

Research Progress on Coordination Method for Intelligent Manufacturing System*

Lei Wang^{1,2}, Yuyun Kang³

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu

²Anhui Key Laboratory of Advanced Numerical Control and Servo Technology, Wuhu

³College of Mechanical Engineering, Linyi University, Linyi

Email: wangdalei2000@126.com, 122195709@qq.com

Received: Jan. 20th, 2013; revised: Feb. 1st, 2013; accepted: Feb. 6th, 2013

Abstract: Good coordination mechanism will play a crucial role in improving the agility, adaptability and robustness of manufacturing systems in dynamically changing manufacturing systems environment. Based on the significance of coordination mechanism for intelligent manufacturing system, the research status between foreign and domestic study progresses on the coordination mechanism and method (such as coordination based on Lagrange Relaxation method, co-ordination based on contract net protocol, coordination based on Petri Net, coordination based on biological hormone and pheromone, and so on) is given, some existent problems for coordination mechanism in existent research methods presently are pointed out. Finally, the future research trends of the coordination mechanism and methods for intelligent manufacturing system are presented.

Keywords: Intelligent Manufacturing System; Coordination Mechanism; Coordination Method; Dynamic Coordination

智能制造系统协调方法研究进展*

王 雷^{1,2}, 康与云³

¹安徽工程大学机械与汽车工程学院, 芜湖

²先进数控和伺服驱动技术安徽省重点实验室, 芜湖

³临沂大学机械工程学院, 临沂

Email: wangdalei2000@126.com, 122195709@qq.com

收稿日期: 2013年1月20日; 修回日期: 2013年2月1日; 录用日期: 2013年2月6日

摘 要: 动态多变的制造系统环境中, 良好的协调机制对提高制造系统的敏捷性、适应性和鲁棒性等将起到至关重要的作用。在阐述了智能制造系统协调机制意义的基础上, 分析了现有协调机制与方法(如基于拉格朗日松弛法的协调、基于合同网的协调、基于 Petri Net 的协调、基于生物激素的协调等)的国内外研究现状及存在的问题。最后, 指出了在智能制造系统中, 对协调机制与方法需要进一步的研究方向。

关键词: 智能制造系统; 协调机制; 协调方法; 动态协调

1. 引言

由于制造系统所处的环境是动态多变的, 包含许

多不确定性因素: 客户订单的改变、运输延迟、价格的变化、设备故障、紧急订单的需求等等, 为了更好地处理制造系统中的不确定因素, 制造系统中制造单元之间就必须进行很好的协调, 以适应多变的生产任务, 充分利用资源、缩短加工任务的完成时间、保持设备负荷平衡, 提高效率降低成本, 简化生产车间调

*资助信息: 国家自然科学基金项目(51175262), 安徽省自然科学基金资助项目(1208085QE94), 安徽高校省级自然科学基金项目(KJ2012B008, KJ2010B021), 安徽工程大学博士科研启动基金(2011YQQ006)。

度复杂性,实现制造单元面向加工任务的动态优化组合,真正实现高度柔性和自适应性。

协调作为一个重要的概念广泛地出现在多个学科和社会经济领域,成为共同关注的一个研究课题。近年来,在制造系统协调方法方面已有大量的研究成果,采用的方法多是建立协调模型和协调语言^[1],例如同合同网模型、黑板模型、通用部分全局规划模型、拉格朗日松弛法、基于 Petri Net(PN)的协调、“涌现”行为协调方法等。

2. 协调方法研究现状及分析

2.1. 基于拉格朗日松弛法的协调

拉格朗日松弛法(Lagrangian Relaxation, LR)被作为一种解决复杂调度问题的热门方法。这一技术已经成功的应用于为单机和并行机的调度问题获得近似最优解^[2]。和其它近似方法或随机方法相比,尽管很多问题还有待于研究,但LR有自己独特的优点。1) 一般性。实际上,这一方法可以处理每种通常的约束规则,特别是每种下面论述的通用的优先约束规则。2) 理论背景。尽管作为结果的解不能保证最优化,但在一定的范围内,LR的应用意义可以解释这一解。3) 它既可以处理调度中的顺序问题也可以处理路线问题。如我们所知,几乎所有建立的典型的调度算法只应用于把调度问题标准化,即,调度问题的所有部分的路线是预先指定的。4) 获得的近似解可以评估:用LR的放宽约束的问题提供了解的下限。因此,该方法在制造系统等相关领域也得到了应用。

