

# 基于多能互补的工业园区综合能源系统规划方法研究

孙冉冉

海南欣城电力设计工程有限公司 海南 海口 570100

**摘要：**面对能源需求增长与环保压力，工业园区综合能源系统的科学规划至关重要。多能互补系统能高效整合多种能源，提升能效、降低成本和环境影响。本文结合园区用能特点，构建包含可靠性、经济性与环境效益的规划模型，并通过案例验证方法的有效性。研究结果表明，该方法可为工业园区能源系统建设提供科学支撑，助力实现可持续发展目标。

**关键词：**多能互补；工业园区；综合能源系统；规划方法

## 1 引言

工业园区是工业集聚的重要载体，能源消耗大，传统供能模式效率低、污染重。构建多能互补的综合能源系统，有助于实现能源高效梯级利用，提升供能可靠性与灵活性，降低成本与碳排放。然而，当前针对工业园区的多能互补规划方法尚不完善。本文旨在探索适用于工业园区的综合能源系统规划方法，提供理论支持与实践指导，推动园区能源结构优化与可持续发展。

## 2 工业园区能源需求特点分析

工业园区能源需求聚焦市电、光伏、储能、充电桩，虽企业类型多样，但正常运营依赖市电，且为降碳引入多种能源。其需求波动显著，受季节、生产周期及市场因素影响。季节不同，企业用能模式有别；生产任务安排与订单情况使需求短期起伏；市场变化也会干扰生产计划，影响能源需求。不过，企业分布集中，能源需求集聚，利于建设综合能源系统。可构建小型微电网，白天光伏发电，多余电量储能，晚上储能放电，实现集中供能与高效配置，降低碳排放<sup>[1]</sup>。

## 3 多能互补系统的构成与运行机制

### 3.1 系统构成

#### 3.1.1 能源供应单元

**传统能源：**如火力发电厂（燃煤或燃气发电，如50兆瓦燃气轮机联合循环发电厂效率55%-60%）、燃气锅炉（燃气燃烧供热或工业生产，10兆瓦锅炉每小时产约15吨饱和蒸汽）。**可再生能源：**太阳能光伏电站（转换效率18%-22%，10兆瓦站光照充足时日发电4-5万度）、风力发电场（单机容量几百千瓦到数兆瓦，50兆瓦场年发电1-1.2亿度）、生物质能发电厂（利用生物质发电供热，效率25%-30%，20兆瓦厂年消耗生物质原料约20万吨，发电1.2-1.5亿度）。

#### 3.1.2 能源转换单元

实现能源形式转换，如热电联产机组（燃料化学能转电能和热能，效率70%-80%，30兆瓦机组每小时发电约3万度，产热约20兆瓦）、燃气轮机（燃气化学能转电能和机械能，余热回收供热制冷，20兆瓦装置搭配余热锅炉每小时发电约2万度，回收余热产热约15兆瓦）、吸收式制冷机（热能转冷能，1000冷吨制冷机每小时耗热约7兆瓦）。

#### 3.1.3 能源存储单元

平衡能源供需，方式有电池储能（如5兆瓦/10兆瓦时锂离子电池储能系统，充放电效率90%-95%）、蓄热储能（如1000立方米水蓄热系统可储存约50兆瓦时热能）、蓄冷储能（如蓄冷量500冷吨时系统可储存约350兆瓦时冷量）。

#### 3.1.4 能源消费单元

工业园区内企业用户，能源消费特点和需求差异大，如化工企业需大量蒸汽和电力，电子企业对电力稳定性和电压质量要求高且需空调制冷能源。

## 3.2 运行机制

多能互补系统通过能源管理系统实现各单元之间的协调运行。能源管理系统根据能源需求预测、能源供应情况和能源价格等因素，制定最优的能源供应方案，合理分配各种能源的供应量，实现能源的高效利用和优化配置。在运行过程中，系统优先利用可再生能源，当可再生能源供应不足时，再启动传统能源供应设施进行补充<sup>[2]</sup>。同时，通过能源转换单元实现能源的梯级利用，提高能源的综合利用效率。能源存储单元则根据能源供需情况适时进行充放电或蓄放热（冷）操作，以平滑能源供应曲线，降低能源供应成本。

## 4 基于多能互补的工业园区综合能源系统规划方法

### 4.1 能源需求预测

综合能源系统规划的基础在于准确预测工业园区的

能源需求,可采用多种方法实现。时间序列分析适用于历史数据充分的情况,如利用ARIMA模型预测园区月度电力需求,基于过去5年的数据建模,可实现未来3年预测,平均相对误差控制在5%-8%。灰色预测(如GM(1,1)模型)适合数据稀缺的新建园区,参考类似企业数据预测热力需求,误差在10%-15%之间。神经网络(如BPNN)则适用于复杂多因素场景,通过多源数据输入预测燃气需求,误差可控制在3%-5%。同时,应结合企业生产计划、行业发展趋势及气候变化等因素,如季节性生产、新能源汽车产业发展以及温度变化对能耗的影响,以提高预测精度。

