

# Urban Energy Planning Method Based on Graph Theory

Ruixiang Wang<sup>1,2,3</sup>, Hai Li<sup>1,2,3</sup>, Rongji Xu<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

<sup>2</sup>National Virtual Simulation Demonstration Centre for Experimental Energy and Buildings Education, Beijing

<sup>3</sup>Beijing Engineering Research Centre of Sustainable Energy and Buildings, Beijing

Email: wangruixiang@bucea.edu.cn, 18510783520@163.com

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2017; accepted: Dec. 6<sup>th</sup>, 2017; published: Dec. 13<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Based on the idea of graph theory, this paper proposes a method to solve the planning problem of urban energy system with multi-source and multi-path. The main content of this method is to optimize the supply and demand path of the energy system by establishing a general model of the energy flow network, defining the objective function (carbon emission indicator) and assigning the carbon emission equivalent coefficient corresponding to the energy conversion path as the weight to optimize the supply and demand path of the energy system. This method is conducive to promoting the construction of a modern energy system represented by green, low-carbon and renewable energy, and provides ideas for the planning and optimization of energy systems in mega-cities or urban agglomerations.

## Keywords

Energy Planning Method, Graph Theory, Energy Flow Network, Low-Carbon City

---

# 基于图论的城市能源规划方法

王瑞祥<sup>1,2,3</sup>, 李海<sup>1,2,3</sup>, 徐荣吉<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京

<sup>2</sup>建筑用能国家级虚拟仿真实验教学示范中心, 北京

<sup>3</sup>北京市建筑能源高效综合利用工程技术研究中心, 北京

Email: wangruixiang@bucea.edu.cn, 18510783520@163.com

收稿日期: 2017年11月22日; 录用日期: 2017年12月6日; 发布日期: 2017年12月13日

---

## 摘要

本文基于图论思想, 提出了一种可较好地解决多源多汇多路径的城市能源系统的规划问题的方法。此方

文章引用: 王瑞祥, 李海, 徐荣吉. 基于图论的城市能源规划方法[J]. 可持续能源, 2017, 7(6): 108-114.

DOI: 10.12677/se.2017.76012

法的主要内容是通过建立能流网络通用模型,定义目标函数(碳排放指标)并将能量的转化路径对应的碳排放当量系数作为权重赋值,对能源系统供需路径进行组合优化。此方法有利于促进构建以绿色低碳、可再生能源为代表的现代能源体系,为特大城市或城市群的能源系统规划和优化提供思路。

## 关键词

能源规划方法, 图论, 能流网络, 低碳城市

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

科学合理的能源规划对城市低碳发展具有重要意义[1]。基于此,诸多学者对能源规划理论和方法进行了探索研究。在区域层面,于航[2]提出了社区能源综合规划方法,为实现区域能源系统效率最大化;黄子硕[3]提出了面向能源规划的建筑总能系统简化焓分析方法,为实现在供需平衡的前提下总化石能源成本最低;Swisher JN [4]提出了 IRP 综合资源规划方法,为实现需求侧的能源利用率达到最高从而降低区域的碳强度。在城市层面,付林[5]提出了一种基于动态和空间分布的城市能源规划方法,对城市热力、燃气和电力等能源基础设施系统进行综合规划;龙惟定[6]提出了城市能源的 P-U-C 分析方法,以推进低碳城市的建筑能源规划进程。在省级、国家级层面,李政[7]、张明[8]、易经纬[9]利用能流图的方法对省级、国家级的能源系统进行分析,研究能源流动方向和利用效率等重要环节;陈荣[10]提出了以 MESSAGE 模型耦合能源需求 MAED 模型为基础的能源规划方法,提高了省级可再生能源规划的规范性和科学性。

