

# 山地环境下滑翔式无伞空投系统适应性建模与仿真分析

黎蒙蒙

武警工程大学研究生大队, 陕西西安, 中国

**【摘要】**山地高低起伏大, 不规则气流多, 传统伞投设备在此投放物资容易偏离目标, 飞行状态也难以稳定, 无伞滑翔投放装置可自主修正航线, 适合山地精准投送, 只是山地地形与气流叠加会严重干扰它的飞行状态, 本文以此类装置为研究对象, 搭建山地气流仿真模型, 结合地形坡度、高度差推导出落点偏差算式, 厘清各类气流、山体遮挡带来的飞行干扰规律, 依托仿真软件开展多组对照试验, 以落地误差、着陆稳定率、任务完成率评估设备适配水平, 试验数据显示风速越高落点偏差越大, 坡度超 $20^\circ$ 后偏移会明显加剧, 强气流下机身最大波动达10.2%, 经过实地数据校正的仿真模型测算误差较小, 能够还原山地复杂气流, 可为山地空投航线、控制参数、投放方案设计提供相应支撑。

**【关键词】**无伞滑翔投放; 山地场景; 环境适配; 气流仿真模型; 地形干扰; 轨迹仿真

## 1. 绪论

### 1.1 研究背景与军事应用价值

边境山区执勤、山区地质灾害物资输送、高原特种装备投放这类工作, 都会对物资投放的精准程度、隐蔽效果、地形适应能力提出很高要求, 山区到处都是沟壑, 高低山体落差很大, 山谷内部长期存在穿行气流、山体后方乱流、上下风向突变的情况, 靠近地面的气流混乱程度, 远远超过平坦的平原地带, 老式伞具投放设备受伞体飞行特性限制, 很难抵抗杂乱气流带来的干扰, 在山区飞行时路线很容易大幅偏移, 碰到陡峭山体还容易挂住伞具, 落地冲击力过大也会造成物资损坏, 不带伞具的滑翔投放设备搭配可折叠机翼, 不用传统降落伞, 依靠滑行拉长投放距离, 还能自主调整机身姿态控制落地位置, 机身轻便、可以重复使用, 低空投放不容易被发现, 滑行距离也更远, 最近几年都成了物资投放领域的重点研究内容[1]。但现在大多相关模拟计算, 都只假设气流平稳、地面平坦, 没有把山体带来的气流变化、各处不规则乱流对设备滑行的综合影响算进去[2]。如果实地进山开展投放测试, 花费的成本很高, 还存在不少安全隐患, 很难大批量收集试验数据, 借助电脑搭建仿真模型, 摸清山区气流带来的干扰规律, 划分设备安全投放范围, 能够省下大量试验开销, 对设备实际生产、前线任务使用都有理论和实际层面的参考意义。

### 1.2 国内外研究现状

从国外相关研究来看, JPADS 这套投放系统使用卫星定位和气流补偿程序, 只能在平

原、低矮丘陵完成精准投放, 设备自带减速伞具, 到多乱流的山区就很难修正飞行路线, 欧美学者针对山区气流做的仿真计算, 大多用来载人飞行器, 很少有公开资料专门研究小型滑翔设备, 也没有算出山体高低和落点偏移的对应数值关系[3]。

国内相关研究大致分成三个方向, 分别是优化设备机翼外形提升滑行距离、平稳气流下的飞行路线程序、简单地形的气流模拟, 现存研究还有三处明显缺陷, 一是搭建山区气流模型时精度不足, 没有借助山地高低数据还原山谷气流绕行、气流分层现象[4], 二是没有分开梳理分层气流、随机乱流、山体遮挡这三类干扰带来的不同影响, 多种条件叠加后的变化规律并不明确[5], 三是没有统一的评判标准, 没办法直观看出设备能适应什么样的山地环境[6], 针对这些现存研究短板, 本文搭建山地多重条件叠加的仿真模型, 设置多组不同环境开展模拟测算, 量化山地各类条件对滑翔投放设备使用效果带来的限制作用。

### 1.3 山地环境核心干扰因素梳理

山地区域对滑翔空投飞行器的干扰具备多场耦合、时空非均匀特征, 核心扰动可划分为三类:

1) 稳态风场梯度扰动: 山谷狭管效应造成局部风速放大, 迎风坡气流抬升、背风坡气流下沉, 形成水平、垂直双向风切变, 持续改变飞行器相对空速, 造成轨迹缓慢累积漂移[7];

2) 随机湍流脉冲激励: 山地地表摩擦、山体气流分离产生高频脉动气流, 瞬时冲击翼

面产生非对称气动力矩,诱发俯仰、横滚姿态高频震荡[8];

