

老旧小区供水管网改造项目施工进度计划优化研究

胡云豪 姚佼 赵依凡

上海理工大学管理学院

DOI:10.12238/jpm.v3i12.5472

[摘要] 随着我国城市化进程的不断推进,老龄化逐步到来,一批老旧小区进入集中改造期。其中,供水管网改造是关系民生的重要项目。供水管网改造项目的施工进度管理优化,既可以减少施工过程对居民日常生活的影响,又可以节约施工单位的成本、提升资源利用的效率。特别在新冠疫情防控常态化影响下,如何通过优化施工进度计划来最大限度缩短工期,规避因疫情封控导致项目停工的风险,成为施工单位需要考虑的现实问题。本研究首先利用 Gupta 启发式算法对施工段进行排序;进而运用潘特考夫斯基法求出排序后的施工段的流水步距对施工进度计划进行优化;最后基于遗传算法对老旧小区供水管网改造的三类主要问题,建立了涵盖施工段、施工任务、施工日期三个维度的施工时间计算模型及相应时间表格,并以 M 小区老旧供水管网改造项目为对象,进行了模型的效果验证。研究成果希望能为我国城市化进程中的老旧小区改造的施工管理提供参考。

[关键词] 老旧小区;供水管网改造;施工进度管理;潘特考夫斯基法;遗传算法

Study on optimization of construction schedule of water supply network renovation project in old residential area

Hu Yunhao, Yao Jiao, and Zhao Yifan

School of Management, Shanghai University of Science and Technology

[Abstract] With the continuous advancement of China's urbanization process, aging gradually arrived, a number of old residential areas into the centralized transformation period. Among them, the transformation of the water supply pipe network is an important project related to the people's livelihood. The optimization of the construction schedule management of the water supply pipe network renovation project can not only reduce the impact of the construction process on the daily life of the residents, but also save the cost of the construction unit and improve the efficiency of resource utilization. Especially under the influence of the normalization of COVID-19 prevention and control, how to minimize the construction period by optimizing the construction schedule and avoid the risk of project shutdown due to the epidemic closure and control has become a practical problem that the construction units need to consider. In this study, Gupta heuristic algorithm is used to rank the construction section; then to optimize the construction schedule with the same method, and then to establish the construction time calculation model and the corresponding time table, including the reconstruction project of the old water supply pipe network in M residential area. The research results hope to provide reference for the construction management of the reconstruction of old residential areas in the process of urbanization in China.

[Key words] Old community; renovation of water supply network; construction progress management; Pankowski method; genetic algorithm

引言

老旧小区一般指主体建筑于 2000 年以前建成、居民基本生活因为公共设施落后而受影响、同时居民有强烈改造意愿的住宅小区^[1],具有地下管线布置杂乱^[2]、大型车辆进出困难、居民多为固定时间上下班的工薪阶层^[3]等特点。目前小区供水管网需要改造的原因有两点。一是供水管网的供需问题,部分管网使用超过 20 年,随着大量人口及产业聚集上海,导致设计过时的供水管网长期处于超负荷运行状态,无法满足居民对水量、水质和水压的基本需求^[4]。二是供水管道的老化问题,由于使用年限长,加之管道迁改、开挖施工、城市地陷、建筑

沉降、材质缺陷等因素叠加,导致漏损及锈蚀情况严重。

老旧小区的供水管网改造工程,大多数情况下属于半封闭施工,施工时受客观因素的限制较多,主要有以下特点:空间上,施工人员、机械、材料等占用的空间与居民日常活动空间和通行空间存在矛盾。时间上,施工时间被严格限制,需要保证上下班高峰期的小区道路通行能力。在新冠疫情仍有局部零星发生的现实背景下,为规避小区因疫情而临时封闭的停工风险,施工单位还需要考虑在控制成本和证质量的前提下以最大限度缩短工期为目标,优化施工进度计划。

