基于可信性理论的输电网规划方法

赵书强[1] 李勇[2] 王春丽[2]
（1. 华北电力大学电气与电子工程学院 保定 071003 2. 绍兴电力局 绍兴 312000）

摘要 输电网规划中存在着大量的随机性和模糊性的不确定性因素，传统方法将其分开考虑，作为单重不确定问题进行建模和求解；可信性理论是数学基础领域最近完成的数学分支，提供了随机性和模糊性综合评估的严格数学基础；运用可信性理论建立了双重不确定性的输电网规划模型，模拟了新增发电机节点出力、新增节点负荷变化值和新增线路造价的不确定性因素，结合随机模糊模拟技术和改进量子遗传算法对模型进行了求解，最后用一个 18 节点系统算例验证了所提模型和方法的有效性。

关键词：输电网规划 双重不确定性 可信性理论 随机模糊模拟 改进量子遗传算法
中图分类号：TM715

Transmission Network Expansion Planning Based on Credibility Theory

Zhao Shuqiang[1] *Li Yong*[1] *Wang Chunli*[2]
（1. North China Electric Power University Baoding 071003 China 2. Shaoxing Municipal Electric Power Company Shaoxing 312000 China）

Abstract In the electricity market, the transmission expansion planning faces influences of many uncertainties,which have the characteristic of random and fuzzy. In the past work, due to the limit in mathematical theory, the model developed could not simultaneously consider these two-fold uncertainties. Based on credibility theory accomplished recently, a new model with random fuzzy programming is proposed in this paper for transmission network expansion planning. The random fuzzy variable is adopted to describe the uncertain factors of newly-added generator bus output, the load of the newly-added bus, and the newly-added line investment. The random fuzzy simulation and improved quantum genetic algorithm are used to solve this model, and the model is proved effective through a 18-bus systems.

Keywords：Transmission network planning, two-fold uncertainty, credibility theory, random fuzzy simulation, improved quantum genetic algorithm (IQGA)

国家科技支撑计划资助项目（ 2008BAA14B05）。
收稿日期 2009-07-22 改稿日期 2009-10-14

1 引言

当前市场环境下，输电网规划与不确定性问题是分不开的[1]。近年来，计及不确定性因素影响的输电网灵活规划方法引起了学术界和工程界的广泛关注，也取得了一些成果。一种处理方法称之为预估方法，其绕过了对不确定性信息的直接分析和处理，直接对未来规划年的环境进行预测和分析，从而将电网规划中的不确定性问题转化为多个确定性的问题。如文献[2]提出了灵活电网规划模型，其基于未来场景的不确定性，从场景的发生概率和方案对场景的适应程度出发，寻求各场景下的综合最优方案；文献[3]通过增加新的约束，得到规划后的网络具有一定的剩余传输容量来适应未来不确定负荷的变化；另一种处理方法是通过不确定理论来对不确定信息进行建模，如文献 [4]提出了概率性的输电网规划方法，文献 [5]运用机会约束方法对规划中的

随机信息进行了有效的处理，文献 [6-7]分别采用联系数和集对分析理论处理电网规划中的各种不确定信息，构造了电网规划的确定与不确定系统。而输电网规划中的有些不确定性因素不是单一的，具有多重性质，如负荷就同时体现了随机性与模糊性[1]：某负荷水平在一年中出现的时间具有随机性，而该负荷水平预测值却具有模糊性；又如节点的发电机出力就同时体现了随机性与模糊性：该节点是否会新增电源具有随机性，而新增电源的发电机出力却具有模糊性；但受限于概率论与模糊论在基础数学领域内是 相互独立的理论体系，传统的方法只能将它们分开研究。

本文针对输电网规划中存在的双重不确定性，提出了一种基于可信性理论的输电网规划模型，并结合随机模糊模拟技术和改进量子遗传算法对模型进行求解，用一个 18 节点的系统算例验证了所提方法的可行性和有效性。

