

基于关键链的资源受限项目调度新方法¹⁾

刘士新¹ 宋健海² 唐加福¹

¹(东北大学信息科学与工程学院 教育部流程工业综合自动化重点实验室 沈阳 110004)

²(上海宝信软件股份有限公司 MES 事业部 上海 201900)

(E-mail: sxliu@mail.neu.edu.cn)

摘 要 针对资源受限项目调度问题 (RCPSPs) 的实际需求建立了多目标优化调度模型, 综合运用现有研究成果, 设计了基于关键链的项目调度方法. 该方法首先采用基于优先规则的启发式算法生成工期最小的近优项目计划, 再在该计划中嵌入输入缓冲和项目缓冲, 保证项目计划在非确定环境下的稳定执行. 论文引用 RCPSPs 的标准问题库 PSPLIB 中大量案例对算法进行了仿真试验, 结果表明本文方法较传统项目调度方法有很大改进, 论文最后对仿真结果进行了深入讨论, 并指出了未来的研究方向.

关键词 项目管理, 计划与调度, 关键链, 启发式算法

中图分类号 TP29

Critical Chain Based Approach for Resource-constrained Project Scheduling

LIU Shi-Xin¹ SONG Jian-Hai² TANG Jia-Fu¹

¹(School of Information Sciences & Engineering, Northeastern University; Key Laboratory of Process Industry Automation, Ministry of Education, Shenyang 110004)

²(Shanghai Baosight Software Company, Ltd. Shanghai 201900)

(E-mail: sxliu@mail.neu.edu.cn)

Abstract A multi-objective model is developed for resource-constrained project scheduling problems (RCPSPs). A critical chain based project scheduling approach is presented by integrating the existing research findings. Firstly, the approach schedules an RCPSP to obtain an approximate optimal project schedule with a minimum makespan by using a priority based heuristic algorithm. Then, it embeds feeding buffer and project buffer into the approximate optimal project schedule to enhance the stability of project schedule. A full factorial computational experiment is set up using the well-known standard instances in PSPLIB. Computational results show that the new proposed approach improves the traditional project scheduling approach greatly. Finally, the computational results are analyzed and future research directions are discussed.

Key words Project management, planning and scheduling, critical chain, heuristics

1) 国家自然科学基金项目 (70301007, 70431003, 70471028), 辽宁省博士启动基金项目 (20021011) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (70301007, 70431003, 70471028), Doctoral Foundation of Liaoning Province (20021011)

收稿日期 2004-9-9 收修改稿日期 2005-9-2

Received September 9, 2004; in revised form September 2, 2005

1 引言

随着经济全球化导致市场竞争的日趋激烈, 现代项目日趋复杂, 要求周期更短、准时完工率更高、成本更低. 传统的项目计划与调度方法已经无法完全满足现代项目管理的实际需求. 1997 年, Goldratt 在文 [1] 中提出的关键链 (Critical chain) 管理方法, 已经在多个企业获得了成功的应用, 并引起了学术界相当的重视和研究^[2~6].

关键链管理方法与 PERT/CPM 管理方法的主要区别在于^[2]: 1) 关键链管理方法以 50% 可能完成时间作为工作的估计执行时间; 2) 关键链管理方法采用关键链代替关键路径. 关键链是在综合考虑工作间紧前关系和资源约束情况下计算出来的制约整个项目周期的一个工作序列, 而关键路径的计算是不考虑资源约束的; 3) 考虑到项目执行过程中的不确定因素和墨菲定律 (Murphy's law) 出现的可能性, 关键链管理方法通过项目缓冲、输送缓冲和资源缓冲机制来消除不确定因素对项目调度计划的影响, 保证在确定环境下编制的项目计划在动态环境下的顺利执行.

本文针对资源受限项目调度问题 (Resource-constrained project scheduling problem, 简称 RCPSP) 的实际需求建立了多目标优化模型, 综合运用已有研究成果, 设计了基于关键链的项目调度方法, 通过大量的仿真实验, 与传统的项目调度方法进行了对比、分析.