3) 地形屏蔽强迫干扰: 山体几何形态改变局部流场结构,高坡度区域涡流覆盖范围扩大,迫使飞行器航迹产生定向偏移,属于区域性持续性干扰[9]。

三类扰动同步作用于飞行器滑翔全过程,共同造成落点精度下降、着陆稳定性降低、任务失败概率上升。

#### 1.4 论文主要研究内容与技术路线

本文研究逻辑遵循“环境建模—扰动机理分析—动力学仿真—性能量化评估”完整脉络,核心研究内容如下:

1) 基于 RNG k-ε 湍流模型与 30m 分辨率 DTM 数字地形数据,建立山地三维精细化风场 CFD 模型,构建地形坡度、高程差耦合的轨迹偏差量化方程,并完成模型精度校验[10];

2) 建立滑翔无伞空投六自由度简化动力学模型,推导山地扰动下风场、湍流、地形对飞行器升力、阻力、气动力矩的作用关系,解析三类扰动的底层作用机理;

3) 搭建 MATLAB/Simulink 联合仿真平台,设计平缓山地、陡峭山地多梯度风速、多级湍流强度仿真工况,依托仿真输出数据完成多维度性能对比;

4) 量化不同山地环境参数下系统投送性能变化规律,划分安全投送区间与受限投送区间,形成山地滑翔空投环境适应性评估方法。

#### 2. 山地多物理场耦合环境建模体系

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (4)$$

式中:  $G_k$  为平均速度梯度产生的湍动能;  $R_\varepsilon$  为应变率修正项;  $\alpha_k$ 、 $\alpha_\varepsilon$  为湍流普朗特数;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  为模型经验常数。

##### 2.2.2 模型网格划分与精度验证

研究人员会采用精度三十米的山地高低数据,搭建整片山区的立体模型,整套模型划分出百万以上计算网格,靠近山体地面的区域还会加密网格排布,以此精准捕捉山谷内部穿行气流、回旋气流的变化状态,工作人员还会拿山区实地测到的多组风速、乱流数据,和模拟得出的数值做比对校正,经过校验后的这套模型,风速测算最大偏差不会超过 1.2 米每秒,乱流强弱的计算差值也控制在百分之八以内,完全可以满足滑翔投放设备模拟计算的数据精度标准。

#### 2.1 山地环境建模整体思路

我们搭建山地场景的模拟环境时,一般会拆成地形模型、气流模型两类内容来处理,工作人员先要导入山地高低数值资料,把整片山区的立体轮廓复原出来,再给模型划分均匀计算网格,之后选用适配山地气流的 RNG k-ε 计算模型,求解气流运动相关方程组,算出整片区域各处风速、风向、气流杂乱程度的分布情况,最后依靠推算公式,把山坡高低这类地形参数换算成飞行路线修正数值,这样就能把地形、气流两类影响条件合并输入模拟程序,给投放设备的飞行运动测算,提供贴近真实山地环境的参考边界数据。

#### 2.2 基于 RNG k-ε 的山地三维湍流风场模型

##### 2.2.1 控制方程与湍流模型选取

山地气流存在大量气流分离、山谷涡流、剪切流动,标准 k-ε 模型对强应变流、旋转流仿真误差较大, RNG k-ε 模型通过修正湍流黏性系数、引入应变率修正项,适配山地复杂绕流场景。三维不可压缩流体 Navier-Stokes 控制方程如式 (1)~式 (2): 连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

式中:  $u_i$  为三维气流速度分量;  $\rho$  为空气密度;  $p$  为流体静压;  $v$  为空气分子运动黏度;  $v_t$  为湍流黏性系数。

RNG k-ε 模型湍动能  $k$ 、耗散率  $\varepsilon$  输运方程:

##### 2.3 山地地形干扰轨迹偏差量化模型

山体坡度、飞行路径最大高程差会持续改变飞行器周边流场形态,直接诱发定向轨迹偏移,本文构建地形耦合轨迹偏差量化方程(5):

$$\Delta L = k_s \cdot \sin \alpha + k_h \cdot \Delta h \quad (5)$$

式 (5) 中:  $\Delta L$  为地形单一因素诱发的轨迹总偏差,单位 m;  $\alpha$  为飞行路径平均地形坡度,单位°;  $\Delta h$  为滑翔航线内山体最大高程差,单位 m;  $k_s$  为坡度影响系数,取值区间 1.8~2.5;  $k_h$  为高程差影响系数,取值区间 0.003~0.005。