1 问题描述

以M小区为研究对象,其位于上海市嘉定区马陆镇,处于上海外环线以外,于1996年建成,是上海典型的老旧小区。2020年供水管网改造时,小区的供水管道已使用接近25年,小区内曾有数处管道渗漏导致地面积水、隆起或塌陷,小区住户时常向物业投诉高峰时水流小、水质差、水有异味等问题。该项目开工时间为2020年12月14日,完工时间为2021年12月27日,合计14天。期间,经施工单位与物业、居委协商,为避开小区进出高峰、保障居民正常用水和保证小区夜间车位,施工时间确定为上午8:00至12:00,下午12:30至16:30,每日合计8小时。

根据设计文件,该项目可分解为以下14个施工任务:施工测量、路面切割、路面破碎、沟槽开挖、管道安装、浸泡试验、打压试验、初次回填、冲洗消毒、阀门安装、二次回填、路面复原(三渣夯实)、路面复原(水泥稳定碎石基层)、路面复原(沥青混凝土面层),此处设为 $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_{14}$ 。同时,该项目在平面上分为8个施工段,此处设为 $B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_8$ 。

在施工开始前,施工单位通过测算各施工任务在各施工段上的施工量和各下属施工小组的施工速度,得到用时表格。在此基础上,使用Gupta启发式算法^[5]求出施工段 B_j 的优先因子 λ_j ,进而根据 λ_j 的大小对各施工段进行排序;再运用潘特考夫斯基法^[6]求出排序后的施工段的流水步距 d ;最后,根据排序后的施工段的作整体施工时间和流水步距,理论计算求得项目的14天总工期。

在项目实施过程中,发现原施工进度计划存除总工期过长外,还存在以下问题:(1)需跨天施工的任务较多,增加了施工小组的工作量,包括沟槽加盖钢板、添置警示围栏、施工机械移动、施工机械重新布置、沟槽积水清理等,导致实际可施工时间被压缩。(2)有条件实施搭接施工,而未进行进度计划优化。施工段1、2、3、4、5、6在平面布置上相互平行,相互独立,都被南北走向的小区主干道(施工段7、8)分成东西两部分,客观上可以实施搭接施工。(3)施工小组的工作安排不够紧凑,存在部分天数人员出工后工作不满4个小时的情况。(4)各施工段的空间利用率不高,无人施工的闲置时间长,导致各施工段的施工周期长。

2 算法概述

遗传算法由美国Holland教授中提出,该算法是一种基于自然选择思想和生物遗传理论的搜索算法,是对生物进化过程的模仿^[7]。其过程主要由3个基本操作构成,即择、交叉和变异^[8]。

遗传算法运用到施工进度问题中时,其优势在于可以将原进度计划作为初始个体进行迭代,保证算法符合基本运算规则和进度设计要求,可以快速收敛。

遗传算法中适应度值 F 的设计,是评价个体(施工进度计划对应的排列方式)优劣的核心标准。根据该项目存在的问题,此处将施工任务 $g_{j,i,x}$ 放在施工日期 x 、施工任务 i 、施工段 j 三个维度上进行分析,将施工进度设计的规则转化为函数表达式,即将“某施工任务在哪天由谁在哪里实施”的现实问题转变为数学问题。计算每个个体(施工进度排列)的适应度值 F ,以为工期压缩为重点,主要通过施工日期 x 有关的指标定量评价每个个体的适应度值 F 。

在施工日期 x 维度,在第 x 天所有当天出工的施工小组各自实施的施工任务 i 在各施工段上的具体施工任务 $g_{j,i,x}$ 能否在当日完成,涉及第 x 天第 j 个施工段上第 i 个施工任务的实际施工时长 $t_{j,i,x}$ 取值,设该指标设为 F_x 。

在施工段 j 维度,在第 x 天施工段 j 上实施的前后施工任务 i 和 $i+1$ 是否连续,或者第 x 天施工段 j 上是否存在长时间无人施工的情况,涉及第 x 天同一施工段中施工任务 $i-1$ 与施工任务 i 的间隔 $d_{i,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i})$ 的取值,设该指标设为 F_j 。