2　可信性理论

以前，在基础数学领域，概率论与模糊论是 两个各自独立研究的数学体系， 2004 年基础数学界 Liu Baoding 利用测度论完成了模糊论的公理化体系 。由于模糊论与概率论都建立在测度论基础之上，进而得出了公理化的模糊性与随机性的综合评估方法，使得随机模糊综合评估有了严格的数学基础 。可信性理论[8]为随机模糊双重不确定性优化问题的建模、求解奠定了理论基础，从而使得随机模糊双重不确定性优化问题的建模和求解工作能够进行，其在电力领域得到了初步应用 [9-12]。

定义 1　随机模糊变量 ξ 是一个从可能性空间 $(\Theta, P(\Theta), P_{\mathrm{os}})$ 到随机变量集合上的映射。其中 ，Θ 为非空集合，$P(\Theta)$为 Θ 的幂集，P_{os} 为可能性测度。ξ的期望值为

$$E_{\text{pro-fuz}}[\xi]=\int_0^{+\infty} C_r\left\{\beta\in\Theta \mid E_{\text{pro}}[\xi(\beta)]\geqslant r\right\}\mathrm{d}r-\int_{-\infty}^{0} C_r\left\{\beta\in\Theta \mid E_{\text{pro}}[\xi(\beta)]\leqslant r\right\}\mathrm{d}r \quad (1)$$

其中

$$E_{\text{pro}}[\xi(\beta)]=\int_0^{+\infty} P_r\left\{E_{\text{pro}}[\xi(\beta)]\geqslant r\right\}\mathrm{d}r-\int_{-\infty}^{0} P_r\left\{E_{\text{pro}}[\xi(\beta)]\leqslant r\right\}\mathrm{d}r$$

式中，等式右边的 E_{pro} 是随机变量期望算子；$C_r\{\}$ 为可信性测度；“$\int$”为 Lebesgue 积分。

如果随机模糊变量 ξ 退化到一个随机变量，即对任意的 $\beta\in\Theta$，$\xi(\beta)$ 是一个固定的随机变量，则式（1）所定义的期望值算子退化成

$$E_{\text{pro}}[\xi]=\int_0^{+\infty} P_r\left\{\xi\geqslant r\right\}\mathrm{d}r-\int_{-\infty}^{0} P_r\left\{\xi(\beta)<r\right\}\mathrm{d}r \quad (2)$$

式中，P_r 为概率测度。

随机模糊变量 ξ 退化到一个模糊变量，即对任意的 $\beta\in\Theta$，$\xi(\beta)$ 是一个实值而不再是一个随机变量，则式（1）将退化为

$$E_{\text{fuz}}[\xi]=\int_0^{+\infty} C_r\left\{\xi\geqslant r\right\}\mathrm{d}r-\int_{-\infty}^{0} C_r\left\{\xi(\beta)<r\right\}\mathrm{d}r \quad (3)$$

由定义 1 可得随机模糊优化技术期望值的一般模型为

$$\begin{cases}\min E_{\text{pro-fuz}}[f(\boldsymbol{x},\xi)]\\ \text{s.t.}\ \ E_{\text{pro-fuz}}[g_j(\boldsymbol{x},\xi)]\leqslant 0\end{cases} \quad (4)$$

式中，f，g_j 为实连续函数，对每个决策向量 $\boldsymbol{x}$，目标函数 $f(\boldsymbol{x},\xi)$ 和约束条件 $g_j(\boldsymbol{x},\xi)$ 都是随机模糊变量。

定理 1　令 a，b 为实数，ξ 和 η 是定义在 $(\Theta, P(\Theta), P_{\mathrm{os}})$ 上的随机模糊变量，则有

$$E_{\text{pro-fuz}}[a\xi+b\eta]=aE_{\text{pro-fuz}}[\xi]+bE_{\text{pro-fuz}}[\eta] \quad (5)$$

