

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.02.002

# 混凝土配合比自动优化程序设计

涂 驰<sup>1</sup>, 钱兆燕<sup>2</sup>, 陈晓红<sup>3</sup>, 沈慧琴<sup>4</sup>, 李 锋<sup>4</sup>, 高 琳<sup>1</sup>, 郑俊星<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 绍兴市交通运输局, 浙江 绍兴 312000;  
3. 绍兴市建设工程质量安全管理中心, 浙江 绍兴 312000; 4. 绍兴市科技产业投资有限公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:** 传统的混凝土配合比设计方法存在繁琐、耗时和资源浪费等问题, 而随着计算机科学和优化算法的发展, 计算机辅助设计混凝土配合比成为该领域的研究热点。因此, 以毒蛛曲线为基础, 采用优化组合集料方法设计了一种新的混凝土配合比优化计算程序。该程序基于“水泥浆体积与组合集料空隙体积之比的混凝土配合比设计方法”, 并集成了混凝土配合比优化相关文献。在设计过程中, 采用模块化程序设计方法, 以提高程序的易读性和可维护性, 同时使程序设计更加简单、直观, 实现了程序的智能化和实用性。

**关键词:** 混凝土配合比; 自动优化程序; 模块; 级配曲线

**中图分类号:** TU528.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2024)02-0007-07

**引文格式:** 涂 驰, 钱兆燕, 陈晓红, 等. 混凝土配合比自动优化程序设计 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(2): 7-13.

## An Automatic Optimization Program Design for Concrete Mix Ratios

TU Chi<sup>1</sup>, QIAN Zhaoyan<sup>2</sup>, CHEN Xiaohong<sup>3</sup>, SHEN Huiqin<sup>4</sup>, LI Feng<sup>4</sup>, GAO Lin<sup>1</sup>, ZHENG Junxing<sup>1</sup>

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Shaoxing Transportation Bureau, Shaoxing Zhejiang 312000, China;  
3. Shaoxing Construction Engineering Quality and Safety Management Center, Shaoxing Zhejiang 312000, China;  
4. Shaoxing Science and Technology Industry Investment Co., LTD., Shaoxing Zhejiang 312000, China)

**Abstract:** Due to the fact that traditional concrete mix design methods are characterized with such flaws as process complexity, time consumption, and resource waste, a computer-aided design of concrete mix proportions has become a research hotspot in this field with the development of computer science and optimization algorithms. Therefore, based on the spider curves, a novel concrete mix ratio optimization calculation program has thus been designed using the optimized combination aggregate method. The proposed program is rooted in “the concrete mix design method of the cement slurry volume ratio to aggregate void volume”, integrating relevant literature on concrete mix ration optimization. In the design process, modular programming methods are adopted for an improvement of the readability and maintainability of the program, thus making the program design simpler and more intuitive, so as to achieve the program intelligence and practicality.

**Keywords:** concrete mix propostion; automatic optimization program; module; grading curve

## 1 研究背景

混凝土配合比设计在建筑和基础设施工程中具

有重要意义。通过合理确定混凝土中各组成材料的比例关系, 可以满足结构设计要求的强度等级、施工需

收稿日期: 2023-03-03

作者简介: 涂 驰, 男, 华中科技大学硕士生, 主要研究方向为智能建造, E-mail: 1093005062@qq.com

通信作者: 钱兆燕, 女, 绍兴市交通运输局高级工程师, 主要研究方向为港口航道与海岸工程, E-mail: 260354457@qq.com

要的和易性、混凝土的耐久性，并在尽可能节约原材料的前提下降低混凝土成本。因此，混凝土配合比设计对于确保工程质量、提高工程效率和降低成本等方面具有重要意义。

已有研究主要依靠经验公式和试验数据来设计混凝土配合比，这种方法存在一定的局限性。传统设计方法的应用范围有限，且设计过程复杂、耗时。随着计算机科学和优化算法的发展，越来越多的研究采用计算机辅助设计混凝土配合比的方法<sup>[1-2]</sup>。在使用优化工具进行配合比设计时，如何准确考虑各种原材料对混凝土性能的影响，以及如何在满足技术要求的同时尽量降低生产成本，仍然是一个挑战。

