

## 基于不确定条件下的北京电源规划优化模型

梁宇希<sup>1</sup>, 黄国和<sup>1,2</sup>, 林千果<sup>2</sup>, 张晓萱<sup>1</sup>, 牛彦涛<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学能源与环境研究中心, 北京 102206;

2. Environmental Systems Engineering Program, Faculty of Engineering, University of Regina, Regina, Sask S4S OA2, Canada)

**摘要:** 电源规划是电力系统中非常重要的规划, 直接影响系统今后运行的可靠性、经济性、电能质量、网络结构及其将来的发展。以北京地区为例, 建立了一个不确定性电源规划优化模型。本模型引入区间混合整数线性规划方法, 可以有效地解决电源规划模型中存在的确定性问题和发电机组的装机扩建问题。结果表明: 北京市将初步建立起以煤、气发电为主, 新能源和可再生能源发电等为补充的多元化电源结构, 为首都经济社会发展和人民生活水平的提高提供安全可靠、稳定充足的电力供应。

**关键词:** 不确定性; 电源规划; 区间规划; 装机扩建; 优化

### Optimization models for Beijing's generation expansion planning under uncertainties

LIANG Yu-xi<sup>1</sup>, HUANG Guo-he<sup>1,2</sup>, LIN Qian-guo<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-xuan<sup>1</sup>, NIU Yan-tao<sup>1</sup>

(1. Energy and Environmental Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Environmental Systems Engineering Program, Faculty of Engineering, University of Regina, Regina, Sask S4S OA2, Canada)

**Abstract:** Generation expansion planning, which plays a vital role in electric power system, has a great influence on the reliability, economics, electricity quality, network structure and development of electric power system in the future. In this study, an uncertainty optimization model for Beijing's generation expansion planning is developed. An interval parameter integrating mixes-integer programming techniques is introduced, which can effectively handle not only the uncertainties expressed as interval numbers, but also the installed power generation capacity-expansion issues. And the application shows that a diversified electricity structure, which is supplied through coal fired electricity and nature gas fired electricity mainly, new energy and reproducible energy et al as a supplement, will be established. It would provide steady and plenteous electricity for the economic and social development of Beijing, and also, for improving our people's lives.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China(973)(No. 2005CB724200 and No. 2006CB403307).

**Key words:** uncertainty; generation expansion planning; interval programming; capacity-expansion; optimization

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0053-07

## 0 引言

电力是国民经济发展的基础, 在社会发展中起着至关重要的作用。随着经济社会的发展和人民生活水平的提高, 人们对电的需求量越来越大, 对电力安全的要求也越来越高。电力工业将如何健康、稳定有序地发展, 迫切需要符合经济社会发展和人民生活需要、符合科学发展观的行业规划进行指导。电源规划是电力系统电源布局的战略决策, 在电力系统规划中处于十分重要的地位, 规划的合理与否,

将直接影响系统今后运行的可靠性、经济性、电能质量、网络结构及其将来的发展<sup>[1-2]</sup>。

近年来, 电力系统的规模和发电机组容量不断增大, 再加上发电机组类型及所采用的一次能源的多样化, 使电源结构日益复杂; 电力市场的出现也使电源规划模型发生了重大变化<sup>[3]</sup>。传统的电源规划目标函数大多都是系统总费用最小, 包括电厂的投资费用和运行费用<sup>[4]</sup>。伴随着经济发展, 人口激增及人民生活水平的提高, 能源的需求量持续增大, 作为发电原材料的化石燃料价格也在持续增长, 逐渐促进了电力系统对可再生资源的开发和利用<sup>[5-6]</sup>。对于不同的国家和地区, 可以利用的发电技术和发电原料是各不相同的。针对这种情况, 要通过控制

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目资助  
(NO. 2005CB724200 和 NO. 2006CB403307)

各种类型机组装机容量以达到其特有的发展需求<sup>[7-8]</sup>。电网峰谷差距大,直接影响到电网系统的安全。强调调峰问题的模型出现,建立了考虑峰谷约束的电源规划模型,很好地解决了日益严峻的电网调峰问题<sup>[9-10]</sup>。进入21世纪,环保的呼声越来越高,在进行电源规划工作时,必须考虑环境保护对电厂建设的影响<sup>[11-12]</sup>。

