

复杂建筑形态节能设计与分析

Design and Analysis of Complex Building Forms for Energy Conservation

李 薇

(泰州职业技术学院, 泰州 225300)

摘 要: 在建筑领域能耗与碳排放居高不下的背景下, 复杂建筑形态节能设计成为实现“双碳”目标的关键路径之一。文章剖析复杂建筑形态节能设计面临形态创新与节能减排平衡难、被动式节能设计适配障碍、能源系统协同不足、节能效果评估复杂等核心难题, 针对性提出形态与节能协同优化、被动式节能设计适配、能源系统与形态融合等策略, 并通过国家大剧院太湖舞美艺术中心案例验证。太湖舞美艺术中心利用光电建筑技术, 在不同建筑区域合理布局光伏系统, 实现能源产出与空间利用提升。为建筑形态美学表达与绿色性能提升的协同发展提供了创新性解决方案。

关键词: 节能目标; 复杂建筑形态; 设计原则; 能耗模拟

中图分类号: TU201.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0161-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.029

LI Wei

(Taizhou Polytechnic College, Taizhou 225300, China)

Abstract: Against the backdrop of high energy consumption and carbon emissions in the construction industry, energy-efficient design of complex building forms has become one of the key paths to achieving the "dual carbon" goal. This article analyzes the core challenges faced by energy-saving design in complex building forms, such as the difficulty of balancing form innovation and energy conservation and emission reduction, obstacles to passive energy-saving design adaptation, insufficient coordination of energy systems, and complex evaluation of energy-saving effects. Targeted strategies such as collaborative optimization of form and energy conservation, passive energy conservation design adaptation, energy system and form integration were proposed, and were verified by the National Grand Theater Taihu Dancing Art Center. The Taihu Dance Art Center utilizes photovoltaic building technology to reasonably layout photovoltaic systems in different building areas, achieving improved energy output and spatial utilization. Provided innovative solutions for the coordinated development of aesthetic expression of architectural form and improvement of green performance.

Key words: energy-saving goals; complex building forms; design principles; energy consumption simulation

0 引言

在应对气候变化与资源短缺的背景下, 建筑行业作为能源消耗的主要领域之一, 面临变革的挑战。根据全球能源报告, 建筑领域的能耗约占到全球总能耗的三分之一, 在一些国家和地区甚至更高^[1-2]。这一严峻形势在我国同样不容乐观, 全国房屋建筑

研究与应用

全过程的能耗与碳排放分别占全国能源消费与碳排放的36.3%和38.2%，凸显了建筑行业在节能减排方面的紧迫性^[3-4]。

自“十三五”规划以来，我国对绿色建筑和节能建筑的政策支持力度逐步加大，许多高校和研究机构开展节能研究，多集中在建筑形态与气候适应性的结合，如地域性建筑形态优化研究，结合传统建筑的节能智慧（如四合院、窑洞等），探索现代复杂形态设计的节能方法^[5-6]。王韬等^[6]、刘士龙等^[7]以及王茜等^[8]探究了寒冷地区建筑形态节能设计，采用建筑形态多目标寻优技术，调整倾角、矢高、平面轮廓等参数优化屋面形态，通过平均太阳辐射量（受太阳方位角影响）、屋面面积来改变太阳辐射总量，达到节能优化的目的；李诚博^[9]、董超等^[10]以玻璃金字塔为例研究了玻璃材料在建筑中的应用，表明玻璃材料能够有效调节建筑主体的光线、热量、能源、噪声等条件，使建筑主体环境保持优越性并能够有效降低建筑能耗；徐浩等^[11]对不同类型的玻璃幕墙能耗影响进行研究，结果表明单层玻璃幕墙能耗普遍高于双层玻璃幕墙能耗，单层玻璃幕墙中浮法玻璃幕墙的节能效果最好，双层玻璃幕墙中双层浮法玻璃幕墙节能效果最好。国外注重建筑形态与能量流动、空气动力学、太阳辐射之间的定量关系，通过参数化设计工具和模拟技术，如CFD（计算流体动力学）和能耗模拟（如Energy Plus、Design Builder），实现了建筑形态对热舒适性和能耗的优化^[12]。Liu等^[13]、Alpar等^[14]采用边界元素方法优化建筑围护结构形状以提高能源效率。

但是，如何在保障建筑功能性和美观性的同时，通过形态创新实现节能减排的突破，是当前研究领域面临的一大挑战。文章探索复杂建筑形态节能设计与分析方法，以期在理论与实践层面为推动绿色建筑发展提供参考。

