

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.07.013

基于 NSGA-II 与方案优选的机场航站楼 大跨度钢结构多目标优化研究

王星星¹, 于竞宇¹, 毛江峰², 丁文轩², 周文武², 黄松²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中建三局第二建设工程有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:为优选出机场航站楼大跨度钢结构最佳施工方案, 实现施工工期短、成本低和质量高的综合优化目标, 文章以非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)与方案优选为基础, 结合建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术和工作分解结构(work breakdown structure, WBS)技术, 构建兼具优化与施工仿真模拟的大跨度钢结构多目标优化体系; 以某军民合用机场为例, 应用该体系确定该工程航站楼大跨度网架结构安装采用分块安装法, 优选出的施工方案较优化前不仅质量水平保持在较高的 0.95, 而且工期缩短 22 d, 成本减少 57 625 元, 进一步验证了该体系具有很好的可行性与有效性。研究结果可为科学合理地确定大跨度钢结构施工方案提供依据, 并有助于提高机场航站楼施工管理水平, 为类似工程提供参考。

关键词:大跨度钢结构; 多目标优化; 非支配排序遗传算法(NSGA-II); 建筑信息模型(BIM); 工作分解结构(WBS)

中图分类号:TU391 文献标志码:A 文章编号:1003-5060(2023)07-0941-09

Multi-objective optimization of large-span steel structure of airport terminal based on NSGA-II algorithm and scheme evaluation

WANG Xingxing¹, YU Jingyu¹, MAO Jiangfeng²,
DING Wenxuan², ZHOU Wenwu², HUANG Song²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. The Second Construction Engineering Co., Ltd. of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) and scheme evaluation, combined with building information modeling (BIM) and work breakdown structure (WBS), this paper constructs a multi-objective optimization system of long-span steel structure with both optimization and construction simulation. Based on this, the optimal construction scheme of long-span steel structure of airport terminal building is determined to achieve the comprehensive optimization goal of short construction period, low cost and high quality. Taking a military-civilian airport as an example, the system is used to determine that the large-span grid structure of the terminal building of the project adopts the block hoisting method. At the same time, the optimized construction scheme is compared with that before optimization. While the quality is maintained at a relatively high level of 0.95, the construction period is shortened by 22 days and the cost is reduced by 57 625 yuan. It further verifies the feasibility and effectiveness of the system. The study can provide support for the scientific and reasonable determination of the large-span steel structure construction scheme, help to improve the

收稿日期:2021-10-29; 修回日期:2022-04-25

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(JZ2021AKKZ0333); 合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2020JSKF0203)

作者简介:王星星(1995—), 女, 安徽寿县人, 合肥工业大学硕士生;

于竞宇(1984—), 女, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者: E-mail: yujingyu@hfut.edu.cn.

level of airport terminal construction management, and provide reference for similar projects.

Key words: large-span steel structure; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II); building information modeling(BIM); work breakdown structure(WBS)

0 引 言

军民合用机场是军民融合^[1]的重要领域,目前我国现有的军民合用机场近 60 个,占到全国运输机场的 30%左右,并且许多地区都有军民合用改建计划^[2]。其中机场航站楼为满足客载量大、视野宽阔、造型美观、安全性高等需求,多采用大跨度钢结构;然而,该结构空间跨度大、结构复杂、节点和支座数量多,同时军民合用机场建设环境限制条件多,使得施工难度增大、不确定性因素增多,为了有效控制工期、成本、质量等目标,需要确定最佳施工方案。因此,对大跨度钢结构施工方案进行优选研究十分必要。

在实际工程中,大跨度空间结构施工方案的选择通常根据施工经验确定,对多种施工方案的优选缺乏系统可行的评估方法^[3]。相关研究中对施工方案的优选多从施工成本、工期、难易程度、安全性等方面确定评价指标,利用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、模糊综合评价法、比例分析法等评价施工方案。如文献[4]从经济层面考虑多方面因素,并运用多因素综合评价系统优选出最经济的地铁施工方案;文献[5]将 AHP 与比例分析法相结合,对自然灾害破坏区域冷弯型钢结构施工备选方案进行评估;文献[6]以传统的价值工程理论为基础,结合模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP),为建设项目投资方案的选择提供科学的方法体系;文献[7]提出基于 Vague 集的施工方案模糊综合评价法,构建大跨度钢结构施工方案综合评价指标体系,以优选施工方案;文献[8]考虑钢网架施工工期、成本、质量及安全 4 个因素,构建钢网架施工方案选择的模糊网络分析模型。

上述研究中,仅对大跨度钢结构的常用施工方法进行评价和优选,而对各备选方案进行工作分解,考虑各方案具体施工工序及机械、设备等使用情况,进行多目标优化的相关研究很少。大跨度钢结构安装工程中存在构件数量多、工程量庞大、参与方众多等问题,使得施工数据难获取、信息难共享。而建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术作为一个可视化的信息管理工具,具有工程量自动计算、虚拟仿真、实时

监控工程数据等功能,可促进项目的不同参与方在同一个数据平台传递和使用工程信息^[9]。因此,本文构建基于非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)与方案优选的大跨度钢结构多目标优化体系,利用 BIM 技术和工作分解结构(work breakdown structure, WBS)技术对施工方案进行分析,确定各方案施工工序以及各工序工期、成本等基础数据;建立多目标优化数学模型,采用 NSGA-II 与灰色关联分析对模型进行求解,以确定最优施工方案。