规划过程中采用不同的发电技术、各种发电技术对应的成本、发电技术对环境的影响和电源规划政策等都对电源规划有很大的影响。电源规划的目标是在能够满足电量需求的前提下,使系统的费用最小。目标函数包括发电所需原料的费用,发电技术费用和发电装机扩建的费用。这些影响因素并不表现为一个确定的数值,通常以区间数表示,比如发电原料煤的价格为400~520元/t,燃煤机组的平均煤耗是335~349 g/kWh和2020年预测北京全社会用电量将达到1 327~1 485 亿kWh等。考虑到现实情况存在的各种不确定性因素,黄国和等人<sup>[13]</sup>提出用于解决模型中含有区间不确定性的数学规划方法——区间线性规划。区间数 $x^\pm$ 被定义为上下界已知,但其概率分布未知的区间。 $x^\pm = [x^-, x^+] = \{t \in x \mid x^- \leq x \leq x^+\}$ ,其中 $x^+$ ,  $x^-$ 为 $x^\pm$ 的上下界,当 $x^- = x^+$ 时, $x^\pm$ 为确定数。区间线性规划有效地改善了前人研究的模糊线性规划、随机线性规划等理论,并且得到了广泛应用<sup>[13-17]</sup>。将区间线性规划方法引入到电源规划模型中,建立不确定电源规划优化模型,可以有效解决目标函数和约束中系数的不确定性问题,得到稳定、可行的区间解。决策者可根据实际情况,在解区间内调整决策变量值,得到满意的电源规划方案。

## 1 规划方法

线性规划法是目前应用较为广泛的数学方法。线性规划的数学模型可以叙述为:在满足一组线性约束条件下,求多变量线性函数的最优值(最大值或最小值)<sup>[4]</sup>。其主要优点是计算简单,求解的规模较大,适合用来求解电源规划问题。线性规划的标准模式由式(1)~(3)表示:

$$\text{Minimize } f = CX \quad (1)$$

Subject to

$$AX \leq B \quad (2)$$

$$x_j \geq 0, x_j \in X \quad (3)$$

其中:

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n]$$

$$X^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

$$B^T = [b_1, b_2, \dots, b_n]$$

$$A = \{a_{ij}\}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$$

但实际电源规划模型中目标函数、约束的系数和参数很多都是不确定的。区间线性规划模型<sup>[13]</sup>可以有效地解决这个问题,模型的一般形式由式(4)~(6)表示:

$$\text{Minimize } f^\pm = C^\pm X^\pm \quad (4)$$

Subject to

$$A^\pm X^\pm \leq B^\pm \quad (5)$$

$$x_j^\pm \geq 0, x_j^\pm \in X^\pm \quad (6)$$

其中:

$$C^\pm = [C^-, C^+]$$

$$(a_{ij})^\pm = [(a_{ij})^-, (a_{ij})^+] \quad \forall i, j$$

$$B^\pm = [B^-, B^+]$$

通过交互式算法<sup>[14]</sup>,将区间线性规划模型转化为两个确定的子模型进行求解,具体形式如下。首先求解子模型 $f^-$ :

$$\min f^- = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^- x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^- x_j^+ \quad (7)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}^+| \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- / b_i^- + \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}^-| \text{Sign}(a_{ij}^-) x_j^+ / b_i^+ \leq 1$$

$$x^- \geq 0, x^- \in X^\pm, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中: $|a_{ij}|$ 为 $a_{ij}$ 的绝对值; $\text{Sign}(a_{ij})$ 为 $a_{ij}$ 的正负符号。求解模型,得 $f_{\text{opt}}^-$ ,  $x_{\text{opt}}^-$  ( $j = 1, 2, \dots, k_1$ ),  $x_{\text{opt}}^+$  ( $j = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, n$ )。

再求解子模型 $f^+$ :

$$\min f^+ = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^+ x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^n c_j^+ x_j^- \quad (10)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^{k_1} |a_{ij}^-| \text{Sign}(a_{ij}^-) x_j^+ / b_i^+ + \quad \forall i \quad (11)$$

$$\sum_{j=k_1+1}^n |a_{ij}^+| \text{Sign}(a_{ij}^+) x_j^- / b_i^- \leq 1$$

$$x_j^+ \geq x_{\text{opt}}^-, j = 1, 2, \dots, k_1 \quad (12)$$

$$x_j^- \leq x_{jopt}^+, j = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, n \quad (13)$$

$$x^+ \geq 0, x^+ \in X^+, j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

通过求解子模型  $f^+$ , 可得出  $f_{jopt}^+$ ,  $x_{jopt}^+$  ( $j = 1, 2, \dots, k_1$ ),  $x_{jopt}^-$  ( $j = k_1 + 1, k_1 + 2, \dots, n$ )。区间线性规划的最优解为:

$$x_{jopt}^\pm = [x_{jopt}^-, x_{jopt}^+] \quad \forall j; f_{jopt}^\pm = [f_{jopt}^-, f_{jopt}^+]$$

## 2 电源规划模型建立

本模型参考已经得到广泛应用的能源系统模型<sup>[17-19]</sup>, 重点突出能源模型中电源规划部分, 构建电源规划模型。电源规划以整个电力系统的费用最小为目标函数, 考虑了发电过程中各种能源需求量和各种发电技术(如化石能源和可再生能源)的费用, 还包括各种发电技术的扩容问题, 以获得所需的电量, 得到合理的电力资源配置。约束条件中涉及质量平衡、发电技术扩容和污染物排放控制等约束。电力系统中各种能源的价格、发电技术成本和用电需求量等都不是确定的数值, 故本模型采用区间数对其进行表述。不确定性电源规划模型表示如下:

