

# Multi objective optimization of integrated renewable energy systems in low-carbon building design

Xingshun Fei

Shandong Provincial Transportation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250001, China

## Abstract

This article focuses on the direction of low-carbon building design. To solve the integration problem of renewable energy systems such as solar energy and geothermal energy in buildings, a multi-objective analysis system based on minimizing economic costs, maximizing carbon emissions reduction, and maximizing technical efficiency is proposed. The article proposes an integrated optimization process from creating a digital twin system, establishing a mathematical model, using intelligent algorithms for solving, to ultimately selecting and verifying the solution. By studying the trade-off relationship between multiple objectives, this integrated optimization process can provide designers and decision-makers with a scientific and quantitative statistical selection method, so that they can make the optimal choice for the integration scheme of renewable energy systems, thereby achieving the goal of precise implementation of low-carbon buildings.

## Keywords

low-carbon buildings; Renewable energy systems; Integrated design; Multi objective optimization; sustainability

# 低碳建筑设计中可再生能源集成系统的多目标优化

费兴顺

山东省交通规划设计院集团有限公司, 中国 · 山东 济南 250001

## 摘 要

本文专注于低碳建筑设计方向,为解决建筑中太阳能、地热能等可再生能源系统的集成难题,提出了基于经济成本最小化、碳排放减少最大化和技术效能最高的多目标分析体系。文章提出了从创建数字孪生系统、建立数学模型、采用智能算法进行求解直至最终方案选择验证的一体化优化流程。通过对多重目标相互之间取舍关系的研究,该一体化优化流程可以给设计人员以及决策层提供一个基于科学及数量统计的选择方法,以便可以对可再生能源系统的集成方案做出最优选择,从而达到建筑低碳化精准落地的目标。

## 关键词

低碳建筑; 可再生能源系统; 集成设计; 多目标优化; 可持续性

## 1 引言

建筑工程的能耗及排放问题越来越严峻,发展集成式可再生能源是其向绿色方向发展的必然趋势,但是在具体的设计过程中,如何统筹协调好初期投入成本与长远的减小排放以及稳定运行之间的多重关系往往难以找到量化的手段来进行衡量。当前的方法一般依赖于个人的经验或是对某一项性能较为看重,很难达到全局性的最优。所以本文想要构建一种科学完善的多目标平衡策略,通过对各因素间的相互影响作用进行数学建模后运用算法对其进行寻优求解得出一系列可行方案,以便能够针对不同的情况作出更明确也更具有说服力的选择,进而使低碳型建筑的能源体系更具有经济效益和社会效益。

## 2 低碳建筑与可再生能源集成系统理论基础

低碳建筑及可再生集成系统理论,主要是基于利用系统集成和优化,达到建筑物用能需求与持续供能间的动态供需平衡这一理念。其主要理论依据首先是建筑全寿命周期评估体系,要求考虑从建筑材料生产开始,经过施工过程,再到使用过程直至最后的拆除过程中的碳排放量全部要减少,而建筑集成可再生能源系统是减少使用过程中碳排放的重要途径。其次理论融合了能源科学中的互补效应以及协同作用。综合利用太阳能、风能和地热能等多种本地可利用能源类型,并且配合使用蓄能手段和智能化管理系统来消除单独使用一种能源会出现间歇性和不稳定的问题,以此来适应建筑物不断变化的需求负荷<sup>[1]</sup>。

【作者简介】费兴顺(1985-),男,中国山东德州人,本科,高级工程师,从事建筑工程设计研究。

### 3 低碳建筑设计中可再生能源集成系统的目标

#### 3.1 经济性目标：实现长期成本最优与投资价值最大化

在绿色建筑中引入可再生能源的第一要务就是寻求前期投入和长远效益的最佳平衡，在建筑生命周期内为物业持有方或项目投资人产生最大化的综合经济效益。其目的并不是简单地追求设备购置和施工的“最低价”，而在于实现数十年间运行的总体经济最优，好的设计方案应当有效削减项目的长期能耗成本，如光伏发一度电即可节约相应金额的外购电费开支，或者高效地热机组每年节省下来的供暖费。与此同时，系统方案还必须充分考量各种政府奖励政策带来的实惠，包括国家对新能源给予的财政补贴，减免税收的优惠政策甚至有可能获得更高的“绿电”价格等，从而尽快收回成本并取得回报。

