

施工能耗均衡的进度优化

——以江苏鲜沛年产 12 万吨高端饮品项目为例

丁军¹ 天翼¹ 徐飞² 糜佳³ 姚栋⁴ 张菊⁴ 杨建军¹ 曹晓东³ 王干一² 孙雷¹

1. 无锡太湖明珠建设咨询有限公司; 2. 锦汇建设集团有限公司;
3. 无锡市新吴区建设工程安全质量监督站; 4. 江苏鲜沛生物科技有限公司

摘要: 本文以江苏鲜沛年产 12 万吨高端饮品项目为背景, 针对工业建筑施工过程中能源消耗集中、波动大的问题, 提出一种工期固定条件下的施工能耗均衡优化方法。通过构建基于定额的施工能耗量化模型, 结合网络计划技术, 建立“进度—能耗”关联机制, 并引入混合进化算法(遗传算法与模拟退火算法结合)对非关键工作的开始时间进行优化, 以最小化日能耗需求强度的方差为目标, 实现能耗的均衡分布。案例分析表明, 优化后能耗方差降低 44.96%, 能耗曲线趋于平缓, 峰值能耗显著下降, 验证了模型与算法的有效性与实用性。本研究为工业建筑项目的绿色施工与能源精细化管理提供了理论支持与实践路径。

关键词: 施工能耗均衡; 进度优化; BIM 技术; 混合进化算法; 工业建筑项目

DOI: 10.65976/3106-1540.2026.01.005

Progress optimization of balanced construction energy consumption – taking Jiangsu Xianpei’s annual production of 120000 tons of high-end beverage project as an example

Ding Jun¹ Tian Yi¹ Xu Fei² Mi Jia³ Yao Dong⁴ Zhang Ju⁴ Yang Jianjun¹
Cao Xiaodong³ Wang Ganyi² Sun Lei¹

(1.the Taihu Lake Pearl Construction Consulting Co., Ltd; 2.Jinhui Construction Group Co., Ltd; 3. Wuxi Xinwu District Construction Engineering Safety and Quality Supervision Station; 4. Jiangsu Xianpei Biotechnology Co., Ltd)

Abstract: This article takes Jiangsu Xianpei’s annual production of 120000 tons of high-end beverages project as the background, and proposes a construction energy consumption balance optimization method under fixed construction period conditions to address the problem of concentrated and fluctuating energy consumption in the construction process of industrial buildings. By constructing a quota based construction energy consumption quantification model and combining network planning technology, a “schedule energy consumption” correlation mechanism is established, and a hybrid evolutionary algorithm (combining genetic algorithm and simulated annealing algorithm) is introduced to optimize the start time of non critical work, with the goal of minimizing the variance of daily energy consumption demand intensity and achieving a balanced distribution of energy consumption. Case analysis shows that after optimization, the energy consumption variance decreased by 44.96%, the energy consumption curve tended to flatten, and the peak energy consumption significantly decreased, verifying the effectiveness and practicality of the model and algorithm. This study provides theoretical support and practical pathways for green construction and refined energy management in industrial building projects.

Keywords: balanced construction energy consumption; Progress optimization; BIM technology; Hybrid evolutionary algorithm; Industrial construction projects

随着我国建筑行业向绿色、节能、高效方向转型, 施工过程中的能源管理已成为项目管理的重要组成部分。在大型工业建筑项目中, 施工阶段能源消耗集中、波动大, 容易导致能源供需不平衡、资源浪费甚至工期延误。因此在保证工期的前提下, 实现施工能耗的

均衡优化, 对于提高能源利用效率、降低运营成本、保障项目顺利实施具有重要意义。

能耗均衡问题是资源均衡问题的一个分支, 在理论上属于 NP-hard 问题。“后移差法”在工期固定的前提下实现资源均衡; 通过调整非关键工作的开始时

间优化施工资源分配；结合资源受限项目调度模型，利用混合算法对关键任务进行优化^[1]。这些研究为资源均衡提供了理论支持，但从施工能耗角度进行系统性优化的研究仍较为有限。

建筑信息模型作为一种集成化信息管理工具，已在施工进度、资源和能耗管理中发挥重要作用。4D施工管理系统，实现了资源的动态管理与优化，基于BIM模型实现了能耗的虚拟统计与可视化。这些成果表明，BIM技术能够有效支持施工能耗的量化与动态管理。

