

文章编号: 1000-8152(2008)02-0353-04

基于multi-Agent和Petri网的分布式风光互补系统

余晓明, 曾 君, 郭红霞, 柳 澹

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 近年来随着“大机组、高电压、大电网”发供电模式的弊端日益显露, 分散式供电系统成为21世纪电力工业的发展方向. 此外, 随着风力、太阳能等可再生能源的飞速发展及其发电效率的不断提高, 使研究风光互补系统的分布式供电有着重要意义. 文中提出一种基于multi-Agent的分布式风光互补混合供电系统, 将分散的风力、太阳能光伏发电装置组成分布式系统, 并采用有色Petri网建立了multi-Agent的协作模型. 通过模拟风力-太阳能的运行情况, 证明了分散控制策略的有效性.

关键词: 分布式供电; 风光互补系统; 多智能体系统(MAS); 有色Petri网(CPN)

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Distributed wind-PV system based on multi-Agent and Petri nets

YU Xiao-ming, ZENG Jun, GUO Hong-xia, LIU Dan

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: A new distributed architecture of wind-photovoltaic hybrid system is formulated in this paper to tackle the disadvantages of power generation and power supply in the mode of “large units, high voltage, large-high power grid”. Firstly, a multi-agent system is applied to wind-photovoltaic hybrid system, and the mathematical model is given to describe the power demand and supply situation of the system based on multi-agent. Then, an algorithm of dynamic task assignment is developed for the cooperation between agents. By combining with coloured petri net, the cooperation and negotiation process is established. Finally, the distributed control strategy is proved to be efficient in a simulative wind-photovoltaic field running circumstance.

Key words: distributed power supply; wind-photovoltaic system; multi-agent system(MAS); colored Petri net(CPN)

1 引言(Introduction)

按目前的技术, 可再生能源系统规模较小, 难以实现集中供能, 而较适合以分散供能方式出现. 可再生能源中发展最快的是风力和太阳能^[1]. 由于风能和太阳能在时间上有很强的互补性, 使风光互补发电系统在资源上具有最佳的匹配性. 当前, 国内外对风力/太阳能光伏互补发电的研究大多集中在静态体系结构的研究、底层发电、蓄能设备的配置及控制、系统仿真等.

由于风力和太阳能发电易受天气和环境的影响, 它们给系统提供的电量呈现动态变化趋势. 如考虑风机发电过程中风速的变化和可能出现的故障, 风机存在“接入、正常运行、并网、退出、停机”等工作状态. 这些工作状态之间的转变方法是基本的控制策略, 属于离散决策部分, 而各种工况下的控制过程是连续的. 太阳能光伏发电也同样存在连续控

制部分和离散决策部分. 本文提出一种分布式风力和太阳能混合发电的方式, 并引入混合Agent描述各个子系统. “混合”意味着系统中包含了离散事件系统和连续时间系统两种特征及它们之间的相互作用. 此外, 还设计了动态任务分配与协商机制算法, 利用Petri网建立了多Agent间的协作交互模型.

2 系统体系结构及特点(System architecture and character)

2.1 系统体系结构(System architecture)

为了使风光互补供电系统具有较高的实时性、动态性和可扩展性, 本文采用了一种分布式协作控制结构^[2]. 通过光纤以太网将分散的风机、太阳能发电子系统组成分布式网络. 其体系结构如图1所示. N 个子系统通过光纤以太网形成一个动态的交互系统. 每个子系统都包含通信模块、人机界面、协作协调规划模块、监控模块、学习模块、数据处理及

信号控制模块、采集模块、传感器、蓄电池和发电设备本身^[3], 每个子系统可看作是网络的一个智能化节点. 在子系统内部, 所有功能模块的集成构成了对该发电设备的“代理”(Agent). 而 N 个智能化节点的交互作用就形成多代理(multi-Agent)运行模式. 通信模块从以太网接收其他节点传来的消息或向其他节点发送消息; 协作协调规划模块既可以作为某一任务的协作者, 响应其他子系统的协作请求, 也可以作为某一任务的组织者, 向其他子系统发送协作请求命令; 监控模块通过传感器、采集模块和数据处理及信号控制模块获得发电系统各个设备所处的状态及电能质量指标等; 通过人机界面, 管理者可以随时查看该子系统当前的运行状况, 及时排除底层设备出现的故障.