1 大跨度钢结构施工多目标优化体系

1) 拟定大跨度钢结构安装备选施工方法。大跨度空间钢结构常用的施工方法有高空散装法、分条或分块安装法、胎架滑移法,以及整体吊装法、整体提升法和整体顶升法等^[10]。为优选出最佳施工方法,首先要掌握各方法的具体内容和施工特点,再根据结构受力和构造特点,结合现场施工条件,拟定适合该工程的备选方法,减少考虑过多不适用施工方法所带来的附加工作量。6 种常用施工方法对比见表 1 所列^[3]。

2) 构建大跨度钢结构多目标优化体系。为实现大跨度钢结构在施工工期、成本、质量多目标均衡优化的基础上,客观、科学、系统地优选出最佳施工方案,本文提出一个多目标优化体系流程,如图 1 所示。首先,项目管理者根据机场航站楼工程实际,对现场施工条件进行综合考量,拟定适合本工程大跨度钢结构安装的备选施工方法;然后结合 BIM 技术和 WBS 技术进行分析,建立 BIM 中心数据库;通过 Revit 软件建立机场航站楼三维信息模型,根据软件提供的分类统计明细表,分析计算得到工程量清单数据;利用 WBS 分析大跨度空间钢结构项目的工作包和进度信息,并结合 Navisworks 软件的仿真模拟功能,确定各方法施工工序、工序间逻辑关系,掌握各方案中临时设施、机械设备用量及相应产生的费用,进一步分析统计得到各工序持续时间、直接成本、间接成本等,这些信息都将作为优化模型的基础数据储存于 BIM 中心数据库;基于此,分析工期、成本、质量之间的关系,建立多目标优化数学模型,运用 NSGA-II 对模型进行求解,得到工期-成本-

质量优化的非劣解集;进一步采用灰色关联度理论对得到的方案进行决策,最终优选出最佳施工方案,并利用 Navisworks 软件进行施工动态模拟,以指导实际施工过程。

表 1 大跨度钢结构 6 种常用施工方法对比

施工方法	施工内容	优点	缺点
高空散装法	小拼单元或单根杆件直接在设计位置总拼	无需大型起重设备、场地要求不高、操作简单、施工难度低、适用范围广	高空作业多、施工工期长、需搭设大量拼装支架、质量难把控
分条或分块安装法	分为条状或块状单元,由起重设备吊装至高空设计位置进行组装	高空作业量和拼装支架少、可降低施工成本	对场地和起重设备要求较高、需保证单元具有足够的刚度
胎架滑移法	分成条状或块状单元,将单元在一端进行拼装,之后通过滑轨滑移到设计的位置	无需大量搭设胎架、对起重设备和牵引设备要求不高	需铺设滑移轨道、对结构平面外刚度要求大、安全防护困难
整体吊装法	在地面总拼后,采用单根或多根拔杆,通过起重机进行吊装	高空作业少、易于保证焊接质量和几何尺寸准确性	需较大的起重设备能力、对场地要求高
整体提升法	就地总拼后,利用安装在结构柱上的提升设备提升	不需搭设大量脚手架和支撑、高空作业少、对场地的要求不高、施工工期较短	需要专用设备、技术含量较高、只能沿着设计坐标垂直上升
整体顶升法	就地总拼后,利用网架支撑柱作为顶升支架,逐步地把结构顶升到设计位置	无需搭设过多操作架、高空作业少、施工速度快	需保证支撑设备的强度和稳定性、要随时检测结构的内力和变形

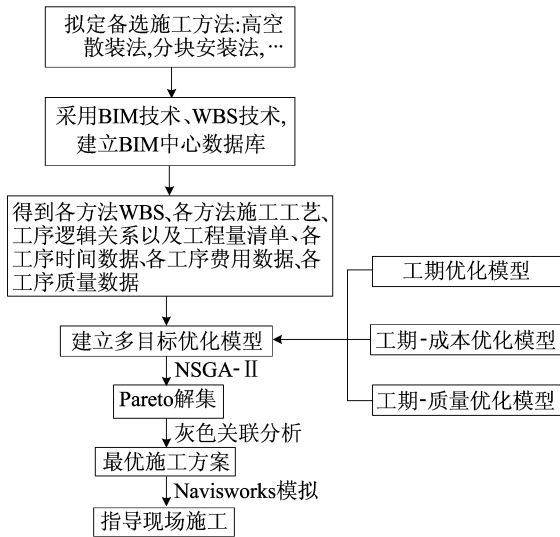


图 1 大跨度钢结构多目标优化体系流程

2 多目标优化模型的构建与求解

在机场航站楼大跨度钢结构建设管理过程中,进度、成本、质量是三大主要控制目标,三者之间存在着对立统一的关系,即质量越优、成本越高、工期越长。同时实现质量优、成本低、工期短的目标是不可能的,需要对各个方面进行综合分析,均衡优化,建立工期-成本-质量多目标优化数

