

High-Strength Concrete Proportioning Optimization Based on Nonlinear Programming Particle Swarm Optimization Algorithm

Yunyi Wang Tao Zhu

Henan University, Kaifeng, Henan, 475000, China

Abstract

In this paper, an improved particle swarm optimization algorithm is used to optimize the mix proportion of high-strength concrete. Penalty function method is used to deal with the constraint conditions, so that the algorithm can adapt to the more difficult nonlinear constrained optimization problem. According to the previous experience, the paper summarizes the relevant variables of the design concrete ratio and the corresponding value range, uses the independent variables to describe the requirements of each index of high-strength concrete, and establishes the optimization model of high-strength concrete ratio. The optimization results show that the concrete cost is 194 yuan, the standard deviation is 0.5026, and the stability of the algorithm is high. Compared with the original, the material cost of the optimized concrete is reduced by 6.41%. While meeting the strength and performance requirements of concrete, its fitness is reduced from 210.1 to 196.2, which indicates that the optimized ratio is more reasonable.

Keywords

high-strength; concrete mix proportion; particle swarm optimization; nonlinear constraint optimization

基于非线性规划粒子群算法的高强混凝土配比优化

王云艺 朱涛

河南大学, 中国·河南 开封 475000

摘要

论文利用一种改进的粒子群算法对高强混凝土的配合比进行优化设计, 采用了罚函数法对约束条件进行处理, 使算法能适应较难的非线性约束优化问题的求解。根据以往的经验, 总结出设计混凝土配比的相关的变量还有对应的取值范围, 使用自变量对高强混凝土各项指标的要求进行数学描述, 建立了高强混凝土配比优化模型。优化结果表明混凝土成本最为 194 元, 标准差为 0.5026, 算法的稳定性较高。优化后的混凝土材料成本与原先相比降低了 6.41%, 在满足混凝土的强度和各项性能要求的同时, 其适应度从原先的 210.1 降低为 196.2, 说明优化后的配比与原先相比更加合理。

关键词

高强混凝土; 配合比; 粒子群算法; 非线性约束优化

1 引言

高强混凝土通常是指以通用水泥和砂石为原料, 通过掺加矿物质细粉和高效减水剂, 在经过常规制造工艺和硬化之后, 其强度等级不小于 C60 的混凝土。既保证了混凝土结构所要求的各项力学性能, 又具有一定的耐久性。当前, 许多国家都对高强混凝土提高重视, 积极进行开发和研究。随着现代建筑规模的扩大和结构的复杂化, 人们对高强混凝土材

料的性能要求进一步提升。在配制高强混凝土的过程中, 其配合比的优劣直接影响到混凝土成品的质量以及造价的高低。因此优化高强混凝土的配合比成为人们在混凝土配合比设计中的一个重要课题。

近年来, 随着计算机技术迅速发展, 粒子群算法得到广泛运用。特别是在计算多变量以及非线性问题的最优解方面能力较强, 为混凝土配合比优化设计问题开辟了一个新思路。对于传统的粒子群算法在求解有约束最优化问题方面的不足, 论文主要使用一种新型的粒子群算法, 通过采用罚函数的方法对约束条件进行转化, 以达到求解目的。

【作者简介】王云艺 (1990-), 男, 河南大学大三在校学生, 从事土木工程方面的研究。

2 非线性规划粒子群算法

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 属于群智能算法的一种, 该算法通过模拟鸟群的捕食行为, 利用鸟群中的信息交流和相互协作的行为作为求解优化问题的启发。类似于遗传算法, 该算法也是通过群体迭代来寻找最优解, 但与遗传算法不同, 粒子群算法中并没有交叉和变异等过程, 而是通过整个粒子群内的信息交流在解空间中进行搜索。PSO 算法容易实现、参数少以及无需梯度信息, 其实数编码的特点对实优化问题的处理非常合适^[1]。同时又有深刻的智能背景, 既适合科学研究, 又特别适合工程应用。