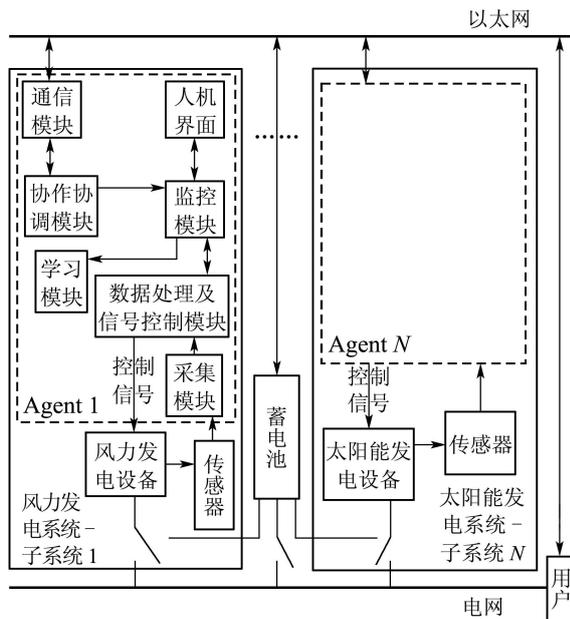


图1 分布式系统体系结构框图

Fig. 1 Block diagram of distributed system architecture

2.2 系统特点(System character)

该分布式风光互补供电系统可根据当地的气象数据和负载需求, 分析各部件的工况转移, 并考虑不同情况下系统的运行可靠性、经济性以及电能质量之后, 确定哪些发电子系统并入电网供电. 因此由风力、太阳能光伏发电组成的分布式风光互补供电系统具有以下特点:

1) 组成结构的复杂性. 分布式风光互补供电系统涉及连续变量和离散变量, 变量的动态特性导致系统行为的复杂性.

2) 分布式. 风光互补供电系统由多个子系统组成, 这些子系统甚至有可能是跨地区(县、市等), 每个子系统之间的关系是平等的. 这种结构使系统具有很强的分布式特征.

3) 交互性. 由风力、太阳能光伏发电组成的分布

式风光互补供电系统的各个组成部分不是孤立的, 而是相互影响、相互联系的, 各子系统均能通过通信等手段与其他子系统进行信息交流, 因此各个子系统存在交互性.

4) 智能性. 各个子系统具有自主进行决策的能力, 可以选择控制算法和协作者, 通过各个子系统的协作使整个系统性能达到最优, 并在协作的过程中进行学习、积累经验, 不断丰富知识库.

3 问题描述(Problem description)

风光互补能量管理系统的相关元素可用四元组 $\langle E, T, A, C \rangle$ 表示, E 是设备安装位置的环境集, T 是任务集, A 是完成某项任务的协作Agent集合, C 是约束条件集合.

任务 T 是由图1中的用户发起的, 表示某个时间段的电量需求. 多Agent任务分配和任务协调的目标是在满足约束条件下使用户获得最大的实惠. 其数学模型可以描述如下:

$$\min \frac{\sum_i t C_{wi} P_{wi}(t) + \sum_j t C_{sj} P_{sj}(t)}{\sum_i t P_{wi}(t) + \sum_j t P_{sj}(t)}, \quad (1)$$

$$\sum_i t P_{wi}(t) + \sum_j t P_{sj}(t) - P_L(t) \pm P_{SB}(t) = 0, \quad (2)$$