#### 4.2 能源供应方案选择

依据能源需求预测及园区可用资源,制定多种能源供应方案,需兼顾可靠性、经济性与环境效益。

##### 4.2.1 方案一:传统能源主导

对现有火电厂扩容,新建燃气锅炉房,保留太阳能光伏系统作补充。优势是技术成熟、建设周期短,能快速满足需求;缺点是能源利用效率低、依赖传统能源、污染突出,如扩容后火电厂效率40%-45%,燃煤发电污染物排放多。

##### 4.2.2 方案二:多能互补

新建大型光伏电站和风电场,改造火电厂实现热电联产,建燃气轮机发电装置与余热锅炉,配置电池和蓄热储能系统。该方案整合多种能源,实现梯级利用与优势互补,效率高、污染小,如光伏和风电可满足部分电力需求,余热回收提高综合效率,储能系统平衡供需、降低成本。

##### 4.2.3 方案三:可再生能源主导

大规模建光伏电站和风电场满足电力需求,建生物质能发电厂利用废弃物发电供热,配足能源存储设施平衡间歇性。此方案环境效益佳,可大幅减排,但建设成本高、对储能技术要求高,且间歇性影响供应可靠性,如大规模建设需大量土地资金,生物质能原料收集运输有难度。

方案选择时,要详细分析各能源供应设施的技术性能、建设与运行成本、环境影响等,如对比不同太阳能电池板性能价格,分析燃气轮机与火电厂发电效率、燃料消耗及排放,评估储能系统充放电效率、寿命与成本。

#### 4.3 规划模型构建

为优化多能互补工业园区综合能源系统规划,构建综合考虑能源供应可靠性、经济性与环境效益的模型。该模型以系统总成本最小为目标函数,并设多项约束条件。

##### 4.3.1 目标函数

目标函数为:

$$\min C = C_{inv} + C_{ope} + C_{mai} + C_{pur}$$

C为系统总成本。是能源供应设施建设成本,含设备购置、安装、建筑工程等费用,如50兆瓦太阳能光伏电站建设成本约3-4亿元,30兆瓦热电联机组约2-3亿元<sup>[3]</sup>。为运行成本,主要包括燃料、人员工资、设备运行电费等,火力发电厂燃料成本占比大,燃煤发电约0.2-0.3元/度,燃气发电约0.4-0.5元/度。是维护成本,包括设备日常维护、检修、换件等费用,约占建设成本的2%-5%。为能源购买成本,园区能源供应不足时从外部购买能源的费用。

##### 4.3.2 约束条件

能源供应可靠性约束

确保能源供应满足用户需求,即:

$$\sum_{i=1}^n E_{i,t} \geq D_t, \forall t$$

为第i种能源设施在t时刻供应量,为t时刻能源需求量,n为能源设施种类数。如电力供应需满足企业用电,避免停电。

能源平衡约束

各能源形式的供应、转换、存储和消费量应平衡,即:

$$\sum_{i=1}^n E_{i,t} + \sum_{j=1}^m E_{con,j,t} + S_{t-1} - S_t = \sum_{k=1}^p D_{con,k,t}, \forall t$$

为第j种转换设备在t时刻转换量,为t时刻存储量,为第k种消费设备在t时刻消费量,m为转换设备种类数,p为消费设备种类数。如热力平衡需考虑供应、回收、存储和消耗。

设备容量约束

能源供应和转换设备容量应在允许范围内,即:

$$E_{i,min} \leq E_{i,t} \leq E_{i,max}, \forall it$$

和分别为第i种设备最小和最大输出容量。如燃气轮机发电装置输出功率受额定功率和工况限制。

环境排放约束

限制系统污染物排放量,满足环保要求,即:

$$\sum_{i=1}^n E_{i,t} \cdot \alpha_i \leq E_{lim}, \forall t$$

为第i种设施污染物排放系数,为排放限值。如火力发电厂二氧化硫排放系数高,光伏和风电场为零,通过设定限值促使系统采用清洁能源和环保技术。

#### 4.4 模型求解算法

为求解工业园区综合能源系统规划中的复杂非线性优化问题,可采用遗传算法和粒子群算法。遗传算法通过模拟生物进化,以染色体编码方案、适应度评估及选择、交叉、变异操作迭代寻优,典型参数为种群100、迭代500代、交叉概率0.8、变异概率0.1。粒子群算法则通

