

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/286978072>

Resource optimization models and application for complex engineering construction system

Article in *Tianjin Daxue Xuebao (Ziran Kexue yu Gongcheng Jishu Ban)/Journal of Tianjin University Science and Technology* · July 2004

CITATIONS

2

READS

68

4 authors, including:



Mingchao Li

Tianjin University

131 PUBLICATIONS 1,263 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Automatic identification and classification in lithology based on deep learning in rock mineral images [View project](#)



Deformation coordinative mechanism of functionally sectionalized structures of high RCC gravity dams [View project](#)

复杂工程施工系统资源优化模型及其应用*

钟登华, 李明超, 张伟波, 胡程顺

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘 要: 对于复杂工程施工系统, 工期一定、资源均衡的资源进度计划是需要解决的一个重要且有相当难度的问题。首先利用程序实现了在工程实践中运用的两种经典模型, 即削峰填谷模型和最小方差模型, 并对比分析了各自的特点; 然后引入近年发展起来的遗传算法模型, 并加以改进实现。最后将三种模型应用到某大型水电站地下洞室群施工系统资源优化中, 获得了各自的仿真优化计算结果。通过比较分析可知, 遗传算法模型相对最优, 能够很好地满足实际的施工需要, 同时也为此类问题的模型选择提供了依据。

关键词: 施工系统; 资源进度计划; 削峰填谷法; 最小方差法; 遗传算法

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2004)07-0589-06

Resource Optimization Models and Application for Complex Engineering Construction System

ZHONG Deng-hua, LI Ming-chao, ZHANG Wei-bo, HU Cheng-shun

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: For complex engineering construction system, resource scheduling of limited project duration resource leveling is an important and difficult problem. Firstly, two kinds of classical models were realized by programming, i. e. the peak shaving model and the minimum variance model, which had been used widely in practice. And their characters were summarized and contrasted. Next, to obtain a better optimization method, the developing genetic algorithm model was introduced and improved to optimize resource scheduling. Finally, three models were applied to simulating resources leveling of the underground structure group in a practical large-sized hydropower station, and the computational solutions were achieved respectively. The analysis of these results shows that the genetic algorithm model is the best and can satisfy well the demands of practical construction. And, it will also offer good references for model selection of such problems.

Keywords: construction system; resource scheduling; peak shaving; minimum variance; genetic algorithm

用网络计划编制复杂工程的施工进度, 不仅要考虑各个工序的作业时间, 还要考虑各工序之间的各种逻辑关系, 其中包括各种重要资源的转移。这种既考虑技术和时间条件, 又考虑资源条件编制的进度计划, 称之为“资源进度计划”(Resource Scheduling)。

根据工程的实际情况和需要, 资源进度计划主要考虑^[1]: 在工期一定的情况下资源的均衡, 即单位时间内资源强度在整个工期内的最大值最小, 或者其均方差最小; 在资源供应强度有限时, 使工期的延迟最短。此即资源进度计划的优化问题, 由于其复杂性且

在研究中困难较多, 至今仍未完全解决。

在工程实践中, 工期一定、资源均衡是一个重要且有难度的问题。对于该问题人们提出了许多不同的解法, 主要可分为分析方法(数学模型)和启发式方法(经验模型)。在实际工程中广泛应用的是启发式方法, 其着眼点并不在于得到数学含义上的最优解, 而是在一定范围内的满意解, 对于复杂工程施工问题, 其接近最优解已足够满足实际需要。

大型水电工程的地下洞室群是一个复杂的施工系统。在施工过程中, 地下洞室纵横交错, 布置密集, 高

* 收稿日期: 2003-03-03; 修回日期: 2003-07-01。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50179023); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目(200166)。

作者简介: 钟登华(1963—), 男, 博士, 教授。

差大,施工通道少,使得各工序配合,相互干扰,错综复杂,各时段的资源强度相差很大.如果不进行系统资源均衡优化,则有可能造成抢工或窝工现象,也有可能造成材料供应脱节或过剩积压等,影响施工的顺利进行,造成人力、物力和财力的不必要浪费.

