

机组短期负荷环境/经济调度多目标混合优化

王 欣^{1,2}, 秦 斌^{1,2}, 阳春华²

(1. 湖南工业大学 电气工程系, 湖南 株洲 412008; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 环境/经济短期负荷调度主要由调度周期内的最优机组组合和负荷环境/经济分配组成, 本文将变权重多目标进化算法与混沌局部优化相结合形成混合优化算法应用到电站机组环境/经济运行多目标优化问题中, 在混合多目标优化算法中采用组合结构基因, 其中机组基因用于机组组合全局粗寻优, 参数基因用于负荷分配局部优化, 基因修正与罚函数结合解决约束问题. 通过对优秀个体进行基于线性搜索的混沌局部优化, 可加快收敛速度和降低计算时间. 实例仿真结果说明所提出的算法能获得较好分布的Pareto优化解.

关键词: 环境/经济负荷调度; 多目标混合优化; 局部搜索; 混沌优化

中图分类号: TP301

文献标识码: A

Multi-objective hybrid optimization algorithm for short term environmental/economic generation scheduling

WANG Xin^{1,2}, QIN Bin^{1,2}, YANG Chun-hua²

(1. School of Electrical Engineering of Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China

2. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: Short term environmental/economic generation scheduling (E/EGS) is composed of optimal unit commitment (UC) and environmental/economic dispatch (ED) in the scheduling period. In this paper the multi-objective hybrid evolutionary algorithm (MHEA) which combines randomly-weighted multi-objective evolutionary algorithm (MEA) with chaotic optimal algorithm (COA) is proposed for the short term generation scheduling problem. In the MHEA, the hierarchical genes are adopted in which the commitment genes are used for global optimization in UC and the parameter genes are used for local optimization in ED, and the constrain problem can be solved by combining genes modification with punishment function method. The chaos local linear search is also applied to good solutions to accelerate the convergence speed of algorithm and reduce the computation time. Finally, the results of a case study demonstrate the capabilities of the proposed approach to generate well-distributed Pareto-optimal solutions of the multi-objective E/EGS problem.

Key words: environmental/economic generation scheduling; multi-objective hybrid optimization; local search; chaotic optimization

1 引言(Introduction)

机组环境/经济运行问题是一个具有两个相竞争目标的整型变量、连续变量及非线性函数的混合整数非线性规划问题, 通过将环境/经济分配处理成约束变量或对多目标线性加权可将问题转换成单目标负荷分配问题, 目前采用的机组最优组合经济运行的实用算法主要有拉格朗日法(LR)^[1]、优先次序法(PL)、动态规划法(DP)、动态比较法、遗传算法(GA)^[2]、集成方法^[3~5]和混沌优化算法(COA)^[6]. 解决环境/经济负荷分配的第2种方法是应用多目标优化理论, Srinivasan D^[7]提出模糊多目标优化技术

解决此类问题, 但算法得到的是次优化结果, 并且没有提供系统框架来直接搜索Pareto优化前沿. 基于进化多目标优化算法^[8]提供了评估经济分配的方法, 其中包含环境约束, 但该方法采用的选择过程可能产生对优化前沿的分类错误.

针对以上问题, 本文采用变权重多目标遗传算法与混沌相结合的混合优化方法, 在遗传算法搜索到初步Pareto优化群后, 运用混沌局部搜索进一步优化前沿, 利用在混沌搜索中得到的先验知识, 通过线性搜索在局部搜索空间加速最优解的收敛速度, 提高解的精度, 获得了满意的效果.

2 电力系统环境/经济负荷分配的数学描述(Mathematics formulation for E/EGS problem)

电力系统的机组组合和经济负荷分配问题可描述为在调度时间区间内, 寻找一个满足一系列约束条件的最优方案, 使在此区间内发电机污染废气排放/运行费用最优。

2.1 目标函数(Objective functions)

1) 负荷经济分配。

负荷经济分配可以表示为满足若干个约束非线性优化问题使式(1)的价值函数最小^[3,4],

$$C(P_{ij}) = \sum_{j=1}^T [\sum_{i \in G} (a_i + b_i P_{ij} + c_i P_{ij}^2) + SC_{ij} + V_{ij} + LC_j]. \quad (1)$$

