

飞机超低空牵引空投动力学响应研究

杨 雨 陆宇平

(南京航空航天大学航天学院, 南京, 210016)

摘要:当飞机进行超低空牵引空投(Super low attitude parachute extraction system, SLAPES)时,货物在货舱内移动,导致飞机质心位置、转动惯量以及绕质心的气动力矩都有显著的变化,飞机可能变成静不稳定的。本文从理论力学和飞行力学的基本原理出发,以飞机的质心作为参考点,分别建立了重物在货舱内静止,被牵引伞牵引和最后在货舱内移动的整个过程中飞机响应的数学模型。通过对重物的不同质量、牵引伞不同牵引比和不同的开伞过程时间条件下的仿真,得到货物质量、牵引比和开伞过程对整个空投的影响。

关键词:导航制导与控制;超低空牵引空投;飞行力学;牵引伞;牵引比

中图分类号:V212.11

文献标识码:A

文章编号:1005-2615(2012)03-0294-07

Dynamics Modelling for Super Low Attitude Parachute Extraction System on Transport Airplane

Yang Yu, Lu Yuping

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In the super low attitude of the airdrop, the movement of the cargos in the cabin will cause significant changes in the center of gravity (CG), the moment of inertia as well as the aerodynamic torque around the center of mass. As a result, the aircraft may become instability. The center of mass of the aircraft is taken as the reference point to establish dynamics models including before the airdrop, the extraction parachute pulling the cargos and the cargos moving in the cabin based on theoretical mechanics and basic flight dynamic equations. Finally, the effect of the extraction parachute, the cargos and the parachute opening process on the airdrop is simulated.

Key words: navigation, guidance and control; super low attitude parachute extraction (SLAPES); flight dynamics; extraction parachute; traction ratio

超低空牵引空投(Super low attitude parachute extraction system, SLAPES)是指飞机飞至距离地面约 1.5~3 m 的超低高度,在空投点,通过引导伞拉出牵引伞,牵引伞将重型货物直接从机舱拉出,落地后通过短距离的滑行停在地面上的空投方式。由于空投高度极低且空投的对象一般是重型武器或货物,因此其难度极大,世界上能执行此任务的运输机型也屈指可数,如美国的 C-17^[1]和 C-130 运输机可以执行此任务。但由于超低空空投

拥有其独特的优势,如空投精度高、空投货物安全性高、飞机无须降落再起飞时效性强,不受机场限制可以将装备物资及时运送至前线,所以在战斗或者救灾中应用极大,C-17 和 C-130 就可以把 M1 坦克和直升机通过超低空牵引空投的方式直接运至前线。所以现在研究运输机时都要考虑飞机拥有超低空牵引空投能力,例如,欧洲最新研制的 A400M 运输机就拥有超低空牵引空投能力。

鉴于超低空空投的高风险性,飞机在投放重型

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20093218120035)资助项目。

收稿日期:2011-03-16;修订日期:2011-12-28

通讯作者:陆宇平,男,教授,博士生导师,1957 年出生,E-mail:yplac@nuaa.edu.cn。

货物过程中,货物在货舱内移动,引起整个飞机的质心和转动惯量变化,导致绕质心的气动力矩导数的变化;而且在释放的瞬间,飞机的质量、质心和转动惯量均发生突变。这样的条件下飞机能否保持稳定、飞机应如何操纵,都是值得关注的问题。所以必须进行超低空牵引空投时货物在货舱内的移动对飞机的影响建立精确的数学模型,分析货物和牵引伞对飞机的影响,为工程应用和飞行员驾驶提供参考。但是,现有的飞行力学方程均不适用于这种情况,或者没有建立完整的动态模型。国内外关于超低空牵引空投的研究和参考资料很少,文献[2]记录了C-130运输机80余次超低空牵引空投试验,并记录了飞机的飞行数据,提出了超低空空投的具体操作步骤和一些关于进行超低空牵引空投对飞机环境的要求。文献[3~6]详细地记录了C-17执行普通重物空投和超低空牵引空投任务的试验,还介绍了用于空投的锁具和货台系统。这些都没有建立完整的超低空牵引空投的模型。在国内,文献[7,8]分别记录了H-5和H-8飞机进行空投时高度和纵向姿态的研究;文献[9]也专门对超低空空投过程进行了仿真,但是没有建立精确的数学模型;文献[10]粗略分析了货物在货舱内移动时飞机纵向的响应,但由于并不是针对超低空牵引空投,所以在很多方面作了假设,如假设飞机在货舱内匀速运动。这些假设使模型变得不精确,不能真实地反映飞机当时准确的响应。并且超低空牵引空投高度低,横侧向的运动也必须受到更大的关注。本文的目的就是要研究在这种极低高度的情况下飞机准确的三维动力学模型的建立方法,分析飞机在整个超低空牵引空投过程中的响应情况。