从实际出发,结合作者提出的全过程动态仿真技术^[2],对施工系统整个资源进度计划进行仿真与优化,如图 1 所示.选择模型进行优化是其中的核心,优化模型包括两种,启发式模型即削峰填谷模型和最小方差模型,以及近年发展起来的遗传算法模型.结合实际工程编制了相应的程序,并分别加以改进.

1 两种启发式模型

1.1 削峰填谷模型

采用削峰填谷法实现资源均衡,是着眼于资源动态曲线的强度最大值,通过调整处于最大资源强度时段内部分工序的开工时间,达到逐步降低最大资源强

度和减少动态曲线波动的目的.该模型实现系统资源优化的流程如图 2 所示.其中工序的优先推迟规则

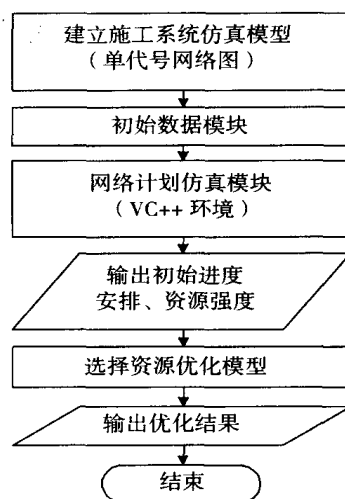


图 1 资源优化整体结构

Fig. 1 Structure chart of resource optimization

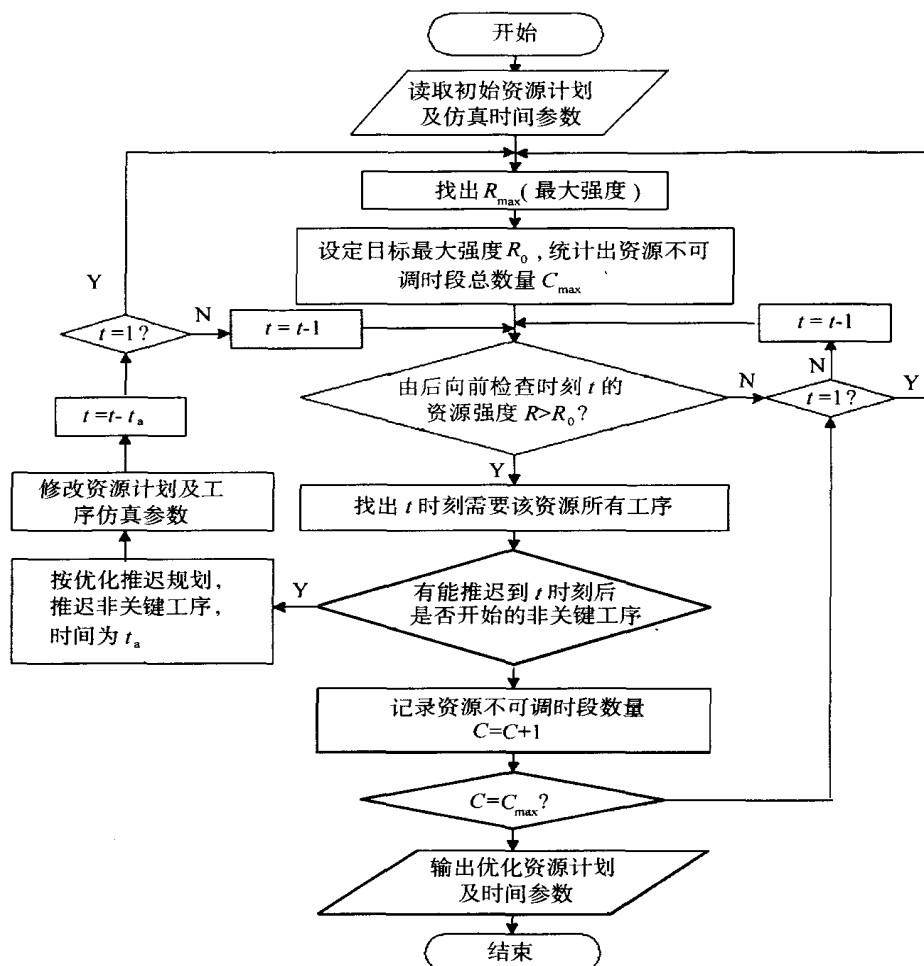


图 2 削峰填谷模型资源优化流程

Fig. 2 Flow chart of peak shaving optimization model

为:优先推迟资源强度小的活动;在资源强度相同的情况下,优先推迟可调时差大的活动。

削峰填谷模型从整个资源工期内找出强度最大时段逐次调整,最大强度值逐步降低,且一般每次的最大强度时段是变化的,因此它是一种从总体上动态调整的方法。可以证明^[3],调整过程中随着最大强度值的降低,动态曲线的方差是减少的,动态曲线随 R_{\max} 减小而变得均匀。

1.2 最小方差模型

用方差指标来评价工程施工系统资源均衡程度,方差值越小,其均衡程度越好。对于一个工程,设 $R(t)$ 为 t 时刻资源强度量, T 为该工程的施工工期, R_m 为资源强度量的平均值,则有

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [R(t) - R_m]^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R^2(t) - R_m^2$$

可知在工期一定和工作效率不变的情况下, T 和 R_m 为常数,要使方差最小,只需使 $\sum_{t=1}^T R^2(t)$ 最小即可。

