

## 基于多智能体的分布式发电系统协调优化

郭红霞<sup>1</sup>, 吴捷<sup>1</sup>, 康龙云<sup>1</sup>, 杨苹<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省绿色能源重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 本文采用评价体系的动态合同协议, 解决分布式发电系统的运行优化问题. 根据分布式发电系统的结构特点, 建立了一种分布协调的Multi-Agent体系. 将各基本可再生发电单元作为电源Agent, 能量管理系统看作是管理协调Agent. 同一地域内的电源Agent组成一个Agent域, 由管理协调Agent对域内各电源Agent电源登记管理. 各Agent域聚集成一个分布式的网络结构. 在此网络结构中, 采用评价体系的动态合同网协议进行协调发电以简化投标过程, 以减少通信量, 提高系统的优化效率. 管理协调Agent作为招标方, 各电源机组作为投标方并按照偷懒原则进行投标. 最后对一个小型的分布式发电系统进行仿真实验, 验证了所提出方案的可行性, 并保证了分布式发电系统的电能质量和可靠供电.

**关键词:** 分布式发电系统; Agent域; 合同网协议; 运行优化

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** A

## Coordinated optimization of distributed hybrid generation system based on multi-agent system

GUO Hong-xia<sup>1</sup>, WU Jie<sup>1</sup>, KANG Long-yun<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;  
2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** A novel dynamic contract-net-protocol algorithm based on the evaluation system is proposed for the coordinated optimization of hybrid generation system. A distributed coordinated multi-agent system (MAS) is built based on the characteristics of the distributed hybrid generation system. Each basic renewable generation unit is viewed as an electrical source agent (ESA). The energy management system is viewed as the management coordinated agent (MCA). All ESA in an area constitute an agent domain registered and controlled by the MCA. All agent domains are gathered together to form a distributed network structure. In this structure, a novel dynamic contract-net protocol algorithm based on the evaluation system optimally coordinates the power generation, which simplifies the bidding procedures, reduces the amount of correspondences, and improves the optimization efficiency. In the bidding process, the MCA is the tenderee, the ESA is the bidder. Bidding is carried out based on the idleness principle according the local environment. The simulation on a small-scale hybrid renewable power system shows that the proposed optimization method realizes the stable operation of the whole generation system.

**Key words:** distributed generation system; Agent domain; contract net protocol; optimum operation

### 1 引言(Introduction)

目前, 世界范围内以煤、石油等为主的常规能源, 其资源有限且对大气的污染也日益严重, 造成了全球的能源紧张和环境恶化, 因此寻求多种新型的可再生能源及其发电的相关课题成为当前全球新能源研究的热点. 分布式发电系统充分利用风、光、沼气等自然能源的特点, 在系统组成上弥补了风电和光电等独立可再生能源系统在资源上的缺陷, 通过设计合理的分布式发电系统结构及运行优化方案, 获得分布式发电系统在资源上的最佳匹配性.

分布式发电系统的运行优化研究在于确定合理

的系统结构及能量管理策略, 使系统在不同时段都能满足负荷的电能质量要求. 由于分布式发电系统的发电单元种类较多, 不同种类的发电单元有着不同的运行特性. 所处地理位置比较分散, 需要采用不同于传统方式的分布式系统结构及并行优化能量管理策略. 文献[1]提出了一种基于小生境进化的多目标免疫算法进行微电网中分布式电源出力的优化管理. 文献[2]采用PQ-V/f综合控制策略实现了负荷功率变化时不同分布式电源间功率的共享. 目前就分布式发电系统的体系结构及其运行优化方面的研究还较少<sup>[3-6]</sup>.

本文就分布式混合发电系统提出了一种基于多代理系统(multi-agent system, MAS)的分布式协调系统结构,在此结构中把各基本风力、太阳能等可再生发电单元作为电源Agent,将能量管理系统看作是管理协调Agent. 本文把管理协调Agent及登记在它上面的多个电源Agent称为是一个Agent域. 同样多个Agent域也可以采用同样的思想和技术来组成一个更大的分布式Agent域结构. 在此分布式结构中,各域Agent采用基于评价体系的动态合同网协议进行协调优化发电. 本文提到的Agent域的概念和技术保证了本文所提出的分布式系统的可实现性和可扩展性.