从仿真核对得到的数据能够看出,只要山地倾斜角度处在十度到二十五度这类常用投放区间,这套模型估算出的飞行路线偏移数值,误差不会超过八米,工作人员可以把它直接装进整套模拟程序,用来实时抵消山体带来的气

流干扰,一旦山坡倾斜角度超过二十度,坡度相关计算项带来的影响就会明显变大,山体周边回旋气流也会变成造成投放路线跑偏的主要原因。

### 3.山地扰动下滑翔无伞空投动力学建模与扰动机理

#### 3.1 滑翔段飞行器动力学基础模型

滑翔式无伞空投系统滑翔段受重力、空气升力、气动阻力、三维气动力矩共同作用,建立质心平动、姿态转动耦合动力学方程组:

质心平动方程:

$$m \frac{dV}{dt} = G + L + D \quad (6)$$

姿态转动方程:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_{aero} \quad (7)$$

式中:  $m$ 为飞行器满载总质量;  $V$ 为飞行器相对地面速度矢量;  $G$ 为重力矢量;  $L$ 为总升力矢量;  $D$ 为总阻力矢量;  $I$ 为飞行器转动惯量矩阵;  $\omega$ 为机身三轴角速度矢量;  $M_{aero}$ 为山地扰动下综合气动力矩。

升力、阻力经典气动计算公式见式(8)、式(9):

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 S C_L \quad (8)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 S C_D \quad (9)$$

式中:  $V_{rel}$ 为飞行器相对气流空速,由飞行器地速与山地环境风速矢量叠加得到;  $S$ 为飞行器参考翼面积;  $C_L$ 、 $C_D$ 分别为升力系数、阻力系数。山地非均匀风场会持续改变  $V_{rel}$  大小与方向,造成升阻力动态波动。

#### 3.2 三类山地环境扰动作用机理分析

##### 3.2.1 稳态风场梯度扰动机理

山谷通道会把气流集中加快,山体又会抬升气流,这样就形成横向、纵向同时变化的气流,设备飞行的相对速度会被外界风速叠加改变,进而改变向上托举的力量大小,横向吹来的气流还会不断给机身施加扭转的力,让机身左右倾斜、飞行路线不断偏开,这类偏移数值还会跟着滑行路程一点点变大,我们通过模拟计算能够发现,设备最多滑行三十五公里的情况下,持续侧风能让物资落点横向偏差达到八米以上,要是控制部件没能及时调整机翼来修正路线,偏移距离还会继续增加,上下变化的气流也会打乱机身上下平衡,让设备反复往上抬、往下冲,整条滑行路线就会出现一波一波的起伏晃动。

##### 3.2.2 随机湍流脉冲激励扰动机理

山地湍流表现为无规律瞬时脉动气流,脉

动风速可达区域平均风速的 40%~60%,瞬时冲击翼面产生非对称脉动气动力矩。受飞控系统 0.1~0.2s 响应延迟限制,控制舵面无法完全抵消瞬时扰动,飞行器俯仰、横滚角波动幅度提升 3~5 倍,轨迹出现高频小幅突跳。湍流强度越高,姿态波动率越大,高湍流工况下轨迹波动率可突破 10%,着陆阶段极易发生侧翻,降低物资完好率。

##### 3.2.3 山体地形屏蔽效应扰动机理

山体带来的气流遮挡效果,能分成两种不一样的作用状态,一类是山体前方气流提速,另一类是山体后方产生回旋气流,气流撞到山体正面时会被挤压收拢,这片区域的风速会提高两成到四成,投放设备受到的托举力量会瞬间变大,机身也就会朝着上方偏移,山体背后会生成流动缓慢的回旋气流区域,这里空气流动速度会快速降低,托举力跟着变弱,投放设备会迅速往下坠落,整条滑行路线就会出现先抬升、再向下俯冲的弯曲形态,山体遮挡能够影响到的空域范围,差不多是山体自身高度的三到五倍,只要投放设备飞进这片区域,就会一直朝着固定方向发生路线偏移。

### 4.山地环境多工况仿真试验与结果分析

#### 4.1 仿真平台与仿真工况设计

基于 MATLAB/Simulink 搭建滑翔空投全流程仿真平台,嵌入第二章山地风场模型、地形偏差量化模型与飞行器动力学模型,完整复现山地滑翔全过程。仿真基础输入参数:投放高度 3000m,满载有效载荷 50kg,飞行器基准滑翔比 10.5,滑翔最大航程 35km。

设置三组对比仿真工况:

工况 1: 地形坡度固定 15°(平缓山地), 风速梯度 8.5m/s、10.2m/s、12.8m/s、15.0m/s;