3　基于可信性理论的输电网规划数学模型

3.1　不确定因素的模拟

在影响输电系统规划的众 多不确定因素中，最重要的是电源点的选取和相应的发电机装机容量，各节点新增负荷或新增节点的负荷预测，及新增线路造价的不确定性因素。

对于可能出现的电源点，新增的电源节点的概率为 P，该点的发电机容量服从离散概率分布，而电源点的总出力 $P_{\mathrm{G}ik}$ 用三角模糊数表示。例如，当确定节点 i 为一新增电源节点时，预计该电源点的总出力可能为 $P_{\mathrm{G}ik}=(P_{\mathrm{G}ik}^{\mathrm{L}}, P_{\mathrm{G}ik}, P_{\mathrm{G}ik}^{\mathrm{R}})$，而出现每一种

可能总出力的概率分别为 a_{ik}，于是得到如下公式：

$P_r(x=P_{Gik})=a_{ik}$，其中，$0<a_{ik}<1;\ \sum_{k=1}^{Q}a_{ik}=1;\ k=1,2,\cdots,Q$。

对于新增的负荷节点，利用三角模糊数来处理，该点的负荷为 $P_{Di}=(P_{Di}^{L},P_{Di},P_{Di}^{R})$。

对于线路造价，假设在规划期内新增线路造价围绕其成本价值在一定范围内上下波动，用三角模糊数表示，即 $C_{li}=(C_{li}^{L},C_{li},C_{li}^{R})$。

3.2 建立数学模型

本文以 3.1 节中的不确定信息模拟为基础，建立基于可信性理论 的输电网规划模型，以线路投资建设总成本的模糊期望值最小为目标函数：

$$\begin{cases}\min\ \ E_{fuz}[f]=\min\ \ E_{fuz}\left[\sum_{li\in\Omega}C_{li}n_{li}\right]\\ \text{s.t.}\ \ E_{pro\text{-}fuz}[|P_{li}|]\leqslant\overline{P_{li}}\\ \quad E_{pro\text{-}fuz}[|P_{li}'|]\leqslant\overline{P_{li}}\\ \quad \boldsymbol{B\theta}=\boldsymbol{P}\\ \quad \underline{P_{gi}}\leqslant P_{gi}\leqslant\overline{P_{gi}}\\ \quad \sum P_{dj}=\sum P_{gi}\\ \quad 0\leqslant n_{li}\leqslant N_{li\max}\\ \quad n_{l0}+n_{li}-1\geqslant 0\end{cases}\tag{6}$$

式中，C_{li} 为新增线路 i 的造价；n_{i0}、n_{li}、$N_{li\max}$ 分别为线路 i 原有条数、线路 i 新增架线条数及最大架线条数；$\boldsymbol{B}$ 为节点导纳矩阵；$\boldsymbol{\theta}$ 为节点相角矩阵；P_{li}、P_{li}'、$\overline{P_{li}}$ 为线路 i 线路正常运行潮流、N–1 条件下线路 i 的潮流和最大线路潮流；P_{gi}、$\underline{P_{gi}}$、$\overline{P_{gi}}$ 为新增发电机节点 i 的有功出力及最小有功出力和最大有功出力；P_{dj} 为节点 j 的负荷功率；Ω 为可增线路集合；E_{fuz} 为模糊期望值；$E_{pro\text{-}fuz}$ 为随机模糊期望值。

4 求解方法及步骤

4.1 随机模糊期望值的计算

采用模糊模拟技术 [8]，求取目标函数中的 $E_{fuz}[f]$值，当线路造价用三角模糊数表示时，其计算流程如图 1 所示，图中 M 为抽样次数，$\wedge$ 为最小化算子，$\vee$ 为最大化算子，Pos 为可能度。而约束条件中 $E_{pro\text{-}fuz}$ 采用随机模糊模拟技术 [8]求取。

