

重装空投动力学分析与控制方案研究

韩艳铎, 陆宇平

(南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对重装空投任务, 基于拉格朗日分析力学, 建立了货物在机舱内滑行阶段飞机-货物两体系统的动力学模型。给出了一种控制补偿方案, 用以抵消或削弱货物运动对飞机的影响。通过数值仿真, 观察货物运动和飞机运动之间的耦合关系, 分析了牵引伞尺寸对飞机和货物运动参数的影响。仿真结果表明, 所给出的控制补偿方案能够有效改善飞机飞行品质, 提高飞行安全性。

关键词: 重装空投; 多体系统; 拉格朗日分析力学; 飞行控制; 数值仿真

中图分类号: V212.11

文献标识码: A

文章编号: 1002-0853(2011) 03-0028-04

引言

在重装空投过程中, 为了避免货物着地冲击载荷过大而受损, 一般要求载机以较慢的速度作超低空飞行。空投时货物在机舱内滑行会给载机造成很大的干扰力矩。如果不能精确控制飞机姿态, 就可能使飞机触地。因此研究在空投过程中飞机-货物两体系统的动力学具有重要意义, 在此基础上采取正确的控制策略, 保证载机安全。

目前该领域公开的文献资料主要研究牵引伞和货台本身的运动, 比如货台离机后的下落过程和着地冲击载荷分析^[1-5]。国内有学者研究了货物在舱内运动对载机的影响^[6-8]。本文基于拉格朗日分析力学建立了货物在舱内滑行时飞机-货物系统动力学模型, 然后通过数值仿真分析牵引伞尺寸对系统运动的影响, 最后给出一种控制补偿方案以改善载机的飞行品质。

1 空投过程飞机-货物系统动力学建模

重装空投过程如图1所示。空投时飞机沿水平直线飞行。图示二维笛卡尔直角坐标系的原点 O 在飞机质心, Ox 轴平行于地面, 与飞机速度矢量保持一致, Oy 轴竖直向上; a_1, a_2 分别为 Ox, Oy 轴方向上的单位矢量; $A \triangleq (a_1, a_2)$ 构成 Oxy 平面上的单位正交基矢量组。货台与导轨之间的滑动摩擦力很小, 且其作用线对飞机质心的力臂很短, 故其对飞机的俯仰干扰力矩很小, 可以忽略。为使推导过程简洁, 本文采用拉格朗日分析力学建模。

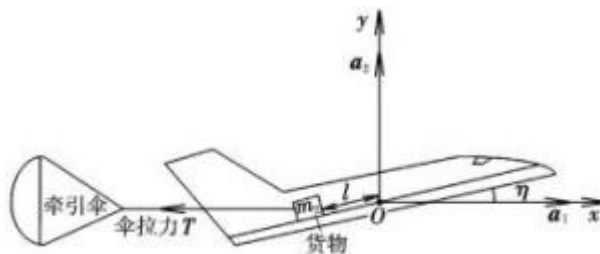


图1 空投过程示意图

离散质点系的拉格朗日动力学方程为:

$$\left(\frac{d}{dt} \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial}{\partial q_j} \right) K = Q_j \quad (1)$$

$$Q_j \triangleq \sum_i F_i \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \quad (2)$$

式中, q_j, Q_j, K 分别表示广义坐标、广义力、系统动能。本文将飞机视为刚体。刚体是由无穷多个质量微元按照理想约束结合在一起的特殊的质点系, 故对于飞机, 式(2)中的累加号须变为积分号, 成为:

$$Q_j \triangleq \int \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q_j} d\mathbf{F} \quad (3)$$

式中, \mathbf{r} 表示飞机上质量微元相对于参考系原点的位矢; $d\mathbf{F}$ 表示质量微元受到的力矢量。

取机-货系统广义坐标如下:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &\triangleq l \\ q_2 &\triangleq \eta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

设飞机质量为 m_1 , 在机上任取质量微元 dm_1 , 设其相对于飞机质心的纵向位置为 r (在飞机质心前为正, 反之为负), 则 dm_1 相对于飞机质心 O 的位矢

$$\mathbf{r} = A \begin{pmatrix} r \cos \eta \\ r \sin \eta \end{pmatrix} \quad (5)$$

收稿日期: 2010-08-23; 修订日期: 2011-01-19

基金项目: 南京航空航天大学专项科研项目(W1013-HT)

作者简介: 韩艳铎(1976-), 男, 山西兴县人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为飞行器动力学与控制;

陆宇平(1957-), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统建模与控制、高超声速飞行器控制等。

式(5)两边同时对时间求导,并考虑基组 $\mathbf{A} \triangleq (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2)$ 的定常性以及刚体的特性,得 dm_1 相对于飞机质心 O 的速矢

$$\mathbf{v} \triangleq \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} -r\dot{\eta} \sin \eta \\ r\dot{\eta} \cos \eta \end{pmatrix} \quad (6)$$