1 坐标系和符号定义

本文对超低空牵引空投的动力学模型研究基于欧美坐标系,主要用到地面坐标系和机体坐标系。

(1)地面坐标系: $O_g x_g y_g z_g$

在地面任选一点作为地面坐标系的原点 O_g ,使 z_g 轴垂直于地面并指向地心, x_g, y_g 轴在水平面上并相互垂直。指向按右手法则确定。

(2)机体坐标系: $O_b x_b y_b z_b$

机体坐标系与飞机固连,原点取在飞机质心处, x_b 轴在飞机对称平面内平行于飞机的设计轴线指向机头, y_b 垂直于飞机对称平面指向机身右方, z_b 轴在飞机对称平面指向机身右方。3个轴的单位矢量分别为 i, j, k 。

为了公式推导,将对符号进行定义,如表1,表2所示。相关角度的定义可以参考文献[11]。

表1 机体轴下符号定义

	滚转轴 x_b	俯仰轴 y_b	偏航轴 z_b
角速率	p	q	r
速度分量	u	v	w
气动合力	X	Y	Z
合力矩	\bar{L}	M	N
转动惯量	I_x	I_y	I_z
惯性积	I_{yz}	I_{xz}	I_{xy}

表2 角度符号定义

定义	符号表示
俯仰角	θ
偏航角	ψ
滚转角	φ
迎角	α
侧滑角	β

利用上述定义,可以得到地面坐标系和机体坐标系的转换矩阵

$$S_{\theta\psi\varphi} = \begin{bmatrix} * & * & -\sin\theta \\ * & * & \cos\theta\sin\varphi \\ * & * & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

地面坐标系和机体坐标系的关系可以通过式(2)转换

$$\begin{aligned} X_{\text{earth}} &= S_{\theta\psi\varphi}^T X_{\text{body}} \\ X_{\text{body}} &= S_{\theta\psi\varphi} X_{\text{earth}} \end{aligned} \quad (2)$$

最后,为了建立模型,需要对货物进行两个合理的假设:

(1)虽然进行超低空牵引空投的货物质量较大,但相对于飞机的质量仍然较小,因此可以把货物当成一个质点处理。

(2)假设货物在货舱内沿直线滑轨运动,货物的移动轨迹与机体轴 x_b 轴重合。这个假设经过调研,在现实的空投中完全可以实现,且多数空投货物都是这样摆放和滑动的。

2 超低空牵引空投动力学建模

对于普通飞机的动力学模型的研究是比较成熟的,多数的飞行控制系统文献[11,12]都有详细推导。普通固定翼飞机模型主要由12个状态变量和4组共12个状态方程描述,其中描述角速率的

运动方程组和描述位移的导航方程组都是基于机体坐标轴和地面坐标轴之间的关系得到的。这两个方程组在超低空牵引空投的数学建模中可以直接应用,而力方程组和力矩方程组由于货物的存在发生了改变。

2.1 力和力矩方程组

首先回顾无货物飞机的力和力矩方程组,以便后面的推导。假设飞机的质量为 m_1 ,飞机受到气动合力(包括升力、阻力、侧力和发动机推力)和自身的重力,利用公式(1,2),将重力分解到机体轴,参考文献[11]及大多数关于飞机控制系统的文献,易得到飞机的力和力矩方程组

$$\begin{cases} X - m_1 g \sin \theta = m_1 (\dot{u} + \omega q - vr) \\ Y + m_1 g \cos \theta \sin \varphi = m_1 (\dot{v} + ur - \omega p) \\ Z + m_1 g \cos \theta \cos \varphi = m_1 (\dot{w} + vp - uq) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \bar{L} = \dot{p} I_x - r I_{xz} + qr (I_z - I_y) - pq I_{xz} \\ M = \dot{q} I_y + pr (I_x - I_z) + (p^2 - r^2) I_{xz} \\ N = \dot{r} I_z - \dot{p} I_{xz} + pq (I_y - I_x) + qr I_{xz} \end{cases} \quad (4)$$