利用最小方差模型进行施工系统资源优化调整的步骤如图 3 所示。

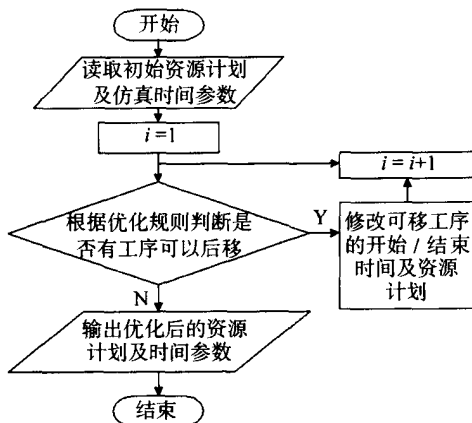


图 3 最小方差模型优化步骤

Fig. 3 Procedure of minimum variance optimization model

其中优化规则设计如下:

1) 从仿真模型的最终工序开始,按由后向前的顺序,逐步考虑各工序的后移问题,一直到仿真模型的最初始工序为止;

2) 在以同一工序为紧后工序的诸工序中,根据其开始时间进行后移判断(先后移开始时间迟的工序);

3) 每个工序能否后移以及后移几天,可由后移条件判定式决定,亦即如果工序 k 可后移 x 天 (x 不能超

过其总时差), $D(k)$ 为工序 k 的持续时间,则当 $x = D(k)$ 时,有

$$\begin{aligned} & [R(t_2 + 1) - R(t_1) + r_k] + \\ & [R(t_2 + 2) - R(t_1 + 1) + r_k] + \dots + \\ & [R(t_2 + x) - R(t_1 + x - 1) + r_k] = 0 \end{aligned}$$

当 $x > D(k)$ 时,有

$$\begin{aligned} & [R(t_1 + x) - R(t_1) + r_k] + \\ & [R(t_1 + x + 1) - R(t_1 + 1) + r_k] + \dots + \\ & [R(t_1 + x + D - 1) - R(t_1 + D - 1) + r_k] = 0 \end{aligned}$$

4) 时差限制 ——这里的时差限制既不是指总时差,也不是指自由时差,而是自己定义的可调时差,即紧后工序的开始时间与该工序的结束时间之差,亦即自由时差 - 可调时差 = 总时差。

1.3 两种模型特点分析

在实际工程施工系统资源优化中,上述两种模型研究和应用比较广泛,它们分别具有各自的特点。

1) 最小方差模型的调整过程着眼于单个工序在总时差范围内的调整;削峰填谷模型则总是从整个工程工期内寻找资源最大强度来进行调整。而实际网络计划中工序间是相互制约的,一个工序的总时差并不为本工序“私有”,而是与它相关路线上有关工序所共享,从这方面考虑,削峰填谷法显得较为合理。