在施工任务 i (施工小组)维度,存在两方面的问题。一是连续施工问题,判断实施施工任务 i 的施工小组在前后施工段能否连续施工,涉及第 x 天同一施工任务 i 下施工段 j 和施工段 $j+1$ 的间隔 $d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i})$ 的取值,设该指标设为 F_i^1 。二是出工天数问题,由于整体施工任务的工作量固定,当分配到每一天的施工时间变长,则施工小组需要出工的天数就越短,故该问题可以转化为统计施工小组每日施工时间的问题,涉及 $t_{j,i,x}$ 的取值,设该指标设为 F_i^2 。

对个体而言,设其适应度值 $F = F_x + F_j + (F_i^1 + F_i^2)$ 。

3 模型设计

3.1 优化时间表

由于一般用于展示各施工段上各施工任务施工时长的用时表格,不能准确表明该任务在施工横道图中的具体分布。因此,为了适应遗传算法,建立程序能够识别的时间矩阵,此处对常规时间表在三个维度上进行扩充,使其能展示施工日期 x 维度上的实际流水步距 $d_x(A_{i-1}, A_i)$ 、施工任务 i 维度上的同一任务下前后施工段间的步距 $d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i})$ 、施工段 j 维度上的同一段下前后施工任务的间隔 $d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i})$ 。

3.2 运算规则设定

(1) 每日施工限时:

$$\sum_{j=1}^8 t_{j,i,x} \leq 8 \quad (1)$$

即对于第 x 天的第 i 个施工任务,不论其在各施工段如何分配时间,其累计施工时间不超过8小时。

(2) 实际流水步距:

$$d_x(A_{m-1}, A_m) \geq d(A_{m-1}, A_m) - \left[\sum_{j=1}^n t_{j,m-1,x-1} + \sum_{j=1}^n d_{m-1,x-1}(g_{j,m}, g_{j+1,m}) \right] \quad (2)$$

其中, $d(A_{m-1}, A_m)$ 是通过Gupta启发式算和潘氏法得到的理论流水步距, $\sum_{j=1}^n t_{j,m-1,x-1}$ 表示前一天的上一个施工任务 $m-1$

在各施工段上需要施工的时间, $\sum_{j=1}^n d_{m-1,x-1}(g_{j,m}, g_{j+1,m})$ 表示前一天的上一个施工任务 $m-1$ 在实施时各施工段之间需要考虑的间隔时间。即实际流水步距 $d_x(A_{m-1}, A_m)$ 需要大于等于理论流水步距 $d(A_{m-1}, A_m)$ 减去前一天的前一个施工任务 $m-1$ 的整体施工时间(包括施工任务的实施时间和施工段间隔时间)的值。

(3) 施工段的间隔:

$$d_{m,x}(g_{n,m}, g_{n+1,m}) \geq \left[\sum_{j=1}^{n+1} t_{j,m-1,x} + \sum_{j=1}^n d_{m-1,x}(g_{j,m}, g_{j+1,m}) \right]$$

$$-\left[\sum_{j=1}^n t_{j,m,x} + \sum_{j=1}^n d_{m,x}(g_{j,m}, g_{j+1,m}) \right] \quad (3)$$

其中, $\sum_{j=1}^{n+1} t_{j,m-1,x} + \sum_{j=1}^n d_{m-1,x}(g_{j,m}, g_{j+1,m})$ 表示当天

的施工任务 $m-1$ 在按序完成施工段 $j+1$ 时需要的累计整体施

工时间, $\left[\sum_{j=1}^n t_{j,m,x} + \sum_{j=1}^n d_{m,x}(g_{j,m}, g_{j+1,m}) \right]$ 表示当天的施工任

务 m 在按序完成施工段 j 时需要的累计的整体施工时间。即从施工段的角度看, 对于 $d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i})$ 需要大于等于当天上一个施工任务 $m-1$ 在完成施工段 $j+1$ 时的累计整体施工时间减去当天本施工任务在完成施工段 j 时的累计整体施工时间值。

3.3 主要问题优化

(1) 跨天施工问题的优化

该问题在施工日期 x 维度上表现为: 第 x 天所有出工的施工小组各自实施的施工任务 i 在各施工段上的具体施工任务 $g_{j,i,x}$ 能否在当日完成, 设 F_x 取值如下。

$$F_x = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n (f_x) \right], f_x = \begin{cases} 3, & t_{j,i,x} = t_{j,i} \\ 0, & t_{j,i,x} < t_{j,i} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 搭接施工问题的优化

