

# 基于双层规划的飞行区地势设计优化模型

袁捷<sup>1</sup>, 李一凡<sup>1</sup>, 孟祥龙<sup>1</sup>, 张家科<sup>1</sup>, 彭逸洲<sup>2</sup>

(1. 同济大学民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海 201804;

2. 深圳市城市交通规划设计研究中心股份有限公司, 广东 深圳 518109)

**摘要:** 为设计出一个符合标准且成本最低的机场飞行区地势表面, 在飞行区内划分出骨架和扭曲面, 上层规划从全局角度确定骨架具体位置, 下层规划根据上层规划的结果, 以局部表面跟天然地面的拟合程度为目标, 合理衔接骨架并使得扭曲面设计最优, 形成基于双层规划的飞行区地势设计优化模型, 最后运用遗传算法求解。采用该模型计算得到的三明机场地势设计实例表明, 优化模型的排水、坡度、坡段设计均符合既有要求, 且与实际工程相比, 更贴合天然地形, 填方量下降 7.50%, 土方总计下降 8.06%, 工程成本降低 10.73%。

**关键词:** 机场飞行区; 地势设计; 土方优化; 双层规划; 遗传算法

中图分类号: U8

文献标志码: A

## Bi-Level Programming Optimization Model of Airfield Surface Elevation Design

YUAN Jie<sup>1</sup>, LI Yifan<sup>1</sup>, MENG Xianglong<sup>1</sup>, ZHANG Jiakeli<sup>1</sup>, PENG Yizhou<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shenzhen Urban Transport Planning Center Co., Ltd., Shenzhen 518109, China)

**Abstract:** In order to design an elevation surface of the airfield area that meets the standards and has the lowest cost, this paper divides the skeleton and the twisted surface in the airfield area. The upper-level planning determines the specific position of the skeleton from a global perspective. Based on the results of the upper-level planning, the lower-level planning aims at the degree of fitting between the local surface and the natural ground, connecting the skeleton and optimizing the design of the twisted surface. These form an optimization model of the airfield area elevation design based on bi-level programming. Finally the genetic algorithm is used to

solve the problem. The elevation design example of Sanming Airport calculated by using this model shows that the drainage, slope, and slope section design of the optimized model meet the existing requirements, and compared with the actual project, it is more in line with the natural terrain. The filling volume is reduced by 7.50%, the total earthwork is decreased by 8.06%, and engineering cost is reduced by 10.73%.

**Keywords:** airfield area; elevation design; earthwork optimization; bi-level programming; genetic algorithm

机场地势设计的目的是设计出一个合理的飞行区场地地势表面, 使其能够在满足飞机正常运行的条件下, 土方工程费用最小<sup>[1]</sup>。飞行区地势设计的约束较一般的公路、铁路、码头等更为复杂, 需要考虑坡度、变坡、视距、排水、净空等约束, 且不同区域设计标准不同。国内最初采用的飞行区地势设计表面几何模型是由一系列连续的折面组成的<sup>[2]</sup>, 设计表面在不同的横向位置有相同的纵断面, 即滑行道的纵断面线形和跑道的纵断面线形完全一致, 这种方法设计变量少, 容易处理, 但未考虑跑道和滑行道的的设计标准差别, 在地形复杂的情况下有局限性。针对这种情况, 李元光等<sup>[3]</sup>提出了基于扭曲面的机场地势设计表面几何模型, 能对滑行道和跑道采用不同的纵断面线形设计, 符合大多数线性坡度约束, 但是, 由于二次规划求解方法限制, 需要在优化前划分跑道、滑行道的坡段位置。杨东援等<sup>[4]</sup>提出了运用孔斯(Coons)曲面构造的机场场道区三维曲面模型, 该模型具有更加规范的表达, 并且能够更加准确地描述在此范围内的设计表面及结构物底面。这些模型要求所有的约束都是线性或至少连续可导, 并且决策变量能用明确的表达式表达, 与实际情况有

收稿日期: 2022-12-06

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1310603)

第一作者: 袁捷, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路与机场工程。E-mail: yuanjie@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

一定区别。

近年来,随着计算机技术的发展,以遗传算法为代表的启发式算法逐渐成熟并应用到设计工作中。Jong<sup>[5]</sup>将遗传算法运用于公路纵断面线形优化, Jha等<sup>[6]</sup>将遗传算法和GIS (Geographic Information System)结合使用,解决了实际的道路线性设计问题。然而启发式算法在求解过程中会产生大量的不可行解,浪费运算时间,为提高计算效率, Kang等<sup>[7]</sup>通过预筛来去除不可行解,此外Hare等<sup>[8]</sup>将变坡处理及阻碍因素纳入纵断面优化模型中,从而降低工程成本的计算误差。启发式算法解决了传统方法在约束和目标函数上的局限性,但在机场地势设计优化领域尚未得到充分应用。

