

混沌模拟树木生长算法在无功优化中的应用

陈勇¹, 吕树河², 杨丽徙¹

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 焦作供电公司, 河南 焦作 454150)

摘要: 针对模拟树木生长算法在求解大规模电力系统无功优化问题中存在的收敛稳定性差、难以找到全局最优解的缺点, 提出了新的无功优化算法——混沌模拟树木生长算法 (CTGSA)。该方法利用混沌优化所具有的对初值敏感性和遍历性的特点, 在模拟树木生长寻优过程中引入混沌移民操作来改善生长点集中可行解的质量、增加可行解的多样性, 从而提高算法的收敛稳定性和寻优精度。将该算法应用于 IEEE 30 节点系统, 结果表明该算法具有较强的全局优化能力和收敛稳定性。

关键词: 无功优化; 混沌优化; 移民; 混沌模拟树木生长算法

Chaotic trees growth simulation algorithm for reactive power optimization

CHEN Yong¹, Lü Shu-he², YANG Li-xi¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Jiaozuo Power Supply Company, Jiaozuo 454150, China)

Abstract: As trees growth simulation algorithm (TGSA) has the disadvantage of bad convergence stability and it is difficult to find the global optimal solution in solving large scale reactive power optimization problem, a new reactive power optimization algorithm called chaotic trees growth simulation algorithm (CTGSA) is presented by using the characters that chaos optimization algorithm is sensitive to initial value and has ergodicity. An operator called chaos immigrant is introduced to the process of TGSA to improve the quality of feasible solutions in the growing point collection and keep the diversity of feasible solutions, by which the new algorithm has better convergence stability and optimization precision. When the algorithm is used for IEEE 30-bus system, the results show that the algorithm has strongly global optimization ability and convergence stability.

Key words: reactive power optimization; chaos optimization; immigrant; chaotic trees growth simulation algorithm

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0096-04

0 引言

电力系统无功优化是电力系统安全经济运行的一个重要方面, 也是降低系统有功损耗, 提高电压质量的重要途径之一。但是, 电力系统无功优化问题是一个动态、多目标、多约束、不确定性的非线性混合整数规划问题, 优化过程十分复杂; 目前的求解方法主要有传统的数学优化方法和近年来提出的遗传算法^[1-2]、粒子群算法^[3]、Tabu 搜索法^[4]等, 但它们都有各自的优缺点。

模拟树木生长算法^[5]将目标函数和约束条件分开处理, 不要求连续、可微, 且不需要给出很多参数, 是处理无功优化问题的一种新的、可行的方法。

基金项目: 河南省教育厅自然科学基金资助项目 (2009A470008)

但其收敛稳定性差, 可行解多样性会随着优化问题规模的扩大而降低, 容易陷入局部最优解。

利用混沌优化^[6-8]所具有的对初值强烈敏感性和遍历性的特点, 在模拟树木生长算法中引入混沌移民操作, 可以提高生长点集中可行解的质量、增加可行解的多样性, 有效解决算法的过早收敛问题。

1 模拟树木生长算法

模拟树木生长算法, 将整数规划的可行域当作树木的生长环境, 将全局最优解当作光源, 模拟真实树木的向光性机理, 建立枝叶在不同光线强度环境下向光源快速生长的动力机制^[5]。

1.1 树木生长过程的数学模拟

模拟树木生长算法首先建立四个概念: 树根、树干、树枝和生长点。树根为控制变量的初始值; 树干和树枝的作用在于从树根出发, 建立跨越优化

问题可行域的拓扑结构, 树干和树枝的长度代表控制变量的取值域; 生长点即树木生长细胞, 代表优化问题的解空间分布。

设树干 M 和树枝 m 上分别有 k 个和 l 个生长点 $(S_{M1}, S_{M2}, \dots, S_{Mk})$ 和 $(S_{m1}, S_{m2}, \dots, S_{ml})$, 每一个生长点的形态素浓度分别为 $(P_{M1}, P_{M2}, \dots, P_{Mk})$ 和 $(P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{ml})$, 则树干及树枝上各生长点形态素浓度值分别为^[5]:

$$P_{Mi} = \frac{f(x_0) - f(S_{Mi})}{\sum_{i=1}^k (f(x_0) - f(S_{Mi})) + \sum_{j=1}^l (f(x_0) - f(S_{mj}))} \quad (1)$$

$$P_{mj} = \frac{f(x_0) - f(S_{mj})}{\sum_{i=1}^k (f(x_0) - f(S_{Mi})) + \sum_{j=1}^l (f(x_0) - f(S_{mj}))} \quad (2)$$

