



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114326815 B

(45) 授权公告日 2023. 06. 09

(21) 申请号 202111681680.4

(22) 申请日 2021.12.30

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 114326815 A

(43) 申请公布日 2022.04.12

(73) 专利权人 北京航空航天大学  
地址 100000 北京市海淀区学院路37号

(72) 发明人 李道春 申童 赵仕伟 阚梓  
邵浩原 姚卓尔 罗漳平

(74) 专利代理机构 北京天汇航智知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11987  
专利代理师 黄川

(51) Int. Cl.  
G05D 1/10 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 112034875 A, 2020.12.04

CN 112327922 A, 2021.02.05

CN 112329200 A, 2021.02.05

EP 3771956 A1, 2021.02.03

柳子栋; 詹浩; 邓阳平; .跑道特性对飞机起飞性能影响的仿真研究.航空计算技术.2010, (第03期), 全文.

审查员 刘洋成

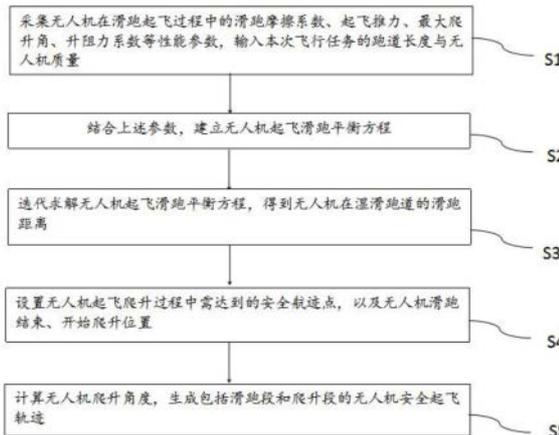
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法

(57) 摘要

本发明提供了一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,包括:采集无人机在滑跑起飞过程中的滑跑摩擦系数、起飞推力、最大爬升角、升阻力系数等性能参数,结合本次飞行任务的跑道长度与无人机质量,建立无人机起飞滑跑平衡方程;迭代求解无人机起飞滑跑平衡方程,得到无人机在湿滑跑道的滑跑距离;设置无人机起飞爬升过程中需达到的安全航迹点,以及无人机滑跑结束、开始爬升位置;计算无人机爬升角度,生成包括滑跑段和爬升段的无人机安全起飞轨迹。本发明在机场湿滑跑道情况下,基于无人机的实际性能,判断其是否可以安全起飞,并设计相应的无人机起飞轨迹,从而给出无人机在湿滑跑道起飞时的操作建议,以提升无人机在起飞过程中的安全性能。



1. 一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1,采集湿滑跑道下,无人机滑跑的地面摩擦系数 $f$ 、无人机起飞推力 $T$ 、最大爬升角度 $\theta_M$ 以及滑跑起飞迎角下的无人机机体升力系数 $C_L$ 与阻力系数 $C_D$ ,并获取本次飞行任务的机场跑道长度 $R$ 、无人机起飞机体质量 $m$ ;

S2,建立湿滑跑道下无人机起飞滑跑平衡方程,公式如下:

$$\begin{cases} mg = \frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_L + N_t \\ ma_t = T - \frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_D + F_t \\ F_t = f N_t \end{cases}$$

式中, $g$ 为机场当地的重力加速度, $\rho$ 为机场当地的空气质量密度, $S$ 为无人机起飞滑跑过程中的迎风面积;平衡方程中带下标 $t$ 的物理量为时间相关项,其中, $V_t$ 为无人机的瞬时滑跑速度, $N_t$ 为无人机滑跑过程中受到的瞬时地面支撑力, $a_t$ 为无人机的瞬时滑跑加速度, $F_t$ 为无人机与湿滑跑道之间产生的瞬时摩擦力, $\frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_L$ 项为无人机在滑跑中的瞬时升力 $L_t$ , $\frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_D$ 项为无人机在滑跑中的瞬时气动阻力 $D_t$ ;