1 复杂建筑形态节能设计面临的问题

1.1 形态创新与节能减排的平衡难题

现代建筑追求独特、新颖的形态以展现其艺术价值和文化内涵，然而复杂多变的建筑形态往往会建筑的能耗产生复杂影响。一些过于追求外观独

特的建筑形态，可能因不符合当地气候条件和自然环境，导致在采光、通风、隔热等方面存在缺陷，进而增加建筑的能耗。因此，如何在建筑形态创新与节能减排之间找到平衡点，是复杂建筑形态节能设计需要解决的关键问题之一。

1.2 复杂形态下被动式节能设计难度大

被动式节能设计旨在充分利用自然条件，如自然光、自然通风和建筑材料的热质性能等，来减少建筑对人工能源的依赖。然而，复杂建筑形态的特殊性使得这些自然条件的利用变得复杂困难。传统的窗户位置和尺寸设计方法难以满足复杂形态建筑的需求，需要精确的日照分析和个性化的设计策略。在自然通风设计方面，复杂形态建筑的异形立面和内部空间结构可能会干扰气流的正常流动，难以形成有效的自然通风路径。复杂形态建筑的非规则空间布局也会影响热量的传递和储存效果，需要更加精细地设计和计算。

1.3 高效能源系统集成与复杂形态的适配问题

复杂建筑形态对高效能源系统集成形成双重制约。一方面，可再生能源设备布局受限：太阳能光伏板需特定面积与朝向以保障能量转化效率，但复杂建筑的曲面屋顶、异形立面常难以提供适配条件，导致发电效率下降；风力发电机对气流环境敏感，不规则建筑形态易干扰周边气流，削弱发电效果。另一方面，智能建筑管理系统（IBMS）应用受阻：复杂形态下空间层级多、流线复杂，IBMS需依托三维模型对热场、光照及设备状态实施分区调控，针对挑空中庭、高低错层等特殊区域，还需结合形态模拟制定差异化策略。但现有技术与算法尚未成熟，难以满足此类动态、精细的调控需求，造成能源系统与建筑形态协同不足。

1.4 节能效果评估与优化的复杂性

复杂建筑形态的节能效果受到多种因素的综合影响，包括建筑形态、材料性能、能源系统运行、用户行为等，这使得节能效果的评估变得复杂困难。传统的节能评估方法往往基于简化的模型和假设，难以准确反映复杂建筑形态的实际能耗情况^[15]。如何在这些目标之间进行权衡和协调，找到最优的设计方案，是节能效果评估与优化面临的难题。

2 复杂建筑形态节能设计策略

2.1 优化建筑形态与布局

复杂建筑形态的设计应首先基于对周边环境的深入分析,包括气候条件、日照路径、风向风速等自然因素。通过模拟分析,确定最佳的建筑朝向、体形系数和开窗比例,以减少夏季过热和冬季热量损失。例如,采用流线型或分段式形态,可以有效减少风阻,利用自然通风降低空调能耗;同时,合理的屋顶倾角和遮阳设计能最大化利用太阳能,避免过度日晒。其次,在空间布局上,应追求功能的灵活性和多样性,以适应不同时间、季节的使用需求变化。采用可变隔断、移动墙体等技术,实现空间的动态划分,既满足日常运营需要,又能在特定时段(如冬季)集中使用,减少供暖或制冷面积,从而达到节能目的。考虑设置多功能共享空间,如中庭、屋顶花园等,既能促进自然采光和通风,又能提供舒适的休闲环境,增强建筑整体的能效。最后,将绿色交通理念融入建筑设计,如设置自行车停车区和步行通道,减少机动车依赖,间接降低碳排放。同时,通过景观设计,如屋顶绿化、垂直花园等,不仅美化环境,还能提供隔热保温效果,减少建筑能耗。景观与建筑的有机融合,还能重塑生物多样性,提升建筑的生态价值。

2.2 强化被动式节能设计

充分利用自然光是减少照明能耗的有效途径。一是强化被动式节能设计,充分利用自然光,经日照分析优化窗户并搭配相关技术,设计可调节遮阳系统;二是针对复杂建筑形态开展因形制宜通风策略,如利用特殊形态引导风流、布置可控风帽等,提升自然通风效率以降能耗。三是利用建筑材料的热质性能,如混凝土、砖石等,作为天然的蓄热体,吸收并储存日间多余热量,夜间缓慢释放,平衡室内温度波动。同时,加强外墙、屋顶和地面的隔热保温措施,采用高性能绝热材料,减少热量传递,确保建筑在极端天气下的舒适性,降低能耗。

