

引用格式: 马彬, 肖俊阳, 吴新, 等. 配电网施工人力机械资源科学调配模型与方法 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(增刊 1): 36-46. MA Bin, XIAO Junyang, WU Xin, et al. Model and method for scientific allocation of human and mechanical resources in distribution network construction [J]. Southern energy construction, 2024, 11(Suppl. 1): 36-46. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.S1.07](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.S1.07).

配电网施工人力机械资源科学调配模型与方法

马彬¹, 肖俊阳¹, 吴新^{1,✉}, 罗金阁¹, 宋佳刚², 徐展鹏²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 随着配网建设投资规模屡创新高, 工程项目与日俱增, 配网工程项目的项目进度管控和项目管理面临着巨大压力, 为了实现全过程管控与资源相结合, 全面提升配电网施工管理水平, 配电网施工人力机械资源科学调配的研究具有重要意义。[方法] 首先, 通过调研梳理各流程环节的先后逻辑关系, 采用单代号有向网络图建立了配电网工程项目各工序的流程模型; 然后, 基于项目全过程工期影响因素的分析, 构建了施工阶段指导工期测算模型; 最后, 提出了基于遗传算法的配电网施工人力机械资源科学调配方法, 为项目全过程在时间维度上的不同种类的人力机械设备资源分配提供数据支持, 实现资源最优分配并预测工期。[结果] 根据某配网实际工程项目构建算例, 对所提方法的有效性进行了分析, 结果表明所提方法有效缩短了施工工期, 并且可得出重要资源的每日分布情况以及项目关键路径, 为进一步缩短工程工期提供理论指导。[结论] 可见, 所提方法有效实现了资源调配、辅助管理者决策的目的, 同时提高了资源的利用率, 间接减少不必要的资源成本, 提高项目整体的工作效率。

关键词: 配电网; 项目施工工期; 遗传算法; 优化模型; 科学调配

中图分类号: TM7; F426.61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)S1-0036-11

DOI: [10.16516/j.ceec.2024.S1.07](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.S1.07)

OA: <https://www.energychina.press/>

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Model and Method for Scientific Allocation of Human and Mechanical Resources in Distribution Network Construction

MA Bin¹, XIAO Junyang¹, WU Xin^{1,✉}, LUO Jing¹, SONG Jiagang², XU Zhanpeng²

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] With the increasing scale of investment in distribution network construction and the increasing number of engineering projects, there is considerable pressure on project progress control and project management in distribution network engineering projects. In order to achieve the control and management throughout the process and integrate resources, and to comprehensively improve the management level of distribution network construction, the research on scientific allocation of human and mechanical resources in distribution network construction is of great significance. [Method] Firstly, through research and analysis of the logical relationships of various process links, the activity-on-node directed network diagram was used to establish a process model for each process of the distribution network engineering project; then, based on the analysis of factors affecting the project construction period in the whole process, a model for guiding the calculation of the construction period in the construction phase was established; finally, a scientific allocation method for human and mechanical resources in distribution network construction based on the genetic algorithm was proposed. The method provided data support for the allocation of different human and mechanical equipment resources throughout the project process in the time dimension, enabling optimal resource allocation and construction period prediction. [Result] Based on a practical engineering project in a certain distribution network, a case study is constructed to analyze the effectiveness of the proposed method. The results show that the utilization of the proposed method can effectively shorten the construction period, and offer

收稿日期: 2023-10-07 修回日期: 2023-11-07

基金项目: 深圳供电局有限公司科技项目“配网工程项目全过程管控决策辅助研究”(090000KK52222063)

the daily distribution information of important resources and the critical path of the project, providing theoretical guidance for further shortening the engineering period. **[Conclusion]** It can be seen that the proposed method effectively achieves the goals of resource allocation and assisting managers in decision-making, while increasing the resource utilization rate, indirectly reducing unnecessary resource costs, and improving the overall work efficiency of the project.

Key words: distribution network; project construction period; genetic algorithm; optimization model; scientific allocation

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

近年来,随着碳达峰、碳中和目标的落地,可再生能源发电装机持续增长,为支撑新能源发展,“十四五”期间电网投资将会保持高位并向配网倾斜^[1-2]。以南方电网为例,《南方电网“十四五”电网发展规划》提出将配网建设列入“十四五”工作重点,规划投资达到 3 200 亿元,配网投资占比约为 48%^[3]。随着配网建设投资规模屡创新高,工程项目与日俱增,配网工程项目的项目进度管控和项目管理也面临着巨大压力。

配网工程具有投资小数量多、同时开工、点多面广、设备种类多、流程环节复杂等特点^[4-5]。由于配网工程在设计施工阶段投入了不同种类的机械设备和各种各样的职能工种,其工期进度管理也面临着资源调配、工序开展时间计划等多种复杂的难题^[6]。同时工程实施涉及多部门、多环节、多阶段,工程管理部门除了要与市政相关部门协调,还需兼顾各个环节的进度管控,避免由于个别环节的滞后造成整体工期的延长^[7-8]。进行项目工期进度控制时,若不能协调处理好各工种、机械之间的关系,很可能造成工程返工等现象出现,不仅影响成本、效率,还可能导致施工延迟、工程无法交付的问题出现,间接地影响了工程的未来收益^[9-10]。因此做好项目工期进度控制对于提高项目交付效率、提升资源利用率具有重要的意义。