Gou Ling 等将 LR 应用于生产车间的调度^[3,4]。Tanaka^[5]等将分支定界法与 LR 相结合的混合算法应用于并行机协调调度,通过 LR 可以获得范围较小的下边界。田俊峰^[6]等将 LR 应用于生产企业供应链中产销运作协调。朱宝琳^[7]等将 LR 应用于炼钢-连铸-热轧生产调度模型中,利用 LR 较好的分解特性,使大规模复杂调度问题的求解成为可能。何小宇等人^[8]提出了一种求解机组组合问题的改进拉格朗日松弛算法。

然而,该方法也有一些缺点,由于其目标函数的非凸性,用对偶问题求解时,存在对偶间隙,需要根据对偶问题的优化解采取一定的措施构造原问题的优化可行解^[8]。同时,拉格朗日乘子初值的选取、所

采用的乘子的修正策略,都会对算法的计算效率产生一定的影响;而算法的迭代过程中容易出现振荡现象,需要采取措施加快收敛^[8]。另外,实际上它也是一种给予最优化方法的启发式算法,因为它不提供保证最优化的解。因此,这种方法并没有得到广泛的应用。

2.2. 基于合同网的协调

合同网协议(Contact Net Protocol, CNP)是 Smith 和 Davis 提出的一种协调方法^[9-11],它被广泛用于实现分布式问题求解系统中的任务分配。

一般情况下,有两种重要的 Agent 存在于 CNP 中:管理 Agent 和资源 Agent。管理 Agent 收到上级提交的任务之后,当该管理 Agent 无法独立完成其所接收到的任务时,就向其它资源 Agent 发出任务标书。其它资源 Agent 对宣布的标书做出投标。管理 Agent 从返回的投标书中选定最合适的资源 Agent,然后管理 Agent 和资源 Agent 经过最后的协商而达成一致并签订协议。

CNP 能够以简单的协调方式实现任务的合理分配,是一种有效的协调方法。研究表明:当 CNP 应用于车间调度时,其调度的性能要比传统的启发式所获得的调度性能更好^[12]。

为了使 CNP 获得更为优越的性能指标,并且与实际应用场合的需要更加吻合,为此,很多专家学者提出了大量的改进的合同网模型。如:在 CNP 中引入基于范例的推理以减少信息通信量^[13];文献[14]提出了适应环境及主体能力变化的动态合同网协议;文献[15]提出的基于任务熟人集的合同网模型等,从而使调度性能更优;文献[16]则利用预招标的方式进一步使系统的性能得到优化;甘露等提出一种基于投标结果修正的 CNP,并将该改进的协议应用于一个风力/太阳能互补发电系统的实例中,结果表明该协议的工作效率比传统 CNP 更高^[17]。

目前,CNP 在制造领域各个方面的应用都获得了广泛的研究,如车间调度^[18,19]、运输小车调度^[20,21]、机器人协调^[22]等。

但是,采用传统的 CNP 协调时,在协调、协商与协作的过程中,不可避免地存在着存在如下的不足^[23]:

1) 管理 Agent 以广播的方式招标, 对每个投标进行评价, 很大程度上增加了通信量。

2) 任务固定划分, 很难适应动态变化的环境。管理 Agent 对任务进行固定的划分后, 对于任务选择一个执行的任务 Agent, 并将任务分配给该任务 Agent, 任务 Agent 接受任务比较被动。没有一个任务 Agent 根据自己的规划和能力来获得子任务, 这样固定的任务分配必然导致低效率。

3) 管理 Agent 为了找到最佳的任务 Agent, 从各自利益的角度出发, 存在一个反复协商的过程, 既造成了系统信息的大量冗余, 又造成系统通信资源的浪费。

