

工程项目工期—成本—安全水平均衡优化研究*

张连营, 严飞, 杨瑞

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 目前工程项目安全性的相关研究中, 缺乏对于工期、成本等目标与安全性之间联系及相互影响的考虑。针对这一不足, 在分析每项工序持续时间、完工成本、保证性安全成本与安全水平之间关系的基础上, 通过将安全性与系统可靠性理论相结合, 得到工程项目的安全水平指数, 并进一步将安全目标引入工期—成本优化模型, 构建了工程项目工期—成本—安全水平均衡优化模型。最后结合一个工程项目实例, 利用 PSO 算法对模型进行了求解, 得到工期、成本与安全水平的一系列 Pareto 解, 从而验证了模型的有效性与合理性及其在工程项目安全管理中的实用性。

关键词: 工程项目; 系统可靠性; 安全水平; 均衡优化

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0078-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.018

Study on time-cost-safety level trade-off of construction project

ZHANG Lian-ying, YAN Fei, YANG Rui

(Dept. of Management & Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Current studies on construction security seldom considered relationships and mutual influences between time, cost and other objectives and security. This paper analyzed relationships between duration, cost of completion, guarantee safety cost and safety level of each activity, and deduced safety level index of construction project by the combination of security and system reliability. Then it established a time-cost-safety level equilibrium optimization model through integrating the objective of safety level into time-cost trade-off model. At last, it achieved the Pareto solution of the model using PSO algorithm based on a real example, and demonstrate the effectiveness, rationality and practicality of the model in safety management of construction projects.

Key words: construction project; system reliability; safety level; trade-off

0 引言

工程建筑业是意外事故发生概率最高的行业之一。根据有关统计资料显示, 英国每个月至少有 4 名建筑工人丧生, 美国平均每 10 万名工人中就有 10.5 名建筑工人因安全事故致死^[1], 我国台湾 2008 年建筑业安全事故死亡率高达 0.13‰, 远高于其他行业^[2]。而国内据不完全统计, 每天至少有 3 名建筑工人因安全事故死亡。工程项目实施过程中安全事故的频发, 在对建筑工人造成巨大威胁的同时, 还给工程项目带来了巨大的经济损失。因此, 合理地安排工程项目的安全投入, 从而提高项目实施的安全水平或者降低工程项目的安全总成本, 对于工程项目的顺利实施具有重要的意义。

目前, 学者们对于工程项目安全性的研究主要分为以下两个方面:

a) 识别造成安全事故的原因以及影响工程项目安全性的因素与策略, 从而为工程项目安全性的量化研究提供理论支持。例如, Hinz 等人^[3]建议将造成安全事故的根源分为 20 类可能的原因, 来替代传统的高空坠落、电击等五类原因。Fang 等人^[4]则通过问卷调查, 分析了工程项目安全管理绩效

与安全性影响因素之间的联系。

b) 研究如何合理安排各项安全措施或项目安全投入, 从而实现工程项目安全水平或安全成本的优化。例如, Yu 等人^[5]通过建立一个多准则 AHP 模型, 对影响高速公路项目安全性的各项备选措施进行优先排序, 在安全管理过程中, 优先选择排序靠前的安全措施, 从而提高高速公路项目的安全性。Fung 等人^[6]建立了一个工程项目安全性的风险评估模型, 并利用该模型对容易出现高风险的工序活动进行预测, 从而为有针对性地预防安全事故发生、提高整个项目的安全性提供支持。陆宁等人^[7]构建了建设项目安全成本率分析模型, 并通过该模型解决了在保证一定安全性水平的前提下最小化安全成本的问题。

从上述研究中可以看出, 目前的研究多集中于在识别安全性相关影响因素或者各项安全措施的前提下, 如何提高工程项目的安全性; 或者是在保证一定安全性水平条件下, 如何最小化安全成本。显然, 相对于工期、成本、质量等工程项目目标的优化研究^[8-10], 目前对于工程项目安全性的研究仍不够充分, 且缺乏对于项目工期、成本等目标与安全性之间联系及相互影响的考虑。Wang 等人^[11]以每项工序为单位, 创造性地利用关键线路法实现了工程项目安全性评估与进度控制的集成, 建立

收稿日期: 2012-05-27; 修回日期: 2012-07-05 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70871088)