4.2 约束条件的处理

本文采用罚函数处理的 方法将约束条件加入到目标函数中，计算了规划网络在正常运行 （N）约束及 N–1 约束条件下的随机模糊过负荷量。通过引入罚因子 λ、μ 分别将 N 约束下过负荷随 机模糊期望值、N–1 约束下的总过负荷随机模糊期望值，转化为经济指标加入到目标函数中，因此得到新的目标函数：

$$\min E_{fuz}[f']=\min E_{fuz}\left[\sum_{li\in\Omega}C_{li}n_{li}\right]+\lambda\left[\sum_{li\in\Psi}\left(E_{pro\text{-}fuz}\left[|P_{li}|\right]-\overline{P_{ij}}\right)\right]+\mu\left[\sum_{li\in\Psi}\sum_{k}^{nl}\left(E_{pro\text{-}fuz}\left[|P_{li}'|\right]-\overline{P_{ij}}\right)\right]\tag{7}$$

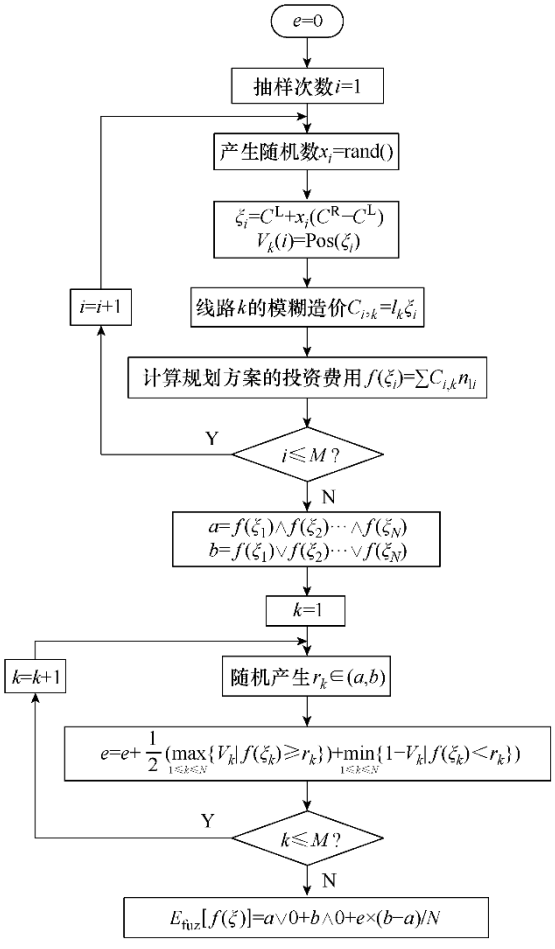


图 1 三角模糊数的模糊期望值计算流程图

Fig.1 Flow chart by a fuzzy expected value with a triangle fuzzy form (C^L, C, C^R) of ξ

式中，Ψ 为不满足线路潮流随机模糊期望值约束的集合；λ、μ为惩罚因子，将过负荷量转化为经济指标，其不同的取值将影响算法的收敛速度和最终的规划方案；nl 为此次断线分析对应的输电网线路走

廊数目； k 为断开第 k 条线路。

通过上述约束的处理，将原规划问题转化为无约束的优化问题。

4.3　目标函数值的计算

每个个体即每个规划方案的修正目标函数值的求解步骤如下：

（1）输入一个规划方案，进行连通性校验和修正，使其满足网络连通性条件 。

（2）模糊抽样产生一组可增加线路造价，并计算该方案的线路投资成本模糊期望值，如图 1 所示。

（3）随机模糊抽样一组新增电源及电源点的发电机出力值和一组新增负荷节点的有功负荷值 。

（4）由于抽样选择的新增发电机节点及其装机容量和新增节点负荷可能使得该场景下电力不平衡，即出现了发电机出力不足和过剩的情况；本文对功率不平衡的发电机出力按照新增发电机装机容量比例调整，使得该场景满足电力平衡要求 。