式中: C 为价值函数; T 为短期负荷分配时间; G 为系统内发电机总数; $P_{i,j}$ 为第 i 台发电机在时间段 j 的有功功率; LG_j 为网损费用; 发电机耗量曲线常用发电机有功功率的二次函数近似表示, a_i, b_i, c_i 为常数。单元启停费用 SC_{ij} 为

$$SC(P_{ij}) = u_{ij}(1 - u_{ij-1})[\mu_i + \nu_i(1 - \exp(-T_{ij}^{\text{off}}/\tau_i))]. \quad (2)$$

u_{ij} 表示第 i 台发电机在时间段 j 的启/停状态, 启动为1, 停止为0; $T_i^{\text{off}}/T_i^{\text{on}}$ 为第 i 台发电机启/停时间; μ_i, ν_i, τ_i 为常数。

发电机耗量曲线的阀点效应^[7]可以表示为

$$V_i = |g_i \sin(h_i(P_{ij} - P_{ij-1}))|. \quad (3)$$

式中 g_i, h_i 为常数。因此在计算耗量时必须加上阀点效应的影响。由于不同地点的机组电厂向系统输送功率所造成的网络损耗是不同的。时间 j 单元的总网损可由潮流软件获得, 习惯上采用 B 系数模型来计算^[9]:

$$LC_j = \delta[P_j^T B P_j + P_j^T B_0 + B_{00}]. \quad (4)$$

式中: P 为 n 维发电机有功功率列矢量, P^T 为 P 的转置, B 为 $n \times n$ 维对称方阵, B_0 为 n 维列矢量, B_{00} 为常数, δ 为费用换算系数。

2) 有害气体排放。

有害气体主要是 NO 和 SO_2 的排放, NO 和 SO_2 的排放可单独建立其模型, 这里采用统一的排放模型^[12]

$$E(P_{ij}) = \sum_{i=1}^N 10^{-2} (\alpha_i P_{ij}^2 + \beta_i P_{ij} + \gamma_i) + \xi_i \exp(\lambda P_{ij}). \quad (5)$$

因此环境/经济负荷调度目标可表示为在约束条件下

$$F = wC(P_{ij}) + (1 - w)\rho E(P_{ij}), \quad (6)$$

w 为线性权重, ρ 为刻度系数, 这里取 $\rho = 200000$ 。

2.2 约束条件(Constraints)

1) 等式约束条件。

$$\sum_{i \in G} P_{ij} u_{ij} = P_{Lj} + P_s. \quad (7)$$

式中: P_{Lj} 为系统内在时间 j 的总负荷; P_s 为系统的总网损。总网损是发电机有功功率、传输线参数和网络拓扑结构的函数, 计算时可忽略或按总负荷的一定百分比确定。也可通过潮流软件获得网损的精确值。

2) 不等式约束条件。

功率约束:

$$P_i^{\min} \leq P_{ij} \leq P_i^{\max}. \quad (8a)$$

式中: $P_i^{\min}$ 为第 i 台发电机有功功率的最小值; $P_i^{\max}$ 为第 i 台发电机有功功率的最大值。

$$\sum_{i \in G} P_i^{\max} u_{ij} \geq P_{Lj} + P_R, \quad (8b)$$

$$\sum_{i \in G} P_i^{\min} u_{ij} \leq P_{Lj} - P_R, \quad (8c)$$

P_R 为预留功率。

单元最小启动/停止时间约束:

$$(T_{ij-1}^{\text{on}} - MUT_i)(u_{ij-1} - u_{ij}) \geq 0, \quad (9a)$$

$$(T_{ij-1}^{\text{off}} - MDT_i)(u_{ij} - u_{ij-1}) \geq 0. \quad (9b)$$

MUT_i/MDT_i 为第 i 台发电机最小启动/停用时间。

传输线约束:

$$P_m^{\max} \leq P_{mj} \leq P_m^{\max}, \quad (10a)$$

$$P_{mj} = \sum_{i \in G} k_{mj} u_{i,j}. \quad (10b)$$

$P_m^{\max}$ 为线 m 最大传输容量, P_{mj} 为时间 j 在传输线 m 上负荷流, k 为灵敏度系数, 可由DC算法确定。

爬坡速度约束:

$$P_{ij} - P_{ij-1} \leq UR_i, \quad (11a)$$

$$P_{ij-1} - P_{ij} \leq DR_i. \quad (11b)$$

UR 为上升速率限制, DR 为下降速率限制。

3 混合优化策略(Strategy of hybrid optimization)

