

环境因素对远程近空间高超声速飞行的影响

郭正雄, 张珩, 肖歆昕, 李文皓, 刘开磊

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 近空间飞行器的飞行环境具有较强的时空特性, 空间和时间的变化均会产生一定的环境波动, 进而影响远程近空间高超声速飞行。以近空间高超声速返回过程为研究对象, 分析了几种典型的环境因素对远程近空间高超声速飞行的影响, 利用飞行仿真实验计算得到环境因素在迎角为零的飞行条件下的影响程度包络范围。仿真结果表明, 大气密度随昼夜和季节的波动均对飞行造成一定程度的影响, 而地磁扰动和风干扰的影响也十分显著, 对于洲际飞行而言, 这些环境因素在设计控制系统以及制定飞行任务时必须予以考虑。

关键词: 高超声速; 大气密度; 地磁活动; 风干扰

中图分类号: V411.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0853(2013)01-0084-04

Effects of environmental factors on the long-range hypersonic flight in near-space

GUO Zheng-xiong, ZHANG Heng, XIAO Xin-xin, LI Wen-hao, LIU Kai-lei

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The flight environment of near-space vehicle has strong spatial and temporal characteristics. The spatial and temporal changes can cause environmental fluctuations and affect the remote near-space hypersonic flight. The impact caused by several environmental factors on the remote near-space hypersonic flight has been studied in this paper. The range of impact degree has been calculated by using flight simulation in the condition that the attack angle is zero. The results show that the atmospheric density fluctuations, including both the circadian and seasonal fluctuations, can influence flight obviously. Also the impact of geomagnetic disturbance and wind interference is also very significant. For the intercontinental flight, these environmental factors must be considered in the design of control systems and the development of flight mission.

Key words: hypersonic; atmospheric density; geomagnetic activity; wind interference

0 引言

近空间高超声速飞行器是目前国际国内研究的热点^[1-3], 远程近空间乃至更高空域范围内执行飞行任务的飞行器因具备快速通过、拦截困难等优势, 更成为研究的重点。远程近空间飞行器的再入飞行要先后经过热层、中间层、平流层和对流层, 大气密度和温度变化强烈, 飞行器受到的力和热的环境十分复杂。杨帆等^[4]说明了大气密度和温度的误差作为重要的非制导误差对导弹精度有一定的影响。杨辉耀^[5]研究了大气密度偏差、气象风和弹道系数误差对落点的影响, 并推导出了这些落点误差的解析计算公式。

以上文献研究考虑的对象均是弹道导弹, 与一般的近空间飞行器相比其升阻比较小, 并且停留的时间较短, 因而之前的研究很少考虑环境因素波动造成的影响, 而近空间飞行器在执行多种任务时具有长航时、远距离等特点。研究发现: 利用精确大气模型在不同时间条件下(如白天和黑夜), 得到近空间洲际飞行的落点会有较大的差异, 因而环境因素及其波动对远程近空间飞行的影响是值得研究的课题。本文以从 100 km 高度附近 0° 倾角无动力再入返回的某型导弹为对象, 定性定量地分析了大气密度、地磁扰动和风干扰对远程高超声速飞行可能造成的影响及其程度, 为近空间飞行器的工程应用提

收稿日期: 2012-06-01; 修订日期: 2012-09-14; 网络出版时间: 2012-12-11 12:41

基金项目: 国家自然科学基金资助(11002143)

作者简介: 郭正雄(1986-), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 研究方向为飞行器制导与控制。

供了一定的参考。

1 飞行器动力学和运动学建模

本文的研究内容是分析各种环境因素对近空间高超声速飞行轨迹的影响,因而只考虑推力停止后自由飞行过程。在地球坐标系下,建立飞行器无动力再入返回的动力学及运动学方程如下^[6-7]:

$$\begin{cases}
 dv/dt = - (1/m) D - g_r \sin \gamma + \omega^2 r \cos \psi \times \\
 \quad (\sin \gamma \cos \psi - \cos \gamma \sin \xi \sin \psi) \\
 v d\gamma/dt = (1/m) L \cos \sigma - g_r \cos \gamma + \\
 \quad v^2 \cos \gamma / r + 2\omega v \cos \xi \cos \psi + \\
 \quad \omega^2 r \cos \psi (\cos \gamma \cos \psi + \\
 \quad \sin \gamma \sin \xi \cos \psi) \\
 v d\xi/dt = - L \sin \sigma / (m \cos \gamma) - v^2 \cos \gamma \cos \xi \times \\
 \quad \tan \psi / r + 2\omega v (\tan \gamma \sin \xi \cos \psi - \\
 \quad \sin \psi) - \omega^2 \cos \psi \sin \psi \cos \xi / \cos \gamma - \\
 \quad g_\psi \sin \xi \cos \xi / \cos \gamma
 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}
 dr/dt = v \sin \gamma \\
 d\lambda/dt = (v \cos \gamma \cos \xi) / (r \cos \psi) \\
 d\psi/dt = (v \cos \gamma \sin \xi) / r
 \end{cases} \quad (2)$$

式中 r 为地心距; λ 为地理经度; ψ 为地理纬度; v 为飞行器空速; γ 为飞行弹道倾角; ξ 为飞行偏角; g_r 为地球引力加速度的径向分量(向上); g_ψ 为地球引力加速度的子午向分量(水平向北); ω 为地球自转角速度; σ 为倾侧角; L, D 分别为升力和阻力,升阻力系数利用工程算法求得。

2 大气密度波动分析及其影响

飞行器的气动力计算公式如下:

$$L = (1/2) \rho v^2 C_L S \quad (3)$$

$$D = (1/2) \rho v^2 C_D S \quad (4)$$

容易看出,大气密度直接关系飞行器升阻力的大小,因此大气模型直接关系仿真计算的精度。在一般的工程估算中,为了方便分析,往往直接利用指数大气模型,但是其精度较差;USSA76 模型相对精度较高,很好地表达了大气密度的平均状况,具有广泛的应用,然而该模型不能反映随时间、空间变化的规律;而 NRLMSISE-00 大气模型,综合考虑了季节、当地时间、日地空间环境参量、经纬度等因素,相对精确地给出了大气密度在时空上的分布,其可信度相对较高。不同大气模型计算得到的大气密度具有一定差异,该差异势必对远程近空间高超声速飞行轨迹造成某种程度的影响,为了说明该影响的大小,

选取其他条件相同、大气模型不同的仿真实验进行对比。

选取仿真的弹道初始参数如下:初始速度 $v_0 = 7\ 300\text{ m/s}$; 初始弹道倾角 $\Theta_0 = 0^\circ$; 初始高度 $h_0 = 100\text{ km}$; 经纬度均为 0° ; 迎角 $\alpha = 0^\circ$ 。计算得到具体飞行参数如表 1 所示,其中 t 为飞行时间; v_i 为落地速度; L 为纵向航程。可以看到,在指数模型和 NRLMSISE-00 模型条件下得到的纵向航程相差近 20 km,而 USSA76 得到的结果和指数模型相差更大,说明大气模型的精度直接影响飞行仿真的精度。

表 1 不同大气模型计算得到的纵向航程

大气模型	t/s	$v_i/m \cdot s^{-1}$	L/km
NRLMSISE-00	972.68	437.43	6 566.1
USSA76	974.57	419.38	6 584.9
指数模型	962.08	611.06	6 547.8

大气密度具有较强的时变特性,一方面随着季节的变化会出现一定波动;另一方面随着昼夜时间的变化也会发生改变。利用 NRLMSISE-00 大气模型计算得到赤道地区某日的 0 时、6 时、12 时、18 时四个时刻密度随高度的变化情况,结果如图 1 所示。图中给出了三个高度范围内的密度值对比,可以看到,随着高度的增加,大气密度波动的程度也相应增加。仿真初始参数与前面仿真算例相同,利用计算得到密度值对比不同当地时间得到的具体飞行参数如表 2 所示。