通过式(3,4),可以得到关于状态变量 $\mathbf{X}^T = [u, v, w, p, q, r]$ 的6个状态方程,这是最基本的飞机动力学模型。飞机受到的力、力矩和各状态量都是已知的,而飞机的转动惯量和惯性积也是不变的。接下来对于超低空牵引空投系统的研究基本上都是以上两个方程组。

在进行超低空牵引空投建模时,主要考虑两种方法来建立动力学模型:(1)把货物的移动和滑出飞机当作货物对飞机的力和力矩的扰动,这样就有一个固定的点作为参考点,就是飞机的质心,这个点在整个空投过程中保持不变,这种方法称为分离法。(2)考虑整体的重心,把货物和飞机看作一个整体,这种方法将货物和飞机的相互作用看成系统的内力,但是这个参考点会随着货物在飞机内的移动随时变化,整体的转动惯量和惯性积也随之变化,这种方法称为整体法。

分离法易于理解,且飞机的惯性积和转动惯量在整个过程中保持不变,但货物的运动十分复杂,需要仔细地研究。整体法不需要考虑内力的影响,但需要求解货物与飞机的整体的惯性积和转动惯量,且求得的速度和角度都是针对整体的,最后还需要转化至飞机,更为复杂,权衡利弊,本文将利用分离法对飞机进行建模。

2.2 超低空牵引空投动力学模型

利用分离法,当飞机进行超低空空投时,无论货物在货舱内静止还是移动,货物对飞机的作用就是力和力矩的干扰。设货物对飞机的作用力为 \mathbf{F} ,

在机体轴上可以分解为 F_x, F_y 和 F_z ,即 $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]$ 。

对于飞机,其力方程组转化为

$$\begin{cases} X - m_1 g \sin \theta + F_x = m_1 (\dot{u} + \omega q - vr) \\ Y + m_1 g \cos \theta \sin \varphi + F_y = m_1 (\dot{v} + ur - \omega p) \\ Z + m_1 g \cos \theta \cos \varphi + F_z = m_1 (\dot{w} + vp - uq) \end{cases} \quad (5)$$

再假设货物的位置矢量在机体轴下的坐标为 $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]$ 。根据假设(2),可以知道 r_y 为0。有了位置矢量,可以得到货物对飞机力矩的影响

$$\mathbf{r} \times \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ r_x & 0 & r_z \\ F_x & F_y & F_z \end{bmatrix} = (-F_y r_z) \mathbf{i} + (F_x r_z - F_z r_x) \mathbf{j} + (F_y r_x) \mathbf{k} \quad (6)$$

此时,飞机的力矩方程组为

$$\begin{cases} \bar{L} - F_y r_z = \dot{p} I_x - r I_{xz} + qr (I_z - I_y) - pq I_{xz} \\ M + F_x r_z - F_z r_x = \dot{q} I_y + pr (I_x - I_z) + (p^2 - r^2) I_{xz} \\ N + F_y r_x = \dot{r} I_z - \dot{p} I_{xz} + pq (I_y - I_x) + qr I_{xz} \end{cases} \quad (7)$$

由于货物的移动轨迹与机体轴 x_b 轴重合,所以 r_z 不变且可以在空投前测量得知,那么式(5,7)只有货物对飞机的作用力 \mathbf{F} 和货物的实时位置 r_x 位置是未知的,如果能得到它们,就可以得到飞机的力和力矩方程组。下面通过分析货物的运动来得到不同空投阶段下的 \mathbf{F} 和 r_x 。

货物在货舱内的移动十分复杂,是3轴的牵连运动,且运动既有平动也有转动,货物在货舱内的运动为平动,而飞机既有自身的运动也有受到货物牵连的运动,既有平动也有转动。把地面坐标系作为定坐标系,机体坐标系作为动坐标系,根据质点的牵连加速度合成原理^[13-14]来计算货物的加速度,点的加速度合成原理指出当牵连运动为转动时,动点的绝对加速度等于牵连加速度、相对加速度和哥氏加速度的矢量和。

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_e + \mathbf{a}_r + \mathbf{a}_k \quad (8)$$

式中: \mathbf{a}_e 表示牵连加速度; \mathbf{a}_r 表示货物的相对加速度; \mathbf{a}_k 表示哥氏加速度。可以通过式(9)计算

$$\begin{cases} \mathbf{a}_e = d\mathbf{V}/dt + d\omega/dt \times \mathbf{r} + \omega \times (\omega \times \mathbf{r}) \\ \mathbf{a}_r = d^2\mathbf{r}/dt^2 \\ \mathbf{a}_k = 2\omega \times (d\mathbf{r}/dt) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\omega = [p, q, r]$ 为飞机的角速度矢量; $\mathbf{V} = [u, v, w]$ 为飞机的速度矢量。