#### 3.2 环境性目标：最大化碳减排与生态效益

可再生能源集成的主要环境目的就是要真正意义上降低建筑使用化石燃料的比例，在更大程度上减少建筑物运营期间的温室气体及其他污染排放物的排放量。而该目标的具体表现就是实现建筑在其整个生命周期中尤其是运行过程中尽可能低的净碳排放量。优化设计的目标就是更好地利用当地的太阳光、风能以及地热能等清洁能源，以此来取代电网中的煤炭发电或者天然气锅炉制热，从根本上减少了二氧化碳、二氧化硫等等物质的产生。评价环境收益除了总体的碳排放指标外还需考虑系统生产以及后期回收过程中的间接环境效应，所以要尽量采用环境负担轻、便于回收的技术设备及原材料；系统本身的经济合理利用也很重要，比如将光伏多余电量进行充电存储或者高效的利用起来而不是白白浪费掉，这也能够增加每千瓦时绿色能源产生的环境效益。最后理想状态下环境方面的实现，则是使建筑从一个单纯的能源消费者转变为一个接近“零碳”甚至是“正能量”的、有利于环境改善的生态节点。

#### 3.3 技术性能目标：保障系统稳定、高效与建筑友好

技术性能指标侧重在保障集成系统可以稳定、高效并隐蔽地内嵌到建筑物本身，成为建筑可依赖的“能源器官”。稳定性和可靠性是最基本的要求，系统应该能够在各个不同的季节甚至恶劣环境下都能够稳定地提供给建筑持续不间断的能量供给，使建筑物内的温度、湿度等环境参数及各种电器的正常运转不会受到由于能源断供的影响而产生变化。这一般要依靠多种能量形式互补（如“光伏+热泵+储能”）以及智能化的预测控制策略加以保障。高效性则是贯穿整个系统的转化、储存利用过程中的每个细节，诸如选取高转化率的光伏组件，合理搭配热泵机组与地埋管，提高能效比，用较少的装机量达到相同的功效，节约材料与空间<sup>[2]</sup>。

### 4 低碳建筑设计中可再生能源集成系统的多目标优化路径

#### 4.1 明确优化边界与建立精细化数字孪生

优化的第一步不是盲目进行计算工作，而是先给整个系统明确清晰的“战场”，搭建精准的“数字孪生”，这就需要设计师们必须到实际的设计项目地，进行一系列重要基础参数的采集及处理工作。建筑物自身一年各季的冷热电需求数据便是其核心输入变量，它决定了你所要设计的建筑内能源系统的“胃口”到底有多大，又是怎么变化的，然后当地的至少一整年的逐小时气象数据（包括太阳辐射强度，风速，气温等等），就是宝贵的资源图谱，它指明了你手头可以利用的资源有多少，它的“家底”又是什么样的，怎样变化着。再者就是建筑本身的可用空间（屋顶面积，立面情况，地下埋深）与设备间的实际限制等构成了你施展拳脚的“舞台边界”。

在此基础上，有必要在一个专业的仿真软件平台上（如 TRNSYS, EnergyPlus, HOMER 等），构建代表建筑同能源系统的交互式的数字模型。要求该模型能够准确地模拟出光伏板在不同倾斜角度以及阴影条件下的发电情况，热泵机组在不同的外部环境温度下工作效率的变化情况，以及电池组的充放电损耗等等动态过程。通过对各项指标进行精确地建模计算，可以事先考察各种技术路线的初始性能指标，筛选掉一些非常糟糕的技术组合形式，这样就可以使得接下来的较为复杂的寻优工作可以集中在这几个有希望的“跑道”，而不是在大海捞针似的一堆无用解法里面消耗自己的计算资源，保证我们的优化求解能够从一开始就有扎实可信的实际依据作为支撑。

#### 4.2 构建兼顾多元目标的量化数学模型

在清楚了明确的物理及资源限制之后，最优化的主要工作就变成了构建一个可以同时经济性、环保性和性能进行考量的“数学天平”。该数学模型要能够把设计人员的思路，转换为计算机可识别并解答的数学式子，其主要工作就是决定决策变量，一般情况下就是各种设备容量（比如光伏发电装置安装了多少千瓦，蓄能电池多少千瓦时，热泵额定制冷量/制热量是多少等等），某些时候也包含一些重要的控制策略参数（例如储能的充放电阈值）。

天平一边是一组要最大化或者最小化的目标函数。经济性指标一般被转化为全生命周期的费用进行评价，这个费用不仅是对设备购置及安装的前期投入，还要包含今后二十甚至三十年使用过程中产生的耗能费用，保养费用，设备折旧费用等等的后期投入，用统一金额数值的形式计算出长期投入费用。环境指标主要针对的是在运行期间每年削减了多少碳排放量，用实际运行期间消耗的太阳能替代掉相应量的电网等效燃煤发电或燃气锅炉产生的碳排放量来进行准确

计算。技术性能指标也可以转换成能源自给率（建筑自我能够提供的可再生能源占整个需求的百分比）或者负荷缺电率（系统不能够提供的负荷需求占全部所需百分比）的形式来考察系统的自主供应能力和稳定程度<sup>[1]</sup>。