但是,以上述为代表的能源规划方法较少涉及能源结构、用能方式、路径耦合、环境效益指标等内容,主要以单向、局部规划为主。在区域层面,多以燃料成本、能源利用率、终端节能率为目标进行规划;在城市层面,局限于强调供应安全及供需总量平衡,电力、热力、燃气规划缺乏协调和沟通,多能源多需求的能网缺乏多能互补及耦合;在省级、国家级层面,能流图是较好的分析方式,但消耗端的不合理分类致使城市建筑能源系统难以进行整体规划分析。综上,针对大城市或城市群的多源多汇多路径的能源网络,现有的理论方法不能科学地进行完整规划。因此,为满足未来能源系统发展形势,本文提出了基于图论的城市能源规划方法,建立能流系统网络通用模型,为特大城市或城市群的能源系统规划和优化提供思路,促进城市化节能减排进程。

## 2. 城市能源规划

### 2.1. 低碳城市化发展的必然性

城市化是人类文明进程的必然趋势,城市系统作为一个生态节点起着重要的承接作用,关联着人类活动与生态系统的互联互通,其中能源作为一个主导性因素在城市中的流动以及各类能源的匹配利用均反作用于人类生活和生态环境。长久以来,为追求经济效益迅速发展,城市能源系统并未得到高度重视和完整规划,致使我国正面临经济效益和环境效益相悖的高碳化发展的严峻挑战。2009年哥本哈根联合国气候变化大会后,人类共同意识到应该理性地认识气候变化,中国在哥本哈根气候峰会上提出到2020年单位GDP二氧化碳排放将比2005年下降40%~45%的目标。因此综合考虑生态环境、国际责任、未来可持续发展等多个目标,低碳城市化发展势在必行。

## 2.2. 城市建筑能源规划的重要意义

城市建筑作为重要载体,是能源利用的主要区域,能源的生产、运输、转换、利用等多过程贯穿于生活各环节。以北京市 2011 年能源消费统计为例,建筑能耗的碳排放比重高达 44% [11],如何规划并优化城市建筑能源系统,是促进低碳城市化的一个重大战略问题。

针对中国这样“富煤、少油、缺气”的能源状况,在能源利用过程中化石能源的依赖比重过高,势必会对城市可持续发展、生态安全保障产生阻碍作用。因此必须从城市建筑能源系统的规划层面入手,在满足各种终端需求的前提下,优化匹配多源多汇多路径的能流网络,以环境友好作为一个重要参考指标考虑到能源系统的源端输入、能源转换、能源输送、终端利用等全过程,以保障建筑能源系统低碳化,进而推进城市可持续发展。

## 3. 图论思想

图论是组合数学的一个分支,是离散数学的重要组成部分[12]。它起源于 18 世纪民间广传一个游戏难题,即哥尼斯堡七桥问题。在 1736 年,欧拉发表的图论首篇论文——《哥尼斯堡七桥问题无解》,给出了最具有说服力的证明,也引出了著名的图论思想。其涉及的问题多且广泛,问题外表简单朴素,本质上却十分复杂深刻。在历经 200 多年的发展后,图论已经积累了大量的理论和成果,应用领域也逐步扩大。

### 3.1. 图论的基本概念

图是二元组  $G = (V, E)$  的集合,  $V(G)$  是图的点集,  $E(G)$  是边集。图论中的图就是指事物与事物之间的关系网,通常用节点表示具体事物,节点之间连线并加以修饰就表示两者之间的特定关系。在给定每条边一个特定方向后的图就称为有向图。在给一个图的边赋予一定意义的权值  $W_{ij}$  后,这个图就称为有权图,即  $G = (V, E, W)$ 。实际复杂网络中的图被赋予不同的权值后就代表着不同的实际意义,根据图中点、边、权的性质不同,就有不同的图论模型,也就相应产生了最小树问题、最短路问题、最大流问题、最优化问题等,使图论模型可以广泛地应用于各类实际问题。

### 3.2. 图论的应用

图论学科又可以分为不同的模块,以解决不同目标的问题。图论思想作为一种分析方法,主要借助点和线的关系表示具体情况,可大大简化复杂问题的分析过程,因此广泛应用于实际生活中,可以简化分为以下几类:

- 1) 连通与匹配问题:用于网络中物质的流通性问题、鲁棒性分析、可达性分析等。
- 2) 遍历问题:可简述为一笔画问题,用于邮递、物流运输、人员搜救等。
- 3) 染色问题:其思想可应用于化学物品等需隔离物质的存储、归类,会议安排等问题。
- 4) 网络流问题:给定网络赋予权值之后,可进行园区选址、系统的流量、费用优化等。