2.1 粒子群算法

粒子群算法中使用一种无质量的粒子来表示鸟群中的鸟。每个粒子都有对应的位置和速度, 在解的可行域中搜寻最优解, 并将其记为当前个体的最优解。通过将个体最优解与其他粒子共享, 就可以找到整个粒子群的当前全局最优解^[2]。粒子群中的所有粒子再根据自己当前的速度位置、自己的当前个体最优解以及全局最优解来更新下一时刻的速度和位置。粒子群算法的主要步骤相对简单, 包括初始化粒子群、计算粒子的适应度、寻找个体最优解、寻找全局最优解、迭代粒子的速度和位置。图 1 是程序的流程图。

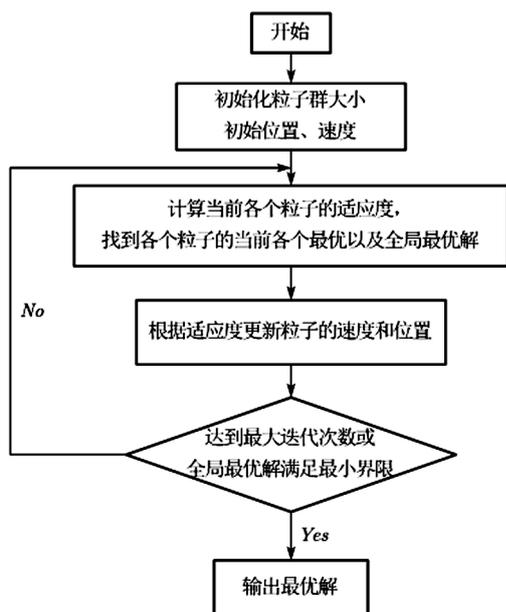


图 1 粒子群算法流程图

(1) 初始化粒子群

首先, 设置初始粒子的种群大小。同时需要设置最大的速度区间以防粒子超出最大的区间。随后在搜索空间和速度

区间上随机设置粒子的初始位置 x_i^d 和速度 v_i^d 。

(2) 个体最优解与全局最优解

个体最优解为每个粒子找到的历史上最优的位置, 记为 $pbest_i^d$ 。并将所有的个体最优解进行比较, 从中找出全局最优解。最后与历史最优解比较并更新当前的历史最优解, 记为 $gbest^d$ 。

(3) 更新速度和位置的公式

根据个体最优解、全局最优解以及粒子自身的速度和位置更新下一次迭代时粒子的速度和位置, 更新公式为:

$$v_i^d = wv_i^{d-1} + c_1r_1(pbest_i^d - x_i^d) + c_2r_2(gbest^d - x_i^d)$$

$$x_i^{d+1} = x_i^d + v_i^d$$

其中, r_1 和 r_2 为 [0,1] 上的随机数; c_1 为粒子的个体学习因子; c_2 为粒子的社会学习因子; w 为速度的惯性权重; $f(x)$ 为在位置 x 时的适应度值。

(4) 判断是否满足终止条件

粒子群算法的终止条件主要有两种: 一是最大迭代数; 二是最优值在一定迭代次数后的变化在一个指定的范围内即停止。论文选择的是第二种。当满足该条件时, 程序跳出循环^[3]。

2.2 约束条件处理机制

传统的粒子群算法无法对有约束条件的问题进行求解。有文献^[6,7]在传统粒子群算法上提出了一种方便可行的解决方法: 在适应度函数的基础上构造罚函数, 对超出约束条件的解进行惩罚, 以达到将有约束的优化问题转化为无约束的优化问题的目的。一般情况下, 非线性约束优化问题 (最小值) 可以表述为:

$$\min f(X)$$

$$s.t. \begin{cases} g_i(X) > 0, & i = 1, \dots, m \\ h_j(X) = 0, & j = 1, \dots, q \\ X_k^{lb} \leq X_k \leq X_k^{ub}, & k = 1, \dots, n \end{cases}$$