而天秤的另一端便是诸多实际限制因素了。技术限制保证装置处于物理可行性区间之内，在这里光伏板的数量只能取正数，电池不能出现既充又放等情况；资源及建设方面的约束决定了系统规模的上限，在这里太阳能电池板的总面积不能超过屋顶可利用面积，地埋管热泵的开挖深度取决于地层构造和用地边界；负荷平衡约束是一个严格的限制条件，保证任意一模拟时刻，系统的发电量（加减储能变化）都要大于或等于建筑需求，经过这样一套数学建模之后这样一个复杂的设计问题就转换成了一个目标明确、可以通过计算寻找最优方案的问题。

### 4.3 采用先进算法求解与生成权衡方案集

针对存在许多互相矛盾的目标函数、决策变量以及复杂的限制条件组成的数学模型，传统的人工试凑或者单向寻优显然已经力不从心了，在这个时候就需要应用当代先进的各种多目标进化算法，比如 NSGA-II、MOEA/D 等强大的搜索能力来解决问题，这些算法以大自然界的进化为启发，其目的并不是得到唯一的“最优解”，而是同时对整个问题进行探测。

算法的基本思路就是，先随机生成一组代表不同装置配置的设计（族群），计算得到各个设计的经济、环保、性能方面得分。再利用“适者生存”“基因杂交突变”的法则，进行世代更替和优胜劣汰的选择。经过几百乃至上千代的演化之后，最终收敛到一系列特殊的解集，称之为“帕累托最优前沿面”。位于该前沿面上的任何一条解都有同样的“优越地位”：你不可能在此基础上进一步改善它的某一项指标（如继续节省投资），而又不让另外至少另一项指标有所牺牲（如提高碳排放或者降低自给率）。

最后交给设计师与决策者的就是这样一张“权衡菜单”，例如：方案 A 是代价最小、中度减碳；方案 B 则是以巨大投入，换取近乎零碳的运营以及超高的能源自给率；而方案 C 则是各方面相对均衡的妥协。这样的展现的最大好处就是将各项目标相互取舍的必然法则以数字的形式直观地展示出来，把主观的设计喜好选择置于全面客观的数量对比的基础之上，使之变得更加合理化、科学化。

### 4.4 基于决策者偏好完成最终方案遴选与验证

得到“帕累托最优前沿”上的一系列候选方案之后，优化的最后一步就是辅助决策者在这些候选方案中依据具

体项目的根本需求、偏好从中甄选出唯一的实施方案。这是一个技术评估和价值评判相融合的过程。为了解决这个问题就需要应用到多准则决策分析方法进行辅助。

一种通常的思路是给经济性、环保、效益这些目标设定不同的权重。比如，对于一所以建设零碳标杆为目标的大厦来说，管理者会倾向于分配较高的权重给环境目标即减碳；而对于以获得短期收益为诉求的商业地产开发，权重的天平就会倾向于经济效益目标。应用熵权法、层次分析法等手段能够合理地计算出相应权重，再结合 TOPSIS 等算法将前沿面中的全部备选方案由优至劣排序，自动选出综合分值最高的选择。而另外一种更为直观的方法是对模型做进一步的敏感性测试，在一些主要变量（未来的电价上涨幅度、碳税力度大小、装备价格降幅）发生变化的情形下，对比各个方案经济指标及环保绩效如何波动，进而考察各方案的稳健程度。

得到方案之后仍需要做最后的闭环校验。即要把经优化推荐出来的设备规模与粗略调度策略再次导入到第一步搭建好的高保真数字化仿真双胞胎模型里边，运行一年的每小时模拟，通过这次模拟检验这个设计方案的真实性能指标在复杂的天气及负荷变化情况下是否符合我们所期望的优化目的，并且对控制策略进行更详细的完善。经历了整个“建模—优化—决策—验证”的闭环流程后，可再生能源综合系统的设计也由原来的经验主义的“艺术”，变成了一种可追溯、可度量、可再现的现代工程学科。

## 5 结论

本文详细论述了基于低碳建筑可再生能源集成系统的多目标优化理论及实现方法，并形成了“建立模型—优化求解—方案筛选—模拟验证”的闭合循环体系，既很好地剖析出了成本、环境与效率三者间的内在博弈关系，在此基础上也将设计方法由以往的经验型转变为如今的数据支撑型。研究结果给实际操作带来了一种切实可行的定量决策手段。后续工作可以在考虑市场的不确定性以及政策的影响等方面加入更多的不确定参数，并向区域能源系统范围进行扩大优化，提高方法的应用性与参考价值。

### 参考文献

- [1] 王润杨,彭道刚,范钰波,等.综合能源系统动态碳核算与多目标低碳协同优化[J].动力工程学报, 2025, 45(12):2219-2228.
- [2] 姜鹤.“双碳”目标下光伏建筑表皮一体化设计研究[J].建筑与文化, 2025(7).
- [3] 张世凯.工程建设项目全生命周期碳足迹核算与减排路径设计[J].江西建材, 2025(9)