针对项目管理及进度管控,国内外已有大量通用管理理论,可适用于多个不同产业的领域中。甘特图和关键路径法是目前应用较为广泛且普遍的项目工期进度管理工具,可以非常直观地表示不同工序的开展计划,并且可找出项目耗时最长的关键工序路径,为项目缩短工期和资源调配提供参考和借鉴^[11-12]。然而配网工程项目各项工序涉及的人机资

源复杂,工序先后逻辑繁杂,需要有针对性的管理理论和方法对其进行指导^[13]。文献[14]整理了电力工程施工项目的各流程工序,并采用关键路径法对项目工期进行缩减,然而没有考虑项目拟投入资源池的限制。文献[15]针对大型电厂 EPC 总承包工程提出了能够合理调配人力资源关键链调度机制与方法,然而缺乏对项目所有工序详细计划的探讨。文献[16]提出了基于关键链技术的配网项目进度控制方法,然而没有针对项目各工序的开展时间进行优先级排序,处理不同工序之间资源调配方面存在不足。文献[17-18]采用优先级评价和排序的方法制定电力配网工程的各项工序开展计划,然而没有考虑不同工序并行开工的情况。综上,现有的关于配网施工项目工期管理的研究工作尚未存在能将项目全过程全工序管控与资源限制和分配相结合,并以具体数据为支撑对项目实施直接进行指导的研究成果。

为此,文章从现行的配网项目工程实施全流程环节出发,对影响项目工期的因素进行分析筛选。在此基础上,针对与工程量、投入资源数量密切相关的施工阶段,文章施工阶段指导工期的测算模型。然后,考虑在资源有限的约束条件下最小化整体施工工期,提出基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的配网基建项目人力机械资源优化分配模型,为项目施工阶段在时间维度上的不同种类的人力机械设备资源分配提供数据支持。最后,以某配网工程项目为例,对文章所提方法进行算例分析,分析验证所提方法的有效性。

1 配网工程项目实施全过程工期影响因素

1.1 配网工程项目实施全过程环节分类

为了做好对配网工程项目实施的工期管控,供电局工程部需评估在下达项目投资计划后,施工单

位在有限资源池内对配网工程项目承接的承载力,测算配网工程项目的全过程工期。从供电局配资部下达配网工程项目投资计划开始,直到项目结算完成,项目的全过程环节主要可以分为4个阶段,分别为前期准备阶段、设计阶段、施工阶段和后期流程手续阶段。前期准备阶段和后期流程手续阶段归为流程手续类,设计阶段和施工阶段可以归为设计施工类。如图1所示。

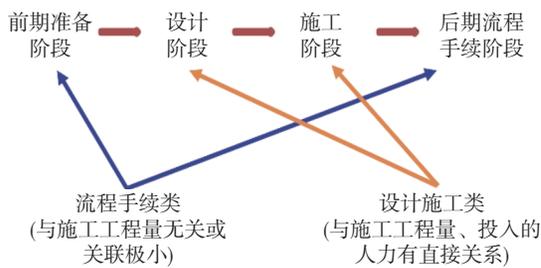


图 1 项目流程环节分类

Fig. 1 Classification of project process links

1)前期准备和后期流程手续阶段

前后期阶段主要为流程手续,包括物资需求计划录入、物资领用、批文办理及审批、技术交底、工作票办理、项目结算和物资退料等工序,这些工序耗时基本固定,与施工工程量无关或关联极小。尽管这些流程手续类环节需要必要的人力资源来完成,但却不能因人力资源投入的增加而缩短耗时。

2)设计阶段

设计阶段在一定程度上受工程量影响,主要在管线勘测和设计现场勘察阶段受影响较大,针对单个项目时,人员投入与耗时关系不大;同时面对大量项目时,人员投入与耗时关系紧密。

3)施工阶段

施工阶段的总工期与项目工程量直接相关,具体耗时由施工单位投入的人力物力资源决定,由于客观上一定人力物力的施工效率相对固定,因此通过调节资源的投入可进行工期进度的调节。

1.2 配网工程项目过程进度的影响因素

配网工程项目进度的主要影响因素有以下几个:项目的工程量、项目所投入的人力物力数量(即资源)、施工效率、项目流程手续的基本固定时间,以及施工的客观条件。不同因素对项目过程进度影响程度不同:

1)项目工程量

主要按项目的规模、投资以及实施难易程度等内容共同确定,直接影响项目的进度工期。

2)项目所投入的人力、物力数量(尤其指施工器具、施工物资等)

此部分为动态可调节部分,由施工方提供的可调配资源池确定,直接影响项目的进度工期,合理的资源调配方式可最大化减小项目的工期耗时。

3)施工效率

一定数量的人力完成一定工程量所需要的时间,直接影响项目的进度工期,此部分基本固定或受施工的客观条件影响。

4)项目流程手续所需要花费的基本固定的时间

此部分视不同地市供电局业务流程所确定,耗时基本固定。

5)施工的客观条件

包括施工的环境条件、施工内容、施工方式、施工作用的材料、征地、青苗赔偿、设备供应等,直接影响项目的工期进度,由客观条件决定。

配网工程项目主要因素与工期之间的关系如图2所示。

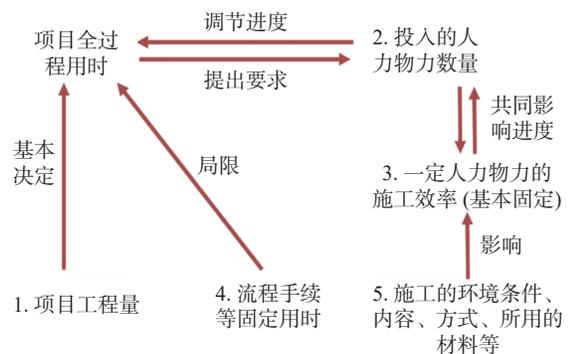


图 2 项目主要因素与工期之间的关系

Fig. 2 Relationship between main factors of the project and the construction period