其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ 是 n 维向量, $f(X)$ 为优化目标函数, $g_i(X)$ 表示第 j 个不等式约束, $h_p(X)$ 表示第 p 个等式约束, 变量 x_i 的取值范围为 $[x_i^{lb}, x_i^{ub}]$ 。

$S = \prod_{i=1}^n [x_i^{lb}, x_i^{ub}]$ 表示搜索空间, S 中所有满足约束条件的可行解构成的可行域记为 F , 满足 $F \subseteq S$ 。

参考吴茜等人^[5]的做法, 论文采取将等式约束通过式转化为不等式约束:

$$|h_j(X)| - \delta \leq 0$$

其中 δ 为一个较小的正数。这样通过转化可以在算法中只留下不等式约束。再通过添加罚函数的方法, 对超出约束条件的解进行惩罚, 可以将适应度函数做如下修改:

$$F_{fit} = \begin{cases} f(X), & X \in F \\ \max(g_i(X), |h_j(X)| - \delta) + N, & X \notin F \end{cases}$$

其中 N 是一个很大的正数。当粒子处于非可行解区域时, 其当前解的值对于粒子下一步速度和位置的迭代没有参考价值, 因为其当前的解并不属于解的可行域。但是该粒子所处的位置, 即粒子到可行解区域 F 的距离能有效地引导粒子飞向解的可行域 F 以及在两个粒子进行比较时带来更多的决策信息。以上对约束处理的方法本质是使算法更倾向于在解的可行域范围内搜索。

3 高强混凝土配比优化模型

在工程上, 根据实际情况对高强混凝土配合比进行优化设计过程中, 根据不同的实际需要来选择相应的优化目标能从最大的程度上满足工程的要求。论文主要考虑在满足混凝土各项性能的情况下, 使混凝土的制造成本最低。

3.1 目标函数

混凝土主要由 6 种材料组成: 水泥、水、砂、石、超细粉掺合料以及外加剂。分别用 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 表示各种组分的用量, 用 $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6$ 表示各组分对应的价格, 因而该混凝土材料费用可以通过下式进行计算:

$$f = \sum_{i=1}^6 x_i y_i$$

式即为需要优化的目标函数。保持各组分的单价不变, 计算既满足混凝土强度设计要求, 又能使费用最低的材料用量。

3.2 约束条件

高性能混凝土配比设计是一个复杂的过程, 并没有统一的规范。选择合适的原材料, 优化配比参数, 或是根据合理

的性能——配比参数关系模型, 有目的地进行少量的试配, 然后由试配结果使关系模型中的参数具体化, 便是高性能混凝土配比设计的合理途径^[4]。在实际工程中, 混凝土的塌落度、强度以及各项性能等都是混凝土配比设计需要参考的指标。

3.2.1 混凝土材料用量约束

一般情况下, 在设计高性能混凝土配合比时应遵循如下基本规定:

①矿物掺和料掺量不宜小于胶凝材料总量的 20%, 不宜大于 40%。

② C30 及以下混凝土的胶凝材料总量不宜高于 400kg/m³, C35-C40 混凝土不宜高于 450kg/m³, C50 及以上混凝土不宜高于 500kg/m³。

③配制高性能混凝土要使用强度等级为 42.5 以上的硅酸盐水泥, 细度合适、与所用高效减水剂相容性好^[4]。

④使用一级或者二级优质粉煤灰, 掺量一般为水泥用量的 15%~30%。

⑤胶凝材料用量为 300~500kg/m³。

⑥石子的最大粒径宜 ≤ 25 mm。

⑦砂子采用中砂, 细度模数一般为 2.8~3.0, 砂率为 36%~40%。

⑧坍落度 ≥ 180 mm 时, 应通过高效减水剂来控制, 掺量一般为水泥用量的 0.8%~1.4%^[4]。

⑨水胶比一般为 0.25~0.40。

3.2.2 高强混凝土强度约束

工程上, 混凝土的试配强度可以用以下两个式子进行估算:

$$R_h = R_0 + 1.645\sigma_0$$

$$R_h = A \cdot R_c \cdot \left(\frac{C + F}{W} - B \right)$$

式中, R_h 为混凝土的试配强度; R_0 为混凝土的设计强度; σ_0 为混凝土强度标准差。式中, R_c 表示水泥的实际强度 (单位 MPa); $\frac{C + F}{W}$ 表示混凝土的水胶比; A 、 B 为