综上,飞行区地势设计优化模型通常采用折面、扭曲面等空间曲面作为飞行区地势设计表面,运用数学方法进行地势设计优化,其结果满足主要技术标准,但求解繁琐并且依赖设计人员的经验,无法保证方案的最优性。本研究将复杂的飞行区地势设计优化问题转化为上下2层较简单的子优化问题,上层对主要纵断面(骨架)设计进行优化,下层对各部分横断面(扭曲面)设计进行优化,采用遗传算法作为模型的求解方法,建立了基于双层规划的飞行区地势优化模型并通过实例验证模型的适用性。

## 1 模型建立

### 1.1 骨架—扭曲面模型

飞行区地势设计中纵断面设计主要受跑道、滑行道高程控制,并且影响土方工程量;横断面设计主要是协调跑道、滑行道、机坪以及排水沟之间的高程,使得雨水能快速排出。基于此,在初步设计或详细设计的初步方案产生阶段提出如图1所示的骨架—扭曲面模型(以单跑道一条平行滑行道为例)。在该模型中,跑道中线、滑行道中线、排水沟、围界等均可以作为地势设计的主要控制线,称为飞行区的骨架控制线(简称骨架);以一侧的骨架为基线,选取若干横截面作为横向设计控制线,向另一侧的骨架展开,形成扭曲面,一些交接处变坡设计的细节可以在大方案已经确定的情况下在施工设计和详细设计阶段由设计人员去处理。

### 1.2 双层规划模型

双层规划模型是一种具有2层递阶结构的系统优化问题,上、下层规划有各自的目标函数和约束条件<sup>[9]</sup>。上层规划一般从全局的角度出发去解决问

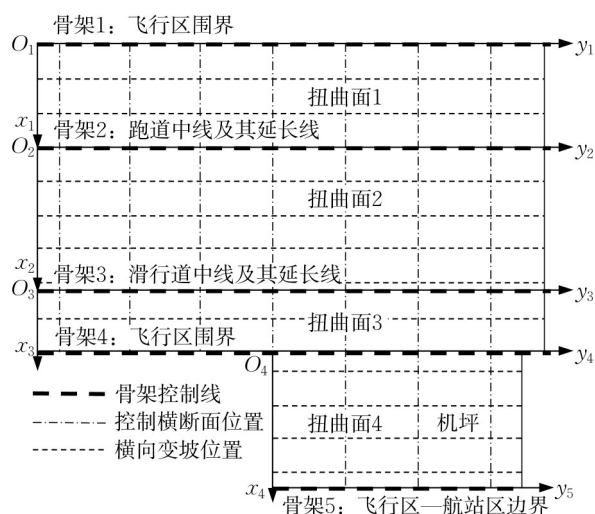


图1 骨架—扭曲面模型示意

Fig. 1 Schematic of skeleton-distorted surface model

题,优化全局目标;下层规划则通过上层规划的结果优化自己的目标函数,如图2所示。

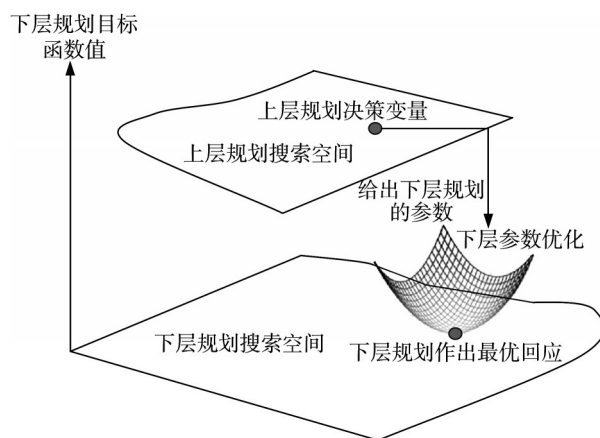


图2 双层规划示意

Fig. 2 Diagrammatic sketch of bi-level programming

运用骨架—扭曲面模型来表达并优化飞行区地势设计表面时,上层规划以综合考虑最小化飞行区土石方工程成本和变坡惩罚项的函数 $F$ 为目标,来求解决策变量 $x$ , $x$ 包含骨架坡度向量 $x_g$ 、坡段坐标向量 $x_c$ 、起点高程向量 $x_h$ 和横向排水沟离跑道的距离向量 $x_d$ ,并决定飞行区表面模型中所有骨架空间位置。下层规划则根据上层规划给出的骨架空间位置,以所有子曲面与天然地表的拟合函数 $f$ 为目标,优化所有子曲面的横坡设计参数 $y$ 。本优化问题的目标函数和约束条件可以表示为式(1)和式(2):