2.3 集成高效能源系统

通过光伏板、风力发电机、地源热泵等设备利用太阳能、风能、地热能等可再生能源,为建筑提供清洁、可持续的能源供应。在设计初期,应将可

再生能源系统纳入整体规划,确保其与建筑形态、功能需求完美融合,最大化能源利用效率。采用先进的智能建筑管理系统(IBMS),集成照明、空调、安防等多个子系统,实现建筑能耗的精细化管理和优化。通过智能控制系统、传感器和大数据分析,可以实时监测建筑的能源使用情况,并根据用户需求和外部环境变化进行动态调整。建立全面的能源回收系统,将建筑运营过程中产生的废弃物转化为资源,如废热回收、雨水收集与再利用等,利用废水中的热能预热生活用水,或将收集的雨水用于灌溉、冲厕等,减少自来水消耗;推广使用节水器具和高效用水系统,也是实现节能减排的重要措施。

复杂建筑形态下,IBMS系统需应对空间层级差异、流线多变等挑战,基于三维信息模型对热场、光照及设备运行状态分区智能调控,针对挑空中庭等特殊空间,结合形态模拟设定差异化能耗策略,实现“形态驱动-系统联动”的能效调控。嵌入能源回收系统需考虑空间组织非线性特征,将废热回收设备布设于中庭背压区等位置,兼顾效率与美感;不规则布局中依重力差设雨水回收通道,既节省能源又与形态逻辑融合,体现设计与节能深度结合。

3 案例分析

国家大剧院台湖舞美艺术中心位于北京市通州区台湖镇,是国家大剧院在城市副中心的重要舞美艺术生产基地。总建筑面积近6万平方米,2018年建成试运营,被誉为中国乃至全球规模最大、功能最全面的舞美制作基地^[16]。项目整合舞美设计制作、排练合成等全流程功能,内设与国家大剧院同尺寸合成剧场及多个专业空间,满足精细化需求。其亮点是广泛应用光电建筑技术,将光伏发电与建筑材料融合,实现能源自给自足。

3.1 节能目标与设计理念

台湖舞美艺术中心节能目标明确:采用高效节能技术设备降低运营能耗;利用可再生能源提升自给力;优化建筑微气候减少环境影响,助力绿色建筑发展。其设计理念秉持“绿色、低碳、可持续”,将节能减排与建筑美学融合。既保障建筑功能与美观,又追求能源高效利用和环境友好保护。项目运

研究与应用

用光电建筑技术,让建筑具备发电能力,实现能源自给自足;还重视微气候设计,经科学布局与合理构造,优化采光、通风和隔热性能,切实降低建筑能耗。

3.2 复杂建筑形态与节能设计

太湖舞美艺术中心的建筑形态复杂多变,既体现了现代建筑的美学理念,又充分考虑了节能的需求。项目整体布局紧凑有序,各个功能区域相互独立又相互联系,形成了高效的空间利用体系。在建筑形态的设计上,采用大量的曲线和斜面元素,不仅增强了建筑的动感和流线性,还有利于改善建筑的采光和通风条件。通过巧妙的屋顶设计,实现了光伏发电与建筑美学的完美结合。

在节能设计策略上,该项目结合不同建筑的形态特点,针对性采用光伏技术实现能源高效利用。2号楼采用光电建筑形式的光伏采光顶,选用147片高透光率(40%)的碲化镉光电建筑构件,总装机量

12.789 kW,既保障采光又实现光伏发电,完美融合两大功能。4号、6号和7号楼屋顶安装分布式光伏发电站;3号艺术交流楼的中庭采光顶和异形幕墙通过嵌入碲化镉构件于大跨度曲面屋顶,实现自然采光、遮阳与发电协同调控,东立面幕墙的光伏模块因垂直异形布设延长日照接收周期,总装机量14.03 kW,体现技术与艺术融合。4号舞美创意空间针对混凝土屋顶,安装2170片碲化镉组件组成的分布式光伏系统(184.45 kW),兼具发电与屋顶隔热功能,减少冷热传递以降能耗。6号、7号舞美仓储库房针对彩钢瓦屋顶,安装4 536片碲化镉组件(385.56 kW),既提升发电量,又延缓屋面老化、延长建筑寿命。