综上,项目总工程量基本决定了项目全过程的总工期,并对需要投入的人力物力(资源)数量提出要求;流程手续等具有固定用时特点的流程环节限制了项目全过程总工期的必要用时;投入的资源数量和一定人力物力下的施工效率共同影响了可变动环节的总耗时。此外,施工的效率受环境条件、方式、工艺等因素影响,然而这部分因素随机性过大,且难以通过人为的人力资源调整来降低客观条件的影响。因此为了从人为可控的角度缩短项目全过程中程用时,

本文重点针对配网工程施工阶段投入的人力物力数量及工期计划安排开展研究工作, 在进行工期测算时, 不考虑影响工期的客观条件。

2 基于 GA 的施工人机资源科学调配模型

为了缩短项目全过程用时, 本文针对项目实施全过程中关键的施工阶段构建人力机械资源科学调配模型。

2.1 假设条件

为了更直观地用数学的方式描述配网工程项目人力机械资源调配问题, 本文对问题模型作以下假设:

1) 项目部分工序之间存在固定的串并行关系, 而单个工序的施工工艺均为串行关系。

2) 各工序从开始到结束其持续时间具有连续性, 项目工序均属于非中断式, 一旦开始则不允许停工, 直到完成该工序为止, 持续时间最小单位为整数天。

3) 各工序之间的依存关系为完成-开始型且时滞为 0, 禁止出现循环回路。

4) 各工序存在一种或多种可行执行工期, 执行工期取决于该工序的工程量与人机资源投入。

5) 在工序开始执行后, 不允许中途变更人机资源的投入。

6) 从单个工序上看, 在其持续时间内, 各时间断面上人机资源使用量是服从均匀分布的。

2.2 问题描述

由于施工阶段的某一项工序通常需要多个工种甚至机械设备才能完成, 难以直接建立施工环节用时与投入的人力物力数量之间的数学关系, 因此本文提出施工标准配置的概念, 其定义为“完成某一项工程施工项目建议的施工人员与机械设备组合”。例如: “电缆管道工程(人工、软管)”工序的“破坏原貌”工艺, 标准配置组的人力机械组成为“普工 2 人, 风炮机操作员 1 人, 风炮机 1 台”。实际施工时, 1 名风炮机操作员操作风炮机破坏路面, 2 名普工负责清扫路面, 即可完成该工艺。根据对施工单位的实地调研结果及供电局过往项目各工序及工艺的投入人员情况, 本文整理了配网工程项目各工序及工艺的标准配置组人员及机械设备组成, 如附录(详见本文 OSID 二维码)。基于此, 施工阶段指导工期可根据公式计算得出:

$$D = \sum_{i \in \Phi_c} \frac{W_i}{U_i G_i} \quad (1)$$

式中:

D ——施工阶段的总工期;

Φ_c ——项目关键路径上的工序集合;

W_i ——关键路径上第 i 项工程施工项目的需完成的总工程量;

U_i ——一组标准配置在一天内能完成的关键路径上第 i 项工程施工项目的工程量;

G_i ——关键路径上第 i 项工程施工项目所投入的标准配置组数。

为了描述项目各工序之间固定的串并行关系, 本文采用单代号有向网络图(Activity-On-Node, AON) $G=(V, E)$ 描述配网基建项目人力机械资源优化分配问题, 如图 3 所示。其中, V 表示项目的工序集合, 有向弧 E 表示工序之间的逻辑关系集合。

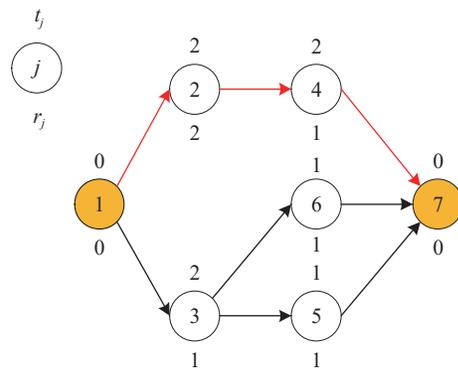


图 3 单代号网络图

Fig. 3 Activity-on-node network diagram

项目 P 包含 N 项工序, 工序 1 和工序 N 分别为唯一开始和唯一结束的虚拟工序, 工序 j 的工期为 t_j , 虚拟工序的工期为 0, 非虚拟工序的工期为非 0 整数。工序之间存在紧前的时序逻辑关系, 即在有向网络图 G 中, 如果工序 a 和工序 b 之间存在有向弧 $(a, b) \in E$, 则工序 b 必须在工序 a 完成后才能开始, 为不失一般性, 假定工序 j 的紧前工序集合 P_j 中工序的编号小于 j ; 完成项目需要 R 类可更新资源, 即资源在任意时间断面上是受限制的, 但被工序消耗的资源随着时间的推移会得到更新, 其中资源 k 的总供应量为 R_k , 执行工序 j 时对资源 k 的需求量为 r_{jk} , 虚拟工序不占用资源, 项目在离散时间断面上对任意资源的需求量不超过该资源的总供应量。

2.3 优化模型

为了在施工方有限资源池的约束下最小化施工阶段的整体工期, 本文构建施工人机资源科学调配优化模型, 优化目标设置为:

$$\min T = \max_{j \in V} \{dx_{jd}\} \quad (2)$$

式中:

