

文章编号:1674-8190(2015)03-360-06

粒子群算法在求解航空项目资源均衡 优化问题中的应用

于海夫,薛惠峰

(西北工业大学 自动化学院,西安 710072)

摘要:为了解决航空项目多任务多层次嵌套带来的资源利用率低、需求量集中等问题,将粒子群算法应用于复杂航空项目的资源均衡优化。通过构建资源均衡优化问题的解空间,建立任务开工时间与算法中粒子属性的映射关系。以资源需求均方差为算法的评价函数,在考虑任务逻辑关系而形成的约束条件下,求解项目中非关键节点的实际开始时间,并给出详细资源均衡优化方案。以航空项目中典型机翼装配为算例对算法进行验证,证明所提出的优化方法能够有效削弱资源需求峰值,解决资源需求量集中的问题,达到了项目资源均衡的目的。

关键词:航空项目;粒子群算法;资源均衡;项目管理

中图分类号: V355

文献标识码: A

Application of Particle Swarm Algorithm on Resource Equalization Optimization of Aviation Projects

Yu Haifu, Xue Huifeng

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The particle swarm algorithm is used on the optimization of aviation projects resources to solve the low utilization and the concentration requirement of resources. A mapping relation between the project start time and the particle attributes has been built by establishing the solution space of resource equalization optimization. The start time of non-critical node is solved by using Mean Square Error(MES) of resource requirement as evaluation function and task logical relation as constraints. A detailed optimization scheme is proposed. The algorithm is verified by the typical wing assembly process. It shows that this method can reduce the resource requirement peak value and solve the problem of resource concentration requirement effectively, which achieve the goal of resource equalization optimization of aviation projects.

Key words: aviation project; particle swarm algorithm; resource equalization; project management

0 引言

在航空制造业向着高精高效发展的大趋势影响下,航空制造领域的项目管理成本与管理难度日益加大,面对日益复杂的业务逻辑关系,项目初始

阶段制定的资源计划随着项目进行通常出现资源需求高峰和低谷落差较大、资源总量不足等现象,导致项目进度延迟和资源需求冲突。为了解决此类问题,生产部门通常采取的措施是简单地追加资源,然而当涉及的生产活动数量大、资源需求种类繁多时,追加资源不利于项目的统一资源调度,且可能导致生产成本提升。多数情况下,资源冲突问题可以通过有效的资源均衡管理等手段解决,在此基础上进行资源追加则能够在控制成本的同时最大程度满足生产需求。

收稿日期:2015-04-30; 修回日期:2015-05-23

基金项目:航空科学基金(2014ZE53056)

通信作者:于海夫,2007303291@163.com

资源均衡是项目管理最受关注的问题之一,在给定的生产周期内,如何使有限资源得到有效利用并减小需求冲突,对降低生产成本和缩短生产周期具有重要意义。乌日娜等^[1]引入启发式算法和线性规划的方法以解决资源优化中“工期固定—资源均衡”以及“资源有限—工期最短”的问题。彭武良等^[2]将粒子群算法应用到求解资源受限项目调度问题中,在所建立模型中充分考虑了资源受限项目调度问题的特点,建立了粒子速度更新规则。李浩平等^[3]以整体工期优化为目标建立了资源优化模型,设计了一种用于求解可更新资源约束的资源优化配置问题的离散粒子群算法。目前的研究工作集中在如何建立资源均衡数学模型^[4],以及应用智能算法(例如启发式算法^[5-6]、遗传算法^[7]和粒子群算法^[8-9]等)对所建立数学模型的求解。其中,粒子群算法作为一种基于群智能的优化算法,在许多领域均有应用,其算法模型可以通过显式的数学公式描述,操作和实施简单^[10],因此尤其适用于解决资源均衡问题。

目前的研究多数集中在相对简单的项目优化问题,对于具有跨部门分工协作和多层级嵌套特定的复杂航空型号项目,目前的研究无法精确表达航空项目中任务之间的关系。本文结合任务间搭接网络关系并考虑动态时差分配问题,提出一种航空项目资源均衡优化的粒子群算法,并以航空项目中典型机翼装配为算例进行验证,证明所提方法的有效性,从而为项目管理决策提供资源均衡配置方案。