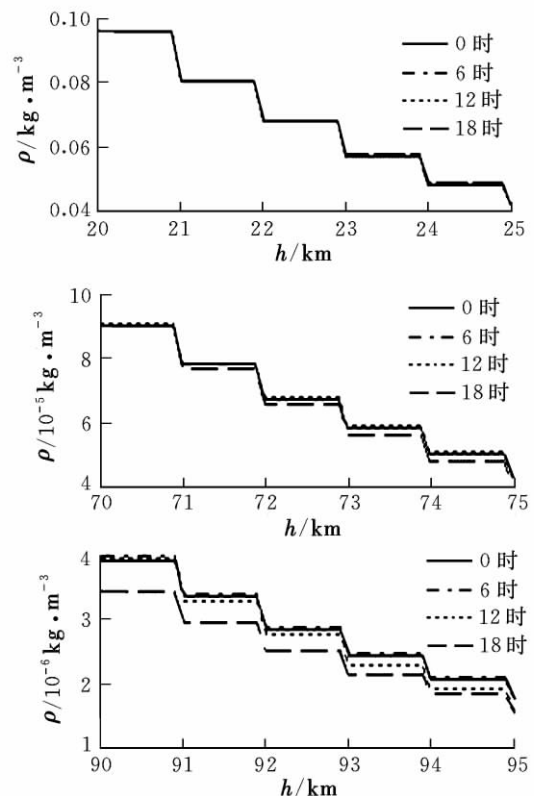


图 1 随昼夜时间变化的大气密度对比图

大气密度的季节波动同样十分明显,选取春分、夏至、秋分、冬至四天的同一时间进行飞行仿真实验,计算得到飞行参数结果如表3所示。可见由于季节引起的密度波动造成的航程差异最大可达11.1 km,说明了季节对远程近空间高超声速飞行的影响也十分显著。

表2 不同当地时间计算得到的飞行参数

时间	t/s	$v_i/m \cdot s^{-1}$	L/km
0时	971.96	431.53	6 558.2
6时	971.84	432.42	6 557.7
12时	972.23	425.83	6 557.7
18时	972.91	425.27	6 562.5

表3 不同季节计算得到的飞行参数

时间	t/s	$v_i/m \cdot s^{-1}$	L/km
春分	970.29	399.15	6 530.3
夏至	970.92	409.41	6 540.3
秋分	970.19	401.12	6 531.2
冬至	971.40	406.33	6 541.4

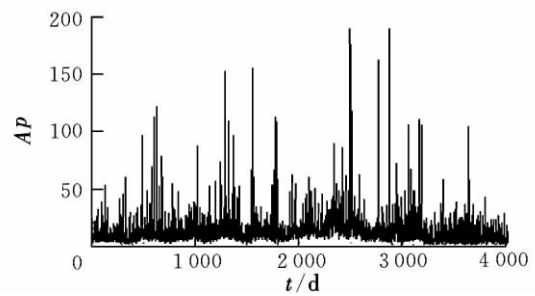
根据大气密度的时变特性容易计算得到在低纬区各个高度下的密度包络范围,即不同高度可能出现的密度值范围,利用密度范围的上下边界可以计算得到密度波动对飞行影响的极限程度,计算得到的飞行参数如表4所示,可见其最大的航程偏差达到了48.1 km。另外纬度因素对大气密度也有较强的影响,由于本文只考虑赤道上空的飞行条件,因而未予以考虑。

表4 边界密度条件下得到的飞行参量

密度边界	t/s	$v_i/m \cdot s^{-1}$	L/km
上边界密度	968.10	397.76	6 513.7
下边界密度	973.82	410.83	6 561.8

3 地磁扰动的影响

地球磁场的变化会引起大气密度的波动,产生磁暴时,高层大气中的大气密度会增大^[9],说明了地磁扰动对大气密度及高空飞行有一定影响。所谓磁暴是指由太阳耀斑引起的地球高层大气的扰动,全球范围内的地磁场的急骤无规则扰动。该现象发生突然,在1小时或更短时间内磁场经历显著变化,然后可能要历时几天才回到正常状态。地磁活动具有11年周期特征,表征地磁活动强度通常用 A_p 指数,图2给出了一个太阳活动周期内的地磁活动强度。

图2 1997年~2007年的 A_p 值

选择 A_p 指数分别为0,50,100,150,200,利用NRLMSISE-00大气模型分别计算得到相对大气密度 R 的变化情况,所谓相对大气密度即随 A_p 变化的密度和平均密度的比值,计算结果如图3所示,可以看出在顶层近空间附近,高度越高,密度受地磁扰动的影响越大。