$$\min_{x \in X, y \in Y} F(x, y) = C_c(x, y) + C_{gc}(x, y) \quad (1)$$

$$\begin{cases}
 x \in \operatorname{argmin}_{x \in X, y \in Y} f(x, y) = \sum_{s=1}^t f_s(x, y) \\
 R_k(x, y) \leq 0, k = 1, \dots, K \\
 R_k^{\text{eq}}(x, y) = 0, k = 1, \dots, K^{\text{eq}} \\
 r_j(x, y) \leq 0, j = 1, \dots, J \\
 r_j^{\text{eq}}(x, y) = 0, j = 1, \dots, J^{\text{eq}}
 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X$ 、 $Y$ 分别为上层、下层规划可行域; $F$ 、 $f$ 分别为上层、下层规划目标函数; $C_e$ 为土方工程成本; $C_{gc}$ 为变坡惩罚项; $t$ 为骨架将飞行区划分出的子曲面数量; $f_s$ 为第 $s$ 个子曲面的下层规划目标函数; $R_k$ 和 $R_k^{\text{eq}}$ 分别为上层规划的第 $k$ 个不等式和等式约束函数; $r_j$ 和 $r_j^{\text{eq}}$ 分别为下层规划的第 $j$ 个不等式和等式约束函数; $K$ 和 $K^{\text{eq}}$ 分别为上层规划中不等式和等式约束个数; $J$ 和 $J^{\text{eq}}$ 分别为下层规划中不等式和等式约束个数。

### 1.3 上层规划模型

#### 1.3.1 土方成本目标

机场土方工程成本 $C_e$ 由挖填方成本 $C_{cf}$ 、借弃方成本 $C_{bs}$ 和土方调配成本 $C_d$ 组成,即 $C_e = C_{cf} + C_{bs} + C_d$ 。

(1)挖填方成本。土方挖填量计算的是机场设计表面和自然地面高程之间的挖方、填方体积,飞行区的设计表面可以由给定的决策变量 $x$ 和 $y$ 计算得到,得到设计表面的高程后,可以用方格网法、等高线法、三角网法等方法计算飞行区的土方挖填体积,再结合挖填价格计算得到 $C_{cf}$ 。

(2)借弃方成本。飞行区全场总挖方体积与总填方体积之比称为挖填比,用 $\mu$ 表示,当全场挖填方大致平衡时,符合式(3):

$$V_{\text{cut}} = \mu V_{\text{fill}} + \epsilon \quad (3)$$

式中: $V_{\text{cut}}$ 为挖方量; $V_{\text{fill}}$ 为填方量; $\epsilon$ 为挖填不平衡量,设 $\epsilon_0$ 为土方平衡阈值,则 $|\epsilon| < \epsilon_0$ 时认为全场挖填方达到平衡, $\epsilon > \epsilon_0$ 时需要弃方, $\epsilon < -\epsilon_0$ 时需要借方。当挖填不平衡时,根据 $\epsilon$ 和相应的价格可以得到借、弃方成本 $C_{bs}$ 。

(3)土方调配模型。在上述步骤中获得设计地势表面各位置的挖填量后,可以采用线性规划模型计算土方调配成本。将全场的土方工作范围划分成若干个土方工作区,设得到 $m$ 个挖方区 $W_1, W_2, \dots, W_m$ ,各挖方区的实际挖方量 $w_1, w_2, \dots, w_m$ ,以及 $n$ 个填方区 $T_1, T_2, \dots, T_n$ ,实际填方量为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ,挖填方量均为天然状态下的体积。其中最后一个工作区 $W_m$ (或 $T_n$ )为虚拟的土方调配区,以

使挖方、填方量满足总体土方平衡。土方调配的线性规划模型及约束条件为式(4)和式(5):

$$\min Z = \sum_{ij} c_{ij} d_{ij} \quad (4)$$

$$\begin{cases}
 \sum_j d_{ij} = w_i, i = 1, 2, \dots, m \\
 \sum_i d_{ij} = t_j, j = 1, 2, \dots, n \\
 d_{ij} \geq 0
 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Z$ 为土方运量; $c_{ij}$ 为由第 $i$ 个挖方区到第 $j$ 个填方区的土方运距,通过计算挖方区和填方区的土方工作重心之间的几何距离得到; $d_{ij}$ 表示由第 $i$ 个挖方区到第 $j$ 个填方区的土方调配量; $w_i$ 为第 $i$ 个挖方区的挖方量; $t_j$ 为第 $j$ 个填方区的填方量。求解模型的目标函数值后,乘以土方调配单价,即可得到土方调配成本 $C_d$ 。