其中: x_0 是初始可行解; $f(\cdot)$ 为目标函数值。各生长点的 P 值由该点对树根的相对位置及该位置的环境信息 (目标函数值) 所确定, 这与真实树木细胞的形态素浓度生成机理一致。

由式 (1) 和式 (2) 可以证明:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l (P_{Mi} + P_{mj}) = 1 \quad (3)$$

区间 $(0,1]$ 中的任意一个随机数 R 所对应的生长点就可以作为下一次循环的新基点并长出新枝。长出新枝的基点被取消, 新枝中的生长点将加入, 形态素浓度重新在各生长点之间进行分配。如此反复进行, 直到满足终止条件为止。

1.2 新生长点的产生

设随机数 R 对应的生长点包含了无功优化问题中的发电机端电压、变压器分接头和无功补偿设备等 n 个控制变量, 其上限分别为发电机电压调节档数、变压器主变抽头调节档数和无功补偿总组数; 其下限均为 0。

设某一次循环的基点 $x_B = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$, 步长为 λ , 让每一个控制变量分别加上或减去步长, 同时保持其他各控制变量不变, 即可得到 $2n$ 个新生长点。其中:

$$x_{2i-1} = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{i0} + \lambda, \dots, x_{n0}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$x_{2i} = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{i0} - \lambda, \dots, x_{n0}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

若某一个控制变量加上或减去步长后越限, 则取其限值。当循环次数是 1 或者是树干上生长点 k 的整数倍时, 步长 λ 取干长; 其余循环步长均取枝长, 以保持生长点集内可行解的多样性, 提高全局寻优能力。

1.3 生长点集和最优解保留策略

若某一生长点的目标函数值小于初始可行解的目标函数值, 且潮流计算所得各状态变量不越限, 则该生长点是无功优化的可行解。生长点集就是无功优化可行解的集合。

为提高计算效率, 生长点集内只保留以往的 S 个最优生长点和本次循环新生成的可行解。 S 的大小参考控制变量的个数选取, 一般取控制变量个数的 2~3 倍。

1.4 模拟树木生长算法中的过早收敛问题

模拟树木生长算法根据形态素浓度状态空间选择新生长基点, 目标函数值较小的可行解更有可能被选中, 但由于其新生长点的产生机理^[5]决定了经过几次迭代后, 生长点集将会被某个目标函数值较小的基点产生的生长点所占据, 可行解的多样性衰退, 最终导致过早收敛于局部最优点。

2 混沌移民操作

在生物进化理论中, 维持群体多样性的有效方法之一就是移民, 从群体之外引入一定规模的同种优秀个体, 替换原群体中的不良个体, 参与该群体的交配繁衍, 以保证该群体的质量, 防止因近亲繁殖导致的基因病变与衰退。

在模拟树木生长算法中引入混沌优化算法, 利用混沌变量的随机性、遍历性和规律性等解空间内进行优化搜索, 易于跳出局部最优解; 混沌优化算法同样无需优化问题具有连续性和可微性^[9]。

混沌变量由式 (6) Logistic 模型产生:

$$z^{k+1} = 4z^k(1-z^k) \quad z^k \in [0,1] \quad (6)$$

混沌移民操作的步骤为:

(1) 混沌变量初始化。置迭代次数 $k=0$, 设当前解为 $x_B = (x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$, 记 $f_{\min} = f(x_B)$, $x_{\min} = x_B$ 。将 x_B 利用式 (7) 进行载波反变换, 将值赋给 z^0 , 作为混沌变量的基点。

$$z^0 = (x_B - t_{\min}) / (t_{\max} - t_{\min}) \quad (7)$$

其中, t_{\max} 、 t_{\min} 分别为优化变量的上限和下限。

(2) 混沌迭代。利用式 (6) Logistic 映射进行混沌迭代, 产生新的混沌序列。

(3) 载波变换。利用式 (8) 将新产生的混沌变量序列载波成原优化变量 x^k , 并计算 $f(x^k)$ 的值。

$$x^k = z^k(t_{\max} - t_{\min}) \quad (8)$$

(4) 确定最优值。若 $f(x^k) < f_{\min}$, 则 $f_{\min} = f(x^k)$, $x_{\min} = x^k$, 否则保留 f_{\min} 及 x_{\min} , 并将循