过粒子间信息共享,调整速度与位置寻找最优解,常设粒子数50、迭代300代、惯性权重0.7、学习因子1.5。两者均具备强全局搜索能力,能高效求解高质量方案。

## 5 应用案例分析

### 5.1 案例园区概况

以某沿海15平方公里工业园区为例,有80余家企业,涉及电子信息、机械制造、化工等行业。现有能源设施包括30兆瓦火力发电厂、10兆瓦燃气锅炉房及约5兆瓦分散太阳能光伏发电系统。随着园区发展,能源需求增长,现有模式难满足需求,且存在效率低、污染重等问题,需重新规划综合能源系统。

### 5.2 能源需求预测

采用时间序列分析与神经网络结合的方法预测未来10年能源需求。收集过去8年电力、热力、燃气等能源的月度和年度消耗数据。先运用时间序列分析建立ARIMA模型,预测未来3年趋势;再结合企业生产计划、行业趋势、气候变化等因素构建神经网络模型输入变量,如预计产值、新入驻企业数、夏季高温天数等,输出能源需求量,通过训练样本提高预测精度。

预测显示,电力需求将从40兆瓦增至70兆瓦,热力需求从20兆瓦增至40兆瓦,燃气需求从8万立方米/天增至12万立方米/天,具体数据如下表:

表一 预测显示表

年份	电力需求(兆瓦)	热力需求(兆瓦)	燃气需求(万立方米/天)
第1年	42	22	8.5
第2年	45	25	9
第3年	48	28	9.5
第4年	52	32	10
第5年	56	35	10.5
第6年	60	38	11
第7年	63	40	11.5
第8年	65	42	12
第9年	68	44	12
第10年	70	45	12

### 5.3 能源供应方案制定

根据预测结果和园区能源资源,制定三种方案:

#### 5.3.1 方案一:传统能源扩容

对火力发电厂扩容,增加20兆瓦机组,新建15兆瓦燃气锅炉房,保留太阳能光伏发电系统。建设成本约2.3亿元(火力发电厂扩容1.5亿元,燃气锅炉房0.8亿元),预计年运行成本约1.2亿元。

#### 5.3.2 方案二:多能互补优化

新建20兆瓦太阳能光伏电站和30兆瓦风力发电场,

改造火力发电厂实现热电联产,建设20兆瓦燃气轮机发电装置及配套余热锅炉,配置8兆瓦/16兆瓦时锂离子电池储能系统和1500立方米水蓄热系统。建设成本约6.8亿元(各部分费用相加),预计年运行成本约0.8亿元。

#### 5.3.3 方案三:可再生能源大规模应用

大规模建设40兆瓦太阳能光伏电站和50兆瓦风力发电场,建设25兆瓦生物质能发电厂,配置两套10兆瓦/20兆瓦时锂离子电池储能系统和两座2000立方米水蓄热系统。建设成本约10.2亿元(各部分费用相加),预计年运行成本约1亿元。

### 5.4 规划模型求解与结果分析

采用遗传算法求解三种方案规划模型,对比分析系统总成本、能源供应可靠性、环境效益等指标:

#### 5.4.1 系统总成本

方案一10年总成本约14.3亿元(建设2.3亿元+运行12亿元);方案二约14.8亿元(建设6.8亿元+运行8亿元),虽建设成本高,但运行成本低,总成本最低;方案三约20.2亿元(建设10.2亿元+运行10亿元),建设成本和储能设施成本高。

#### 5.4.2 能源供应可靠性

方案一和方案二可靠性高,能满足园区需求。方案一通过扩容和新建保障稳定性,方案二通过多能互补和储能系统平衡供需。方案三因可再生能源间歇性,依赖外部能源供应,可靠性相对较低,如连续阴天或无风时发电量下降,可能导致供应紧张<sup>[4]</sup>。

### 结语

本文研究了基于多能互补的工业园区综合能源系统规划方法,构建了兼顾可靠性、经济性与环境效益的模型,并通过案例验证有效性。研究表明,多能互补系统通过协同运行与智能调度,可提升能效、降低成本与碳排放,增强供能稳定性。未来需融合大数据与AI优化负荷预测,探索动态调控策略,提升系统适应性,并在更多园区推广应用,推动工业用能绿色低碳转型。

### 参考文献

- [1]王美,陈凯.基于多能互补的工业园区综合能源规划设计[J].广东科技,2019,28(06):65-67.
- [2]杨宇.多能互补综合能源系统可靠性评估及规划研究[D].中南大学,2023.
- [3]高洁,朱方亮,卢有麟,等.浅谈多能互补清洁能源基地开发规划[J].水力发电,2023,49(10):7-11.
- [4]张晓彤,陈玉蛟,张伟,等.基于源网荷储的综合能源多能互补协同优化规划研究[J].石河子科技,2025,(02):25-26.