#### 1.3.2 变坡惩罚目标

技术要求中规定的变坡间距是作为硬约束体现在模型中。在实际设计中,频繁变坡会对设计、施工、安全、美观等多方面带来额外的成本,所以通过设置变坡的惩罚权重作为软的约束,可以通过调节惩罚的权重大小引导模型输出更贴合或者更简洁的地势,变坡距离惩罚项 $C_{gc}$ 的函数和约束条件可分别用式(6)和式(7)表示:

$$C_{gc} = \sum_{k=1}^{N_g} \sum_{r=2}^{l-1} \eta_{r,k} \quad (6)$$

$$\eta_{r,k} = \begin{cases} 0, & d_{r,k} - D_{r,k} \geq 0 \\ \omega_k^{gc} (d_{r,k} - D_{r,k})^2, & d_{r,k} - D_{r,k} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\eta_{r,k}$ 为骨架 $k$ 在第 $r$ 个和第 $r+1$ 个变坡间的变坡距离惩罚; $N_g$ 为骨架的数量; $l$ 为变坡的数量; $d_{r,k}, D_{r,k}$ 分别为骨架 $k$ 在第 $r$ 个和第 $r+1$ 个变坡间的实际和允许最小间距,可通过设立最小变坡曲线半径求得; $\omega_k^{gc}$ 为骨架 $k$ 的变坡距离惩罚权重, $\omega_k^{gc} > 0$ 。

#### 1.3.3 上层规划约束

我国机场飞行区地势设计的上层规划约束条件应参考文献[10-11]的要求,主要包括:

(1)控制点高程约束:跑道标高、出水点高程、最低点高程、障碍物限制面以及其他控制点要满足设计标准和场区排水的要求。

(2)协调性约束:同一断面上的高程差应当处于它们之间的飞行场地所允许的平均横向坡度范围内。

(3)纵坡约束:骨架上的各设计纵坡受到最大值、最小值约束,另外跑道还受到平均纵坡的限制。

(4)视距约束:跑道、滑行道的视距若存在遮挡,



则用遮挡高度作为违反约束程度的度量,以便进行惩罚。

以上4类约束组成了上层规划的等式和不等式约束,上层规划的数学计算模型见式(8),模型约束见式(9):

$$\min_{x \in X, y \in Y} F(x, y) = C_{cl}(x, y) + C_{bs}(x, y) + C_d(x, y) + C_{gc}(x, y) \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} R_k^{eq}(x, y) = 0, k = 1, \dots, K^{eq} \\ R_k(x, y) \leq 0, k = 1, \dots, K \end{cases} \quad (9)$$

#### 1.4 下层规划模型

记飞行区被骨架划分为 $t$ 个子曲面,每个子曲面的平面投影均为矩形,且曲面至少与一条骨架相接,为每一个子曲面建立扭曲面模型。对于整个飞行区,下层规划的决策向量 $\mathbf{y}$ 由各个子曲面的设计向量连接组成,即 $\mathbf{y} = (\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_t^T)^T$ 。以其中的一个子曲面 $s$ 为例,建立二次规划模型, $\mathbf{v}_s$ 为曲面 $s$ 内各方格网点的挖填高程向量(负值为挖,正值为填),为

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{A}_s \mathbf{y}_s - \mathbf{z}_s \quad (10)$$

式中: $\mathbf{A}_s$ 为设计矩阵,由子曲面 $s$ 中各方格网点的平面坐标、扭曲面的坡段规划情况和扭曲面上的骨架设计高程决定; $\mathbf{z}_s$ 为曲面 $s$ 内方格点的天然高程向量。

