

啤酒生产调度数学模型及其优化

郑松, 葛铭, 李春富, 薛安克

(杭州电子科技大学 教育部检测技术与自动化工程研究中心, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对啤酒企业生产人工调度效果不理想的问题, 建立了啤酒生产调度数学模型, 并研究了此类间歇工业调度问题的优化方法. 根据啤酒生产流程特点, 将整个啤酒生产划分为糖化区、过滤包装区, 分别建立相应的生产调度数学规划模型, 并通过蚁群优化算法求解此类调度问题. 该优化调度方案在企业中的应用结果表明, 通过蚁群算法对建立的啤酒调度模型进行优化, 该方法具有良好的鲁棒性与实用性, 可为生产管理人员提供方便快捷的优化解决方案.

关键词: 生产调度; 数学模型; 优化; 蚁群系统

中图分类号: TP F273.5 **文献标识码:** A

Mathematical programming model for beer production scheduling and its optimization

ZHENG Song, GE Ming, LI Chun-fu, XUE An-ke

(Detection and Automation Engineering Center, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: To deal with the deficiency of manual scheduling, we propose a mathematical model for beer production scheduling, and present the method for its optimization. Based on the production process, the entire beer production is divided into saccharification area, and filtering and packing area. For the production in each area, we set up the corresponding mathematical programming model for production scheduling, which is then optimized by using the ant colony optimization algorithm. The application results show that the developed optimization program provides robust operation in practical productions. It is also convenient and effective in production management.

Key words: production scheduling; mathematical model; optimization; ant colony system

1 引言(Introduction)

啤酒生产是一个系统复杂且生产周期较长的间歇生产过程, 生产包括各种不同工序, 且工序之间相互关联. 目前啤酒企业之间的市场竞争日益激烈, 而合理的生产调度对提高啤酒企业效率、市场响应速度和综合竞争力具有极其重要的作用. 尤其目前精益生产方式在啤酒企业的不断推广, 迫使对啤酒生产调度的研究越来越迫切^[1]. 同其他间歇生产过程一样, 啤酒生产过程具有生产半连续性的特点, 它按产品规定的操作顺序和工艺条件批量生产产品. 并且频繁地改变生产的产品、且多种产品共享资源(包括时间、设备、原料和人力), 这使得全部生产活动和经济效益极大地依赖于生产的计划和调度, 同时也使生产调度变成一个非常复杂的问题. 目前, 对啤酒生产调度的数学模型研究仍然匮乏, 啤酒企业仍然依靠人工进行调度生产, 其调度效果并不理想.

由于间歇过程生产环境及用户需求的动态变化, 以及工业调度问题的NP完备性质, 目前解决间歇过

程生产调度问题大多采用基于知识的启发式调度方法或者分枝定界等精确解法. 启发式调度方法的特点是不必进行大量计算, 避开了组合爆炸问题, 以次优可行解代替了最优解, 但还是难以处理突发事件、解决不确定变化^[2,3]. 而分枝定界等精确解法不适合解决大规模调度问题, 导致其研究重点在于如何建立好的混合整数线性规划(mixed integer linear program, MILP)或混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear program, MINLP)模型以削减模型的整数变量数目, 虽然这些方法能够在一定程度上解决间歇过程调度问题, 但当问题规模增加时, 这些方法花费的求解时间非常巨大, 难以应用到实际生产过程中^[4,5].

而蚁群优化算法此类进化算法自诞生以来, 在基础理论和应用研究方面都有了许多发展^[6,7]. 它开放性、鲁棒性、并行性、全局收敛性以及对问题的数学形式无特殊要求等特点^[8,9], 在过程优化领域已取得了一些实际应用成果, 在复杂工业过程在线稳态优

化问题中有广阔的应用前景^[10~13]. 因此, 本文为解决啤酒行业缺乏生产优化调度方案的问题, 根据啤酒实际生产流程, 首先建立了基于工艺流程机理的生产调度数学模型, 并利用蚁群优化算法求解此类优化问题.

