

文章编号: 1671-0576(2021)02-0051-04

高超声速滑翔飞行器弹道仿真分析

孟夏莹, 杜 君, 刘 健

(电磁散射重点实验室, 上海 200438)

摘 要: 针对临近空间高超声速助推滑翔飞行器弹道轨迹预测, 以高超声速助推滑翔飞行器为研究对象进行了纵平面运动轨迹建模、气动参数估计及攻角模型设计。不同滑翔初始状态下的弹道仿真结果表明: 滑翔初始运动高度越高, 跳跃幅度越大; 滑翔初始运动速度越大, 滑翔时间越长。通过研究加深了对高超声速飞行器运动特性的认识, 为弹道预报、轨迹规划与制导系统设计等任务提供了参考。

关键词: 高超声速飞行器; 助推滑翔; 轨迹; 初始状态

中图分类号: TJ760

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2021.02.011

Trajectory Simulation Analysis of Hypersonic Boost-glide Vehicle

MENG Xia-ying, DU Jun, LIU Jian

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Shanghai 200438, China)

Abstract: Aiming at the trajectory prediction of hypersonic boost-glide vehicle in near space, the longitudinal plane motion trajectory model, aerodynamic parameters estimation and angle of attack model design of hypersonic boost-glide vehicle are carried out. The trajectory simulation results of different initial gliding states show that the higher the starting height of glide is, the larger the jump amplitude is. The greater the starting speed of glide is, the longer the glide time is. The research deepens the cognition of the motion characteristics of hypersonic vehicle, and provides a reference for the mission of trajectory prediction, trajectory planning and guidance system design.

Key words: hypersonic vehicle; boost-glide; trajectory; initial state

0 引言

高超声速飞行器是指利用稀薄大气特点以马

赫数为 5 以上的速度在 (20~100) km 的临近空间进行高超声速机动飞行的飞行器。高超声速飞行器飞行速度快、机动能力强, 是用于突破下一代一体化防空系统的革命性装备, 对国家战略安全起着至关重要的作用。高超声速飞行器包括无动力的高超声速助推滑翔飞行器和有动力的高超声速巡航飞行器。其中, 高超声速助推滑翔飞行器

收稿日期: 2021-01-27

作者简介: 孟夏莹(1994—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事红外目标特性建模与仿真技术研究。

能够无动力滑翔数千至一万多公里,并具有较强的侧向机动和突防能力,能携带核弹头或常规弹头实施远距离快速打击。这类飞行器在助推段由火箭运载携带至最高点,飞行器与助推火箭分离,通过改变姿态和控制变量再入大气层,然后进入无动力滑翔阶段。高超声速滑翔飞行器在滑翔阶段具有较高的升阻比,由于受到重力、阻力以及升力等作用,其运动轨迹往往呈现出“跳跃”特征。因此,研究高超声速滑翔飞行器的运动弹道具有重要意义,能够为高超声速导弹轨迹规划与制导系统设计等任务提供参考。

高超声速滑翔飞行器滑翔段的运动弹道分为平衡滑翔和跳跃滑翔两种,高超声速飞行器的运动状态和控制量决定着其飞行时受到的气动力。当纵向上的气动升力、重力和离心力的合力为 0 时,高超声速飞行器处于平衡滑翔状态;当这一合力不为 0 时,高超声速飞行器处于跳跃滑翔状态^[1]。CHEN 等^[2]对飞行器的平衡滑翔轨迹进行了深入分析,推导了速度、航迹倾角和飞行高度等状态量之间的解析关系;李广华等^[3]区分了平衡滑翔和跳跃滑翔,基于平衡滑翔状态仿真分析了跳跃轨迹的运动参数变化规律。然而,上述文献均未探讨高超声速滑翔飞行器滑翔初始运动状态的改变对滑翔阶段弹道的具体影响。

本文采用理论推导和数值仿真的方法对跳跃滑翔这种典型的飞行弹道模式进行分析,建立高超声速滑翔飞行器滑翔段的运动弹道模型,分析飞行器滑翔的不同初始运动状态对滑翔阶段弹道的影响。

1 高超声速滑翔飞行器弹道建模

高超声速飞行器弹道建模是分析其运动特性的前提和基础。高超声速飞行器开始滑翔时,由于高升阻比,飞行器所受气动力和地球重力分别约为科氏惯性力和地球自转引起的惯性离心力的 100 倍和 1 000 倍,因此可以忽略惯性离心力,假设地球为圆球不旋转模型^[4]。

1.1 运动方程

根据任务的需要或描述方便,可基于合适的参考坐标系建立飞行器运动方程。通常情况下,

在高超声速飞行器滑翔过程中,其运动方程主要在半速度坐标系中进行描述。半速度坐标系如图 1 所示。原点 o 为飞行器质心, x 轴与飞行器速度方向一致, y 轴位于射击平面内,且垂直于 x 轴,指向上方, z 轴与 x 轴、 y 轴形成右手坐标系^[5]。