（5）计算该规划方案在 N 和 N–1 条件下的系统过负荷随机模糊期望值。即对个体在场景样本中进行运行模拟，得到各种运行方式下的系统过负荷量，通过随机模糊模拟技术计算得到该方案在这组运行场景下的过负荷随机模糊期望值；将其以罚函数方式加入到投资成本里，得到式（ 7）所示的修正目标函数值。

4.4　改进量子遗传算法

量子遗传算法[13]将量子科学的概念引入进化计算中，以量子比特和量子叠加态为基础，将量子态的矢量表述引入染色体编码中，通过量子门变换以其他进化算子的作用实现染色体演化，以提高进化算法的效率，并 且在理论上保证其收敛于全局最优解。其染色体的编码方式和量子门更新过程 参见文献[13]。

由于旋转角 α 的幅度影响收敛速度，但是若幅值度太大，又会导致早熟。故本文采用动态调整量子门旋转角 α 大小，即在算法运行初期和当前个体与最优个体较远时，搜索的网格较大，从而增加了算法的收敛速度；在算法运行末期和当前个体与最优个体接近时，搜索的网格较小，从而实现了精度搜索，有利于寻得最优解。故提出了文 献[14]中 delta 的一种具体实现形式：

$$\text{delta} = K \cdot \pi\left(1 - \frac{n}{\text{MAXN}+1}\right)\frac{f_{\min} - f'_{\min}}{f_{\min} - f} \qquad (8)$$

式中， n 为当前的进化代数； MAXN 为终止代数； K 为 0～1 之间的常数； $f_{\min}$ 为目标最小值，若目标最小值未知，则选取已计算出的最小值替代 $f_{\min}$； f 为当前个体计算出的目标值； $f'_{\min}$ 为当前种群中的最小值。

4.5　规划模型的整体流程图

本文整体求解过程的计算流程图如 图 2 所示。

5　算例分析

为了满足 N–1 约束要求，采用文献 [15]中可扩建线路为 51 条的 18 节点系统作为规划算例，线路系统参数相同；假设 11，14，16，18 节点可能会出现新增电源，数据见表 1；11，12，13，14，15，16，17，18 节点的负荷用三角模糊数表示，有关数据见表 2；线路成本数据与线路长度数据相同，其线路造价用三角模糊数表示。假定线路单价为 100

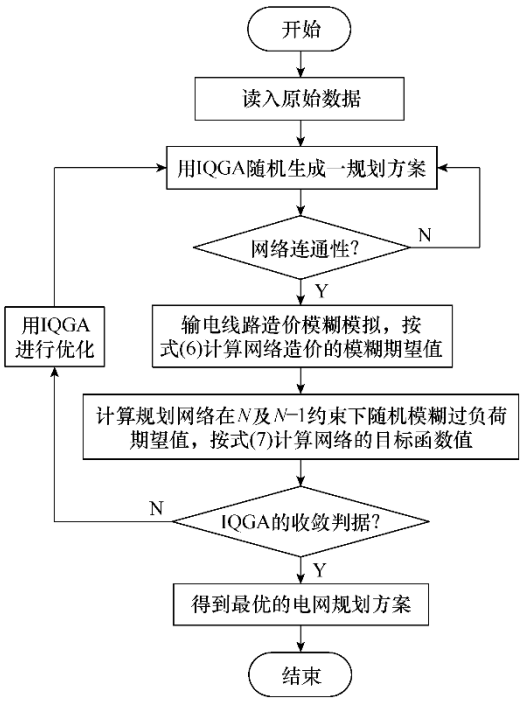


图 2　计算流程图

Fig.2　Flow chart of computation

万元/（km·回），线路造价的 三角模糊数表示为 (90,100,120)。

表 1　新增电源点随机模糊数据

Tab.1　Parameters of random fuzzy distributions of new generation

节点号	P_i	P_{gi1}	a_{i1}	P_{gi2}	a_{i2}
11	0.9	（5100,5400,5700）	0.7	（7000,7600,8000）	0.3
14	0.8	（5600,6000,6400）	0.2	（7000,7600,8000）	0.8
16	0.8	（4700,5000,5300）	0.2	（6100,6400,6700）	0.8
18	0.9	（1300,1400,1500）	0.6	（1800,2100,2300）	0.4