2) 最小方差模型直接以方差指标最小为目标逐步调整各个工序,这样就使得最大资源强度不能在尽可能的范围内减少,资源动态曲线的均匀性未能取得预期效果。对于许多工程来说,降低其最大资源强度是工程设计和可行性研究中一个很重要的目标。削峰填谷模型正是为了满足工程的这一要求而设计的,而且它在降低最大资源强度的同时,也减小了资源动态曲线的方差值,因而更多地应用于工程实践当中。

3) 两种模型都属于解决资源均衡问题的启发式模型,没有从实质上解决“在工序的先后次序约束和有限资源约束条件下的优化问题”。对于复杂的实际工程,两种方法都只能获得较优解。

由此看出,相对而言削峰填谷模型比最小方差模型更为实用,但是对于工序繁多的复杂工程,削峰填谷模型的计算过程比较复杂,而且得到的近似最优解也有一定的误差。下面提出了基于遗传算法的资源优化方法,可以得到更接近最优的进度计划。

2 遗传算法模型

2.1 模型设计

现有的研究表明^[4~8],遗传算法应用于资源进度

计划优化问题是可行的,尤其是在工程越复杂、网络计划可调整余地越大时有明显的优势.基于全过程动态

仿真思想^[2]所设计的遗传算法模型优化施工系统网络资源进度计划的过程如图 4 所示.

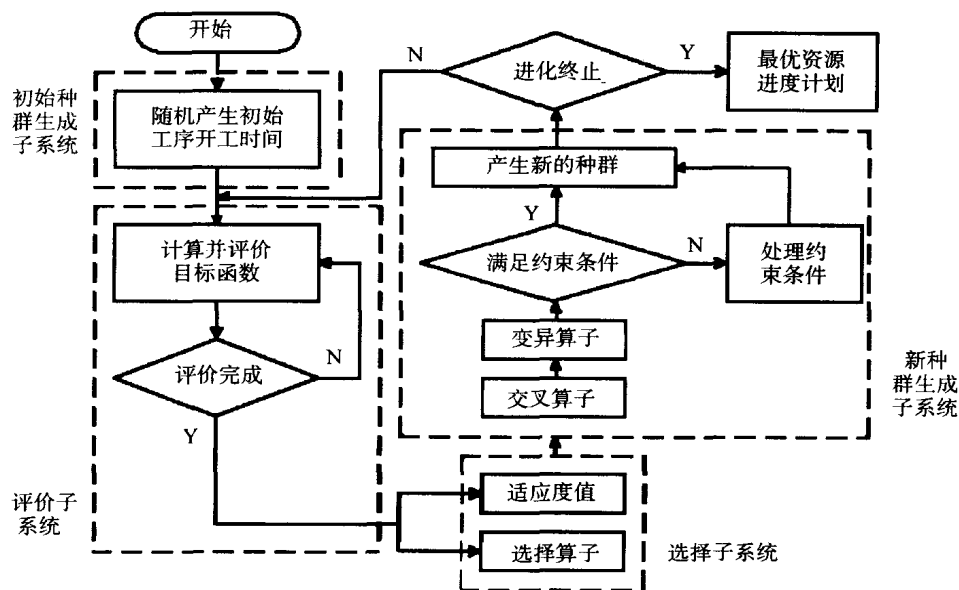


图 4 资源进度计划优化的遗传算法模型

Fig. 4 Genetic algorithm model for resource optimization

图 4 所示的遗传算法模型,由初始种群生成子系统、新种群生成子系统、评价子系统和选择子系统组成,它们各有自己的作用.初始种群子系统根据每个基因的定义域随机产生其开工时间,为遗传操作做准备;评价子系统通过目标函数或其转化形式对所产生的种群进行客观的计算评价,供选择子系统通过赌盘轮转法则进行选择;在新种群生成子系统中,通过对选择得来的染色体进行交叉、变异操作和约束条件的处理,生成可行的染色体串,从而得到新一代的种群,进入到新一轮的循环中,直到进化终止,获得最优或接近最优的资源进度计划.