下层规划的目标可以简化为使设计表面尽可能贴近天然地面,利用最小二乘法建立子曲面 $s$ 的目标函数 $f_s$ ,如式(11)所示:

$$\min f_s(\mathbf{y}) = \mathbf{v}_s^T \mathbf{W}_s \mathbf{v}_s \quad (11)$$

式中: $\mathbf{W}_s$ 为权重矩阵,其元素等于方格点所影响的土方计算面积,表征子曲面 $s$ 内各方格点对曲面内土方计算的影响程度。

由于骨架的设计参数已由上层规划给出,各个子曲面的设计向量 $\mathbf{y}_s$ 相互独立,子曲面 $s$ 的 $f_s(\mathbf{y})$ 只与 $\mathbf{y}_s$ 有关,故保证每个子曲面 $s$ 的 $f_s(\mathbf{y})$ 取最小值即为下层规划模型的总体目标,其计算公式见式(12)。下层规划中的约束主要包含:①坡度方向使得水需从道面方向流向设置排水沟的一侧;②横坡、纵坡大小满足技术标准中的取值范围;③控制点的设计高程符合要求;④与骨架重合处,设计高程应当与骨架一致,其数学计算式见式(13)。

$$\min f(\mathbf{y}) = \sum_{s=1}^n \min f_s(\mathbf{y}) \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} r_j(x, y) \leq 0, j = 1, \dots, J \\ r_j^{eq}(x, y) = 0, j = 1, \dots, J^{eq} \end{cases} \quad (13)$$

## 2 求解算法

双层规划中上层规划是一个标准的遗传算法问题,下层规划是适应度评价的计算,在遗传算法产生的每个个体中,找到它们最优的详细设计,从而评价这个个体。遗传算法是一种自适应搜索技术,通过模仿自然界的进化理论,采取有导向的随机搜索方式,对一组可能解进行评价和改良,最终寻得问题的最优解或近似最优解<sup>[12]</sup>。用于上层规划的遗传算法求解步骤如下:

(1)初始化。①编码方案确定:在飞行区骨架一扭曲面模型参数确定后,根据上层规划中各决策变量 $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_g^T, \mathbf{x}_c^T, \mathbf{x}_h^T, \mathbf{x}_d^T)^T$ 及其对应的变化范围、求解精度确定每个基因的编码顺序和编码长度(采取二进制编码)。每个染色体代表一种决策变量组合,能够确定一种飞行区骨架控制线高程设计方案。②设置算法参数:种群大小 $n_{pop}$ ,交叉概率、变异概率、适应度调节常量、最大迭代次数等。

(2)生成初始种群。随机生成 $n_{pop}$ 个初始个体,如事先根据预优化结果或设计偏好对部分变量设定了变量初始解生成范围,再将对应的基因编码映射到给定范围。

(3)适应度评价。①依据编码方案,解码得到上层规划的决策向量 $\mathbf{x}$ 。根据其包含的各骨架控制线的坡度、坡段、高程设计值,计算得到各骨架控制线各位置的高程设计向量。②根据高程设计向量,计算下层规划中各个子扭曲面所需要符合的高程相等、纵坡相等约束;根据主要排水线的位置,计算横坡排水方向约束,得到下层规划模型中各子曲面对应的二次规划模型参数,进行求解就可以得到对应当前设计方案下的下层规划最优解 $\mathbf{y}$ 。③根据 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ ,计算当前方案下的飞行区全场方格点设计高程值,结合天然地面数字高程计算得到全场土方工作范围和高度。④根据全场土方工作高程结果,得到土方调配量,最后利用各项土方工作量计算得到总体土方工程成本 $C_e$ 。⑤通过检查视距约束和跑道、滑行道纵坡约束等,计算上层规划中各等式约束、不等式约束的值。根据骨架坡度、坡段设计,计算变坡惩罚项 $C_{gc}$ 。⑥根据以上结果计算得到当前个体的适应度值,返回①直至所有个体适应度均评

价完成。⑦ 进行步骤(9)。

(4)选择算子。利用放回抽样的方式在种群中随机取出 3 个个体,选择这些个体中最优的一个,复制进入下一代种群,通过多轮得到所需规模  $n_{pop}$  的子代种群。

(5)计算自适应交叉概率和变异概率。根据每个个体的适应度函数,利用式(14)和式(15)分别计算每个个体的自适应交叉概率  $P_b$  和变异概率  $P_c$ 。

$$P_b = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - \lambda_1 f)}{f_{\max} - \lambda f_{\text{avg}}}, f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (14)$$

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - \lambda_2 f)}{f_{\max} - \lambda f_{\text{avg}}}, f \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $k_1$ 和 $k_2$ 分别为个体适应度不低于和低于平均时的交叉概率常量; $k_3$ 和 $k_4$ 分别为个体适应度不低于和低于平均时的变异概率常量; $f$ 为个体的适应度值; $f_{\max}$ 为种群中最优个体的适应度; $f_{\text{avg}}$ 为种群中所有个体的平均适应度; $\lambda$ 为适应度参数; $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 分别为交叉概率和变异概率的适应度调节常量。