$$Q_f = \sum_{i=1}^8 W_i E_{qi} \geq C, \quad (3)$$

$$P_{SB-MIN} \leq P_{SB} \leq P_{SB-MAX}, \quad (4)$$

$$t = 1, 2, \dots, T.$$

式(1)描述了在 t 时间段内的平均电价, 其中: $P_{wi}(t)$, $P_{sj}(t)$ 分别表示风力发电机组和太阳能光伏发电机组在时间段 t 的发电功率, C_{wi} , C_{sj} 分别表示风力发电机组和太阳能光伏发电机组的单位电价. 式(2)为系统功率平衡条件, 其中 $P_L(t)$, $P_{SB}(t)$ 分别表示 t 时段的负荷和蓄电池在 t 时段的可调电量, 取“+”表示蓄电池作为供电Agent, 取“-”表示蓄电池作为需求Agent. 式(3)为电能质量约束, Q_f 为电能质量综合指标, 由各项指标 E_{qi} 乘上各自权重 W_i 后求和得到, 其中 E_{qi} 分别表示频率偏差、波动、闪变、谐波、电压偏差、三相不平衡、电压暂降、功率波动. C 为用户能接受的电能质量综合指标值, Q_f 须大于 C , 才能保证电网供电的稳定性. 式(4)是为了延长蓄电池的使用寿命, 避免蓄电池处于过充电和过放电状态.

4 算法描述(Algorithm description)

任务执行过程中, 有些任务单个Agent无法完成, 需要进行合作. 本文以降低电价、减少多Agent之间的通信量和缩短任务完成时间为性能指标, 设计了动态任务分配与协商机制算法. 其步骤如下:

第1步 任务发起Agent以广播方式向本地局域网中Agent发出 t 时段请求Request($T_t, E_{Price}, R_{Time}(T_t), E_{Quality}, Effect(T_t), Query$), 请求Agent在满足电价 E_{Price} 和电能质量 $E_{Quality}$ 约束的条件下在 $R_{Time}(T_t)$ 之前完成任务 T_t , 完成效果为 $Effect(T_t)$. 局部广播是为了减少系统通信量, 优先利用本地资源.

第2步 Agent收到请求后, 将进行任务分配与协商. 效用最大的Agent将作为任务组织者, 并选择效用较大的Agent合作完成任务. 根据Agent完成任务的需求, 设计了一个竞标效用函数, 见式(5). 其基本原则是: 发电机组的单位电价越低, 效用越大; 单独完成任务的效用最大, 如需合作, 则尽可能用越少的Agent完成任务, 从而减少Agent之间的通信量; 与用户距离越近的Agent, 其效用越大, 同时也可缩短任务完成时间.

$$u = l \frac{1}{E_{price}} + m \frac{P_{curr}}{P_{rest}} + n \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (5)$$

其中: E_{price} 为发电机组电价, P_{curr} 为发电机组当前的出力, P_{rest} 为任务中尚未被承接的电量. d 为Agent与用户间的距离. l, m, n 为系数. 当 $P_{curr} > P_{rest}$ 时, 表示任务组织者能单独完成任务, 超出任务所需求的电量可给蓄电池充电, 此时任务组织Agent将给任务发起Agent作出承诺Commit($E_{Price}', R_{Time}'(T_t), E_{Quality}', Effect'(T_t)$), 转第5步. 当 $P_{curr} < P_{rest}$ 时, 表示任务组织者无法独立完成任务, 需要其他Agent的合作, 转第3步.

第3步 任务组织Agent在本地局域网中对 P_{rest} 进行招标, 效用值越大, 中标几率越大. 中标Agent将给任务组织者作出承诺Commit($E_{Price}'' , R_{Time}''(T_t), E_{Quality}'' , Effect''(T_t)$), 转第5步. 若无Agent中标, 转第4步.

第4步 任务组织 Agent 扩大招标范围, 若在 $R_{Time}(T_t)$ 内找到中标Agent, 转第5步, 否则, 任务组织Agent给任务发起Agent发出消息Modify($T_t, E_{Price}, E_{Quality}, Request$), 请求修改 E_{Price} 和 $E_{Quality}$. 更新约束条件后, 转第1步.

第5步 任务组织Agent(与合作Agent共同)执行任务计划.