## 2 基于MAS的分布式发电系统结构(Structure of distributed hybrid generation system based on multi-agent system)

### 2.1 分布式发电系统的体系结构分析(Analysis for structure of distributed hybrid generation system)

分布式发电系统的结构如图1所示. 图1所示系统中,经风能最大捕获控制器,风电获得最大功率输出,太阳能发电控制器使太阳能电池阵列始终处于最大功率输出状态. 沼气作为可控发电单元,通过控制器使其发电功率可调. 各发电单元和中央控制器连接,形成有效的信息传输、控制网络. 负载可分交流负载与直流负载,交流负载通过逆变器在交流侧使用电能,而直流负载(如电视、光电暖气等)可直接接到直流母线上利用电能. 同时通过通讯网络,根据电网的需求,可改变电网的功率因数,确保电网具有良好的电能质量.

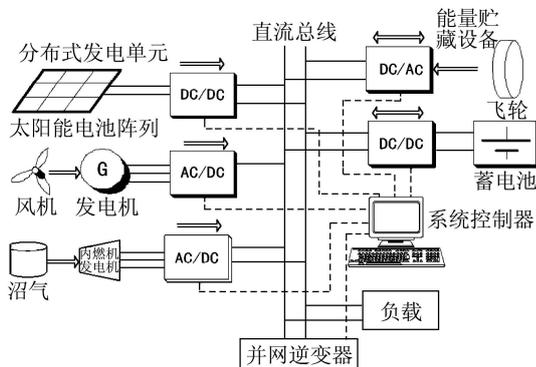


图1 分布式发电系统体系结构图

Fig. 1 The structure of distributed generation system

### 2.2 基于MAS框架的分布式发电系统(Distributed hybrid generation system based on MAS)

在图1所示的由风力、太阳能等可再生能源构成的分布式发电系统中,由于风速、日照强度和其他气候条件的变化,风电机组、太阳能电池阵列的输出功率存在着较大范围的波动,因而对可再生分布式混合电源中的能量管理系统提出了很高的要求.

本文采用Agent思想,将风力、太阳能、沼气的功率控制器及蓄电池都看作是电源Agent,将能量管理系统看作是管理协调Agent. 考虑到同一地域的分布式混合发电系统的共同目标是维护同一供电小区的能源供需平衡,而此地域的能量管理系统对这些电源进行管理监控,因此本文将同一供电小区的各电源Agent和它的管理协调Agent组成一个区域,即Agent域. 在Agent域内,管理协调Agent管理区域内的各电源Agent信息. 则不同Agent域通过各域内的管理协调Agent进行信息交互. 本文设计了一种基于MAS组织结构的分布协调式混合发电系统,结构如图2所示.

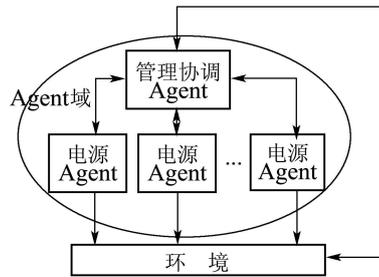


图2 基于分布协调MAS的混合发电系统结构

Fig. 2 Distributed coordinated hybrid power system structure based on MAS

## 3 Agent功能(Function of agent)

由图2可以看出,管理协调Agent在结构上与电源Agent之间有层次关系,但不同Agent域之间的管理协调Agent及域内的各电源Agent之间是平等的. 从功能上看,为了避免各Agent域内发生系统瓶颈问题,本文将系统的优化管理功能分散到各电源Agent中,实现在Agent域内,系统控制与管理的真正分布协调.

### 3.1 电源Agent(Generation agent)

本文将分布式发电单元的功率控制器及蓄电池看作是电源Agent. 它有更多的自治性,可根据自身的运行状态自动加入或退出管理协调Agent. 当某一独立发电单元发生故障或新增加发电设备时,在管理协调Agent中注销或登记. 同时,一定数目的电源Agent可通过聚集形成一个新的Agent域.