在 \mathbf{a}_e 的表达式中, $d\mathbf{V}/dt$ 表示飞机运动的加速

度,可以由式(5)求出,如式(10), $d\omega/dt \times r$ 和 $\omega \times (\omega \times r)$ 可以由式(11,12)求出。

$$dV/dt = (\dot{u} + \omega q - vr)\mathbf{i} + (\dot{v} + ur - \omega p)\mathbf{j} + (\dot{w} + vp - uq)\mathbf{k} \quad (10)$$

$$d\omega/dt \times r = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \dot{p} & \dot{q} & \dot{r} \\ r_x & 0 & r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_z \dot{q} \\ r_x \dot{r} - r_z \dot{p} \\ -r_x \dot{q} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\omega \times (\omega \times r) = \omega \times \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ p & q & r \\ r_x & 0 & r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ p & q & r \\ r_x & 0 & r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & q & r \\ r_x & 0 & r_z \\ -r_x q^2 + r(pr_z - rr_x) \\ r_x pq + r_z qr \\ -r_x q^2 - p(pr_z - rr_x) \end{bmatrix} \quad (12)$$

同理, a_r 和 a_k 可以通过式(13,14)计算

$$a_r = \ddot{r}_x \mathbf{i} + 0\mathbf{j} + \ddot{r}_z \mathbf{k} \quad (13)$$

$$2\omega \times (dr/dt) = 2 \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ p & q & r \\ \dot{r}_x & 0 & \dot{r}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\dot{r}_z q \\ 2(\dot{r}_x r - \dot{r}_z p) \\ -2\dot{r}_x q \end{bmatrix} \quad (14)$$

由于货物的移动轨迹与机体轴 x_b 轴重合,所以 $\dot{r}_z = \ddot{r}_z = 0$,那么简化式(13,14),得到机体轴下货物的加速度的公式

$$\begin{cases} a_x = \dot{u} + \omega q - vr + r_z \dot{q} - r_x q^2 + r(pr_z - rr_x) + \ddot{r}_x \\ a_y = \dot{v} + ur - \omega p + r_x \dot{r} - r_z \dot{p} + r_x pq + r_z qr + 2\ddot{r}_x \\ a_z = \dot{w} + vp - uq - r_x \dot{q} - r_z q^2 - p(pr_z - rr_x) - 2q\dot{r}_x \end{cases} \quad (15)$$

对货物进行受力分析,货物受到了自身的重力 G ,飞机对货物反作用力 $-F'$ 以及牵引伞的拉力 T 。假设货物的质量为 m_2 ,对货物建立牛顿第二定律方程

$$\begin{cases} F_x = \frac{m_1 m_2 r_x (q^2 + r^2) - m_1 m_2 \ddot{r}_x - m_2 X + m_1 T_x}{(m_1 + m_2)} \\ F_y = \frac{-m_1 m_2 r_x (c_1 pq - c_2 r q + c_3 \bar{L} + c_4 N) - m_1 m_2 r_x pq - m_2 Y + m_1 T_y + 2m_1 m_2 r \ddot{r}_x}{m_1 + m_2 + c_4 m_1 m_2 r_x^2} \\ F_z = \frac{m_1 m_2 r_x (c_5 pr - c_6 p^2 + c_6 r^2 + c_7 M) - m_1 m_2 r_x pr - m_2 Z + m_1 T_z + 2m_1 m_2 r \ddot{r}_x}{m_1 + m_2 + c_7 m_1 m_2 r_x^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中: r_x, \dot{r}_x 和 \ddot{r}_x 均为未知量。在这里可按下面的方法处理:在力和力矩方程组6个状态变量的基础上增加两个状态变量 x_1 和 x_2 ,并令 $x_1 = r_x, x_2 = \dot{r}_x$ 。则有

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (19)$$

由于货物在货舱内滑动, F_z 为滑动摩擦力,设货舱的滑动摩擦因数为 μ ,则有式(20)成立

$$m_2 a = G + T - F' \quad (16)$$

牵引伞在拉直的过程中,其拉力与面积呈线性关系;在充气的过程中,其拉力与面积的4次方呈线性关系;最后伞完全张开,拉力达到最大,货物开始移动,伞的拉力为货物质量与牵引比的乘积^[15]。在此文中,牵引伞拉力已知,其在机体轴上的分量可表示为 $T = [T_x, T_y, T_z]$ 。下面分两种情况分别建立超低空牵引空投的数学模型:

(1)货物在货舱内静止情况

在飞机下滑至空投高度或者在空投前牵引伞在拉直充气的过程中,货物是静止不动的, r_x 就是货物的初始位置,货物在机体轴上的速度和加速度为0,即 $\dot{r}_x = \ddot{r}_x = 0$ 。将式(5,7,15)代入式(16),可以得到关于 $F = [F_x, F_y, F_z]$ 的三元一次方程。由于方程组非常复杂,不失一般性,给出当 $r_z = 0$,即货物的位置在机体轴 z_b 上的坐标为0时的方程组的解为

$$\begin{cases} F_x = \frac{m_1 m_2 r_x (q^2 + r^2) - m_2 X + m_1 T_x}{(m_1 + m_2)} \\ F_y = \frac{-m_1 m_2 r_x (c_1 pq - c_2 r q + c_3 \bar{L} + c_4 N) - m_1 m_2 r_x pq - m_2 Y + m_1 T_y}{m_1 + m_2 + c_4 m_1 m_2 r_x^2} \\ F_z = \frac{m_1 m_2 r_x (c_5 pr - c_6 p^2 + c_6 r^2 + c_7 M) - m_1 m_2 r_x pr - m_2 Z + m_1 T_z}{m_1 + m_2 + c_7 m_1 m_2 r_x^2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $c_1 \sim c_7$ 均为关于转动惯量和惯性积的表达式,均为常数。所以,式(17)中除了状态变量,均为已知量。将 $F = [F_x, F_y, F_z]$ 代入式(5,7),可以得到当货物静止时,飞机的力方程组和力矩方程组,就可以作为货物静止时的空投模型。

(2)货物在货舱内移动情况

货物在货舱内移动的情况相对于静止要复杂很多,此时 $\dot{r}_x = \ddot{r}_x \neq 0$,且 r_x 也在变化。

同理,将式(5,7,15)代入式(16),可以得到 $F = [F_x, F_y, F_z]$ 的表达式如下

$$F_x = -\mu F_z \quad (20)$$

将式(17)中的 F_x 和 F_z 代入,可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = \ddot{r}_x &= \frac{\mu F_z (m_1 + m_2) - m_2 X + m_1 T_x}{m_1 m_2} + \\ &x_1 (p^2 + r^2) \end{aligned} \quad (21)$$

这样利用两个新的状态变量的状态方程,联立方程组(5,7,19,21),得到了8个状态变量的状态

方程,加上运动方程组和导航方程组共 14 个状态变量构成了货物移动时的飞机的动力学模型。

而当货物在货舱内沿直线滑轨运动,货物的移动轨迹不与机体轴 x_b 轴重合时,即货物的位置矢量在机体轴下的坐标 $\mathbf{r}=[r_x, r_y, r_z]$ 中, $r_y \neq 0$ 。在这种情况下,仍然可以利用上面的分析求出飞机的动力学方程,只是此方程包含 r_y ,而 r_y 为货物在货舱内的位置在机体坐标轴 y_b 轴的坐标。又由于货物在货舱内沿直线运动,所以 r_y 在货物移动过程中为一常量不变,且 $\dot{r}_y = \ddot{r}_y = 0$ 。这样就很容易推导出当 $r_y \neq 0$ 的情况下飞机的动力学模型了。

下面将利用此模型通过仿真分析空投货物、牵引伞及开伞过程对飞机姿态的影响。

3 超低空牵引空投仿真及分析

由上面的分析可知,除飞机本身外其他因素对飞机姿态的影响,主要是货物的质量、货舱滑轨的摩擦因数、伞的拉力及整个开伞过程。经调研,滑轨的摩擦因数很低,数量级甚至可达到 10^{-3} ,所以这里不对不同的滑轨摩擦因数进行仿真。货舱开伞过程主要是指从牵引伞被拉出到最后货物移动之间的一段时间,而牵引伞的最大拉力与牵引比有关,参考 C-130 对牵引比值的设定,进行超低空牵引空投一般选择的牵引伞的牵引比在 1 至 3 之间。下面将以某飞机为例,通过仿真逐个分析这些量对飞机姿态的影响。