混凝土配合比设计是指设计混凝土中各组成材料用量之间的比例关系，它是根据原材料的技术性能，在给定的浇筑方法和应用环境下，实现特定混凝土性能所需的混凝土各项组成材料的用量。混凝土配合比设计的根本要求是：1) 满足混凝土结构设计所要求的强度等级；2) 满足施工所要求的混凝土拌合物的和易性；3) 满足混凝土的耐久性；4) 在满足各项技术性质的前提下，使各组成材料经济合理，尽量做到节约水泥和降低混凝土制造成本<sup>[3]</sup>。

在混凝土中，水泥浆不仅被用于填充由组合集料混合捣实后的空隙，而且可以包围和分隔集料，减小集料之间的摩擦力，增加混凝土的和易性。填充由粗集料和细集料混合捣实后形成的空隙的这部分水泥浆体是必需的；包围和分隔集料的水泥浆体是富余的，这部分水泥浆体会增加混凝土的流动性能，但是要满足硬化混凝土的强度和耐久性要求。依据此思路，可以把混凝土看成是由集料与水泥浆（含有一定量的空气）按照一定比例的组合，并满足新拌混凝土工作性能和硬化混凝土的强度、耐久性<sup>[4]</sup>，得到一种水泥混凝土配合比设计方法。

本研究拟提出一种基于水泥浆体积与组合集料空隙体积之比的混凝土配合比设计方法，并结合毒蛛曲线、Haystack 曲线和 Power 45 曲线<sup>[4-6]</sup>，同时结合单独和组合级配曲线，以及 Shilstone 图表的粗糙度因子和工作因子，优化集料级配曲线和水泥用量。通过综合考虑水泥用量、集料级配和各种原材料的特性，应用 python 开发了一个混凝土配合比自动优化程序，以提高混凝土配合比设计效率和准确性。该研究具有重要的理论和实际意义：首先，将为混凝土配合比设计提供一种新的思路和方法，使设计过程更加科学、可靠；其次，通过开发一个智能化的优化程序，可以提高设计的自动化程度，减少人工干预和人力资源浪费。

## 2 设计思路

本文研究的是被广泛应用于建筑和基础设施工程中的普通混凝土。为了确保混凝土的性能和质量，依据《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[3]</sup>（JGJ 55—2011）进行混凝土配合比设计。该规程包含了混凝土配合比设计的基本原理、要求和规定<sup>[3]</sup>。依据该规程，本研究采用优化组合集料方法，结合毒蛛曲线等优化工具，开发一款智能化混凝土配合比优化计算程序。应用该程序，工程师可以根据具体的工程需求，快速准确地设计出符合规程要求的混凝土配合比。

### 2.1 集料级配优化

混凝土配合比设计的重点不仅是满足混凝土的基本性能，而且还要求经济地生产出混凝土。在不影响工程性能的情况下使用尽可能少的水泥浆是降低生产成本的一种有效方法。骨料系统对混凝土配合比设计有很大的影响，集料级配优化对于减少水泥浆同时实现设计所需的和易性至关重要。

一般可以使用集料级配曲线实现优化组合级配。毒蛛曲线是根据 Haystack 图表开发的集料优化曲线，毒蛛曲线的 y 轴是每个筛子上的分计筛余体积分数，x 轴是不同尺寸的筛子。如图 1 所示，该曲线已由混凝土路面承包商和机构验证，因此本程序依据毒蛛曲线进行组合集料配合比优化<sup>[5]</sup>。Haystack 曲线如图 2 所示。

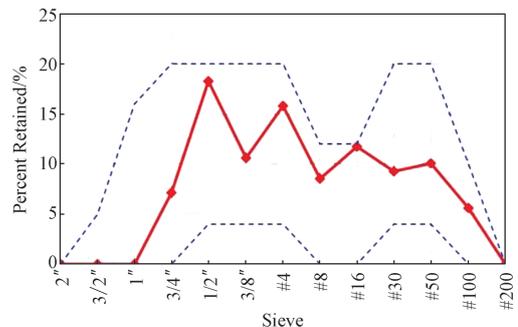


图 1 毒蛛曲线

Fig. 1 Tarantula curves

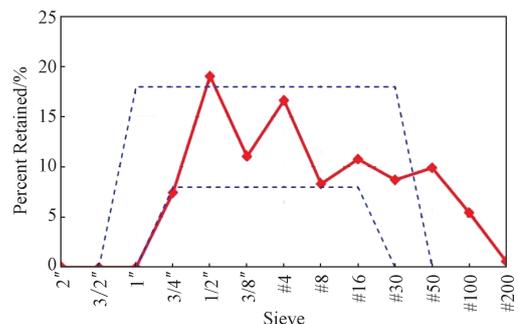


图 2 Haystack 曲线

Fig. 2 Haystack curves

组合集料的筛余曲线应位于毒蛛曲线的包络线内, 并尽可能靠近包络线的中心, 以达到提供经济的优化组合级配的目的。

## 2.2 基于水泥浆体积与组合集料空隙体积之比的混凝土配合比设计

基于水泥浆体积与组合集料空隙体积之比的混凝土配合比设计方法中, 配合比设计的关键点在于确定水泥浆体积。根据水胶比和用水量计算水泥用量, 配合比设计流程如图3所示。