目标函数

$$\text{Min } f^\pm = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n (P_{jt}^\pm * Z_{jt}^\pm) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^n (PV_{kt}^\pm * X_{kt}^\pm) + \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n \sum_{t=1}^T (Y_{kmt}^\pm * IC_{kmt}^\pm * EC_{kmt}^\pm)$$

约束条件

1) 质量平衡约束

$$DI_t^\pm + DM_t^\pm + X_{k,t}^\pm * FE_{k,t}^\pm \leq Z_{j,t}^\pm \quad (16)$$

$$X_{k,t}^\pm * FE_{k,t}^\pm \leq UP_{j,t}^\pm \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^n X_{k,t}^\pm + Z_{j,t}^\pm \geq DIE_t^\pm + DME_t^\pm \quad (18)$$

2) 装机容量约束

$$\sum_{m=1}^n (RC + \sum_{p=1}^t (Y_{m,p}^\pm * EC_{m,p}^\pm)) * UCAP \geq X_{k,t}^\pm \quad (19)$$

3) 能源约束

$$Z_{j,t}^\pm \leq UP_{j,t}^\pm \quad (20)$$

4) 非负约束

$$X_{k,t}^\pm, Z_{j,t}^\pm \geq 0, \quad (21)$$

$$0 \leq Y_{i,m,t}^\pm \leq 1, \forall i, j, m, k, t$$

5) 扩容约束

$$\sum_{m=1}^n Y_{kmt}^\pm \leq 1 \quad (22)$$

6) 污染物排放约束

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T X_{j,t}^\pm * SN_{j,t}^\pm \leq PLE_t^\pm \quad (23)$$

其中:  $f^\pm$  表示电源规划费用;  $j$  表示能源类型;  $k$  表示供电形式;  $m$  表示各种供电形式扩容方案;  $Z_{j,t}$  决策变量表示  $t$  阶段第  $j$  种能源的供应量 (万 tce);  $X_{k,t}$  决策变量表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式的电量 (亿 kWh);  $Y_{k,m,t}$  决策变量表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式的  $m$  种方案是否扩容;  $P_{j,t}$  表示  $t$  阶段所需的能源的供应价格 (元/t);  $PV_{k,t}$  表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式的可变费用 (元/kWh);  $IC_{k,m,t}$  表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式采用第  $m$  种扩容方案的花费 (元/MW);  $EC_{k,m,t}$  表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式采用第  $m$  种扩容方案的扩容量 (MW);  $DI_t$  表示工业能源需求量;  $DM_t$  表示市政能源需求量;  $RC$  表示各种发电技术机组原有装机 (MW);  $FE_t$  表示供电系数;  $UP_{j,t}$  表示  $t$  阶段第  $j$  种能源的上限;  $UCAP$  表示转化系数;  $SN_{j,t}$  表示污染物排放系数;  $PLE_t$  表示污染物排放量上限 (万 t/a)。

## 3 案例研究

### 3.1 北京电力系统背景介绍

随着北京经济社会的发展和人民生活水平的提高, 北京的电力需求保持较高的增长速度。2001~2005 年期间, 北京地区的全社会用电量由 399.94 亿 kWh 增长到 570.54 亿 kWh, 年平均增长率为 9.3%; 整点最大负荷由 6 994 MW 增长到 10 538 MW, 年平均增长率为 10.7%。到 2005 年底北京市发电装机容量 4 556 MW, 其中煤电装机 2 897 MW、抽水蓄能装机 800 MW、水电装机 180 MW、燃油装机 655 MW、余热发电装机 24 MW, 可供电力达到 3 400 MW 左右。

随着产业结构的调整, 北京市的用电结构发生了一定变化: 第一产业用电量比重持续缓慢下降, 用电量比重由 2001 年的 3.3% 下降到 2005 年的 2%; 第二产业用电量比重有大幅度下降, 用电量比重由 2001 年的 51.65% 下降到 2005 年的 49%; 第三产业用电增长势头良好, 用电量比重由 2001 年的 28.26% 上升到 2005 年的 33.41%; 城乡居民生活用电快速增长, 用电量比重由 2001 年的 5.90% 上升到 2005 年的 15.59%<sup>[20]</sup>。

本文将依据北京地区的能源和电力需求水平 (见表 1) 进行为期十五年的电源规划。每五年为一个规划周期, 与国家的五年规划相对应 (2006~2010 年为第一周期、2011~2015 年为第二周期和第