构成客观世界的三大基础是物质、能量和信息。目前,图论思想在物流网络、计算机信息工程领域已经有了广泛的结合,本文将讨论图论思想与能量流系统的结合应用。

## 4. 基于图论的城市能源规划方法

### 4.1. 基于图论的城市能源规划思想的提出

图是关系的数学表示。针对城市建筑能源系统,可以看成由不同能流以满足不同终端需求的复杂网络,即多源多汇多路径的能流网。为简化分析,可分为能源输入、能源加工与转换、终端能源消费三部分。其中能源输入就是指煤、石油、天然气、可再生能源等一次能源的输入以及区域电网的电力调入;终端能源

消耗就是指建筑用户端的热、电、冷需求；能量转化环节较为复杂，因为该阶段转换方式多、转换设备多、参与的系统多，并且相对于能源输入和能源消耗而言，能源加工与转化环节具有承接过渡作用。

根据图论学科思想，结合当今能源系统亟待解决的问题，提出一种新的能源规划思想。对城市建筑能源系统进行规划和优化，达到源头入手、过程控制的目的。为避免能源加工转换环节的多系统、多方式、多设备的繁琐，根据能量形式的转化特点进行简化分类，包括以煤、石油、天然气为主的化石燃料的化学能→热能转换形式、化学能→电能转化形式；以太阳能、地热能为主的可再生能源→热能转换形式、可再生能源→电能的转换形式；若区域内不存在自主电力生产或者不能满足负荷需求时，则引入外来电网作为直接电力输送以满足用户需求。详细的转换方式、转换设备见表 1。

#### 4.2. 基于图论的城市能源系统模型

将城市建筑能源系统按照图论思想进行建模分析，分别用系列节点 P(provide)、T(transfer)、C(consume) 代表城市单元的能源输入、能量形式转换、终端能量消耗。各个节点之间的连线代表能流路径的流动状态。在不增加整体模型的复杂性同时，定义路径权值函数作为权重赋值，决策出路径的权值指标比较。具体节点定义见表 2。

按照设定好的节点、能源网络的流动、耦合及利用方式，构建基于图论的建筑能源网络流模型图，如图 1 所示。

定义路径因子  $C_{i,j,k}$ ，其中， $i$  为输入端能源种类； $j$  为能量转换方式； $k$  为建筑终端能源需求。

$$\begin{cases} C_{i,j,k} = 0, & \text{当不存在路径, 使得第 } i \text{ 种能源经过第 } j \text{ 种转换方式以满足第 } k \text{ 种需求} \\ C_{i,j,k} = 1, & \text{当存在 1 条路径, 使得第 } i \text{ 种能源经过第 } j \text{ 种转换方式以满足第 } k \text{ 种需求} \\ C_{i,j,k} = n, & \text{当存在 } n \text{ 条路径, 使得第 } i \text{ 种能源经过第 } j \text{ 种转换方式以满足第 } k \text{ 种需求} \end{cases}$$

以 P 为源，C 为汇，生成 P-T-C 能源网络路径矩阵，其元素即为路径因子  $C_{i,j,k}$ 。从路径矩阵可知，该城市建筑能源流动模型共有 28 条路径匹配以满足建筑终端的热、电、冷需求，其中当  $k = C_1$  时，共有 9 条路径、当  $k = C_2$  时，共有 5 条路径、当  $k = C_3$  时，共有 14 条路径。

$$\text{Path matrix} = \begin{pmatrix} C_{P_1,T_1,C_1} & \cdots & C_{P_1,T_3,C_3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{P_3,T_1,C_1} & \cdots & C_{P_3,T_3,C_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