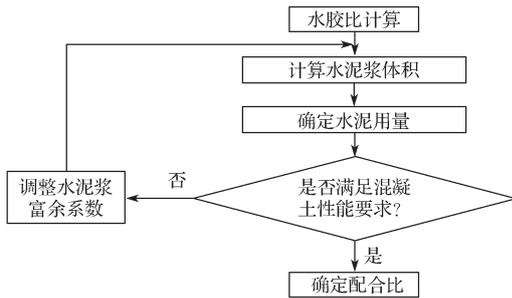


图3 混凝土配合比设计流程

Fig. 3 Design process of concrete mix proportion

在图3所示设计流程中, 水胶比的计算由实际水泥28d强度计算获得, 采用的水胶比应满足《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[3]</sup>中的相关规定。根据组合集料空隙率, 考虑水泥浆富余系数, 即考虑水泥浆体积与组合集料空隙体积之比, 计算水泥浆体积。初始水泥浆体积与组合集料空隙体积之比, 取决于水泥中辅助胶凝材料的选择, 通常取125%~175%。为了保证水泥满足可加工性、抗压强度、干燥收缩率和渗透性要求, 一般选择125%作为初始比值<sup>[5]</sup>。根据水胶比、组合集料空隙率和水泥浆体积与组合集料空隙体积之比确定水泥用量, 计算单位体积水泥用量。如果初始水泥浆富余系数确定的水泥用量能满足设计要求的工作性以及强度要求, 则计算完成, 输出配合比; 如果初始水泥浆富余系数确定的水泥用量不能满足设计要求的工作性以及强度, 则重新选择水泥浆的富余系数、计算水泥浆体积、确定水泥用量, 再次判断是否满足混凝土工作性能和强度要求, 若仍不满足, 则重复以上步骤。

依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[7]</sup>进行压缩强度试验和抗拉强度试验评估混凝土强度。试验通过在一定时间内施加荷载或应力来评估混凝土的强度特性, 并通过与结构设计要求进行比较, 确定混凝土的强度是否满足要求。流动性是另一个重要的性能指标, 依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》<sup>[8]</sup>, 以施工现场的坍落度试验进行评估。试验可以提供有关混凝土流动性和工作性的信息, 确保混凝

土在施工过程中能够良好地流动和浇筑。

## 3 设计过程

### 3.1 集料优化算法与集料优化曲线

针对性能要求的最佳设计参数值, 本程序通过改变粗、细骨料的体积分数来实现最小残差平方和(residual sum of squares, RSS), 使组合集料各筛分计筛余接近每个筛子的上限和下限的中间值<sup>[5]</sup>。

$$\left( RSS = \sum_{i=1}^n (P_m(D_i) - P_t(D_i))^2 \right) \geq \text{minimum} \quad (1)$$

式中:  $RSS$  为最小残差平方和;  $P_m(D_i)$  为实际通过粗、细集料的体积分数;  $P_t(D_i)$  为通过每个相应筛子的目标百分数, 使用每个筛分上限和下限的中间值。

同时, 组合集料需要满足以下条件: 0.60, 1.18, 2.36 mm 的各筛分计筛余质量分数总和应大于15%, 而细砂(0.075~0.600 mm) 应占集料总质量的24%~34%。

$$\left( Coarse = \sum_{i=8}^{10} P_m(D_i) \right) \geq 15 \quad (2)$$

式中:  $Coarse$  为 0.60, 1.18, 2.36 mm 的各筛分计筛余总和。

$$34 \geq \left( Fine = \sum_{i=10}^{13} P_m(D_i) \right) \geq 24 \quad (3)$$

式中:  $Fine$  为细砂(0.075~0.600 mm) 的各筛分计筛余总和。

基于最小残差平方和(RSS)的目标曲线拟合, 使 Tarantula 曲线内的组合骨料级配保持接近每个筛子上、下限的中间, 同时尽量保持接近 Power 45 图表的最大密度线。如图4所示, 最大限度地减少达到性能要求所需的水泥浆用量。