环次数加 1。

(5) 判断终止条件。若循环次数大于预先给定的次数 C ，则计算结束；否则，重复以上步骤。

模拟树木生长算法生长点集内的可行解是按目标函数值从小到大依次排列的，可以在模拟树木生长算法每一次循环后都对生长点集中目标函数值较大的一部分次优解进行混沌移民操作，这样可以使可行解快速地得到更新和改善，维持其多样性。

移民比例^[9]的选取对算法的影响较大，经过大量实验验证，当群体总规模为 50~100 时，对应的移民比例取 0.2~0.4 为宜，文中选取 0.2。

3 混沌模拟树木生长算法的应用

3.1 无功优化数学模型

目标函数：

$$\min f = P_{\text{Loss}} = \sum_{i=1}^{N_N} \sum_{j=1}^{N_N} V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (9)$$

式中： P_{Loss} 为总的有功网络损耗； N_N 为全体节点集合； V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压； G_{ij} 为节点 i 、 j 之间的互电导； θ_{ij} 为 V_i 、 V_j 的相角差。

等式约束：

$$P_{Gi} - P_{Li} = V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (i \in N_N - N_S) \quad (10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} = V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in N_{PQ}) \quad (11)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的有功和无功发电功率； P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功和无功负荷功率； N_S 为平衡节点； N_{PQ} 为 PQ 节点集合； B_{ij} 为节点 i 、 j 之间的互电纳。

不等式约束：

$$\begin{cases} \text{控制变量 } U = [U_{Gi}, T_{ki}, Q_{Ci}]; \underline{U} \leq U \leq \bar{U} \\ \text{状态变量 } X = [U_i, Q_{Gi}]; \underline{X} \leq X \leq \bar{X} \end{cases} \quad (12)$$

式中： U_{Gi} 为节点 i 的发电机端电压； T_{ki} 为支路 k 的变压器变比； Q_{Ci} 为节点 i 的无功补偿容量； U_i 为节点 i 的电压；其他变量的含义同式 (9) ~ (11)。

3.2 控制变量的处理

根据模拟树木生长算法处理整型变量的要求，求解过程中发电机端电压用整型的发电机端电压档位进行离散化处理；对无功补偿容量用整型的无功补偿投切组数来描述；对变压器变比的取值用变压器抽头档位来描述。对混沌移民过程中控制变量的最优解做取整处理。

3.3 无功优化问题的求解

(1) 输入原始数据。包括潮流计算数据、无功控制变量的维数和上下限值、状态变量的限值。

(2) 寻找初始可行解。给出各控制变量的一个初始值 x_0 ，潮流计算，检验各发电机无功出力、负荷节点电压是否满足约束。若不满足，则修改 x_0 重新计算潮流；若满足，则求出网络的有功功率损耗，即目标函数初值 $f(x_0)$ 。

(3) 确定初始基点。令基点 x_B 及目标函数最小值所对应的点 x_{\min} 都为 x_0 ，即 $x_B = x_{\min} = x_0$ ， $f_{\min} = f(x_0)$ 。其中 x_0 、 x_B 、 x_{\min} 均为相应点的向量形式， f_{\min} 为目标函数的最小值。令循环次数及最小值重复出现次数均为 1，初始生长点集为空。

(4) 判断算法是否终止。若循环次数大于 N 或最小值重复出现次数达到 F 则计算结束，输出 f_{\min} 和 x_{\min} ；否则，转入下一步。

(5) 产生新生长点及新生长点集。以 x_B 为基点，以 λ 为步长得到 $2n$ 个新生长点，将新生长点中的各可行解并入生长点集。

(6) 混沌移民。按第 2 节的方法对新生长点集进行混沌移民操作，重新将生长点集内的各可行解按目标函数值从小到大排序。

(7) 确定目标函数最小值。将第 (5) 步所得各可行解的目标函数值最小者与 f_{\min} 比较，若小于 f_{\min} 则置换 f_{\min} 及 x_{\min} ；否则保留 f_{\min} 及 x_{\min} ，并使最小值重复出现次数加 1。

(8) 计算生长点集内各可行解的形态素浓度，确定可行解的状态空间。

(9) 确定新循环基点。利用计算机产生一个位于区间 (0,1] 的随机数 R ， R 将落入形态素浓度状态空间 P 的某一区间，该区间对应的可行解即为下一次循环的新基点 x_B ，并将 x_B 从生长点集内去除。循环次数加 1，转到步骤 (4)。