所以 dm_1 的动能

$$dK_1 = \frac{1}{2} \mathbf{v} \mathbf{v} dm_1 = \frac{1}{2} r^2 \dot{\eta}^2 dm_1 \quad (7)$$

式(7)对 m_1 积分得机体转动动能

$$K_1 = \int dK_1 = \frac{1}{2} J \dot{\eta}^2 \quad (8)$$

式中, $J \triangleq \int r^2 dm_1$, 表示机体俯仰转动惯量。

货物相对于飞机质心 O 的位矢

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{A} \begin{pmatrix} l \cos \eta \\ l \sin \eta \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)两边同时对时间求导,得货物相对于飞机质心 O 的速矢

$$\mathbf{v}_2 \triangleq \frac{d\mathbf{r}_2}{dt} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \dot{l} \cos \eta - l\dot{\eta} \sin \eta \\ \dot{l} \sin \eta + l\dot{\eta} \cos \eta \end{pmatrix} \quad (10)$$

所以货物动能

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 \mathbf{v}_2 \mathbf{v}_2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{l}^2 + l^2 \dot{\eta}^2) \quad (11)$$

飞机-货物系统总动能

$$K = K_1 + K_2 \quad (12)$$

飞机上 dm_1 受到的主动力微元

$$d\mathbf{F} = d\mathbf{R} + d\mathbf{G} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{aligned} d\mathbf{R} &= \mathbf{A} \begin{pmatrix} dR_1 \\ dR_2 \end{pmatrix} \\ d\mathbf{G} &= \mathbf{A} \begin{pmatrix} 0 \\ -dm_1 g \end{pmatrix} \end{aligned}$$

式中, $d\mathbf{R}$ 表示空气动力微元; $d\mathbf{G}$ 表示重力微元。

货物受到的主动力

$$\mathbf{F}_2 = \mathbf{A} \begin{pmatrix} -T \\ -m_2 g \end{pmatrix} \quad (14)$$

将式(13)和式(14)代入式(2)和式(3)得系统广义力

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= -T \cos \eta - m_2 g \sin \eta \\ Q_2 &= Tl \sin \eta - m_2 gl \cos \eta + M_R \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

推导过程中用到积分

$$M_R = \int r \cos \eta dR_2 - r \sin \eta dR_1$$

式中, M_R 表示作用在机体上的总气动俯仰力矩。

将式(8)、式(11)、式(12)及式(15)代入式(1)

得空投过程飞机-货物两体系统动力学方程为:

$$\left. \begin{aligned} m_2 \ddot{l} - m_2 l \dot{\eta}^2 &= -T \cos \eta - m_2 g \sin \eta \\ (J + m_2 l^2) \ddot{\eta} + 2m_2 l \dot{\eta} \dot{l} &= Tl \sin \eta - m_2 gl \cos \eta + M_R \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中, M_R 可分解为:

$$M_R = qSb(m_R^\alpha \alpha + m_R^{\delta_{stb}} \delta_{stb} + m_R^{\dot{\eta}} \dot{\eta} + m_R^{\delta_e} \delta_e) \quad (17)$$

式中, q, S, b 分别表示动压头、机翼面积、平均气动弦长; $\alpha, \delta_{stb}, \delta_e$ 分别表示机体迎角、平尾偏角、升降舵偏角, $\alpha = \eta - \theta$ 。

2 空投过程系统动态特性仿真分析

忽略牵引伞的质量,数值仿真中可按下式估算伞拉力:

$$T = \frac{1}{2} \rho (v + \dot{l} \cos \eta)^2 S' \quad (18)$$

式中, ρ 表示大气密度; v 表示飞机速度, $v + \dot{l} \cos \eta$ 表示牵引伞相对于空气的速度; $S' = \pi R'^2$ 表示牵引伞迎风面积, R' 表示牵引伞迎风半径。

运输机是自稳定的。下面在运输机无控(即升降舵锁在零度)条件下,对两体系统式(16)进行数值仿真。货物初始位置在飞机质心处,飞机在配平状态下平飞5 s后货物解锁,同时打开牵引伞,在牵引伞拉力下沿导轨向外滑行。仿真参数设定如下: $m_2 = 15\ 000\ \text{kg}$, $J = 9 \times 10^6\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$, $S = 300\ \text{m}^2$, $b = 6.5\ \text{m}$, $m_R^\alpha = -0.3$, $m_R^{\delta_{stb}} = -0.1$, $m_R^{\dot{\eta}} = -0.8$, $m_R^{\delta_e} = -0.06$, $\delta_{stb} = -6^\circ$, $\rho = 1.225\ \text{kg/m}^3$, $v = 80\ \text{m/s}$, $R' = 4.0\ \text{m}$, $S' = 50.27\ \text{m}^2$, 货舱导轨长度 $L = 8\ \text{m}$ 。仿真结果如图2和图3所示。