2 啤酒生产调度描述模型(Beer production scheduling model)

根据啤酒生产工艺及通常管路布局进行分析整理后, 本文将生产阶段简化成Flow-shop形式, 分为5个阶段, 分别是糖化阶段、发酵阶段、过滤阶段、储酒阶段以及包装阶段, 如图1所示. 每个阶段又有多台并行设备可供选择, 并且各阶段并行设备的生产能力各不相同, 不同设备通过管道可以与后续阶段

的其他任意设备相连. 其输入区为生产计划所规定的各品种生产的批次顺序, 输出区为订货的批次顺序. 可见, 啤酒生产调度属于典型的混流车间调度问题, 属于NP-hard问题. 啤酒生产调度的优化目标是保证储酒区库存需要尽可能接近理想库存, 且啤酒成品量应尽可能满足每个时刻的订单量, 以应对市场的波动. 考虑到生产过程中, 发酵阶段所占时间较长, 一般占整个生产时间的85%左右, 而且发酵生产时间远大于生产调度模型的预测时间. 因而, 本文为保证方案的实用性, 降低问题的复杂度, 以发酵工序为界可以将生产调度过程分为糖化区、过滤包装区两个相对独立的子过程, 针对两个过程单独建立数学模型. 表1列出了模型参数说明.

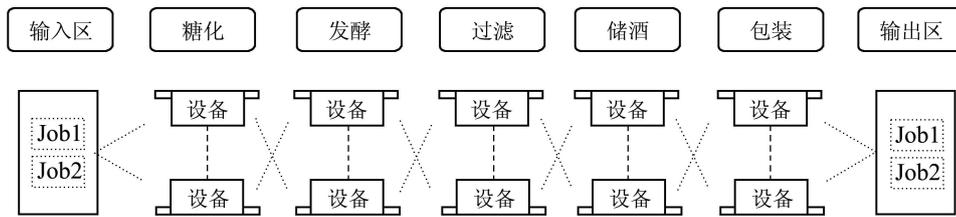


图1 啤酒生产包括5个阶段

Fig. 1 Five stages of beer production

表1 参数说明列表

Table 1 Parameters list

参数名	参数意义	参数名	参数意义
$i = 1, \dots, N$	啤酒品种	$t = 1, \dots, T1$	时间间隔长度
$u1 = 1, \dots, U1$	啤酒糖化设备编号	$u2 = 1, \dots, U2$	啤酒发酵罐编号
$u3 = 1, \dots, U3$	啤酒过滤工序设备编号	$u4 = 1, \dots, U4$	啤酒储酒设备编号
$u5 = 1, \dots, U5$	啤酒包装线设备编号	Pt_i^{SP}	品种 <i>i</i> 预期发酵总量
P_i^{SP}	品种 <i>i</i> 预期半成品存储总量	$tc'_{u2,t}$	时刻 <i>t</i> , 发酵罐 <i>u2</i> 封罐发酵时间
Tc_i	品种 <i>i</i> 所需发酵时间	$Q1$	目标函数各部分之间权重
mu_{u1}	糖化设备 <i>u1</i> 单位时间产量	Fc	单个发酵罐标准存储量
\bar{P}_1	发酵罐区的最大存储量	\bar{S}_i	各品种成品酒的预期库存量
$Q2$	按时完成订单的权重系数	μ_{3u3}	过滤设备 <i>u3</i> 的单位过滤量
μ_{5u5}	包装设备 <i>u5</i> 的单位包装量	\bar{P}	储酒阶段单罐最大啤酒容量
$P_{u2,t}$	时刻 <i>t</i> , 发酵罐 <i>u2</i> 中啤酒存储量	$tc_{u2,t}$	时刻 <i>t</i> , 发酵罐 <i>u2</i> 中发酵时间
$P'_{u2,i}$	发酵罐 <i>u2</i> 正在进行封罐发酵的品种 <i>i</i> 存储量	$M_{i,t}^1$	时刻 <i>t</i> , 清酒存储区对发酵罐区的啤酒需求量
$Y_{i,t}$	由生产计划, 时刻 <i>t</i> 需投料品种 <i>i</i> 进入生产为1, 它为0	$ts_{u1,u2',i'}$	糖化设备 <i>u1</i> 生产品种 <i>i</i> 啤酒, 并投料到 <i>u2</i> 的开始时间
$ts_{u1,u2,i}$	糖化 <i>u1</i> 生产品种 <i>i</i> 啤酒, 并投料到发酵罐 <i>u2</i> 的开始时间	$te_{u1,u2,i}$	糖化 <i>u1</i> 生产品种 <i>i</i> 啤酒, 完成一批并到发酵罐 <i>u2</i> 的完成时间
$P_{u4,t}$	时刻 <i>t</i> , 清酒罐 <i>u4</i> 所存啤酒量	$M'_{i,t}$	<i>t</i> 时刻内, 已经包装品种 <i>i</i> 质量
$x_{u2,u3,u4,t}$	<i>t</i> 时刻内, 发酵罐 <i>u2</i> 经过滤 <i>u3</i> 到清酒罐 <i>u4</i> 为1, 其他为0	$x_{u4,i,t}$	<i>t</i> 时刻内, 清酒罐 <i>u4</i> 存储的啤酒为品种 <i>i</i> 时为1, 其他为0
$x_{u2,i,t}$	<i>t</i> 时刻内, 发酵罐 <i>u2</i> 存储品种 <i>i</i> 啤酒且完成发酵时为1, 其他为0	$x_{u4,u5,t}$	<i>t</i> 时刻内, 清酒罐 <i>u4</i> 经包装线 <i>u5</i> 时为1, 其他为0