3.3 节能效果与经济效益分析

通过上述光电建筑技术的应用策略,国家大剧院太湖舞美艺术中心在节能减排方面取得了显著成效。具体分析与总结见表1。

表1 国家大剧院太湖舞美艺术中心2021年用电分析
Table 1 Analysis of electricity consumption of Taihu Stage Art Center in 2021

全年用电量 /kWh	光伏发电量 /kWh	可再生能源 使用占比/%	建筑面积 /m ²	用电单位能耗 /[kWh/(m ² ·a)]	二氧化碳排放量(kgCO ₂ /a)	
					无光伏电的排放量	有光伏电减少的排放量
551 374	546 023	99	59 781	9.2	432 829	428 628

自2018年12月项目建成试运行以来,整体发电表现稳定,2019年发电545 115 kWh,2020年发电562 930 kWh,2021年发电546 023 kWh,总计发电量1 654 068 kWh,节约燃煤542.533 t,减少二氧化碳排放1 649.11 t,减少SO₂排放量约10.255 t,减少NO_x(以NO₂计)排放量约3.474 t。根据北京市商业用电平均价格及光伏补贴政策(北京市分布式光伏补贴0.3元/kWh,光电建筑形式补贴0.4元/kWh;通州区对600 kW以上光伏项目最高补贴100万元),该项目在2021年的光伏年收入1 873 637元。

从经济效益看,节能设计的收益显著,高效节能设备与技术降低了运营成本,光伏发电实现能源自给自足以减少外部依赖,叠加政府补贴与奖励机制,为项目带来额外经济收益。

4 结语

综上所述,复杂建筑形态节能设计是当代建筑设计领域的重要课题。随着全球能源危机的加剧和环境保护意识的提高,如何在保证建筑功能性和美

观性的同时,实现能源的高效利用和环境的友好保护,成为了建筑师和设计师们必须面临的挑战。通过对复杂建筑形态设计原则、方法以及设计工具与技术的探讨,为节能建筑的设计提供了理论支持和实践指导。国家大剧院太湖舞美艺术中心项目通过创新光电技术、微气候设计及节能设备应用,实现节能目标下的建筑形态设计实践,为绿色建筑树立标杆。未来,复杂建筑形态节能设计将继续成为建筑设计领域的研究热点。随着科技的不断进步和人们对节能环保认识的不断提高,将会有更多的新技术、新材料和新方法被应用到建筑设计中。

参 考 文 献

[1] 张珍,伍高宏,李鹏慧,等.综合交通枢纽项目施工碳排放计算分析与减碳技术研究[J].智能建筑与智慧城市,2023(6):100-102.
[2] 沈泽南.“双碳”目标下近零能耗建筑的节能性探索[J].新型建筑材料,2022,49(8):14-18.
[3] 谢虎.多目标因子约束下的建筑节能环保改造设计[J].能源与环保,2022,44(5):125-130. (下转第169页)

(3) 设计主动频率响应机制, 结合二阶锥松弛优化, 成功将负荷控制的平均误差降至 2.1 MW (场景 1) 和 1.8 MW (场景 2), 实现微电网负荷节能的精准调节。