4) 只考虑了 Agent 静态的求解能力, 没有充分考虑如负载、任务的求解质量、代价等动态变化的因素, 这些因素随着任务 Agent 的学习能力的提高和自己所处的状态而变化。

5) 非合作型多 Agent 系统环境下 Agent 的自私性导致了系统性能的下降。

6) 当任务最终得不到执行时或者死锁现象等问题, 传统合同网没有充分考虑对任务所做的处理。

2.3. 基于 Petri Net(PN)的协调

PN 最初由 Petri 在 1962 年开发, 对于描述和分析并发处理之间的同步、通信和资源共享来说, 是一种适当并且可靠的语言。在离散事件动态系统的控制分析方面, PN 方法具有模型形式的直观性和概括性、性能特征的工程意义性、分析过程定性和定量的兼顾性, 以及应用的可扩展性等优点^[24], 是适用于分布式并发系统描述和分析的图形数学工具, 实践证明, PN 是对离散制造业生产调度建模分析的有效手段^[24,25]。因此基于 PN 及其改进的 PN 在制造系统协调控制中得到了广泛的应用。

文献[26]利用形式化和图形化的建模工具 PN 对协调问题中的依赖关系及协调机制进行了研究和表述, 为协调问题的可计算描述提供了一种新的思考角度。Hsieh^[27]采用 PN 建立了任务分配的模型, 然后再采用招标 - 投标形式的 CNP 协调机制使任务分配的完成成本最小。随后, 他又将基于 PN 与 CNP 相结合的协调方法应用到 HMS 中, 并取得了满意的效果^[28]。Safiye Turgay^[29]基于改进的 TPN(Timed Petri Nets, TPN)

应用于基于 Agent 的柔性制造系统协调控制中, 并对任务序列等待加工时间进行了评价。Song Huang 等人^[30]运用 TCPN(Timed Colored Petri Net, TCPN)建模以便在虚拟制造系统中实现更好的协调来敏捷得满足市场的需求。Y.F. Lee 等人^[31]运用 TEOPN(Timed Extended Object-Oriented Petri Net, TEOPN)协调机制对半导体生产制造中的多目标调度及实时分配的策略进行了研究, 仿真结果表明该算法能够达到满意的效果。Dotoli 等人^[32]将混合 PN 协调机制应用到分布式制造系统中, 因此, 能够有效地解决并行制造的问题。

潘全科^[33]等针对绿色制造模式的作业车间调度, 建立了包含加工时间、生产成本、资源消耗和环境影响等信息的 Petri 网模型。通过为机器分配工序来协调以消除因机器库所共享引起的冲突, 得到表示调度方案的标识图。王景华^[34]等人将面向对象技术与 PN 结合作为建模工具, 针对离散制造业的研究现状及其生产调度特点, 进行离散制造系统生产调度建模; 选用满足交货期的成本最低原则作为调度目标, 运用最优化方法进行目标优化。通过对柔性制造系统的建模及目标优化, 证明利用该方法建模能准确反映生产调度的加工路径及其资源约束, 将复杂系统高度抽象, 模型易于扩展。

PN 模型往往具有较强的建模能力, 然而, PN 在实践应用中, 也暴露出了一些缺点。首先, 越复杂的 PN 模型往往具有越强的建模能力, 但是同时也削弱了其模拟、分析和验证的能力, 并且不具备足够的简洁、有效性。其次, 没有数据概念, 使得所构造模型往往过于庞大, 这是由于所有数据操作都必须直接表现在网结构中(即通过位置和变迁来表现)。再次, 没有分层概念, 因此不可能通过拥有良好接口定义的子网来构建大的模型。第四, 在控制方面的效率并不是很高。因此, 单纯利用普通 PN 描述, 存在无输入与输出的封闭系统及状态空间的“爆炸”等问题^[35]。

2.4. 基于生物激素的协调

生物群体智能中的个体之间为了互相施加影响来实现协调和合作, 就必须通过一种间接的通信方式来向其它个体传递信息, 这种通信方式又被称为基于生物外激素(Pheromone/Stigmergy)的隐式协调机制。