2.1 糖化区生产调度子模型(Saccharification area production scheduling model)

2.1.1 目标函数(Objective function)

目标函数如式(1)所示, 包含存量、时间两方面的指标: 一方面, 保证品种*i*啤酒的发酵总量接近于 Pt_i^{SP} , 品种*i*的半成品存量接近于期望存量 Pt_i^{SP} , 式中的第1部分表示两存量的偏差累计平方和, 同时需满足清酒罐区的啤酒需求, 式中的第2部分表示供给与需求的偏差累计平方和; 另一方面, 由于各种生产原料是按照生产计划采购, 应尽可能按照生产计划生产才能保证各种原料的稳定供应, 因此, 对糖化进料的品种需求以及进料时间应尽可能同生产计划规定的进料品种和时间相符, 如式(1)中第3部分所示, 表示进料时间的累计偏差。

2.1.2 约束条件(Constraints)

每个时间间隔*t*内, 根据物料平衡, 发酵罐*u2*中的存储量应为糖化设备向罐*u2*的投料量式(2), 当发酵罐*u2*中存储着啤酒才能对发酵进行计时式(3); 仅当选择糖化设备*u1*生产品种*i*的麦汁并投料到发酵罐*u2*中后, 才表示罐*u2*中开始生产品种*i*的啤酒式(4); 糖化设备*u1*生产一批次麦汁的完成时间满足约束式(5); 由于发酵罐体积限制, 当麦汁累计进料量达到标准容量时, 糖化生产需停止, 也表示糖化完成一个批次生产式(6); 发酵区累计存储量满足体积约束式(7); 同一台糖化设备同一时间只能为一个发酵罐提供麦汁式(8)。

$$\begin{aligned} \min J = & Q1 \sum_{t=1}^{T1} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{u1=1}^{U1} P_{u2,t} t c_{u2,t} x_{u2,i,t} + \right. \\ & \left. \sum_{u2=1}^{U2} P'_{u2,i} t c'_{u2,t} - P t_i^{SP} - M_{i,t}^1 T c_i \right)^2 + \\ & Q2 \sum_{t=1}^{T1} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{u1=1}^{U1} P_{u2,t} x_{u2,i,t} + \right. \\ & \left. \sum_{u2=1}^{U2} P'_{u2,i} + P_i^{SP} - M_{i,t}^1 \right)^2 + \\ & Q3 \sum_{t=1}^{T1} \sum_{i=1}^N \left(Y_{i,t} - \sum_{u1=1}^{U1} x_{u1,u2,i,t} \right)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_{u2,t} = P_{u2,t-1} + \sum_{u1=1}^{U1} \mu_{u1} x_{u1,u2,i,t}, \quad (2)$$

