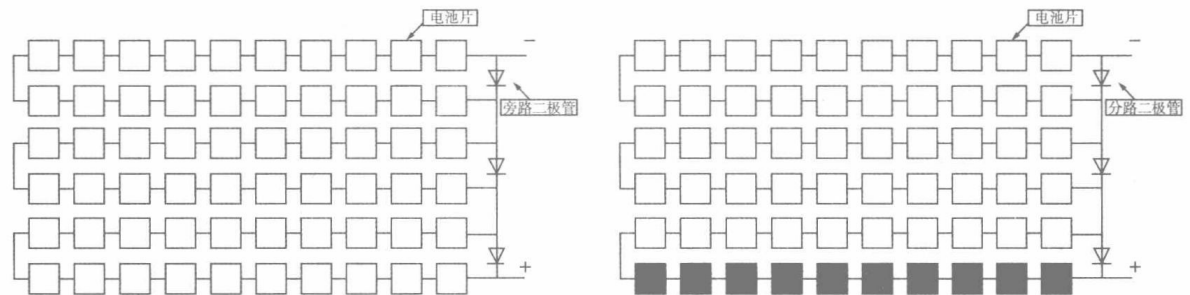


图 2-3 光伏组件电池排布及遮挡示意

若组件受到遮挡,其输出功率曲线将会受到影响,输出功率减少。表 2-9 即为通过实测测得的输出功率下降的比例,可以见到,仅遮挡半列电池组时输出功率下降并不大,但是当一列电池组被遮挡后,功率下降比例明显上升。若继续加大遮挡,其输出功率受遮挡的影响程度将急剧扩大,输出效率也会迅速下降至 50% 以下。

表 2-9 受遮挡后功率下降实测值(注:数据来源于西北光伏电站实测数据)

	Voc/V	Isc/A	P/W	输出额定功率的百分比/%
未遮挡	34.62	5.88	204	100
遮挡半列电池组	34.49	5.8	200	98.0
遮挡一列电池组	33.5	5.2	174	85.3

依据组件长宽大小,不同间距可能造成的光伏组件电池遮挡如表 2-10 所示。结合表

中数据,可以发现,当间距缩小至一定程度以下时,将会有 1 列以上的电池组件被遮挡,输出功率将直线下降。这就需要将间距维持在一定范围内,有 0.5~1 列组件被遮挡的合理范围,将实测输出功率维持在 85.3%以上的可接受范围内。

表 2-10 组件遮挡情况

遮挡的电池组列数	0	0.5	1.00	1.5
输出功率	100%	98%	85.3%	<50%
上海	间距 650mm	间距 400mm	间距<400mm	
北京	间距 1 365mm	间距 900mm	间距<900mm	
沈阳	间距 1 675mm	间距 1 000mm	间距<1 000mm	
广州	间距 350mm	间距 280mm	间距<280mm	

由光伏这一发电属性,屋顶的利用优化应控制在一定范围之内。相反,若间距小于一定值,优化后的发电量将均不足以弥补由光电属性带来的输出功率降低。即若考虑光电属性带来的输出功率下降,屋顶利用率并不是一条递增的曲线,若影响光电属性,就无所谓屋顶利用率提高一说了。

光伏与建筑一体化结合中,在保证光伏发电效率的同时,应提高有限建筑面积的发电利用率。适当的减小间距对光伏组件整体接受到的辐照量影响不大,遮挡影响程度应控制在 2%以内。若继续增加遮挡,考虑光伏电池自身发电属性会极大地影响光伏组件输出功率。通过对比,发现在间距影响作用较大区域如上海、北京、沈阳,间距的扩大带来的效应应该终止于一个限值,这个限值应小于单排电池组件被遮挡。各地区在仅考虑单个组件(板高 800mm)的情况下,间距推荐值如表 2-11 所示。