4 算例及分析

对 IEEE 30 节点标准测试系统进行算法验证与无功优化分析，用 Visual Basic 语言编写优化程序。IEEE 30 节点系统有 30 个节点、41 条支路、6 个发电机节点、4 个变压器支路、9 个电容器无功补偿点。发电机节点的编号为 1、2、5、8、11、13，变压器支路的编号为 11、12、15、36，电容器无功补偿节点的编号为 10、12、15、17、20、21、23、24、29。节点和支路相关数据详见文献[10]；总的有功负荷和无功负荷分别为 283.4 MW 和 126.2 MVar，初始有功网络损耗为 5.538 47 MW。计算时取节点 1 为

平衡节点,其余发电机节点为PV节点,其他节点为PQ节点。基准功率取100MVA,发电机节点电压的取值范围是0.95~1.1,分50档,负荷节点电压的取值范围是0.95~1.05,变压器变比的取值范围是0.9~1.1,分10档,电容器无功补偿容量的取值范围为基准功率的0.00~0.05倍,分10组。

混沌模拟树木生长算法中,最大迭代次数 $N=1\ 000$;最小值最大重复出现次数 $F=100$;发电机节点电压干长=7档,支长=3档;变压器变比干长=2档,支长=1档;电容器无功补偿容量干长=5组,支长=2组;最优解空间 $S=50$;混沌优化中循环次数 $C=40$ 。优化前后控制变量及其最优解的取值见表1。

表1 优化前后控制变量的取值(标么值)

Tab.1 Value of control variables around the optimization (pu)

发电机节点编号	1	2	5	8	11	13			
优化前机端电压	1.050	1.040	1.010	1.010	1.050	1.050			
优化后机端电压	1.076	1.064	1.036	1.036	1.076	1.064			
变压器支路编号	11		12	15		36			
优化前变比	1.078		1.069	1.032		1.068			
优化后变比	1.000		1.000	1.000		1.020			
补偿电容编号	10	12	15	17	20	21	23	24	29
优化前补偿量	0	0	0	0	0	0	0	0	0
优化后补偿量	0.05	0.02	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.03

为了验证混沌模拟树木生长算法的优越性,分别与标准遗传算法^[11]和模拟树木生长算法进行比较,表2给出了各种算法分别运行10次所得的结果。设定网损 <0.05 的解为最优解,表中“收敛到最优解的次数”指各算法独立运行10次,可以得到最优解的次数。

表2 优化计算结果比较

Tab.2 Comparison of optimization results

算法	平均网损/pu	收敛到最优解的次数
标准遗传算法	0.050 80	5
模拟树木生长算法	0.050 30	6
混沌模拟树木生长算法	0.048 86	10

从表2结果可以看出,混沌模拟树木生长算法能得到更好的最优解,且有更强的收敛稳定性。本算例中,与模拟树木生长算法相比较,混沌模拟树木生长算法收敛到全局最优解的概率提高了0.67倍,因为在混沌模拟树木生长算法优化过程中,每一次循环后对部分可行解进行混沌搜索,生长点集中的可行解可以更快速地得到更新和改良,容易跳出局部最优解;引入混沌搜索后可以减少模拟树木

生长算法的循环次数,有可能提高算法的运算速度。

5 结论

(1) 引入混沌移民后的模拟植物生长算法(CTGSA),充分利用了双方的优点,改善了生长点集中可行解的质量,保证了可行解的多样性,有利于跳出局部最优,收敛到全局最优解。

(2) 该算法将目标函数和约束条件分开处理,不要求优化问题连续、可微,具有很强的全局优化能力和广泛的应用前景。

(3) 由于模拟树木生长算法本身在寻优过程中可能需要经过较多的循环次数后才会收敛,且每一次循环都需要对所有新生长点进行潮流计算,需要较长的计算时间,所以,在提高计算速度、优化计算程序方面还需要改进。