注：P_i 为节点 i 出现新增电源的 概率；P_{gik} 为可能的发电机出力，a_{ik} 为 P_{gik} 出现的概率； k=1,2。

表 2 新增节点负荷的模糊集

Tab.2 Fuzzy set of new nodal loads

（单位：MW）

节点号	负 荷
11	（6300,7000,7700）
12	（1700,1900,2100）
13	（1000,1100,1200）
14	（900,1000,1100）
15	（1800,2000,2200）
16	（1200,1300,1400）
17	（3600,4000,4400）
18	（450,500,550）

选取种群规模 W=150，变异概率 P_m=0.08，交叉概率 P_c=0.5，罚因子 $\lambda=10^4$、$\mu=10^2$，模拟抽样次数为 500，经过 76 次迭代计算得到最优规划方案，其模糊期望成本为 3031.78，并将其与常规规划、随机规划、模糊规划方案进行了比较。为了验证本文方案的灵活性和适应性，定义方案 k 的 N–1 允许最大负荷波动（ U_k ）即当所有负荷节点的负荷数值都以同比例增长时，在保证网络 N–1 安全的前提下每个负荷点可增加的最大 负荷量占原有负荷量的百分比。方案 k 的灵活度指标为

$$\lambda_k=\frac{U_k}{\max(U_k)}$$

方案 k 的成本效益指标为

$$\tau_k=\frac{\lambda_k}{C_k}$$

式中， C_k 为方案 k 的投资费用。

该成本效益指标表明了当电网规划方案 k 通过投入单位资金可满足多大的 N –1 条件下的负荷变化值，即网架对未来不确定环境变化的适应性和可靠性增值。因此，具有最大成本效益指标的方案可以通过较少的投入得到对未来环境变化较高的适应性和灵活性，该方案就是最佳的电网灵活规划方案。计算结果见表 3，从中可以看出，常规规划在规划中未考虑不确定因素，其得到的优化方案对未来环境的适应性比较低；分开考虑模糊不确定性和随机不确定性所得到的规划方案对未来环境的变化具有一定的适应性。尽管本文规划方案的初期投资成本和架线总数比其他三种规划方案要大，但在模型中考虑了随机模糊双重不确定性，对未来负荷增长的适应性能力强，并能较好地适应新增电源点的总出力和各种因素影响下的线路造价不确定性。即当未来环境发生变化时，它为消除过负荷的补偿投资将小于确定性规划。

表 3 规划结果及比较

Tab.3 Planning results and comparison

比较项目	需假设线路	新架线条数	C_k	U_k	λ_k	τ_k
本文方法	1,2,7,10(2),11,12(2),13(2),14(2),16,17(2),18(2),19(2),20,21(2),22,24,25(2),26,27(3)	30	3031.78	3.78	1.0000	0.3298
随机规划	1,2,7,10(2),12,13(2),14(2),17(2),18(2),19(2),20,21(2),22,24,25(2),26,27(3)	27	2915.04	2.34	0.6190	0.2124
模糊规划	1,2,7,9,10,12,13(2),15,16,17(2),18,19(2),20,21(2), 24,25(2),26,27(3)	25	2905.37	2.21	0.5847	0.2012
常规规划	1,2(2),7,10,12,13(2),14,16,17(2),18(2),19(2),20,21(2),22,25(2), 26,27(3)	26	2841	0.98	0.2593	0.0913

6 结论

针对输电网规划中的随机模糊双重不确定性，本文提出了基于可信性理论的输电网规划方法，并结合随机模糊模拟技术和改进量子遗传算法对模型进行了求解。其综合考虑了电源建设、负荷变化、线路造价等因素的随机性和模糊性，对未来环境变化的适应性要强，其对各种不确定信息进行的描述比较详细，所以其包含的信息量较多，对未来环境的近似也越接近；因此，可以较好地适应未来可能的变化，具有较高的应用价值和前景。

本文只考虑了在正常运行条件下的静态规划方案，而在输电网动态规划中如何考虑双重不确定性将成为下一步研究的目标。

参考文献

[1] 程浩忠，张焰. 电力系统规划 [M]. 北京：中国电力

出版社, 2008.