从蚂蚁寻食到蚂蚁聚集尸体到蚂蚁搬运筑巢个体之间的通信机制总是离不开 Pheromone/Stigmergy 机制。Stigmergy(刺激)和 Pheromone(信息素)作为隐式的通信方式,具有相同的效用,因此,在绝大部分的文献研究中将这两者等同起来。文献[36-38]就采用的是这种方式。

Grasse 首先引入 Stigmergy 来解释白蚁在筑巢的过程中是如何进行协调的^[39,40]。Stigmergy 在宏观上提供了一种将个体行为和群体行为联系起来的机制。基于 Stigmergy 的协调机制在制造系统协调控制领域中得到较为广泛的应用。文献[38]在工业自动控制中引入 Stigmergy 机制,从而使整个系统获得较好的自组织、自适应性能。文献[41-43]将 Stigmergy 机制应用于车间调度协调控制中,以应对复杂的制造环境,仿真结果表明了该机制的有效性和可行性。Sallez 等^[44]将基于 Stigmergy 协调方法应用于柔性制造系统中加工路线动态选择,并通过 NetLogo 软件进行了仿真。郜庆路等^[36]将基于 Stigmergy 协调机制应用于混流生产调度系统中,仿真结果验证了该机制的有效性和可行性。

基于信息素的协调机制在制造系统中也得到了较为广泛的应用。文献[45]在柔性车间制造系统中引入基于信息素的协调机制,从而使得车间系统具有较强的适应随机干扰下的快速响应能力。文献[46]将其应用于无人机中,使它们能够高效地协调与协作,从而高质量地完成任任务。文献[47]将基于信息素的协调机制应用于智能交通预测与管理中,以使交通阻塞发生的概率减小。文献[48]将基于信息素协调机制应用于 Multi-Agent 制造系统动态调度中,实验结果表明使用该协调机制所得到的优化结果比其它的一些启发式规则的性能更好。Paulo Leitao 等^[49]运用基于信息素的方法对 HMS 进行有效的协调控制。文献[50,51]将信息素机制应用到车间动态调度中,提出了“吸引场”的概念,机床对 AGV 具有一定的吸引力和排斥力,实验结果表明该方法的有效性和可行性。Brezocnik 等人^[52]将“涌现”的智能行为应用于制造系统的机器人路径规划中,体现出很好的自组织行为。

另外,关于生物内激素调节机制在制造系统中也得到了应用。文献[53]将内分泌调节机制应用

到粒子群算法中,利用神经系统和内分泌系统共同作用,对粒子群的行为进行更新。通过机器人路径规划实验的例子验证该方法的有效性。文献[54]构造了一种基于人工内分泌系统的防火墙自适应调控算法。仿真实验表明,该调控算法能够根据网络性能变化,自适应地调整防火墙参数,具有较好的应用价值。

通过以上分析不难发现,利用生物激素的调节作用,可以引导个体投入到当前群体更需要的工作中,从而在群体内部实现协调合作。这种协调方法与基于合同网等显示协调机制相比较,具有以下显著特点^[36]: 1) 简单的内建的协调机制; 2) 通信量小; 3) 较强的应对动态环境的能力; 4) 自动的寻优方法; 5) 非符号通信; 6) 以环境为媒介。

2.5. 其它协调方法

Gupta 和 Sivakumar^[55]利用“Look-Ahead”协调机制来优化半导体批量生产调度中的交货期问题,仿真结果表明该协调策略能够在大范围条件下使交货期优化得到改善。Toly Chen^[56]利用模糊-神经网络方法与“Look-Ahead”的混合协调机制应用于半导体生产任务完成时间预测中,仿真结果表明该方法在完成时间预测准确性方面明显优于已有的方法。薛彩军等^[57]将分布式计算技术应用于耦合优化问题的求解中,提出一种易于实现并行决策的分布式优化模式。探讨子优化模型并行计算和协调控制策略,并建立了一种处理耦合变量冲突的协调模型。工程优化实例验证了本方法和策略的有效性。于江涛等^[58]为解决实际工程问题,将 Agent 的设计思想引入分解协调算法,实现了大系统的分解和生产单元之间的协作,并采用 GA 算法进行参数协调。改进后的分解协调算法具有较好的适用性。Kolisch 研究了不同种制造系统之间的协调^[59]。Christoph 和 Schneeweiss 应用层次规划理论研究了供应链中上下两层之间的协同运作机制^[60]。

