

牵引比对货物牵引空投运动状态准确性的影响分析

Analysis on the Influences of Traction Ratio on Veracity of airdrop State

张恒铭 惠笃义 / 中航工业一飞院

摘要: 为了明确牵引比参数对空投货物运动状态准确性的影响,采用牵引比参数的条件下,将牵引力与实际牵引伞提供的牵引力进行对比,并建立货物牵引空投运动轨迹模型。通过实例计算出两种情况下货物运动状态,根据计算数据拟合出货物运动状态随时间的变化对比曲线,分析了牵引比参数对货物牵引空投运动状态准确性影响程度,为精确空投中确定货物运动准确状态提供了帮助。

Abstract: For the sake of confirming the influences of the traction ratio on veracity of cargo state during airdrop, here using the traction ratio, comparing the traction and actual circs, and establishing model of the cargo on airdrop. The article uses example to work out the state of locomotion in both of the circs, and simulates contrastive curves to analyze the influences of the traction ratio on veracity of cargo state, theses offer help of confirming the veracity of cargo state during airdrop.

关键词: 牵引比; 空投准确性; 运动轨迹

Keywords: traction ratio; veracity of airdrop; contrail of locomotion

0 引言

空投是部队投送装备物资补给及部署手段。传统空投方式易受气候环境的影响,而精确空投系统可快速、精确、秘密、低成本以及低损耗地将装备物资投放到指定的区域^[1]。货物空投过程按空间分一般分为空投货物舱内运动和空投货物舱外运动两个阶段。这里主要考虑在货物牵引空投的情况下,由于在货物离机后,牵引伞不再牵引货物,而是拉开降落伞包。因此,货物牵引空投过程主要是从货物牵引开始运动到完全离机后牵引伞失去牵引货物作用为止。影响货物牵引空投运动状态准确性的主要因素有牵引比、飞机横滚角、俯仰角、牵引浮动角等。这里以牵引比为例,由于牵引伞在牵

引货物过程中提供的牵引力为变化值,而牵引比参数一般选为定值(牵引比一般为在一定的空气流动速度条件下牵引伞完全张开时的牵引力与牵引货物重力的比值),造成与真实的货物出舱运动轨迹存在较大误差而影响货物牵引空投运动状态准确性^[1]。

为了明确牵引比参数对空投货物运动状态准确性的影响,假设在相同的

外界条件下,对货物运动状态准确性的影响进行实例分析。

1 货物牵引空投运动轨迹建模

货物牵引空投主要是依靠牵引伞的拉力,将货物牵引出舱,实现货物空投任务,如图1所示。

在货物牵引空投运动过程中,当货物开锁后开始运动时,此时为货物牵引

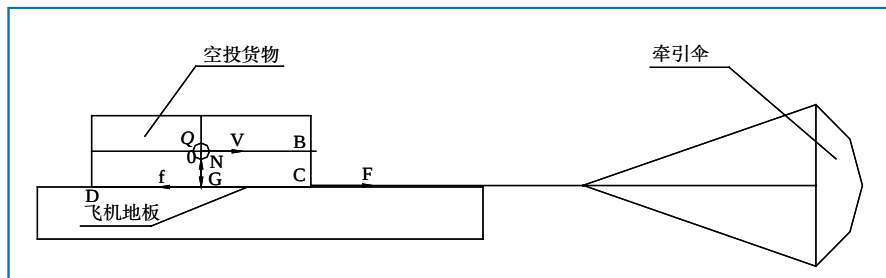


图1 货物牵引空投运动示意图

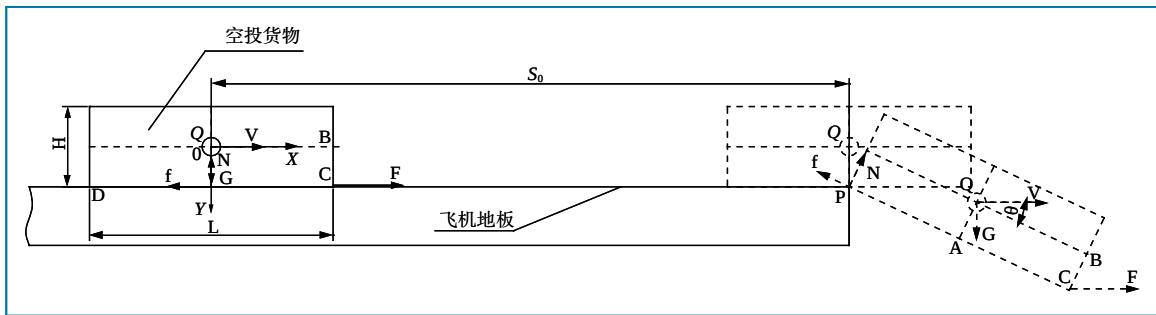


图2 货物牵引空投运动过程

空投运动的初始状态;当货物离开飞机地板末端时,此时为货物牵引空投运动过程中的末状态如图2所示。货物尺寸(长×宽×高)为: $L \times b \times H$,设飞机地板坐标系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,货物牵引空投初始状态时货物重心Q点与坐标系原点重合。