作者简介: 张连营(1965-), 男, 河北景县人, 教授, 博士, 主要研究方向为工程项目管理、工程项目多目标综合优化等(tjzly126@126.com); 严飞(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能算法、工程项目多目标优化; 杨瑞(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能算法、工程项目多目标优化。

了一个基于仿真模拟的工程项目安全评价模型。然而该模型也只能对安全性目标进行评价分析,无法实现安全性目标与工期、成本等目标之间的均衡优化。

1 工程项目工期—成本—安全水平均衡优化模型

1.1 工期—成本优化模型

本文假设工程项目中的每项工序都存在一个正常持续时间 t_{in} (受资源供应情况、工人熟练程度等条件影响),而随着人力、机械等资源的增加或者减少,工序 i 的持续时间会相应地缩短或延长。工序 i 在正常持续时间 t_{in} 下完成时的完工成本是最底的,记为 c_{in} ;随着工序持续时间的变化(缩短或延长),工序的完工成本都将在正常持续时间 t_{in} 下的完工成本 c_{in} 的基础上增加。同时,由于资源、人工、机械等条件的限制,每项工序的持续时间不可能无限制地缩短或延长,因此本文假设每项工序都存在一个最短持续时间 t_{is} 和最长持续时间 t_{il} 。

在假设条件下,本文提出工序 i 的完工成本为

$$c_i = c_{in} + \gamma_i (t_i - t_{in})^2 \quad (1)$$

其中: t_i 为工序 i 的实际持续时间; t_{in} 为工序 i 的正常持续时间; c_i 为工序 i 的实际完工成本; c_{in} 为正常持续时间 t_{in} 下工序 i 的完工成本; γ_i 为工序 i 的成本惩罚因子(对于不同施工条件下的不同工序, γ_i 取值不同)。

工程项目的总成本是由所有工序的成本构成的,因而通过将所有工序的实际完工成本相加,即得到整个工程的工期—成本优化模型:

$$\min T = \sum_{i \in A} t_i \quad (2)$$

$$\min C = \sum_{i=1}^n [c_{in} + \gamma_i (t_i - t_{in})^2] \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad -X_i + X_j - t_i \geq 0 \quad (4)$$

$$t_{is} \leq t_i \leq t_{il} \quad (5)$$

$$X_i, X_j \geq 0 \quad (6)$$

其中: t_{is} 为工序 i 的最短持续时间; t_{il} 为工序 i 的最长持续时间; X_i, X_j 为工序 i 与 j 的开始时间(工序 j 为 i 的紧后工序); T 为工程项目总工期; C 为工程项目总成本; A 为工程项目关键路径上所有工序的集合。

1.2 基于系统可靠性的工程项目安全水平指数

1.2.1 单项工序的安全水平指数

安全成本主要包括保证性安全成本与损失性安全成本。保证性安全成本是指为了提高项目安全水平,降低事故发生概率而投入的费用,如对工人进行安全培训的费用、购买安全设施的费用等;损失性安全成本则是指项目因发生安全事故而导致的一切费用,如工人受伤的抚恤费用等。三者间的相互关系如图1所示。从图1中可以看出,随着保证性安全成本投入的增加,工程项目安全性也将逐渐提高。假设 η 为项目的保证性安全成本率(保证性安全成本率 = 保证性安全成本/工程项目总成本),则工序 i 投入的保证性安全成本记为 $c_{ig} = \eta c_i$ 。若此时工序 i 实际发生安全事故的概率为 p_i ,则工序 i 的安全水平指数^[3]可表示为

$$S_i = 1 - p_i = 1 - p_{0i} (1 - \Delta p_i) \quad (7)$$

其中: S_i 为工序 i 的安全水平指数; p_{0i} 为保证性安全成本率为 η 时,工序 i 发生安全事故的初始概率(不同的 η 值对应不同的 p_{0i} 值); Δp_i 为工序 i 投入保证性安全成本后,安全事故发生

概率的减小比例,且 $\Delta p_i = \Delta p_{i \min} + (\Delta p_{i \max} - \Delta p_{i \min}) \frac{c_{ig} - c_{ig \min}}{c_{ig \max} - c_{ig \min}}$;