在一般情况下, 各个目标函数间可能是冲突的, 不存在惟一的全局最优解, 使所有目标函数同时最优。若 x^* 是搜索空间中一点, 当且仅当不存在 i (在搜索空间中)使得 $f_i(x) < f_i(x^*)$ 成立称 x 为非劣最

优解(Pareto optimal), 由所有非劣最优解组成的集合称为多目标优化问题的最优解集(Pareto optimal set). 相应非劣最优解的目标向量称为非支配目标向量(non-dominator), 由所有非支配的目标向量构成多目标问题的非劣最优目标域, 也称为Pareto 前沿(Pareto front).

变权重组合法与经典的线性加权法不同, 变权重组合法在一次优化过程中, 有规律地改变各目标函数的权重来进行适应度评估^[10]. 这种方法权重的改变可以采用随机变化或者直接把权重信息编码到染色体中随进化过程而进化. 这样种群中的所有个体可以有不同的目标函数组合进行适应度评估, 从而使优化过程从不同的角度同时进行, 一次运算就可得到机组组合和负荷分配 Pareto 优化前沿.

采用混合优化算法, 首先运用组合结构基因的混合进化算法得到组合优化方案群, 在进化过程中对最优部分方案运用基于线性搜索的混沌局部算法加速得到最优环境/经济运行负荷分配 Pareto 优化前沿.

3.1 染色体的结构设计(Structure design of chromosomes)

染色体可表示为包括机组组合基因和负荷分配参数基因的混合结构, 组合基因采用二进制编码, 表示发电机在某小时启停状态, “0”表示该发电机停止, “1”表示该发电机启动. 参数基因采用实数编码, 每个基因用一个实数代表对应控制基因所分配的经济负荷的百分比, 初始设置根据负荷与启动机组总功率所占比率选取. 多目标进化算法具有主种群和 Pareto 优化前沿种群, Pareto 优化前沿种群保存搜索得到的优化前沿个体, 包括多目标适应值、单目标适应值、权值和基因等数据.

3.2 约束处理(Processing of constraints)

对于约束处理, 以往方法往往采用不可微精确罚函数法^[4], 但这种方法对于不可行方案比例较大时, 计算量很大, 因此本文采用在计算适应度时分段分步处理并对基因进行修正的方法, 即在 UC 机组组合优化阶段处理负荷功率约束和启停约束, 将不满足要求的基因进行修改和替换, 在环境/经济负荷分配混沌优化时处理负荷平衡、传输线和爬坡约束, 对于在本阶段不便处理的约束采用罚函数法.

$$F = \sum_{j=1}^t F(j) + \beta_1 F_{TR}(j) + \beta_2 F_{TD}(j) + \beta_3 V_{TL}(j). \quad (12)$$

式中: $F(x)$ 为原问题目标函数; β_i 为罚因子, $F_{TR}(j)$, $F_{TD}(j)$ 为未满足负荷需求及预留功率, $V_{TL}(j)$ 为超

过线容许负荷.

3.3 基于混沌的局部线性搜索(Chaos based local linear search)

混沌优化作为一种直接搜索算法, 其缺点是仅仅利用混沌变量的特定内在随机性和遍历性来搜索最优解, 并没有利用已找到的局部最优解, 且当最优解位于小区间时, 解的收敛速度仍然缓慢, 而优先权较高的机组单元其最优负荷分配往往在满负荷, 因此自然的想法是把混沌优化的全局搜索能力与一般的局部搜索算法相结合. 为此, 本文采用一种基于线性搜索的混沌局部优化方法^[11], 利用前次算法搜索找到的局部最优点 P^{*old} , 与再做 $N1$ 次混沌搜索找到的局部最优点 P^* 进行比较, 若 $\|P^{*old} - P^*\| > \varepsilon$, 则沿方向 $L = P^* - P^{*old}$, 从 P^* 出发做线性搜索求出 P^0 , 用 P^0 取代 P^* . 具体算法的实现方案如下:

步骤 1 初始化. 由式(15)生成混沌变量 $\{y_i - 0.5\}$, i 为机组台数, 并取 $N1, N2$ 为合适的整数.

$$z_{i,t+1} = 4z_{i,t}(1.0 - z_{i,t}),$$

$$z_{i,t} \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, m+1, \quad (13)$$

$$y_n = \begin{cases} z_n + 0.5, & x < 0.5, \\ z_n - 0.5, & x > 0.5. \end{cases} \quad (14)$$

变换后的序列概率分布呈中心密度大边缘小, 基于混沌的局部线性搜索与遗传方法相结合既可加快算法的收敛速度又可防止过早收敛.