V ——由 N 个工序组成的集合, $V = \{1, 2, \dots, j, \dots, N\}, j \in V$;

d ——离散时间, $d = [1, 2, \dots, \bar{T}]$, 其中 \bar{T} 为合同工期上限;

x_{jd} ——第 d 个离散时间的第 j 个工序的状态布尔变量, 1 表示该时间该工序处于工作状态, 0 则相反。

式(2)表示使得最后完成的工序工期取最小值。约束条件设置为:

$$\sum_{d \in D} x_{jd} = t_j \quad (3)$$

$$t_j x_{jd} - t_j x_{j(d+1)} + \sum_{p=d+2}^T x_{jp} \leq t_j \quad (4)$$

$$t_i x_{jd} \leq \sum_{p=1}^{d-1} x_{ip} \quad (5)$$

$$dx_{jd} \leq \bar{T} \quad (6)$$

$$\begin{cases} r_{jk} = c_j h_{jk} \\ h_{jk} \leq r_{jk} \leq \omega_j h_{jk} \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V} r_{jk} x_{jd} \leq R_k \quad (8)$$

$$\omega_j = \frac{\psi_j}{\kappa_j} \leq c_j t_j \quad (9)$$

式中:

D ——时间离散化集合, $d \in D$;

t_j ——执行工序 j 的耗时(工期);

t_i ——紧前工序 i 的耗时(工期);

r_{jk} ——执行工序 j 所需 k 类资源的数量;

c_j ——执行工序 j 的标准配置组数;

h_{jk} ——工序 j 所需 k 类资源的标准配置数量;

ω_j ——执行工序 j 的效率参数;

k ——资源种类集合;

R_k —— k 类资源的供应数量;

ψ_j ——工序 j 的工程量;

κ_j ——工序 j 一组标准配置的单位工程量。

上述模型中, 式(3)~式(6)为时序约束, 其中式(3)表示任意工序必须在其工期内完成执行; 式(4)表示任意工序的施工过程不允许中断; 式(5)表示工序的紧前约束; 式(6)表示任意工序都不应晚于项目结束时间 \bar{T} ; 式(7)~式(9)为资源约束, 其中式(7)表示任意工序各类资源需求与投入标准配置组数呈线性关系; 式(8)表示任意工序任意时刻的各类资源与资源池的约束关系; 式(9)表示任意工序的工程量与工期和投入标准配置组数的关系约束。

2.4 算法设计

式(4)、式(5)、式(8)、式(9)存在离散决策变量乘积项, 使得该模型呈现非凸非线性的结构, 这类问题可归为混合整数非线性规划(Mixed Integer Nonlinear Programing, MINLP)问题, 难以求得全局最优解。为了求解上述施工人机资源科学调配优化模型, 获得一个满足模型约束的满意解, 本文采用启发式算法——GA 对模型进行求解。

GA 是一种受到生物进化思想启发的优化算法, 被广泛用于组合优化、参数调优等领域, 它模拟了生物进化中的遗传和自然选择过程, 通过迭代逐步优化问题的解。遗传算法的基本思想是从一个初始的随机解集合开始, 通过模拟自然界中的进化过程, 逐步进化出更优的解^[19-20]。具体步骤如下:

2.4.1 基因编码

染色体是 GA 最基本的要素, 其编码形式对算法整体的搜索能力至关重要。本文采用双链表结构的编码方式, 两条链表分别代表工序链表 J 和工期链表 T 。一个双链表结构的染色体 L 表示为:

$$L = \begin{bmatrix} J \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 & \cdots & j_n \\ t_1 & t_2 & \cdots & t_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:

$J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ ——工序链表, 是满足紧前约束的全部工序的排列;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ——工期链表, 是工序链表 J 对应工序执行工期的向量。

1) 工序链表 J 的生成

各项工序之间具有既定的时序优先关系, 为了避免随机生成的工序链表出现不可解的情况, 工序链表的生成过程需添加实际问题的紧前约束。

Step1: 对工序流程图中的各工序进行初次编码, 进一步地, 以工艺框图为最小单位扩展工序流程图, 并添加开始与结束虚工序构成流程总图, 并对各流程进行再编码。

Step2: 用紧后关系矩阵描述单代号网络图的时序逻辑关系, 如图 4 所示, 其中, 工序 1 与工序 7 分别代表项目开始与结束, 为虚工序。

	1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0

图 4 紧后关系矩阵

Fig. 4 Relation matrix of immediate successor

Step3: 随机生成工序优先权值列表。每一个工序均有独一无二的优先权值, 优先权值大者优先执行, 而工序 1 与工序 7 代表开始与结束, 具有固定顺序, 不受随机性影响。

Step4: 生成符合时序逻辑关系要求的工序编码。

符合时序逻辑关系要求的工序编码流程如图 5 所示。

2) 工期链表 T 的生成

工期链表 T 表示工序链表 J 中对应的可行执行工期向量, 工期链表 T 与工序链表 J 两条链表的基因位一一对应。

2.4.2 基因解码

采用串行进度生成机制对染色体进行解码, 当工序的调度顺序和对应的可行工期给定后, 采用串行调度生成机制进行解码, 可得到一个可行解。

2.4.3 初始化种群和适应度函数

初始群体的产生包括两部分, 一部分为每个工序对应的优先权值, 另一部分为每个工序对应的执行工期。本文初始种群采用随机选取的方式, 产生满足时序优先关系的染色体工序编码。