[2] 高赐威，程浩忠，王旭．考虑场景发生概率的柔性约束电网规划模 型[J]．中国电机工程学报，2004, 24(11): 34-38.
Gao Ciwei, Cheng Haozhong, Wang Xu. Electric power network flexible planning model based on the probability of scene occurrence [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 34-38.

[3] 武鹏，程浩忠，邢洁，等．不确定信息下的输电网规划新模型[J]．电力系统自动化，2008, 32(13): 21-25.
Wu Peng, Cheng Haozhong, Xing Jie, et al. A new transmission network planning model considering uncertain information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 21-25.

[4] Li Wenyuan, Choudhury P. Probabilistic transmission planning[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(5): 46-53.

[5] 杨宁，文福拴．基于机会约束规划的输电网规划方法[J]．电力系统自动化，2004, 28(14): 23-27.
Yang Ning, Wen Fushuan. Transmission system expansion planning based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27.

[6] 金华征，程浩忠，杨晓梅，等．基于联系数模型的电网灵活规划方法[J]．中国电机工程学报，2006, 26(12): 16-20.
Jin Huazheng, Cheng Haozhong, Yang Xiaomei, et al. Transmission network flexible planning based on connection number model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 16-20.

[7] 金华征，程浩忠，曾德君，等．基于集对分析的柔性电网规划方法[J]．中国电机工程学报，2005, 26(3): 7-12.
Jin Huazheng, Cheng Haozhong, Zeng Dejun, et al. A novel method of flexible transmission network planning based on set pair analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 26(3): 7-12.

[8] 刘宝碇，彭锦．不确定理论教程[M]．北京：清华大学出版社，2005.

[9] Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Power system operation risk assessment using credibility theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1309-1318.

[10] Ma Xinshun, Shi Tongju. Credibility theory based approach to build optimal bidding strategies with risk management for generation companies[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, 7: 1-5.

[11] 冯永青，吴文传，张伯明，等．基于可信性理论的火电机组检修计划[J]．中国电机工程学报，2006, 26(13): 14-19.
Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Hydro-thermal generator maintenance scheduling based on credibility theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 14-19.

[12] 冯永青，吴文传，张伯明，等．基于可信性理论的输电网短期线路检修计划[J]．中国电机工程学报，2007, 27(4): 65-71.
Feng Yongqing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. Short term transmission line maintenance scheduling based on credibility theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 65-71.

[13] 黄友锐．智能，优化算法及其应用[M]．北京：国防工业出版社，2008.

[14] 邢焕来，潘炜，邹喜华．一种解决组合优化问题的改进型量子遗传算法[J]．电子学报，2007, 35(10): 1999-2002.
Xing Huanlai, Pan Wei, Zou Xihua. A novel improved quantum genetic algorithm for combinatorial optimization problems [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1999-2002.

[15] 秦茹静，王淳，苏惠玲，等．考虑 *N*–1 安全性的输电网络启发式扩展规划方案[J]．继电器，2007, 35(13): 30-38.
Qin Rujing, Wang Chun, Su Huiling, et al. A heuristic method for transmission network expansion planning considering *N*–1 security[J]. Relay, 2007, 35(13): 30-38.

作者简介：赵书强　男，1964 年生，教授，研究方向为电力系统分析、运行与控制，电力系统规划与可靠性。　李　勇　男，1981 年生，硕士，研究方向为电力系统规划与可靠性。