电源Agent的标志是符号名(symbolic name),由于一个Agent域中有多个电源Agent,为加以区分,每个Agent都有唯一的符号名来标志自己以便于通信和合作. 电源Agent的功能有: ① 采集现场电源运行数据,并对数据做必要的转化,风速、最大功率输出等; ② 根据自身的条件决定其运行状态; ③ 接收并执行管理协调Agent下达的协调命令; ④ 对现场电源及其控制设备进行直接的检测、诊断及控制. 电源Agent的运行状态包括<sup>[7]</sup>: 并网运行状态 $m_1$ (各个Agent到达自己的额定出力,并且向负荷输送电能)、热备用状态 $m_2$ (发电机组能达到最小出力,但

并未向负荷输送电力)、待机状态 $m_3$ (外部自然资源不能使发电机组能达到最小出力,从而使机组处于待机状态,一旦自然资源充足,机组能马上启动运行)、停机检修状态 $m_4$ (发电设备完全停止运行,如果是风机则风轮停止转动,同时制动闸将转轴固定住).这四个运行状态之间的转换关系如图3所示.

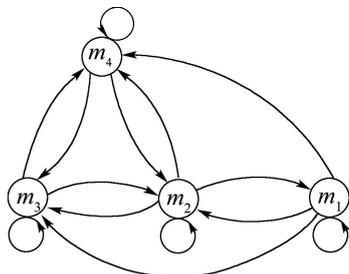


图3 运行模式转换关系

Fig. 3 Operation mode change

### 3.2 管理协调Agent(Management coordinated agent)

本文将分布式混合发电系统中的能量管理系统看作是管理协调Agent.在分布式发电系统中由于自然环境因素的影响各个电源Agent还不能完全自治协调的工作,他们之间存在着一定的冲突.分布式发电系统中使各个电源Agent之间产生冲突的主要原因有:系统中存在功率不平衡、各电源Agent自身的运行状态发生变化、上级调度的变化、电能质量的恶化等.而管理协调Agent对这些电源Agent的冲突进行协调并实行一定的监测和任务协调规划管理等.

当各电源Agent之间存在冲突时,管理协调Agent采用一定的协调策略对各电源Agent进行管理,但是这种控制管理仅是在各电源Agent自主规划和协商之上对发电任务进行的全局协调.当系统发生异常情况使得各电源Agent的通信不可靠时,这样高层次的协调规划可以提高整个系统的可靠性.

管理协调Agent其他的功能有:第一,与其他Agent域中的管理协调Agent进行交互通信;第二,校验电源Agent动作的执行情况;第三,人机对话.管理协调Agent除了给操作人员提供各电源Agent自身运行状态信息外,当系统发生难以预料的异常情况下,使得各电源Agent都无法解决时,由其通知操作人员处理这些异常、冲突或者死锁、如改变任务的执行状态;第四,人机界面.主要运行数据的显示、存储、打印、各种记录的查询,各种图形、报表的生产及打印.

### 4 分布式发电系统的协调优化方法(Coordinated optimization of distributed hybrid generation system)

合同网协议(contract net protocols)<sup>[8]</sup>是分布式控制中常用的协调优化策略,在多机器人的协调方面

得到了广泛的研究应用<sup>[9-10]</sup>.针对分布式发电系统的特点,本文采用基于评价体系动态合同网协议作为分布式发电系统中多Agent协调优化的策略.

#### 4.1 系统的优化目标(Optimization goal of system)

在分布式发电系统中,所有处在并网运行模式的电源Agent,其总发电量必须满足的功率平衡目标为

$$F_t = \sum_{i=1}^{N_1} u_{i,t} p_{i,t}, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad (1)$$

式中:  $T$ 为时段总数;  $N_1$ 为并网运行电源Agent总数,  $F_t$ 为 $t$ 时刻的系统总负荷,  $p_{i,t}$ 为Agent  $i$ 在 $t$ 时刻的出力,  $u_{i,t}$ 为机组 $i$ 在第 $t$ 时刻的状态,  $u_{i,t} = 1$ 表示机组处于并网运行状态,  $u_{i,t} = 0$ 表示机组处于非并网运行状态.并网电源Agent所对应的电能质量目标函数为

$$\min r = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_i u_{i,t} \right)}{N_1}, \quad (2)$$

式中 $\lambda_i$ 为并网运行的机组 $i$ 所对应的电能质量评估指标,即其输出功率平稳性的评估指标等.

### 5 基于评价体系的动态合同网协议(Dynamic contract net protocol algorithm based on evaluation system)

动态合同网中<sup>[11]</sup>,招标方分派任务时,根据信任度按照一定的概率来确定任务的投标方以减少通信量.本文提出采用评价体系的动态合同网协议,来简化投标过程,以减少通信量来提高系统的优化效率.