2.2 模型的实现过程

在建立遗传算法的最优资源进度计划模型后主要工作在于完成模型的实现过程.

1) 在确定初始计划的时间参数和每道工序资源强度值的条件下,以施工期内资源强度方差最小为目标,将工期一定和各工序的紧前紧后关系等作为约束条件,建立问题的数学模型为

$$\min F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R(t) - R_m)^2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T R^2(t) - R_m^2$$

s. t.

$$\begin{cases} R(t) = \sum_{i=1}^N R_i(t) \\ R_i(t) = \begin{cases} R_i & T_s(i) \leq t < T_s(i) + T(i) \\ 0 & t < T_s(i), t > T_s(i) + T(i) \end{cases} \\ \max \{ T_s(i) + T(i) \} \leq T_s(j) \\ T_e(i) \leq T_s(i) \leq T_l(i) \end{cases}$$

式中: R_i 表示 i 工序的统计时间资源强度; $T_e(i)$ 表示 i 工序的最早可能开工时间; $T_l(i)$ 表示 i 工序的最迟必须开工时间; $T_s(i)$ 表示 i 工序的实际开工时间; $T(i)$ 表示 i 工序的持续时间; j 为 i 工序的紧后工序编号; N 为工序总数.

2) 数学模型建立之后,就要进行资源优化的遗传算法设计,即通常意义下的染色体结构、编码设计和遗传操作等.

基因表达,包含染色体结构组成和编码两部分内容.在染色体结构中,以每个工序的实际开工时间作为变量,并占用一个单元形成一个基因,然后按照工序编号顺序将所有基因排列成一行,形成染色体串.由于复杂工程资源优化问题涉及到上百个工序数的网络计划,若采用二进制编码会使得染色体串很长,还存

在计算精度不高的缺陷,于是考虑采用实数编码,它能使染色体串短和计算直接高效的优点^[8,9]。因此,染色体中的每一个基因就代表一个参数,基因值就是相应工序的实际开工时间,其上下界分别是相应工序的最早开工时间和最迟必须开工时间。

遗传操作运算,选择操作采用基于排名的选择。对于实数编码方法,交叉和变异操作运算方式可以分为传统运算、算术运算和基于方向的运算^[9,10]。因此,交叉操作采用了简单交叉、算术交叉和启发式交叉三种方式;变异操作选用均匀变异和非均匀变异。

3) 约束条件的处理。对于建立的数学模型,为了充分利用问题本身的启发式信息,将资源约束方程分为基本约束和属性约束两类^[7]。基本约束是指标志变量定义域范围的约束,而属性约束则定义在基本约束集上,反映变量间制约关系的约束。从基本约束出发,设计编码范围,并产生随机个体的种群,进行遗传进化,然后对产生的子个体进行判别,对不满足属性约束的个体采用修复策略加以处理,以保证种群中的个体都能满足给定的约束条件。修复程序的设计很简单,即对所有工序逐一判断,看其是否满足约束条件 $\max \{T_s(i) + T(i)\} \leq T_s(j)$, 如果不满足,则强行改变 $T_s(i)$ 使等号成立。

3 模型应用对比分析

以某大型水电站地下洞室群施工系统作为工程应用实例进行研究。该系统的施工网络进度计划图(施工全过程动态可视化仿真模型)可参见文献^[11]。由于工程的复杂性,网络计划共包含 122 个工序活动,工期长达 2 061 天,月最大施工资源强度 $1.45 \times 10^5 \text{ m}^3$,有必要对资源进度计划进行优化计算,使施工顺序合理、经济。下面采用削峰填谷法、最小方差法和遗传算法三种模型分别对系统进行资源优化仿真计算,并对其计算结果进行对比分析。