2.5 算法步骤

基于 GA 的施工人机资源科学调配的主要流程如下:

Step1: 初始化算法参数, 如种群规模 P 、最大迭代次数 \max_Gen 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 等。

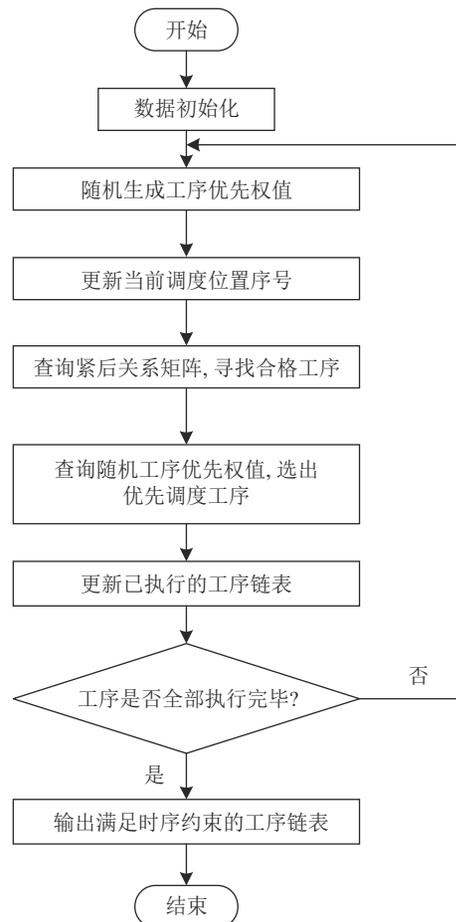


图 5 符合时序逻辑关系要求的工序编码流程

Fig. 5 Procedure coding flow that meets the requirements of chronological logic relations

Step2: 采用双链表结构的编码方案。工序链表符合时序优先关系, 工期链表是各工序对应的可行工期向量。

Step3: 采用串行调度生成机制进行解码, 得到满足时序约束和资源约束的可行解。

Step4: 将任意生成的 n 个染色体定义为初始种群, 计算种群中个体的适应度。

Step5: 判断是否满足收敛条件或判断迭代次数是否大于最大迭代次数。

Step6: 若不满足结束条件, 则迭代次数 $Gen=Gen+1$, 执行选择、交叉、变异的遗传操作, 并返回 Step2 继续执行算法, 直至满足结束条件。

迭代结束后, 输出种群中最优的染色体作为问题的全局满意解。

算法的主要流程图如图 6 所示。

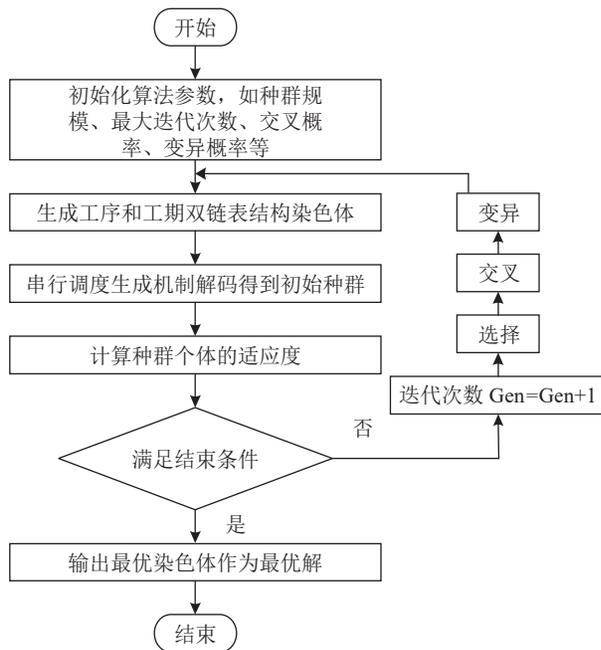


图 6 基于 GA 的施工人机资源科学调配的主要流程

Fig. 6 The main process of scientific allocation of human and mechanical resources for construction based on GA

3 算例分析

以某配网工程项目为例,采用本文所提基于 GA 的施工人机资源科学调配方法进行算例分析,验证所提方法的有效性。通过调研供电局及施工单位过往的配网工程项目,梳理配网工程项目各工序流程、各工序标准配置组及其效率参数,各工序的逻辑顺序关系图如附录(详见本文 OSID 二维码)。

3.1 主要工程量

配网工程项目算例的主要工程量为:电缆沟(砖砌)6 m,电缆管道(人工、软管)38 m,非开挖电缆管道(顶管)66 m,电缆井(硬质土)2 座,电缆敷设(电缆沟)17 m,电缆敷设(排管)356 m,1 kV 终端头 12 套,10 kV 终端头 3 套,户外低压开关箱(无基础)1 台,杆塔工程(硬质土、杠)1 座,导线架设 88 m,台架式变压器(无基础)1 座,户外电气设备安装 1 台,外墙装修 178 m²,室内照明安装 1 套,内墙装修 178 m²,配电线路单回路断开隔离开关引(流)线 2 次,低压发电 2 次,干式变压器安装及接地工程(双层配电房)1 台,环网开关柜安装及接地工程(双层配电房)5 面,室内低压开关柜安装及接地工程(双层配电房)4 面,阳台栏杆、楼梯扶手安装 18 m,母线槽安装 10 m,配电线路单回路搭接隔离开关引(流)线 2 次,防静电