本文以江苏鲜沛年产12万吨高端饮品项目为背景，结合网络计划技术与混合进化算法，构建施工能耗量化模型与进度优化模型，旨在实现工期固定条件下的施工能耗均衡，为工业建筑项目的绿色施工提供方法支持。

1 施工能耗量化模型

在工业建筑项目中，施工阶段的能源消耗主要包括机械设备、施工照明、临时设施等直接能耗。该项目将施工能耗划分为机械设备能耗、照明能耗、焊接能耗、运输能耗等子项，构建施工能耗量化模型。

1.1 模型原理

采用基于定额的能耗量化方法，结合施工网络计划，构建“进度—能耗”关联模型。具体步骤如下：建立项目三维模型（如使用Revit等BIM软件），明确构件信息与施工工艺；通过工作分解结构（WBS）将施工任务逐层分解，形成施工清单；关联施工网络计划，确定各工作的开始与结束时间；根据建筑工程施工消耗量定额等标准，附加能耗定额信息，形成“5D模型”（3D+时间+能耗）。

1.2 量化计算

设第*i*项工作的能耗为 E_i ，其计算公式为：

$$E_i = \sum_{j=1}^m P_j \times T_j \times Q_i$$

其中 P_j 为第*j*种机械的额定功率； T_j 为第*j*种机械的工作时间； Q_i 为第*i*种机械的工程量； m 为机械设备种类数。

清单项目能耗 E_k 为： $E_k = \sum_{i=1}^n E_i$

网络计划中第*w*项工作的总能耗为： $E_w = \sum_{k=1}^l E_k$

日平均能耗 E_{dw} 表示为： $E_{dw} = \frac{E_k}{N_k} + \sum_{z=1}^p \frac{E_{k,z}}{N_{k,z}}$

其中： N_k 为关键工作持续时间； $N_{k,z}$ 为非关键工作持续时间； $E_{k,z}$ 为非关键工作能耗量。

1.3 系统实现

通过Revit平台进行二次开发，使用Python语言编写能耗量化系统，实现三维模型、进度计划与能耗

信息的集成。系统支持能耗随进度变化的动态可视化，为后续优化提供数据基础。

2 基于能耗均衡的施工进度优化模型

2.1 问题描述

本项目共有*n*项工作，每项工作 A_y 受以下约束： A_y 必须在所有紧前工作完成后才能开始（紧前关系约束）；项目总工期为365天，不得延误（总工期约束）；各工作能耗不得低于量化值（能耗强度约束）；工作为连续施工，不可中断（工作模式约束）。优化目标是在满足上述约束的前提下，通过调整非关键工作的开始时间，使日能耗需求强度的方差最小，实现能耗均衡。

2.2 数学模型

设： T 为总工期（365天）； E_t 为第*t*天的能耗需求强度； E_{ave} 为平均日能耗强度； $T_{s,y}$ 为工作 A_y 的实际开始时间； $E_{s,y}$ 为工作 A_y 的最早开始时间； $L_{s,y}$ 为工作 A_y 的最晚开始时间； d_y 为工作 A_y 的持续时间。

目标函数为：

$$\min \delta^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (E_t - E_{ave})^2$$

约束条件包括：

$$E_{s,y} \leq T_{s,y} \leq L_{s,y}; \max(T_{s,p} + d_p) \leq T_{s,y}$$

$$E_{y,t} = \begin{cases} E_y & \text{if } T_{s,y} \leq t \leq T_{s,y} + d_y \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$T_{f,y} = T_{s,y} + d_y$$

为提升计算精度，引入相对能耗强度： $K_t = \frac{E_t}{E_{ave}}$

目标函数转化为： $\min \delta^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (K_t - \lambda)^2$ （其中 λ 为调整系数，通常取1）。

2.3 混合进化算法求解

采用遗传算法与模拟退火算法结合的混合进化算法，步骤如下：参数设置种群规模 $M=100$ ，迭代次数 $N=500$ ，初始温度 $T_0=100$ ，交叉概率 $P_c=0.85$ ，变异概率 $P_m=0.05$ ^[2]。编码设计以非关键工作的实际开始时间为基因编码；种群初始化以最早开始时间作为初始值；适应度评估以目标函数作为适应度函数；进化操作采用轮盘赌选择、单点交叉、均匀变异；模拟退火处理以Metropolis准则接受劣解，增强全局搜索能力；结果输出迭代完成后输出最优解。