(1) 货物质量对飞机姿态的影响

固定开伞过程所需时间和牵引伞牵引比,分别选取 10, 20 和 30 t 的货物进行仿真。假设飞机在 1.5 m 的高度平飞 9 s 后开伞,开伞过程为 1 s,然后货物移动,整个仿真时间 20 s,此刻飞机的高度、速度曲线如图 1 所示。

通过图 1 可以看到,平飞结束后开始的牵引阶段,由于货物不动,牵引伞的力相当于对飞机的阻力,飞机的高度和速度都降低。当货物向后移动时,飞机的俯仰角增大,货物掉落时,由于飞机的质量突然减轻,而油门的大小没有改变,飞机的高度会逐渐升高。而货物质量越大对飞机的姿态影响也越大,导致了飞机在速度和高度上的变化更加明显。

(2) 开伞过程对飞机姿态的影响

将开伞时间分别定为 1, 1.5 和 2 s,固定货物质量为 20 t,牵引伞牵引比为 2,仿真时间仍为 20 s,飞机的高度、速度曲线如图 2 所示。

俯仰角、俯仰角速率曲线如图 3 所示。

由图 2, 3 可以看出,开伞过程对飞机姿态的影

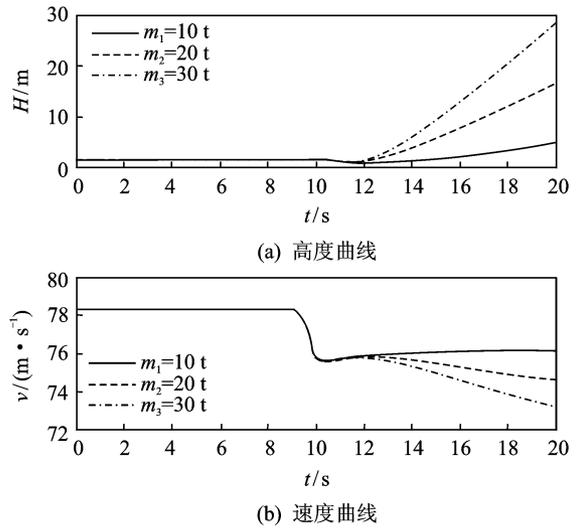


图 1 不同货物质量超低空牵引空投高度速度曲线

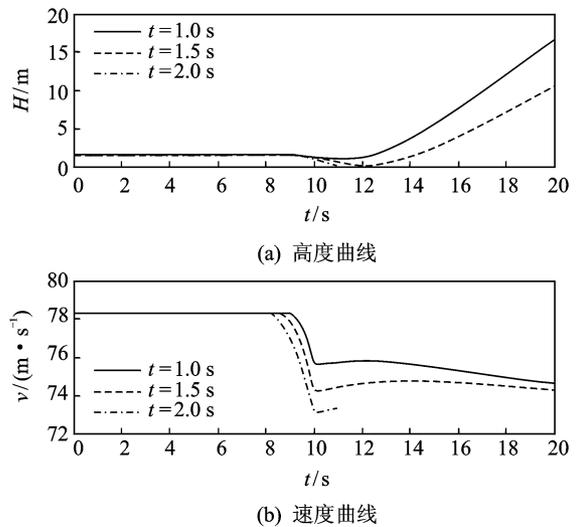


图 2 不同开伞过程超低空牵引空投高度速度曲线

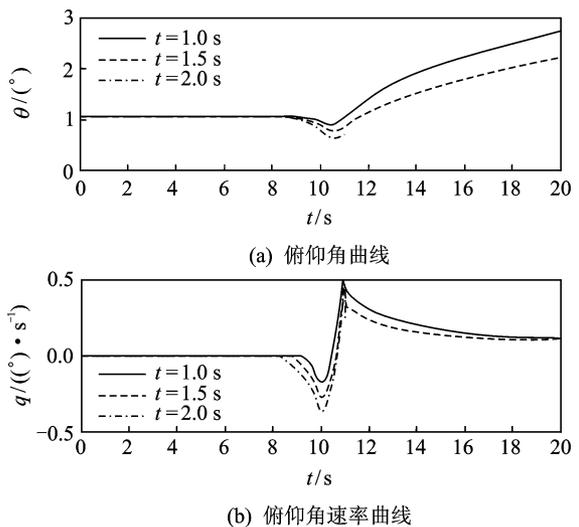


图 3 不同开伞过程超低空牵引空投姿态曲线

响非常大,牵引伞在释放之后其拉力就会成为飞机的阻力,而且这个阻力非常大。由于飞机距离地面的距离非常近,这样大的阻力如果不能得到补偿,一定会导致飞机吊高。过长的开伞过程时间还可能会导致飞机触地(2 s 的开伞过程时间飞机触地),并且开伞过程时间过长还会导致俯仰角、俯仰角速率的变化幅度都变大,这对飞机是非常危险的。