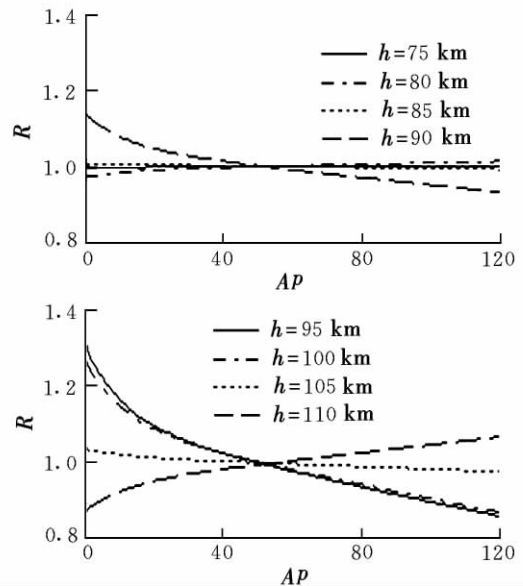


图3 地磁扰动对地球边缘大气密度的影响

为了说明地磁扰动对远程近空间高超声速飞行的影响,将计算得到的不同 A_p 值对应的大气密度代入飞行器运动方程得到相应的飞行轨迹,其余仿真初始参数同上,得到飞行参数结果如表5所示。在 $A_p=0$ 和 $A_p=200$ 时,其纵向航程的差异达8.2 km,说明地磁扰动对近空间高超声速飞行具有不可忽略的影响,因此在执行飞行任务时需充分考虑地磁扰动可能引起的偏差。

表5 地磁扰动对近空间高超声速飞行的影响

A_p	t/s	$v_i/m \cdot s^{-1}$	L/km
0	972.66	429.46	6 562.7
50	973.30	427.82	6 566.5
100	973.56	427.05	6 568.0
150	973.57	430.25	6 569.4
200	973.62	432.77	6 570.9

4 风干扰的影响

风场即风向量的空间分布状况,其大小受各种时空因素的影响,风对飞行器的影响主要表现为产生附加迎角以及改变空速大小,若无风条件下空速和航迹速度 v 相同,有风的条件下空速 v_k 和风速 w 的和为航迹速度 v ,即

$$v = v_k + w \tag{5}$$

分析得到以下标量关系式:

$$v_k = \sqrt{v^2 \sin^2 \theta + (v \cos \theta - w)^2} \tag{6}$$

$$\Delta \alpha = - \arctan \frac{w \sin \theta}{v - w \cos \theta} \tag{7}$$

比较有代表性的风场模型有 CIRA86, HWM93 和 HWM07 等。其中 HWM07 模型是在 HWM93 的基础上发展而来,是国际上较新的全球风场模式,具有较高的精度和可信度^[10]。HWM07 模型可以计算得到经向(南北向)风和纬向(东西向)风,由于本文只考虑铅垂面的运动,因此只考虑纬向风。定义向东刮的风为正,向西为负,考虑一年中可能出现的最大风力强度值,计算得到不同高度下的纬向风的风力强度范围,计算结果如图 4 所示。

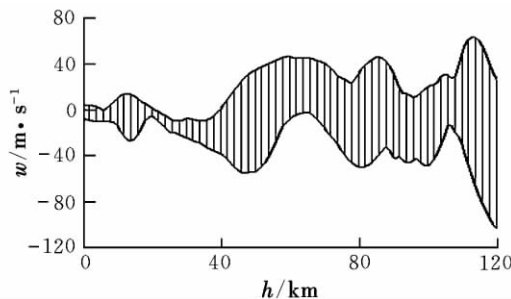


图 4 纬向风风力强度包络图

假设飞行器具有静稳定性,并且能够瞬时配平,为了说明风干扰对远程近空间高超声速飞行可能造成的影响范围,分别考虑无风、东向风(上边界)、西向风(下边界)、平均风的影响,设平均风为上边界和下边界的平均值,其余初始参数同前文算例。计算得到的飞行参数结果如表 6 所示,可以看到在西向风和东向风仿真得到的纵向航程差别有 44 km 左右,而落地速度相差 248 m/s。

表 6 风干扰对远程近空间高超声速飞行的影响

风的性质	t/s	$v_i/m \cdot s^{-1}$	L/km
无风	972.65	437.91	6 566.1
西向风	955.02	620.55	6 533.7
东向风	981.15	372.38	6 577.3
平均风	966.09	495.80	6 554.9

5 几种因素的影响对比

以上分别就大气密度波动、地磁干扰和风干扰对远程近空间高超声速飞行的影响进行了定性和定量的分析,各种环境因素在迎角为零的条件下可能造成的飞行参数最大差异值如表 7 所示。