常系数, 当缺乏 A 、 B 的试验系数时, 可按下列数值取用: 当采用碎石时, $A=0.46$, $B=0.52$; 当采用卵石时, $A=0.48$,

$B=0.61$ (仅使用与骨料为干燥状态)。

将方程、联立可得:

$$\frac{R_0 + 1.645\sigma_0}{A \cdot R_c} + B = \frac{C + F}{W}$$

可以看出式将强度用水胶比来表示, 则满足强度要求时:

$$\frac{R_0 + 1.645\sigma_0}{A \cdot R_c} + B \leq \frac{C + F}{W}$$

3.2.3 材料总体积约束

由于是计算 1m³ 混凝土的各组分用量, 所有组分的总体积不会发生改变:

$$\sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_i}{\rho_i} \right) + 10\alpha - 1000 = 0$$

式中, ρ_i 表示各个材料密度; α 表示混凝土的含气量, 不加引气剂时, 取 $\alpha = 1$ 。

3.3 约束条件关系转化

综合上述所有约束条件, 并将其表示为变量之间的关系列于下表。

表 1 约束条件汇总

序号	约束类型	取值范围约束条件
1	各原材料用量范围	$x_i = [a_i, b_i], i = 1, 2, \dots, 6$
2	水胶比	$0.25 < \frac{x_2}{x_1 + x_2} < 0.40$
3	砂率	$0.36 < \frac{x_3}{x_3 + x_4} < 0.40$
4	胶凝材料用量	$300 < x_1 + x_5 < 500$
5	外加剂与水泥用量之比	$0.008 < \frac{x_6}{x_1} < 0.014$
6	粉煤灰与水泥用量之比	$0.15 < \frac{x_5}{x_1} < 0.30$
7	保持各原材料总体积固定	$\sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_i}{\rho_i} \right) + 10\alpha - 1000 = 0$
8	混凝土强度约束	$\frac{R_0 + 1.645\sigma_0}{0.46R_c} + 0.52 \leq \frac{x_1 + x_2}{x_2}$

注: 表 1 中 a_i, b_i 均为常数, 表示材料用量的上限和下限。

4 工程实例

以郑西铁路客运专线渭南渭河特大桥工程为例, 该工程要求混凝土强度等级高于 C60, 工程用水为洁净井水。该工程混凝土所需原料水泥为普通硅酸盐 PO42.5 低碱水泥; 矿物掺合料采用陕西华西电力科技环保有限公司粉煤灰; 粗

骨料采用 5~31.5mm 连续级配碎石; 细骨料采用细度模数为 2.3~3.0 的中砂, 含泥量小于 2.0%; 外加剂采用山西黄腾化工有限公司聚羧酸高效减水剂。

该工程选用的混凝土基准配合比为: 水泥 228kg、水 152kg、砂 804kg、碎石 1066kg、粉煤灰 152kg、外加剂 4.94kg。接下来通过粒子群算法对该工程的高强混凝土配比进行优化。根据以往高强混凝土配比设计的经验, 表 2 列出高强混凝土组成的用量范围、密度以及目前市面上每种材料的价格。

表 2 混凝土原料配比取值范围

组分	用量符号	用量范围 /kg	密度 (kg/m ³)	价格 / (元 /kg)
水泥	x_1	255~445	3100	0.355
水	x_2	135~205	1000	0.002
砂	x_3	510~990	1589	0.060
石	x_4	990~1450	2684	0.040
粉煤灰	x_5	105~245	2120	0.006
外加剂	x_6	2~6	/	7.000