3. 协调方法展望

从以上对制造系统协调机制与方法的研究成果可以发现,由于人工智能技术、物联网技术以及计算机技术等不断成熟与发展,在制造系统中的任务分配、机器人协调等各个应用领域,各种制造资源在某种程度上都已具备足够的智能性、自治性以及相应的

信息交互能力。对制造系统协调机制与方法也将由原来通过集中控制方式逐渐转变为递阶控制乃至分布式的协调控制方式。但是,对分布式制造系统协调控制机制的研究方法上还有许多工作要做,主要表现在以下几个方面:

1) 基于类电磁机制的智能启发式算法的研究。类电磁机制是通过模拟电磁场中的吸引-排斥机制,来实现对全局最优解的搜索。因此,如何将动态环境下的制造资源、任务与信息素有机结合起来,建立资源与任务之间的吸引-排斥机制模型,是需要进一步的研究方向。

2) 显示与隐式协调机制的有机结合的研究。诸如前面提及到的显示协调与隐式协调机制各有自己的优越性所在,再加上应用较为成熟的多 agent 技术,研究显示与隐式协调机制相结合更加能有效地解决制造系统的动态协调控制问题。

3) 与免疫算法等智能优化算法相互结合的协调机制研究。生物免疫系统是一个高度并行、分布、自适应和自组织的系统,具有很强的学习、识别、记忆和特征提取能力,不但能够识别抗原而且清除抗原,维护人体整个系统功能的正常运转。因此,研究基于信息素与免疫算法相结合的制造系统协调机制与控制方法,使系统可以自适应地对内外环境做出及时响应与控制。

4) 基于内外激素相互结合的协调机制研究。通过上面对于基于生物激素的协调分析可知,基于生物内外激素调节的协调机制与方法在制造系统调度与控制中的应用取得了一定的研究成果,完全满足分布自治的平等交互实现的协调方式的要求,但主要还是集中在基于蚁群算法的车间调度优化方面的研究。因此,对基于生物激素的协调机制与方法的研究,尤其是对内外激素相互结合的协调机制的研究仍有待于进一步深入和完善。

参考文献 (References)

[1] A. Brogi, J.-M. Jacquet. On the expressiveness of coordination via shared dataspace. *Science of Computer Programming*, 2003, 46(1-2): 71-98.

[2] P. B. Luh, D. J. Houghton, E. Max, et al. Scheduling generation and reconfiguration for parallel machines. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1990, 6: 687-696.

[3] G. Lin, P. B. Luh and K. Yuji. Holonic manufacturing scheduling:

Architecture cooperation mechanism, and implementation. *Computer in Industry*, 1998, 37(3): 213-231.

[4] G. Lin, P. B. Luh and K. Yuji. Holonic manufacturing scheduling: Architecture, cooperation mechanism, and implementation. *Proceedings of the 1997 1st IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Manufacturing*, 1997: 39-45.

[5] S. Tanaka, M. Araki. A branch-and-bound algorithm with Lagrangian relaxation to minimize total tardiness on identical parallel machines. *International Journal of Production Economics*, 2008, 113(1): 446-458.

[6] 田俊峰, 杨梅. 生产企业供应链中产销运作协调研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 3: 33-38.

[7] 朱宝琳, 于海斌. 炼钢-连铸-热轧生产调度模型及算法研究[J]. *计算机集成制造系统-CIMS*, 2003, 9(1): 33-36.

[8] 何小宇, 张粒子, 谢国辉. 改进的拉格朗日松弛法求解机组组合问题[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(17): 16-21.

[9] D. Randall, R. G. Smith. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. *Artificial Intelligence*, 1983, 20(1): 63-109.

[10] R. G. Smith. Contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, 1980, C-29(12): 1104-1113.