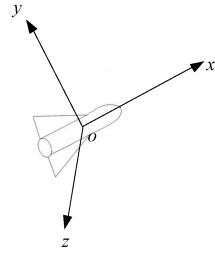


图 1 半速度坐标系示意图

在半速度坐标系下,以时间为自变量的高超声速飞行器纵平面质心运动方程为^[6]

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = -\frac{D}{m} - g \sin \theta \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{\cos \sigma L}{mv} - \left(\frac{g}{v} - \frac{v}{R+h} \right) \cos \theta \\ \frac{dh}{dt} = v \sin \alpha \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v \cos \theta \cos \psi}{R+h} + \frac{L \sin \sigma}{mv \cos \theta} \\ \frac{d\lambda}{dt} = \frac{v \cos \theta \sin \psi}{(R+h) \cos \varphi} \\ \frac{d\psi}{dt} = \frac{v \cos \theta \sin \psi \tan \varphi}{R+h} \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 为飞行器运动速度; D 为飞行器飞行过程中受到的气动阻力; m 为飞行器质量; g 为重力加速度,取 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; θ 为速度倾角; σ 为控制量倾侧角; L 为飞行器飞行过程中受到的气动升力; R 为地球半径,取 $R = 9.937 8 \times 10^6 \text{ m}$; h 为飞行器距离地球表面的高度; α 为攻角; φ 为纬度; ψ 为速度方位角; λ 为经度。

1.2 气动参数

飞行器飞行过程中受到的气动升力 L 和气动阻力 D 的计算公式为

$$\begin{cases} L = \rho C_L S v^2 / 2 \\ D = \rho C_D S v^2 / 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为大气密度; C_L 和 C_D 分别为升力系数和阻力系数,通常为攻角和马赫数的函数; S 为参

考面积。

1.3 攻角模型

攻角是一个很重要的控制参数,虽不显含在高超声速滑翔飞行器的运动方程中,但它是影响气动升力和阻力系数的关键参数,进而影响着飞行器受力和飞行器气动加速度。在攻角的设计过程中,主要考虑热防护和最大射程两个方面。再入大气层时,热流密度是飞行器的主要安全制约因素。采用较大攻角飞行可以提高第一次变轨下降的最低点高度,从而减小飞行器热流密度峰值。最大射程制约着飞行器所能打击的最远距离。一般升阻比越大,射程越远,所以当飞行速度下降到热流密度不再是主要安全制约因素时,高超声速滑翔飞行器可以采用最大升阻比对应的攻角进行设计。攻角模型为速度的分段线性函数^[7],表达式为

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_{\max}, & v \geq v_1 \\ \frac{\alpha_{\max}(K) - \alpha_{\max}}{v_2 - v_1}(v - v_1) + \alpha_{\max}, & v_2 < v < v_1 \\ \alpha_{\max}(K), & v \leq v_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: α_{\max} 和 $\alpha_{\max}(K)$ 分别为最大飞行攻角和最大升阻比对应攻角,其中 $K = L/D$ 为升阻比; v_1 和 v_2 为攻角曲线的分段速度。

2 仿真分析

以 CAV-H(common aero vehicle-H)高超声速滑翔飞行器为例,开展高超声速飞行器气动和运动参数仿真分析。

2.1 气动参数仿真

为开展不同弹道下高超声速飞行器运动特性分析,还需要获得飞行器气动参数数据。飞行器气动参数为飞行马赫数和攻角的函数。表1和表2分别为CAV-H高超声速滑翔飞行器的气动阻力系数表和气动升力系数表^[8]。基于线性插值方法,可以得到不同马赫数和不同攻角下高超声速滑翔飞行器的升力系数和阻力系数。

表1 阻力系数表

马赫数	阻力系数		
	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 20^\circ$
3.5	0.10	0.30	0.40
5.0	0.12	0.26	0.42
8.0	0.10	0.22	0.35
10.0	0.10	0.19	0.31
15.0	0.10	0.19	0.30
20.0	0.10	0.19	0.30
23.0	0.10	0.19	0.30

表2 升力系数表

马赫数	升力系数		
	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 15^\circ$	$\alpha = 20^\circ$
3.5	0.50	0.70	1.10
5.0	0.42	0.70	1.00
8.0	0.40	0.67	0.95
10.0	0.38	0.63	0.90
15.0	0.37	0.60	0.85
20.0	0.36	0.57	0.80
23.0	0.35	0.56	0.78

2.2 运动弹道仿真

(1) 仿真条件

CAV-H高超声速滑翔飞行器的参考面积为 0.35 m^2 , 质量为 907 kg ^[8]。假设滑翔初始运动状态速度倾角为 0° , 速度方位角为 0° , 倾侧角为 10° 。为分析不同滑翔初始高度和初始速度对飞行器跳跃高度和滑翔速度的影响, 采用两组弹道进行仿真, 仿真计算初始条件如表3所示。第一组工况是以相同初始速度、不同初始高度作为滑翔初始条件; 第二组工况是以相同初始高度、不同初始速度作为滑翔初始条件。

表3 飞行器滑翔弹道仿真初始条件

第一组工况			第二组工况		
弹道编号	高度/km	马赫数	弹道编号	高度/km	马赫数
1	90	20	5	60	20
2	80	20	6	60	18
3	70	20	7	60	16
4	60	20	8	60	14