三个规划期 2016~2020 年)。北京资源匮乏, 主要能源如煤、天然气等依赖外部购入。燃煤发电对环境影响较大, 不宜新建常规燃煤电厂; 天然气资源稀缺, 发电成本高, 出于长远供应的安全性和经济性考虑, 天然气电厂也不宜多建。但为满足调峰供热和安全需要, 可采取“总量控制、适度发展”的原则建设一定数量的燃气电厂。新能源和可再生能源发电技术有着广泛的应用前景, 鉴于当前的经济和技术水平要适度发展。本文重点解决的问题: 1) 满足电量需求; 2) 建立以煤、气发电为主, 新能源和可再生能源发电等为补充的多元化电源结构; 3) 保证供电环境安全; 4) 有效调节电网峰谷差问题; 5) 控制污染物排放总量, 改善大气环境质量。

表 1 负荷和用电量预测<sup>[20]</sup>

Tab.1 Forecast of load and electricity

	2008 年	2010 年	2020 年
负荷/MW	[13556, 15000]	[15833, 16700]	[26870, 29130]
用电量/亿 kWh	[695, 745]	[750, 820]	[1327, 1485]

### 3.2 模型应用

结合北京的能源资源现状, 建立电源规划模型如下<sup>[17-19]</sup>:

目标函数

$$\text{Min } f^{\pm} = \sum_{t=1}^3 \sum_{j=1}^4 (P_{jt}^{\pm} * Z_{jt}^{\pm}) + \sum_{t=1}^3 \sum_{k=1}^9 (PV_{kt}^{\pm} * X_{kt}^{\pm}) + \sum_{k=1}^9 \sum_{m=1}^3 \sum_{t=1}^3 (Y_{kmt}^{\pm} * IC_{kmt}^{\pm} * EC_{kmt}^{\pm}) \quad (24)$$

约束条件

(1) 质量平衡约束

$$\text{煤: } DIC_t^{\pm} + DMC_t^{\pm} + X_{1,t}^{\pm} * FEC_{1,t}^{\pm} + X_{2,t}^{\pm} * FEC_{2,t}^{\pm} \leq Z_{1,t}^{\pm} + Z_{2,t}^{\pm} \quad (25)$$

$$\text{天然气: } DIN_t^{\pm} + DMN_t^{\pm} + X_{3,t}^{\pm} * FEN_t^{\pm} \leq Z_{3,t}^{\pm} \quad (26)$$

$$\text{水电: } X_{4,t}^{\pm} * FEH_t^{\pm} \leq UP_{5,t}^{\pm} \quad (27)$$

$$\text{抽水蓄能: } X_{5,t}^{\pm} * FEP_t^{\pm} \leq UP_{6,t}^{\pm} \quad (28)$$

$$\text{风能: } X_{6,t}^{\pm} * FEW_t^{\pm} \leq UP_{7,t}^{\pm} \quad (29)$$

$$\text{太阳能: } X_{7,t}^{\pm} * FES_t^{\pm} \leq UP_{8,t}^{\pm} \quad (30)$$

$$\text{垃圾: } X_{8,t}^{\pm} * FEG_t^{\pm} \leq UP_{9,t}^{\pm} \quad (31)$$

$$\text{生物质: } X_{9,t}^{\pm} * FEB_t^{\pm} \leq UP_{10,t}^{\pm} \quad (32)$$

$$\text{电量平衡: } X_{1,t}^{\pm} + X_{2,t}^{\pm} + X_{3,t}^{\pm} + X_{4,t}^{\pm} + X_{5,t}^{\pm} + X_{6,t}^{\pm} + X_{7,t}^{\pm} + X_{8,t}^{\pm} + X_{9,t}^{\pm} + Z_{4,t}^{\pm} \geq DIE_t^{\pm} + DME_t^{\pm} \quad (33)$$

(2) 装机容量约束

燃煤装机扩容:

$$\sum_{m=1}^3 (RCC_1 + \sum_{p=1}^t (Y_{1,m,p}^{\pm} * EC_{1,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{1,t}^{\pm} \quad (34)$$

燃煤热电联产装机扩容:

$$\sum_{m=1}^3 (RCC_2 + \sum_{p=1}^t (Y_{2,m,p}^{\pm} * EC_{2,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{2,t}^{\pm} \quad (35)$$

天然气热电联产装机扩容:

$$\sum_{m=1}^3 (RCN + \sum_{p=1}^t (Y_{3,m,p}^{\pm} * EC_{3,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{3,t}^{\pm} \quad (36)$$

$$\text{水电: } \sum_{m=1}^3 (RCH + \sum_{p=1}^t (Y_{4,m,p}^{\pm} * EC_{4,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{4,t}^{\pm} \quad (37)$$