3.1 仿真优化计算结果

根据对工程施工系统进行动态仿真的结果,从中取得各个工序活动的持续时间、资源强度值、最早开工时间、最迟开工时间和紧前紧后关系,分别采用削峰填谷、最小方差和遗传算法模型进行仿真优化计算。其中削峰填谷模型的目标最大强度值为原最大值的 97%;遗传算法种群规模为 20,进化代数数为 200。初始资源强度及三种模型优化后按月统计的资源强度柱状图如图 5 所示,其中横纵坐标 S_m 和 S_{Ri} 分别表示统计

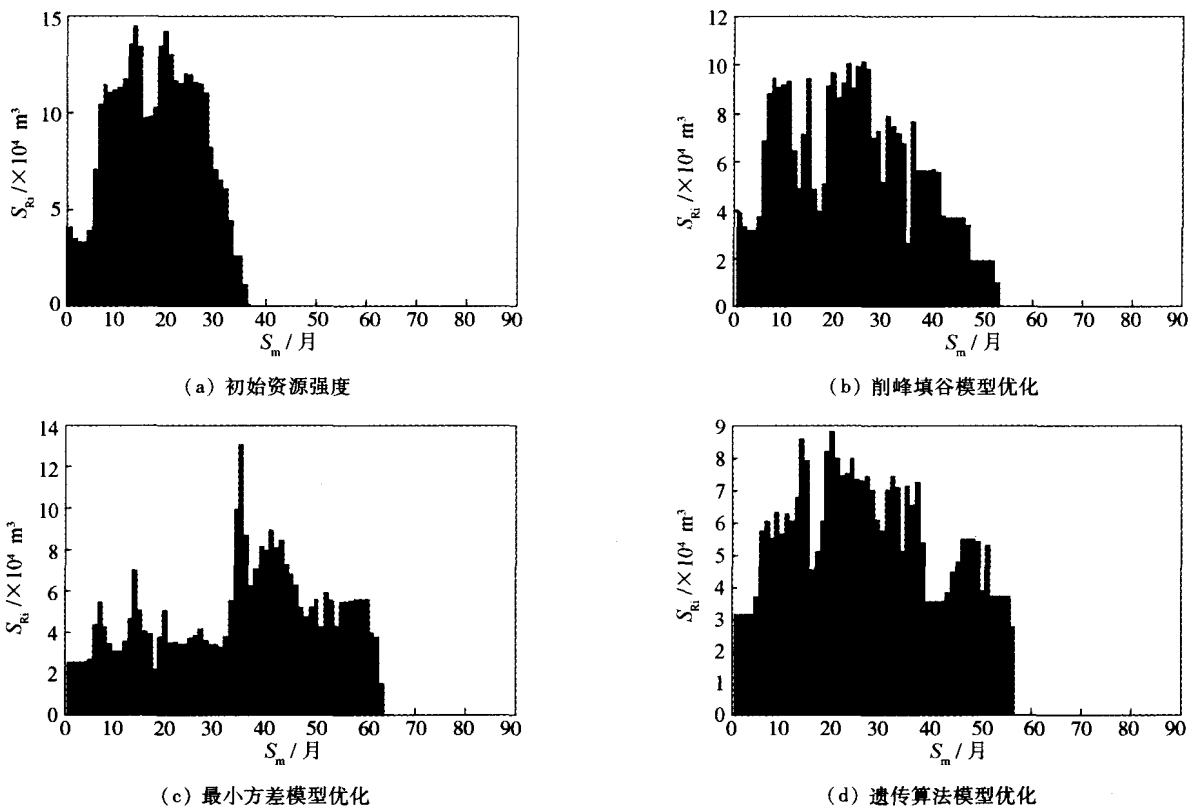


图 5 施工系统初始资源强度及优化结果

Fig. 5 Initial resource intensity and optimization results of construction system

月份数和统计资源强度值.

3.2 结果的对比分析

为了比较这三种方法的优劣,选取计算结果中的资源强度分布总方差和最大强度值作为指标来综合考虑,其中方差为最小方差和遗传算法的模型目标,最大强度值为削峰填谷的模型目标.这两个指标同时也是实际工程施工中很重要的因素,本实例的资源强度总方差及月最大强度值对比情况见表 1.