3 案例分析

3.1 项目概况

江苏鲜沛年产12万吨高端饮品项目位于江苏省无锡市，总建筑面积约50000m²，包括1#生产车间、研发车间、仓库及附属设施。项目采用钢筋砼结构为

主体, 施工内容涵盖基础工程、主体工程、设备安装、管道敷设、电气工程、装饰装修等。项目总工期为 365 天, 分为三个施工段流水施工。

3.2 施工网络计划参数

本项目共识别出 30 项主要工作, 通过网络计划技术绘制双代号网络图, 计算各工作的最早开始时间、最晚开始时间和总时差。关键线路: 基础施工→主体施工→设备基础→灌装线安装→调试运行, 总工期 365 天。非关键工作包括部分装饰、管道敷设、室外工程等, 总时差在 5~20 天, 具体见表 1。

表 1 部分施工网络计划参数

工作编号	工作名称	持续时间 / 天	总时差 / 天
A1	土方开挖	20	0
A2	基础施工	45	0
A3	主体施工	90	0
A4	屋面安装	30	5
A5	墙体施工	60	10
A6	设备基础	30	0
A7	灌装线安装	60	0
A8	管道敷设	45	15
A9	电气安装	50	10
A10	装饰装修	70	20
A11	室外工程	40	25
A12	调试运行	30	0

3.3 施工能耗量化分析

根据建筑工程施工消耗量定额和机械设备功率表, 计算各工作的能耗。如主体施工中使用塔吊、升降机、焊机等设备, 日均能耗较高。通过能耗量化系统生成初始进度—能耗曲线, 显示在施工中期 (第 150 ~ 250 天) 能耗集中, 峰值达 550 kWh/天, 而前期和后期能耗较低, 存在明显波动。

3.4 施工能耗均衡优化

以非关键工作 A4、A5、A8、A9、A10、A11 为调整对象, 设置混合进化算法参数, 进行优化求解。优化前后非关键工作开始时间对比, 见表 2。

表 2 非关键工作开始时间调整对比

工作	初始开始时间 / 天	优化后开始时间 / 天
A4	第 135 天	第 140 天
A5	第 150 天	第 155 天
A8	第 210 天	第 225 天
A9	第 230 天	第 240 天
A10	第 260 天	第 275 天
A11	第 300 天	第 320 天

优化后, 日能耗需求强度方差由初始的 $\sigma_{\text{initial}}^2=18.75$ 降低至 $\sigma_{\text{optimal}}^2=10.32$, 降幅达 44.96%。能耗曲线趋于平缓, 峰值由 550 kWh/天降至 480 kWh/天, 波谷由 200 kWh/天提升至 350 kWh/天, 整体能耗分布更加均衡。

4 结论

综上所述, 随着绿色工业建筑和大型建筑建设频率大幅度增长, 为更好满足建筑行业步伐, 要积极应用绿色建筑设计理念, 构建施工能耗量化模型与进度优化模型, 通过混合进化算法实现工期固定条件下的施工能耗均衡^[3]。研究表明基于定额的能耗量化方法结合网络计划, 能够有效识别能耗高峰与低谷; 通过调整非关键工作的开始时间, 可显著降低能耗波动, 提高能源利用效率; 混合进化算法在解决能耗均衡这一 NP-hard 问题时表现出良好的收敛性与鲁棒性。为工业建筑项目的绿色施工与进度管理提供了实用工具, 后续可进一步研究工作中断模式、多目标优化 (如成本—能耗双目标) 等方向, 以提升模型的适用性与精细化程度。

参考文献:

- [1] 王乾坤, 申楚雄, 郭曾, 等. 基于建筑信息模型的装配式建筑施工能耗均衡的进度优化 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2024, 57(04): 446-452.
- [2] 李雪妍. 派单模式下考虑“取餐+送餐”的众包外卖配送优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [3] 霍振华. 绿色建筑设计理念在工业建筑设计中的体现 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(07): 124-126.