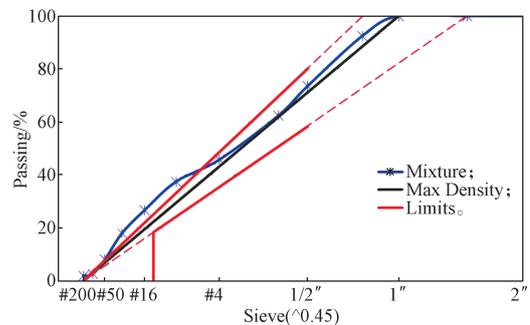


图4 Power 45 曲线

Fig. 4 Power 45 curves

结合单独和组合级配曲线, 保持细集料的通过百分率位于包络线内, 并尽可能靠近包络线中心。如图5所示, 细集料的单独组合级配曲线接近 C33 上、下包络线的中间位置。

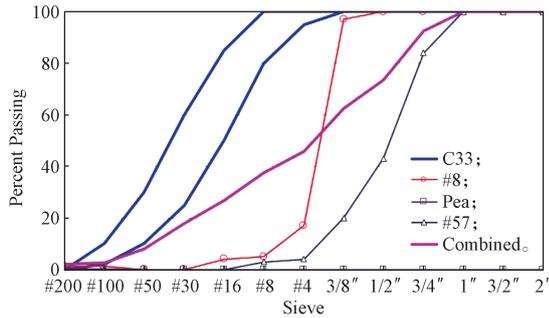


图5 单独和组合级配曲线

Fig. 5 Individual and combined grading curves

同时,结合 Shilstone 图表的粗糙度因子和工作因子,评估集料合成级配和单位水泥用量,如图6所示是划分 Shilstone 图表的不同区域。不同的区域划分不同的情况。由图可知, I 区的级配间断,中间量非常少; II 区级配良好,是混凝土的最佳级配设计。III 区有大量的中间级和极少的粗级料,适用于骨料最大、粒径较小的混凝土。IV 区和 V 区与极端的砂土和岩石相关,其中 IV 区混凝土多砂,过黏; V 区混凝土骨料过多<sup>[6]</sup>。

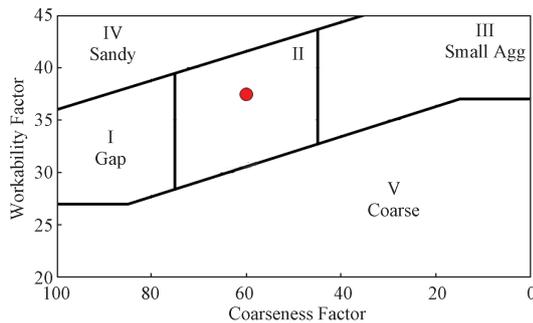


图6 Shilstone 图表

Fig. 6 Shilstone chart

Shilstone 图表由粗糙度因子和工作因子组成。这两个参数方程控制细集料、中间集料和粗骨料。如式(4)所示,工作因子改变了组合集料中细集料的质量分数。给定含砂量下,粗集料与中间集料的比例由式(5)所示的粗糙度因子控制<sup>[9]</sup>。

$$WF = W + (2.5(C - 564)/94). \quad (4)$$

式中:  $WF$  为工作因子;  $W$  为 2.36 mm 筛分的组合集料通过率(%);  $C$  为胶凝材料用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

$$CF = Q/R * 100. \quad (5)$$

式中:  $CF$  为粗糙度因子;  $Q$  为 9.5 mm 筛分的组合集料累计筛余率(%);  $R$  为 2.36 mm 筛分的组合集料累计筛余率(%)。

### 3.2 混凝土配合比设计的影响因素分析

混凝土配合比是指混凝土中各组成材料之间的比例关系,包括水泥浆、集料和水。因此影响混凝土

配合比设计的因素大致有以下几个方面:集料质量分数、辅助胶凝材料的掺量、组合集料空隙率、水泥浆体积与组合集料空隙体积之比、水胶比、含气率、集料含水率等。为了使以上影响因素可以在程序中计算,需要对这些因素进行分析<sup>[10]</sup>。

