

物伞系统动力特性研究*

程文科 杨小伟 秦子增 张晓今

(国防科技大学航天技术系 长沙 410073)

摘要 研究了降落伞—物体系统的空间运动。假定降落伞和物体都有 6 个自由度, 两者通过吊带连接起来。推导了物伞系统运动的非线性微分方程, 运动方程中没有考虑伞绳和吊带的弹性。用所得数学模型分析了减速伞回收系统的动力特性, 给出了仿真计算结果。

关键词 降落伞系统, 动力学, 附加质量

分类号 V 414.34, V 448.15

Analysis of the Dynamic Performance of a Parachute and Payload System

Cheng Wenke Yang Xiaowei Qin Zizeng Zhang Xiaojin

(Department of Aerospace Technology, NUDT, Changsha 410073)

Abstract The three-dimensional motion of a parachute and payload system is studied. Both the parachute and payload are assumed to have six degrees of freedom. They are coupled by a riser. The nonlinear differential equations of motion for a parachute-payload system are developed, which model the parachute suspension lines and the riser as inelastic elements. The resulting mathematical model is then applied to analyze the dynamic performance of a drogue parachute recovery system. The simulation results are presented.

Key words parachute system, dynamics, added mass

降落伞具有较高的减速效率和很高的可靠性等特点, 从而在飞行器回收、机上应急逃逸、人员和装备空投、飞机减速和控制、空中回收和特种用途等技术领域得到了广泛的应用。在降落伞系统的设计研制过程中, 有效数据的获取主要依赖于各种试验, 费用昂贵, 周期长, 对于大型伞系统尤其如此。建立合理的物伞系统动力学模型, 在各种条件下进行性能分析预测, 可为系统设计及试验提供指导, 并可减低对试验工作的依赖性, 其意义十分明显。

文献 [2] [3] 给出了物伞系统的动力学模型, 文献 [2] 中考虑了伞绳、吊带有弹性和无弹性两种情形, 文献 [3] 中仅考虑了吊带的弹性。在这两上模型中, 物体都是轴对称吊挂, 而且在降落伞的运动方程中, 它们对于附加质量项的处理方法现在看来也是不合适的^[6]。在本文所建立的一般物伞系统的动力学模型中, 物体为非对称吊挂, 没有考虑伞绳和吊带的弹性, 伞的方程更为合理。本文对降落伞的附加质量也作了较为深入的讨论。

1 数学模型

典型的物伞回收系统如图 1 所示, 即由物体、吊带、降落伞三体组成。

1.1 简化假设

- (1) 降落伞是轴对称的, 全张满后具有固定形状的伞衣;
- (2) 吊带仅向降落伞和物体传递轴向力;