$$t c_{u2,t} = t c_{u2,t-1} + \sum_{i=1}^N x_{u2,i,t}, \quad (3)$$

$$x_{u2,i,t} = x_{u1,u2,i,t} + x_{u2,i,t}, \quad (4)$$

$$t e_{u1,u2,i} = t s_{u1,u2,i} + F c / \mu_{u1}, \quad (5)$$

$$0 \leq P_{u2,t} \leq F c, \quad (6)$$

$$0 \leq \sum_{u2=1}^{U2} P_{u2,t} \leq \bar{P}_1, \quad (7)$$

$$t e_{u1,u2,i} \leq t s_{u1,u2,i}. \quad (8)$$

2.2 过滤包装区生产调度子模型(Filter area production scheduling model)

2.2.1 目标函数(Objective function)

目标函数如式(9)所示, 包含两方面指标: 一方面, 各品种的成品存储量应接近于预期存储量, 如式(9)中第1部分所示, 表示两存量的偏差累计平方和; 另一方面, 实际已包装的啤酒量应尽可能满足每个时刻的订单量, 如式(9)中第2部分所示, 表示啤酒包装量与订单量的偏差累计平方和。

$$\begin{aligned} \min J = & \sum_{t=1}^{T1} \sum_{i=1}^N [Q4 \left(\sum_{u4=1}^{U4} P_{u4,t} x_{u4,i,t} - \bar{S}_i \right)^2 + \\ & Q5 (M'_{i,t} - M_{i,t})^2]. \end{aligned} \quad (9)$$

2.2.2 约束条件(Constraints)

每个时间间隔*t*内, 各清酒罐内的存酒量满足物料平衡式(10); 实际包装量满足约束式(11); 各发酵罐内的半成品存量满足物料平衡式(12); 各发酵罐内的半成品存量满足约束式(13); 各清酒罐内的成品存量满足约束式(14)。

$$P_{u4,t} = P_{u4,t-1} + \mu_{3u3} x_{u2,u3,u4,t} x_{u2,i,t} - \mu_{5u5} x_{u4,u5,t} x_{u4,i,t}, \quad (10)$$

$$M'_{i,t} = \sum_{u5=1}^{U5} \mu_{5u5} x_{u4,u5,t} x_{u4,i,t}, \quad (11)$$

$$P_{u2,t} = P_{u2,t-1} - \sum_{u3=1}^{U3} \mu_{3u3} x_{u2,u3,u4,t} x_{u2,i,t}, \quad (12)$$

$$P_{u2,t} \geq 0, \quad (13)$$

$$0 \leq P_{u4,t} \leq \bar{P}_1. \quad (14)$$

3 啤酒生产调度蚁群优化方法(Ant colony optimization for beer production scheduling)

蚁群优化算法具有开放性、鲁棒性、并行性、全局收敛性等特点, 在组合优化等领域已取得了实际应用成果. 本文应用蚁群算法优化生产调度之前, 首先需要将啤酒生产调度问题转变成图2(a)所示的形式. 每个矩形方框代表一套生产设备, 例如F1, F2; 每套设备区域内又包含两列节点, 其中第1列节点代表该设备生产的啤酒品种, 第2列表示该设备的起始生产时间, 圆圈的大小表示蚂蚁选择概率的大小. 因此, 把调度问题转化成图2(a)的形式以后, 蚂蚁从虚拟起始点S出发, 至最前列搜索到最后一列, 每一列至多且必须经过一个节点. 图2(b)表示蚂蚁最终收敛到的一条路径, 其所代表的调度方案为在*T2*时刻开始用设备F2生产品种A的啤酒。