学模型。

2.1 工期优化模型

完成整个项目所需的全部时间称为项目的工期,通过计算网络计划中关键线路上各个工序的持续时间之和,即可确定项目的总工期 T 。构建的工期优化模型为:

$$\begin{aligned} \min T &= \sum_{i \in L} t_i, \\ \text{s. t. } &t_i^s \leq t_i \leq t_i^n \end{aligned} \quad (1)$$

其中: L 为关键线路; t_i 、 t_i^s 、 t_i^n 分别为工序 i 的实际持续时间、最短持续时间和正常持续时间。

2.2 工期-成本优化模型

项目的总成本由直接成本和间接成本 2 个部分组成^[11]。其中:项目的直接成本是所有工序直接费用之和,每个工序的直接费用可视为其持续时间的二次函数^[12],与时间呈反比关系,即随着时间增加,直接费用会降低;间接成本为整个项目总工期的线性函数,与时间呈正比关系,即随着工期增加,间接费用也会增加,因此可假设间接费率是定值。

构建的工期-成本优化模型为:

$$\min C = \sum_{i=1}^N C_{Di} + C_1 =$$

$$\sum_{i=1}^N [C_{Di}^n + \alpha_i (t_i^n - t_i)^2] + \beta \sum_{i \in L} t_i,$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \alpha_i = \frac{C_{Di}^s - C_{Di}^n}{(t_i^n - t_i^s)^2}, \\ t_i^s \leq t_i \leq t_i^n, \\ -x_{i-1} + x_i - t_i \geq 0, \\ x_i \geq 0, t_i \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: C 为总成本; C_{Di} 为工序 i 所产生的直接成本; C_1 为总间接成本; α_i 为工序 i 的直接费率; β 为整个项目的间接费率; C_{Di}^s 为工序 i 在最短持续时间下所产生的直接成本; C_{Di}^n 为工序 i 在正常持续时间下所产生的直接成本; x_i 为工序 i 的开始时间; $-x_{i-1} + x_i - t_i \geq 0$ 表示后项工作必须在其紧前工作完成后才能开始。

2.3 工期-质量优化模型

工程项目的总质量受施工过程中各个工序质量好坏的影响,而每道工序的质量又与其完成时间有关,完成时间的不同会形成不同的工序质量,继而影响整个项目的质量。

为量化工期与质量之间关系,本文采用文献[13]中的各个工序质量水平 Q_i 与持续时间 t_i 的二次函数关系式,即

$$Q_i = p_{1i}t_i^2 + p_{2i}t_i + p_{3i} \quad (3)$$

$$\begin{cases} p_{1i}(t_i^s)^2 + p_{2i}t_i^s + p_{3i} = 0.5, \\ p_{1i}(t_i^m)^2 + p_{2i}t_i^m + p_{3i} = 1.0, \\ p_{1i}(t_i^l)^2 + p_{2i}t_i^l + p_{3i} = 0.8, \\ t_i^m = t_i^s + 0.618(t_i^l - t_i^s) \end{cases} \quad (4)$$

其中: p_{1i} 、 p_{2i} 、 p_{3i} 为系数; t_i^l 、 t_i^m 分别为工序 i 的最长持续时间和最佳持续时间。

整个工程的质量水平可采用网络可靠度算法^[14],通过计算单个节点的质量水平即可得到整个项目的质量水平 Q ,即

$$Q = \prod_{i=1}^N Q_i \quad (5)$$

综上,建立工期-质量优化模型为:

$$\max Q = \prod_{i=1}^N Q_i = Q_N^{\text{out}},$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} Q_i^{\text{out}} = [1 - \prod_{j=1}^m (1 - Q_j^{\text{in}})] Q_i, \\ Q_i = p_{1i}t_i^2 + p_{2i}t_i + p_{3i} \end{cases} \quad (6)$$

其中: Q_i 为工序 i 的质量水平; Q_j^{in} 为工序 i 在网络图中第 j 个紧前工序对其网络输入质量的执行系数,其中工序 i 有 m 个紧前工序; Q_i^{out} 为工序 i

的网络输出质量执行系数。

2.4 多目标优化模型的建立与求解

根据上述的单目标优化模型,并统一将目标函数转化为求最小值,建立大跨度钢结构多目标优化模型如下:

$$\begin{cases} \min Z = \{F_1, F_2, -F_3\}, \\ F_1 = \min T = \sum_{i \in L} t_i, \\ F_2 = \min C = \sum_{i=1}^N [C_{Di}^n + \alpha_i (t_i^n - t_i)^2] + \beta \sum_{i \in L} t_i, \\ F_3 = \max Q = Q_N^{\text{out}}, \\ \text{s. t. } \begin{cases} t_i^s \leq t_i \leq t_i^n, \\ -x_{i-1} + x_i - t_i \geq 0, \\ x_i \geq 0, t_i \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