* 1997年 9月 29日收稿
第一作者: 程文科, 男, 1970年生, 博士生

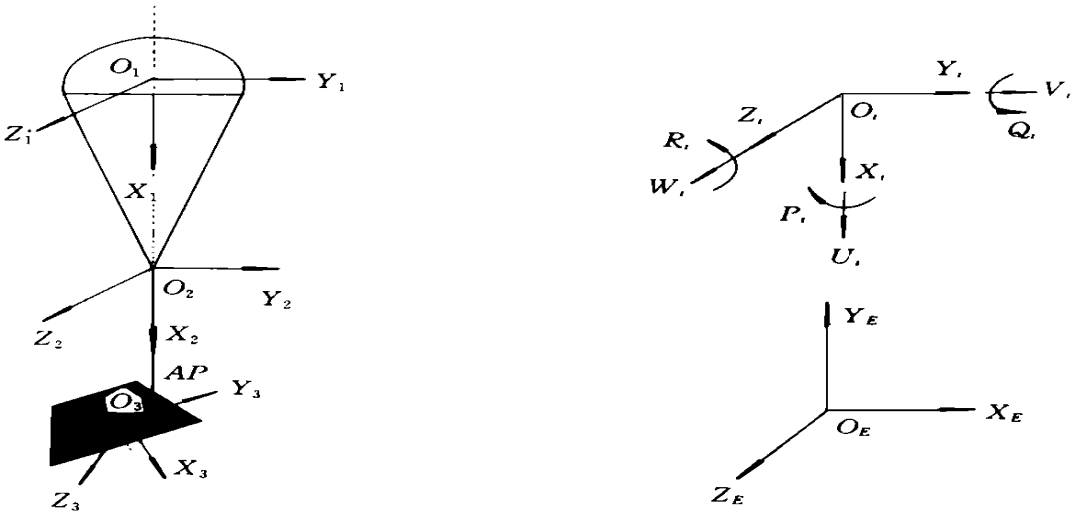


图 1 大地坐标系和体坐标系

(3)伞物的气动压心在各自的对称轴上,而且伞衣的压心与伞衣质心相重合;

(4)降落伞运动引起的空气团的能量变化用附加质量张量来表示,而物体运动引起的空气团能量变化可忽略不计;

(5)物体尾流对伞的影响忽略不计;

(6)平面大地,平静大气.

1 2 附加质量

当任意一个物体在流体中作非稳态运动时,不仅物体本身的动量在发生变化,周围流体的动量也将发生变化,表现为物体所受运动阻力的增加.在一般应用中,与前者相比,后者可不予考虑,但是,当物体的质量与其所排开的流体的质量处于大约同一数量级时,例如降落伞在空气中的运动,则后者的影响不能忽略.通常,把流体动量的变化归结为一质量为 Γ 的附加物体动量的变化, Γ 称为“附加质量”.若物体质量为 m ,物体所受外力为 F ,当物体以速度 V 运动时,则有

$$F = (m + \Gamma)\dot{V} \tag{1}$$

类似地,对应于物体的角速度变化,可以引入“附加惯性矩”的概念.对应于平动和转动的耦合效应,可以引入“附加静矩”的概念.这里将附加质量、附加惯性矩和附加静矩统称为“附加质量”,这里“质量”的含义更广泛.

由上述可知,附加质量可用一对称二阶张量描述: $\alpha_{ij} = \alpha_{ji} (i, j = 1, \dots, 6)$ 其中第一下标为非稳态流体动力或力矩的方向,第二下标为引起附加质量的线加速度或角加速度方向,沿 X, Y, Z 对应 1 2 3 绕 X, Y, Z 对应 4 5 6 总共有 21个独立分量,6个代表平动项,6个代表转动项,9个代表平动和转动的耦合项

在理想流体中,附加质量分量可根据势流理论来估计.对于给定的物体外形和姿态,它们是常数.在真实流体中,附加质量分量的大小不仅与物体的外形、姿态有关,而且也与物体的无量纲加速度(加速度数)等有关,远比在理想流体中复杂.

研究表明,降落伞的附加质量只能由试验测定.对于降落伞,当加速度数较小时,附加质量分量的试验测量值比势流估计值大的多,只在加速度数足够大时,它们的数值才接近.

在上面的简化假设和图 1所定义的坐标系下,只有 3个降落伞附加质量分量需要确定: $\Gamma_{11}, \Gamma_{22} = \Gamma_{33}, \Gamma_{55} = \Gamma_{66}$

附加质量对系统的动力学性能,尤其是对动稳定性有显著的影响.在某些条件下,采用理论值或试验值,甚至会得到相反的结论,因此建议使用试验值.

1 3 系统运动方程

根据上面降落伞的附加质量的有关论述,在图 1所定义的坐标系下,降落伞的运动方程的分量形式

为^[4]:

$$\begin{aligned} F_{x1} &= (m_1 + T_{11})\dot{U}_1 - (m_1 + T_{33})(R_1V_1 - Q_1W_1) - m_1xg(Q_1^2 + R_1^2) \\ F_{y1} &= (m_1 + T_{33})(\dot{V}_1 - P_1W_1) + (m_1 + T_{11})R_1U_1 + m_1xg(\dot{R}_1 + P_1Q_1) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} F_{z1} &= (m_1 + T_{33})(\dot{W}_1 + P_1W_1) - (m_1 + T_{11})Q_1U_1 - m_1xg(Q_1 - P_1R_1) \\ M_{x1} &= I_{xx1}\dot{P}_1 \end{aligned}$$