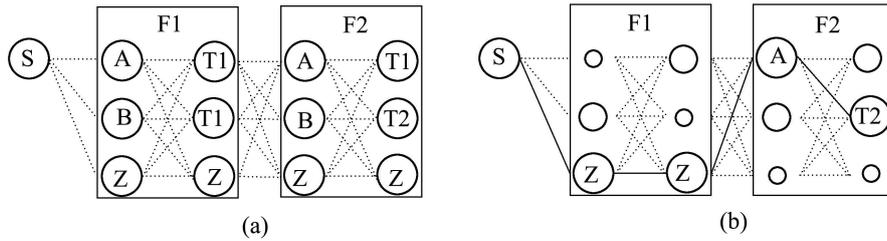


图2 啤酒生产调度的搜索空间举例

Fig. 2 Example of the search space for beer production scheduling

于是, 基于蚁群系统的优化步骤流程图如图3所示.

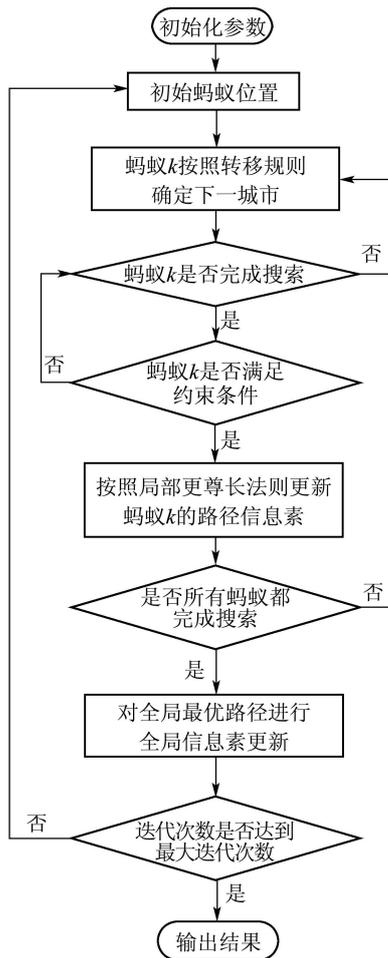


图3 优化步骤流程图

Fig. 3 Flow chart of optimization procedure

详细步骤如下:

Step 1 初始化各参数;

Step 2 将M只蚂蚁放在虚拟起始点, 初始化禁忌表 $a[taba]u_k$;

Step 3 第k只蚂蚁按照转移规则确定下一移动节点;

Step 4 当第k只蚂蚁是否完成一个完整计划的搜索, 如果是则执行Step 5, 否则转Step 3;

Step 5 第k只蚂蚁寻找到的计划是否满足生

产约束条件, 如果是则对第k只蚂蚁经过的节点按照局部更新法则进行信息素更新, 并转Step 6, 否则转Step 4重新寻找合适的计划方案;

Step 6 是否所有M只蚂蚁得到了完整的计划, 如果是则执行Step 7, 否则 $k \leftarrow k+1$ 并转Step 3;

Step 7 寻找出目前发现的最优生产方案, 按照全局更新法则进行更新;

Step 8 迭代次数是否达到最大迭代次数, 达到则输出最优解, 否则转Step 2.

4 啤酒生产调度蚁群优化计算结果(Results of ant colony optimization for beer production scheduling)

某时刻, 某企业生产情况如表2所示, 各设备的生产能力及状态如表3所示. 其中目标函数(1)和(9)中参数设定为

$$Q1 = 1/50000, Q2 = 0.01,$$

$$Q3 = 0.05, Q4 = Q5 = 1/10000.$$

本文借鉴文献[6]中的蚁群算法经验参数, 并经过多次实验测试分析, 蚁群算法采用如下参数较合适, $\rho = 0.05, M = 10$, 算法运行1000代, 路径初始信息素强度为1. 此外, 本文为验证算法的鲁棒性与全局优化能力, 用遗传算法对该调度模型进行优化并进行对比. 其中, 遗传算法参数为: 杂交概率为0.85, 变异概率为0.1, 种群个数为10, 进化代数为1000代. 计算结果如表4所示, 其中, 平均解为每种优化算法独立计算20次获得.