#### 3.2.1 集料质量分数

混凝土配合比设计的关键之一就是优化集料级配,得到集料质量分数,再按粗、细集料的质量分数,进行混凝土配合比设计。粗、细集料的质量等于组合集料乘以集料相应的质量分数。所有集料的质量之和等于组合集料的质量。

#### 3.2.2 辅助胶凝材料掺量

胶凝材料由水泥与辅助胶凝材料组成,常用的辅助胶凝材料有粉煤灰、矿粉等,不同的辅助胶凝材料,选择的水泥浆体积与组合集料空隙体积之比不同,同时辅助胶凝材料的掺量会影响胶凝材料的质量。辅助胶凝材料的质量等于胶凝材料的质量乘以辅助胶凝材料的掺量,水泥质量与辅助胶凝材料的质量之和等于胶凝材料的质量。

#### 3.2.3 组合集料空隙率

组合集料空隙率由空隙率实验获得,按优化后的粗、细集料和中间集料质量之比,称取一定质量的粗、细集料和中间集料,基于 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》中 T 0309 粗集料堆积密度及空隙率试验<sup>[11]</sup>,搅拌均匀,测试组合集料空隙率。计算组合集料体系的烘干单位质量精确到  $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,再计算组合集料空隙率。

$$m_{\text{dru}} = m_{\text{d}} / V_{\text{r}}. \quad (6)$$

式中:  $m_{\text{dru}}$  为组合集料体系烘干单位质量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $m_{\text{d}}$  为烘干质量 ( $\text{kg}$ );  $V_{\text{r}}$  为容器体积 ( $\text{m}^3$ )。

$$\eta_{\text{voids}} = \frac{m_{\text{g}} \times \rho_{\text{w}} - m_{\text{dru}}}{m_{\text{g}} \times \rho_{\text{w}}} \times 100\%. \quad (7)$$

式中:  $\eta_{\text{voids}}$  为组合集料空隙率(%);  $m_{\text{g}}$  为毛体积比例;  $\rho_{\text{w}}$  为水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

毛体积比例可以按单个成分的加权比例计算。例如,49%粗集料 A,51%细集料 B,其比例分别为  $a$  和  $b$ ,则毛体积比例  $m_{\text{g}}$  可以按式(8)计算:

$$m_{\text{g}} = (0.49 \times a) + (0.51 \times b). \quad (8)$$

#### 3.2.4 水泥浆体积与组合集料空隙体积之比

通过计算混凝土胶凝体积,并将该值除以压实组合骨料之间的空隙体积,来确定水泥浆体积与组合集料空隙体积之比。胶凝体积包括系统中水、胶凝材料和空气的体积。空隙是指压实组合骨料之间的空间。水泥浆体积与组合集料空隙体积之比为 100%,表示组合骨料系统之间的所有空隙都被水泥

浆填充, 没有多余的水泥浆。水泥浆富余系数一般为 25%~75%, 即水泥浆体积与组合集料空隙体积之比在 125%~175% 之间, 足以满足混凝土设计要求的工作性、强度要求<sup>[9]</sup>。

### 3.2.5 水胶比

水的用量根据胶凝材料用量及水胶比确定, 水胶比的计算由实际水泥 28 d 强度计算获得, 同时应满足《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[3]</sup> 中的规定, 如式 (9) (10) 所示。

$$f_{cu,o} = f_{cu,k} + 1.645\sigma \quad (9)$$

式中:  $f_{cu,o}$  为混凝土的配置强度 (MPa);  $f_{cu,k}$  为混凝土的设计强度 (MPa);  $\sigma$  为混凝土的标准偏差 (MPa)。

$$\frac{W}{C} = \frac{\alpha_a \times f_{ce}}{f_{cu,o} + \alpha_a \times \alpha_b \times f_{ce}} \quad (10)$$

式中:  $W/C$  为水胶比;  $f_{ce}$  为水泥的抗压强度 (MPa);  $\alpha_a$ 、 $\alpha_b$  为回归系数, 根据《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[3]</sup> 选用。

水的质量等于胶凝材料的质量乘以水胶比。

### 3.2.6 含气率

水泥浆不仅由胶凝材料和水组成, 还包含其中的空气。尽管空气具有质量 (密度约为 1.293 g/L), 但在计算时, 通常忽略水泥浆中的空气质量, 而仅考虑空气的体积。这是因为水泥浆中的空气相对于其他成分的质量通常可以忽略不计, 而在体积计算中, 仍然需要考虑水泥浆的含气率, 以确保准确反映其实际体积特性。

