

# Generator Maintenance Scheduling Model and Algorithm for Balanced System Reserve

Fei Wang<sup>1</sup>, Xiaodong Chen<sup>1</sup>, Shaoqing Guo<sup>2</sup>, Honghui Kuang<sup>2</sup>, Hongwei Huang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electric Power Dispatching and Control Center, Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou,

<sup>2</sup>Beijing QU Creative Technology Co., Ltd., Beijing

Email: [kuanghonghui@263.net](mailto:kuanghonghui@263.net)

Received: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2014; revised: Apr. 8<sup>th</sup>, 2014; accepted: Apr. 20<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 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

---

## Abstract

Balanced system reserve capacity or reserve rate is an important principle of generators maintenance scheduling. This paper proposes a generators maintenance scheduling model which maximizes the lower bound of system reserve rates, in order to achieve balanced system reserve rates. This model avoids the computational difficulties from which traditional approaches suffer because of the quadratic objective function of minimum variance, and greatly improves the computation speed and robustness of optimization. Meanwhile, this paper proposes a heuristic approach which finds the active constraints and modifies them in next iteration, so as to continuously optimizes the lower bound of system reserve rates at remaining periods, thus expanding the optimization space compared to traditional approaches and reaching better optimality regarding balance of reserve rates. On the one hand, this paper establishes a rigorous mathematical model to optimize generators maintenance scheduling model, thus guarantees the global optimality; on the other hand, heuristic approach is employed to improve computational efficiency. Case studies show the optimality and efficiency of the proposed model and algorithm, indicating that the method can be effectively applied to industrial practices.

## Keywords

Generator Maintenance Scheduling, Balanced System Reserve, MILP

---

## 系统备用均衡的发电机组检修模型与算法

王 斐<sup>1</sup>, 陈晓东<sup>1</sup>, 郭少青<sup>2</sup>, 匡洪辉<sup>2</sup>, 黄红伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广州供电局有限公司电力调度控制中心，广州

<sup>2</sup>北京清大科越科技有限公司，北京

Email: [kuanghonghui@263.net](mailto:kuanghonghui@263.net)

收稿日期：2014年3月2日；修回日期：2014年4月8日；录用日期：2014年4月20日

## 摘要

等备用容量或等备用率是安排发电机组检修计划的一项重要原则。本文针对系统备用率时间均衡的目标，建立了最大化备用率下界的发电机组检修计划模型，从而避免了传统方法以方差最小为二次目标函数带来的求解困难，提高了检修计划模型的优化计算速度和鲁棒性。在迭代计算过程中，通过启发式方法寻找起作用约束条件，并在下一次优化计算中对其进行修改，在非起作用约束对应的时段中继续对备用率下界进行优化，与传统方法相比拓展了优化空间，更好地达到备用率均衡度最优的目标。一方面，本文建立了严格的数学模型对机组检修计划进行优化，保证了全局最优性；另一方面，本文利用启发式方法提高了最优解的搜索速度。算例表明本文模型与算法具有良好的优化精度与计算速度，完全能够满足工程实践要求。

## 关键词

检修计划，系统备用均衡，混合整数规划

## 1. 引言

发电机组的检修计划安排属于电力系统结构性优化的范畴，机组的检修停运直接关系到电能供给的安全性，影响电网的发电容量充裕度。此外，发电机组检修计划的合理安排，能够降低由于设备故障而产生的运行成本，以及减小发电机组的随机停运率。发电机组检修计划的安排本质上是一个带有约束条件的优化问题。随着电力系统规模的不断扩大，随着用户对于供电质量要求的日益增高，对检修计划方案的公平性、低能耗性等方面的要求不管提高，检修计划的安排问题中需要考虑的约束条件不断增多，检修计划优化问题的规模、复杂程度均大大增加。