(6)交叉算子。从前往后遍历种群,生成随机数,根据相邻 2 个个体的自适应交叉概率较小值为交叉概率,确定两者是否进行交叉。生成 2 个随机数作为交叉位点位置,并在两点间执行双点交叉。

(7)变异算子。对于每个个体,生成随机数,根据其自适应变异概率确定其是否参加变异。若个体参加变异,对于个体基因上每个位点,按照 0.01 的概率发生变异(0 变为 1,或 1 变为 0)。

(8)得到新种群,重新执行步骤(3)。

(9)通过以下 3 个条件判断算法是否收敛:① 最

优个体的适应度值在设定的变异代数内始终不变。

② 迭代次数达到设定的最大迭代次数。③ 适应度函数最低的个体在种群中达到一定的占比。若满足收敛条件,进入步骤(10),否则,进入步骤(4)继续搜索,并将本代种群中最优个体保存进入下一代。

(10)输出结果。

### 3 实例分析

以福建三明机场飞行区的地势设计为例,沿跑道中线及其延长线、飞行区两侧围界设置 3 条平行于跑道的骨架,其中跑道中线及其延长线坡段数量为 6,飞行区两侧围界坡段数量均为 10,骨架间的 2 个扭曲面内各设置 1 条纵向排水沟,骨架外机坪区域扭曲面内排水沟位置固定。由此可知上层规划共有 57 个决策变量,坡度变量的增量取 0.5‰,各扭曲面按照横向间隔 60m、纵向 200m 划分设计坡段(可根据优化效果或实际工程需求设置),并在所有控制点处增加坡段。

遗传算法求解时,种群的规模设置为 300,交叉概率自适应系数  $k_1=0.8$ 、 $k_2=0.8$ 、 $\lambda_1=0.9$ ,变异概率自适应系数  $k_3=0.35$ 、 $k_4=0.35$ 、 $\lambda_2=0.90$ ,整个算法最大进化迭代次数设置为 200 次。遗传算法优化求解后的全场高程设计和排水方案如图 3 所示。

优化方案的设计整体上呈两端高、中间低的态势,更为贴合天然地形,同时做到了变坡平缓、表面平整。场区共设有 4 个排水出口点,主要集中于飞行区中段地势最低处,纵向排水沟距离跑道距离分别为 181 m 和 127 m,各项坡度、坡段设计均符合既有要求且排水通畅。

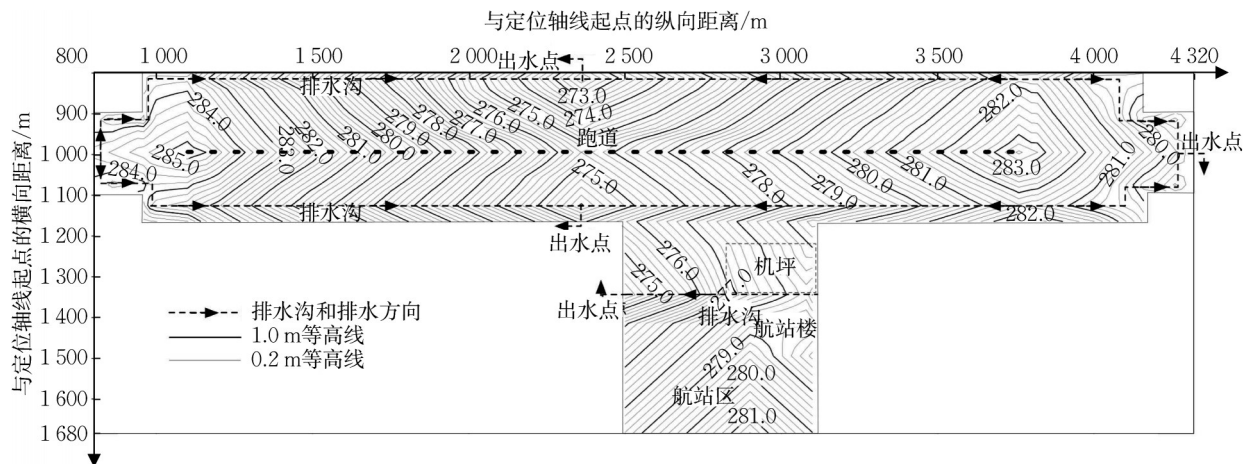


图 3 地势设计优化结果的等高线

Fig. 3 Contour map of elevation design optimization results

土方工程量和成本对比分别见表1和表2,得益于跑道起始段较原方案抬高,削减了端净空的处理面积,边坡处理区挖方和填方的减少量均大于130万·m<sup>3</sup>,此外,场区填方量减少了175.79万·m<sup>3</sup>,降幅7.50%,土方总量减少了449.95万·m<sup>3</sup>,降幅8.06%。由于将运送土方目的地选在天然地面地势