2 问题描述

典型的 RCPSP 可描述如下: 在一个项目中, 包含着 J 项工作. 由于技术上的要求, 某些工作之间存在着紧前关系, 记 P_j 为工作 j 的紧前工作集, S_j 为工作 j 的紧后工作集. 整个项目的结构由一张有向网络图表示, 图中节点代表工作, 弧线代表工作间关系. 图中各工作顺序编号, 保证 P_j 中的工作编号小于 j . 工作 1 是唯一最早开始的工作, 工作 J 是唯一最晚完成的工作, 分别代表整个项目的开始和结束. 工作 $j, j = 1, \dots, J$ 的完成需要第 k 种资源量为 r_{jk} , 执行时间为 d_j . 第 $k, k = 1, \dots, K$ 种资源在第 $t, t = 1, \dots, T$ (T 为工期的上限) 阶段的可用量为 R_{kt} . 项目调度计划可以用 J 元组 $S = (SST_1, SST_2, \dots, SST_J)$ 表示, 其中 SST_j 为工作 $j, j = 1, \dots, J$ 的计划开始时间. 一个可行计划是指各项工作开始时间已经确定, 且满足紧前关系及资源约束的调度计划.

现代企业为了获得竞争优势, 追求项目周期更短、库存水平更低、产品交货期更加稳定. 因此, 本文在进行项目调度时, 以缩短项目周期和降低库存水平为优化目标, 并通过项目缓冲区和输入缓冲区的设置保证项目计划的稳定性. 数学模型描述如下:

$$\min SFT_J \quad (1)$$

$$\min WIP = \sum_{j=1}^J \left(\frac{1}{|S_j|} \times \sum_{i \in S_j} (SST_i - SFT_j) \right) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } SST_i - SST_j \geq d_j, \quad i \in S_j \quad (3)$$

$$\sum_{j \in A_t} r_{jk} \leq R_{kt}, \quad k = 1, \dots, K, \quad t = 1, \dots, T \quad (4)$$

$$P(AFT_J \leq (SFT_J + PB)) \geq p_0 \quad (5)$$

其中: SFT_j 为工作 j 的计划完成时间; A_t 为在 t 时间段正在进行的工作集合; AFT_t 为工作 j 的实际完成时间; PB 为项目缓冲区尺寸; p_0 为项目按计划完工的期望概率. 目标函数 (1) 极小化项目工期; 目标函数式 (2) 极小化项目在制品水平. (3) 代表紧前关系约束; (4) 代表资源约束; (5) 保证项目按计划完工概率大于事先给定的期望完工概率 p_0 .

模型 (1)~(5) 不能通过确定性算法求解. 本文基于关键链管理方法设计了一种启发式算法. 算法首先应用基于优先规则的并行调度算法对项目进行反向调度, 获得最小化项目周期的近优调度计划, 并拥有较低的在制品水平. 然后, 在近优调度计划中识别关键链和非关键链, 并设置项目缓冲区和输入缓冲区, 保证项目计划在执行过程中的稳定性.

3 基于关键链的调度方法

3.1 关键链识别

关键链管理方法采用关键链代替关键路径. 但是, 针对一个 RCPSP, 关键链数量、长度以及关键链上包含的工作集合均决定于 RCPSP 的求解过程. RCPSP 是一类著名的 NP 难题^[7], 求解这类问题获得一个近优的调度计划十分困难. 文献 [8] 基于 RCPSP 的调度理论和方法, 设计了一种识别关键链的通用算法. 该方法首先应用一种启发式算法对项目进行反向调度生成一个近优调度计划, 并设定该调度计划中工作 j 的计划开始时间 SST_j , $j = 1, \dots, J$ 为工作 j 最晚开始时间 LST_j , 然后按照各工作最晚开始时间从小到大的顺序逐项局部左移各项工作生成半积极调度计划 (Semi-active schedule)^[9], 移动过程中保持资源的分配顺序不变. 记半积极调度计划中工作 j 的计划开始时间为最早开始时间 EST_j , $j = 1, \dots, J$, 算法通过比较计划中各工作的最晚 / 最早开始时间来识别关键链. 算法总体流程如 1 所示.

流程 1. 关键链识别

第 1 步. 采用启发式算法对项目进行反向调度, 生成一个延迟调度计划 $S = (LST_1, LST_2, \dots, LST_J)$, 记延迟调度计划中各工作的计划开始时间为最晚开始时间;

第 2 步. 以延迟调度计划 $S = (LST_1, LST_2, \dots, LST_J)$ 的计划长度为项目周期, 按照各工作计划开始时间从小到大的顺序逐项局部左移各项工作生成半积极调度计划 $S = (EST_1, EST_2, \dots, EST_J)$;

第 3 步. For $j = 1$ To J

 计算资源约束下的工作自由时间 $rcf_j = LST_j - EST_j, j = 1, \dots, J$;

 If $rcf_j = 0$ Then 工作 j 属于关键链工作;

 Else 工作 j 属于非关键链工作;

EndFor

第 4 步. 输出关键链

算法在第 1 步中, 可以嵌入不同的启发式算法作为反向调度算法.