步骤 2 将混沌变量以前段确定的参数基因为基点变换到相应启动机组的允许解空间 P_k , 并对功率约束进行修正, 即随机选取第 j 个发电机, 其功率变化补偿其他发电机功率的变化. 计算与功率相应的部分性能指标 f_k , 如果当前点的性能指标值小于已有的最优值, 即 $f_k < f^*$, 则保留已有最优点、当前点及其相应的最优性能指标值 $P^{*old} = P^*, P^* = P_k, f^* = f_k$, 如果 f^* 经 $N1$ 步搜索后保持不变, 且 $\|P^{*old} - P^*\| > \varepsilon$, 则转步骤 3; 否则继续迭代搜索.

步骤 3 求 $L = P^* - P^{*old}$, 记容许集合为 R , 做线性搜索

$$\begin{cases} f(P') = \min_{\eta} \{(P^* + \eta L) | P^* + \eta L \in R\}, \\ P^{*old} = P^*, P^* = P', f^* = f(P'). \end{cases} \quad (15)$$

步骤 4 迭代次数 $m = m+1$, 如果 $m > N2$, 则终止搜索, 此时 P_i^* 即为局部搜索最优点, f^* 为得到的最优解, 修改相应参数和适应值, 否则转步骤 2.

由于利用了下降法, 所以可加快算法的收敛速度, 因为是功率参数的局部搜索, 可按时间区间分别

计算,并可只计算修正功率部分的性能指标值,因此减小了计算量。

3.4 多目标混合进化算法(MHEA)

多目标混合进化算法的主要思想是在负荷优化阶段对适应度高的部分个体实行基于混沌局部线性搜索寻优,用来加快遗传算法的收敛速度。进化算法如下:

步骤1 初始化。确定种群大小等进化参数,随机产生初始种群。由于不同的初始时间状态优化结果不同,为获得整体最优方案,由优化算法确定调度初始时间状态,取调度初始时间状态与结束时间状态相同。

步骤2 进化计算。计算每个方案的分目标函数值,根据函数值更新Pareto优化前沿种群。包括:1)搜索非支配个体并考入Pareto优化前沿种群;2)搜索Pareto优化前沿种群中的非支配个体,并除去支配个体;3)如果外部Pareto优化前沿种群数量超过预定最大数量,可通过聚类方法减少。

步骤3 选择父辈。随机确定权重 w , $0 < w < 1$,按式(6)计算目标函数值,从种群中选择父代,个体被选择的概率为:

$$P_s(P_i) = \frac{F_{\max} - F(P_i)}{\sum_{j=1}^n (F_{\max} - F(P_j))}. \quad (16)$$

其中: $F_{\max}$ 为最大函数值, $F(P_i)$ 为个体 P_i 的函数值。

步骤4 交叉与变异操作,控制基因采用两段式交叉,对控制基因以概率 P_{m1} 进行变异,其操作为对位进行取反,改变发电机的启停状态,适应值最高的个体直接进入下一代,随机选择优化前沿种群个体考入工作群中。为了减少生成的不可行基因,可对生成的基因进行修复操作,如对于不满足最小启停和预留功率的控制基因进行修改,设立规则和禁忌表,使后面基因修改不改变前面已修改的基因变量。参数基因在此阶段保持初始值不变。

步骤5 局部搜索。

经过若干代运算后,对种群中的10%优秀个体进行局部搜索,搜索初始个体的选择按以下方法确定:随机确定权重 w , $0 < w < 1$,根据本次权重由已得出的单个目标值按式(6)计算多目标函数值,将种群中10%的多目标函数值按概率 P_{m2} 进行局部混沌线性搜索(一般不超过5个),在局部搜索中权向量保持不变,也就确定了最佳搜索方向。如图1所示,如随机确定的权重为 $w = 0.3$,计算适应值得到本次优秀个体依次为 a, b, c, d, e ,以 P_{m2} 的概率按 w 所指方向进