抽水蓄能:

$$\sum_{m=1}^3 (RCP + \sum_{p=1}^t (Y_{5,m,p}^{\pm} * EC_{5,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{5,t}^{\pm} \quad (38)$$

$$\text{风能: } \sum_{m=1}^3 (RCW + \sum_{p=1}^t (Y_{6,m,p}^{\pm} * EC_{6,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{6,t}^{\pm} \quad (39)$$

太阳能:

$$\sum_{m=1}^3 (RCS + \sum_{p=1}^t (Y_{7,m,p}^{\pm} * EC_{7,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{7,t}^{\pm} \quad (40)$$

$$\text{垃圾: } \sum_{m=1}^3 (RCG + \sum_{p=1}^t (Y_{8,m,p}^{\pm} * EC_{8,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{8,t}^{\pm} \quad (41)$$

$$\text{生物质: } \sum_{m=1}^3 (RCB + \sum_{p=1}^t (Y_{9,m,p}^{\pm} * EC_{9,m,p}^{\pm})) * UCAP \geq X_{9,t}^{\pm} \quad (42)$$

(3) 能源约束

$$Z_{j,t}^{\pm} \leq UP_{j,t}^{\pm} \quad j=1,2,3,\dots,10 \quad (43)$$

(4) 非负约束

$$X_{k,t}^{\pm}, Z_{j,t}^{\pm} \geq 0, \quad (44)$$

$$0 \leq Y_{i,m,t}^{\pm} \leq 1, \forall i, j, m, k, t$$

(5) 扩容约束

$$\sum_{m=1}^3 Y_{kmt}^{\pm} \leq 1 \quad (45)$$

(6) 污染物排放约束

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^3 X_{j,t}^{\pm} * S_{j,t}^{\pm} \leq PLES_t^{\pm} \quad (46)$$

$$\sum_{j=1}^3 \sum_{t=1}^3 X_{j,t}^{\pm} * N_{j,t}^{\pm} \leq PLEN_t^{\pm} \quad (47)$$

其中:  $f^{\pm}$  表示电源规划费用;  $j$  表示能源类型,  $j=1,2,\dots,10$  ( $j=1$  本地煤;  $j=2$  外购煤;  $j=3$  外购天然气;  $j=4$  外购电;  $j=5$  水电;  $j=6$  抽水蓄能;  $j=7$  风力发电;  $j=8$  太阳能发电;  $j=9$  垃圾发电;  $j=10$  生物质);  $k$  表示供电形式,  $k=1,2,\dots,9$  ( $k=1$  燃煤;  $k=2$  燃煤热电联产;  $k=3$  燃气热电联产;  $k=4$  水电;  $k=5$  抽水蓄能;  $k=6$  风力发电;  $k=7$  太阳能发电;  $k=8$  垃圾发电;  $k=9$  生物质);  $m$  表示各种供电形式扩容方案,

$m=1,2,3$ ;  $Z_{j,t}$  决策变量表示  $t$  阶段第  $j$  种能源的供应量 (万 tce);  $X_{k,t}$  决策变量表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式的电量 (亿 kWh);  $Y_{k,m,t}$  决策变量表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式的  $m$  种方案是否扩容;  $P_{j,t}$  表示  $t$  阶段所需的能源的供应价格 (元/t);  $PV_{k,t}$  表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式的可变费用 (元/kWh);  $IC_{k,m,t}$  表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式采用第  $m$  种扩容方案的花费 (元/MW);  $EC_{k,m,t}$  表示  $t$  阶段第  $k$  种供电形式采用第  $m$  种扩容方案的扩容量 (MW);  $DIC_t$  表示工业用煤量 (t);  $DMC_t$  表示市政用煤量 (t);  $DIN_t$  表示工业用天然气量 (亿  $m^3$ );  $DMN_t$  表示市政用天然气量 (亿  $m^3$ );  $DIE_t$  表示工业用电量 (kWh);  $DME_t$  表示市政用电量 (kWh);  $RCC$  表示煤电原有装机 (MW);  $RCN$  表示燃气供电原有装机 (MW);  $RCH$  表示水电原有装机 (MW);  $RCP$  表示抽水蓄能原有装机 (MW);  $RCW$  表示风电原有装机 (MW);  $RCS$  表示太阳能发电原有装机 (MW);  $RCG$  表示垃圾供电原有装机 (MW);  $RCB$  表示生物质供电原有装机 (MW);  $FEC_{kt}$  表示供电系数,  $k=1$  燃煤供电,  $k=2$  燃煤热电联产;  $FEN_t$  表示燃气供电系数;  $FEH_t$  表示水电系数;  $FEP_t$  表示抽水蓄能供电系数;  $FEW_t$  表示风电系数;  $FES_t$  表示太阳能供电系数;  $FEG_t$  表示垃圾发电系数;  $FEB_t$  表示生物质发电系数;  $UP_{j,t}$  表示  $t$  阶段第  $j$  种能源的上限;  $UCAP$  表示转化系数;  $S_{j,t}$  表示二氧化硫排放系数;  $N_{j,t}$  表示氮的氧化物排放系数;  $PLES_t$  表示二氧化硫排放量上限 (万 t/a);  $PLEN_t$  表示氮的氧化物排放量上限 (万 t/a)。