S3,设无人机初始飞行速度为0,迭代求解步骤S2中的无人机起飞滑跑平衡方程,当瞬时滑跑速度 $V_t$ 足够大时,机体升力与重力达到平衡,瞬时地面支撑力 $N_t$ 变为0,此时意味着无人机离地起飞,迭代计算结束;

对瞬时滑跑速度 $V_t$ 进行积分,得到无人机的滑跑距离 $W$ ,若 $W \geq R$ ,则应取消或推迟起飞任务,若 $W < R$ ,则进入步骤S4;

S4,设无人机在起飞过程中的位置坐标为 $(X_t, Y_t)$ ,其中 $X_t$ 与 $Y_t$ 分别为无人机距离滑跑开始位置的纵向与垂向距离,无人机开始滑跑位置为点 $P_0(0, 0)$ ;根据机场的周边地形环境,设置无人机起飞过程中为了躲避障碍物,需要爬升达到的安全航迹点 $P_A(X_A, Y_A)$ ;根据步骤S3中计算得到的无人机滑跑距离 $W$ ,得到无人机滑跑结束、开始爬升位置 $P_B(W, 0)$ ;

S5,计算无人机从点 $P_B$ 抵达点 $P_A$ ,所需的爬升角度 $\theta = \arctan(\frac{Y_A}{X_A - W})$ ;若 $\theta > \theta_M$ ,则应取消或推迟起飞任务;若 $\theta \leq \theta_M$ ,则生成无人机滑跑起飞轨迹,该轨迹由自点 $P_0$ 到点 $P_A$ 的滑跑段以及由点 $P_A$ 到点 $P_B$ 的爬升段组成,无人机依照该轨迹执行起飞任务。

2. 根据权利要求1所述的湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,其特征在于,步骤S1中,湿滑跑道下,地面摩擦系数 $f$ 根据实验经验,取值在0.2~0.4之间。

## 一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及无人机飞行控制技术领域,特别是涉及一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法。

### 背景技术

[0002] 起飞过程是航空飞行器整个飞行过程中的事故高发段,根据欧洲航空安全局于2018年发表的《航空年度安全总结报告》统计,2013至2017年,冲/偏出跑道事故的发生率在所有民航飞行事故类型中占据第一位,且81%的冲/偏出跑道事故属于高风险航空事故。由于降雨、降雪所引起的跑道条件的恶化同样是威胁无人机起飞安全的主要因素之一。跑道积雪、结冰和积水会形成湿滑跑道,导致无人机在起降阶段滑跑过程中摩擦系数减小,不易保持方向、起飞距离增加甚至冲出跑道。因此,无人机起飞过程需要考虑复杂的跑道条件,与之相关的无人机起飞轨迹设计对于无人机飞行安全尤为重要。

[0003] 美国联邦航空管理局的AC-25-31和中国民用航空局的CCAR 121均给出了湿滑跑道起飞相关的民航适航条例。其中AC-25-31分析了不同跑道表面状况对摩擦系数和起飞距离的影响,但对于起飞操作方面没有进行具体的标准要求。CCAR 121中给出了民航飞机在干、湿和受污染情况下的起飞跑道长度要求,要求当出现跑道湿滑情况时,有效跑道长度应能满足滑跑距离相比正常滑跑距离增加115%之情况,但并未给出具体的起飞性能计算方法,也缺少详细的起飞操作要求。相比于各国适航管理机构对于民航飞机湿滑跑道起飞的各类适航规定与建议,对于无人机在湿滑跑道中的安全起降研究尚处于起步阶段,尚未有成熟的适航条例颁布。同时,无人机自主起飞相比民航飞机的驾驶员操作起飞,在风险性上进一步提高,急需给出无人机在湿滑跑道起飞时的操作建议,以提升无人机在起飞过程中的安全性能。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,在机场湿滑跑道情况下,基于无人机的实际性能,判断其是否可以安全起飞,并设计相应的无人机起飞轨迹,从而给出无人机在湿滑跑道起飞时的操作建议,以提升无人机在起飞过程中的安全性能。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供了如下方案:

[0006] 一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,包括如下步骤:

[0007] S1,采集湿滑跑道下,无人机滑跑的地面摩擦系数 $f$ 、无人机起飞推力 $T$ 、最大爬升角度 $\theta_M$ 以及滑跑起飞迎角下的无人机机体升力系数 $C_L$ 与阻力系数 $C_D$ ,并获取本次飞行任务的机场跑道长度 $R$ 、无人机起飞机体质量 $m$ ;

[0008] S2,建立湿滑跑道下无人机起飞滑跑平衡方程,公式如下:

$$[0009] \quad \begin{cases} mg = \frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_L + N_t \\ ma_t = T - \frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_D + F_t \\ F_t = f N_t \end{cases}$$

[0010] 式中,  $g$ 为机场当地的重力加速度,  $\rho$ 为机场当地的空气质量密度,  $S$ 为无人机起飞滑跑过程中的迎风面积;平衡方程中带下标 $t$ 的物理量为时间相关项,其中,  $V_t$ 为无人机的瞬时滑跑速度,  $N_t$ 为无人机滑跑过程中受到的瞬时地面支撑力,  $a_t$ 为无人机的瞬时滑跑加速度,  $F_t$ 为无人机与湿滑跑道之间产生的瞬时摩擦力,  $\frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_L$ 项为无人机在滑跑中的瞬时升力 $L_t$ ,  $\frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_D$ 项为无人机在滑跑中的瞬时气动阻力 $D_t$ ;

[0011] S3, 设无人机初始飞行速度为0, 迭代求解步骤S2中的无人机起飞滑跑平衡方程, 当瞬时滑跑速度 $V_t$ 足够大时, 机体升力与重力达到平衡, 瞬时地面支撑力 $N_t$ 变为0, 此时意味着无人机离地起飞, 迭代计算结束;

[0012] 对瞬时滑跑速度 $V_t$ 进行积分, 得到无人机的滑跑距离 $W$ , 若 $W \geq R$ , 则应取消或推迟起飞任务, 若 $W < R$ , 则进入步骤S4;

[0013] S4, 设无人机在起飞过程中的位置坐标为 $(X_t, Y_t)$ , 其中 $X_t$ 与 $Y_t$ 分别为无人机距离滑跑开始位置的纵向与垂向距离, 无人机开始滑跑位置为点 $P_0(0, 0)$ ;根据机场的周边地形环境, 设置无人机起飞过程中为了躲避障碍物, 需要爬升达到的安全航迹点 $P_A(X_A, Y_A)$ ;根据步骤S3中计算得到的无人机滑跑距离 $W$ , 得到无人机滑跑结束、开始爬升位置 $P_B(W, 0)$ ;

[0014] S5, 计算无人机从点 $P_B$ 抵达点 $P_A$ , 所需的爬升角度 $\theta = \arctan\left(\frac{Y_A}{X_A - W}\right)$ ;若 $\theta > \theta_M$ , 则应取消或推迟起飞任务;若 $\theta \leq \theta_M$ , 则生成无人机滑跑起飞轨迹, 该轨迹由自点 $P_0$ 到点 $P_A$ 的滑跑段以及由点 $P_A$ 到点 $P_B$ 的爬升段组成, 无人机依照该轨迹执行起飞任务。

[0015] 进一步的, 步骤S1中, 湿滑跑道下, 地面摩擦系数 $f$ 根据实验经验, 取值在0.2~0.4之间。

[0016] 根据本发明提供的具体实施例, 本发明公开了以下技术效果: 本发明提供的湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法, (1) 相比民机适航条例中湿滑跑道情况下只是对滑跑距离做出调整, 未给出具体的性能计算方法或起飞操作建议, 本发明所提方法同时考虑了机场湿滑程度、无人机实际性能以及爬升段的避障需求, 能够更准确地判断无人机是否适合起飞, 并能够设计出安全性更高的起飞轨迹; (2) 相比基于飞行动力学全量方程的起飞航迹仿真方法的复杂性, 本发明所提起飞轨迹在合理考虑重要指标的同时, 操作简便, 避免了过高的计算复杂度。