地板 26 m²,智能化设备安装及调试 1 套,电房防火门 4 m²,安健环 2 套,自流坪 52 m²,电气试验 1 d,主站联调 1 d。

3.2 资源概况

配网工程项目算例的施工方拟投入人员 62 人,其中普工 10 人,挖掘机司机 1 人,吊车司机 1 人,风炮机操作员 2 人,钻机/顶管机操作员 1 人,绞磨机操作员 1 人,混凝土工 1 人,高空作业技术工 6 人,电工 10 人,焊工 2 人,钢筋工 2 人,木工 2 人,架子工 6 人,装修工 6 人,试验人员 3 人,联调人员 2 人,智能化设备调试人员 2 人,管理人员 4 人;施工方拟投入机械 5 辆(台),其中挖掘机 1 辆,吊车 1 辆,风炮机 1 台,钻机/顶管机 1 台,绞磨机 1 台。

3.3 项目施工最优工期及施工计划调度

根据配网工程项目算例各工序的工程量及施工方拟投入的资源池,各工序的效率参数与一组标准配置人员组成按附录(详见本文 OSID 二维码)设置,分别采用 2 种策略进行施工计划调度:

1) 本文所提配电网施工人机资源科学调配方法。

2) 串行施工计划调度策略,即不考虑工序同步开展,各工序按先后顺序依次开展,完成上一项工序后再开展下一项工序。

在本文所提方法中,GA 的参数如表 1 所示。

表 1 GA 算法参数

Tab. 1 Parameters of GA

参数	数值
种群数/个	100
变异概率	0.80
交叉概率	0.08
最大迭代次数/次	200

首先,采用本文所提方法求解配网工程项目施工人力机械资源科学调配模型,记录 GA 迭代过程最优工期结果的变化情况,GA 优化过程迭代曲线如图 7 所示。由图 7 可见,随着迭代次数的增加,最优工期结果不断下降,在 27 次迭代之后达到稳定值 38 d。

然后,通过对 GA 算法求解的最优染色体解码,得到本文所提方法求解所得的最优调度的各项工序施工计划甘特图、各项工序的执行工期,以及每日重要资源分布情况,如图 8 和图 9 所示。

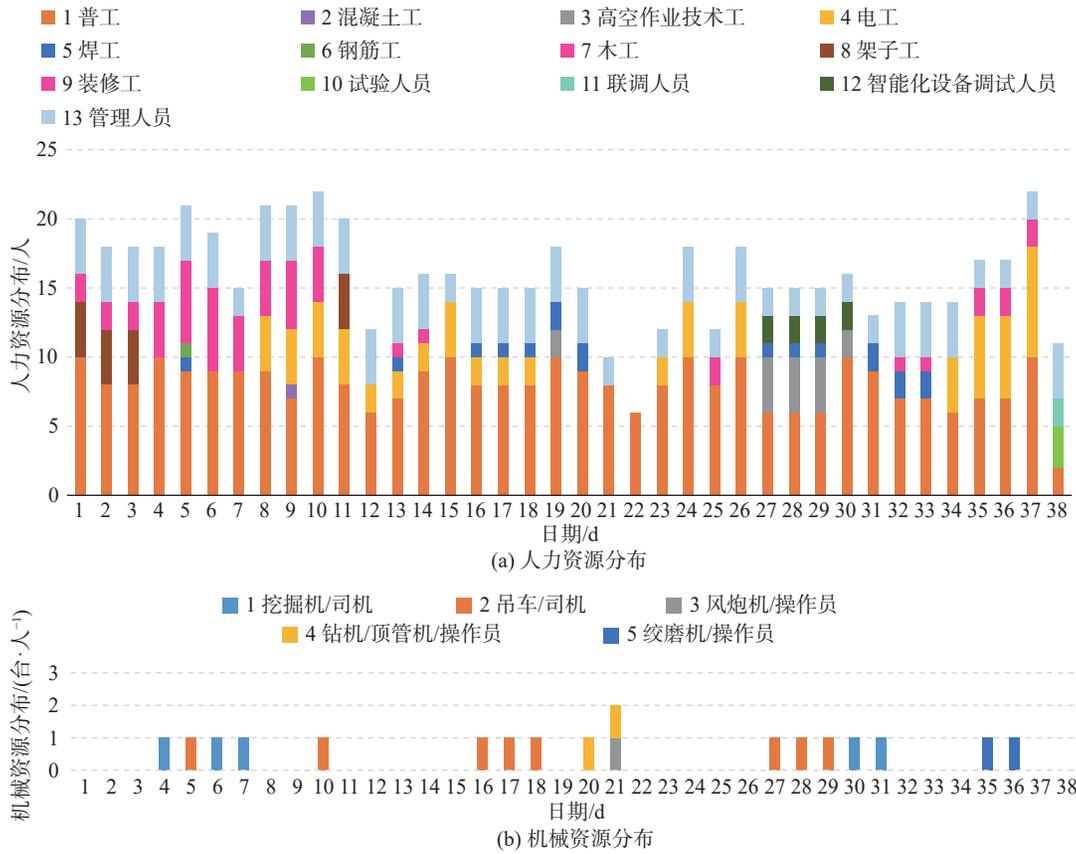


图 9 施工计划每日资源分布

Fig. 9 Daily resource distribution of the construction plan

表 2 2 种策略下施工工期及最大日投入人机资源结果

Tab. 2 Construction period and maximum daily investment of human and mechanical resources under two strategies