$\Delta p_{i \min}$ 为工序 i 投入保证性安全成本之后,安全事故发生概率的最低减小比例; $\Delta p_{i \max}$ 为工序 i 投入保证性安全成本之后,安全事故发生概率的最高减小比例; $c_{ig \min}$ 为工序 i 的最小完工成本; $c_{ig \max}$ 为工序 i 的最大完工成本; c_{ig} 为投入工序 i 的最低保证

性安全成本, $c_{ig} = \eta c_{i \min}$; $c_{ig \max}$ 为投入工序 i 的最高保证性安全成本,且 $c_{ig} = \eta c_{i \max}$ 。

1.2.2 基于系统可靠性的工程项目安全水平指数

为了进一步对整个工程项目的安全水平指数进行量化计算,本文将安全成本与系统可靠性理论^[13]相结合,从而计算出整个工程项目的安全水平指数。为此,本文假设整个工程的安全水平指数 S 是由工序 i 的安全水平指数 S_i 参照混连系统可靠性算法得到的。

本文将其定义为如下的网络可靠性算法:

$$S = \prod_{i=0}^n S_i \quad (8)$$

在工程项目单代号网络图中,网络可靠性算法 $G(S_i)$ 定义如下:

假设对于每个节点 i 来说,有如图2所示的网络参数。

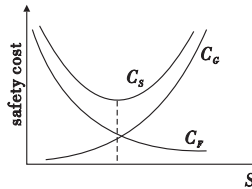


图1 保证性安全成本与损失性安全水平、安全总成本之间的关系

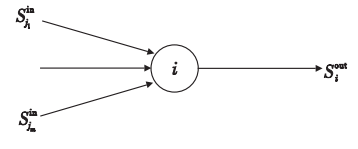


图2 网络安全水平指数计算示意图

其中, $S_{j_1}^{in}, \dots, S_{j_m}^{in}$ 分别表示在如图2所示的网络中,工序 i 的紧前工序 $j_1, \dots, j_m$ 在网络中对其输入的安全水平指数(其中工序 i 有 m 个紧前工序, m 为自然数),则工序 i 的网络输出安全水平指数为 $S_i^{out} = [1 - \prod_{j=1}^m (1 - S_{j_j}^{in})] \times S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

特别地,对于初始节点($i = 1$)来说, $S_0^{in} = 1$; 当 $1 \leq i \leq n$ 时, $S_i^{in} = S_i^{out}$ 。

对于整个网络来说,网络初始输入的安全水平指数 S^{in} 即为初始节点输入 S_0^{in} ,而输出的安全水平指数就是整个工程项目的安全水平指数,即结束节点($i = n$)输出的安全水平指数

$$S = \prod_{i=0}^n S_i = S_n^{out}。其中, S_i \in [0, 1]。$$

1.3 工期—成本—安全水平均衡优化模型

根据1.1、1.2节所作的论述,本文建立如下的工程项目工期—成本—安全水平均衡优化模型:

$$\min T = \sum_{i \in A} t_i \quad (9)$$

$$\min C = \sum_{i=1}^n [c_{in} + \gamma_i (t_i - t_{in})^2] \quad (10)$$

$$\max S = S_n^{out} = [1 - \prod_{j=1}^m (1 - S_{j_j}^{in})] \times S_n \quad (11)$$

约束条件为

$$T \leq T_q \quad (12)$$

$$C \leq C_q \quad (13)$$

$$[1 - \prod_{j=1}^m (1 - S_{j_j}^{in})] \times S_n \geq S_q \quad (14)$$

$$-X_i + X_j - t_i \geq 0 \quad (15)$$

$$t_{is} \leq t_i \leq t_{il} \quad (16)$$

$$X_i, X_j \geq 0 \quad (17)$$

$$c_{gi} \geq c_{gi} \geq c_{gi} \quad (18)$$

$$0 \leq S_i \leq 1 \quad (19)$$

其中: T_q 为工程项目最大总工期限制; C_q 为工程项目最大总成本限制; S_q 为工程项目安全水平指数的最低要求; 其他参数意义同前。式(12)~(14)为工程项目对于总工期、总成本及总安全水平指数的实际要求; 式(15)表示各项工序之间的逻辑关系; 式(16)~(18)及式(19)表示模型中各项工序持续时间、保证性安全成本及安全水平指数的变化范围。