多目标优化模型是对工期、成本及质量进行均衡协调优化,其函数值越小,代表优化程度越好。

本研究采用 NSGA-II 求解数学优化模型,NSGA-II 搜索效率高,搜索过程灵活,不易陷入局部最优,具有良好的全局优化性能和稳健性,其具体过程包括 7 个步骤^[15]: ① 获取数据,从 BIM 模型中获取数据,包括各工序最短持续时间、正常持续时间、最长持续时间、直接成本和间接成本等; ② 种群初始化,基于大跨度钢结构拟定施工方案中各工序持续时间的约束,将各工序实际持续时间在正常持续时间和最短持续时间中取值,并随机产生 1 组初始解; ③ 计算适应度值,根据大跨度钢结构工期-成本-质量优化模型计算个体的工期、成本及质量,构成适应度值; ④ 非支配排序,根据非支配解的定义,不断从种群中取出非支配个体组成 1 个小种群,反复操作将原始种群进行分层; ⑤ 遗传操作,通过选择、交叉、变异操作进行种群迭代; ⑥ 拥挤度计算,基于非支配排序结果,令边界的 2 个个体拥挤度为无穷,根据 $n_d = n_d + (f_m(i+1) - f_m(i-1))$ 公式进行计算(n_d 为拥挤度, f_m 为种群样本拥挤距离); ⑦ 终止迭代,不断通过遗传操作进行迭代,经过有限次循环后,得到满足多目标优化约束条件的 Pareto 解集。

3 基于灰色关联分析的方案优选

通过 NSGA-II 对大跨度钢结构多目标优化数学模型进行求解,得到的结果为 Pareto 解集,即问题的非劣解。在得到多组非劣解集后,需利用一种客观方法选出最符合实际需求的方案,本

文采用灰色关联分析对 Pareto 解集进行优选,以期得到大跨度钢结构最优施工方案。

灰色关联分析是通过比较每个评价方案与理想方案之间的相似度,来确定两者之间的关联,两者数列拟合曲线形状越相似,关联程度越大,方案越优,反之则越差^[16]。具体步骤如下:

1) 构建指标属性矩阵。设大跨度钢结构安装有 k 个备选方案,多目标决策问题方案集合为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, 指标集合为 $E = \{E_1, E_2, \dots, E_u\}$, x_{st} 为第 s 个方案的第 t 个评价指标的属性值,由此构成指标属性矩阵 $A = (x_{st})_{k \times u}$ 。

2) 对指标属性矩阵进行初始化处理。在工期、成本、质量 3 个指标中,工期和成本是成本型指标,其属性愈小愈好,而质量为效益型指标,其属性愈大愈好。为使 3 个指标之间具有可比性,需对矩阵 A 进行归一化处理,进一步再与理想方案 $x_0' = [x_{01}' \ x_{02}' \ \dots \ x_{0u}'] = [1 \ 1 \ \dots \ 1]$ 进行灰色关联分析。

效益型指标归一化公式为:

$$x_{st}' = \frac{x_{st} - \min\{x_{st}\}}{\max\{x_{st}\} - \min\{x_{st}\}} \quad (8)$$

成本型指标归一化公式为:

$$x_{st}' = \frac{\max\{x_{st}\} - x_{st}}{\max\{x_{st}\} - \min\{x_{st}\}} \quad (9)$$

初始化矩阵为:

$$A' = (x_{st}')_{(k+1) \times u}$$

3) 计算理想方案与待评方案之间在第 t 个评价指标的关联系数 r_{st} 。 r_{st} 计算公式为:

$$r_{st} = \left(\min_{1 \leq s \leq k} \min_{1 \leq t \leq u} |x_{st}' - x_{0t}'| + \rho \max_{1 \leq s \leq k} \max_{1 \leq t \leq u} |x_{st}' - x_{0t}'| \right) / \left(|x_{st}' - x_{0t}'| + \rho \max_{1 \leq s \leq k} \max_{1 \leq t \leq u} |x_{st}' - x_{0t}'| \right) \quad (10)$$

其中, ρ 为分辨系数,在 $0 \sim 1$ 之间取值,一般取 0.5。

由灰色关联系数构成多目标灰色关联矩阵 $R = (r_{st})_{k \times u}$

4) 理想方案与待评方案关联度计算。通过无限方案多目标决策方法求解因素指标权重^[17]为:

$$\omega_t = \sum_{s=1}^k r_{st} / \left(\sum_{t=1}^u \sum_{s=1}^k r_{st} \right) \quad (11)$$

再由加权法求各方案的灰关联度 r_s 为:

$$r_s = \sum_{t=1}^u r_{st} \omega_t \quad (12)$$

r_s 值越大,表明方案越优。

4 实例分析

4.1 实例概况

本文以某军民合用机场改扩建航站楼工程为例,工程用地面积为 $15\,553.20 \text{ m}^2$,总建筑面积为 $13\,928.44 \text{ m}^2$,建筑基地面积为 $9\,408.28 \text{ m}^2$ 。建筑层数为地上 3 层(局部夹层),下部为现浇钢筋混凝土框架结构,上部为大跨度钢结构,建筑高度为 29.4 m。航站楼钢屋面下为焊接球正放四角钢网架结构,钢网架屋面长、宽分别为 145.0、79.8 m,外形设计为最大高度差 14.302 m 的对称双曲面,如图 2 所示。