行局部搜索,计算局部改进适应值。假设得到 r, s, h , g ,由图可以看出个体 h 和 g 为支配个体, s 为最优个体。与一般多目标进化算法相比,由于采用优秀个体进行局部搜索,并且确定了最佳方向,只需修改顺序改变的适应值部分,使搜索效率提高。

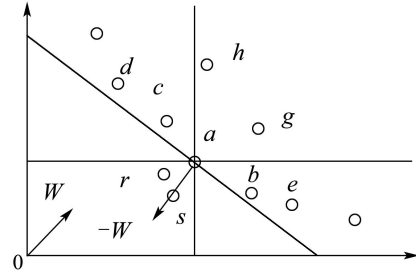


图1 局部搜索选择示意图

Fig. 1 Illustration of the selection of initial solutions for local search

步骤6 根据停止条件判断寻优是否结束,如否则转步骤2。

多目标混合进化算法框图如图2所示。

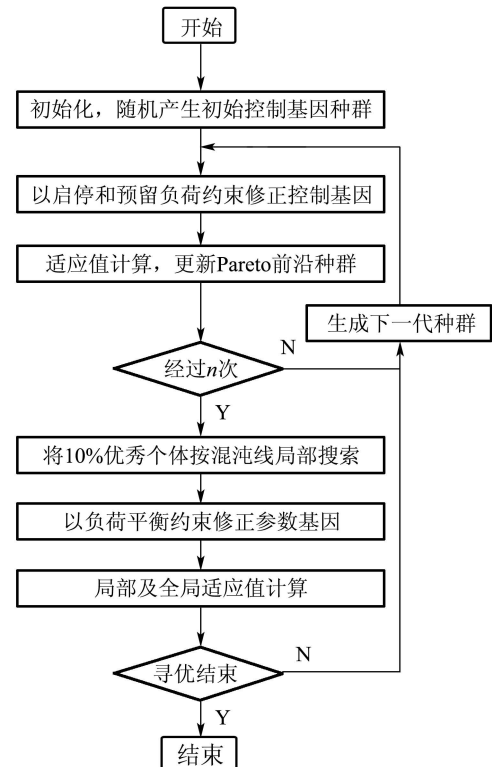


图2 多目标混合优化进化算法框图

Fig. 2 Scheme of the MHEA

4 研究实例(Case study)

将本文方法应用到一个具有12个单元中等规模电力系统中,其发电机单元参数数据见表1。

小时负荷需求如表2所示,为进行比较用拉格朗

日法LR^[1]、混合遗传算法HGA^[5]和变尺度混沌优化COA^[9]对同样问题进行寻优,为简化起见,仅考虑经济(费用)目标,优化结果如表3所示,GA算法

和COA都获得了负荷调度优化值,MHEA得到的优化值最好,COA计算时间最多,GA次之,而MHEA在寻优和计算时间都具有较好的结果。

表1 发电机单元参数表

Table 1 Parameters of generation unit

	$P^{\min}$	$P^{\max}$	a_i	b_i	c_i	bus	α	β	γ	ξ	λ	UH/h	DH/h	UR	DR	M	v	τ
1	25.0	100.0	2183.35	181.00	0.0612	1	6.492	-5.554	4.092	2.0e-4	2.857	2	2	51.0	74.0	70	70	4
2	25.0	100.0	2187.75	182.00	0.0596	1	6.490	-5.554	4.091	2.0e-4	2.857	2	2	51.0	74.0	70	70	4
3	54.25	155.0	1430.28	107.154	0.0473	1	5.639	-6.047	2.543	5.0e-4	3.333	3	2	55.0	78.0	150	150	6
4	54.25	155.0	1427.34	106.940	0.0473	2	5.639	-6.047	2.543	5.0e-4	3.333	3	2	55.0	78.0	150	150	6
5	54.25	155.0	1435.97	107.583	0.0487	4	5.639	-6.047	2.543	5.0e-4	3.333	3	2	55.0	78.0	150	150	6
6	54.25	155.0	1433.17	107.376	0.0481	4	5.639	-6.047	2.543	5.0e-4	3.333	3	2	55.0	78.0	150	150	6
7	68.95	197.0	2591.31	230.00	0.0259	1	3.380	-3.550	5.426	2.0e-3	2.000	4	2	55.0	99.0	200	200	8
8	68.95	197.0	259.649	231.00	0.0260	1	3.380	-3.550	5.426	2.0e-3	2.000	4	2	55.0	99.0	200	200	8
9	68.95	197.0	260.176	232.00	0.0263	1	3.380	-3.550	5.426	2.0e-3	2.000	4	2	55.0	99.0	200	200	8
10	140.0	350.0	1770.57	108.816	0.0153	4	5.151	-5.555	6.131	1.0e-5	6.667	5	3	70.0	120.0	300	200	8
11	100.0	400.0	3119.10	75.031	0.0195	5	4.586	-5.094	4.258	1.0e-6	8.000	8	4	50.5	100.0	500	500	10
12	100.0	400.0	3100.02	74.921	0.0194	3	4.586	-5.094	4.258	1.0e-6	8.000	8	4	50.5	100.0	500	500	10