表 1 资源总方差及最大强度值的对比

Tab. 1 Comparison of resource total variance and maximum intensity

模型	资源总方差	最大强度值 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{月}^{-1}$)
初始计划	416.6	14.53
削峰填谷模型	199.8	10.09
最小方差模型	147.5	13.15
遗传算法模型	149.3	8.86

从表 1 的对比结果可以看出,最小方差法的总方差最小,将初始计划的总方差降低了 64.6%,其次为遗传算法的总方差,仅超过最小值的 1.2%;而资源强度最大值最低的为遗传算法,它将最大强度值从 $1.45 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{月}$ 降低为 $8.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{月}$,仅为初始值的 61.0%,其次为削峰填谷法的 $1.01 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{月}$.

结合以上数据,对照图 5 可以看出,遗传算法的资源优化结果是最好的.虽然最小方差法的总方差更小,但是它只是在局部将资源强度更加均衡化,其最大强度值并没有降下来,比初始值仅降低了 9.5%,这在实际施工过程中往往并不可行,而遗传算法优化结果的整体均衡性显然强于它.对于削峰填谷法,其优化结果与目标最大强度值的选取有很大的关系,这与工程实际需要有关,在很大程度上依据经验选取.虽然在本实例中其优化结果并不十分理想,误差较大,但可以根据实际情况灵活变化,这是它的一个优点.

4 结 语

综合以上内容,针对应用实例的优化结果,可以明确地判断遗传算法模型要优于削峰填谷模型和最小方差模型,因为它不仅资源最大强度值最低,而且方差目标也很好.通过改变遗传算法的操作算子和某些系

统参数,可以得到许多组不同的接近最优解,可以为施工决策提供更多的依据.而另外两种启发式模型分别只能得到一组近似最优解.这为以后类似问题的模型选择提供了一定的依据.

参考文献:

- [1] Cao Jiming, Xu Wei. *Network Planning Technique and Construction Management Planning* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2000, 115—122 (in Chinese).
- [2] Zhong Denghua, Li Jingru, Liu Kuijian. Dynamic simulation technique for whole construction processes and its application to large scale construction project [J]. *J of Tianjin University*, 2003, 36(3): 347—352 (in Chinese).
- [3] Zhang Weibo. Research on system simulation theory and application for construction process of large scale underground structure group [D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2002, 55—56 (in Chinese).
- [4] Chan Weng-Tat, Chua Daviad K H, Kannan Govindom. Construction resource scheduling with genetic algorithms [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 1996, 122(2): 125—132.
- [5] Leu Sour-Sen, Yang Chung-Huei. GA-based multicriteria optimal model for construction scheduling [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, ASCE, 1999, 125(6): 420—427.
- [6] Leu Sour-Sen, Hung Tzung-Heng. A genetic algorithm based optimal resource-constrained scheduling simulation model [J]. *Construction Management and Economics*, 2002, 20(2): 131—141.
- [7] Tian Jun, Kou Jisong, Li Minqiang. Using genetic algorithms to optimize the resources in arrow network techniques [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1999, 19(5): 78—82 (in Chinese).
- [8] Zhang Lianying, Luo Gang, Lu Lining. Genetic algorithms in resource optimization of construction project [J]. *J of Tianjin University*, 2001, 34(2): 188—192 (in Chinese).
- [9] Gen M, Cheng R. *Genetic Algorithms and Engineering Design* [M]. Translated by Wang Dingwei and Tang Jiafu. Beijing: Science Press, 2000, 235—243.
- [10] Chen Guoliang, Wang Xufa, Zhuang Zhenquan, et al. *Genetic Algorithms and Their Application* [M]. Beijing: Post and Telecom Press, 1996, 28—97 (in Chinese).
- [11] Zhong Denghua, Zheng Jiaying, Liu Donghai, et al. *Theory and Application of Visual Simulation* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2002, 32—67 (in Chinese).