国内外对于发电机组检修计划的安排算法进行了广泛的研究，提出了考虑机组检修停运之后电力系统各时段备用容量相等、备用率相等[1]的等备用原则，考虑了发电机组随机停运的等风险度原则[1][2]，以及系统电量不足期望最小等原则[3]。随着电力市场的发展，有学者提出了电力市场环境下载发电机组检修计划的安排方法[4][5]，以及综合考虑经济性、安全性等指标的检修计划安排方案[6]。目前，发电机组检修计划的算法主要包括数学规划方法与启发式算法两种。数学规划方法包括线性规划、非线性规划、混合整数规划[7]、动态规划等算法；启发式算法是在研究周期内，运用反复试探的方法使所求解的检修计划尽量逼近目标函数的要求，使得所求得解尽量接近最优解。由于发电机组检修计划安排问题的大规模性、离散性，直接应用数学规划模型求解的方法往往受到问题复杂程度的限制，出现计算机内存溢出、得不到可行解的情况；而启发式算法虽然可以在计算过程中较为灵活的添加约束条件，能够求解大规模优化问题，但是单纯的启发式算法并不能考虑到不同机组间检修计划的互相影响[8]，在对最优解的寻找方面具有一定的局限性。

文献[9]提出了将各时段备用率的下界最大化来优化各时段备用率均衡度的方法，该方法将备用率方差最小的二次目标函数转化为线性函数，提高了检修计划优化模型的求解速度，但是该算法只进行一次

优化计算,在备用率最低时段之外的时段内,尚可以对备用率下界进行优化,尚存在备用率均衡度的优化空间。

为此,本文基于发电机组检修计划的等备用率原则,提出了一种混合整数规划与启发式算法相结合的方法,在文献[9]方法的基础上,进行多次迭代计算,逐次寻找优化问题中的起作用约束条件,并修改对应约束条件,在不起作用约束条件对应的时段内继续对备用率均衡度进行优化,以实现等备用率的检修计划安排目标。相对于直接用二次规划求解的算法,该算法目标函数为线性函数,在求解规模、求解速度上均优于二次规划模型。最后通过算例,通过与二次规划模型比较,验证了该算法的可行性及有效性。

## 2. 数学模型

### 2.1. 目标函数

在实际的检修工作中,设备的检修持续时间一般以数周计,因此在本文中,考虑以周为单位,在一年52周中对各机组的年度检修计划进行安排(不考虑跨年检修的情况)。

若直接以各时段备用率的方差最小作为优化问题的目标函数,对应的是一个目标函数为二次函数的混合整数规划模型,目标函数为:

$$\min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (M_t - \bar{M})^2 \quad (1)$$

其中, $T$ 是考虑的时段总数,若为年度检修计划,以周为时段,则 $T=52$ ;  $M_t$ 是系统在时段 $t$ 的备用率,由式(2)计算;  $\bar{M}$ 是系统各个时段的备用率平均值,由式(3)计算。

$$M_t = \frac{1}{D_t} (\sum G - \sum G_m - D_t) \quad (2)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T M_t \quad (3)$$

$\sum G$ 表示系统总装机容量;  $\sum G_m$ 表示系统在时段 $t$ 安排的检修容量总和;  $D_t$ 表示时段 $t$ 系统负荷最大值。

式(1)~(3)是求解系统备用率均衡的传统数学模型,其含义明确、直观,但由于其目标函数非线性,因此求解速度较慢。当检修计划模型规模较大时,求解起来具有一定的困难。

为此,本文采用将各时段备用率的下界最大化的方法达到备用率均衡的目标,同时使目标函数线性化,便于求解。其目标函数为:

$$\max M \quad (4)$$

$M$ 为各时段备用率的下界(最小值),即对于每个时段 $t$ ,均有式(5)成立:

$$M_t \geq M \quad (5)$$

### 2.2. 约束条件

#### (1) 检修连续性约束

电力设备的检修工作具有连续性的特征,为使停电次数最少以及避免检修资源的浪费,检修一旦开始,就应该持续到检修工作完成为止。为了表示检修计划的连续性约束条件,本文将机组开始检修的状态标记 $x_{i,t}$ 作为决策变量进行优化。 $x_{i,t}=1$ 说明第 $i$ 台机组在时段 $t$ 开始进行检修, $x_{i,t}=0$ 说明第 $i$ 台机组不从时段 $t$ 开始检修。于是,各机组在各时段的检修状态 $y_{i,t}$ 可以由 $x_{i,t}$ 表出( $y_{i,t}=1$ 说明

第  $i$  台机组在时段  $t$  处于检修停运状态, 出力为零;  $y_{i,t} = 0$  说明第  $i$  台机组在时段  $t$  正常运行), 如式(6)所示:

$$\begin{cases} y_{i,t} = y_{i,t+1} = \dots = y_{i,t+d_i-1} = 1, & \text{if } x_{i,t} = 1 \\ y_{i,t} = 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $d_i$  表示第  $i$  台机组的检修持续时间, 当机组  $i$  从时段  $t$  开始检修时 ( $x_{i,t} = 1$ ), 从时段  $t$  开始之后的  $d_i$  个时段对应的检修状态变量均为 1。