#### 4 结果分析

不确定性电源规划的结果表示如下: 表 2 为用于发电的各种能源的需求量。本地煤在三个规划周期内的需求量分别是: [67.86, 75], [47.5, 52.5] 和 [33.93, 37.5] 万吨标准煤 (tce)。外购煤的需求量为: [1320.4, 1420.5], [1307.7, 1554.7] 和 [1403.8, 1750.2] 万 tce, 伴随着北京日益增长的电力需求, 煤的需求总量也在增加, 但煤量的增长速度低于天然气需求量的增长速度。规划期内的外购天然气量为: [732.83, 851.22], [870.81, 942.21] 和 [1123.04, 1181] 万 tce。

表 2 能源需求量

Tab. 2 Solutions for energy supplies

(万 tce)	第一周期	第二周期	第三周期
本地煤	[67.86, 75]	[47.5, 52.5]	[33.93, 37.5]
外购煤	[1320.4, 1420.5]	[1307.7, 1554.7]	[1403.8, 1750.2]
外购天然气	[732.83, 851.22]	[870.81, 942.21]	[1123.04, 1181]

图 1 为规划期内各种发电技术的扩建方案。扩容的发电技术有: 燃煤热电联产、燃气热电联产、抽水蓄能发电、风力发电、垃圾焚烧发电和生物质发电, 单纯燃煤发电和水力发电仍以原有的装机进行发电。如第一周期内, 只有燃气热电联产扩容 2 000 MW, 抽水蓄能扩建 500 MW, 风电扩建 100 MW, 垃圾焚烧扩建 120 MW 和生物质发电扩容 150 MW。随着北京经济社会的发展和人民生活水平的提高, “十一五” 期间北京的电力需求保持较高的增长速度, 但是又要满足可持续发展的环境保护的要求, 规划期内计划扩建的都是低排放的甚至是零排放的发电技术。抽水蓄能的扩建用于调峰。燃煤发电机组环境压力较大, 故不扩建。水电因北京周边条件所限, 无法新建。

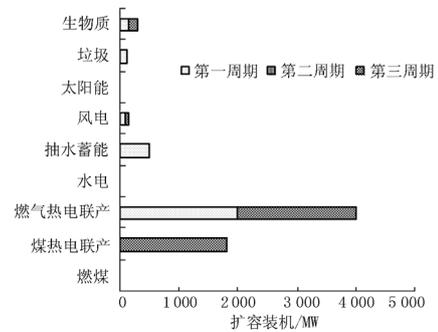


图 1 发电装机扩容方案

Fig.1 Capacity expansion scheme for electricity-generation facilities

表 3 电源规划发电量和费用

Tab. 3 Solutions for electricity productions and total cost

(亿 kWh)	第一周期	第二周期	第三周期
燃煤发电	[30.59, 42.75]	[32.92, 42.75]	22.5
燃煤热电联产	124.41	[124.41, 176.61]	[151.15, 257.17]
燃气热电联产	[45, 67.69]	82.7	123.6
水电	[4.21, 5.48]	[4.21, 5.48]	[4.21, 5.48]
抽水蓄能	[12.63, 19.73]	[12.63, 19.73]	[12.63, 19.73]
风电	1	2	3
光伏发电	0	0	0
垃圾发电	4.32	8.64	8.64
生物质发电	4.5	4.5	9.47
合计	[217.8, 261.1]	[272, 342.4]	[335.2, 449.6]
外购电	[453.3, 539.8]	[544, 569.6]	670.4
费用/亿元	[1473.14923, 1809.3264]		

根据以上的扩建方案, 得到电源规划的发电量如表 3 所示。燃煤发电量基本保持不变: [30.59, 42.75], [32.92, 42.75] 和 22.5 亿 kWh。燃煤热电联

产随着装机容量的增加，发电量有所增加：124.41，[124.41, 176.61]和[151.15, 257.17]亿 kWh。燃气热电联产作为一种清洁能源，为电量需求做出很大的贡献：[45, 67.69]，82.7 和 123.6 亿 kWh。水电和抽水蓄能发电量基本保持不变。风力发电量逐年增加。太阳能光伏发电因为其效率低，发电量少，故电源规划模型中没有体现，但实际情况中应酌情发展。垃圾焚烧发电和生物质发电形式的出现，用于调整和优化发电结构，满足日益增长的用电需求。规划周期内的费用为[1473.14923, 1809.3264]亿元。