表 7 几种因素可能造成的最大差异对比

影响因素	$\Delta t/s$	$\Delta v_i/m \cdot s^{-1}$	$\Delta L/km$
大气密度	5.7	13.1	48.1
地磁扰动	1.0	5.7	8.2
风干扰	26.1	248.2	43.6

结果表明,大气密度波动和风干扰均能对远程近空间高超声速飞行造成较大影响,其纵向航程差最大可达 40 km,而地磁扰动的影响相对较小,可能造成的航程差达 8 km,另外风干扰对飞行时间和落地速度可能造成的差异较大,分别可达 26 s 和 248 m/s,说明由于附加迎角造成气动力改变的积累效应十分明显。另外如果在迎角不为零甚至大迎角的前提下,各环境因素对飞行的影响将更加显著。

6 结束语

本文分析了大气密度、地磁扰动和风干扰三种典型的环境因素对远程近空间高超声速飞行的影响,这三种环境因素均具有较强的时变特性,季节和昼夜的变化均能引起它们的波动,在制定远程近空间飞行任务时必须考虑环境因素可能带来的影响,因而准确预测近空间各环境因素的变化便显得十分重要,有待进一步研究的是各环境因素的时空特性,并提出简便实用的工程化环境预测方法。

参考文献:

- [1] 崔尔杰. 近空间飞行器研究发展现状及关键技术问题[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 658-673.
- [2] 杨亚政, 李松年, 杨嘉陵. 高超声速飞行器及其关键技术简论[J]. 力学进展, 2007, 37(4): 537-550.
- [3] 黄伟, 罗世彬, 王振国. 临近空间高超声速飞行器关键技术及展望[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1259-1265.
- [4] 杨帆, 芮筱亭, 王国平. 提高弹道导弹命中精度方法研究[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(1): 10-16.
- [5] 杨辉耀. 弹道导弹制导精度提高与再入误差分析研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1995.
- [6] 肖歆欣. 亚轨道飞行器再入返回制导与控制方法研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2011.
- [7] 赵汉元. 飞行器再入动力学和制导[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1997.

(下转第 92 页)

在表3中,变迁发生数 n 和仿真时间 t 是近似成正比的,这是因为在模型确定、不确定性变迁数较少的情况下,定步长仿真时,模型调用一次的步数是近似确定的,从而网模型运行的变迁数也是一定的,与仿真时间成近似的正比关系。产生这样的原因一是引用网的建模方法更贴近于通用编程语言,二是还没有考虑到更多的真实战场环境的随机因素,这是今后需要做的工作。

5 结束语

通过本文研究可以看出,用引用 Petri 网方法进行导弹攻防对抗仿真,在解决了仿真平台与仿真机制的问题后,该方法显现出处理大系统对抗仿真的一定优势。这一方法的建模过程更贴近于通用的编程建模方法,显现出了很强的通用性与简单性。但是战场环境复杂,如果要考虑更多的因素,则需要进一步挖掘这一方法的潜力并将之进行进一步的扩展。另外,这种方法对于其他复杂系统的建模仿真也具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] Jensen K. Colored Petri nets and the invariant-method [J]. Theoretical Computer Science, 1981, 14 (3): 317-336.
- [2] Lee K H. Hierarchical reduction method for analysis and decomposition of Petri nets [J]. IEEE Transaction System Man Cybernet, 1985, 12(21): 272-280.
- [3] Sibertin-Blanc C. Cooperative nets [C]//Proceedings of 15th International Conference on the Application and Theory of Petri Nets. Lecture Notes in Computer Science 815, 1994: 471-490.
- [4] 黄树采, 李为民, 张多林. 防空武器系统的着色 Petri 网络建模与仿真 [J]. 计算机工程, 2004, 30 (23): 147-149.
- [5] 李九天, 唐国金, 梁彦刚. 基于对象 Petri 网的导弹作战效能评估方法 [J]. 控制管理, 2007, 10(3): 3-5.
- [6] 罗晓明. 弹道导弹攻防对抗的建模与仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 101-132.

(编辑: 方春玲)

(上接第87页)

- [8] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107 (A12): 1-16.
- [9] 秦国泰, 孙丽琳, 曾宏, 等. 2005年8月24日强磁暴事件对高层大气密度的扰动 [J]. 空间科学学报, 2008,

28(2): 137-141.

- [10] Drob D P, Emmert J T, Crowley G, et al. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07 [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(12): 1-18.

(编辑: 方春玲)