综上所述, 该方法通过多能协同优化与动态分级控制, 显著提升了负荷控制精度和能源利用效率, 为建筑微电网智能化节能提供了新技术路径。

参 考 文 献

- [1] 王朝亮, 肖涛, 陈宋宋, 等. 基于直流微电网协调控制的电动汽车充电成本优化 [J]. 电气传动, 2024, 54 (11): 66-75.
- [2] 毛荀, 占勇, 刘敏, 等. 基于先导节点选取下优化下垂控制的孤岛运行微电网负荷功率分配方法 [J]. 电源学报, 2023, 21 (1): 126-132.
- [3] 史军, 王加澍, 熊峰, 等. 基于智能负载的微电网精准切负荷控制策略 [J]. 电力工程技术, 2020, 39 (2): 103-109.
- [4] 马勇. 直流微电网含负荷功率自动分配控制方法 [J]. 电工技术, 2022 (24): 159-161.
- [5] 郭鑫. 新能源光伏技术在建筑节能中的应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024 (5): 0074-0077.
- [6] 顾炜. 基于光伏新能源技术的建筑电气节能控制系统研究 [J]. 电气技术与经济, 2025 (2): 80-82.
- [7] 熊文斌, 吴炜, 董大群, 等. 智能建筑中的分布式光伏发电与微电网控制系统分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41 (6): 384-385.
- [8] 段晓芳, 钟晚秋, 谢敏杰. 新疆太阳能光伏建筑一体化关键技术研究 [J]. 城市建筑, 2025, 22 (4): 5-7.
- [9] 李双营. 光伏微网储能系统用电峰谷差自适应控制技术 [J]. 现代电子技术, 2024, 47 (24): 105-108.
- [10] 谢志刚, 陈丽娜, 朱波, 等. 基于源网荷态势的光伏微电网需求侧响应调度方法 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版), 2024, 46 (1): 164-169.
- [11] 刘雪原, 陈玉敏, 魏阳, 等. 基于积分调节算法的光伏电池负荷功率跟踪控制 [J]. 电气自动化, 2024, 46 (3): 4-7.
- [12] 马倩倩, 崔红社, 孙锐, 等. 基于 PSO-LM-BP 算法的空调系统节能预测控制研究 [J]. 低温与超导, 2022, 50 (4): 65-70.
- [13] 葛卫梁, 黄磊, 冯建云. 微电网站设备短期输出负荷主动控制技术 [J]. 自动化应用, 2022 (8): 108-110.
- [14] 陆春光, 刘炜, 姚力, 等. 考虑碳排放目标的燃煤机组负荷量节能控制模型 [J]. 粘接, 2024, 51 (12): 131-134.
- [15] 许娜, 朱龙虎. 基于负荷预测结果的换热站节能控制方法与案例分析 [J]. 建设科技, 2024 (18): 65-67.
- [16] 刘可, 徐小东, 王伟. 以节能为导向的住区形态布局及自动寻优方法研究 [J]. 工业建筑, 2021, 51 (8): 1-10, 27.
- [17] 覃飞龙. 概念设计与结构措施在建筑结构中的应用 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33 (9): 139-141.
- [18] 王韬, 张清, 傅绍辉. 基于太阳辐射的建筑屋面形态绿色设计方法 [J]. 建筑节能 (中英文), 2021, 49 (4): 18-24.
- [19] 刘士龙, 句德民, 张花蕊, 等. 寒冷地区居住建筑执行 75% 节能标准增量成本分析研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2015, (6): 43-44, 48.
- [20] 王茜, 石谦飞, 史树一. 基于节能导向的寒冷地区医院建筑形态多目标寻优技术研究 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2024, 56 (4): 604-612.
- [21] 李诚博. 住宅建筑节能设计的不足与改进措施 [J]. 四川水泥, 2023 (3): 76-78.
- [22] 董超, 田治国. 浅谈玻璃材料在建筑设计中的应用研究—以玻璃金字塔为例 [J]. 西部皮革, 2021, 43 (4): 9-10.
- [23] 徐浩, 胡锦亮, 曾小华, 等. 不同类型的玻璃幕墙能耗影响分析研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 130-134.
- [24] PUNDIENĖ I, PRANCKEVIČIENĖ J, BUMANIS G, et al. Experimental investigation of novel bio-composite with integrated phase change materials (PCM) for enhanced energy saving in buildings [J]. Industrial Crops & Products, 2025, 43 (3): 205-212.
- [25] LIU Z, GE H, SONG T, et al. Research on building energy-saving based on GA-BP coupled improved multi-objective whale optimization algorithm [J]. Energy & Buildings, 2025, 47 (2): 1-14.
- [26] ALPAR S, BERGER J, MAZUROSKI W, et al. Shape optimization of the energy efficiency of building retrofitted facade [J]. Solar Energy, 2024, 45 (4): 1180-1205.
- [27] 宋娇. “双碳”目标下北京市某既有建筑节能减碳潜力分析 [J]. 节能, 2023, 42 (6): 67-69.
- [28] 赵丹. 复杂性视阈下的大跨度建筑参数化形态生成策略研究 [D]. 西安: 西安大学, 2021.
- [29] 程昌斌. 高层复杂建筑供配电节能设计要点探讨 [A] 2017 年 8 月建筑科技与管理学术交流会论文集 [C]. 《建筑科技与管理》组委会, 北京恒盛博雅国际文化交流中心, 2017: 2.
- [30] 胥小龙, 孙鹏, 时雪燕. 碳达峰碳中和目标愿景下建筑节能低碳发展路径构思 [J]. 建筑, 2022 (10): 36-38.
- [31] 张勇, 梁晓珂, 袁丽娟. 面向节能的建筑设计多目标优化方法 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (7): 107-112.