### 3.2.7 集料含水率

在计算混凝土的施工配合比时, 需要考虑集料的含水率, 它不仅会影响集料的用量, 同时会影响混凝土中水的用量。如式 (11) (12) 所示, 考虑集料含水率对混凝土配合比的影响。

$$m_{ci} = m_{di}(1 + w_{ci}) \quad (11)$$

式中:  $m_{ci}$  为施工配合比中某种集料的质量 (kg);  $m_{di}$  为设计配合比中某种集料的质量 (kg);  $w_{ci}$  为某种集料的含水率。

$$m_{cw} = m_{dw} + \sum_i^n m_{di}(w_{ai} - w_{ci}) \quad (12)$$

式中:  $m_{cw}$  为施工配合比中水的质量 (kg);  $m_{dw}$  为设计配合比中水的质量 (kg);  $w_{ai}$  为某种集料的吸水率。

## 3.3 程序设计及各模块功能

根据 3.1 中的集料优化算法与集料优化曲线, 以及 3.2 中的影响因素分析, 程序设计的核心工作已完成, 接下来就是如何设定集料信息与水泥浆信息的

输入以及混凝土配合比的输出。程序设计充分考虑了人性化与高效化, 其主要包含输入模块、优化模块、计算模块和输出模块, 具体如图 7 所示。

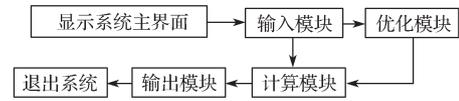


图 7 混凝土配合比自动优化程序流程图

Fig. 7 Concrete mix proportion automatic optimization program flowchart

### 3.3.1 输入模块

输入模块作为配合比优化与计算的依据, 由用户键盘输入。考虑到输入内容较多, 故在输入模块中设定了预设值, 以提高用户的输入效率, 同时可以手工输入。输入模块包括集料系统与水泥浆系统。

集料系统包含集料的各项参数, 包括集料名称、集料相对密度、集料的含水状态、集料的质量分数以及集料级配。其中, 集料名称选用集料种类。集料的含水状态根据集料的含水率与吸水率确定, 当集料的含水率大于吸水率时, 集料为湿润状态; 当集料的含水率小于吸水率时, 集料为天然含水状态; 当集料的含水率等于吸水率时, 集料为饱和面干状态。程序设计中, 集料的含水状态默认为饱和面干状态, 用户可以根据集料的实际状态自行修改。对于集料的质量分数, 用户可以输入一个初始值, 方便后续分析对比。集料级配的输入包含 4 种粗细不同的集料情况, 默认情况下 4 种集料都会使用, 用户可以根据实际所用的集料数量进行勾选, 用户需要输入每种集料筛分后通过的质量分数。根据用户输入的集料级配, 系统自动计算集料的最大粒径。

胶凝材料系统包含水泥浆的各项参数, 包括水泥以及辅助胶凝材料的名称与相对密度, 含气量、外加剂含量、辅助胶凝材料掺量, 以及组合集料空隙率, 水泥浆体积与组合集料空隙体积之比。输入信息由用户自行填写, 外加剂包括减水剂、引气剂、缓凝剂和早强剂, 胶凝材料掺量的单位为 ml/100 kg。辅助胶凝材料可以填写多种, 默认为粉煤灰与矿粉, 可以添加硅灰、矿渣和磷渣粉等其它材料, 掺量可以自行调节。组合集料空隙率由实验获得。水泥浆体积与组合集料空隙体积之比初始值设为 125%, 如果不合理可以随时调整该值。

### 3.3.2 优化模块

为实现混凝土配合比优化设计, 程序运用了 scipy.optimize 中的 minimize 函数<sup>[12]</sup>, 通过设定目标函数和约束条件, 规划求解, 获得最优配合比。

根据集料系统中输入的集料信息, 程序采用非线性

性规划求解方式,通过优化集料级配,进而优化混凝土配合比。针对式(1)进行规划求解,约束条件为式(2)(3),以及粗、细集料和中间集料的质量分数之和为100%,变量为集料的质量分数。系统会自动优化集料级配,并且将集料质量分数改为优化后的集料质量分数输出给用户。同时计算模块会根据优化后的集料质量分数进行运算,从而获得混凝土建议配合比。