每个电源Agent完成任务的能力,是由环境和自身状况决定的.在Agent域中,电源Agent的信息包含环境和自身状况信息两部分,并注册在管理Agent上的.管理Agent对这些信息给与评价,并实时更新.

对于风机来讲,按照不同风机的实际输出功率的情况来建立每个风电电源Agent的评价信息.而对太阳能电池板,按照电池板的实际输出功率等情况来建立太阳能电源Agent的评价信息.评价信息 $r(t)$ 分为3类:

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{输出功率接近额定功率,} \\ 0.5, & \text{输出功率小于或大于额定功率,} \\ 0, & \text{无输出功率.} \end{cases} \quad (3)$$

当系统的功率不平衡时,管理协调Agent发布招标内容即招标任务.而招标内容来源于以下3个方面:第一,负荷需求变化引起的功率不平衡;第二,由上一级调度指令变化引起的功率不平衡;第三,是环境的变化使得风机或太阳能的输出功率发生变化.因此招标的一个任务类型为

$$\text{Task\_type} = \{L_1, L_2, L_3\}, \quad (4)$$

其中:  $L_1$ 为正常的系统负荷变化引起的供需失衡而产生的任务变更,这里的任务可以是负荷需求的

增加(对应于增加机组功率或增加联合发电机组数量),也可以是负荷需求的减少(结果为减少功率或减少联合发电机组数量); $L_2$ 为上一级调度指令变更而造成的任务变化; $L_3$ 为发电机组因自然资源变化的原因而导致的任务变更.任务变更来自几类不同的Agent,当管理协调Agent检测到这些任务变化,或者是电源Agent向它汇报了这些任务变更时,其发布招标任务.

本文把图2中的各电源Agent作为是投标方.投标方根据其本地资源状况,按照偷懒原则进行投标.

偷懒原则定义为:如果电源Agent  $i$  处于热备用状态时,则投标.否则一概不投标.偷懒原则防止了电源Agent在没有能力完成任务时也进行投标的行为.

招标方接到电源Agent  $i$  的投标方案之后,按照其价值观念即:功率平衡、电能质量目标最优的原则,并根据评价体系从中挑选出最佳的电源Agent的组合方案,向各投标方发布中标方案.各电源Agent根据中标方案进行发电,如图4所示.以 $L_1$ 的变更为例,说明基于合同网的电源Agent与管理Agent之间协商过程如下:

**Step 1** 当管理协调Agent检测负荷增加的情况时产生招标任务,并公开招标消息;

**Step 2** 各个电源Agent根据其他电源Agent信息提出投标方案,按照偷懒原则向招标方投标;

**Step 3** 管理系统Agent按照自身的价值观念,并根据评价体系来选取本轮投标的最优方案,并将此方案以广播方式下达;

**Step 4** 各个Agent按照所接任务执行.

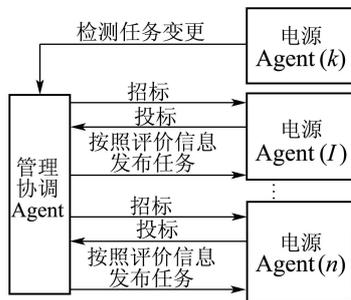


图4 基于合同网的协调过程

Fig. 4 collaboration procedure of contract net

### 6 仿真研究(Simulation study)

本文以5台机组(风机及太阳能发电)、24个时段的可再生分布式发电系统为研究背景.系统参数如表1所示.表1中,电源Agent为5个, $p_i$ 表示机组的额定输出功率, $p_{i0}$ 表示在初始阶段机组*i*的实际出力能力, $\lambda_i$ 表示机组*i*所对应的电能质量评估指标,按公式2进行计算每个机组的电能质量. $S_i$ 表示机组*i*已经连续运行的时间,负值表示连续停机的时间,例如 $S_2 = -5$ ,表示机组2已经连续停机了5小时.各时

段的系统负荷见表2.假定各Agent的电能指标、电价已经给出,且电价在各个时段都是一样的,同时假定各Agent始终处于并网运行或热备用这两种状态.