表 2-11 平屋面单个光伏组件板(高 800mm)的布置间距推荐值

地区	安装倾角等级	布置间距推荐值(mm)
上海	25°	[400,650]
北京	35°	[900,1 365]
沈阳	40°	[1 000,1 675]
广州	15°	[280,350]

2.2 平屋面横向遮挡布局影响研究

在建筑光伏一体化设计中,光伏组件除了前后遮挡影响外,由于当日太阳高度角的变化,前板往往会对正后方两边的光伏板形成侧向遮挡。这一现象在横向布置光伏组件较多时会造成较大影响,是屋顶光伏组件布置中需要考虑的问题。

2.2.1 上海

以上海为例建立分析模型如图 2-4 所示,在横向上分别布置组数为单组、2 组、4 组、8 组、10 组、15 组、25 组与 40 组,用于对比横向长度方向光伏组件布置对后侧的光伏组件存在的影响。

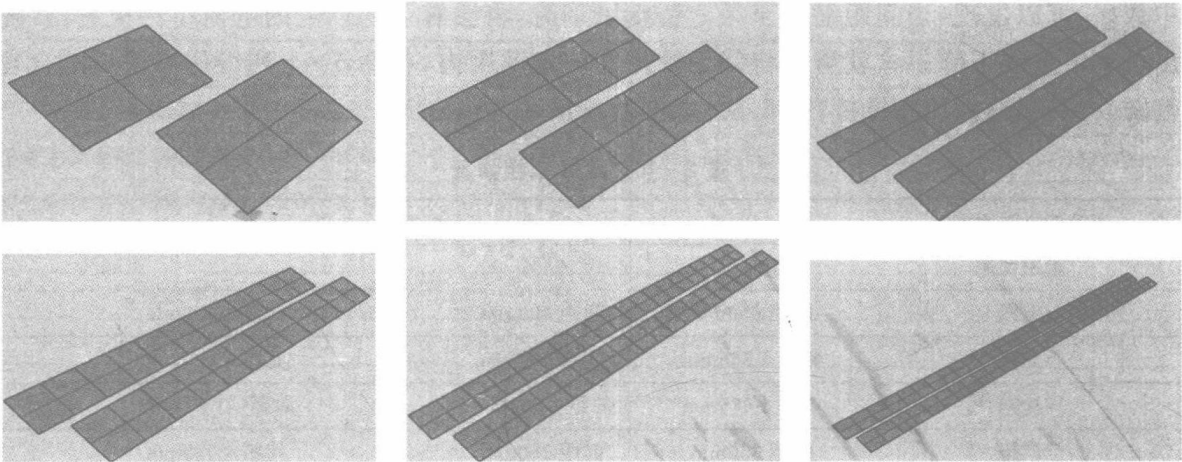


图 2-4 不同横向长度的分析模型

根据上节的分析结论,主要以 500mm,400mm 间距为分析重点,考虑一定的差异性影响要求,共设 650mm,500mm,400mm,300mm 四个分析情况,得到的分析数据见表 2-12。

表 2-12 不同横向长度方向布置的遮挡率 (%)

横向 前后	单组 1.6(m)	2 组 3.2(m)	4 组 6.4(m)	8 组 9.6(m)	10 组 16(m)	15 组 24(m)	25 组 40(m)	40 组 64(m)
间距 650(mm)	1.18	1.45	1.61	1.87	1.60	1.23	0.99	0.77
间距 500(mm)	1.89	2.09	2.00	2.86	2.58	1.97	1.44	1.04
间距 400(mm)	2.08	2.32	3.87	4.36	3.73	2.99	2.95	1.52
间距 300(mm)	4.35	4.92	5.41	6.50	5.69	4.77	3.49	2.34

由表 2-12 可知,遮挡程度随着组数的增加有所递增,但是当组数超过一定数量时,遮挡程度会慢慢下降,各组不同间距反映出,其遮挡程度均在 8 组时达到最大值。图 2-5 可以更加清晰地反映这一问题。

