

重装空投中货物重心位置对离机姿态角的影响分析

Influences of the Barycenter Position on Pose Angle during Airdrop

张恒铭 程德峰 / 中航工业一飞院

摘要: 为了明确空投集装箱货物重心位置对离机姿态角的影响, 本文构建了货物离机运动轨迹模型, 通过实例计算在货物不同重心位置条件下的离机姿态角, 拟合了货物离机姿态角随不同重心位置的变化曲线, 实现了集装箱货物不同重心位置对离机姿态角影响状态的可视化。这有助于确定空投集装箱货物重心位置的合理范围, 提高重装空投的可靠性。

Abstract: For clarifying the effects on isolated attitude angle by airdrop container cargo gravity position, here the containerized cargo different gravity position has carried on the analysis to the influence of the attitude angle from the aircraft, construct the movement trajectory model, and through examples in different gravity position of cargo under the condition of the attitude angle is calculated from the aircraft, Fit the cargo from the aircraft attitude angle curve with different gravity position, and get the state of the visual effect of containerized cargo different gravity position on the off plane pose angle. It provides help for determining the reasonable range of airdrop container cargo gravity to improve the reliability of heavy equipment airdrop.

关键词: 货物重心; 离机姿态角; 运动轨迹

Keywords: the gravity of cargo; isolated attitude angle from the aircraft; trajectory

0 引言

在重装空投中, 小件货物需要进行集装化处理, 形成与空投底板相适应的集装货物, 而空投货物在集装化处理过程中, 集装货物重心一般很难保证与集装货物几何中心完全重合。由于集装货物重心位置直接影响到离机姿态角, 从而影响空投安全和效果。选取合理的集装货物重心位置范围显得尤为重要。本文对不同货物重心位置而引起离机姿态角的变化进行分析, 构建空投货物离机运动轨迹模型, 并引用实例进行详细说明。

1 空投货物离机运动轨迹建模

在空投货物离机运动过程中, 当货物前端运动到垂直于地板末端时, 为货物离机运动过程中的初始状态, 如图1

所示; 当货物末端运动到地板末端位置时, 为货物离机运动过程中的末状态, 如图2所示。设货物尺寸(长×宽×高)为 $L \times B \times H$, 货物重心位置 Q 点距货物前端 a_1 , 距货物下表面 b_1 。取飞机地板坐标系 $OXYZ$ 为参考坐标系(X 正方向为飞机逆航向, Y 正方向为垂直地板向下, 坐标系符合右手法则), 货物离机运动初始状态时货物几何中心 W 点与坐

标系原点 O 重合。

由于牵引伞牵引货物离机过程一直处于完全张开状态, 牵引伞提供的牵引力为:

$$F = \frac{k}{2} \rho (v_0 - \frac{ds}{dt})^2 \quad (1)$$

其中: k 为牵引伞特征系数, ρ 为空气密度, v_0 为飞机速度, s 为空投货物在 X 方向上的运动位移。

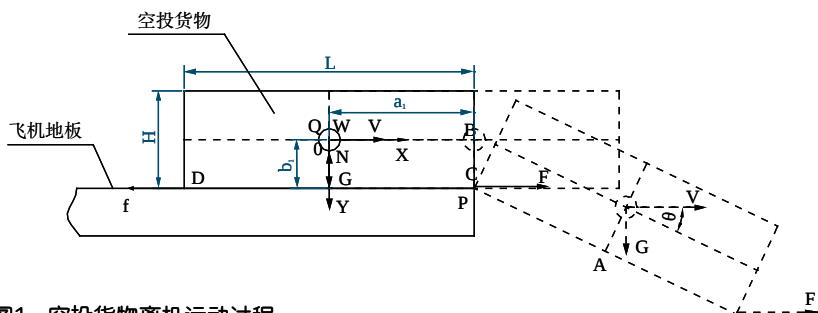


图1 空投货物离机运动过程

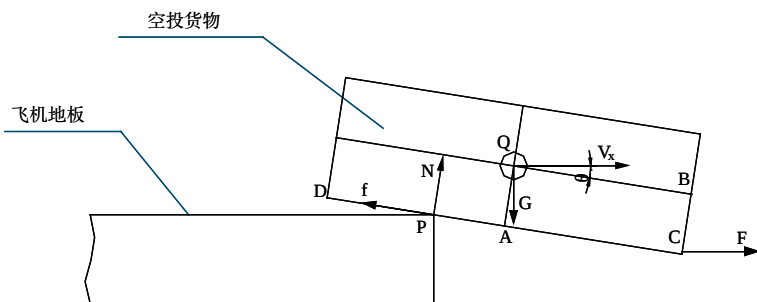


图2 货物离机旋转运动状态

假设无侧风影响,飞机保持水平飞行,牵引力方向与X正方向一致。设货物从初始状态到重心处于货舱末端面为AB阶段;货物从重心处于货舱末端面到离机末状态为BC阶段。根据货物的受力关系和运动状态如图1和图2所示,构建空投货物离机运动轨迹模型。

1) AB段

$$\text{牵引力: } F = \frac{k}{2} \rho (v_0 - \frac{ds_{x1}}{dt})^2$$

$$\text{受力关系: } m \frac{d^2 s_{x1}}{dt^2} = F - f$$

$$\text{摩擦力: } f = \mu_0 N$$

$$\text{Y方向上: } S_{y1} = 0$$

整理后得:

$$m \left(\frac{d^2 s_{x1}}{dt^2} \right) = \frac{k}{2} \rho \left[v_0 - \left(\frac{ds_{x1}}{dt} \right) \right]^2 - \mu_0 N \quad (2)$$

2) BC段

$$\text{牵引力: } F = \frac{k}{2} \rho (v_0 - \frac{ds_{x2}}{dt})^2$$

在X方向上:

$$m \frac{d^2 s_{x2}}{dt^2} = F + N_1 \sin \theta - f \cos \theta$$

在Y方向上:

$$m \frac{d^2 s_{y2}}{dt^2} = G - N_1 \cos \theta - f \sin \theta$$

绕Z轴旋转:

$$I_z \frac{d^2 \theta}{dt^2} = f \times l_{AQ} + N_1 \times l_{PA} - F \times l_1$$

$$\text{摩擦力: } f = \mu_1 N_1$$

通过重心Q点的转动惯量:

$$I_z = \frac{m}{12} (H^2 + L^2) - md^2$$

力臂:

$$l_1 = l_{BC} \cos \theta + \frac{L}{2} \sin \theta$$

$$l_{PA} \tan \theta + \frac{s_{x2} - a_1 - \frac{l_{PA}}{\cos \theta}}{\sin \theta} = \frac{H}{2}$$

约束条件:空投货物与地板接触点

P在支撑力方向上速度为零,即:

$$\tan \theta = \frac{\frac{H}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) + s_{y2}}{s_{x2} - a_1}$$

式中: S_{x1} 、 S_{y1} 分别为AB阶段某一时刻X方向和Y方向的运动位移; S_{x2} 、 S_{y2} 分别为BC阶段某一时刻X方向和Y方向的运动位移; 旋转角 θ ; 货物对其重心轴(Z方向)的转动惯量 I_z ; l_{AQ} 为AQ两点的距离; l_{PA} 为PA两点的距离; l_1 为货物重心Q点到牵引力方向上的垂直距离; l_{BC} 为BC两点的距离; N 为货物对货舱地板的压力; N_1 为货物对地板末端P点的压力; d 为重心偏移量; μ_0 为货物与地板的摩擦系数; μ_1 为货物与P点摩擦系数。

空投货物离机运动初始状态条件:

$$t=0; \quad s_{x1}=0; \quad \frac{ds_{x1}}{dt} = v_{x0}$$

空投货物处于B点的状态条件:

$$s_{x2} = s_{x1}; \quad \frac{ds_{x1}}{dt} = \frac{ds_{x2}}{dt}; \quad s_{x1} = a_1$$