1 资源均衡优化问题描述及模型建立

航空项目资源均衡优化问题可以归结为“项目工期固定的资源受限均衡优化”,即在保证项目交付节点的前提下,合理调整项目中非关键节点的开始时间,使得在整个工期内资源需求达到最佳优化效果。在对航空项目进行多级网络计划归并处理后,使得优化算法能够应用于整个制造链上,进而以资源需求量均方差为粒子群算法的评价函数,建立资源均衡优化模型并在特定约束条件下求解。

1.1 多级网络计划归并处理

航空型号在生产过程中具有跨区域协作、多部

门分工和生产周期长等特点,由此制定的网络计划通常具有多级性,且层级嵌套复杂。因此,在建立资源均衡优化模型准备阶段,应根据项目的实际情况对网络计划进行处理。若生产部门之间资源需求关联性低,且相互之间的任务几乎不存在紧前紧后关系,或者部门内项目网络计划已相当复杂,则应尽量选择各部门之间并行资源均衡优化,即不进行网络计划的归并处理。否则,为了获得全局最优解应对分级网络计划进行合并,从而得到单一的、完整的综合项目计划^[11]。设项目的分级网络计划含有 N 个单元,且其序列为 $SN = \{SN_1, SN_2, \dots, SN_N\}$, 其中每个单元对应若干个任务集合 $TSN_k = \{TSN_k^1, TSN_k^2, \dots, TSN_k^n\}$ 。若单元 SN_i 为单元 SN_j 的父网络,则 SN_j 是由 SN_i 中的某个任务 $TSN_k^m \in TSN_k$ 向下分解而产生的网络计划单元,故 TSN_k^m 可由 SN_j 中的所有任务替换。对整个项目从顶层开始逐层级替换,最终可将分级网络计划归并为一个综合的大型网络,在此基础上可对资源需求进行全局优化。

1.2 资源均衡优化数学模型

航空项目不同任务与环节对资源的需求类型和需求量不同,在实际项目管理中,通常制约项目进程或者重点关注的资源只有少数几种,因此资源均衡优化所解决的问题多数为有限种资源的均衡求解,则能够在满足管理指标的同时尽量降低求解复杂度。进一步可以定义每种资源的重要程度,即将每种资源赋予一个权重系数,设整个项目需要 K 种可更新资源,完成活动 $j(j=1, 2, \dots, J)$ 需要第 k 种资源的总量为 r_{jk} , 该种资源的权重系数为 Q_k , 其中 $0 \leq Q_k \leq 1, k=1, 2, \dots, K$, 并且 $\sum_{k=1}^K Q_k = 1$ 。航空项目中的时间(t)一般以日为最小单位,若 $R_k(t)$ 为 $[t-1, t]$ 内第 k 种资源的需求总量, \bar{R}_k 为工期(T)内第 k 种资源的平均需求量,以 A_t 表示 $[t-1, t]$ 时间段内正在进行的活动集合, S_{T_j} 表示活动 j 的开始时间,选取资源需求量的均方差作为优化的目标函数,则有式(1)^[9]。

$$\min E = \sum_{k=1}^K Q_k \left\{ \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [R_k(t) - \bar{R}_k]^2 \right\}, \quad t=1, 2, \dots, T \quad (1)$$

式中: $R_k(t) = \sum_{j \in A_t} (r_{jk})_t$; $\bar{R}_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R_k(t)$; $T = S_{T_j}$ 。

式(1)变形后可以将多资源优化问题简化为类似单资源优化的问题。按照资源的重要程度计算活动 j 在时间 t 内的统一资源需求总量 R_{jt} , 即 $R_{jt} = \sum_{k=1}^K Q_k(R_{jk})_k$, 则目标函数可以表示为

$$\min E = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [R_k(t) - \bar{R}_k]^2 \quad (2)$$

式中: $R_k(t) = \sum_{j \in A_t} R_{jk}$, $R_k(t) \leq R$, R 为所有资源的总量。

资源均衡优化问题是通过调整非关键节点型任务的开始时间, 进而分散资源的占用情况, 达到削弱资源消耗集中的目的。为了描述约束条件, 设任务 i 的持续时间为 $D(i)$, 实际开始时间为 $S(i)$, 最早开始时间为 $ES(i)$, 最迟开始时间为 $LS(i)$, $Z(ij)$ 为任务 i 与 j 的总延时量 (表示任务 i 结束后多久任务 j 开始), 则资源优化问题的约束条件为 $S(i) + D(i) + Z(ij) \leq S(j) \leq LS(j)$, $\forall i \in P_j$ (3)