[11] S. R. G. Smith, D. Randall. Frameworks for cooperation in distributed problem solving. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1981, SMC-11(1): 61-70.

[12] M. Tseng, M. Lei and Z. Guan. A market-based coordination mechanism for resource allocation in mass customization manufacturing. *Proceedings of 1998 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, Otsu, 1998: 637-640.

[13] O. Takuya, H. Kazuo and A. Yuichiro. Lemming: A learning system for multi-robot environments. *Proceedings of 1993 International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1993: 1141-1146.

[14] 张海俊, 史忠植. 动态合同网协议[J]. *计算机工程*, 2004, 30(21): 44-46.

[15] 万武南, 张蕾. 基于任务熟人集的合同网模型的改进[J]. *计算机应用*, 2003, 23(3): 3-5.

[16] S. Aknine, S. Pinson and M. F. Shakun. An extended multi-agent negotiation protocol. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2004, 8(1): 1387-2532.

[17] 甘璐, 杨宜民, 王建彬. 一种基于投标结果修正的合同网协议[J]. *控制理论与应用*, 2008, 25(2): 329-330.

[18] D. Ouelhadj, S. Petrovic, P. I. Cowling, et al. Inter-agent cooperation and communication for agent-based robust dynamic scheduling in steel production. *Advanced Engineering Informatics*, 2004, 18(3): 161-172.

[19] D. Jégou, D.-W. Kim, P. Baptiste, et al. A contract net based intelligent agent system for solving the reactive hoist scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 2006, 30(2): 156-167.

[20] K. Toru, O. Koichi. Amadeus: A mobile autonomous decentralized utility system for indoor transportation. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, 1998: 2229-2235.

[21] Z. G. Dan, L. N. Cai and L. Zheng. Improved multi-agent system for the vehicle routing problem with time windows. *Tsinghua Science and Technology*, 2009, 14(3): 407-412.

[22] S. C. Botelho, R. M. Alami. A scheme for multi-robot cooperation through negotiated task allocation and achievement. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999: 1234-1239.

[23] 林琳, 刘锋. 基于改进合同网协议的多 Agent 协作模型[J]. *计算机技术与发展*, 2010, 20(3): 71-75.

[24] 韩江洪, 刘辛, 黎杰. 基于 Petri 网的皮带机控制模型分析[J]. *合肥工业大学学报*, 2007, 30(2): 129-131.

[25] 江志斌. Petri 网及其在制造系统建模与控制中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[26] 洪流, 马巧云, 陈学广. 基于 Petri Nets 的协调机制研究[J]. *计算机应用研究*, 2007, 24(4): 26-28.