低、填方密集的飞行区中部,挖方成本降低了7 605万元,填方成本降低了4 675万元。本文算法实现了场区挖填平衡,不需要额外借方,平均运距降低将近100 m,土方调配总量节约了19.67%,总成本降低了10.73%,优化方案的土方工程量和成本降低效果显著。

表1 土方工程量对比

Tab. 1 Comparison of earthwork volumes

| 类别           | 单位                   | 优化方案工程量  | 实际工程量    | 优化后工程量增加量 |
|--------------|----------------------|----------|----------|-----------|
| 场区挖方         | 万·m <sup>3</sup>     | 1 663.69 | 1 627.13 | 36.56     |
| 场区填方         | 万·m <sup>3</sup>     | 2 169.25 | 2 345.04 | -175.79   |
| 净空处理及边坡处理挖方  | 万·m <sup>3</sup>     | 752.70   | 927.53   | -174.84   |
| 边坡处理填方       | 万·m <sup>3</sup>     | 549.37   | 685.26   | -135.89   |
| 挖方总计         | 万·m <sup>3</sup>     | 2 416.39 | 2 554.67 | -138.28   |
| 填方总计         | 万·m <sup>3</sup>     | 2 718.62 | 3 030.29 | -311.67   |
| 土方总计         | 万·m <sup>3</sup>     | 5 135.01 | 5 584.96 | -449.95   |
| 借方量          | 万·m <sup>3</sup>     | 0        | 156.41   | -156.41   |
| 弃方量(不记表皮土弃运) | 万·m <sup>3</sup>     | 1.08     | 0        | 1.08      |
| 调配总量         | 万·m <sup>3</sup> ·km | 1 349.06 | 1 679.38 | -330.32   |
| 平均运距         | m                    | 827.61   | 922.17   | -94.56    |

注:借方量计算时考虑填方中草皮土利用量为25.43万·m<sup>3</sup>。

表2 土方工程成本对比

Tab. 2 Comparison of earthwork costs

| 类别   | 单位:万元   |         |          |
|------|---------|---------|----------|
|      | 优化方案    | 实际工程    | 优化后成本增加量 |
| 挖方成本 | 132 901 | 140 506 | -7 605   |
| 填方成本 | 40 779  | 45 454  | -4 675   |
| 借弃成本 | 54      | 7 820   | -7 766   |
| 成本   | 6 745   | 8 396   | -1 651   |
| 总成本  | 180 480 | 202 178 | -21 698  |

## 4 结论与展望

针对飞行区地势设计优化模型决策变量多、约束条件多且约束条件跟设计变量相互影响的情况,以跑道中线、围界等地势设计的主要控制线为骨架、骨架之间的横截面作为扭曲面,并结合双层规划理论来描述和解决地势优化问题。上层规划侧重于飞行区的整体纵断面控制,通过综合考虑土方挖填、边坡处理、净空处理、土方调配,优化土石方工程成本及变坡惩罚项;下层规划以局部表面跟天然地面的拟合函数为目标,侧重于局部的横断面优化,将下层模型拆分为若干个小的二次规划,降低求解的复杂度。将上下层规划结合建立基于双层规划的飞行区地势设计优化模型,最后采用遗传算法对福建三明机场飞行区地势进行设计,经计算优化后土方总计下降8.06%,调配总量下降19.67%,总成本下降

10.73%,模型更好地实现各类复杂约束,更适应实际情况,可用性和可靠性较强。

### 作者贡献声明:

袁捷:确定研究思路和技术路线,提供研究所需数据,指导论文写作。

李一凡:指导论文初稿写作,完成论文修改。

孟祥龙:开展数据分析和完成论文初稿写作。

张家科:计算方法和论文写作指导。

彭逸洲:所需计算代码编制、调试和运行求解。

### 参考文献:

- [1] 陈丽. 山区机场地势设计及土石方量计算探讨[J]. 建设科技, 2017, (14): 130. DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2017.14.060. CHEN Li. Discussion on terrain design and earthwork calculation of mountainous airports [J]. Construction Science and Technology, 2017, (14): 130. DOI:10.16116/j.cnki.jskj.2017.14.060.
- [2] 刘海军, 李淑明, 何彬峰. 计算机辅助机场地势优化设计[J]. 基建优化, 2000, (5): 10. LIU Haijun, LI Shuming, HE Bingfeng. Computer-aided optimal design of airfield surface [J]. Optimization of Capital Construction, 2000, (5): 10.
- [3] 李元光, 楼设荣, 许巍. 机场地势设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014. LI Yuanguang, LOU Sherong, XU Wei. Airport topography design[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [4] 杨东援, 王国强, 朱照宏. 机场场道工程CAD系统中设计面