为了更清晰地表现各种发电技术的发电量关系，将其用圆圈图表示如下，图 2、3、4 分别为第一周期、第二周期和第三周期的电源规划结果，里外两圈分别表示区间结果的上下界。可以看出发电量最大的为燃煤热电联产，分别占供电总量的 [46%，55%]，[45%，51%]和[44%，58%]。燃煤热电联产的总效率可以达到 80%以上，远大于传统的单独发电的效率，而且调整了热能与电能的关系，使能量的质量得到合理的利用<sup>[21]</sup>。其次是燃气热电联产。我国天然气资源稀缺，且价格昂贵，发电成本高，出于长远供应安全性和经济性考虑，燃气电厂规模不宜过大，本电源规划中，燃气热电联产供电量分别占供电总量的[20%，25%]，[24%，30%]和[27%，37%]。新能源和可再生能源的发电量在本规划中也有很好的体现，分别为[3.8%，4.5%]，[4.4%，5.6%]和[4.7%，6.3%]。外购电是北京必不可少的补充，为了保证北京电源的安全，本地产电量与外购电量之间要符合一定的比例。如图 5 所示，图中方框的上下边表示电量的上下界。规划结果可以满足本地电源发电与外购电量之间的 1:2 的关系。

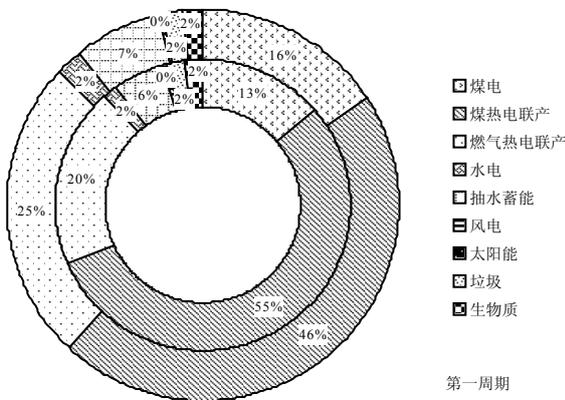


图 2 第一周期电源规划结果

Fig.2 Solutions of generation expansion planning in period I

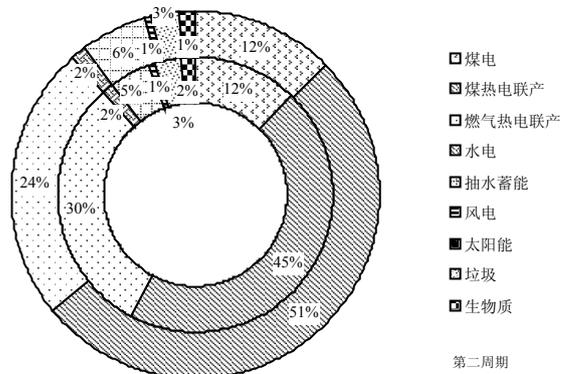


图 3 第二周期电源规划结果

Fig.3 Solutions of generation expansion planning in period II

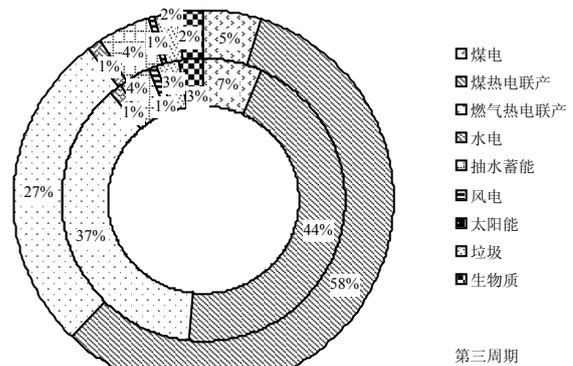


图 4 第三周期电源规划结果

Fig.4 Solutions of generation expansion planning in period III

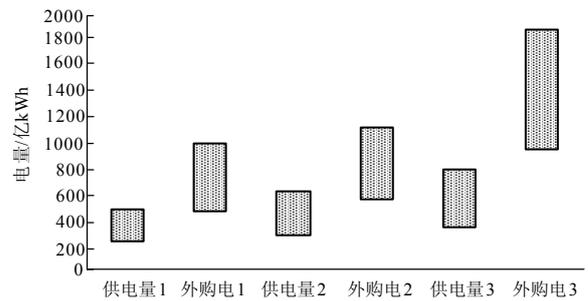


图 5 供电量和外购电量的关系

Fig.5 Relationship of electricity productions and imports

### 5 结论

本文以北京地区为例，建立了一个不确定性电源规划优化模型。结果表明：北京市将初步建立起以煤、气发电为主，新能源和可再生能源发电等为

补充的多元化电源结构, 为首都经济社会发展和人民生活水平的提高提供安全可靠、稳定充足的电力供应。将区间线性规划方法引入到电源规划模型中, 建立不确定电源规划优化模型, 可以有效解决目标函数和约束中系数和参数的不确定性问题, 得到稳定、可行的区间解。决策者可根据实际情况, 在解区间内调整决策变量值, 得到满意的电源规划方案。