#### (2) 机组检修意愿区间约束

在调度中心安排检修计划之前, 各机组应申报各自的检修意愿区间, 即机组最早开始检修的时段  $T_{i1}$  与机组最迟开始检修的时段  $T_{i2}$ 。若  $t \in [T_{i1}, T_{i2}]$ , 有  $x_{i,t} = 1$  或  $x_{i,t} = 0$ ; 若  $t \notin [T_{i1}, T_{i2}]$ , 则均有  $x_{i,t} = 0$ 。

#### (3) 机组检修需求约束

对于每一台机组  $i$ , 应有:

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} = 1 \quad (7)$$

即每台机组在所考虑的时间周期(如一年)内必须进行并且只进行一次检修。

#### (4) 检修空间约束

对于每个时段  $t$ , 有:

$$\sum_{i=1}^N y_{i,t} G_i \leq S_t \quad (8)$$

$$S_t = \sum G - D_t \quad (9)$$

$G_i$  为第  $i$  台机组的容量;  $N$  为发电机组数;  $S_t$  表示系统在时段  $t$  的检修空间, 即满足负荷后, 系统尚剩余的发电容量。当  $S_t < 0$  时, 令  $S_t = 0$ 。

#### (5) 检修资源约束

对于每个时段  $t$ , 有:

$$\sum_{i=1}^N y_{i,t} q_i \leq Q_t \quad (10)$$

其中,  $q_i$  表示机组  $i$  检修占用的某种资源的数量(比如检修人员等),  $Q_t$  表示系统在时段  $t$  所能供给的该种资源的最大值。

#### (6) 备用率下界约束

对于每个时段  $t$ , 有:

$$M_t = \frac{1}{D_t} (\sum G - \sum G_{mt} - D_t) \quad (11)$$

$$M_t \geq M \quad (12)$$

其中:

$$G_{mt} = \sum_{i=1}^N y_{i,t} G_i \quad (13)$$

式(4)、(6)~(13)构成了本文发电机组检修计划优化的混合整数规划模型。

### 3. 求解方法

#### 3.1. 优化空间拓展

文献[9]提出了备用率下界最大化的方法,其目标函数如式(3)与式(5)所示。该方法在一定程度上能够使得各时段的备用率均匀化,但具有一定的局限性。由于该算法只进行一次优化计算,只确定了某时段的备用率最小值,只有该时段的备用率约束条件为起作用约束,其余时段的备用率约束条件均为不起作用约束。在剩余时段中,尚存在备用率均衡度的优化空间。

为此,本文提出一种将混合整数规划与启发式策略相结合的算法。通过迭代计算,修改每次优化中起作用约束条件,不断拓展备用率均衡度在不起作用约束对应时段中的优化空间。

首先,在初始约束条件下对检修计划规划问题进行求解,在进行完一次优化计算之后,寻找该次优化过程中的起作用约束,确定当前的优化过程中备用率下界对应的时段。该时段的备用率为全时段中的最小值,其备用率约束条件为起作用约束,限制了备用率下界值的提高,在其余的时段中,尚可以对备用率的均衡度进行进一步优化,因此应该取消该时段的约束条件对备用率下界的约束作用,同时应保存上一次优化计算的结果。于是,对该时段的备用率下界约束条件按此进行修改:将该时段的备用率下界确定为该次优化结果中的备用率最小值,该时段的备用率下界不再作为决策变量参与备用率均衡度的优化。在当前优化结果的前提下,对余下时段的备用率均衡度进行优化。依此进行迭代计算,直至所有时段的备用率均为确定的值,整个优化模型不再具有剩余优化空间为止。

#### 3.2. 迭代计算过程

下面给出具体的迭代计算过程:

(1) 求解式(4)、(6)~(13)模型,得到初始解  $M_1^*$ 。

(2) 寻找该次优化中的起作用约束,即寻找优化结果中备用率值为  $M_1^*$  的时段,假设为  $t_1$  时段,对其备用率下界约束式(12)的右端项修改为  $M_1^*$ ,即:

$$M_{t_1} \geq M_1^* \quad (14)$$

如此修改约束条件,一方面保留了该时段备用率的下界值,对上一次的优化结果进行了保存;另一方面松弛了该时段的备用率对决策变量  $M$  的约束作用,拓展了优化空间,使得在下一轮的优化过程中,其余时段的备用率均衡度往更优的方向发展。