3.2 缓冲区设置

关键链管理方法通过项目缓冲、输送缓冲和资源缓冲机制来消除不确定因素对项目计划的影响. 目前主要有两种缓冲区设置方法, 分别是“剪贴法”法和“根方差”法^[12]. 考虑到关键链管理方法在项目执行过程的“接力”机制和项目调度的多目标优化, 文献 [13] 提出了一种新的缓冲区设定方法. 流程如下:

流程 2. 缓冲区设置

第 1 步. 识别非关键链 $k, k = 1, \dots, K, K$ 为非关键链数;

第 2 步. 依根方差法计算每条非关键链缓冲区的尺寸 $b_k, k = 1, \dots, K$;

第 3 步. 对属于非关键链 $k, k = 1, \dots, K$ 的每项工作 j , 计算工作 j 的最大可能缓冲区 BS_j

$$BS_j = \text{Min}\{b_k, rcf_j\} \quad (6)$$

第 4 步. 按照各工作最晚开始时间从大到小的顺序逐个调整各非关键链工作的计划开始时间. 记最晚开始时间从大到小的工作序列为 $A = \{j_1, j_2, \dots, j_J\}$, 其中, 如果 $LST_{j_p} \geq$

LST_{j_q} , 则 $p < q$
 For $i = 1$ To J
 选择工作 j_i ;
 If 工作 j_i 为非关键链工作 Then
 [根据后序工作计划开始时间计算工作 j_i 的当前最晚开始时间 $DLST_{j_k}$;
 设置 $DLST_{j_i} := \min\{DLST_j, (LST_{j_i} - BS_{j_i})\}$
 将工作 j_i 的计划开始时间从 $SST_{j_i} = EST_{j_i}$ 到 $DLST_{j_i}$ 局部右移]
 EndFor

第 5 步. 输出调整后的项目调度计划

综合运用以上关键链识别和缓冲区设定方法, 可以实现模型 (1)~(5) 的优化目标: 为了优化目标式 (1), 在关键链识别过程中采用反向调度算法得到近优的项目调度计划保证了较短的项目周期, 设置项目缓冲区和输入缓冲区保证了项目调度计划的稳定性. 为了实现目标式 (2), 各工作应该尽量晚开始, 这样既可以降低项目在制品水平, 又可以获得更多的项目信息以提高工作的执行效率^[14]. 另外, 本文采用根方差法设置项目缓冲区.

4 实验结果

4.1 实验设计

为了测试本文方法的正确性和有效性, 作者应用 Java 语言实现了本文算法, 算法运行在 Pentium III/1G/128M PC 上. 测试问题选自标准问题库 PSPLIB^[15] 中的 3 组单执行模式项目调度问题, 分别包含 32、62 和 92 项工作, 每组包括 480 个实例, 需要 4 种可更新资源. 实验中假设测试问题中各工作的执行时间不包含安全时间 (即为 50% 可能完成时间), 将该时间值乘以 2 得到安全执行时间. 在采用传统的启发式方法生成非延迟计划时使用工作的安全执行时间, 以便将传统项目调度方法和本文方法生成的项目计划进行比较. 项目执行过程的仿真方法如下: 以各工作 50% 可能完成时间为均值, 以服从均匀分布 $U \sim [0.75, 1.5]$ 的随机数为方差, 为各工作生成符合对数正态分布的随机整数 (小数采用四舍五入方式) 作为实际执行时间. 项目起始工作 1 的直接后序工作按计划开始时间开始, 其他工作在项目执行过程中按计划开始时间从小到大的顺序采用“接力”机制执行.