当相对牵引伞的空气运动速度为 v_0 时,牵引力随时间的变化曲线如图3所示,A点为牵引伞开始充气状态,B点为开锁时的牵引力状态,C点为牵引伞完全张开时的牵引力状态,D点为空投货物舱内运动末状态(货物重心处于飞机地板末端)时的牵引力状态,E点为货物离开飞机地板时的牵引力状态,BC段为空投货物开锁后到牵引伞完全张开的牵引力变化过程,CD段为牵引伞完全张开到空投货物舱内运动末状态的牵引力变化过程,DE为货物舱内

运动末状态到离开飞机地板的牵引力变化过程,BE段为货物牵引空投运动过程中牵引力的变化过程。在这里主要考虑货物从开锁后开始运动到离开飞机地板(BE段)。

由于牵引货物获取的开锁初始牵引力到牵引伞完全张开时的牵引力所用时间非常短暂,牵引力在这个区间可以近似为线性关系,即:

BC段的牵引力:

$$F = F_0 + \frac{(F_1 - F_0)(t - t_1)}{t_2 - t_1}$$

CD段的牵引力:

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

DE段的牵引力:

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

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CE阶段的空投货物运动位移, F_0 为开锁力, F_1 为货物最大牵引力。

根据牵引比设定,可计算出货物牵引力 $F = \lambda mg$, λ 为牵引比。

假设货物重心位置在货物的几何中心Q处,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。根据货物的受力关系和运动状态如图2所示,构建货物牵引运动轨

迹模型。

1) BC段

真实状态下的牵引力:

$$F = F_0 + \frac{(F_1 - F_0)(t - t_1)}{t_2 - t_1}$$

根据牵引比设定推导出的牵引力:

$$F = \lambda mg$$

受力关系:

$$m \frac{d^2 s_{x1}}{dt^2} = F - f$$

摩擦力: $f = \mu_0 N$

Y方向上: $s_{y1} = 0$

2) CD段

真实状态下的牵引力:

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

根据牵引比设定推导出的牵引力:

$$F = \lambda mg$$

受力关系: $m \frac{d^2 s_{x2}}{dt^2} = F - f$

摩擦力: $f = \mu_0 N$

Y方向上: $s_{y2} = 0$

3) DE段

真实状态下的牵引力:

$$F = \frac{k}{2} \rho (v_0 - \frac{ds_{x3}}{dt})^2$$

根据牵引比设定推导出的牵引力:

$$F = \lambda mg$$

在X方向上:

$$m \frac{d^2 s_{x3}}{dt^2} = F + N_1 \sin \theta - f \cos \theta$$

在Y方向上:

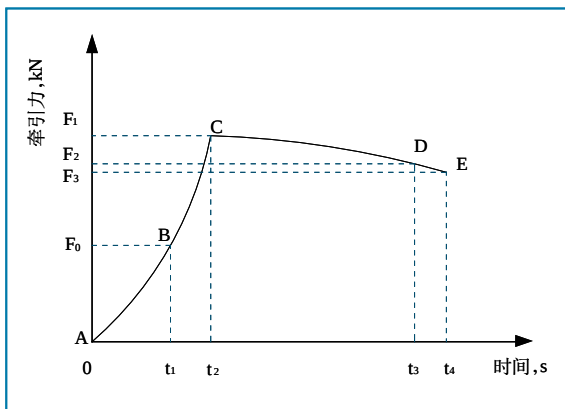


图3 牵引力随时间的变化曲线

$$m \frac{d^2 s_{y3}}{dt^2} = G - N_1 \cos \theta - f \sin \theta$$

绕Z轴旋转:

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

摩擦力: $f = \mu_1 N_1$

转动惯量:

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

力臂:

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

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

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:

$$\tan \theta = \frac{\frac{H}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) + s_{y3}}{s_{x3} - s_0}$$