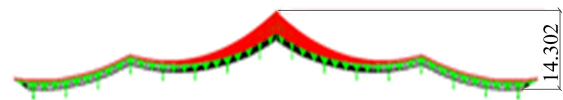


图2 某机场航站楼屋盖外形设计图

4.2 BIM 模型建立与施工仿真

4.2.1 BIM 建模

将机场航站楼分为钢网架结构和网架下部结构 2 个部分:对于钢网架结构,先采用 3D3S 软件进行空间钢结构设计,得到网架结构分析模型,再通过 3D3S 与 Revit 数据转化接口,转换成 .rvt 格式,从而得到网架结构 BIM 模型;对于网架下部结构,采用 Revit 软件直接创建,依次进行选择项目样板、创建标高轴网、绘制图元等步骤,最终完成整个工程 BIM 模型的创建,如图 3 所示。

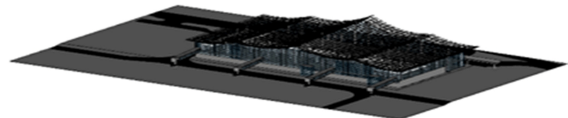


图3 航站楼 BIM 模型图

4.2.2 拟定方案虚拟仿真

对于该军民合用机场项目,其航站楼是对原有机场的扩建,不能影响正常的机场运营,施工场地有限,无法提供足够的拼装场地,同时网架结构跨度大,起重机械抬吊难度大,因此不适宜采用整体吊装法。此外,该项目网架为弧状且存在高度差,采用整体提升法或整体顶升法会使得在提升或顶升的过程中,设备提升、顶升的能力分布不均匀,施工难以同步控制,构件就位困难。

综合考虑上述因素,将高空散装法、分条或分块安装法和胎架滑移法作为该机场航站楼大跨度网架结构施工的备选方法,将各方案所需

的施工机械、辅助设施等载入 BIM 模型,再导入 Navisworks 软件,进行施工方案虚拟仿真,仿真过程如图 4~图 6 所示。

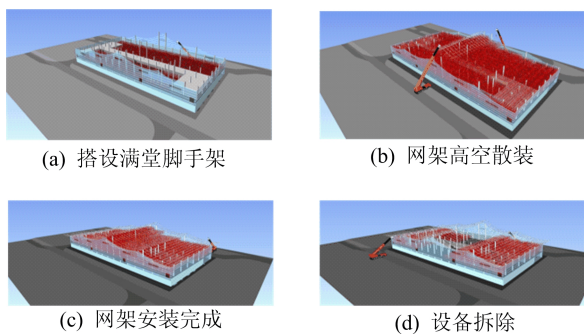


图 4 高空散装法施工仿真过程

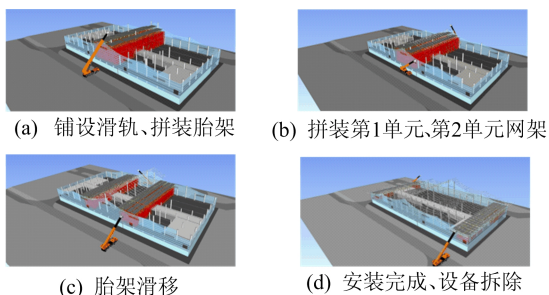


图 5 胎架滑移法施工仿真过程

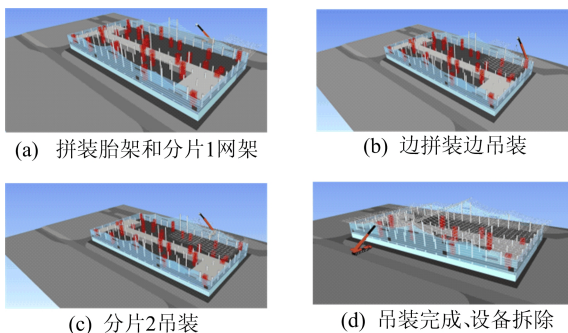


图 6 分块安装法施工仿真过程

4.2.3 施工方案数据分析

为后续通过数学模型对施工方案进行优化,最终选出最优施工方案,需要对拟定施工方法进行相关数据信息的统计分析。通过 BIM 建模和施工动态模拟,得到精准的工程量信息,掌握机械设备的使用情况,并结合 WBS 技术确定网架结构的施工工序、工期和成本等,同时采用网络计划技术,绘制相应的施工网络图。

1) 高空散装法。采用高空散装法进行网架结构施工时,其正常工期为 177 d,总费用为 414.83 万元,质量水平为 0.955 8,根据项目实际情况确定间接费率为 5 800 元/d,施工网络图如图 7 所示,相关工序、工期及费用见表 2 所列。

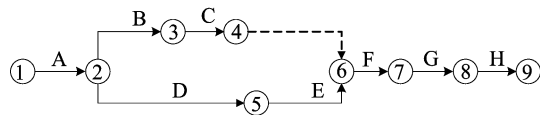


图 7 高空散装法施工网络图

2) 胎架滑移法。采用胎架滑移法进行网架结构施工时,将网架结构分为 10 个单元块,由中间同时向两边进行,其正常工期为 122 d,总费用为 430.66 万元,质量水平为 0.901 2,根据项目实际情况确定间接费率为 8 600 元/d,施工网络图如图 8 所示。胎架滑移法施工工序、工期及费用见表 3 所列。

3) 分块安装法。采用分块安装法进行网架结构施工,将网架结构分为 10 个分片,其正常工期为 148 d,总费用为 413.03 万元,质量水平为 0.950 0,根据项目实际情况确定间接费率为 6 800 元/d,施工网络图如图 9 所示。分块安装法施工工序、工期及费用见表 4 所列。