本文所建模型为以工程项目施工过程中各项工序的实际持续时间 t_i 为自变量(t_i 为离散值), 以工程项目总工期、总成本以及总安全水平指数为优化目标的多目标均衡优化模型。

2 PSO 算法

2.1 标准 PSO 算法

近年来,随着优化技术的不断发展,各国学者相继提出了禁忌搜索、遗传算法、人工神经网络、微粒群算法等多种功能强大的智能优化算法^[4,13]。在这些优化技术与方法中,微粒群算法概念简明、参数设置少、易于实现,它能够依据当前的搜索情况,及时有效地对搜索策略进行动态调整,从而有效地解决复杂条件下的优化问题。更重要的是,PSO 算法在种群规模较小的条件下即可得到很好的计算结果,这能够有效满足实际工程项目中对于多目标优化效率的要求。

标准 PSO 算法由 Kennedy 等人^[14]最早提出,根据式(20)~(21)来更新粒子的速度和位置。

$$v_{id} = v_{id} + c_1 \text{rand}() (p_{id} - x_{id}) + c_2 \text{rand}() (p_{gd} - x_{id}) \quad (20)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (21)$$

其中: c_1, c_2 为加速常数; rand 为随机函数, 值为 $[0, 1]$; v_{id} 为微粒速度; x_{id} 为微粒位置。

式(20)右边第一部分是更新前微粒所具有的速度,用于保证算法拓展搜索空间的能力; 第二部分是认知因子,代表微粒自身的思考; 第三部分是社会因子,代表种群中微粒之间的相互合作与信息共享。

标准 PSO 算法的流程如图 3 所示。

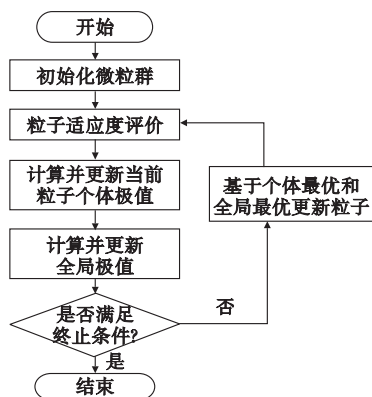


图3 标准微粒群算法流程

2.2 加入惯性权重的微粒群算法

从式(20)中可以看出,微粒速度影响着微粒搜索的进程,它有效地控制着微粒飞行的速度,使得算法能够达到全局探索

与局部搜索功能间的有效平衡。然而标准微粒群算法对于微粒飞行速度的控制是非常有限的。为了解决这一问题,Shi 等人^[15]在基本微粒群算法模型中引入了惯性权重系数 ω , 即将式(20)中的速度项 v_{id} 变为 ωv_{id} , 以实现对微粒飞行速度的有效控制与调整。惯性权重 ω 的大小将控制微粒的搜索步长。较小的 ω 能提高算法的搜索精度和局部搜索能力; 较大的 ω 能够提高算法的全局搜索能力, 避免陷入局部最优。

本文采用自适应惯性权重的方法^[16]: 算法开始时, 赋予 ω 一个较大的值 ω_1 ($\omega_1 > 0$), 并随着微粒搜索的进行, 使得惯性权重 ω 呈线性减小。设 ω 在 $[\omega_2, \omega_1]$ 上随着迭代次数的增加而线性减少, 则 $\omega(i) = \omega_1 - (\omega_1 - \omega_2) \frac{i}{\text{maxiter}}$ 。其中: i 为当前迭代次数, maxiter 为算法的最大终止代数。线性递减的自适应惯性权重可以使得 PSO 算法在初期时能够搜索较大的区域, 较快地找出最优解的大致位置, 提高算法的搜索速度; 而随着迭代次数的增加, ω 值减小, 微粒速度也逐渐减小, 算法的搜索精度与局部搜索能力也将逐渐增加。

2.3 模型求解算法设计难点

1) 惯性权重的选取 不同惯性权重的选取, 对于加入惯性权重的微粒群算法的优化性能具有较大的影响, 本文取目前较典型的取法^[16]: $\omega_1 = 0.9, \omega_2 = 0.4$ 。