5 基于有色Petri网的multi-Agent协作模型(Multi-Agent collaboration model based on colored Petri net)

在基于multi-Agent的分布式风光互补供电系统中, 各Agent之间存在复杂的通讯和合作. 这些通讯和合作对相互之间的影响很大, 必然存在很多潜在的冲突. 这些冲突通常会扰乱MAS的建立, 使交互

协作过程不能顺利进行. 因此本文在建模过程中使用有色Petri网描述并分析了Agent之间的通讯、协调、协作机制, 有效表达了Agent之间的相互作用机理. 这一初步给出的体系结构, 有望在继续完善后在分布式电源或微电网发电中得到真正的应用^[4,5].

5.1 有色Petri网(Colored Petri net)

为了增强对实际系统的描述能力, 人们提出了有色Petri网, 将库所中的每个标记与一种“颜色”相联系, 从而同一库所可以存放不同类型的资源, 而在基本Petri网中所有托肯是没有区别的. 相应地, 有色Petri网变迁的发生就不只是简单地复制和传递标记, 而是要对从输入库所取来的标记经过加工, 变成新颜色的标记后再传递给输出库所^[6].

5.2 协作过程有色Petri网模型(Colored Petri net model of collaboration process)

风光互补协调交互过程模型包含以下类型的托肯, 每种托肯都是包含了丰富信息的数据结构:

D : 需求计划托肯. $D = \{UD\}$, UD 表示电力用户需求. $\langle ud \rangle$ 为 UD 托肯的元素.

S : 服务计划托肯. $S = \{PS, WS, BS\}$, PS, WS, BS 分别表示光伏发电服务、风力发电服务及蓄电池服务. $\langle ps \rangle, \langle ws \rangle$ 和 $\langle bds \rangle$ 分别为 PS, WS 和 BS 托肯的元素.

C : 网络约束校验托肯. $\langle c \rangle$ 是 C 托肯的元素.

$\langle D, S \rangle$: 表示需求方选择 S 作为满足其 D 需求计划的托肯. 根据规则, 电力用户可选择PVA, WTA和SBA作为电力服务供应方, 这样就有 $\langle ud, ps \rangle, \langle ud, ws \rangle, \langle ud, bds \rangle$ 3种配对;

$\langle S, D \rangle$: 表示供应方愿意为提供 D 需求计划的需求方提供 S 方式的服务. 根据规则, 有 $\langle ps, ud \rangle, \langle ws, ud \rangle, \langle bds, ud \rangle$ 几种配对结果.

该系统供需电量的平衡, 是通过各成员之间的协作完成的. 在multi-Agent模型中, 成员包括PUA(power users Agent), WTA(wind turbine Agent), PVA(photovoltaic Agent), SBA(storage battery Agent)和GCA(grid constraining Agent), 在有色Petri网中, 使用椭圆表示各成员的库所, 用长方形表示变迁, 同一库所中可以包含几个不同颜色的托肯. 有色Petri网的图形描述如图2所示. 图中SBA处于放电状态, 即作为电力供应方.

图2中每一个PUA, WTA和PVA(3个为正体)分别用不同的颜色表示, 变迁的激发过程成为一个信息处理和分析的过程. 任务组织Agent和投标Agent协商过程模型如图3所示.