式中, s_{x1} 、 s_{y1} 分别为BC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CD阶段某一时刻X方向和Y方向的运动位移; s_{x3} 、 s_{y3} 分别为DE阶段某一时刻X方向和Y方向的运动位移; s_0 为初始状态条件下货物重心到货舱末端的距离;俯仰角 θ ;货物对其重心轴(Z轴)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_1 为货物对地板末端P点的压力; 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。

空投货物舱内运动过程的初始状态条件: $t=0$; $s_{x1}=0$; $\frac{ds_{x1}}{dt}=0$ 。

当牵引伞完全张开时,即处于C点的状态条件:

$$t = t_2 - t_1; s_{x2} = s_{x1}; \frac{ds_{x1}}{dt} = \frac{ds_{x2}}{dt};$$

$$F_1 = \frac{k}{2} \rho (v_0 - \frac{ds_{x1}}{dt})^2$$

空投货物舱内运动末状态条件:

$$s_{x2} = s_0; t = t_{31}; l_{PA} = 0; N = G; l_1 = l_{BC}; \frac{d^2 s_{y3}}{dt^2} = 0;$$

$$\frac{ds_{y3}}{dt} = 0; \frac{d^2 \theta}{dt^2} = 0; \frac{d\theta}{dt} = 0; \frac{d^2 s_{x3}}{dt^2} = \frac{F - \mu_0 G}{m};$$

$$\frac{ds_{x3}}{dt} = \frac{ds_{x2}}{dt}。t_{31} \text{ 为从货物舱内运动初始}$$

状态到舱内运动末状态所用时间。根据空投货物舱内运动末状态条件中 $s_{x2} = s_0$, 可求解出舱内运动所用时间 t_{31} 。

货物牵引空投离机时的状态条件:

$$l_{PA} = \frac{L}{2}, t = t_{41}, t_{41} \text{ 为从货物舱内运动初始}$$

状态到货物离开飞机地板所用时间。根据货物牵引空投离机时的状态条件中 $l_{PA} = \frac{L}{2}$, 可求解出出舱所用时间 t_{41} 。当 t 在 $0 \sim t_{41}$ 中取值时, 根据货物牵引空投运

动轨迹模型, 可求解出此时货物的运动状态。

2 货物牵引空投运动轨迹模型实例分析

牵引伞在空气流动速度为 v_0 时的开伞时间由牵引伞自身特性决定, 在这里设牵引伞在空气流动速度为 $v_0 = 80 \text{ m/s}$ 时, 牵引伞通过牵引力开锁到牵引伞完全张开所用时间 $t_{21} = 0.5 \text{ s}$;

假设:空投的海拔高度为 $h = 1000 \text{ m}$, 飞机速度 $v_0 = 80 \text{ m/s}$, 空投货物重量 $m = 8 \text{ t}$, 尺寸(长×宽×高)为: $8 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 牵引比 $\lambda = 0.25$, 牵引点到货物中心面 $l_{BC} = 0.9 \text{ m}$, 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 $\mu_0 = 0.1$, 货物与P点摩擦系数为 $\mu_1 = 0.08$, 初始状态条件下货物重心到货舱末端的距离 $s_0 = 10 \text{ m}$, 开

表1 两种牵引条件下货物牵引空投运动状态

时间 t, s	真实牵引力变化状态条件下		采用牵引比参数的恒定牵引力状态条件下	
	X方向位移 x_0, m	Y方向位移 y_0, m	X方向位移 x_1, m	Y方向位移 y_1, m
0	0	0	0	0
0.4	0.0458	0	0.1178	0
0.5	0.08185	0	0.1841	0
0.8	0.2746	0	0.4714	0
1.2	0.7285	0	1.0606	0
1.6	1.404	0	1.8854	0
2	2.2972	0	2.946	0
2.4	3.4044	0	4.2422	0
2.8	4.7219	0	5.7742	0
3.2	6.246	0	7.5418	0
3.6	7.973	0	9.545	0
3.6848	8.3809	0	10	0
4.0	9.8991	0	11.8338	0.1488
4.020	10	0	11.963	0.1833
4.3205	11.6233	0.1165	14.112	1.3019
4.4	12.1087	0.259	×	×
4.6895	14.097	1.4629	×	×