由啤酒糖化生产调度的优化结果可知(见表4), 由于糖化设备较少, 调度问题复杂性较低, 因而各种蚁群算法以及遗传算法经过20次独立计算后搜索到最优解为52.4. 对于啤酒过滤包装阶段的生产调度优化结果分析可知(见表4), 蚁群算法与遗传算法相比具有更佳的优化性能. 蚁群系统经过20次独立计算后所得方案的平均解为91.2, 平均迭代185次, 其中最优解的目标函数值为85.6, 优于遗传算法的平均解(95.6)和最优解(87.3), 且遗传算法平均迭代次数需要347次.

表 2 某时刻啤酒企业生产情况表

Table 2 Production table of beer company

	品种1	品种2	品种3	品种4
清酒罐期望库存量/t	1440	960	960	960
清酒罐实际成品酒库存量/t	1440	960	960	480
发酵罐期望库存量/t	3840	2880	2400	2400
发酵罐期望发酵量/(t/d)	38400	28800	24000	24000
发酵罐实际发酵批次信息及时间	480/16 480/14 480/11.5 480/10 480/8.5 480/5 480/4 480/2.5	480/18 480/15 480/11 480/8 480/5.5 480/3	480/16.5 480/13 480/10 480/7 480/5.5	480/20 480/16 480/8 480/5
订单量/t	200	0	100	0
最佳交货期/h	6	0	10	0
存储区最大容量/t	6240			

表 3 某时刻各设备生产能力及状态

Table 3 Production capacity and status of equipments

	糖化1	糖化2	过滤1	过滤2	包装1	包装2	包装3
生产能力/(t/h)	60	35	50	30	30	20	15
状态	空闲						

表 4 基于不同算法的啤酒生产调度优化性能对比

Table 4 Comparison of optimization performance with different algorithms

	蚁群系统			遗传算法		
	平均解	最优解	平均迭代次数	平均解	最优解	平均迭代次数
糖化区生产调度优化对比	52.4	52.4	53.9	52.4	52.4	120
过滤包装区生产调度优化对比	91.2	85.6	223	95.6	87.3	556

图3和图4分别为ACS算法在啤酒糖化、过滤包装阶段生产优化调度中随迭代次数的进化曲线。由计算结果可知, 本文应用蚁群算法优化啤酒生

产调度的方案, 能够良好的实用性及鲁棒性, 能适应各种产量的啤酒企业. 最优的生产调度方案如表5所示。

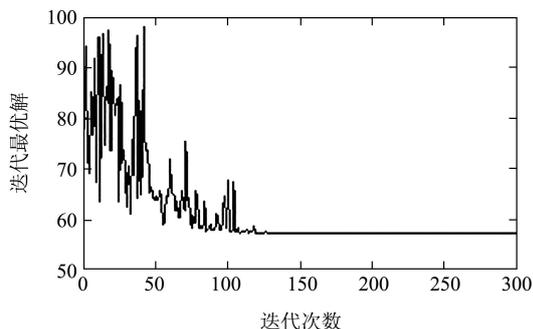


图 4 啤酒糖化生产优化调度中ACS算法随迭代次数的进化曲线

Fig. 4 Evolutionary curve of ACS algorithm for beer saccharification optimal Scheduling

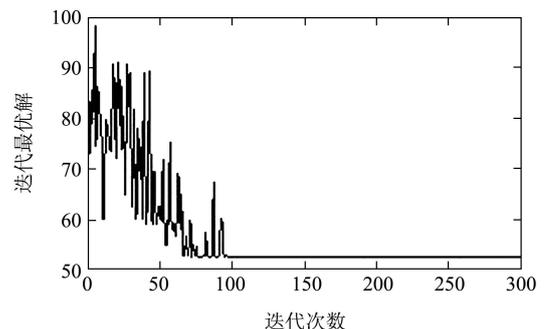


图 5 啤酒包装过滤生产优化调度中ACS算法随迭代次数的进化曲线

Fig. 5 Evolutionary curve of ACS algorithm for beer filter optimal Scheduling

表5 最优啤酒生产优化调度方案

Table 5 Best beer optimal scheduling

设备	糖化1	糖化2	过滤1	过滤2	包装1	包装2	包装3
品种	品种4	品种1	品种4	品种1	品种1	品种3	品种1
时间/h	0	3	0	1	0	0	0

5 结论(Conclusions)

本文基于啤酒企业的应用需求,研究了啤酒生产过程中的调度问题.建立了啤酒生产调度数学规划模型.针对传统求解调度方法的局限性,应用蚁群算法优化啤酒解决此类调度问题.该优化调度方案在企业中的应用结果表明,该优化调度方案具有良好的鲁棒性与实用性,可为生产管理人员提供方便快捷的优化解决方案,对实际生产具有很好的指导意义.