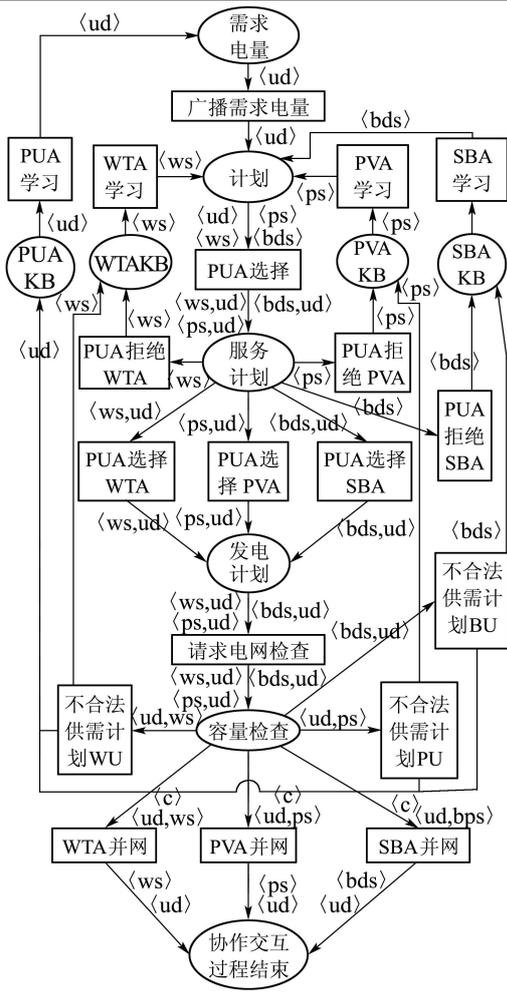


图2 基于有色Petri网的multi-Agent协作模型
 Fig. 2 Multi-Agent collaboration model based on colored Petri net

6 模型分析(Model analysis)

图2和图3模型的可达性和活性很容易通过可达树法得到验证. 通过图2的协作模型, 可以将分散的风力、太阳能发电系统通过以太网组建一个小型的混合发电站. 当日照强度大时, 太阳能发电电子系统出力较多, 在与其他子系统协调交互后, 太阳能发电电子系统将作为主要的供应方给负载提供电量, 而风力发电电子系统和蓄电池则起到辅助、补充的作用; 当风速较大时, 主要由风力发电电子系统给负载供电, 而太阳能发电电子系统和蓄电池则作为补充. 由于系统采用分布式供电方式, 单个子系统的故障不会影响到整个系统的正常运行.

7 结论(Conclusions)

风光互补发电系统不仅结构复杂, 而且各子系统存在复杂的交互, 本文引入multi-Agent技术将分散的风机、太阳能光伏发电装置等资源组成分布式供电系统, 采用有色Petri网建立了multi-Agent协作交互的模型. 这种分布式的风光互补供电方式没有庞大的输配电网络, 不存在网络故障引起的供电中断, 供电可靠性大大提高, 故障只影响局部用户, 没有现代电力系统大面积停电的危险. 但这一系统目前尚不够完善, 如对负荷可定义为两种即第1类(主要)和第2类(次要)负荷; 在优化过程中各指标如安全、经济、优质的折中处理以及各种约束条件的引入; 在连续控制模型部分, 各控制算法的内部切换和平滑过程等等. 但笔者相信, 随着对问题的深入分析和了解, 该系统的功能将日臻完善和实用.

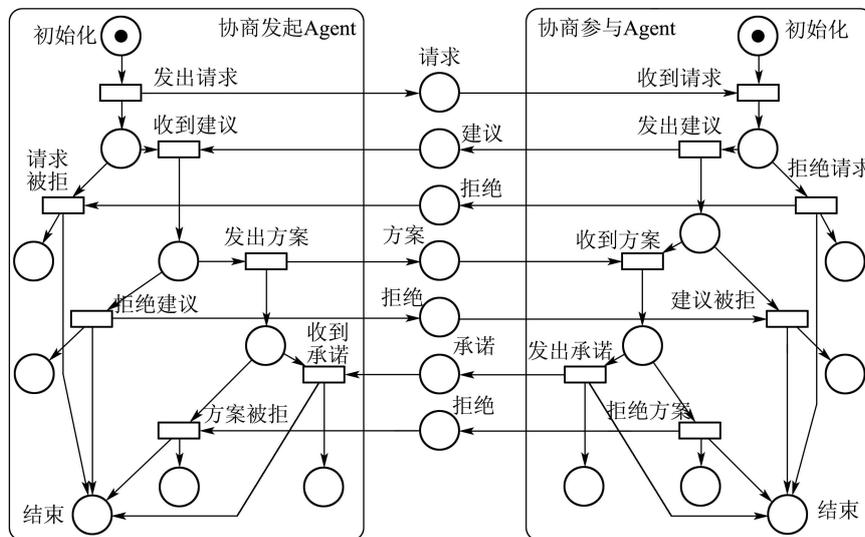
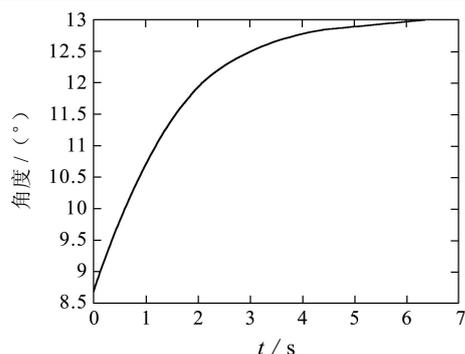