2) 适应度值计算及 Pareto 解的实现 根据目标函数式(9)~(11)计算种群中每一个微粒所对应的工期、成本及安全水平指数, 构成适应度值, 作为计算拥挤距离和偏序关系的依据, 并将非支配集理论以及动态权重法与 PSO 算法相结合, 使得算法能够求得模型的 Pareto 最优解。

3) 非劣排序和拥挤距离排序 根据非支配解的定义对种群进行非劣排序, 在产生新种群时, 保留处于非劣层级较低且拥挤距离较大的个体, 并将它们参与下一代进化。

4) 模型可行解的选取 本文所建立模型的自变量为各项工序的实际持续时间 t_i , 且 t_i 以整数天为单位(离散值), 因此直接利用 PSO 算法进行求解, 迭代过程中将会出现大量的不可行解。为了解决这一问题, 本文在粒子每次迭代之后, 对其迭代值进行圆整处理。

3 工程实例应用分析

3.1 工程实例概况

案例项目共包括 8 项工序, 且要求项目完成工期不超过 140 天, 总成本不高于 3 000 万元, 安全水平指数不得低于 0.800。其施工网络计划如图 4 所示。表 1 为各工序的相关参数与数据, $\eta = 5\%$ 。

表 1 各工序相关参数与数据

工序	t_{is}	t_{in}	t_{il}	c_{in}	γ_i	p_{0i}	$\Delta p_{i \min}$	$\Delta p_{i \max}$
1	23	30	34	390	1.68	0.15	0.05	0.90
2	21	28	31	312	3.37	0.15	0.02	0.89
3	20	26	33	390	3.14	0.12	0.10	0.85
4	15	22	29	240	0.56	0.10	0.04	0.90
5	16	21	27	228	3.00	0.05	0.008	0.92
6	22	28	35	330	3.53	0.08	0.12	0.85
7	21	21	28	216	1.96	0.13	0.05	0.90
8	25	25	30	240	3.98	0.11	0.09	0.95

3.2 模型求解与结果分析

根据 3.1 节中的相关数据, 可以建立该实际案例的工期—

成本—安全水平均衡优化模型(见1.3节),然后利用加入惯性权重的 PSO 算法对模型进行求解。由于自变量 t_i 为离散值,为了保证算法搜索过程中解的多样性,从而得到较好的 Pareto 解,根据算例的规模,将种群规模设置为 50,迭代次数设置为 500 代,求解得到案例模型的 Pareto 解。求得的 Pareto 解在坐标系中表现为三维的 Pareto 前沿面,如图 5 所示。

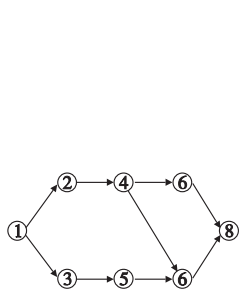


图4 案例项目施工的单代号网络图

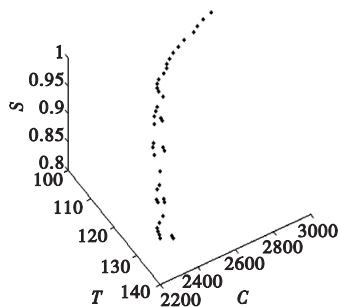


图5 工期 T 、成本 C 与安全水平指数 S 的Pareto前沿面

限于篇幅,表2仅列出了部分 Pareto 解,每组 Pareto 解均可作为项目的备选方案。从图5和表2的数据中可以看出,工程项目工期、成本与安全水平之间存在相互制约的关系,且随着安全水平的提高,所需要付出的成本也越来越高。项目决策者可根据项目对工期、成本与安全水平的具体要求来选择最佳的备选方案,为各项工序的实施合理分配资源。

表2 案例模型的部分 Pareto 解

工序	T	C	S	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8
1	132	2 348	0.803	29	28	26	22	21	28	21	25
2	127	2 368	0.821	28	27	27	20	20	28	21	24
3	124	2 405	0.874	26	26	26	21	21	28	20	23
4	120	2 442	0.895	25	26	25	20	20	26	20	23
5	118	2 468	0.922	25	26	26	19	19	25	20	23
6	116	2 487	0.951	24	27	25	17	19	25	21	23
7	106	2 750	0.970	23	25	23	15	17	23	21	20
8	105	2 807	0.981	23	24	22	15	17	22	19	21
9	103	2 984	0.982	23	21	23	18	16	22	19	19