在给定滑翔初始条件后, 根据式(1)~式(3)对飞行器在半速度坐标系下的运动状态进行迭代计算, 即可得到对应仿真结果。

(2) 初始高度对弹道的影响

图2为第一组工况下, 以相同初始速度、不同

初始高度作为滑翔初始条件,CAV-H 飞行器在 1 000 s 内滑翔的三维轨迹仿真结果。

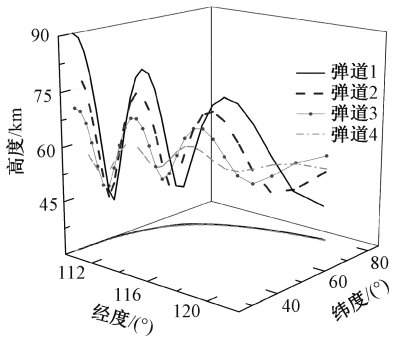


图 2 第一组工况 CAV-H 飞行器滑翔三维轨迹图

从图中空间轨迹可以看出:按弹道 1~弹道 4 滑翔,高超声速滑翔飞行器滑翔高度呈周期性变化,滑翔初始高度越高,飞行器跳跃幅度越大;由于大气阻力作用,飞行器滑翔过程中能量越来越低,弹道跳跃幅度越来越小,逐渐趋于平缓。从图中弹下点轨迹可以看出,弹道 1~弹道 4 的弹下点轨迹基本重合,滑翔初始高度对弹下点轨迹无影响。

图 3 为第一组工况下滑翔速度随时间变化的仿真曲线。

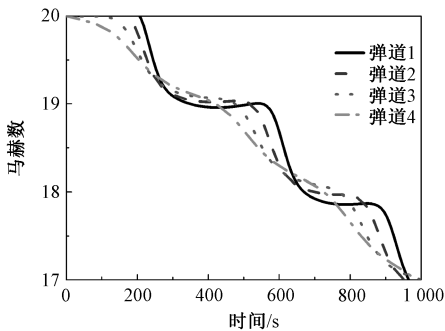


图 3 第一组工况 CAV-H 飞行器滑翔马赫数随时间变化曲线

可以看出,高超声速飞行器滑翔马赫数呈周期性变化,滑翔初始高度越高,飞行器速度跳跃幅度越大。当初始高度为 60 km 时,速度随时间趋向于线性变化。

(3) 初始速度对弹道的影响

图 4 为第二组工况下,以相同初始高度、不同初始速度作为滑翔初始条件,CAV-H 飞行器在 1 000 s 内的滑翔三维轨迹仿真结果。

从图中空间轨迹可以看出,按弹道 5~弹道 8

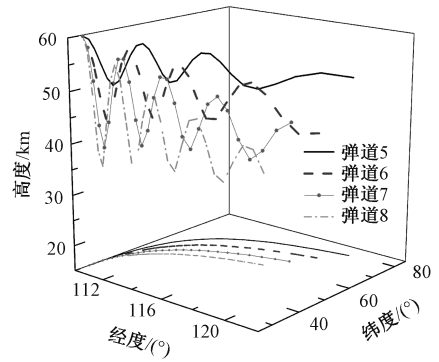


图 4 第二组工况 CAV-H 飞行器滑翔三维轨迹图

滑翔,高超声速飞行器滑翔高度呈周期性变化,滑翔初始马赫数越高,飞行器跳跃高度幅度越小。从图中弹道 5~弹道 8 的弹下点轨迹可以看出,滑翔初始马赫数越高,射程越大。可见,如果要维持临近空间的较长射程,滑翔初始速度的高低至关重要。

图 5 为第二组仿真工况下滑翔速度随时间变化的仿真曲线。

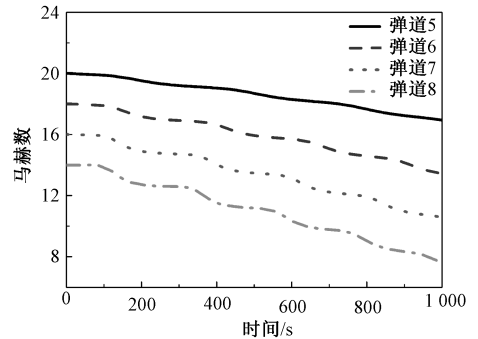


图 5 第二组工况 CAV-H 飞行器滑翔马赫数随时间变化曲线

可以看出,高超声速飞行器滑翔马赫数呈周期性变化,滑翔初始马赫数越高,滑翔速度跳跃幅度越小。滑翔 1 000 s 后,弹道 5~弹道 8 速度分别衰减了 15.5%, 19.2%, 33.9%, 45.9%。可见,滑翔初始马赫数越高,滑翔速度衰减越慢。

3 结论

本文对高超声速飞行器跳跃滑翔弹道进行了建模,仿真分析了不同初始条件对弹道的影响。高超声速飞行器滑翔的初始高度对射程基本无影响,但会明显影响飞行器滑翔高度和速度的跳跃

(下转第 60 页)