表1 系统参数  
Table 1 System data

名称 类型	A1 机组1	A2 机组2	A3 机组3	A4 机组4	A5 机组5
$p_i/\text{kW}$	22	12	15	22	15
电能质量 $\lambda_i$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6
电价/kW	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
$p_{i0}$	15	8	12	8	7

表2 负荷数据

Table 2 Load data

时段	负荷	时段	负荷	时段	负荷
1	25	9	55	17	48
2	27	10	60	18	43
3	30	11	62	19	47
4	38	12	65	20	42
5	40	13	68	21	36
6	45	14	64	22	30
7	49	15	58	23	28
8	50	16	53	24	26

假定正午的时候太阳能电源输出可达其额定功率,风机的实际功率一般小于其额定功率,沼气发电机组功率可调,并符合一定的概率分布,则一天内各Agent在各时间段的实际出力如表3括号内的数据.

在Agent域中,管理Agent上对各个电源的初始评价信息如表4所示.

按照本文所提出的基于评价信息的动态合同网协议的优化方法对系统进行仿真研究,管理协调Agent从供电系统的角度出发,其最主要的目标就是“安全、经济、优质”地供能,因此在考虑中标方案时,优先考虑的目标是供需平衡,即要求总发电量要恰好与负荷需求值相等.其次考虑电能质量,最后才考虑经济目标,即电价.因此本文假定所有机组电价相同.

表3是根据负荷需求,采用合同网协议优化得到的不同时段各Agent的联合发电及电网与风光混合发电系统的能量交换情况. $A_i(i = 1, \dots, 5)$ 为各电源Agent,具体数值为个机组的实际出力,0表示机组没有加入发电计划,1表示加入发电计划,第6列表示了分布式电源并网运行,1为正值表示分布式发电系统向电网输送的能量,-1表示电网向分布式发电系统的负荷提供能量.具体的数值为电网与混合系统交换的能量.

从表3可以看到本文所提出的基于分布式协调的MAS系统结构及优化方法,可以对分布式发电系

系统中的各个电源机组的运行进行协调优化, 同时对大电网与分布式发电系统之间的能量交换进行检测和控制, 这对分布式发电系统的并网和大电网的安全稳定运行提供了很好的保障.

表 3 不同时段Agent的出力

Table 3 Generating scheme in different time

时段	A1	A2	A3	A4	A5	能量交换
1	(20)*0	(12)*0	(11)*1	(18)*1	(0)*0	(4)*1
2	(19)*0	(11)*0	(13)*1	(16)*1	(0)*0	(2)*1
3	(18)*0	(9)*0	(15)*1	(19)*1	(0)*0	(4)*1
4	(20)*0	(10)*1	(14)*1	(20)*1	(0)*0	(6)*1
5	(21)*0	(10)*1	(12)*1	(21)*1	(0)*0	(3)*1
6	(19)*1	(10)*0	(13)*1	(19)*1	(0)*0	(6)*1
7	(20)*1	(10)*0	(11)*1	(18)*1	(3)*0	(0)*1
8	(17)*1	(9)*0	(13)*1	(20)*1	(5)*0	(0)*1
9	(18)*1	(11)*0	(13)*1	(19)*1	(7)*0	(2)*1
10	(20)*1	(11)*0	(13)*1	(21)*1	(9)*0	(3)*1
11	(15)*1	(8)*1	(10)*1	(17)*1	(11)*0	(1)*-1
12	(15)*1	(8)*1	(12)*1	(13)*1	(14)*1	(3)*-1
13	(16)*1	(9)*1	(12)*1	(13)*1	(15)*1	(3)*-1
14	(16)*1	(10)*1	(11)*1	(15)*1	(15)*1	(3)*1
15	(14)*1	(9)*1	(8)*1	(13)*1	(15)*1	(1)*1
16	(15)*1	(10)*0	(9)*1	(15)*1	(14)*1	(0)*1
17	(8)*1	(6)*1	(7)*1	(9)*1	(14)*1	(4)*-1
18	(9)*1	(8)*0	(8)*1	(10)*1	(11)*1	(3)*1
19	(10)*1	(9)*1	(11)*1	(12)*1	(2)*1	(3)*-1
20	(10)*1	(9)*1	(10)*1	(11)*1	(0)*0	(2)*-1
21	(12)*1	(9)*1	(9)*1	(13)*1	(0)*0	(7)*1
22	(10)*1	(8)*0	(8)*1	(9)*1	(0)*0	(5)*1
23	(9)*1	(7)*1	(7)*1	(9)*1	(0)*0	(4)*1
24	(13)*0	(10)*0	(12)*1	(14)*1	(0)*0	(0)*1