由原施工过程发现, 施工段 1、2、3、4、5、6 中部分施工任务可以被二次分割为东侧和西侧两部分, 其中东侧工作量为 30%, 西侧工作量为 70%, 涉及的施工任务有: A2 路面切割、A3 路面破碎、A4 沟槽开挖、A5 管道安装、A11 二次回填、A12 三渣垫层、A13 水泥碎石基层、A14 沥青混凝土面层。针对这些施工任务, 可以考虑让实施前个施工任务的施工小组在完成这些施工段的西侧部分后, 转场到该施工段的东侧继续施工, 同时安排实施下一施工任务的施工小组进场紧接着在该施工段的西侧进行施工。这里将该问题作如下数学表述为:

$$d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i}) \geq -30\%t_{j,i-1}, i = 3, 4, 5, 12, 13, 14$$

另外, 为了从施工段 j 角度评价进度优化效果, 设 F_j 取值如下。

$$F_j = \sum_{x=1}^m \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n (f_j) \right], f_j = \begin{cases} 2, & -30\%t_{j,i-1} \leq d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i}) < 0 \\ 1, & d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i}) = 0 \\ 0, & d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i}) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

(3) 连续施工和出工天数问题的优化

连续施工和出工天数两个问题都是施工任务 i 的维度上的问题, 前者是判断同一施工任务 i 的前后施工段是否连续施工, 可以转化为 $d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i})$ 的问题, 后者则可以转化为统计施工小组每日施工时间的问题。设 F_i^1 和 F_i^2 取值如下:

$$F_i^1 = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=1}^n (f_i^1) \right], f_i^1 = \begin{cases} 2, & d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i}) = 0 \\ 1, & 0 < d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i}) \leq 3h \\ 0, & d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i}) > 3h \end{cases} \quad (6)$$

$$F_i^2 = \sum_{x=1}^m \sum_{i=1}^n (f_i^2), f_i^2 = \begin{cases} 0, & \sum_{j=1}^n (t_{j,i,x}) = 0 \\ -3, & 0 < \sum_{j=1}^n (t_{j,i,x}) < 4 \\ 1, & 4 \leq \sum_{j=1}^n (t_{j,i,x}) \leq 6 \\ 3, & \sum_{j=1}^n (t_{j,i,x}) > 6 \end{cases} \quad (7)$$

3.4 遗传算法运用

(1) 确定选择函数

此处选择使用自适应遗传算法, 其中的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 按如下的公式设置:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(F_{max} - F')}{F_{max} - F_{avg}}, & F \geq F_{avg} \\ P_{c1}, & F < F_{avg} \end{cases}, P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(F_{max} - F)}{F_{max} - F_{avg}}, & F \geq F_{avg} \\ P_{m1}, & F < F_{avg} \end{cases} \quad (8)$$

其中, 设 $P_{c1}=0.6$ 和 $P_{c2}=0.3$ 为初始设定的两个交叉概率, 前者对应的是防止在进化初期因变化小而进化走向局部最优解的较大交叉概率, 后者对应的是在精英个体的适应度值接近最大值时保证其遗传稳定的较小交叉概率。设 $P_{m1}=0.1$ 和 $P_{m2}=0.2$ 为初始设定的两个变异概率, 其要求与交叉概率 P_{c1} 和 P_{c2} 相似。

(2) 确定交叉算子

此处采用部分映射交叉的算子, 对于本项目而言, 主要针对各施工段排序, 即对于 8 个施工段的排序位置, 随机生产的两个位置节点, 交换父代染色体中两个交叉点之间的片段, 对应施工排序位置上的两个相关施工段。

以原施工进度计划 $[g_8, g_1, g_2|g_3, g_4, g_5|g_6, g_7]$ 和简单排列 $[g_1, g_2, g_3|g_4, g_5, g_6|g_7, g_8]$ 作为初代染色体、位置 3 和 6 作为交叉点为例:

在交叉过程中, 个体 p_1 的片段 $(g_{4,i}, g_{5,i}, g_{6,i})$ 和个体 p_2 的片段 $(g_{3,i}, g_{4,i}, g_{5,i})$ 将交换。对于 p_1 的剩余片段, $g_{1,i}$ 不与 $(g_{3,i}, g_{4,i}, g_{5,i})$ 冲突则直接填入; $g_{3,i}$ 存在冲突, $g_{3,i}$ 的映射基因因为 $g_{4,i}$ 存在冲突, $g_{4,i}$ 的映射基因因为 $g_{5,i}$ 仍存在冲突, $g_{5,i}$ 的映射基因因为 $g_{6,i}$ 不存在冲突, 则将 $g_{6,i}$ 填入后代个体 q_1 的相应位置。依此类推, 得到的后代个体 $p_{1,1,i,1}$: $[g_{1,i}, g_{2,i}, g_{6,i}|g_{3,i}, g_{4,i}, g_{5,i}|g_{7,i}, g_{8,i}]$, 和后代个体 $p_{1,2,i,1}$: $[g_{8,i}, g_{1,i}, g_{2,i}|g_{4,i}, g_{5,i}, g_{6,i}|g_{3,i}, g_{7,i}]$ 。在程序编写中, 位置点由计算机随机生成。

(3) 确定变异算子

此处采用扰动式变异的算子。在施工日期 x 的维度上, 设 $t_{j,i,x}$ 取值为 $[0, t_{j,i}]$ 。在施工任务 i 的维度上, 由于 $d_x(A_{i-1}, A_i)$

最小值为 $d(A_{i-1}, A_i) - \left[\sum_{j=1}^n t_{j,i-1,x-1} + \sum_{j=1}^n d_{i-1,x-1}(g_{j,i}, g_{j+1,i}) \right]$, 考虑到可能存在间隔数天的情况, 设其最大值为 32。同理, 设 $d_{i,x}(g_{j,i}, g_{j+1,i})$ 的取值为 $[0, 8]$ 。在施工段 j 的维度上,

$d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i})$ 的取值需分情况讨论。对于可以实施搭接操作的施工任务, 即当 $i = 3, 4, 5, 12, 13, 14$ 时, 设 $d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i})$ 取值范围为 $[-30\%t_{j,i-1}, 4]$; 对于没有搭接施工条件的其他施工任务, 设 $d_{j,x}(g_{j,i-1}, g_{j,i})$ 取值范围为 $[0, 4]$ 。

4 程序编写

在程序编写和试运行中发现, 如将用时表格的数据直接代入模型并保留一位小数进行运算, 算法会过早达到局部最优而不再进行有效迭代, 故保留两位小数进行计算, 并设计了 $\pm 5\%$ 的容许误差。具体流程如图 1 所示。

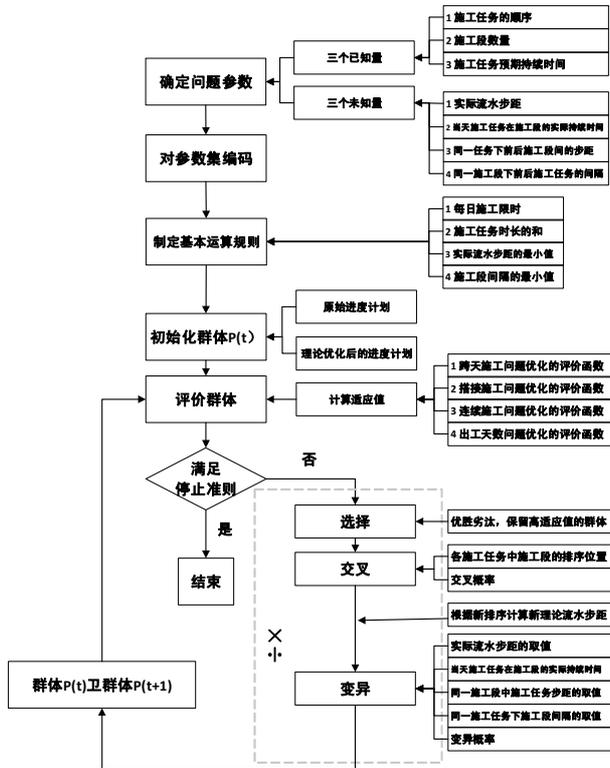


图 1 程序流程图

5 结果分析

此处应用 Python 语言, 对模型进行编程实现, 并迭代运行 200 次, 输出进度优化结果。程序优化后施工进度计划的适应度值 F 为 506, 原值为 348, 提升 45%, 具体体现在以下三个方面。