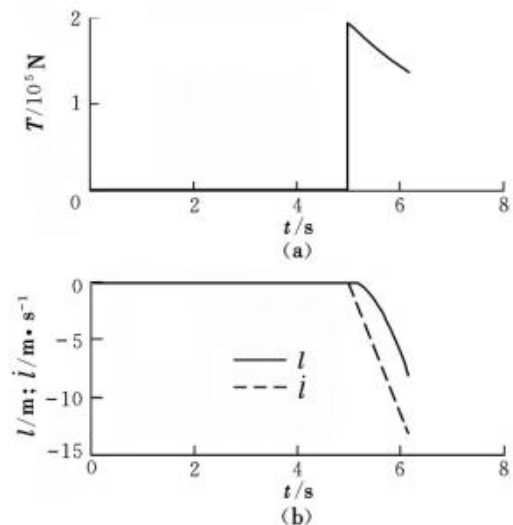


图2 无控条件下伞拉力和货物运动参数

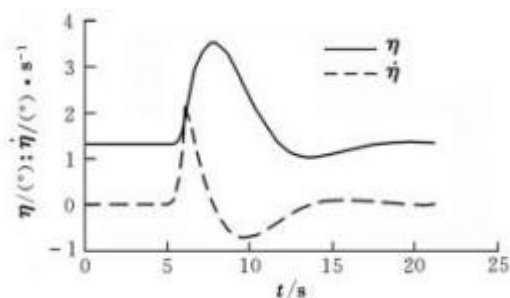


图3 无控条件下飞机姿态运动参数

由图2可见,货物在牵引伞的拉力下沿导轨加速滑行,经过1.17 s离舱时的速率达到13.06 m/s。加速度近似均匀,大小约11.16 m/s²。货物开始滑行时伞拉力最大,约1.97 × 10⁵ N,随后因货物加速向后滑行,所以牵引伞相对于空气的速度递减,其拉力亦递减,在货物出舱瞬时减至1.38 × 10⁵ N。

货物向机尾运动,给飞机造成抬头干扰力矩,使机体俯仰角从1.30°持续递增。货物离机后,虽然抬头力矩消失,但由于机体巨大的转动惯性,俯仰角继续增大,直至空投后2.28 s时达到峰值约3.52°。此后飞机在气动稳定力矩和阻尼力矩的共同作用下,经过约13.43 s回到平衡点。

表1给出了牵引伞不同尺寸条件下的仿真结果。表中, t_f 表示货物出舱耗时。

表1 牵引伞迎风面积对空投过程的影响

R'/m	S'/m^2	T_{max}/N	$ \dot{l} _{max}/m \cdot s^{-1}$	t_f/s	$\eta_{max}/(^{\circ})$
3.0	28.27	1.11×10^5	10.22	1.53	4.23
4.0	50.27	1.97×10^5	13.06	1.17	3.52
5.0	78.54	3.08×10^5	15.89	0.96	3.13
5.5	95.03	3.73×10^5	17.21	0.88	2.97
6.0	113.10	4.43×10^5	18.44	0.81	2.81

表1显示,随着牵引伞迎风面积的增大,其最大拉力和货物出舱速率增大,货物出舱耗时缩短,对飞机姿态运动的影响减小,使飞机俯仰角峰值减小,从而提高了载机的安全性。但是伞面积越大,开伞过程复杂度就越高,可靠性越低,所以应根据实际情况折衷选取伞的尺寸。

3 控制补偿方案及仿真验证

无控条件下虽然飞机姿态能自动回稳,但是俯仰角变化范围偏大,回稳过程也较慢。下面给出一种升降舵补偿控制方案,以改善飞机俯仰运动特性。

(1) 货物在导轨上滑行时升降舵向下满偏,以产生足够的低头控制力矩来抵消抬头干扰力矩,即

$$\delta_e = \delta_{e\max} = 20^{\circ} \quad (19)$$

(2) 货物离机后,升降舵按如下PD控制律偏

转,使飞机姿态回稳:

$$\delta_e = 20(\eta - \eta^*) + 5\dot{\eta} \quad (20)$$

从式(19)到式(20)的切换时机的掌握比较关键。自控模式下,当检测到飞机俯仰角加速度出现负跳变时,意味着货物离舱,进行控制律的切换;人工模式下,需要驾驶员根据经验掌握切换时机。