(3) 对整个检修计划优化模型进行逐次迭代计算,假设第  $k$  次优化的结果为  $M_k^*$ ,起作用约束对应的时段为  $t_k$ ,则将时段对应的约束条件修改为:

$$M_{t_k} \geq M_k^* \quad (15)$$

若在某次优化结果中出现多个时间段对应的约束均为起作用约束,即出现多个时段  $t_{k1}, t_{k2}, \dots, t_{ks}$  的备用率值与计算结果  $M_k^*$  相等,则对这些时段对应的约束条件均进行修改,再进行下一次优化计算。

(4) 如果尚有时段的备用率值  $M_{t_i}$  未被确定,则重复第(3)步;若所有时段的备用率值均被确定,优化模型中与备用率下界  $M$  相关的约束条件全部被松弛,说明已无剩余优化空间,计算结束,得到发电机组的最优检修计划。

迭代计算过程如图1所示。

本文给出的数学模型是混合整数线性规划问题,而检修连续性约束、机组检修意愿区间约束等时段耦合的约束条件大大增加了问题的复杂度。因此,本文采用成熟数学优化工具包 IBM ILOG CPLEX 12.4 进行求解[10],在保证最优性的前提下大幅提高计算效率。

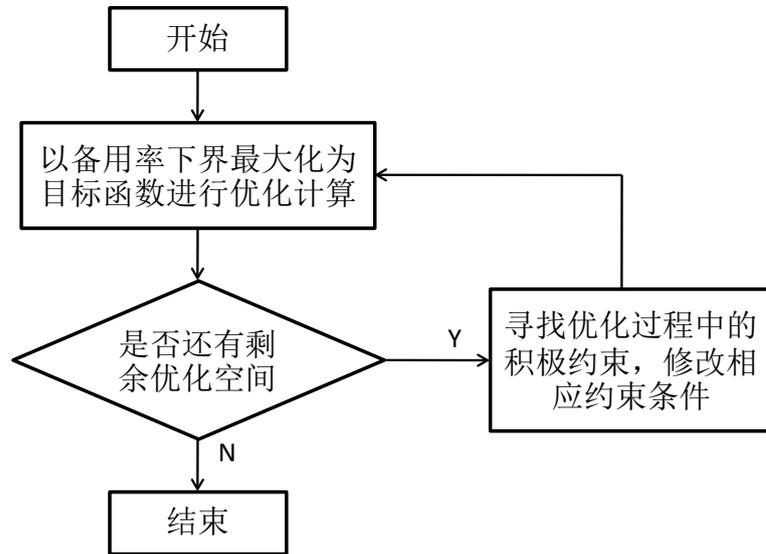


Figure 1. Flow chart of the generator maintenance scheduling algorithm  
图 1. 发电机组检修计划求解算法流程图

## 4. 算例分析

### 4.1. 6 机系统

为便于比较本文算法与方差最小算法计算结果之间的区别，本算例采用一个 6 台机组的系统，总装机容量为 335 MW，考虑在 12 个时间段内安排其检修计划，机组的检修约束数据如表 1 所示。

各时段的最大负荷为 291.23 MW，最小负荷为 193.96 MW。表 2 和表 3 分别给出了用该算法计算得到的发电机组检修计划以及各时段备用率的最大值、最小值、均值、方差等统计信息。表 2、表 3 同时列出了将式(1)作为目标函数所得到的优化结果。

图 2 所示为本文算法与方差最小算法所得到的分时备用率，同时画出了安排机组检修计划之前的系统备用率曲线。从图 2 中可以看出，两种方法的优化结果均在系统备用率较大的时段安排较大的检修容量，以达到备用率均衡的目标。

若采用方差最小作为目标函数，则从全局的角度来优化各时段备用率的均衡度，虽然得到的备用率方差是最小的，备用率最为均匀，但是从电网安全的角度来看，这种算法可能会导致某些时段的备用率很小，以牺牲系统供电可靠性为代价来换取备用率的均匀性；从计算结果可以看出，备用率方差最小的情况下，备用率的最小值比本文算法得到的结果要小，即在备用率最小的时段，系统供电的可靠性相对薄弱。