(1) 在施工日期 x 维度, 总工期显著减少

从项目整体看, 程序优化后施工进度计划的总工期为 10 天, 相对于原值 14 天工期, 项目的总工期减少了 28%, 达到此次优化的目标。同时从具体施工任务看, 程序优化后施工进度计划中跨天施工的情况出现了 34 次, 相对于原施工进度计划中出现的 35 次, 情况略有改善。此现象也从一定程度上说明老旧小区的供水管网改造项目中跨天施工的情况不可避免。

(2) 在施工段 j 维度, 空间利用率显著提高

施工段的空间利用率和闲置率, 可以通过施工段的实际施工天数来进行量化分析。经程序优化后的各施工段的平均施工天数为 6.9 天, 原值为 9.9。在总体工作量固定的前提下, 各

施工任务在各施工段上累计实施的天数减少, 则说明施工段的闲置时间减少, 空间利用率提高。

(3) 在施工任务 i 维度, 施工小组的工作效率显著提升 20% 的施工小组在程序优化下后其出工天数相比于原值有所减少, 主要得益于高效施工天数的增加。30% 的施工小组, 在其出工天数不变的情况下, 其高效施工的天数相比于原值更多, 施工更趋于集中在某几天进行。有 30% 的施工小组出工情况没有明显变化。另有 20% 施工小组的施工时间在程序优化后更加分散, 可理解为了整体最优而做出的局部妥协。

6 结语

本研究以 M 小区老旧供水管网改造项目为研究对象, 总结其施工进度计划存在的问题, 利用 Gupta 启发式算法对施工段进行排序, 并运用潘特考夫斯基法求出排序后的施工段的流水步距, 并依托理论计算, 在理想条件下对施工进度计划进行优化; 第二步, 以遗传算法为主要工具, 建立了涵盖施工段、施工任务、施工日期三个维度的施工时间计算模型及相应时间表, 通过在模型中设计适应度值、交叉算子和变异算子等参数, 依托计算机辅助, 对实际条件下的施工进度计划进行优化。希望对后续类似老旧小区管网改造项目的管理提供相关理论依据和相关经验, 不断提升施工企业的项目管理水平, 提升广大居民对老旧小区改造的满意度。

【参考文献】

[1] 丁燕杰. 城市更新视角下的老旧小区综合评估[J]. 城市勘测, 2022 (01): 14-19.
 [2] 宋健, 潘雅静. GIS+BIM 技术在老旧小区综合管线改造中的应用研究[J]. 城市勘测, 2022 (01): 171-173.
 [3] 陈焯, 张尚武, 施雨, 等. 适老化视角下的上海老旧小区更新与治理路径思考——以长宁路 396 弄工人新村社区调查实践为例[J]. 城市发展研究, 2021, 28 (01): 39-44.
 [4] 钟文. 市政供水管网改造分析[J]. 住宅与房地产, 2021 (24): 225-226.

[5] 晋良海, 谢慧云, 胡瑶, 等. 流水施工工期优化模型及其混合算法研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46 (04): 83-86.
 [6] 武庆良, 王文博. 无节奏流水施工进度计划绘制原理剖析及应用[J]. 科技经济市场, 2011 (02): 25-27.
 [7] 金福, 陈伟. 遗传算法之父——霍兰及其科学工作[J]. 自然辩证法通讯, 2007 (02): 86-93+112.
 [8] 张琳娜. 改进遗传算法在计算机数学建模中的应用研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29 (19): 31-34.

作者简介:

胡云豪(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为工程项目管理;
 姚佼, 副教授, 博士, 研究方向为交通运输工程;
 赵依凡, 本科, 主要从事软件开发工作。