$$M_{y1} = (I_{zz1} + T_{55})\dot{Q}_1 - m_1xg(\dot{W}_1 - Q_1U_1 + P_1V_1) + (I_{xx1} - I_{zz1})P_1R_1 \quad (2b)$$

$$M_{z1} = (I_{zz1} + T_{55})\dot{R}_1 - m_1xg(\dot{V}_1 + R_1U_1 - P_1W_1) - (I_{xx1} - I_{zz1})P_1Q_1$$

其中 F_{x1}, F_{y1}, F_{z1} 为降落伞外力沿伞体坐标系的分量, 外力包括重力、气动力和吊带张力。 M_{x1}, M_{y1}, M_{z1} 为外力矩分量 xg 为伞衣压心到降落伞质心的距离。方程中包括三项附加质量 T_{11}, T_{33} 和 T_{55} , 并忽略了 $(T_{11} - T_{33})U_1W_1$ 和 $-(T_{11} - T_{33})U_1V_1$ 项^[5]。值得一提的是, 根据附加质量的概念, 降落伞的气动力和气动力矩为稳态测量值

为节约篇幅, 物体的运动方程这里不再列出, 详见参考文献 [1]

2 连接方程

在伞绳汇交点 O_2 处, 有

$$[B^2]^T \begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} = [B^1]^T \left\{ \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ L_1R_1 \\ -L_1Q_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

在物体吊挂点 AP 处, 有

$$[B^2]^T \left\{ \begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ L_2R_2 \\ -L_2Q_2 \end{bmatrix} \right\} = [B^3]^T \left\{ \begin{bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ W_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_3 \\ Q_3 \\ R_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{AP3} \\ Y_{AP3} \\ Z_{AP3} \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

其中 $[B^i]$ 为坐标变换矩阵, i 等于 1 2 3 分别代表降落伞、吊带和物体。 L_1 为伞绳汇交点到伞坐标原点的距离。 L_2 为吊带长度。 $X_{AP3}, Y_{AP3}, Z_{AP3}$ 为吊挂点的体坐标

方程 (3)、(4) 左乘 $[B^2]$ 后相减, 并令 $[M] = [B^2B^3]^T$, $[N] = [B^2B^1]^T$, 得:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ L_2R_2 \\ -L_2Q_2 \end{bmatrix} = [M] \left\{ \begin{bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ W_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_3 \\ Q_3 \\ R_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{AP3} \\ Y_{AP3} \\ Z_{AP3} \end{bmatrix} \right\} - [N] \left\{ \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ L_1R_1 \\ -L_1Q_1 \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

由方程 (5) 的第二、第三式可求得 Q_3, R_2 的表达式。对第一式求导, 并代入有关方程, 可求得吊带张力的代数表达式, 这样求解相对于文献 [3] 的处理方法要简单一些。

3 仿真结果与分析

以一顶锥形带条减速伞 (已经完全张开) 和一个非对称吊挂的物体组成的回收系统为例。给定系统的设计参数和初始条件后, 利用四阶龙格-库塔法积分, 所得部分结果如下:

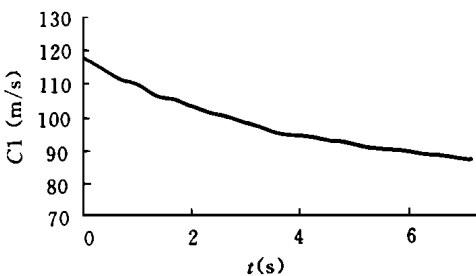


图 2 降落伞线速度变化曲线

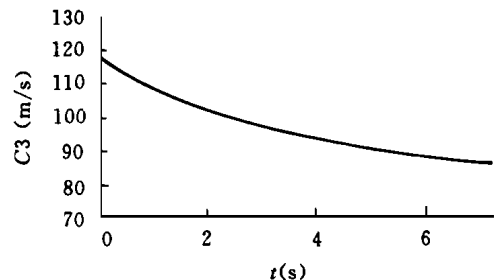


图 3 物体线速度变化曲线

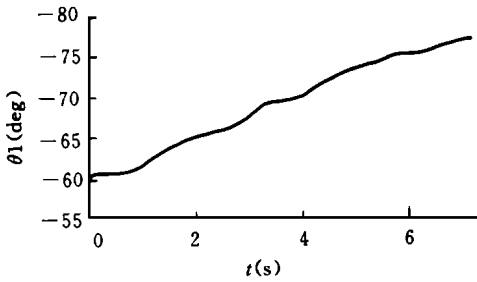


图4 降落伞俯仰角变化曲线

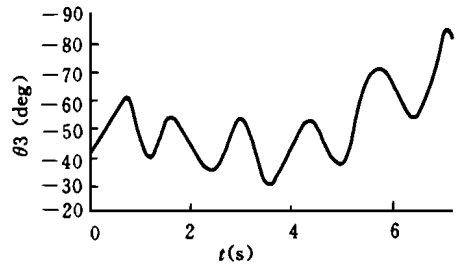


图5 物体俯仰角变化曲线

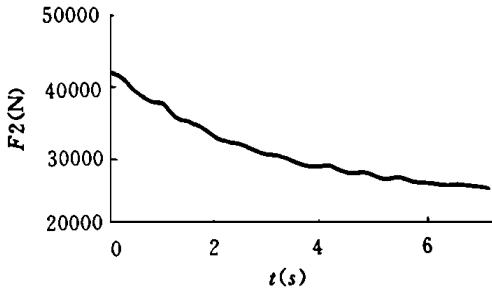


图6 吊带张力变化曲线

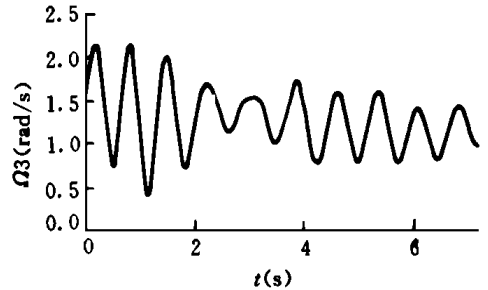


图7 物体角速度变化曲线

图2图3表明降落伞和物体的速度基本一致,因此当仅仅考虑系统的轨迹和速度时,可以把降落伞和物体看作一个整体;图4图5说明降落伞和物体之间存在相对运动,这与试验观察是一致的;图6是吊带张力变化的曲线;图7表明物体具有转动,这主要是由于非对称吊挂引起的。

4 结束语

物伞系统实际上是一个三体系统,各种物理量之间关系复杂,本文建立了一般物伞系统11自由度的非弹性动力学模型,并给出了有关方程,它们可以作为对降落伞回收系统动力学特性进行仿真计算的基础,进一步,利用该模型,可以分析各种系统设计参数改变对系统性能的影响;或者采用线性小扰动理论分析系统的动稳定性。

参考文献

- 1 杨来伍,梅凤翔. 变质量系统力学. 北京理工大学出版社, 1989
- 2 Fallon H E. J Parachute Dynamics and Stability Analysis of the Queen Match Recovery System. AIAA-91-0879, 1991
- 3 Ibrahim S K, Engdahl R A. Parachute Dynamics and Stability Analysis NASA-CR-120326, 1974
- 4 Cockrell D J. Preliminary Consideration of Parameter Identification Analysis from Parachute Aerodynamic Flight Test Data. AIAA-81-1940, 1981
- 5 Yavuz T. The Equations of Motion for a Parachute System Descending through a Real Fluid. Aeronautical Journal, 1985, 89(889): 343 ~ 348
- 6 Cockrell D J. The Aerodynamics of Parachutes. AGARD-AG-295, 34-42