4.2 统计结果

为了将本文方法与传统方法生成的项目计划优化指标进行对比, 试验中统计了两种方法生成的项目计划在仿真前后的目标函数值. 实验中选择应用传统方法嵌入不同优先规则 (包括 GRD、GRPW、GRU、LFT、LST、MINSLK、SPT^[10,11]) 时生成的各项目计划的最短项目周期和最低在制品水平作为两种方法的比较标准, 分别记为 SD^* 和 $SWIP^*$. 统计结果如表 1~3 所示, 表中第 2 列为各项目计划周期与 SD^* 相比的百分比平均值, 即

$$SD1 = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left(\frac{SD_p^r - SD^*}{SD^*} \right) \times 100 \quad (7)$$

其中, $P = 480$ 为测试问题数; SD_p^r 为采用传统方法嵌入优先规则 r , 求解问题 p 时生成的项目计划周期. 表中第 3 列为各项目计划在制品水平与 $SWIP^*$ 相比的百分比平均值, 即

$$SWIP1 = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \left(\frac{SWIP_p^r - SWIP^*}{SWIP^*} \right) \times 100 \quad (8)$$

其中, $SWIP_p^r$ 为采用传统方法嵌入优先规则 r 求解问题 p 时生成的项目计划根据公式 (2) 计算的 WIP 值; 表中第 4 列为在仿真中各项目在计划工期 SD_p^r 之前完成的百分比; 第

5 列为各项目在仿真执行过程中实际 WIP 与 $SWIP^*$ 比较的平均值, 计算方法与 (8) 式类似. 表中第 6~9 列分别与第 2~5 列的 $SD1$ 、 $SWIP1$ 、 $CP1$ 和 $AWIP1$ 采用相同的计算公式, 只是对应的项目计划采用本文方法生成, 工作执行时间采用 50% 可能完全时间, 项目计划工期 SD_p^* 为关键链长度加上项目缓冲区长度.

表 1 传统项目调度方法与本文方法生成的项目调度计划性能对比 ($J = 32$)
Table 1 The statistic results of traditional approach and critical chain based approach ($J = 32$)

优先 规则 r	传统方法				本文方法			
	SD1	SWIP1	CP1	AWIP1	SD2	SWIP2	CP2	AWIP2
GRD	106.35	117.16	1.0	40.38	75.28	58.39	99.87	36.59
GRPW	107.57	118.18	1.0	40.57	75.94	58.71	99.90	36.61
GRU	104.59	114.58	1.0	39.53	74.46	57.10	99.81	35.61
LFT	107.20	118.40	1.0	40.69	75.77	58.97	99.81	36.83
LST	107.41	118.50	1.0	40.70	75.94	58.89	99.92	36.71
MINSLK	102.41	109.57	1.0	38.02	73.38	55.60	99.89	34.83
SPT	106.16	118.57	1.0	40.85	75.00	58.58	99.84	36.61

表 2 传统项目调度方法与本文方法生成的项目调度计划性能对比 ($J = 62$)
Table 2 The statistic results of traditional approach and critical chain based approach ($J = 62$)

优先 规则 r	传统方法				本文方法			
	SD1	SWIP1	CP1	AWIP1	SD2	SWIP2	CP2	AWIP2
GRD	106.06	116.25	1.0	53.32	75.57	53.08	99.88	49.03
GRPW	106.61	118.52	1.0	54.07	75.94	54.25	99.93	49.86
GRU	104.54	114.33	1.0	51.36	74.81	52.40	99.85	48.97
LFT	107.04	119.44	1.0	53.31	76.03	54.65	99.83	47.21
LST	107.54	120.45	1.0	53.73	76.33	54.91	99.96	47.33
MINSLK	101.87	109.71	1.0	49.60	73.48	51.17	99.91	44.46
SPT	106.83	120.59	1.0	53.57	75.87	54.76	99.87	49.87

表 3 传统项目调度方法与本文方法生成的项目调度计划性能对比 ($J = 92$)
Table 3 The statistic results of traditional approach and critical chain based approach ($J = 92$)

优先 规则 r	传统方法				本文方法			
	SD1	SWIP1	CP1	AWIP1	SD2	SWIP2	CP2	AWIP2
GRD	105.66	115.87	1.0	53.32	73.98	51.60	99.90	49.03
GRPW	106.42	118.14	1.0	54.07	74.35	52.40	99.94	49.86
GRU	104.31	115.41	1.0	51.36	73.35	50.88	99.92	48.97
LFT	106.37	118.56	1.0	53.31	74.22	52.52	99.87	47.21
LST	107.14	119.16	1.0	53.73	74.57	52.72	99.95	47.33
MINSLK	101.28	108.50	1.0	49.60	71.72	49.05	99.93	44.46
SPT	105.82	119.22	1.0	53.57	73.88	52.49	99.90	49.87