式中: P_j 为任务 j 的前置任务集合。

2 粒子群算法原理

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, 简称 PSO) 是一种与遗传算法等仿生类算法相似的计算技术, 采用了“群体”和“进化”的概念, 依据个体 (粒子) 间的协作与竞争, 实现复杂空间中最优解的搜索, 可以用来求解复杂的优化问题^[4]。该算法在 N 维解空间内随机产生由 M 个粒子组成的初始群, 其中每个粒子在解空间内运动。为了描述第 m 个粒子的运动情况, 将其空间位置定义为 $x_m = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mN})$, 当前飞行速度定义为 $v_m = (v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mN})$, 其中 $m = 1, 2, \dots, M$ 。 x_{mj} 和 v_{mj} ($j = 1, 2, \dots, N$) 分别为粒子在第 N 维空间的坐标和速度。位置坐标的更新规则为

$$x_m(\lambda + 1) = x_m(\lambda) + v_m(\lambda + 1) \quad (4)$$

式中: $x_m(\lambda + 1)$ 和 $x_m(\lambda)$ 分别为粒子 m 第 $\lambda + 1$ 代和第 λ 代的位置坐标; $v_m(\lambda + 1)$ 为第 $\lambda + 1$ 代的速度, $v_m(\lambda + 1)$ 是 $v_m(\lambda + 1) \times \Delta\lambda$ 的简写, 因为每一代的时间步 $\Delta\lambda$ 为 1。

标准 PSO 的速度更新规则为^[10]

$$v_m(\lambda + 1) = v_m(\lambda) + l_1 u_1 [p_m - x_m(\lambda)] + l_2 u_2 [p_g - x_m(\lambda)] \quad (5)$$

式中: l_1 体现了粒子的认知能力, 为调节粒子飞向自身最好位置方向的步长; l_2 体现了粒子的群体学习能力, 为调节粒子向全局最好位置飞行的步长; u_1 和 u_2 为相互独立的两个 $U(0, 1)$ 范围内随机函数; p_m 为粒子 m 的最优解; p_g 为全局最优解。

对 PSO 算法的研究还集中于速度更新规则上, 除标准 PSO 外, 还有引入惯性权重的 PSO^[12] 和引入压缩系数的 PSO^[13]。本文主要应用引入惯性权重的 PSO 求解资源均衡优化问题, 其速度更新规则为

$$v_m(\lambda + 1) = \omega v_m(\lambda) + l_1 u_1 [p_m - x_m(\lambda)] + l_2 u_2 [p_g - x_m(\lambda)] \quad (6)$$

ω 的作用是使粒子保持运动惯性, 体现了上次迭代中的速度对当前速度的影响。系数 ω 在 0.9 至 0.4 间线性减小可以使算法在开始求解时具有较好的全局搜索能力, 在结束时具有较好的局部搜索能力^[12], 当 $\omega = 0.729$ 且 $l_1 = l_2 = 1.429$ 时算法的收敛性较好^[13]。

3 资源均衡的粒子群算法设计

利用粒子群算法解决优化问题时需要明确优化参数与粒子的映射关系, 即粒子所表达的内容。在项目资源均衡优化问题中通常有两种方式: 排序法^[9] 与优先值法^[14]。排序法中每个粒子的坐标均代表活动的一种排序方式, 利用排序法计算资源优化问题时必须动态调整活动的时差, 以避免出现不满足逻辑关系的活动序列。优先值法是将活动中的每个任务赋予权重, 令粒子的每一维坐标值代表一个活动优先级的大小。通常情况下, 排序法优化效果好, 但时间代价高; 优先值法时间代价低, 但优化效果差。

为了获得最佳优化效果, 本文选取排序法进行研究, 此时活动的实际开始时间不仅需满足在最早和最晚开始时间内, 还受紧前活动的制约。为了避免不合理的排序方式出现, 应增加如下约束条件:

$$\begin{cases} ES(j) \leq S(j) \leq LS(j), P_j = \emptyset \\ \max\{S(l) + D(l) + Z(lj)\} \leq S(j) \leq LS(j), \\ l \in P_j \neq \emptyset \end{cases} \quad (7)$$