表2 小时负荷需求

Table 2 Load demand for hours

小时	负荷/MW	小时	负荷/MW	小时	负荷/MW
1	602.7	9	1675.8	17	1602.3
2	588.0	10	1852.2	18	1881.6
3	529.2	11	1940.4	19	1940.4
4	499.8	12	1999.2	20	1705.2
5	602.7	13	1925.7	21	1.2495
6	823.2	14	1734.6	22	970.2
7	1158.4	15	1587.6	23	764.4
8	1411.2	16	1499.4	24	662.2

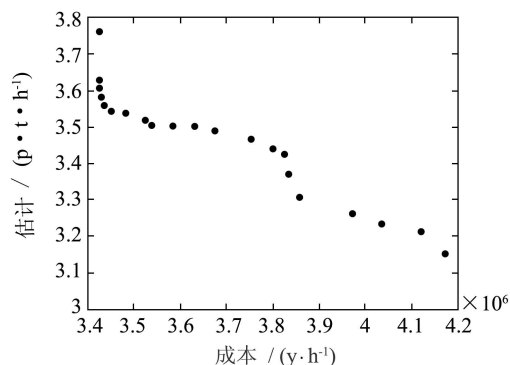


图3 Pareto优化前沿

Fig. 3 Pareto-optimal front

图3为得到的Pareto优化前沿,可以看出经济和环境目标是相互竞争的,也就是说难以找到唯一的全局最优解,优化解可根据具体情况折衷进行选择。

表3 优化结果比较

Table 3 Compare of results obtained from different approach

	LR	HGA	COA	MHEA
优化值($\times 10^6$)	3.4910	3.4345	3.4317	3.4299
时间/s	323	245	2257	142

5 结论及应用展望(Conclusion and expectation for application)

本文应用多目标混沌混合优化方法求解电力系统环境/经济负荷调度问题,综合考虑了启停损耗、网损和汽轮机的阀点效应.采用基因修正和罚函数相结合,用多目标进化算法搜索Pareto优化前沿.采用优秀个体进行混沌局部线性搜索,并且确定了最佳方向,只需修改顺序改变的适应值部分,使收索效率提高.仿真结果表明该方法结构简单,寻优速度快,能满足解决实际负荷经济/环境分配问题的要求。

参考文献(References):

- [1] WANG S J, HAHIDEPOUR S M, KIRSCHEN D S, et al. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation[J]. *IEEE Trans on Power systems*, 1995, 10(3): 1294 – 1301.

$$Q_1 = [176.4785 \quad -349.7259 \quad 208.1909],$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} -519.4601 & 582.4832 & 194.0667 \\ 212.5087 & -331.9907 & 523.8909 \end{bmatrix},$$

$$Q_3 = [90.5042 \quad 825.8450].$$

根据式(10),得到 α -分散控制器:

$$K_1 = [5.8874 \quad -2.0112 \quad -0.5011],$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -6.4347 & 1.3129 & -0.1114 \\ 6.5816 & -0.4561 & 7.3240 \end{bmatrix},$$

$$K_3 = [-11.2779 \quad -1.7195].$$

参考文献(References):