- 三维曲面模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1998, (1): 53.
- YANG Dongyuan, WANG Guoqiang, ZHU Zhaohong. 3D design surface model for the roads in airport CAD system [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 1998, (1): 53.
- [5] JONG J C. Optimizing highway alignments with genetic algorithms[D]. Maryland: University of Maryland, 1998.
- [6] JHA M K, SCHONFELD P. A highway alignment optimization model using geographic information systems [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2004, 38 (6): 455.
- [7] KANG M W, SCHONFELD P, YANG N. Prescreening and repairing in a genetic algorithm for highway alignment optimization [J]. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2009, 24(2): 109.
- [8] HARE W, LUCET Y, RAHMAN F. A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and side-slopes in road construction [J]. European journal of operational research, 2015, 241(3): 631.
- [9] 李俊, 宋松柏, 何灏川, 等. 基于多目标双层规划模型的汛期分期研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4): 807. DOI:10.16058/j.issn.1005-0930.2021.04.003.
- LI Jun, SONG Songbai, HE Haochuan, *et al.* Study on the flood season division based on multi-objective bi-level programming model [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29 (4): 807. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.04.003.
- [10] 中国民用航空局. 民用机场飞行区技术标准: MH 5001—2021[S]. 北京: 中国民航出版社, 2021.
- Civil Aviation Administration of China. Aerodrome technical standards: MH 5001—2021 [S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2021.
- [11] 中国民用航空局. 民用机场排水设计规范: MH/T 5036—2017[S]. 北京: 中国民航出版社, 2017.
- Civil Aviation Administration of China. Specifications for aerodrome drainage design: MH/T 5036—2017 [S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2017.
- [12] ARRAM A, AYOB M, KENDALL G, *et al.* Bird mating optimizer for combinatorial optimization problems [J]. IEEE Access, 2020, 8: 96845.

### (上接第 1508 页)

- [10] O'BRIEN M K . A study of concrete bridge columns using innovative materials subjected to cyclic loading [D]. Reno: University of Nevada, 2006.
- [11] SAIIDI, M S, O'BRIEN, M, SADROSSADAT-ZADEH M. Cyclic response of concrete bridge columns using superelastic nitinol and bendable concrete [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(1): 69.
- [12] SAIIDI M S, WANG H Y. Exploratory study of seismic response of concrete columns with shape memory alloys reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 2006, 103(3): 436.
- [13] BILLAH, A H M M, ALAM, M S. Seismic fragility assessment of concrete bridge pier reinforced with superelastic shape memory alloy [J]. Earthquake Spectra, 2015, 31 (3): 1515.
- [14] BILLAH, A H M M, ALAM, M S. Seismic performance of concrete columns reinforced with hybrid shape memory alloy (SMA) and fiber reinforced polymer (FRP) bars [J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 730.
- [15] BILLAH A H M M, ALAM M S. Probabilistic seismic risk assessment of concrete bridge piers reinforced with different types of shape memory alloys [J]. Engineering Structures, 2018, 162: 97.
- [16] SHRESTHA B, HAO H. Parametric study of seismic performance of super-elastic shape memory alloy-reinforced bridge piers [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12(9): 1076.
- [17] XIANG N, GOTO Y, OBATA M, *et al.* Passive seismic unseating prevention strategies implemented in highway bridges: a state-of-the-art review [J]. Engineering Structure, 2019, 194: 77.
- [18] ALAM M S, BHUIYAN M A R, BILLAH A H M M. Seismic fragility assessment of SMA-bar restrained multi-span continuous highway bridge isolated by different laminated rubber bearings in medium to strong seismic risk zones[J]. Bull Earthquake Engineering, 2012, 10(6): 1885.
- [19] KAN WY, PAMPANIN S, PALMERMO A, *et al.* Self-centering structural systems with combination of hysteretic and viscous energy dissipations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2010, 39(10): 1083.
- [20] XIANG N L, CHEN X, ALAM MS. Probabilistic seismic fragility and loss analysis of concrete bridge piers with superelastic shape memory alloy-steel coupled reinforcing bars [J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110229.