表 2 高空散装法施工工序、工期及费用

工序名称	内容描述	正常工期/d	正常直接费用/万元	最短工期/d	极限费用/万元	最长工期/d
A	施工准备	4	3.70	2	4.70	6
B	网架进场验收	8	2.99	6	4.00	10
C	焊接球进场验收	2	0.75	1	1.25	3
D	满堂脚手架搭设	32	40.15	28	45.40	40
E	支撑胎架搭设	5	8.04	4	8.79	6
F	网架安装	124	244.54	108	264.34	130
G	设备拆除	9	10.00	7	11.00	10
H	竣工验收	3	2.00	2	2.50	4

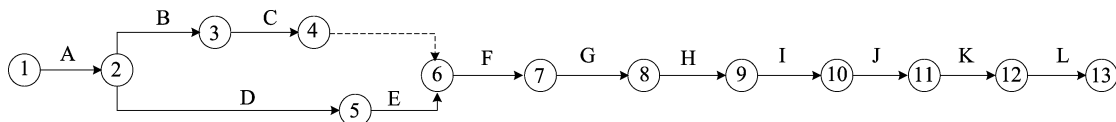


图 8 胎架滑移法施工网络图

表 3 胎架滑移法施工工序、工期及费用

工序名称	内容描述	正常工期/d	正常直接费用/万元	最短工期/d	极限费用/万元	最长工期/d
A	施工准备	4	3.60	2	4.60	6
B	网架进场验收	8	2.99	6	4.00	10
C	焊接球进场验收	2	0.75	1	1.25	3
D	滑移系统安装	18	27.70	16	29.30	20
E	胎架搭设	8	8.80	7	10.30	10
F	第 1 单元、第 2 单元安装、卸载	16	54.59	14	58.61	18
G	胎架滑移、第 3 单元、第 4 单元安装就位	14	48.95	12	52.50	15
H	胎架滑移、第 5 单元、第 6 单元安装就位	16	53.86	14	57.82	18
I	胎架滑移、第 7 单元、第 8 单元安装就位	16	53.91	14	57.88	18
J	胎架滑移、第 9 单元、第 10 单元安装就位	17	58.10	15	62.42	18
K	设备拆除	10	10.50	8	11.50	10
L	竣工验收	3	2.00	2	2.50	4

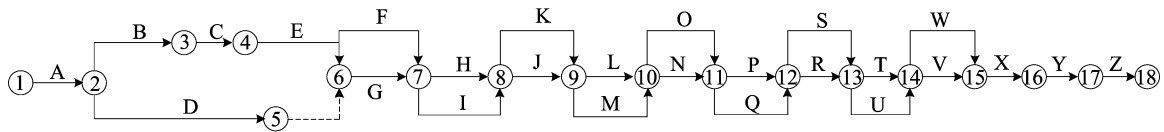


图 9 分块安装法施工网络图

表 4 分块安装法施工工序、工期及费用

工序名称	内容描述	正常工期/d	正常直接费用/万元	最短工期/d	极限费用/万元	最长工期/d
A	施工准备	4	3.97	2	5.00	6
B	网架分片进场验收	8	2.99	6	4.00	10
C	焊接球进场验收	2	0.75	1	1.25	3
D	胎架搭设	16	16.11	13	18.36	18
E	分片 1 拼装	14	27.97	12	30.20	16
F	分片 2 拼装	13	25.91	11	27.95	15
G	分片 1 吊装	4	4.31	3	5.41	5
H	分片 3 拼装	12	24.13	10	26.00	15
I	分片 2 吊装	3	3.99	2	4.93	4
J	分片 4 拼装	13	25.91	11	27.95	15
K	分片 3 吊装	2	4.18	1	4.95	3
L	分片 5 拼装	14	27.97	12	30.20	17
M	分片 4 吊装	3	4.50	2	5.45	4
N	分片 6 拼装	12	23.53	10	25.36	14
O	分片 5 吊装	4	4.06	3	5.15	5
P	分片 7 拼装	11	21.53	9	23.17	13
Q	分片 6 吊装	2	3.65	1	4.39	3
R	分片 8 拼装	11	22.52	9	24.23	14
S	分片 7 吊装	2	3.58	1	4.26	3
T	分片 9 拼装	11	21.53	9	23.17	13
U	分片 8 吊装	2	3.61	1	4.33	3
V	分片 10 拼装	12	23.53	10	25.36	14
W	分片 9 吊装	2	3.83	1	4.52	3
X	分片 10 吊装	2	1.33	1	2.08	3
Y	卸载、拆除	6	5.00	4	6.00	8
Z	竣工验收	3	2.00	2	2.50	4

4.3 多目标优化建模与求解

将表 2~表 4 数据代入式(7)中,可得到该工程的多目标优化模型,采用 NSGA- II,使用 MATLAB 软件进行计算。设置种群数为 100,交叉概率为 0.4,变异概率为 0.1,迭代循环 200 次。