设有 M 个粒子在 N 维空间内运动, 每个粒子的坐标为 $x_m = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mN})$, 飞行速度为 $v_m = (v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mN})$, 其中 x_{mj} ($m=1, 2, \dots, M; j=1, 2, \dots, N$) 的值对应活动 j 的实际开始时间, 其活动范围为 $[x_{mj}^{\min}, x_{mj}^{\max}]$, 代表活动 j 的实际开始时间范围, x_{mj}^{\min} 为最早开始时间, x_{mj}^{\max} 为最晚开始时间; v_{mj} 的活动范围为 $[-v_{mj}^{\max}, v_{mj}^{\max}]$ 。粒子在一定飞行速度下不断进化, 最终在其活动范围内达到最佳位置, 即确定活动的实际开始时间。由于粒子群算法属于连续空间的优化算法, 本文所有任务的实际开始时间所组成的集合为离散数据集, 因此计算时需要将粒子的位置和速度进行取整处理。

为了满足逻辑关系, 在每次迭代开始前均需要根据式 (6) 条件重新计算时差, 即 $ES(j) = \max\{s(l) + D(l) + Z(lj)\}$, 并利用 $ES(j)$ 更新 x_{mj}^{\min} , 此过程虽然增加了算法的时间代价, 但可以获得更好的优化结果。

应用排序法的粒子群资源均衡优化算法的步骤如下:

步骤 1: 初始化粒子群, 设定群体规模、每个粒子的位置和速度;

步骤 2: 判断 $x_{mj} = S(j)$ 是否满足式 (3) 和式 (6), 若不满足返回步骤 1 修改初始值, 否则应用式 (2) 计算每个粒子 x_m 的适应度值;

步骤 3: 更新 p_m 与 p_g , 即若该步的局部适应度值更好则令 $p_m = x_m$, 若该步的全局适应度值更好则令 $p_g = x_m$, 否则保持 p_m 与 p_g 不变;

步骤 4: 应用式 (5) 更新速度 v_m , 若 $v_{mj} > v_{mj}^{\max}$ 则令 $v_{mj} = v_{mj}^{\max}$; 若 $v_{mj} < -v_{mj}^{\max}$ 则令 $v_{mj} = -v_{mj}^{\max}$;

步骤 5: 应用式 (4) 更新速度 x_m , 若 $x_{mj} > x_{mj}^{\max}$ 则令 $x_{mj} = x_{mj}^{\max}$; 若 $x_{mj} < x_{mj}^{\min}$ 则令 $x_{mj} = x_{mj}^{\min}$;

步骤 6: 判断程序是否达到终止条件 (满足误差限或达到迭代次数上限), 若达到则输出结果, 程序结束; 若未达到则返回到步骤 3。

4 实例分析与验证

以航空项目网络计划为算例^[11]进行资源均衡优化分析 (如图 1 所示), 图 1 反映了任务执行及搭接关系, 其中每个任务的最早、最晚开始时间和工期如表 1 所示。

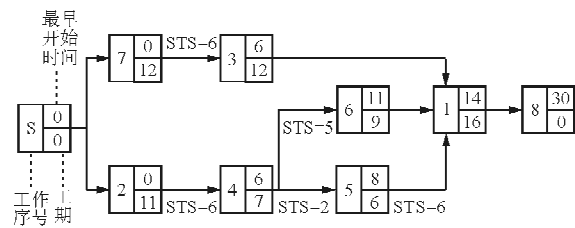


图 1 实例任务网络计划图

Fig. 1 Network planning chart of tasks

表 1 任务时间参数表

Table 1 Time parameters of tasks

序号	任务名称	ES/天	LS/天	t/天
1	机翼主体部件装配	14	14	16
2	翼尖装配	0	0	11
3	梁架装配	6	11	12
4	下板件装配	6	6	7
5	上板件装配	8	8	6
6	翼肋装配	11	19	9
7	机翼后段装配	0	6	12

每个任务在工期范围内需要的资源类型及消耗的资源量不同, 每个任务的资源需求情况如图 2 所示 (条形框内的数字表示资源需求量), 假定三种资源的权重分别为 0.3, 0.3 和 0.4, 若任务的开始时间依次为 14、0、6、6、8、11、4 天, 则根据式 (2) 计算出的资源需求量均方差为 $\sigma^2 = 8.2765$ 。