4 结束语

相对于工期、成本以及质量等工程项目目标的优化研究,目前对于工程项目安全性的研究仍不够充分,缺乏对于项目工期、成本等目标与安全性之间联系及相互影响的考虑。本文针对这一不足,在分析每项工序持续时间、完工成本、保证性安全成本与安全水平之间关系的基础上,通过将安全性与系统可靠性理论相结合,推导出工程项目的安全水平指数,并进一步将安全目标引入工期—成本优化模型,构建了工程项目工期—成本—安全水平均衡优化模型。最后结合工程项目实例,利用加入惯性权重的 PSO 算法对模型进行了求解,得到工期、成本与安全水平的一系列 Pareto 解,从而验证了模型的有效性与合理性及其在工程项目安全管理中的实用性。

另外,本文的研究仍存在不足需要进一步完善: a) 工程项目安全水平受到各方面因素的综合影响,文中对于影响工程项目安全水平的因素考虑还不够全面; b) 本文只研究了工程项目工期、成本与安全水平之间的均衡关系,而没有考虑质量、环境影响等其他目标。如何全面地考虑工程项目安全水平的各方面影响因素,并将质量、环境影响等目标同时与安全水平进行综合均衡优化,将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] MITROPOULOS P T, CUPIDO G. The role of production and team-work practices in construction safety: a cognitive model and an empirical case study [J]. *Journal of Safety Research*, 2009, 40(4): 265-275.
- [2] CHENG C W, LEU S S, CHENG Ying-mei, et al. Applying data mining techniques to explore factors contributing to occupational injuries in Taiwan's construction industry [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2012, 48: 214-222.
- [3] HINZE J, PEDERSEN C, FREDLEY J. Identifying root causes of construction injuries [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 1998, 124(1): 67-71.
- [4] FANG Dong-ping, XIE Fang, HUANG Xin-yu. Factors analysis-based studies on construction workplace safety management in China [J]. *International Journal of Project Management*, 2004, 22(1): 43-49.
- [5] YU Jie, LIU Yue. Prioritizing highway safety improvement projects: a multi-criteria model and case study with safetyAnalyst [J]. *Safety Science*, 2012, 50(4): 1085-1092.
- [6] FUNG I W H, TAM V W Y, LO T Y, et al. Developing a risk assessment model for construction safety [J]. *International Journal of Project Management*, 2010, 28(6): 593-600.
- [7] 陆宁, 廖向晖, 王巍, 等. 建设项目安全成本率分析模型 [J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 39(2): 161-164.
- [8] AZARON A, MOGHADDAM R T. Multi-objective time-cost trade-off in dynamic PERT networks using an interactive approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(3): 1186-1200.
- [9] TAREGHIAN H R, TAHERI H. An application of randomized minimum cut to the project time/cost tradeoff problem [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 173(2): 1200-1207.
- [10] GHODSI R, SKANDARI M R, ALLAHVERDILOO M, et al. A new practical model to trade-off time, cost, and quality of a project [J]. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2009, 3(4): 3741-3756.
- [11] WANG W C, LIU J J, CHOU S C. Simulation-based safety evaluation model integrated with network schedule [J]. *Automation in Construction*, 2006, 15(3): 341-354.
- [12] CAPUTO A C, PELAGAGGE P M, PALUMBO M. Economic optimization of industrial safety measures using genetic algorithms [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2011, 24(5): 541-551.
- [13] 彭伟功, 李春光, 杨德钦. 可靠性理论在建筑施工安全领域的应用研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2009, 5(4): 115-119.
- [14] 骆刚, 刘烈烈, 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.
- [15] TAN K C, GOH C K, MAMUN A A, et al. An evolutionary artificial immune system for multi-objective optimization [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187(2): 371-392.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // Proc of the 4th IEEE International Conference on Neural Networks. 1995: 1942-1948.
- [17] SHI Yu-hui, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C] // Proc of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. 1998: 69-73.
- [18] 朱洪程. 基于遗传免疫微粒群算法的工程项目多目标综合优化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [19] 胡建秀, 曾建潮. 微粒群算法中惯性权重的调整策略 [J]. *计算机工程*, 2007, 33(11): 193-195.