采用的计算机处理器型号为 Intel(R) Core(TM) i5-3470S,频率为 2.90 GHz,内存为 6.00 GiB,运行时间约 60 s。

3 种施工方法优化后部分 Pareto 解见表 5 所列。

表 5 3 种施工方法优化后部分 Pareto 解

施工方法	方案	工期/d	成本/万元	质量水平
高空散装法	A1	165	412.898 1	0.867 6
	A2	167	412.733 9	0.907 2
	A3	168	412.298 3	0.912 1
	A4	168	412.816 3	0.928 3
	A5	169	412.268 9	0.916 0
	A6	170	412.351 3	0.937 3
	A7	170	413.210 6	0.954 5
	A8	171	412.775 0	0.959 5
胎架滑移法	B1	117	427.570 0	0.877 3
	B2	118	428.041 1	0.886 1
	B3	119	428.526 1	0.899 1
	B4	120	429.152 8	0.902 8
	B5	121	429.887 8	0.909 8
	B6	120	429.261 1	0.905 4
分块安装法	C1	125	407.510 0	0.948 7
	C2	126	407.267 5	0.949 0
	C3	126	407.710 0	0.949 7
	C4	127	407.167 5	0.949 2
	C5	127	407.310 0	0.949 2
	C6	128	407.367 5	0.949 7
	C7	129	407.745 0	0.950 0
	C8	130	406.957 5	0.949 8

4.4 方案优选

采用灰色关联分析对优化后的待选方案进行优选。由表 5 中的数据建立大跨度钢网架施工方案评价指标矩阵,然后根据式(8)、式(9)进行初始化处理,得到矩阵 A' ;进一步将理想方案与待选方案进行灰色关联分析,计算灰色关联系数,得到灰色关联矩阵 R 。

根据式(11)与灰色关联矩阵 R ,可计算得到工期、成本、质量的权重分别为 0.325 8、0.349 0、0.325 2。再由式(12),计算各方案的灰关联度,结果为:

$$r = \begin{bmatrix} r_{A1} & r_{A2} & r_{A3} & r_{A4} & r_{A5} & r_{A6} & r_{A7} & r_{A8} \\ r_{B1} & r_{B2} & r_{B3} & r_{B4} & r_{B5} & r_{B6} & r_{C1} & r_{C2} & r_{C3} & r_{C4} \\ r_{C5} & r_{C6} & r_{C7} & r_{C8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.455 6 & 0.498 4 \\ 0.510 9 & 0.537 4 & 0.516 9 & 0.566 6 & 0.629 1 \\ 0.665 3 & 0.567 1 & 0.562 3 & 0.565 0 & 0.557 6 \\ 0.556 3 & 0.561 0 & 0.847 6 & 0.848 9 & 0.839 9 \\ 0.846 1 & 0.842 0 & 0.836 5 & 0.821 6 & 0.837 5 \end{bmatrix}.$$

各方案灰关联度从大到小排序依次为 C2、C1、C4、C5、C3、C8、C6、C7、A8、A7、B1、A6、B3、B2、B6、B4、B5、A4、A5、A3、A2、A1。

由此可得最优施工方法是分块安装法,其次是高空散装法和胎架滑移法,最佳方案是 C2。

A' 、 R 分别为:

$$A' = \begin{bmatrix} 1.000 0 & 1.000 0 & 1.000 0 \\ 0.111 1 & 0.740 9 & 0.000 0 \\ 0.074 1 & 0.748 1 & 0.430 9 \\ 0.055 6 & 0.767 1 & 0.484 2 \\ 0.055 6 & 0.744 5 & 0.660 5 \\ 0.037 0 & 0.768 4 & 0.526 7 \\ 0.018 5 & 0.764 8 & 0.758 4 \\ 0.018 5 & 0.727 3 & 0.945 6 \\ 0.000 0 & 0.746 3 & 1.000 0 \\ 1.000 0 & 0.101 1 & 0.105 5 \\ 0.981 5 & 0.080 5 & 0.201 3 \\ 0.963 0 & 0.059 4 & 0.342 8 \\ 0.944 4 & 0.032 1 & 0.383 0 \\ 0.925 9 & 0.000 0 & 0.459 2 \\ 0.944 4 & 0.027 3 & 0.411 3 \\ 0.851 9 & 0.975 9 & 0.882 5 \\ 0.833 3 & 0.986 5 & 0.885 7 \\ 0.833 3 & 0.967 2 & 0.893 4 \\ 0.814 8 & 0.990 8 & 0.887 9 \\ 0.814 8 & 0.984 6 & 0.887 9 \\ 0.796 3 & 0.982 1 & 0.893 4 \\ 0.777 8 & 0.965 7 & 0.896 6 \\ 0.759 3 & 1.000 0 & 0.894 5 \\ 0.360 0 & 0.658 7 & 0.333 3 \\ 0.350 7 & 0.665 0 & 0.467 7 \\ 0.346 2 & 0.682 2 & 0.492 2 \\ 0.346 2 & 0.661 8 & 0.595 6 \\ 0.341 8 & 0.683 4 & 0.513 7 \\ 0.337 5 & 0.680 1 & 0.674 2 \\ 0.337 5 & 0.647 1 & 0.901 9 \\ 0.333 3 & 0.663 4 & 1.000 0 \\ 1.000 0 & 0.357 4 & 0.358 6 \\ 0.964 3 & 0.352 2 & 0.385 0 \\ 0.931 1 & 0.347 1 & 0.432 1 \\ 0.899 9 & 0.340 6 & 0.447 6 \\ 0.870 9 & 0.333 3 & 0.480 4 \\ 0.899 9 & 0.339 5 & 0.459 3 \\ 0.771 5 & 0.954 0 & 0.809 7 \\ 0.750 0 & 0.973 7 & 0.813 9 \\ 0.750 0 & 0.938 4 & 0.824 3 \\ 0.729 7 & 0.981 9 & 0.816 9 \\ 0.729 7 & 0.970 1 & 0.816 9 \\ 0.710 5 & 0.965 4 & 0.824 3 \\ 0.692 3 & 0.935 8 & 0.828 6 \\ 0.675 0 & 1.000 0 & 0.825 8 \end{bmatrix}.$$