调度策略	施工工期/d	最大日投入人力资源/人	最大日投入机械资源/台
串行策略	87	16	1
所提方法	38	23	2

网开关柜安装及接地工程,室内低压开关柜安装及接地工程,干式变压器安装及接地工程,母线槽安装,防静电地板,电气试验工序的工期已为最短的 1 d,无法通过加大人员和机械资源的投入来缩短项目工期。根据关键路径,如需进一步缩短项目工期,可在外墙装修,断开隔离开关引(流)线,阳台栏杆、楼梯

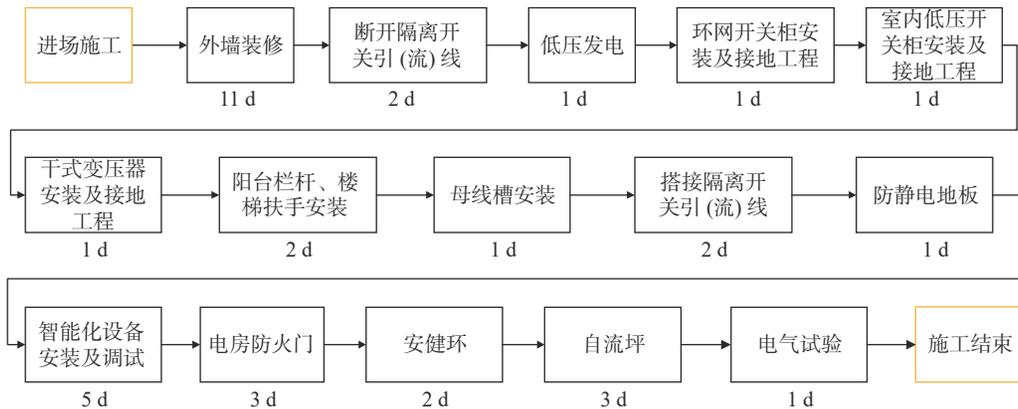


图 10 项目关键路径

Fig. 10 Project critical path

扶手安装, 搭接隔离开关引(流)线, 智能化设备安装及调试, 电房防火门, 安健环, 自流坪等关键工序上加大人员和机械资源的投入, 人员资源包括普工, 电工, 焊工, 架子工, 装修工, 智能化设备调试人员, 管理人员。

4 结论

本文工作在对项目的环节、耗时、资源梳理的基础上, 模型和算法能自动生成精确到工作日级的资源调配计划, 有效指导项目管理人员进行资源调配, 辅助管理者的决策, 大大提高资源的利用率, 减少资源的闲置时间, 间接减少不必要的资源成本, 提高项目整体的工作效率。本文的先进性和主要工作如下:

1) 通过调研既有的配网项目工程全过程管控流程图, 掌握当前配网项目的过程流程环节, 梳理各流程环节的先后逻辑关系, 并据此建立项目流程模型。

2) 将资源-耗时模型嵌入项目流程模型中的每个流程环节, 为项目全过程在时间维度上的不同种类的人力机械资源分配提供数据支持。

3) 建立配网基建项目人力机械资源优化分配模型, 以最小化项目工期为目标函数, 结合人力机械资源池中设置的资源数量, 对施工企业的人力机械资源进行优化分配并预测工期, 为项目施工进度把控提供策略支持。

参考文献:

- [1] 国网能源研究院有限公司. 国内外电网发展分析报告 2021 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
State Grid Energy Research Institute Co., Ltd.. Analysis report on the development of domestic and foreign power grids 2021 [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.
- [2] 王骥鑫, 卢保通, 王蓓蓓, 等. 配额制背景下基于区块链的可再生能源电力追踪方法 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(23): 11-19. DOI: 10.7500/AEPS20211214006.
WANG Q X, LU B T, WANG B B, et al. Blockchain-based renewable energy power tracking method in background of renewable portfolio standard [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(23): 11-19. DOI: 10.7500/AEPS20211214006.
- [3] 李文华. 南网“十四五”电网发展规划出炉 [N]. 中国能源报, 2021-11-17.
LI W H. Southern power grid's 14th five year plan for power grid development has been released [N]. *China Energy News*, 2021-11-17.
- [4] 冯开健, 库陶菲, 袁祖伟, 等. 南海岛屿配网工程计价体系研究初探 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(增刊 1): 59-64. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.009.
FENG K J, KU T F, YUAN Z W, et al. Preliminary research on the pricing system of distribution network project in South China Sea Islands [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(Suppl.1): 59-64. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.009.
- [5] 邓国豪. 装配式配电站在配电网建设中的应用探讨 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(增刊 1): 59-61. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.011.
DENG G H. Discussion on the application of assembled distribution station in distribution network construction [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(Suppl.1): 59-61. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.011.
- [6] 邓婷婷. 建筑工程施工进度管理优化设计研究——以亳州市某医院急诊大楼项目为例 [J]. *砖瓦*, 2022(4): 114-117. DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.2022.04.016.
DENG T T. Research on optimization design of construction schedule management in building engineering: taking the emergency building project of a hospital in Bozhou city as an example [J]. *Brick-tile*, 2022(4): 114-117. DOI: 10.16001/j.cnki.1001-6945.2022.04.016.
- [7] 张斯淇, 郑翔天, 王小玄. 配网工程项目管理系统的设计与实现 [J]. *电子技术与软件工程*, 2023(3): 243-246.
ZHANG S Q, ZHENG X T, WANG X X. Design and implementation of distribution network engineering project management system [J]. *Electronic technology & software engineering*, 2023(3): 243-246.
- [8] 官嫣嫣, 庄佳才. 基于风险管理的海上风电进度管理方法研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 34-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005.
GUAN Y Y, ZHUANG J C. Research on schedule management method of offshore wind power based on risk management [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 34-39. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005.
- [9] 彭军武. 工程项目工期、进度与成本关系的分析 [J]. *化工管理*, 2021(15): 64-65. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.15.032.
PENG J W. Analysis of the relationship between construction period, schedule and cost [J]. *Chemical enterprise management*, 2021(15): 64-65. DOI: 10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.15.032.
- [10] 张国宗, 范栩侨, 罗千买, 等. 基于关键链的工程项目群工期管理模式研究 [J]. *项目管理技术*, 2021, 19(6): 24-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4313.2021.06.005.
ZHANG G Z, FAN X Q, LUO Q M, et al. Research on construction period management mode of engineering project