由表 1~3 可见: 采用传统项目调度方法, 项目按计划完工的概率达到 100%, 而实际在制品水平较计划值减少 50% 左右, 说明传统项目调度方法生成的项目调度计划过于保守. 采用本文方法进行项目调度时, 项目计划工期较传统方法缩短约 75%, 而项目平均按计划完工概率仍然达到 99% 以上, 计划 WIP 水平和仿真 WIP 水平更加接近, 说明本文调度方法更符合项目实际. 另外, 本文算法在第 1 步嵌入较好的启发式算法时, 如基于 MINSLK 优先规则的并行算法, 生成的项目计划具有较好的综合指标, 因此, 可以在算法中嵌入求解效果更好的启发式算法, 如遗传算法、模拟退火、禁忌搜索等, 进一步改进本文算法的求解效果.

为了进一步分析项目工期可以缩短的程度, 在本文研究中针对 J32 一组问题统计了在不同工期下项目按计划完成的概率, 项目工期分别设置为 $\{0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90\} \times$

SD^* (小数部分按 4 舍 5 入处理). 统计结果如表 4 所示. 尽管在本文方法中为了降低在制品水平而延迟了某些非关键链工作, 但两种项目计划方法生成的项目计划在不同工期下平均按计划完成的概率基本接近. 当项目工期设置为 $0.75 \times SD^*$ 时, 两种项目计划方法生成的项目计划在仿真中平均按计划完成的概率均达到 99% 以上.

4.3 仿真结果分析

表 4 的统计结果表明: 当项目工期设置为 $0.75 \times SD^*$ 时, 两种项目计划方法生成的项目计划在仿真中平均按计划完成的概率均达到 99% 以上, 表 1~3 显示采用传统项目调度方法生成的项目计划在仿真执行过程中实际在制品水平较计划值减少 50% 左右. 然而, 值得说明的是: 在本文的项目执行过程仿真中, 仿真模型没有考虑大多数企业特有的企业文化影响, 而是简单地采用“接力”机制按项目计划规定的资源分配顺序执行计划, 每项工作完成之后及时报告, 工作在紧前关系和资源约束允许的情况下马上开始执行. 事实上, 根据“帕金森定律 (Parkinson's law)”和“学生综合症 (Student syndrome)”, 工作执行者会浪费掉工作执行时间中的安全时间. 而且, 在大多数企业文化中, 企业不会因为项目较计划提前完成而获得更多的利润. 工作执行者几乎很少甚至不会因为提前完成了工作而获得奖励, 而是会被分配更多的工作, 还经常是因为工作被延迟或出现质量问题而受到惩罚. 因此, 很少有工作提前完成而及时汇报的情况. 这些因素都会导致工作执行时间中的安全时间被浪费掉. 应用传统方法进行项目计划时, 如果项目执行顺利, 项目会按照计划完成而不是提前完成, 如果项目进行不顺利, 那么也没有很多时间用来进行补救.

本文提出的基于关键链管理方法使用工作 50% 可能完成时间进行项目调度, 而将工作的安全时间以项目缓冲区或输入缓冲区的形式设置在关键链的尾部或非关键链工作后面, 从而保证整个项目的工期以及关键链上工作的顺利进行. 这种策略克服了“帕金森定律”、“学生综合症”以及“只惩罚拖期和出现质量问题者”的企业文化弊端.

表 4 在不同工期下项目按计划完工概率 ($J = 32$)

Table 4 The probability of completing projects on schedule under different project durations ($J = 32$)

优先 规则 r	$60\% \times SD^*$		$65\% \times SD^*$		$70\% \times SD^*$		$75\% \times SD^*$	
	传统法	新方法	传统法	新方法	传统法	新方法	传统法	新方法
GRD	89.22	89.15	94.25	94.12	96.90	96.89	99.98	99.98
GRPW	86.91	86.38	93.14	92.50	96.61	96.40	99.91	99.87
GRU	90.66	90.98	94.50	94.39	96.93	96.91	99.98	99.98
LFT	87.00	86.74	93.46	92.91	96.76	96.64	99.96	99.95
LST	87.00	86.62	93.21	92.59	96.61	96.51	99.90	99.90
MINSLK	92.58	93.30	94.80	94.74	96.97	96.96	99.99	99.99
SPT	89.29	89.32	94.12	93.89	96.87	96.86	99.97	99.97
优先 规则 r	$80\% \times SD^*$		$85\% \times SD^*$		$90\% \times SD^*$		$95\% \times SD^*$	
	传统法	新方法	传统法	新方法	传统法	新方法	传统法	新方法
GRD	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
GRPW	99.97	99.97	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00
GRU	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
LFT	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
LST	99.98	99.98	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
MINSLK	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
SPT	99.99	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