- [1] GUNDES A N, KABULI M G. Reliable decentralized integral-action controller design[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(2): 296 – 301.
- [2] SCORLETTI R, DUC G. An LMI approach to decentralized H-Infinity control[J]. *Int J of Control*, 2001, 74(3): 211 – 224.
- [3] TSAY J T, LIU P L, SU T J. Robust stability for perturbed large-scale time-delay systems[J]. *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, 1996, 143(3): 233 – 236.
- [4] XU B, LAM J. Decentralized stabilization of large-scale interconnected time-delay systems[J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 1999, 103(1): 231 – 240.
- [5] 胥布工, 许益芳, 周有训. 关联时滞在系统的分散镇定: 线枕矩阵不等式方法[J]. *控制理论与应用*, 2002, 19(3): 475 – 478. (XU Bugong, XU Yifang, ZHOU Youxun. Decentralized stabilization of large-scale interconnected time-delay systems: an LMI Approach[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(3): 475 – 478.
- [6] WU Hansheng. Decentralized adaptive robust control for a class of large-scale systems including delayed state perturbations in the interconnections[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1745 – 1751.
- [7] 刘晓志, 李华, 井元伟, 等. 不确定关联时滞系统基于观测器的鲁棒分散镇定[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2004, 25(6): 511 – 514. (LIU Xiaozhi, LI Hua, JING Yuanwei, et al. Observer-based robust decentralized stabilization for a class of uncertain interconnected time-delay systems[J]. *J of Northeastern University (Natural Science)*, 2004, 25(6): 511 – 514.)

作者简介:

彭达洲 (1972—), 男, 博士, 讲师, 主要研究兴趣为时滞系统和不确定性系统的分析与综合、网络拥塞控制, E-mail:dzhpeng@scut.edu.cn;

胥布工 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 1993 年获工学博士学位, 1993 年 11 月至 1995 年 3 月在英国 Strathclyde 大学电子与电机工程系作访问研究, 主要研究兴趣为时滞系统和不确定性系统的分析与综合、大系统理论及其应用。

(上接第 734 页)

- [2] KAZARLIS S A, BAKIRTZIS A G, PETRIDIS V. A genetic algorithm solution to the unit commitment problem[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(1): 83 – 92.
- [3] MANTAWY A H, ABDEL-MAGID Y L, SELIM S Z. Integrating genetic algorithms, tabu search, and simulated annealing for the unit commitment problem[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1999, 14(3): 829 – 836.
- [4] DESOUKY A E, AGGARWAL R, EIKARTEB M M, et al. Advanced hybrid genetic algorithm for short-term generation scheduling[J]. *IEE Proc-Gener Trans on Distrib*, 2001, 148(6): 512 – 517.
- [5] TONG S, SHAHIDEHPOUR S, OUYANG Z. A heuristic short-term unit commitment[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1991, 6(3): 1210 – 1216.
- [6] 唐巍, 李殿璞. 电力系统经济负荷分配的混沌优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(10): 36 – 40. (TANG Wei, LI Dianpu. Chaotic optimization for economic dispatch of power systems[J]. *Proceedings of CSEE*, 2000, 20(10): 36 – 40.)
- [7] SRINIVASAN D, CHANG C S, LIEW A C. Multi-objective generation schedule using fuzzy optimal search technique[J]. *IEE Proc-Gener Trans on Distrib*, 1994, 141(3): 231 – 241.
- [8] SRINIVASAN D, TETTAMANZI A. An evolutionary algorithm for evaluation of emission compliance options in view of the clean air act amendments[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1997, 12(1): 152 – 158.
- [9] PODMORE R. A Simplified and improved method for calculating transmission loss formulas[J]. *Pro PICA*, 1983, 18(2): 40.
- [10] ISHIBUCHI H, MURATA T. A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics*, 1998, 28(3): 392 – 403.
- [11] 张春慨, 李霄峰, 邵惠鹤. 基于线性搜索的混沌优化及其在非线约束优化问题中的应用[J]. *控制与决策*, 2001, 16(1): 123 – 128. (ZHANG Chunkai, LI Xiaofeng, SHAO Huihe. A chaos optimization algorithm based on linear search and its application to nonlinear constraint optimization problems[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(1): 123 – 128.)

作者简介:

王欣 (1971—), 女, 副教授, 博士生, 主要研究方向为复杂工业过程建模与智能控制、实时智能调度系统, E-mail:wwangxin97@163.com;

秦斌 (1963—), 男, 教授, 主要研究方向为复杂工业过程智能控制与智能调度、多智能体应用;

阳春华 (1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、实时优化调度。