(3) 牵引伞牵引比对飞机姿态的影响

固定其他参数,开伞时间为 1 s,货物 20 t,分别选择牵引比为 1, 2 和 3 的牵引伞进行仿真,可得到高度、速度曲线如图 4 所示。

俯仰角和俯仰角速率曲线如图 5 所示。

由仿真曲线可以看出,大的牵引比可以加快飞机的出舱过程,使飞机在高度和姿态上受到的影响较小,对超低空牵引空投有益,但要想有大的牵引比,必然要使用迎风面积较大的牵引伞,这样就会延长开伞过程,而根据前面的分析,开伞过程过长

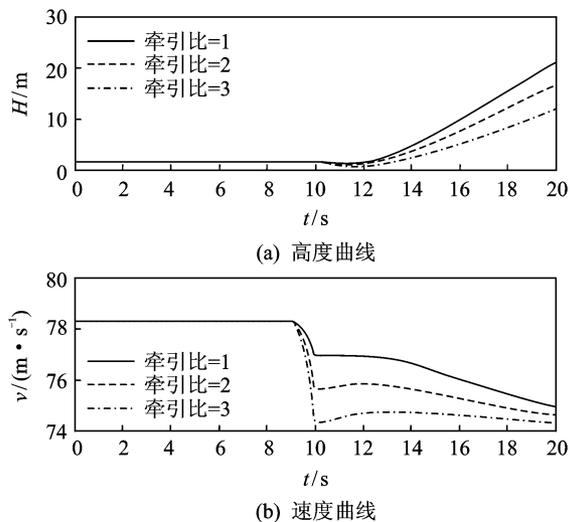


图 4 不同牵引比超低空牵引空投高度速度曲线

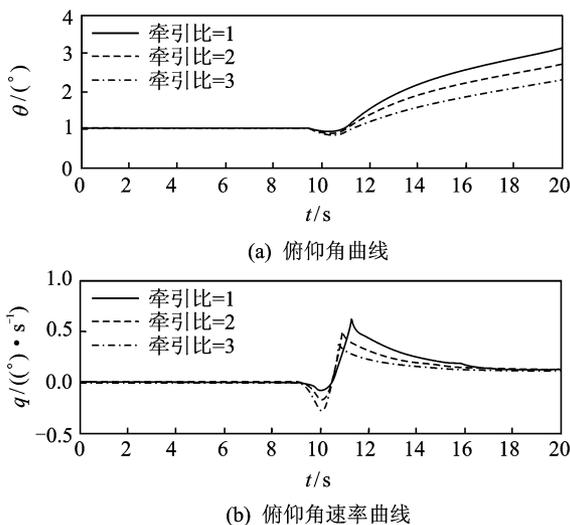


图 5 不同牵引比超低空牵引空投姿态曲线

又会增加空投的危险性。而牵引比过小会导致货物出舱时间加长,对空投不利。所以,牵引比和开伞过程是一对矛盾的因素,在对牵引伞尺寸的选择上应作慎重的选择。

在纵向的控制上,由于超低空牵引空投的高度非常低,所以高度是飞行员最关心的数据,同时飞机的姿态和速度也是非常重要的,这些要素也会影响高度。在进行空投时,飞行员在操纵的同时可以接通自动飞机控制系统的高度保持模态控制飞机。但是由于货物质量过大,这样控制的效果有限,可能需要一些现代控制手段和现代化的飞机布局对超低空牵引空投进行控制,例如:LQR 控制方法、发动机的矢量控制等。

除此之外,飞机在横侧向上的运动也十分关键,虽然货物在货舱内沿直线滑轨运动,货物的移动轨迹与机体轴 x_b 轴重合,货物在飞机无侧滑飞行时对飞机并没有横侧向的作用,但如果存在侧风,飞机存在滚转角,货物的重力分量就会对飞机产生影响。下面假设在仿真第 5 s 突然侧向受到 4 m/s 的突风,滚转角的数值仿真真曲线见图 6。