5 结论

1) 基于关键链的项目调度方法较传统项目调度方法更加符合项目管理实际, 克服了项目管理中的“帕金森定律”、“学生综合症”以及“只惩罚拖期和出现质量问题者”的

企业文化弊端的影响;

2) 本文方法在第 1 步嵌入较好的启发式算法时生成的项目计划具有较好的仿真结果. 开发更好的启发式算法嵌入到算法中可以作为下一步的研究方向. 另外, 更巧妙的项目缓冲区和输入缓冲区的设置方法开发将是改进关键链项目管理方法的另一个研究方向.

References

- 1 Goldratt E M. Critical Chain. Great Barrington, MA: The North River Press, 1997
- 2 Liu Shi-Xin, Song Jian-Hai, Tang Jia-Fu. Critical chain – A new method for project planning and scheduling. *Control and Decision*, 2003, **18**(5): 513~516
- 3 Herroelen W, Leus R. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. *Journal of Operations Management*, 2001, **19**(5): 559~577
- 4 Yeo K T, Ning J H. Integrating supply chain and critical chain concepts in engineer-procure-construct (EPC) projects. *International Journal of Project Management*, 2002, **20**(4): 253~262
- 5 Hoel K, Taylor S G. Quantifying buffers for project schedules. *Production and Inventory Management Journal*, 1999, **40**(2): 43~47
- 6 Hagemann A G. Use of the critical chain project management technique at NASA. In: Proceedings of 20th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference, Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2001. 4B11~4B110
- 7 Bartusch M, Möhring R H, Radermacher F J. Scheduling project networks with resource constraints and time windows. *Annals of Operations Research*, 1988, **16**(1): 201~240
- 8 Mo Ju-Hua. Critical chain based model and algorithms for project scheduling. [Master thesis]. Shenyang: Northeastern University, P. R. China, 2005
- 9 Sprecher A, Kolisch R, Drexel A. Semi-active, active, and non-delay schedules for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 1995, **80**(1): 94~102
- 10 Kolisch R, Hartmann S. Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis. In: J. Weglarz, editor, Handbook on Recent Advances in Project Scheduling. Amsterdam: Kluwer, 1998
- 11 Hartmann S, Kolisch R. Experimental evaluation of state-of-the-art heuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 2000, **127**(2): 394~407
- 12 Newbold R C. Project Management in the Fast Lane – Applying the Theory of Constraints. Cambridge: The St Lucie Press, 1998
- 13 Liu Shi-xin, Song Jian-hai, Tang Jia-fu. Approach for sizing time buffers in resources-constrained project scheduling. *Chinese Journal of Systems Engineering*, (In press)
- 14 Tavares L V, Ferreira J A, Coelho J S. On the optimal management of project risk. *European Journal of Operational Research*, 1998, **107**(2): 451~469
- 15 Kolisch R, Sprecher A. PSPLIB – a project scheduling problem library. *European Journal of Operational Research*, 1997, **96**(1): 205~216

刘士新 博士, 副教授. 从事生产计划与调度、项目管理、最优化理论与应用等研究.

(LIU Shi-Xin Ph. D., associate professor. His research interests include production planning and scheduling, project management, and optimization theory and applications.)

宋健海 博士, 高级工程师. 从事钢铁企业 ERP、MES 及企业信息系统整体解决方案等研究.

(SONG Jian-Hai Ph. D., senior engineer. His research interests include ERP and MES in iron/steel enterprises, integrated solutions for enterprise information systems.)

唐加福 教授, 博士生导师. 从事供应链管理、进化算法、Fuzzy 优化理论与方法等研究.

(TANG Jia-Fu Professor. His research interests include supply chain management, evolutionary computation, and fuzzy optimization theory and method.)