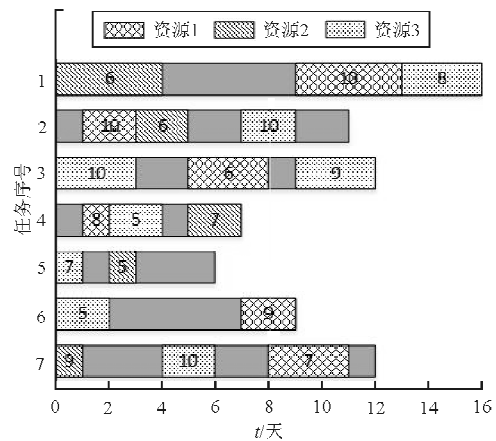


图 2 各任务在工期内的资源需求情况

Fig. 2 Resources requirements in project duration

利用本文的粒子群优化算法, 设定粒子群粒子数 $M=10$; 惯性系数 $\omega=0.729$; 学习因子 $l_1=l_2=1.429$; 最大进化代数 $G=40$, 重复计算 50 次得出最优解即最小资源均方差为 $\sigma^2 = 1.6011$ 。计算过

程中目标函数值的变化如图3所示,可以看出算法具有较好的收敛性。

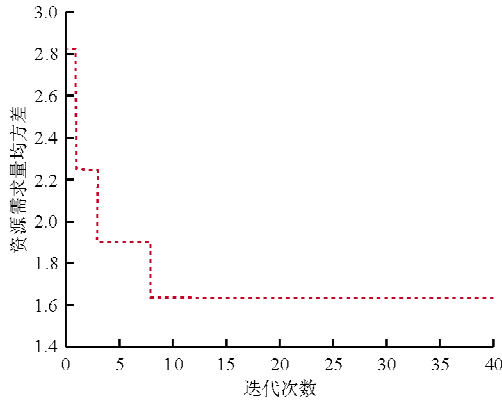


图3 算法计算结果

Fig.3 Result of the algorithm

本实例利用粒子群优化算法进行优化,得到每个任务的实际开始时间为14、0、11、6、8、18、0天。优化前后的任务工期对比如图4所示。

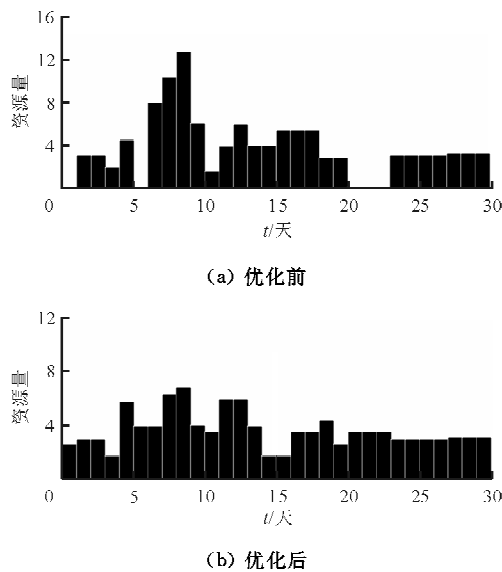


图4 资源均衡优化前后对比

Fig.4 Comparison of resources distribution before and after optimizing

从图4可以看出:优化前资源需求量峰值主要集中在 $t=8$ 和 $t=9$ 时间内,且工期内有零资源需求时间出现;优化后资源需求峰值被明显削弱,整体趋于平稳。

5 结论

介绍了粒子群算法在航空项目中的应用,提出

了一种基于惯性权重粒子群的航空项目资源优化算法,实现了在离散空间对资源均衡问题的求解,解决了航空项目进行中的资源集中问题。

由于影响航空型号项目进展的因素众多,本文仅选取部分关键因素进行讨论,针对不同的优化结果各个因素的选取权重可能不同。因此,只有根据实际情况对关注的参数进行综合分析调整,才能从最大程度上解决航空项目资源均衡优化的问题。