参考文献(References):

- [1] 黄兆奇. 啤酒企业精益生产方式研究[J]. 广州食品工业科技, 2002, 18(4): 71 – 77.
(HUANG Zhaoqi. Beer enterprises lean production research[J]. *Guangzhou Food Science and Technology*, 2002, 18(4): 71 – 77.)
- [2] 王万良, 吴启迪. 生产调度智能算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
(WANG Wanniang, WU Qidi. *Intelligent Production Scheduling Algorithm and Its Application*[M]. Beijing: Science Press, 2007.)
- [3] 苏生, 战德臣, 徐晓飞. 基于免疫算法的并行机间歇过程模糊生产调度[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(8): 1252 – 1257.
(SU Sheng, ZHAN Dechen, XU Xiaofei. Fuzzy scheduling with parallel machines batch process based on immune algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(8): 1252 – 1257.)
- [4] WU D, IERAPETRITOU M G. Decomposition approaches for the efficient solution of short-term scheduling problems[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(8): 1261 – 1276.
- [5] 宁树实, 王伟, 刘全利. 钢铁生产中的加热炉优化调度算法研究[J]. 控制与决策, 2006, 21(10): 1138 – 1142.
(NING Shushi, WANG Wei, LIU Quanli. An optimal scheduling algorithm for reheating furnace in steel production[J]. *Control and Decision*, 2006, 21(10): 1138 – 1142.)
- [6] DORIGO M, STUTZLE T. *Ant Colony Optimization*[M]. Cambridge, Massachusetts, London: Massachusetts Institute of Technology Press, 2004.
- [7] BONTOUX B, FEILLET D. Ant colony optimization for the traveling purchaser problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2008, 25(2): 628 – 637.
- [8] NAIMI H M, TAHERINEJAD N. New robust and efficient ant colony algorithms: Using new interpretation of local updating process[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(1): 481 – 488.
- [9] BASKAN O, HALDENBILEN S, CEYLAN H, et al. A new solution algorithm for improving performance of ant colony optimization[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 211(1): 75 – 84.
- [10] GAO L, ZENG Y, DONG A G. An ant colony algorithm for solving Max-cut problem[J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(9): 1173 – 1178.
- [11] CHEBOUBA A, YALAOUI F, SMATI A, et al. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(6): 1916 – 1923.
- [12] 唐加福, 孔媛, 潘震东, 等. 基于划分的蚁群算法求解货物权重车辆路径问题[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 699 – 702.
(TANG Jiafu, KONG Yuan, PAN Zhendong, et al. An ant colony optimization algorithm for vehicle routing problem with cargo coefficient[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 699 – 702.)
- [13] 邓高峰, 张雪萍, 刘彦萍. 一种障碍环境下机器人路径规划的蚁群粒子群算法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 879 – 883.
(DENG Gaofeng, ZHANG Xueping, LIU Yanping. Ant colony optimization and particle swarm optimization for robot-path planning in obstacle environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 879 – 883.)

作者简介:

郑松 (1982—), 男, 讲师, 从事计算机控制与优化技术的研究, E-mail: zhs@hdu.edu.cn;

葛铭 (1971—), 男, 教授, 从事流程建模与优化等领域研究, E-mail: mingge@hdu.edu.cn;

李春富 (1977—), 男, 讲师, 从事流程建模与优化等领域研究, E-mail: lichunfu@hdu.edu.cn;

薛安克 (1957—), 教授, 从事鲁棒控制及生产过程优化调度等领域研究.