- [27] F. S. Hsieh. Developing cooperation mechanism for multi-agent systems with Petri nets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2009, 22(4-5): 616-627.
- [28] F. S. Hsieh. Robustness analysis of Holonic assembly/disassembly processes with Petri nets. *Automatica*, 2008, 44(10): 2538-2548.
- [29] S. Turgay. Agent-based FMS control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 25(2): 470-480.
- [30] S. Huang, Y. J. Hu and C. G. Li. A TCPN based approach to model the coordination in virtual manufacturing organizations. *Computers & Industrial Engineering*, 2004, 47(1): 61-76.
- [31] Y. F. Lee, Z. B. Jiang and H. R. Liu. Multiple-objective scheduling and real-time dispatching for the semiconductor manufacturing system. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(3): 866-884.
- [32] M. Dotoli, M. P. Fanti, A. Giua, et al. First-order hybrid Petri nets: An application to distributed manufacturing systems. *Non-linear Analysis: Hybrid Systems*, 2008, 2(2): 408-430.
- [33] 潘全科, 左凤朝, 朱剑英. 面向绿色制造模式调度的 Petri 网模型及优化算法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(9): 48-53.
- [34] 王景华, 韩江洪, 刘征宇等. 面向对象 Petri 网离散制造系统生产调度建模研究[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(15): 4159-4162.
- [35] 刘舟, 朱齐丹, 朱伟等. 面向对象 Petri 网在舰炮武器系统建模中的研究[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(6): 1343-1346.
- [36] Q. L. Gao, X. Luo and S. Z. Yang. Stigmergic cooperation mechanism for shop floor control system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25: 743-753.
- [37] L. Tummolini, C. Castelfranchi. *Trace signals: The meanings of stigmergy*. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 141-156.
- [38] P. Valckenaers, Hadeli, B. S. Germain, et al. MAS coordination and control based on stigmergy. *Computers in Industry*, 2007, 58(7): 621-629.
- [39] L. Thomas. *The lives of a cell: Notes of a biology watcher*. New York: Viking Penguin USA, 1974.
- [40] 金士尧, 黄红兵, 范高俊. 面向涌现的多 Agent 系统研究及其进展[J]. *计算机学报*, 2008, 31(6): 881-895.
- [41] H. Karuna, P. Valckenaers, B. Saint-Germain, et al. Emergent forecasting using a stigmergy approach in manufacturing coordination and control. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 210-226.
- [42] Hadeli, P. Valckenaers, M. Kollingbaum, et al. Multi-agent coordination and control using stigmergy. *Computers in Industry*, 2004, 53(1): 75-96.
- [43] P. Valckenaers, Hadeli, B. S. Germain, et al. Emergent short-term forecasting through ant colony engineering in coordination and control systems. *Advanced Engineering Informatics*, 2006, 20(3): 261-278.
- [44] Y. Sallez, T. Berger and D. Trentesaux. A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS. *Computers in Industry*, 2009, 60(3): 204-216.
- [45] P. Peeters, B. H. V. russel, P. Valckenaers, et al. Pheromone based emergent shop floor control system for flexible flow shops. *Artificial Intelligence in Engineering*, 2001, 15(4): 343-352.
- [46] H. Van Dyke Parunak, S. Brueckner and J. Sauter. Synthetic pheromone mechanisms for coordination of unmanned vehicles. *Proceedings of the 1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems*, Bologna, 2002: 448-450.
- [47] Y. Ando, Y. Fukazawa, O. Masutani, et al. Performance of pheromone model for predicting traffic congestion. *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Hakodate, 2006: 73-80.
- [48] W. Xiang, H. P. Lee. Ant colony intelligence in multi-agent dynamic manufacturing scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008, 21(1): 73-85.
- [49] P. Leitao, F. Restivo. ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*, 2006, 57(2): 121-130.
- [50] J. Varrio, K. Ueda. An emergent modeling method for dynamics scheduling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1998, 9(2): 129-140.
- [51] K. Ueda, T. Kito and N. Fujii. Modeling biological manufacturing systems with bounded-rational agents. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2006, 55(1): 469-472.
- [52] M. Brezocnik, J. Balic and Z. Brezocnik. Emergence of intelligence in next-generation manufacturing systems. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2003, 19(1-2): 55-63.
- [53] 陈得宝, 赵春霞. 基于内分泌调节机制的粒子群算法[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(6): 1005-1009.
- [54] 朱思峰, 王华东, 魏荣华. 基于内分泌机制的防火墙自适应调控算法[J]. *计算机科学*, 2009, 36(11): 238-241.
- [55] A. K. Gupta, A. I. Sivakumar. Optimization of due-date objectives in scheduling semiconductor batch manufacturing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46: 1671-1679.
- [56] T. Chen. A hybrid fuzzy-neural approach to job completion time prediction in a semiconductor fabrication factory. *Neurocomputing*, 2008, 71: 3193-3201.
- [57] 薛彩军, 聂宏, 邱清盈等. 分布式优化模式及其协调策略的研究[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(10): 19-24.
- [58] 于江涛, 钱积新. 基于 GA 的系统分解协调算法 Agent 实现[J]. *控制与决策*, 2003, 18(5): 630-632.
- [59] R. Kolisch. Integration of assembly and fabrication for make-to-order production. *International Journal of Production Economics*, 2000, 68(1): 287-306.
- [60] S. Christoph, Z. Kirstin. Hierarchical coordination mechanisms within the supply chain. *European Journal of Operational Research*, 2004, 153(1): 687-703.