参考文献

- [1] 乌日娜,徐方舟,陆惠民. 项目资源约束下工期最短-资源均衡优化算法[J]. 项目管理技术, 2013, 11(7): 103-107. Wu Rina, Xu Fangzhou, Lu Huimin. A resource equalization optimization method under resource-constrained condition[J]. Project Management Technology, 2013, 11(7): 103-107. (in Chinese)
- [2] 彭武良,郝永平. 求解资源受限项目调度问题的改进粒子群算法[J]. 系统工程, 2010, 28(4): 84-88. Peng Wuliang, Hao Yongping. An improved PSO for solving resource-constrained project scheduling problem[J]. Systems Engineering, 2010, 28(4): 84-88. (in Chinese)
- [3] 李浩平,方子帆,计三有. 基于离散粒子群算法的资源约束下多项目资源优化方法研究[J]. 现代机械, 2011(1): 34-36. Li Haoping, Fang Zifan, Ji Sanyou. Study on multi-project resources optimization method under resource-constrained based on discrete particle swarm optimization[J]. Modern Machinery, 2011(1): 34-36. (in Chinese)
- [4] 褚春超,郑丕涛,李栋. 网络计划资源均衡模型的改进及其应用[J]. 天津大学学报, 2006, 39(2): 250-255. Chu Chunchao, Zheng Pi'e, Li Dong. Improved network-planning-based resources leveling model and its application [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(2): 250-255. (in Chinese)
- [5] 白思俊. 多资源约束的网络计划的启发式优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 1995(7): 42-47. Bai Sijun. Heuristic method for multiple resource-constrained in PERT/CPM network[J]. Journal of Systems Science and Information, 1995(7): 42-47. (in Chinese)
- [6] Koulinas G, Kotsikas L, Anagnostopoulos K. A particle swarm optimization based hyper-heuristic algorithm for the classic resource constrained project scheduling problem[J]. Information Sciences, 2014, 277: 680-693.
- [7] 骆刚,刘尔烈,王健. 遗传算法在网络计划资源优化中的应用[J]. 天津大学学报, 2004, 37(2): 179-183. Luo Gang, Liu Erlie, Wang Jian. Resource planning optimization in network schedule using genetic algorithms[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(2): 179-183. (in Chinese)

- [8] 郭云涛, 白思俊, 徐济超, 等. 基于粒子群算法的资源均衡[J]. 系统工程, 2008, 26(4): 99-103.
Guo Yuntao, Bai Sijun, Xu Jichao, et al. The resource leveling based on particle swarm optimization[J]. Systems Engineering, 2008, 26(4): 99-103. (in Chinese)
- [9] 单汨源, 邓莎, 吴娟, 等. 一种求解项目调度中资源均衡问题的粒子群算法[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(22): 5805-5809.
Shan Guyuan, Deng Sha, Wu Juan, et al. Particle swarm algorithm for solving resource leveling problem in project scheduling[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(22): 5805-5809. (in Chinese)
- [10] Shi Y. Particle swarm optimization[J]. IEEE Connections, 2004, 2(1): 8-13.
- [11] 舒湘沅, 杨铭, 王延平. 航空项目资源均衡优化问题的蚁群—模拟退火算法[J]. 航空制造技术, 2010(13): 77-81.
Shu Xiangyuan, Yang Ming, Wang Yanping. Ant colony-simulated annealing algorithm of aviation project resource leveling and optimizing problems[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(13): 77-81. (in Chinese)
- [12] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C]// Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence. The 1998 IEEE International Conference on, IEEE, 1998: 69-73.
- [13] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm—explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.
- [14] Zhang H, Li X D, Li H, et al. Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling[J]. Automation in Construction, 2005, 14(3): 393-404.

作者简介:

于海夫(1978—),男,博士研究生。主要研究方向:航空项目管理。

薛惠锋(1964—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:系统工程及管理科学。

(编辑:赵毓梅)

(上接第 346 页)

- Guo Jun, Wu Yafeng, Chu Nisheng. Application of AMESim in aircraft hydraulic system[J]. Computer Aided Engineering, 2006, 15(2): 42-45. (in Chinese)
- [12] 万晓峰. LMS Virtual. Lab Motion 入门与提高[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2010: 231-233.
Wan Xiaofeng. LMS Virtual. Lab Motion accident and advance[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010: 231-233. (in Chinese)

作者简介:

朱伟(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机起落架收放控制系统设计。

高萌(1987—),男,工程师。主要研究方向:飞机起落架系统设计。

黄伟峰(1983—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机起落架收放控制系统设计。

(编辑:赵毓梅)