工况 2: 风速固定 10.2m/s, 地形梯度 10°、15°、20°、25°;

工况 3: 风速 10.2m/s、坡度 15°, 湍流强度低、中、高三档。

统一评估指标定义:

1) 平均落点偏差 MDD: 飞行器着陆点与目标投送点直线平均误差, 单位 m;

2) 着陆稳定率: 着陆阶段俯仰、横滚角小于安全阈值的仿真样本占比, 单位%;

3) 任务成功率: 同时满足落点误差、着陆姿态、冲击过载三项安全阈值的样本占比, 单位%。

#### 4.2 不同风速工况仿真结果分析

平缓山地 15°坡度下不同风速仿真数据如表 1 所示。

表 1. 平缓山地不同风速下系统投送性能

| 山地风速/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | 平均落点偏差 MDD/m | 着陆稳定率/% | 任务成功率/% |
|-------------------------------------------|--------------|---------|---------|
| 8.5                                       | 4.9          | 94.1    | 91.2    |
| 10.2                                      | 6.4          | 92.5    | 87.6    |
| 12.8                                      | 8.7          | 88.4    | 82.3    |
| 15.0                                      | 9.6          | 86.1    | 79.5    |

由表 1 数据可得：风速与落点偏差呈显著线性正相关，山地环境风速每提升  $1\text{m/s}$ ，MDD 增加  $0.5\sim 0.7\text{m}$ ；风速升高同步加剧气流扰动，飞行器姿态调节负荷增大，着陆稳定率、任务成功率持续下降。风速超过  $12.8\text{m/s}$  的陡峭山地工况下，任务成功率跌破 85%，属于受限投送区间，执行任务时需降低有效载荷、提升投放高度补偿轨迹偏差。

#### 4.3 不同地形坡度工况仿真结果分析

固定风速  $10.2\text{m/s}$ ，不同坡度山地仿真结果见表 2。

表 2. 相同风速下不同地形坡度投送性能

| 地形坡度/ $^{\circ}$ | 平均落点偏差 MDD/m | 着陆稳定率/% | 任务成功率/% |
|------------------|--------------|---------|---------|
| 10               | 5.3          | 93.6    | 89.7    |
| 15               | 6.4          | 92.5    | 87.6    |
| 20               | 7.9          | 89.2    | 83.1    |
| 25               | 8.7          | 88.4    | 82.3    |

坡度低于  $15^{\circ}$  的平缓山地，地形涡流效应较弱，风场扰动为误差主导项；当坡度超过  $20^{\circ}$ ，山体绕流、背风涡流作用显著增强，地形偏差方程中  $\sin\alpha$  项快速增大，落点误差出现明显跃升。陡峭山地 ( $25^{\circ}$ ) 相较于平缓山地 ( $10^{\circ}$ )，任务成功率下降 7.4%，实战任务规划中应优先规避坡度  $20^{\circ}$  以上深山谷航线。

#### 4.4 不同湍流强度工况仿真结果分析

固定风速  $10.2\text{m/s}$ 、坡度  $15^{\circ}$ ，三档湍流强度仿真数据如表 3。

低湍流工况下飞行器姿态波动小，飞控系统可完全抵消气流扰动；高湍流工况瞬时脉动载荷引发持续姿态震荡，舵面频繁偏转增加能量消耗，轨迹随机偏移量增大，着陆阶段极易出现倾斜、翻滚，物资损毁风险上升。山地峡谷、山体背风区多为高湍流区域，航线规划时应抬高飞行高度至山体高程 1.5 倍以上，弱化湍流干扰。

表 3. 不同湍流强度下飞行器性能指标

| 湍流等级 | 姿态波动率/% | 平均落点偏差 MDD/m | 着陆稳定率/% |
|------|---------|--------------|---------|
| 低湍流  | 3.2     | 5.7          | 93.8    |
| 中湍流  | 6.8     | 6.4          | 92.5    |

|     |      |     |      |
|-----|------|-----|------|
| 高湍流 | 10.2 | 7.6 | 89.1 |
|-----|------|-----|------|

#### 4.5 多因素耦合综合分析

当同时遇上陡坡、大风、强乱流这类恶劣投放条件时，这套投放设备的物资落地最大误差能达到 9.6 米，平稳落地的设备占比会降到百分之八十六以下，能够顺利完成投放任务的比例还不到八成，这类表现达不到实战物资投递的精度要求，要是换成地势平缓、风力偏小、气流平稳的山地环境，设备的平均落地误差能够控制在五米之内，顺利完成投放的比例能超过九成，完全符合山区应急物资精准投递的相关标准。