### 参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统规划基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.  
WANG Xi-fan. The basis knowledge of power system planning [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [2] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.  
WANG Xi-fan. The optimization and planning of power system[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.
- [3] 李小明, 陈金富, 段献忠, 等. 电源规划模型及求解方法研究综述[J]. 继电器, 2006, 34 (23): 78-83.  
LI Xiao-ming, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong, et al. A survey of modeling and optimization methods on generation expansion planning[J]. Relay, 2006, 34 (23): 78-83.
- [4] 侯煦光. 电力系统最优规划[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991.  
HOU Xu-guang. The optimization of power system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1991.
- [5] Allan R N, Corredor Avella P. Reliability and economic assessment of generating systems containing wind energy sources[J]. Proc IEE, 1985, 132 (1) .
- [6] Farghal S A, Roshdy Abdel Aziz M. Generation expansion planning including the renewable energy sources[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3 (3): 816-822.
- [7] Park Jong-Bae, Park Young-Moon, Won Jong-Ryu, et al. Least-cost generation expansion planning based on an improved genetic algorithm[C]. //Power Engineering Society Summer Meeting. 1999:1043-1047.
- [8] Park Jong-Bae, Park Young-Moon, Won Jong-Ryu, et al. An improved genetic algorithm for generation expansion planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (3): 916-922.
- [9] 杨斌, 余岳峰, 杜建军. 改进的遗传算法在中期发电规划中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25 (8): 33-36.  
YANG Bin, YU Yue-feng, DU Jian-jun. Application of improved genetic algorithm in midterm power generation planning[J]. Power System Technology, 2001, 25 (8): 33-36.
- [10] 张少华, 言茂松, 程道平, 等. 调峰电源的系统规划与评价[J]. 电网技术, 1995, 19 (4): 11-16.  
ZHANG Shao-hua, YAN Mao-song, CHENG Dao-ping, et al. System planning and evaluation for peak-regulation plans[J]. Power System Technology, 1995, 19 (4): 11-16.
- [11] Kim Young-Chang, Ahn Byong-Hun. Multicriteria generation-expansion planning with global environmental considerations[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 1993, 40 (2): 154-161.
- [12] Su Ching-Tzong, LI Guor-Rung, Chen Jiann-Jung. Long-term generation expansion planning employing dynamic programming and fuzzy techniques[C].// Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology. 2000: 644-649.
- [13] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. An interval linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty[J]. Civil Engineering Systems, 1992, 9: 319-335.
- [14] Huang G H. IPWM: An interval parameter water quality management[J]. Engineering Optimization, 1996, 26: 79-103.
- [15] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. Development of a grey critical path method for construction planning[J]. Engineering Optimization, 1997, 28: 157-174.
- [16] 张晓萱, 黄国和, 席北斗, 等. 不确定性的电厂动力配煤优化模型[J]. 华东电力, 2008, 36 (6): 73-76.  
ZHANG Xiao-xuan, HUANG Guo-he, XI Bei-dou, et al. Coal blending optimization models for power plants under uncertainties[J]. East China Electric Power, 2008, 36 (6): 73-76.
- [17] Lin Q G, Huang G H. IPEM: An interval-parameter energy systems planning model[J]. Energy Sources, Part A: Taylor & Francis, 2008, 30 (14-15): 1382-1399.
- [18] Liu Y Y. A dynamic two-stage energy systems planning model for saskatchewan[D]. Canada: University of Regina, 2006.
- [19] 牛彦涛, 黄国和, 张晓萱, 等. 北京市能源系统模型的研究[J]. 环境工程, 2009, 27: 591-594.  
NIU Yan-tao, HUANG Guo-he, ZHANG Xiao-xuan, et al. Research on energy system model in Beijing[J]. Environmental Engineering, 2009, 27: 591-594.
- [20] 北京市发展改革委员会, 《北京市“十一五”时期电力发展规划》, 2006. [http://www.bjpc.gov.cn/fzgh/guihua/11\\_5\\_zx/11\\_5\\_yb/200612/t148053.htm](http://www.bjpc.gov.cn/fzgh/guihua/11_5_zx/11_5_yb/200612/t148053.htm)
- [21] 孙奉仲, 杨祥良, 高明. 热电联产技术与管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.  
SUN Feng-zhong, YANG Xiang-liang, GAO Ming. Cogeneration technology and management[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

收稿日期: 2009-08-30; 修回日期: 2009-10-23

作者简介:

梁宇希 (1983-), 女, 硕士研究生, 从事环境与能源、电力系统优化研究。E-mail: liangyuxi0@163.com