在与上一节仿真条件同等的情况下,进行了带补偿控制的仿真。仿真中考虑了升降舵回路的一阶动态特性和舵偏限幅。仿真结果如图4和图5所示。

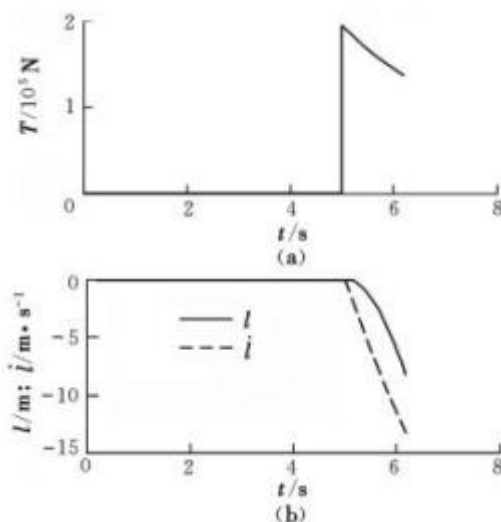


图4 有控条件下伞拉力和货物运动参数

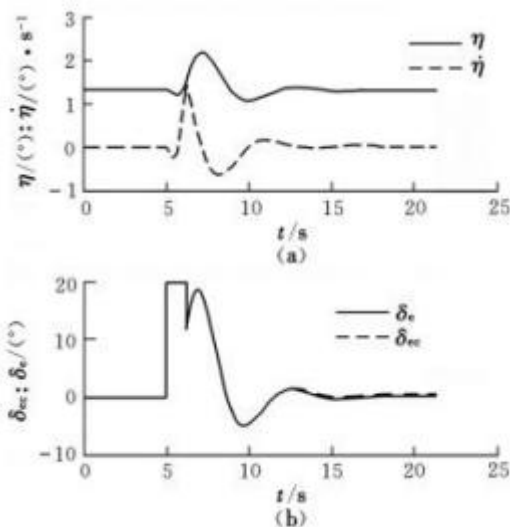


图5 有控条件下飞机运动参数

仿真结果显示,施加升降舵补偿控制后,飞机俯仰角峰值由无控时的3.52°下降到2.19°,俯仰角速率峰值也由无控时的2.13(°)/s下降到1.50(°)/s。货物离机后,飞机姿态角衰减速度也明显加快。可见控制补偿方案能比较显著地改善飞机姿态动态特性,提高了载机的安全性。

4 结束语

本文基于拉格朗日分析力学建立了重装空投过程飞机-货物两体系统动力学模型,分析了货物移动和飞机姿态运动之间的耦合关系,并设计了相应的控制补偿方案,通过数值仿真验证了其有效性。该项研究对发展我国重装空投技术具有一定的理论指导意义和工程参考价值。对于这一方面的研究,尚有如下问题需要进一步的思考和深入研究:考虑地效影响的重装超低空空投动力学与控制;综合考虑飞机质心运动和姿态运动的空投过程中机-货系统动力学与控制。

参考文献:

- [1] 杨雪松,王乘,李振环. 超低空空投过程的仿真[J]. 华中科技大学学报,2003,31(4):108-110.
- [2] Chuthbert P A. A software simulation of cargo drop tests [C]//17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. Monterey, California, 2003:1-11.
- [3] Kenneth J Desabrais. The motion and aerodynamics of an airdrop platform [C]//22th Applied Aerodynamics Conference and Exhibit. Providence, Rhode Island,2004:1-13.
- [4] 柯鹏,杨春信,杨雪松,等. 重型货物空投系统过程仿真及特性分析[J]. 航空学报,2006,27(5):856-860.
- [5] 刘彬,谷京朝,陈湘平,等. 重物空投着陆过程系统分析与仿真[J]. 空军雷达学院学报,2008,22(2):136-138,142.
- [6] Peng K E, YANG Chun-xin, YANG Xue-song. Extraction phase simulation of cargo airdrop system [J]. Chinese Journal of Aeronautics,2006,19(4):315-321.
- [7] Zhang Hui-yuan, Shi Zhong-ke. Variable structure control of catastrophic course in airdropping heavy cargo [J]. Chinese Journal of Aeronautics,2009,22(5):520-527.
- [8] 杨妙生,屈香菊. 运输机空投的飞行动力学建模及仿真[J]. 飞行力学,2010,28(3):9-12.

Dynamics for heavy equipment airdrop and control design

HAN Yan-hua, LU Yu-ping

(College of Astronautics, NUAA, Nanjing 210016, China)

Abstract: A two-body system of plane-cargo's dynamics model is built based on the Lagrange analytical mechanics for a heavy equipment airdrop mission. A compensation scheme is proposed to weaken the cargo's impact to airplane. Numerical simulation shows the dynamic coupling between airplane and cargoes, and the relevancy between the size of extraction parachute and simulation results is analyzed. Numerical simulation results also supports the effectiveness of control law proposed in this paper, that is, flying qualities and safety of airplane are improved significantly.

Key words: heavy cargo airdrop; multi-body system; Lagrange analytical mechanics; flight control; numerical simulation

(编辑: 姚妙慧)