若采用备用率下界最大化的算法，在一定程度上保证了备用率的均衡度，所得到的备用率方差与最优值差别很小，并且在每次计算过程中均考虑了电网备用率最低的情况，并对备用率的下界作最优的改善，最大程度保障了各时段的供电可靠性，该算法更具有实际意义。

### 4.2. 30 机系统

为验证该算法在计算效率和鲁棒性上的优势，采用 30 台机组的系统作为算例进行分析，总装机容量为 6150.2 MW，考虑在一年 52 周内安排机组的年度检修计划，系统的年度最大负荷为 5641.0 MW，年度最小负荷为 3636.7 MW。对两种算法进行比较，若采用方差最小的二次规划模型，利用 CPLEX 规划工具进行求解，由于数学模型规模增大，计算时出现内存溢出，得不到可行解的情况；若采用本文的算法，

**Table 1.** The constraints of the generators  
**表 1.** 机组检修约束数据

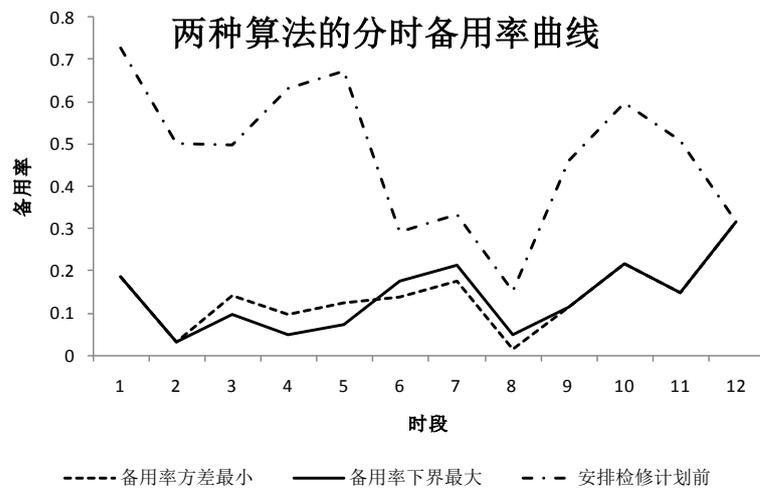
机组序号	机组容量(MW)	最早检修时段	最迟检修时段	检修持续时间
1	80	1	9	2
2	80	1	9	3
3	50	1	9	3
4	55	1	9	2
5	30	1	9	3
6	40	1	9	3

**Table 2.** Results of maintenance scheduling optimization  
**表 2.** 检修计划优化结果

机组序号	开始检修时段	
	备用率下界最大	备用率方差最小
1	4	4
2	9	9
3	1	1
4	1	1
5	6	3
6	3	6

**Table 3.** Reserve rate statistics of optimization results  
**表 3.** 优化结果中各时段备用率统计数据

统计指标	备用率下界最大	备用率方差最小
备用率最小值	0.0310	0.0130
备用率最大值	0.3150	0.3150
备用率平均值	0.1380	0.1405
备用率方差	0.0068	0.0059



**Figure 2.** Reserve rate curves of different algorithms  
**图 2.** 两种算法的分时备用率曲线

在相同的计算环境下，在较短时间内能够得到检修计划的可行解，由此证明了该算法在实际应用中的可行性与有效性。

图 3 表示了安排检修计划之前与安排检修计划之后的分时备用率曲线。从图 3 中看出，该算法在系统备用率较低的时段不安排机组的检修计划，在系统备用率充足的时段安排机组的检修计划，并且在安排了检修计划的时段实现了备用率的均匀化，达到了等备用率的优化目标。

表 4 还列出了只对备用率下界进行一次优化时的计算结果与迭代计算之后各时段备用率的相关数据。从表 4 的数据中可以看出，通过对每次优化中起作用约束条件的修改与迭代计算，备用率的均匀程度得到了较大的提高，证明了该算法的有效性。

### 5. 结语

等备用容量或等备用率是安排发电机组检修计划的一项重要原则。方差为直接反映系统各时段备用率均衡度的指标，但若以备用率方差最小化作为优化目标，由于目标函数的非线性，限制了模型求解速度以及求解规模。据此，本文采用了将各时段备用率下界最大化的方法，实现了备用率均衡度目标函数的线性化。此外，通过寻找在每次优化过程中的起作用约束条件，将起作用约束条件对应时段的备用率下界替换为该次优化的最优值，一方面保存了本次优化的计算结果，另一方面取消了该时段的约束条件