### 3.3.3 计算模块

程序创建了一个计算类,其中包含了19个函数,运用numpy包中的数组进行计算<sup>[13]</sup>,并运用sympy包中的solve函数进行方程求解。其中,集料级配运算包括计算每种集料不同筛分下在组合集料中的通过质量分数、组合集料的通过质量分数、组合集料的累计筛余质量分数、组合集料的分计筛余质量分数,以及组合集料的分级筛余体积分数。根据以上计算,可获得细度模数、级配曲线中的毒蛛曲线最小残差平方和(RSS)、粗度、细度,以及Shilstone图表的工作因子与粗糙度因子。依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)进行配合比运算<sup>[3]</sup>,主要包括胶凝材料的质量、组合集料的质量、水的质量、设计配合比、施工配合比等的计算。

### 3.3.4 输出模块

输出模块包含配合比、组合集料筛分的通过质量分数、细度模数、级配曲线中的毒蛛曲线最小残差平方和(RSS)、粗度、细度、Shilstone图表的工作因子与粗糙度因子,以及胶凝材料的质量、组合集料量

的输出。除配合比的输出与组合集料筛分的通过质量分数的输出之外,其他输出都需要点击详细数据按钮获得。如果配合比不合理,调整水泥浆体积与组合集料空隙体积之比,并检查输入模块中输入的胶凝材料内容。

输出模块还包含集料级配曲线的输出,包括毒蛛曲线、单独和组合级配曲线、Haystack曲线、Power 45曲线,以及Shilstone图表。用户可以通过观察集料级配曲线,对比分析集料级配与混凝土配合比的情况。如果优化后的结果并不是很好的解决方案,可以对集料的质量分数进行调试,并观察集料级配图像,如果图像总是很奇怪或难看,就选择更换集料。

## 4 界面设计

程序采用pyqt5进行界面设计,界面设计具有简单性、高效性,方便操作人员使用本系统。

系统输入模块由排列整齐的输入框构成,简单明了,操作人员可通过键盘输入项目信息,同时可通过鼠标点击集料的勾选按钮,输入使用的集料数量。优化模块放置在系统左上角菜单位置,包括“集料优化算法”和“集料优化曲线”,使用鼠标点击相应菜单便可进行集料优化。点击确认按钮,系统便能自动运行计算模块,并将输出内容显示在界面上。点击详细数据按钮,系统便会跳出关于混凝土配合比设计的更多详细内容,便于用户分析对比。本界面具操作简单、输出内容明确等特点。程序操作界面见图8。