“碳足迹”与城市能源规划的结合对于低碳城市的营建具有重要指导意义。结合我国节能减排的严峻形势，本文以城市能流网络碳排放总量最小为优化目标，根据上述基于图论的城市能源规划模型，在图 1 中给予 P-T-C 能量流动过程赋予碳排放权值，生成连通附权图。如路径矩阵所示，满足同一种需求可以有多种匹配路径，定义碳排放函数作为分析指标，进行路径分析比较，从而在保障用户端需求的前提下，进行多能流路径耦合的组合优化。

在计算能流路径碳排放时，参考 IPCC 碳排放计算指南[13]，结合本文的图论能流图模型，定义路径碳排放权值数学模型：

$$E_{\text{PTC}} = \sum_{i=1}^n E_i \times C_i \quad (1)$$

式中： $E_{\text{PTC}}$  为城市能源系统各能流路径的碳排放值总量； $E_i$  为各种输入能源的流量； $C_i$  为输入端所涉及能源种类的碳排放因子。

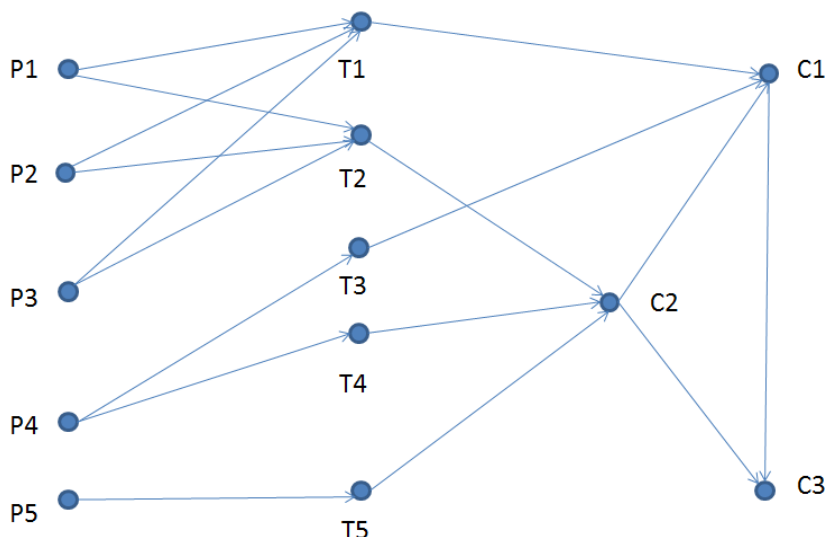
则针对城市能源网络的碳排放权值优化目标为：

**Table 1.** Energy system energy conversion methods and required equipment or systems  
**表 1.** 能源系统能量转换方式及所需设备或系统

能源输入	能量转换形式	设备或系统
煤炭	化学能→热能	炉子、燃煤锅炉、燃烧器
石油	化学能→热能→机械能→电能	燃气轮机、热力发电机
天然气	热能→冷能	吸收式制冷
太阳能、 地热能等可再生能源	辐射能→热能	热水器、太阳灶、光化学反应
	辐射能→电能	太阳能电池、光电效应
	辐射能→电能→机械能	太阳能发电机
区域电网输入	热能→	地热供暖
	电能→	区域电网、智能电网

**Table 2.** Node labeling and representative meaning in the Network  
**表 2.** 节点标号及网络中代表意义

节点名称	代表意义	节点名称	代表意义	节点名称	代表意义
P1	煤炭输入	T1	化→热转换	C1	热需求
P2	石油输入	T2	化→电转换	C2	电需求
P3	天然气输入	T3	可→热转换		
P4	可再生能源输入	T4	可→电转换	C3	冷需求
P5	区域电网输入	T5	电网→		



**Figure 1.** Building energy network flow model based on graph theory  
**图 1.** 基于图论的建筑能源网络流模型

$$\min \sum E = E_c \times C_c + E_o \times C_o + E_g \times C_g + E_{re} \times C_{re} + E_e \times C_e \quad (2)$$

式中： $E_c$ 为煤炭的能源活动量； $C_c$ 为煤炭的碳排放因子； $E_o$ 为石油的能源活动量； $C_o$ 为石油的碳排放因子； $E_g$ 为天然气的能源活动量； $C_g$ 为天然气的碳排放因子； $E_{re}$ 为太阳能、地热能等可再生能源的能