空投货物离机运动末状态条件:

$$l_{PA} = 1 - a_1$$

根据空投货物离机时的状态条件

中 $l_{PA} = 1 - a_1$, 可求解出货物离机姿态角 θ 。

2 空投货物离机运动轨迹模型实例分析

当某一空投货物的重量为8t, 尺寸(长×宽×高)为8m×3m×2m, 空投海拔高度 $h=1000\text{m}$; 机速 $v_0=80\text{m/s}$; 牵引点到货物中心面 $l_{BC}=0.9\text{m}$; 货物离机初速度 $v_{x0}=4\text{m/s}$; 牵引力偏摆夹角为0, 牵引伞特征系数 $k=5.58$, 空气密度 $\rho=1.100\text{kg/m}^3$, 货物与地板的摩擦系数 $\mu_0=0.08$; 货物与P点摩擦系数 $\mu=0.08$ 。

对于重力加速度, 引用文献[2]中重力加速度随海拔高度的变化函数:

$$g = g_0 \left(1 - \frac{2h}{R} \right) \quad (3)$$

式中: g_0 为海平面处的重力加速度, $g_0=9.82\text{m/s}^2$; R 为地球半径, $R=6370000\text{m}$; g 为重力加速度; h 为海拔高度。

通过(3)式可求得海拔高度为1000m时的重力加速度 $g=9.817\text{m/s}^2$ 。

根据图1中坐标系所示, 由于货物在离机过程中Z方向受到导轨限制, 货物重心位置在Z方向上变化对离机姿态角影响甚微, 可以忽略不计, 因此, 这里只考虑货物重心在X方向和Y方向上的变化。设定货物重心在几何中心沿X方向的偏差范围为(-2, 2); 在几何中心沿Y方向的偏差范围为(-0.6, 0.6); 当

$b_1 = \frac{1}{2}H$ 时, 货物重心在X方向上 a_1 以0.5m

递增变化; 当 $a_1 = \frac{1}{2}L$ 时, 货物重心在Y方

向上 b_1 以0.2m递增变化。根据上述货物离机运动轨迹模型, 利用MATLAB软件求解出货物重心位置沿X方向和Y方向上变化过程中对应的离机姿态角如表1所示。

在空投集装货物质量不变的条件下, 根据不同重心位置对应离机姿态角的数据, 拟合货物离机姿态角随重心位

表1 空投货物重心位置变化对应的离机姿态角

重心位置在几何中心沿X方向上偏移 Δ_1 (m)	离机姿态角 θ_1 (°)	重心位置在几何中心沿Y方向上偏移 Δ_2 (m)	离机姿态角 θ_2 (°)
-2.0	5.887	-0.6	19.181
-1.5	9.304	-0.4	19.393
-1.0	12.881	-0.2	19.605
-0.5	16.418	0	19.811
0	19.811	0.2	20.024
0.5	23.033	0.4	20.230
1.0	26.066	0.6	20.442
1.5	28.926	×	×
2.0	31.638	×	×