## 附图说明

[0017] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动性的前提下, 还可以根据这些附图

获得其他的附图。

[0018] 图1为本发明湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法的流程示意图；

[0019] 图2是四种不同工况下的滑跑速度曲线；

[0020] 图3是四种不同工况下的滑跑距离曲线；

[0021] 图4a是干燥跑道下无人机以正常起飞重量起飞航迹示意图；

[0022] 图4b是湿滑跑道下无人机以正常起飞重量起飞航迹示意图。

### 具体实施方式

[0023] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0024] 本发明的目的是提供一种湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,在机场湿滑跑道情况下,基于无人机的实际性能,判断其是否可以安全起飞,并设计相应的无人机起飞轨迹,从而给出无人机在湿滑跑道起飞时的操作建议,以提升无人机在起飞过程中的安全性。

[0025] 为使本发明的上述目的、特征和优点能够更加明显易懂,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0026] 如图1所示,本发明提供的湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,包括如下步骤:

[0027] S1,采集湿滑跑道下,无人机滑跑的地面摩擦系数 $f$ 、无人机起飞推力 $T$ 、最大爬升角度 $\theta_M$ 以及滑跑起飞迎角下的无人机机体升力系数 $C_L$ 与阻力系数 $C_D$ ,并获取本次飞行任务的机场跑道长度 $R$ 、无人机起飞机体质量 $m$ ;其中正常干燥跑道的地面摩擦系数一般为0.4左右,湿滑跑道的摩擦系数会根据表面状况不同有所不同,一般在0.2~0.4之间。

[0028] S2,建立湿滑跑道下无人机起飞滑跑平衡方程,公式如下:

$$[0029] \begin{cases} mg = \frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_L + N_t \\ ma_t = T - \frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_D + F_t \\ F_t = f N_t \end{cases}$$

[0030] 式中, $g$ 为机场当地的重力加速度, $\rho$ 为机场当地的空气质量密度, $S$ 为无人机起飞滑跑过程中的迎风面积;平衡方程中带下标 $t$ 的物理量为时间相关项,其中, $V_t$ 为无人机的瞬时滑跑速度, $N_t$ 为无人机滑跑过程中受到的瞬时地面支撑力, $a_t$ 为无人机的瞬时滑跑加速度, $F_t$ 为无人机与湿滑跑道之间产生的瞬时摩擦力, $\frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_L$ 项为无人机在滑跑中的瞬时

升力 $L_t$ , $\frac{1}{2} \rho V_t^2 S C_D$ 项为无人机在滑跑中的瞬时气动阻力 $D_t$ ;

[0031] S3,设无人机初始飞行速度为0,迭代求解步骤S2中的无人机起飞滑跑平衡方程,当瞬时滑跑速度 $V_t$ 足够大时,机体升力与重力达到平衡,瞬时地面支撑力 $N_t$ 变为0,此时意味

着无人机离地起飞,迭代计算结束;

[0032] 对瞬时滑跑速度 $V_t$ 进行积分,得到无人机的滑跑距离 $W$ ,若 $W \geq R$ ,则应取消或推迟起飞任务,若 $W < R$ ,则进入步骤S4;

[0033] S4,设无人机在起飞过程中的位置坐标为 $(X_t, Y_t)$ ,其中 $X_t$ 与 $Y_t$ 分别为无人机距离滑跑开始位置的纵向与垂向距离,无人机开始滑跑位置为点 $P_0(0, 0)$ ;根据机场的周边地形环境,设置无人机起飞过程中为了躲避障碍物,需要爬升达到的安全航迹点 $P_A(X_A, Y_A)$ ;根据步骤S3中计算得到的无人机滑跑距离 $W$ ,得到无人机滑跑结束、开始爬升位置 $P_B(W, 0)$ ;