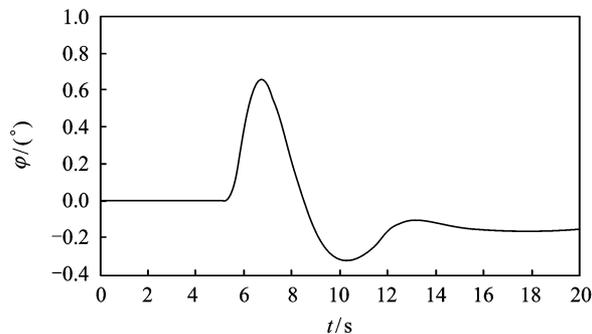


图 6 超低空牵引空投侧风环境下滚转角曲线

由于飞机距离地面的高度非常低,如果此时发生滚转极易使翼尖触地。还必须通过翼展与滚转角之间的关系解算出翼尖距离地面的高度,对飞机执行超低空牵引空投的最大风速进行限制。如果存在风切变等气象情况,由于飞机飞行高度极低,这些扰动对飞机将是毁灭性的影响,而风切变是可以提前预报的,建议在这种情况下不进行超低空牵引空投。

4 结 论

本文从理论力学的基本原理和飞行力学的基本结论出发,建立了飞机进行超低空空投时飞机的精确的数学模型,研究模型中影响飞机空投姿态的因素并通过仿真分析得到以下结论:

(1)无论货物静止或者移动都对飞机动力学模型产生影响,尤其在货物移动时,必须增加货物位置和货物速度两个状态变量,才能准确地描述飞机的动力学响应。

(2)货物的质量、牵引伞开伞过程和牵引伞牵引比都是影响空投的重要因素,尤其是开伞过程和牵引比的选择不当,可直接导致飞机触地。可以通过建立数学仿真确定安全的开伞过程时间,根据不同的质量的货物来选择适合进行超低空牵引空投的牵引伞。

(3)进行超低空空投的飞机受到侧风的影响会发生滚转,翼尖有触地危险,必须通过飞机的翼展对侧风的最大风速进行限制。

参考文献:

- [1] Tavernetti L R. The C-17: modern airlift technology [R]. AIAI Paper 92-1262, 1992.
- [2] Platt S C, Maple R, Franke M E. Parachute extraction of a generic munition form a C-130E aircraft [R]. AIAA 2006-457, 2006.
- [3] Lopez M A, Wuest M R. C-17A cargo airdrop testing[R]. AIAA Paper 1995-1578-C, 1995.
- [4] Lis J, Tavernetti L R. C-17 dual raw airdrop system [R]. AIAA Paper 99-1721, 1999.
- [5] Kendall E R. Advances in aircraft flight control [M]. London: Taylor & Francis, 1996:189-210.
- [6] Black W B. Development of the C-17 formation airdrop element geometry[R]. AIAA-97-3578, 1997.
- [7] 吴建华,胡启仁,刘少田. H-5 飞机着陆跳跃复飞的可行性探讨[J]. 飞行力学,1993,11(4):75-79.
Wu Jianhua, Hu Qiren, Liu Shaotian. Landing jumps and take off feasibility research of H-5 airplane[J]. Flight Dynamic, 1993,11(4):75-79.
- [8] 傅百先. Y-8 飞机连续空投纵向动态分析[J]. 飞行力学,1993,11(1):80-87.
Fu Baixian. The longitudinal dynamic analysis of Y-8 airplane in continuous airdrop[J]. Flight Dynamic, 1993,11(1):80-87.
- [9] 杨雪松,王乘,李振环. 超低空空投过程仿真[J]. 华中科技大学学报,2003,31(4):108-110.
Yang Xuesong, Wang Cheng, Li Zhenhuan. Simulation of airdrop at a super-low-attitude[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2003,31(4):108-110.
- [10] 胡兆丰,肖业伦. 货物在货舱内移动时飞机运动的研究方法[R]. 北京航空航天大学科学研究报告 BH-B550. 北京:北京航空航天大学. 1980.
- [11] 吴森堂,费玉华. 飞行控制系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:52-59.
- [12] 鲁道夫布罗克豪斯. 飞行控制[M]. 金长江,译. 北京:国防工业出版社,1999:125-130.
- [13] 王志伟,马明江. 理论力学[M]. 北京:中国机械工业出版社,2006:161-172.
- [14] 陈立群,戈新生,徐凯宇. 理论力学[M]. 北京:清华大学出版社,2006:82-92.
- [15] 王利荣. 降落伞理论与应用[M]. 北京:宇航出版社,1997.