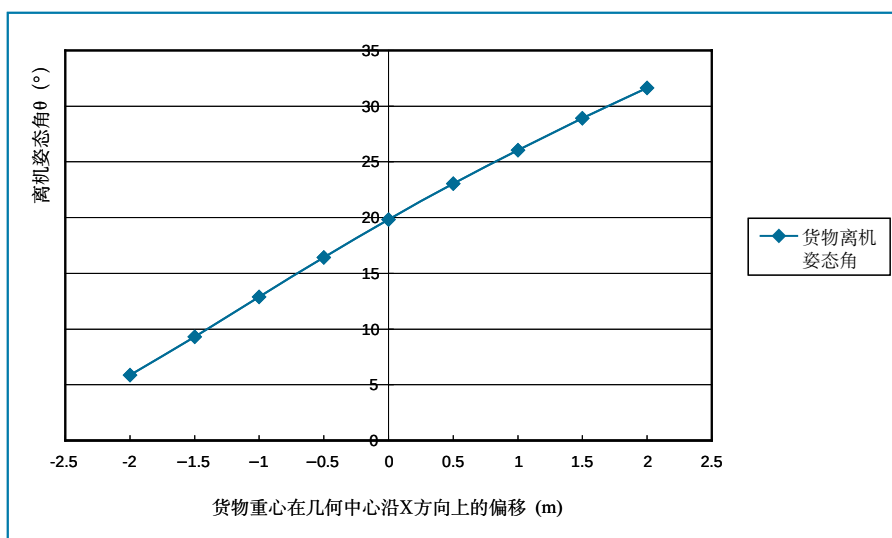


图3 货物离机姿态角随重心在几何中心沿X方向偏移的变化曲线

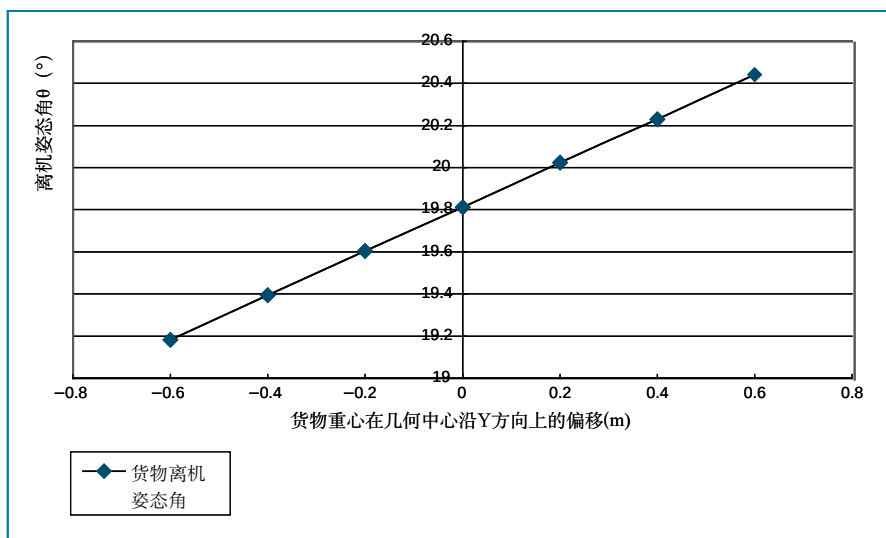


图4 货物离机姿态角随重心在几何中心沿Y方向偏移的变化曲线

置在几何中心沿X方向和Y方向上偏移的变化曲线(如图3、图4所示)。从拟合的曲线图可以看出:货物离机姿态角随着重心位置沿X方向增大而增大,其主要原因是:在相同的外界条件下,当货物重心位置沿X方向增大过程中,货物开始旋转到完全离机所用时间增大,货物离机姿态角因而增大;货物离机姿态角随着重心位置沿Y方向增大而增大(货物重心越低,离机姿态角越大),其主要原因是:在相同的外界条件下,当货物重心沿Y方向增大过程中,其重心位置降低,牵引力的旋转力臂减小,牵引力提供的逆时针旋转力矩减小,导致离机姿态角随着重心位置沿Y方向增大而增大。而货物重心位置在几何中心沿X方向上偏移对离机姿态角影响比较明显。

3 结束语

本文通过对货物不同重心位置而引起的离机姿态进行分析,建立了货物离机运动轨迹的计算模型,并引入实例对其进行计算分析。根据计算数据拟合出货物离机姿态角随重心位置变化的曲线。实现货物重心位置变化对离机姿态角影响效果的可视化,根据合理离机姿态角范围,以便明确合理的货物重心位置范围,为重装空投安全提供了参考。

AST

参考文献

- [1] 宋旭民,程文科,彭勇,秦子增.先进的精确空投系统[J].航天返回与遥感,2004,25(1):6-10.
- [2] 覃铭,韦文山.重力加速度的分布[J].广西民族学院学报,2002,8(2):52-53.

作者简介

张恒铭,硕士,工程师,主要从事空投空降研究工作。