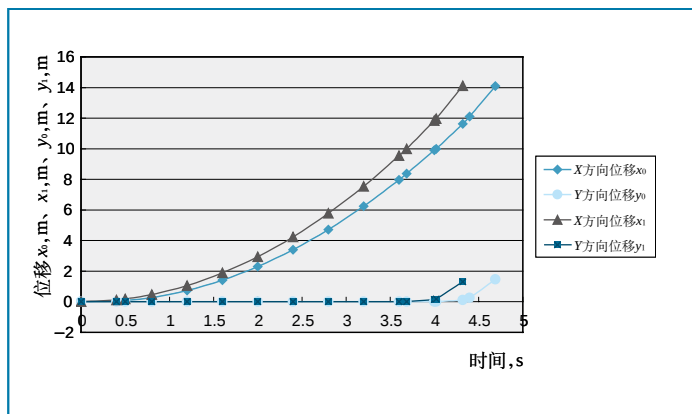


图4 两种条件下货物运动状态随时间的变化曲线

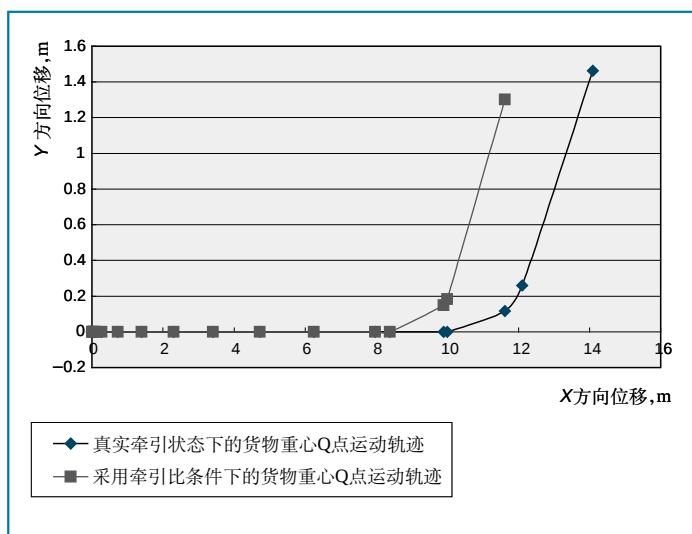


图5 两种牵引条件下货物重心Q点牵引空投运动轨迹曲线

锁牵引力 $F_0=9.82\text{kN}$ 。

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:

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

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。

通过式(1)可求得海拔高度为1000m时的重力加速度 $g=9.817\text{m/s}^2$ 。

设定 t 以0.4s递增,根据上述货物牵引空投运动轨迹模型,利用MATLAB软件求解出两种牵引条件下每个时刻的货物运动状态如表1所示。

根据表1中两种牵引条件下货物运动状态数据,拟合出 X

方向位移、 Y 方向位移随时间的变化对比曲线如图4所示。从图4可以看出, X 方向位移 x_0 和位移 x_1 都是随时间的变化而递增,在刚开始0~0.5s过程中,位移 x_0 和位移 x_1 两条曲线没有明显的差异;但是在0.5s以后两条曲线出现明显的差异;这是由于采用牵引比方式下牵引力为恒定值,而真实状态下牵引力先快增大然后缓慢减小而引起的。在两种条件下,空投货物离机所用时间差为0.369s,离机时货物水平方向产生的误差(在地面坐标系下)为29.52m。 Y 方向位移 y_1 和位移 y_0 在0~3.6848s过程中无位移,这是由于货物处于舱内水平运动,位移 y_1 比位移 y_0 快0.3352s进入货物离机旋转状态而产生位移;这是由于采用牵引比方式与真实状态存在差异而引起的。在离机时, Y 方向上的位移误差只有0.161m,影响较小。

根据两种牵引条件下货物运动状态数据中 X 方向位移和 Y 方向位移的运动数据,拟合出两种牵引条件下空投货物重心 Q 点运动轨迹变化曲线图(如图5所示),由图5可以清楚地看出:两种牵引条件下空投货物在出舱过程中重心 Q 点随时间的变化轨迹曲线之间的差异。

3 结束语

通过两种牵引条件下对货物牵引空投的运动轨迹进行分析,建立了货物牵引空投运动轨迹的计算模型。引入实例对货物运动时间以及相应的运动状态进行计算,并根据两种牵引条件下货物牵引空投运动状态的计算数据,拟合出 X 方向位移、 Y 方向位移随时间的变化对比曲线,分析了两条曲线之间差异的原因,明确了牵引比参数对货物牵引空投运动状态准确性影响程度,为精确空投中确定货物运动准确状态提供了帮助。 **AST**

参考文献

- [1] 宋旭民,程文科,彭勇,等.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,工程师,硕士,主要从事空投空降研究工作。