源活动量； $C_{re}$  为太阳能、地热能等可再生能源的碳排放因子； $E_e$  为区域电网的电力输入量； $C_e$  为区域电网的碳排放因子。

该模型的建立将碳足迹与城市能源系统规划相结合，为满足同种需求的不同路径提供比较依据。通过建立以能源系统的总碳排放值最小作为优化目标，对城市建筑能源系统进行优化和规划。

### 4.3. 城市能源系统规划及优化方法应用

在上述基于图论的城市能源规划模型确立后，应从需求侧至供应侧进行规划分析。对终端节点进行负荷预测、对转换节点进行设备比较及方式选取、对各路径过程进行指标函数附值比较、在优化目标约束下进行路径组合优化进而调整输入节点的能源结构。具体步骤为：

1) 针对所规划城市或城市群地区，进行终端的热、电、冷静态负荷预测以及动态负荷分布预测。

2) 根据规划城市的实际情况，如政策安排、能源状况等因素，删除或添加系列 P 节点。比较并选择 T 节点的工况，将光伏、光热、热泵、燃气热电冷三联供系统与常规能源体系充分融合，积极推动多种能源系统高效耦合。

3) 确定 n 种能量输入载体的碳排放因子，将碳排放附权函数结合路径矩阵确定出不同路径的碳排放矩阵，比较满足同种需求的不同能流路径的碳排放值；确定目标函数中各能源节点的约束条件，进行混合线性规划，以确定多源多汇多路径网络在目标函数下的最优组合匹配，优化能源结构。

## 5. 结论

本文在分析了多种传统能源规划方法的特点的基础上，提出了一种基于图论思想的能源规划方法，以解决多源多汇多路径的能源规划问题。通过建立能流系统网络通用模型，定义目标函数(如碳排放指标)，将能量的转化路径对应的碳排放当量系数作为权重赋值，对能源系统供需路径进行组合优化。这种扁平化、节点式、网络状的能源规划思想更加注重能源结构、路径耦合、环境效益等多环节，可为大城市或城市群的能源系统规划和优化问题提供思路和建议，对追求经济 - 能源 - 环境的协调发展以及促进低碳城市演变具有重要的现实意义。

## 基金项目

国家可再生能源建筑应用科技研发及产业化项目(00351911023)。国家自然科学基金青年基金项目(51506004)。

## 参考文献 (References)

- [1] 华贲. 低碳时代的中国城市能源规划[J]. 建筑科学, 2010, 26(12): 1-6.
- [2] 于航. 社区能源综合规划及其方法初探[J]. 暖通空调, 2014, 44(12): 13-16.
- [3] 黄子硕. 面向社区能源规划的建筑总能系统模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(2): 292-310.
- [4] Swisher, J.N., Gilberto, D.M.J. and Redlinger, R.Y. (1997) Tools and Methods for Integrated Resource Planning Improving Energy Efficiency and Protecting the Environment, 19.
- [5] 付林, 郑忠海, 江亿, 等. 基于动态和空间分布的城市能源规划方法[J]. 城市发展研究, 2008, 15(A1): 146-149.
- [6] 龙惟定. 低碳城市的区域建筑能源规划[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [7] 李政. 基于能源平衡表的中国能流图[J]. 中国能源, 2006, 28(9): 5-10.
- [8] 张明. 基于能流图的山东省能源消耗分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(7): 46-50.
- [9] 易经纬, 赵黛青, 蔡国田. 广东省能流图与能源平衡分析[J]. 区域能源, 2010, 15(4): 95-101.
- [10] 陈荣. 基于 MESSAGE 模型的省级可再生能源规划方法[J]. 清华大学学报, 2008, 48(9): 1526-1528.
- [11] 叶祖达, 王静懿. 中国绿色生态城区规划建设:碳排放评估方法、数据、评价指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社

社, 2015.

[12] 钱颂迪等《运筹学》教材编写组. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

[13] IPCC. (2010) 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [EB/OL].  
<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-9219, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [se@hanspub.org](mailto:se@hanspub.org)