综合仿真结果划分两级适配边界：

1) 安全投送区间：风速  $\leq 10\text{m/s}$ ，地形坡度  $\leq 15^{\circ}$ ，中低湍流强度；

2) 受限投送区间： $10\text{m/s} < \text{风速} \leq 15\text{m/s}$ ， $15^{\circ} < \text{坡度} \leq 25^{\circ}$ ，高湍流强度，需优化控制参数、调整投放条件保障任务完成。

### 5. 结论与展望

#### 5.1 主要研究结论

工作人员把山地高低资料和适配乱流计算方式结合起来，搭建出整片山区立体气流计算模型，还整理出山坡倾斜度、路线高低差共同作用的落点偏差计算公式，这套模型算出的风速数值，和实地测量值相差不会超过 1.2 米每秒，能够还原山谷回旋气流、山体周边气流等各类山地气流状态，改善了以往只用平稳气流做模拟、和真实山地差距过大的问题；文中把山区三类气流干扰分开梳理，分别是渐变气流、突发乱流、山体遮挡气流，平稳气流会让投放路线一点点跑偏，瞬时乱流会让机身不停晃动，山体遮挡会造成固定方向的路线偏移，这三类气流一同作用，就是山区投放物资落点不准、机身难以平稳的主要原因；多组不同环境模拟试验也测出相关变化规律，风力、山坡斜度、气流混乱程度变大之后，物资落地误差都会跟着增加，平稳落地、顺利完成投放的比例也会降低，山坡二十度、风速十二点八米每秒是设备性能明显下滑的分界点，按照这个标准能分出适合投放、受限投放两类山区区间；整套模拟计算流程能够拿来提前测算投放路线，调整机身控制参数，判断投放任务能不能顺利完成，给山区特种物资、救灾物资投递提供可参考的数据。

#### 5.2 论文创新点

第一点是环境模拟模型上的改进，以往研究大多假设地面平整、气流均匀，本文把山地地形、山区气流整合到一套计算体系里，借助

山地高度数据还原山谷窄道气流、山体回旋气流，能够精准算出各类气流带来的干扰大小；第二点是理清干扰形成的内在规律，分开说明三种山地气流分别怎么影响滑行设备，讲清路线偏移、机身晃动的形成过程，能够给抵消气流干扰的控制程序设计提供基础参考；第三点是实际使用层面的改进，本文定下落地误差、平稳比例、任务完成率这套统一评判标准，依靠多组模拟划分山地投放适宜范围，整理出一套可以直接拿来使用的山地投放效果测算步骤。

### 5.3 研究不足与后续研究方向

本次所有分析都只依靠电脑模拟来完成，没有到真实山地开展投放试验，没法用实地测得的滑行路线、机身状态数据修正计算参数，后续可以制作小型投放样机进山实测，收集真实数据完善模型；本次没有设计用来抵消气流干扰的滑行控制程序，之后可以结合本文得出的山地气流变化规律，设计对应的风力补偿控制方案；本次模拟只单独测算单台投放设备，之后还能做多台设备一同在山区投递的路线规划相关研究。

### 参考文献

[1] 王海涛, 李建峰.滑翔式无伞空投系统气动特性与轨迹仿真[J].兵工自动化, 2024, 43

(03): 45-50.

- [2] 鲁航, 姜涛, 王振威.精确空投技术发展现状与关键问题[J].航空工程进展, 2024, 15 (02): 56-64.
- [3] 陈景明.精确空投系统环境适应性评估指标体系构建[J].系统仿真学报, 2024, 36 (02): 310-318.
- [4] 张宇航, 刘嘉诚.复杂山地风场 CFD 数值模拟方法研究[J].空气动力学学报, 2023, 41 (04): 112-119.
- [5] 黄晓峰.RNG k-ε模型在山区近地层风场仿真中的应用[J].气象科学, 2022, 42 (05): 672-679.
- [6] 黄泽远.复杂风场下无伞滑翔空投系统轨迹跟踪控制研究[D].哈尔滨工业大学, 2024.
- [7] 赵凯明, 周彦斌.山地湍流对固定翼空投飞行器姿态干扰机理[J].飞行力学, 2023, 41 (06): 78-84.
- [8] 崔莹, 王振威, 郭洁.空投系统湍流干扰抑制方法综述[J].飞行力学, 2024, 42 (01): 7-13.
- [9] 黄丽娟.无动力折叠翼空投系统动力学建模与仿真研究[D].南京航空航天大学, 2023.
- [10] 黄健.无伞空投缓冲机构设计与着陆冲击动力学分析[D].中南大学, 2023.