4.5 结果分析

通过 NSGA- II 求解多目标优化数学模型,采用灰色关联分析进行方案优选,最终确定钢网架结构安装采用分块安装法,选择最佳方案 C2,将 C2 方案与优化前的方案进行对比,工期、成本及质量水平见表 6 所列。

表 6 方案优化前后工期、成本及质量水平对比

方案	总工期/d	总成本/万元	总质量水平
优化前	148	413.030 0	0.950
优化后 (方案 C2)	126	407.267 5	0.949

由表 6 可知:优化后工期为 126 d,主要通过缩短关键工作的持续时间使施工进度提前 22 d;工期缩短,间接费用降低,最终总成本减少 57 625 元;同时质量仍然保持在较高水平 0.95 左右。通过优化,在保证一定质量水平的条件下,既缩短工程工期,又降低了建设费用,实现在工期-成本-质量的均衡优化基础上,科学合理地确定大跨度网架结构安装方法。

5 结 论

本文通过发挥 NSGA- II 和 BIM 技术的优势,将 NSGA- II、BIM 技术、WBS 技术与多目标优化理论结合,构建大跨度钢结构多目标优化体系,并以某军民合用机场为例,验证该体系的可行性与有效性,结论如下:① 基于 WBS 技术,可对备选施工方案进行工作分解,在考虑各工序工期-成本-质量均衡优化的基础上优选方案;② 基于 BIM 建模,可准确获取工程量数据,通过施工仿真模拟,掌握大跨度钢结构各施工方法机械、设备的使用以及施工工序、进度安排等情况,为多目标优化定量分析做准备;③ 基于 WBS、BIM 技术分析结果,结合工期、成本、质量之间关系,建立大跨度结构多目标优化数学模型,基于多目标优化算法 NSGA- II,智能求解多目标优化数学模型,可得到 1 组工期-成本-质量均衡优化的 Pareto 解集;④ 基于灰色关联分析,对 Pareto 解集进行优选,可确定大跨度钢结构安装最佳方法和最优方案。

对策,2013,30(4):99-102.

[2] 黄涛,聂党民. 浅谈军民合用机场中军航如何做好飞行调配工作[J]. 中国新通信,2020,22(9):134.

[3] 高崇贤. 大跨钢桁架文物展馆施工方案优选研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2019.

[4] ORMAZABAL G, VINOLAS B, AGUADO A. Enhancing value in crucial decisions; Line 9 of the Barcelona Subway [J]. Journal of Management in Engineering, 2008, 24(4): 265-272.

[5] BITARAFAN M, HASHEMKHANI ZOLFANI S, AREFI S L, et al. Evaluating the construction methods of cold-formed steel structures in reconstructing the areas damaged in natural crises, using the methods AHP and COPRAS-G [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2012, 12(3):360-367.

[6] 董静. 基于 FAHP 的价值工程理论在建设项目方案比选的应用研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2012.

[7] 吕俊志,张明轩. 基于 Vague 集的大跨度钢结构施工方法决策研究[J]. 建筑技术开发,2014,41(10):59-61.

[8] 胥灿辉. 基于模糊网络分析法的钢网架施工方案选择研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

[9] 刘申. 基于 BIM 技术的绿色建筑施工项目进度优化研究[D]. 南昌:华东交通大学,2019.

[10] 蔡俊. 大跨度钢网架结构整体提升施工关键技术应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[11] MOHAMED A A. Optimization of project time-cost trade-off problem with discounted cash flows[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137(1): 65-71.

[12] 杨凯. 基于 BIM 技术工程项目 4D 进度优化研究[D]. 西安:西安工业大学,2017.

[13] 张淑山. 基于免疫遗传微粒群算法的工程项目工期-质量-成本均衡优化[D]. 天津:天津大学,2010.

[14] 蒋红妍,杨森,曹一鹏. 基于系统可靠性的工程质量量化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014, 46(1):34-37.

[15] 冯宪彬,丁蕊. 改进型遗传算法及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2016:25-61.

[16] 年峰,罗学东,蒋楠,等. 基坑支护方案灰色多目标决策优选模型的建立与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013,44(5):1982-1987.

[17] 王应明,傅国伟. 运用无限方案多目标决策方法进行有限方案多目标决策[J]. 控制与决策,1993(1):25-29.

(责任编辑 张淑艳)

[参 考 文 献]

[1] 杨志坚. 协同视角下的军民融合路径研究[J]. 科技进步与