[0034] S5,计算无人机从点 $P_B$ 抵达点 $P_A$ ,所需的爬升角度 $\theta = \arctan\left(\frac{Y_A}{X_A - W}\right)$ ;若 $\theta > \theta_M$ ,则应取消或推迟起飞任务;若 $\theta \leq \theta_M$ ,则生成无人机滑跑起飞轨迹,该轨迹由自点 $P_0$ 到点 $P_A$ 的滑跑段以及由点 $P_A$ 到点 $P_B$ 的爬升段组成,无人机依照该轨迹执行起飞任务。

[0035] 在具体实施例中,样例无人机的正常起飞质量为 $m_1 = 1100\text{kg}$ ,最大起飞质量为 $m_2 = 1350\text{kg}$ 。无人机滑跑起飞迎角为 $1^\circ$ ,对应的机体升力系数 $C_L = 1.2$ ,阻力系数 $C_D = 0.12$ 。无人机起飞推力 $T = 1600\text{N}$ ,最大爬升角 $\theta_M = 14^\circ$ 。

[0036] 本次飞行任务的机场跑道长度 $R = 1500\text{m}$ ,假设干燥跑道的摩擦系数为 $f_1 = 0.4$ ,湿滑跑道的摩擦系数为 $f_2 = 0.3$ 。机场当地的重力加速度 $g = 9.8\text{m/s}^2$ ,机场当地的空气质量密度 $\rho = 1.23\text{kg/m}^3$ ,无人机起飞滑跑过程中的迎风面积 $S = 8\text{m}^2$ 。则可求得无人机在滑跑中的瞬时升力 $L_t = \frac{1}{2}\rho V_t^2 S C_L = 5.412V_t^2$ ,瞬时气动阻力 $D_t = \frac{1}{2}\rho V_t^2 S C_D = 0.492V_t^2$ 。

[0037] 分别设置“干燥跑道+正常起飞重量( $f_1, m_1$ )”、“干燥跑道+最大起飞重量( $f_1, m_2$ )”、“湿滑跑道+正常起飞重量( $f_2, m_1$ )”、“湿滑跑道+最大起飞重量( $f_2, m_2$ )”四种飞行工况,分别迭代求解无人机湿滑跑道起飞滑跑平衡方程。可得到四种工况下的滑跑速度曲线(图2)和滑跑距离曲线(图3),根据上述曲线可以发现,湿滑跑道和起飞重量增加,均会导致滑跑距离的增加。

[0038] 安全航迹点 $P_A$ 坐标设置为(2000, 300)。根据本发明方法,计算得到“干燥跑道+正常起飞重量( $f_1, m_1$ )”工况下的无人机滑跑距离 $W_1 = 452.26\text{m}$ ,爬升角 $\theta_1 = 10.97^\circ$ ;“干燥跑道+最大起飞重量( $f_1, m_2$ )”工况下的无人机滑跑距离 $W_2 = 734.64\text{m}$ ,爬升角 $\theta_2 = 13.34^\circ$ ;“湿滑跑道+正常起飞重量( $f_2, m_1$ )”工况下的无人机滑跑距离 $W_3 = 518.52\text{m}$ ,爬升角 $\theta_3 = 11.45^\circ$ ;“湿滑跑道+最大起飞重量( $f_2, m_2$ )”工况下的无人机滑跑距离 $W_4 = 857.46\text{m}$ ,爬升角 $\theta_4 = 14.71^\circ$ 。

[0039] 图4a和4b分别给出了“干燥跑道+正常起飞重量( $f_1, m_1$ )”工况与“湿滑跑道+正常起飞重量( $f_2, m_1$ )”工况的起飞航迹示意图,经过对比发现,后者比前者需要更长的滑跑距离与更大的爬升角度。