图3 图3协商过程Petri网模型
 Fig. 3 Negotiation model based on Petri net

图4(b) δ 随时间的变化Fig. 4(b) Variation of δ versus time

5 结论(Conclusions)

不可控整流加可控逆变的交-直-交结构是直驱式风力发电机较理想的实现方案. 调节逆变器输出电压使其与电网电压完全相同实现软并网, 而保持电压幅值不变调节电压的相位就可调节发电机输出功率实现最大风能跟踪. 在本文中所谓软并网与功率调节控制就是在不同工况下(并网与不同风速均视为不同之工况)给出最理想的逆变器调制波即给出调制电压的相位与幅值. 本文所提出的控制方法无需控制发电机或直流环节就可以较好地实现风能跟踪. 新的控制方法具有算法简单、经济、控制鲁棒性强的优点, 是一种具有实用意义的集成控制方法.

参考文献(References):

[1] GRAUERS A. *Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines*[D]. Goteborg, Sweden; Chalmers University

of Technology, 1996.

[2] 何山. 兆瓦级永磁同步风力发电机的电磁场分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2005.

HE Shan. *The electromagnetic field analysis of mega-watt permanent magnet synchronization wind Turbine generator*[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2005.

[3] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.

LI Gengyin, LU Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(4): 77-81.

[4] WANG Fengxiang, HOU Qingming, BO Jianlong, et al. Study on control system of low speed PM generator direct driven by wind turbine[C]//*Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems*. Nanjing, China: Southeast University Press, 2005, Vol2: 1009-1012.

[5] ESMAILI R, XU L, NICHOLS D K. A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application[C]//*Proceedings of Power Engineering Society General Meeting*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2005, 3: 1162-1167.

[6] WANG Quincy, CHANG Liuchen. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(5): 1242-1249.

[7] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(1): 130-135.

[8] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003. (WANG Chengxu, ZHANG Yuan. *Wind-Power Generation*[M]. Beijing: China Electric Power Industry Press, 2003.)

(上接第356页)

参考文献(References):

[1] 吴捷, 杨俊华. 绿色能源与生态环境控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 864-869.

(WU Jie, YANG Junhua. Control on green energy source and ecological environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 12(6): 864-869.)

[2] 祖丽楠, 田彦涛, 梅昊. 大规模多移动机器人合作任务的分布自主协作系统[J]. 机器人, 2006, 28(5): 470-477.

(ZU Linan, TIAN Yantao, MEI hao. Distributed autonomous cooperation system for the large-scale cooperation task of multiple mobile robots[J]. *Robotics*, 2006, 28(5): 470-477.)

[3] 何轶璇, 罗毅, 涂光瑜. EMS数据流管理系统的框架设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 33-38.

(HE Yixuan, LUO Yi, TU Guangyu. Design of the frame of data

stream management system for the energy management system[J]. *Automation of Electric Power System*, 2006, 30(24): 33-38.)

[4] MATURANA F P, TICHY P, SLECHTA P. Distributed multi-agent architecture for automation systems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2004, 26(1): 49-56.

[5] 黄天辰, 韩京才. 基于Agent技术的复杂适应系统分析与建模[J]. 计算机仿真, 2005, 22(9): 58-60.

(HUANG Tianzhen, HAN Jingcai. Agent-based analysis and modeling of complex adaptive system[J]. *Computer Simulation*, 2005, 22(9): 58-60.)

[6] ZHAI Wenbin, ZHANG Jie, YAN Junqi, et al. Agent-oriented colored petri-net based interactive protocol modeling technologies of semiconductor fabrication line[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2005, 39(7): 1150-1154.