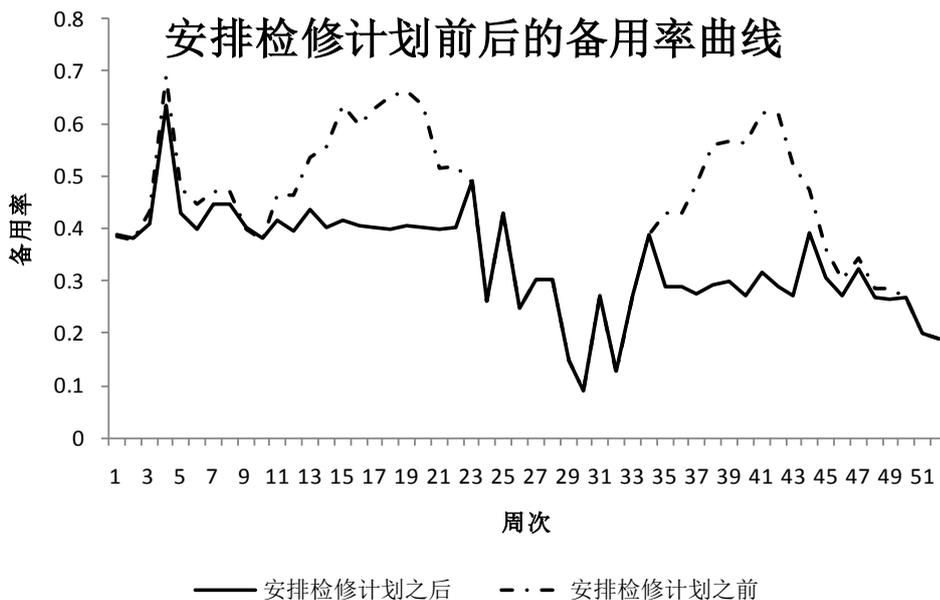


Figure 3. Reserve rate curves before and after generators maintenance scheduling

图 3. 安排检修计划前后的备用率曲线

Table 4. Reserve rate statistics of optimization results

表 4. 优化结果中各时段的备用率统计数据

统计指标	迭代计算	单次计算
备用率最小值	0.0903	0.0903
备用率最大值	0.6342	0.6637
备用率平均值	0.3383	0.3444
备用率方差	0.0093	0.0320

对备用率下界的限制作用，拓展了检修计划模型在剩余不起作用约束条件中的优化空间，实现了各时段备用率的均匀化。算例结果表明了该模型与算法的计算结果与方差最小方法的实际最优值差别很小，通过对每次优化中起作用约束条件的修改，使备用率均衡度比只进行一次计算时有了很大的改善。

### 参考文献 (References)

- [1] 王锡凡 (1990) 电力系统优化规划. 水利电力出版社, 北京.
- [2] 刘建月, 韩富春 (2008) 基于等风险度可靠性的发电机组计划检修模型. *电气技术*, **3**, 50-52.
- [3] 丘文千 (2005) 基于电量不足期望值最小的发电机组检修计划优化算法. *浙江电力*, **2**, 1-4.
- [4] 鲁刚, 文福拴, 钟志勇, 等 (2008) 电力市场环境下的发电机组检修问题. *电力系统及其自动化学报*, **5**, 1-8.
- [5] 王建学, 王锡凡, 冯长有, 等 (2006) 基于市场公平性的发电机组检修规划. *电力系统自动化*, **20**, 15-20.
- [6] 袁德, 汪晓露, 杜楠, 等 (2008) 发电设备检修计划多目标协调优化模型研究. *华东电力*, **5**, 75-59.
- [7] 杨澎, 陈少华 (1997) 制定大规模发电机组检修计划的整数规划法. *华南师范大学学报*, **3**, 40-44.
- [8] 王淳, 程浩忠, 谭永香, 等 (2008) 发电机组检修计划的模拟植物生长算法. *电工技术学报*, **9**, 105-110.
- [9] Chen, L.N. and Toyoda, J. (1991) Optimal generating unit maintenance scheduling for multi-area system with network constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, **6**, 1168-1174.
- [10] The IBM ILOG CPLEX website.  
<http://www-03.ibm.com/software/products/cn/zh/ibmilogcpleoptistud>