设置粒子种群数为 100, 最大的迭代次数 10000, 最大停滞迭代数 60。将程序运行 20 次, 其计算得到的混凝土成本最低为 194 元, 将这 20 次计算结果数据进行统计, 算得标准差为 0.5026, 说明该算法的稳定性较高。图 2 为优化前后配合比参数和性能。从图 2 可以看出, 与优化前相比, 在经过优化后, 混凝土材料成本降低了 6.41%, 在满足混凝土的坍落度和强度要求的同时, 其适应度从原先的 210.1 降低为 196.2, 说明优化后的配比与原先相比更加合理。

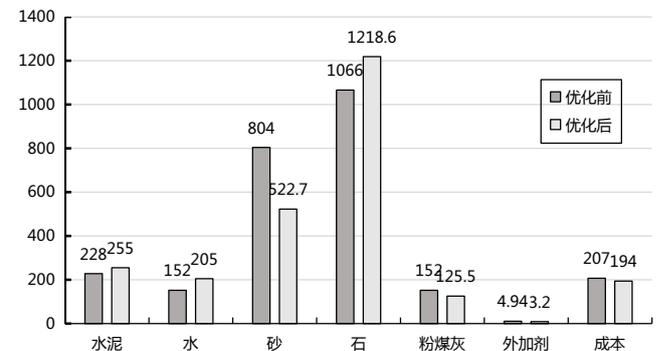


图 2 优化前后混凝土配合比对比

5 结语

论文主要研究了非线性规划的粒子群算法在混凝土配比优化设计方面的应用。以制造成本为目标函数, 以满足

高强混凝土的各项性能指标为约束条件建立高强混凝土配比优化模型。采用一种改进的粒子群算法对非线性规划的优化问题进行求解,在原适应度函数的基础上添加罚函数的方法对约束条件进行转化而达到求解目的。优化后的混凝土制造成本为194元,与优化前相比降低了6.41%,标准差为0.5026,算法的稳定性较高。优化结果表明,在满足混凝土的坍落度、强度以及各种性能的条件下,该优化设计可降低混凝土制造成本,具有较好的工程应用前景。说明了粒子群算法在混凝土配合比优化设计中应用的可行性,尤其可以对没有经验积累时的混凝土配比设计提供较大参考价值。粒子群算法在混凝土配合比的优化设计中还有很大的发展潜力,在未来的研究中将会有很大的应用前景。

参考文献

- [1] 张士刚. 基于 MATLAB 语言的多目标优化抗裂混凝土配合比设计研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [2] 孟洁平, 林金娜, 焦俊婷, 等. 高强混凝土配合比的遗传算法设计研究 [J]. 混凝土, 2017(10): 52-55.
- [3] 张清山. 铁路客运专线桥梁桩基高性能混凝土配合比示例 [J]. 商业文化 (学术版), 2009(01): 158-159.
- [4] 李高峰, 刘翠兰, 王伟. 基于遗传算法的粉煤灰高性能混凝土配合比优化设计 [A]. 全国高强与高性能混凝土及其应用专题研讨会论文集 [C]. 中国土木工程学会高强与高性能混凝土委员会, 浙江大学建筑工程学院, 2005.
- [5] 吴茜, 郑金华, 宋武. 改进的粒子群算法求解非线性约束优化问题 [J]. 计算机工程与应用, 2007(24): 61-64.
- [6] X. Hu, and R. Eberhart. Solving constrained nonlinear optimization problems with particle swarm optimization. 6th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, USA, 2002.
- [7] Parsopoulos K E, Vrahatis M N. Particle Swarm Optimization Method for Constrained Optimization Problems [M]. Intelligent Technologies Theory and Applications: New Trends in Intelligent Technologies. CiteSeer, 2002.