参考文献

- [1] 李运华,吴宏昂,盛万兴,等. 分布式并行混合遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 36-41.
LI Yun-hua, WU Hong-bing, SHENG Wan-xing, et al. Application of distributed parallel hybrid genetic algorithm in reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2008, 20(2): 36-41.
- [2] 王瑞,林飞,游小杰,等. 基于遗传算法的分布式发电系统无功优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 24-28.
WANG Rui, LIN Fei, YOU Xiao-jie, et al. Research on the reactive power control of distributed generation system based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 24-28.
- [3] Al-Hamouz Z, Faisal S F, Al-Sharif S. Application of partial swarm optimization algorithm for optimal reactive power planning[J]. IEEE Trans on Control and Intelligent Systems, 2007, 35(1): 66-72.
- [4] 叶品勇,都洪基. 改进Tabu方法在无功优化中的应用[J]. 电气应用, 2007, 26(2): 32-36.
YE Pin-yong, DU Hong-ji. The application of improved Tabu search method in reactive power optimization[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(2): 32-36.
- [5] 王锴,杨丽徙,黄训诚. 应用改进模拟植物生长算法求解无功优化问题[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 694-698.
WANG Kai, YANG Li-xi, HUANG Xun-cheng. Application of trees growth simulation algorithm to solve reactive power optimization problem[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 694-698.
- [6] 刘自发,葛少云,余怡鑫. 基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 53-57.

(下转第140页 continued on page 140)

[13] Rudnick H, Palma R, Fernandez J E. Marginal pricing and supplement cost allocation in transmission open access [J]. IEEE Tans PWRS, 1995, 10(2): 1125-1142.

[14] Conejo A J, Arroyo J M, Alguacil N. Transmission on loss allocation: a comparison of different practical algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (3) : 571-576.

[15] Multale J, Strbac G, Curcic S, et al. Allocation of losses in distribution systems with embedded generation[J]. IEE Proc-Gener, Transm & Distrib, 2000, 147 (1) : 7-14.

[16] 吴政球. 非线性函数值贡献因子理论及其应用[J]. 电力系统自动化, 2000, 25 (11) : 32-34.
WU Zheng-qiu. Contribution factor theory on variables to the non linear function value and its applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25 (11) : 32-34.

[17] 荆朝霞, 段献忠, 何仰赞. 函数值分摊理论及其在电力市场中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 9-14.
JING Zhao-xia, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan. Function value allocation theory and its applications to electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (2) : 9-14.

[18] 王锡凡, 王秀丽, 郑斌. 电力市场过网费的潮流分析基础—网损分摊问题[J]. 中国电力, 1998, 31 (6) : 6-9.
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, JIA Bin. Fundament of load flow analysis in wheeling costing-loss allocation

problem[J]. Electric Power, 1998, 31 (6) : 6-9.

[19] 王锡凡, 王秀丽. 电流追踪问题[J]. 中国科学: E辑, 2000, 30 (3) : 405-412.
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li. Tracing the current[J]. China Science: Proceedings E, 2000, 30 (3) : 405-412.

[20] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (21) : 82-86.
BAO Hai, MA Qian. Physical distribution mechanism of network loss for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (21) : 82-86.

[21] 王小君, 鲍海. 电力系统节点输电网损成本分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13) : 120-124.
WANG Xiao-jun, BAO Hai. Node network loss cost analysis method in transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13) : 120-124.

收稿日期: 2010-01-22; 修回日期: 2010-04-19

作者简介:

艾东平 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dongping19810127@126.com

鲍海 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制;

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制。

(上接第 99 页 continued from page 99)

LIU Zi-fa, GE Shao-yun, YU Yi-xin. Optimal reactive power dispatch using chaotic partical optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (7): 53-57.

[7] 赵涛, 熊信银, 吴耀武. 基于混沌优化算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2003, 31 (3) : 20-22.
ZHAO Tao, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Reactive power optimization of power system based on chaos optimization algorithm[J]. Relay, 2003, 31 (3) : 20-22.

[8] 陈敏, 李泽军, 黎昂. 基于混沌理论的城市用电量预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (16) : 41-45.
CHEN Min, LI Ze-jun, LI Ang. Forecast research of urban electricity consumption based on chaos theory [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (16) : 41-45.

[9] 刘宝英, 杨仁刚, 李慧, 等. 基于混沌遗传算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (5): 49-52.

LIU Bao-ying, YANG Ren-gang, LI Hui, et al. Reactive power optimization based on chaos genetic algorithm in electric power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2006, 18 (5): 49-52.

[10] LEE K Y, PARK Y M, ORTIZ J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1985, 104 (5): 1147-1153.

[11] WU Q H, CAO J Y, WEN J Y. Optimal reactive power dispatch using an adaptive genetic algorithm[J]. Int J Electric Power & Energy System, 1998, 20 (8): 563-569.

收稿日期: 2009-11-12; 修回日期: 2010-01-17

作者简介:

陈勇 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与优化规划; E-mail: cylf123@163.com

吕树河 (1970-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行与规划管理方面的研究;

杨丽徙 (1956-), 女, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与规划。