[0040] 上述实施例中,前三种工况下,无人机的滑跑距离均小于机场跑道长度,爬升角度均小于无人机最大爬升角。因此,前三种工况无人机可以按照所设计起飞航迹安全起飞。第四种工况“湿滑跑道+最大起飞重量( $f_2, m_2$ )”中,无人机爬升角度大于最大爬升角,说明无人机无法安全抵达安全航迹点,存在航迹冲突风险,因此需要取消或推迟当前起飞任务。

[0041] 综上,本发明提供的湿滑跑道下无人机安全起飞轨迹设计方法,同时考虑了机场湿滑程度、无人机实际性能以及爬升段的避障需求,能够更准确地判断无人机是否适合起

飞,并能够设计出安全性更高的起飞轨迹;本发明所提起飞轨迹在合理考虑重要指标的同时,操作简便,避免了过高的计算复杂度。

[0042] 本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述,以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想;同时,对于本领域的一般技术人员,依据本发明的思想,在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处。综上所述,本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

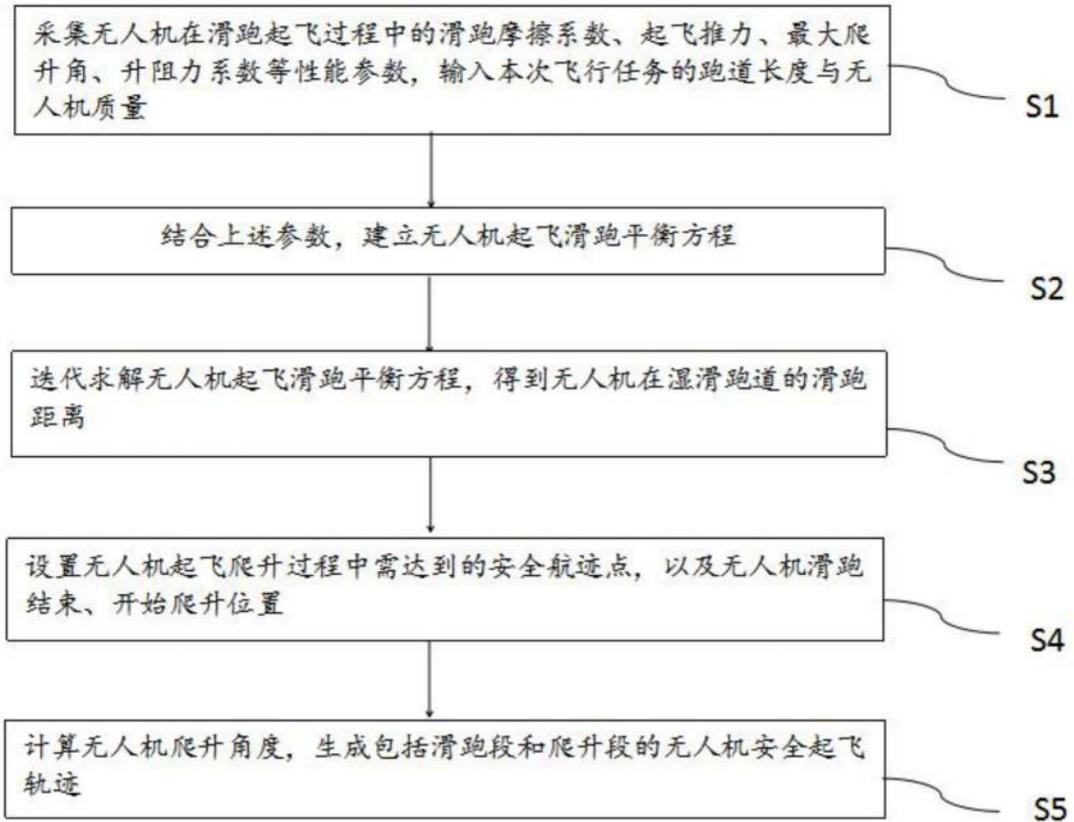


图1

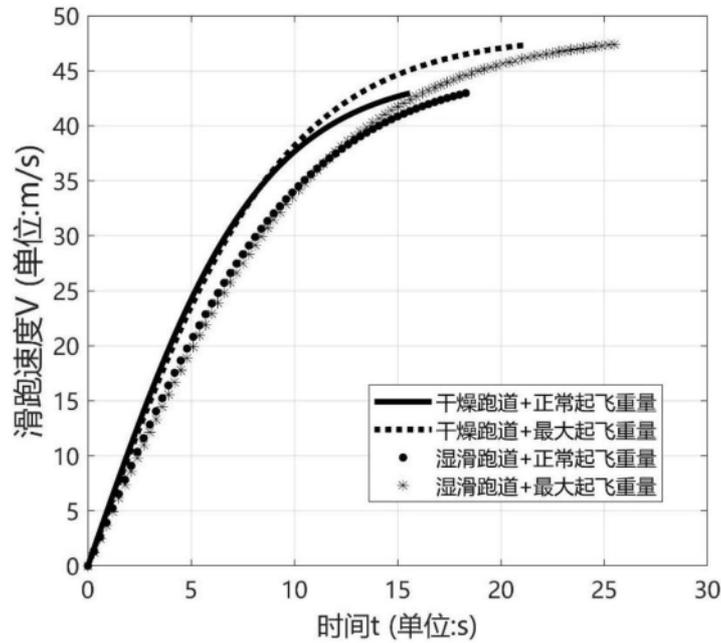


图2

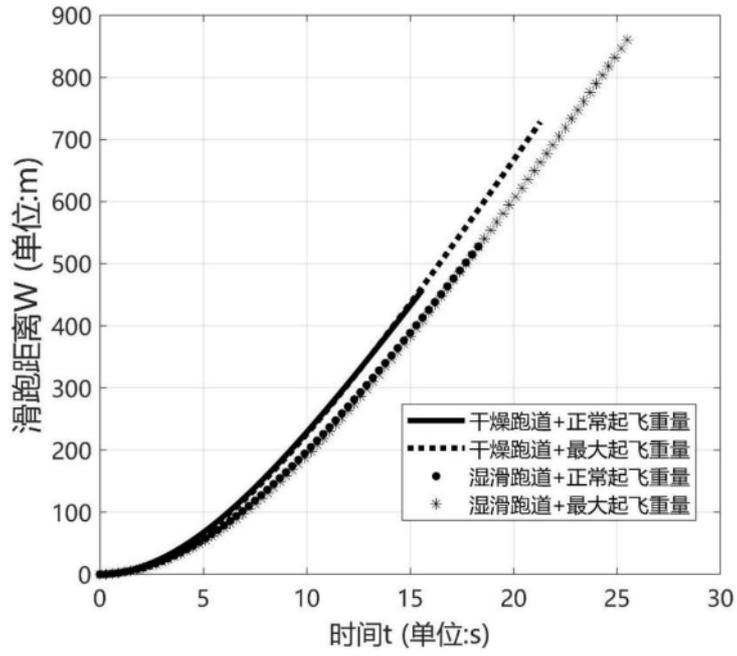


图3

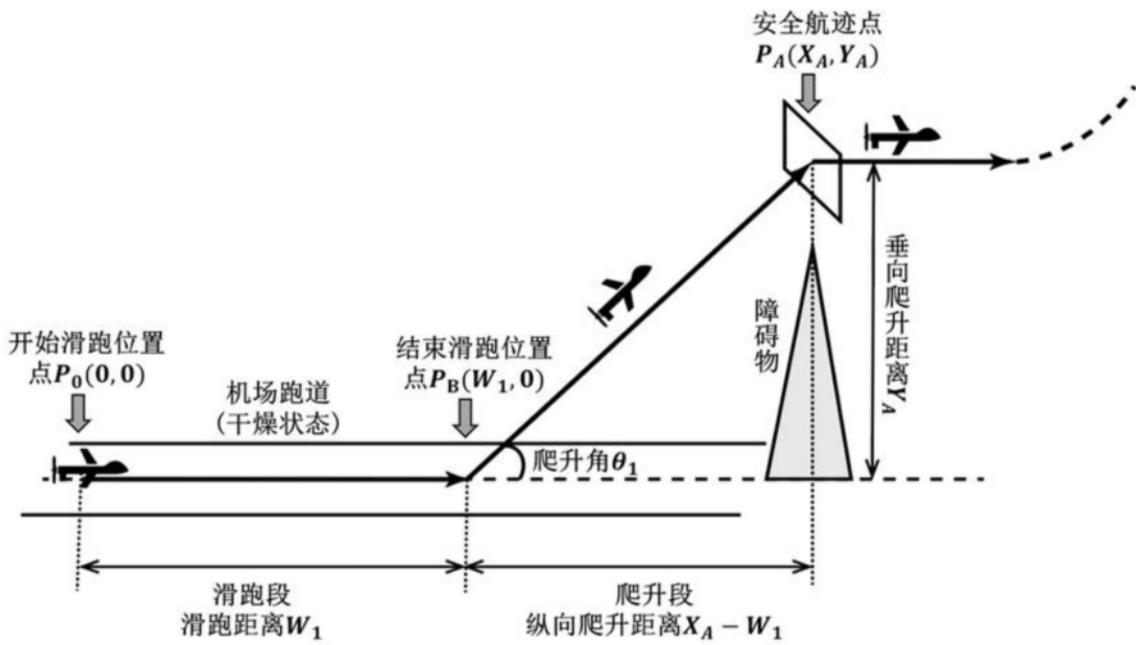


图4a

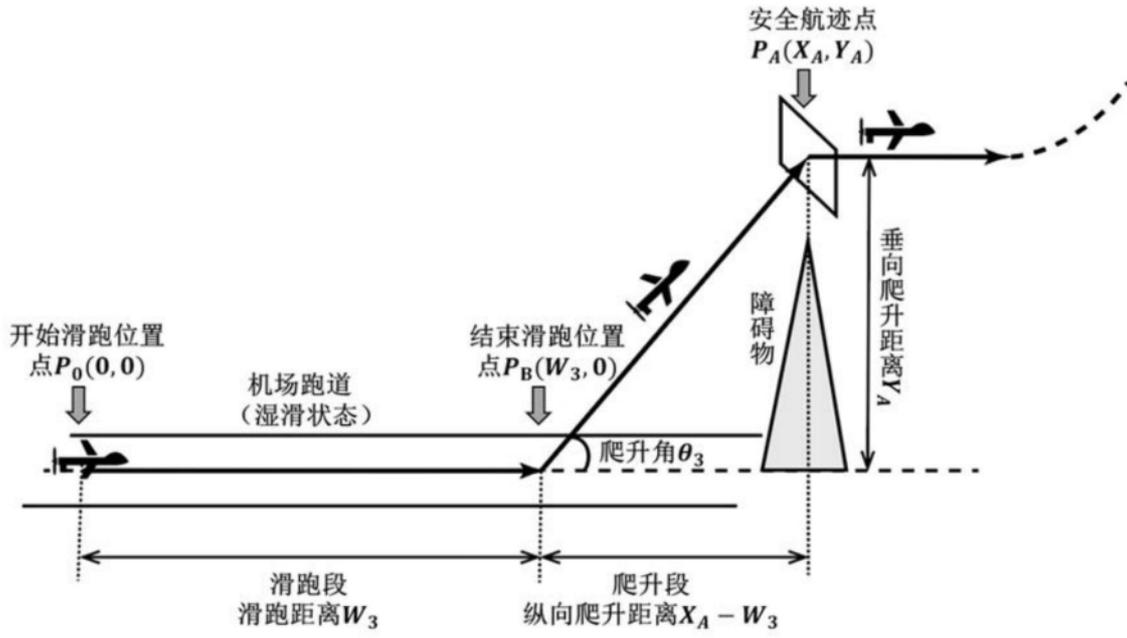


图4b