- group based on critical chain [J]. *Project management technology*, 2021, 19(6): 24-31. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4313.2021.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4313.2021.06.005).
- [11] WREN D A. Implementing the Gantt chart in Europe and Britain: the contributions of Wallace Clark [J]. *Journal of management history*, 2015, 21(3): 309-327. DOI: [10.1108/JMH-09-2014-0163](https://doi.org/10.1108/JMH-09-2014-0163).
- [12] HU X J, CUI N F, DEMEULEMEESTER E, et al. Incorporation of activity sensitivity measures into buffer management to manage project schedule risk [J]. *European journal of operational research*, 2016, 249(2): 717-727. DOI: [10.1016/j.ejor.2015.08.066](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.066).
- [13] 陈骥, 孙成秀. 电力工程施工阶段的进度控制 [J]. *科学技术创新*, 2017(14): 241. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1328.2017.14.222](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1328.2017.14.222).
CHEN J, SUN C X. Progress control during the construction phase of power engineering [J]. *Scientific and technological innovation*, 2017(14): 241. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1328.2017.14.222](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1328.2017.14.222).
- [14] 魏圣亭. 电力工程施工阶段的进度控制——以交城三角 110 kV 变电站电气安装工程为例 [D]. 太原: 山西大学, 2015. DOI: [10.7666/d.D789685](https://doi.org/10.7666/d.D789685).
WEI S T. Power engineering construction stage progress control—the case of Jiaocheng San Jiao 110 kV substation electrical installation project [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2015. DOI: [10.7666/d.D789685](https://doi.org/10.7666/d.D789685).
- [15] 袁丽雅. 大型电厂 EPC 总承包工程中采购进度管理研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(增刊 1): 237-241. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.043](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.043).
YUAN L Y. Research on procurement schedule management of large-scale power plant EPC project [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(Suppl.1): 237-241. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.043](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.043).
- [16] 王路. X 新区高可靠性配电网项目进度管理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2020.004321](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2020.004321).
WANG L. Research on project schedule management of high reliability distribution network project in X New Area [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. DOI: [10.27014/d.cnki.gdnau.2020.004321](https://doi.org/10.27014/d.cnki.gdnau.2020.004321).
- [17] 黄智豪. 基于优先级和关键链的电力配网工程多项目进度计划研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020. DOI: [10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.001817](https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.001817).
HUANG Z H. Research on multi project schedule of power distribution network engineering based on priority and critical chain [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. DOI: [10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.001817](https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnlu.2020.001817).
- [18] 谢依霖. 基于优先级评价的城镇配电网多项目进度管理研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2022. DOI: [10.27456/d.cnki.gyndu.2022.001089](https://doi.org/10.27456/d.cnki.gyndu.2022.001089).
XIE Y L. The research of urban distribution network project schedule based on priority evaluation [D]. Kunming: Yunnan University, 2022. DOI: [10.27456/d.cnki.gyndu.2022.001089](https://doi.org/10.27456/d.cnki.gyndu.2022.001089).
- [19] 葛海麟, 陈皓勇, 刘飞. 基于遗传算法的区域电力和供热系统优化 [J]. *南方能源建设*, 2017, 4(1): 25-30,37. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.004).
GE H L, CHEN H Y, LIU F. Optimization of district electricity and heating system based on genetic algorithm [J]. *Southern energy construction*, 2017, 4(1): 25-30,37. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.004).
- [20] 王守相, 张善涛, 王凯, 等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行 [J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(1): 125-132. DOI: [10.16081/j.epae.201911029](https://doi.org/10.16081/j.epae.201911029).
WANG S X, ZHANG S T, WANG K, et al. Multi-objective optimal operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price [J]. *Electric power automation equipment*, 2020, 40(1): 125-132. DOI: [10.16081/j.epae.201911029](https://doi.org/10.16081/j.epae.201911029).

作者简介:



马彬

马彬(第一作者)

1977-, 男, 电气工程硕士, 主要从事配电网规划建设、运行等相关工作 (e-mail) m-ba@163.com。

肖俊阳

1988-, 男, 电气工程硕士, 主要从事配电网基建相关工作 (e-mail) 920455877@qq.com。



吴新

吴新(通信作者)

1988-, 男, 电气工程学士, 主要从事配电网基建相关工作 (e-mail) 694737968@qq.com。

罗金阁

1990-, 男, 电气工程硕士, 主要从事配电网基建相关工作 (e-mail) rayhuangzjtrash@126.com。

宋佳刚

1988-, 男, 工程师, 电气工程硕士, 主要从事配电网建设、规划等相关研究工作 (e-mail) songjiagang@gedi.com.cn。

徐展鹏

1997-, 男, 电气工程硕士, 主要从事配电网建设、规划等相关研究工作 (e-mail) zpxu1025@163.com。

(编辑 赵琪)