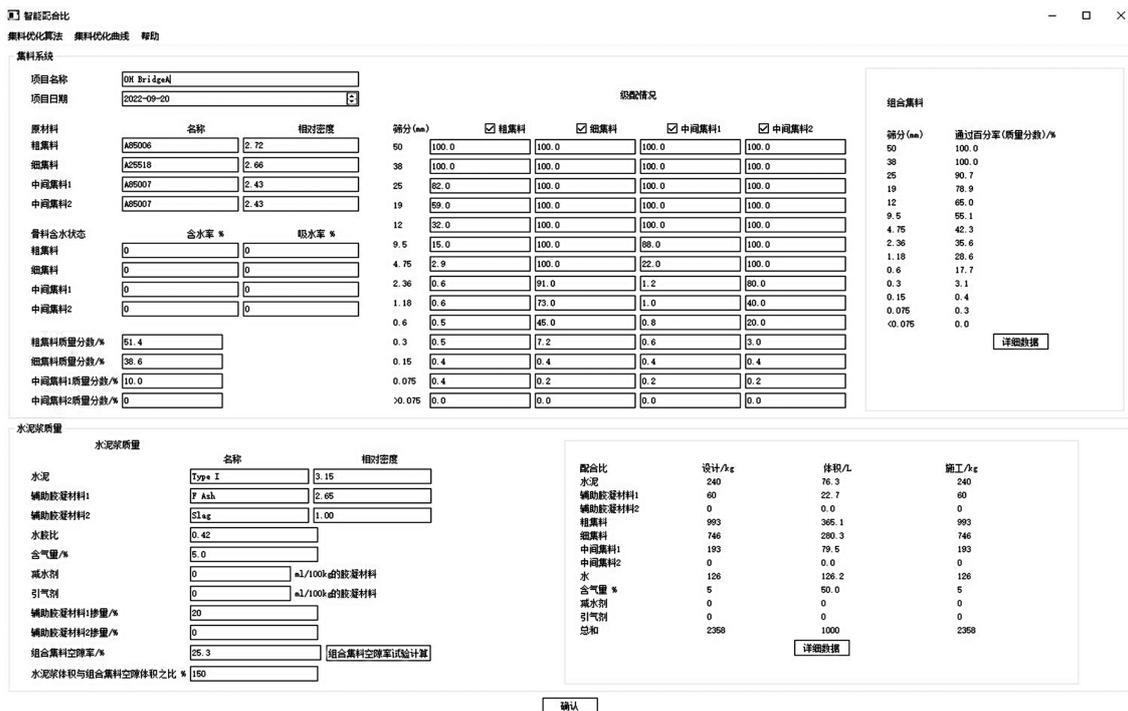


图8 程序操作界面

Fig. 8 Program operation interface

## 5 结论

本研究以毒蛛曲线为基础, 采用优化组合集料方法设计了一种新的混凝土配合比优化计算程序, 同时参考了多种集料级配曲线, 评估集料级配, 得到优化后的建议配合比。该方法具有较高的实用性, 同时能够节约水泥用量, 具有较好的经济性。但使用本程序的同时, 应结合实践经验, 以保证使用过程的科学性、规范性和实用性<sup>[14]</sup>。所设计的程序不仅实现了对混凝土配合比的优化功能, 同时具有精确、实用、高效的特点, 能够很好地服务于混凝土配合比的科学研究以及混凝土的工程施工。

### 参考文献:

- [1] 韩 斌, 吉 坤, 胡亚飞, 等. ANN-PSO-GA 模型在湿喷混凝土强度预测及配合比优化中的应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 584-591.  
HAN Bin, JI Kun, HU Yafei, et al. Application of ANN-PSO-GA Model in UCS Prediction and Mix Proportion Optimization of Wet Shotcrete[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2021, 38(3): 584-591.
- [2] 陈 浩, 朱尔玉, 白正伟. 基于智能制造的 CRTS III 型轨道板混凝土配合比优化研究[J]. 施工技术, 2022, 51(3): 103-106, 133.  
CHEN Hao, ZHU Eryu, BAI Zhengwei. Research on Research on Mix Ratio Optimization of CRTS III Track Slab Concrete Based on Intelligent Manufacturing[J]. Construction Technology, 2022, 51(3): 103-106, 133.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 6-12.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Mix Proportion Design of Ordinary Concrete: JGJ 55—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 6-12.
- [4] 杨大田, 陈富强, 孔令才. 一种新的路面水泥混凝土配合比设计[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(6): 93-97.  
YANG Datian, CHEN Fuqiang, KONG Lingcai. Practice of Innovative Pavement Cement Concrete Proportion Design[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(6): 93-97.
- [5] ANG X H, TAYLOR P, YURDAKUL E, et al. An Innovative Approach to Concrete Mixture Proportioning[J]. ACI Materials Journal, 2018, 115(5): 749-759.
- [6] COOK M D, GHAEZADEH A, TYLER LEY M, et al. Investigation of Optimize Graded Concrete for Oklahoma-Phase 1[EB/OL]. [2023-01-20]. <https://www.docin.com/p-1502500748.html>.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 5-31.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard Test Methods for Physical and Mechanical Properties of Concrete: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 5-31.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 5-7.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard Test Methods for Properties of Ordinary Concrete Mixtures: GB/T 50080—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 5-7.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构工程施工质量验收规范: GB 50204—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 39-44.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Quality Acceptance of Concrete Structure Construction: GB 50204—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 39-44.
- [10] FAROOQ F, AHMED W, AKBAR A, et al. Predictive Modeling for Sustainable High-Performance Concrete from Industrial Wastes: A Comparison and Optimization of Models Using Ensemble Learners[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126032.
- [11] 中华人民共和国交通部. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 31-33.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test Methods of Aggregate for Highway Engineering: JTG E42—2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2005: 31-33.
- [12] VIRTANEN P, GOMMERS R, OLIPHANT T E, et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python[J]. Nature Methods, 2020, 17(3): 261-272.
- [13] HARRIS C R, MILLMAN K J, VAN DER WALT S J, et al. Array Programming with NumPy[J]. Nature, 2020, 585: 357-362.
- [14] HUANG J D, SUN Y T, ZHANG J F. Reduction of Computational Error by Optimizing SVR Kernel Coefficients to Simulate Concrete Compressive Strength Through the Use of a Human Learning Optimization Algorithm[J]. Engineering with Computers, 2022, 38(4): 3151-3168.

(责任编辑: 廖友媛)