表 4 评价信息

Table 4 Evaluation information

电源	A1	A2	A3	A4	A5
评价信息	1	0.5	1	0	0.5

### 7 结论(Conclusion)

本文提出了一种基于多Agent的分布式系统结构, 将各基本可再生发电单元作为自治Agent, 同时提出了一种基于评价体系的动态合同网协议对系统进行优化协调, 并对优化方法进行了阐述, 最后针对一个小型的分布式混合发电系统进行仿真研究, 其中管理协调Agent从供电系统的角度出发, 在考虑中标方案时, 优先考虑的目标是供需平衡, 即要求总发电量要恰好与负荷需求值相等. 其次考虑经济目标, 并参考评价信息, 从而得到了一天24h内各个电源Agent的联合发电计划及大电网与混合发电系统的能量交换情况. 仿真结果表明本文所提出的系统机构及优化方法可保证混合发电系统的优化及大

网安全稳定运行, 为分布式混合发电系统的检测和控制提供了很好的条件.

### 参考文献(References):

- [1] 王新刚, 艾芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83. (WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua, et al. Multi-objective optimal energy management of microgrid with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(20): 79-83.)
- [2] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103. (WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(7): 98-103.)
- [3] CHEDID R, SALIBA Y. Optimization and control of autonomous renewable energy systems[J]. *International Journal of Energy Research I*, 1996, 20(7): 58-66.
- [4] 徐大明, 康龙云, 曹秉刚. 风光互补独立供电系统的优化设计[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 919-921. (XU Daming, KANG Longyun, CAO Binggang. Optimal design of stand-alone hybrid wind/PV power systems[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2006, 27(9): 919-921.)
- [5] 柳澹, 吴捷, 曾君, 等. 基于多Agent系统的分散发电调度规划[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 151-154. (LIU Dan, WU Jie, ZENG Jun, et al. Dispatch management in distributed power generation on multi-agent system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 151-154.)
- [6] 余晓明, 曾君, 郭红霞, 等. 基于multi-Agent和Petri网的分布式风光互补系统[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 353-360. (YU Xiaoming, ZENG Jun, GUO Hongxia, et al. Distributed wind-pv system based on multi-agent and petri nets[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 353-360.)
- [7] LIU D. *Research on distributed wind-photovoltaic hybrid power management system*[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2008.
- [8] SMITH R G, DAVIS R. The contract net protocol: high level communication and control in a distributed problem solver[J]. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, 29(12): 1104-1113.
- [9] 陈为雄, 李振龙. 基于BDI模型的多机器人智能体系统设计[J]. 机器人, 2004, 26(4): 310-313. (CHEN Weixiong, LI Zhenlong. Design of intelligent multi-robot systems based on BDI model[J]. *Robot*, 2004, 26(4): 310-313.)
- [10] 周浦城, 洪炳镛, 王月海. 动态环境下多机器人合作追捕研究[J]. 机器人, 2004, 27(4): 289-295. (ZHOU Pucheng, HONG Bingrong, WANG Yuehai. Multi-robot cooperative pursuit under dynamic environment[J]. *Robot*, 2004, 27(4): 289-295.)
- [11] 张海俊, 史忠植. 动态合同网协议[J]. 计算机工程, 2004, 30(21): 44-57. (ZHANG haijun, SHI zhongzhi. Dynamic contract net protocol[J]. *Computer Engineering*, 2004, 30(21): 44-57.)

### 作者简介:

**郭红霞** (1971—), 女, 工学博士, 讲师, 专业特长为系统的优化设计, 主要从事现代控制理论在电力电子、可再生能源中应用方面的研究工作, E-mail: guohx@scut.edu.cn;

**吴捷** (1937—), 男, 博士生导师, 主要从事智能控制在电力系统及新能源中的应用方面的研究工作, E-mail: epjiewu@scut.edu.cn;

**康龙云** (1961—), 男, 博士生导师, 主要从事电动汽车的控制等方面的研究工作, E-mail: lykang@scut.edu.cn;

**杨苹** (1967—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子电路的建模与控制, E-mail: epyyang@scut.edu.cn.