

doi: 10.7690/bgzdh.2013.08.006

超低空空投故障状态下模糊飞行控制

戴正升, 陆宇平, 杨雨

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 针对运输机超低空空投时的飞行安全问题, 对空投时飞机的纵向姿态控制律进行研究。通过选取适当的坐标系, 从牛顿矢量力学出发, 推导了空投过程中货物在机舱内移动时飞机纵向运动的数学模型, 分析了货物的运动方程并考虑了货物因机构故障被卡死的意外情况; 并基于智能控制理论, 设计了模糊控制律, 对空投过程进行了无控条件和模糊控制下的仿真。仿真结果表明: 该模糊控制器能够有效抑制货物出舱出现故障时对运输机姿态的影响, 具有良好的控制效果。

关键词: 超低空空投; 飞行力学; 飞行控制; 模糊控制; 出舱故障

中图分类号: TP273⁺.4 **文献标志码:** A

Fuzzy Flight Control for Ultra-Low Altitude Airdrop in Fault State

Dai Zhengsheng, Lu Yuping, Yang Yu

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

Abstract: The flight control law of longitudinal attitude is researched for flight safety of the transport airdropping at ultra-low altitude. Based on Newtonian mechanics, the transport longitudinal mathematical model of heavy cargo airdrop system is established by selecting useful coordinate system. Cargo extraction dynamics model is built, and investigated a kind of important accident case, that of cargo be stuck at guide rail. The fuzzy controller is designed based on intelligent control theory and computer simulation is made under non-control condition and fuzzy control condition. Simulation results show that the fuzzy controller is effective, that is, the impact of cargo extraction fault is effectively restrained.

Key words: ultra-low altitude airdrop; flight mechanics; flight control; fuzzy control; cargo extraction fault

0 引言

重装空投是利用降落伞等气动力减速器将重型武器装备物资投送到指定地点的一种技术^[1], 主要用于重武器运送、后勤补给及抢险救灾等方面^[2]。超低空空投时, 重装货物出舱过程及出舱瞬间会对飞机姿态产生很大影响^[3], 控制不当可能会使飞机触地; 因此, 须采取控制策略以保证运输机安全。

国内外对重装空投系统的研究多针对货物运动及着陆时冲击载荷方面^[4-6]。文献[7-10]研究了货物舱内运动对运输机的影响, 其中文献[10]基于滑模变结构理论设计了鲁棒性较强的飞行控制律, 较好地解决了空投前后运输机的特性突变, 而针对空投故障情况的相关研究较少。

笔者建立了飞机及货物的纵向运动方程, 并分析不同阶段货物与飞机间的相互作用力以及开伞后货物沿滑轨滑行至某一位置时因机械故障被卡死的情况。为了削弱其对飞机的影响, 笔者基于模糊控制理论设计了模糊控制律, 并进行了数值仿真。

1 坐标系定义

为了便于研究飞机与货物的运动特性, 建立以下坐标系:

1) 地面坐标系 $S_g - O_g x_g y_g z_g$ 。

坐标原点选在地面上某一定点, x_g 轴在水平面内并指向某一方向, z_g 轴垂直于地面并指向地心, y_g 轴和 x_g 轴、 z_g 轴构成右手系。

2) 机体坐标系 $S_b - O_b x_b y_b z_b$ 。

坐标原点选在飞机质心处, 坐标系与飞机固连, x_b 轴在机体对称平面内且与飞机轴线平行, 指向机头, y_b 轴垂直于飞机对称平面, 并指向机身右方, z_b 轴在飞机对称平面内, 垂直 x_b 轴指向下方。

3) 气流坐标系 $S_a - O_a x_a y_a z_a$ 。

坐标原点在飞机质心处, 坐标系与飞机固连, x_a 轴指向空速方向, z_a 轴垂直 x_a 轴, 在飞机对称平面内指向机身下方, y_a 轴与 x_a 、 z_a 轴构成右手系。

坐标系之间的方位关系图及坐标系间的转换关系详见参考文献[11]。

收稿日期: 2013-02-18; 修回日期: 2013-03-13

作者简介: 戴正升(1987—), 男, 安徽人, 在读硕士, 从事飞行器控制与仿真研究。

2 货物出舱飞机运动建模

设 i 、 j 、 k 分别为机体坐标系的 x_b 轴、 y_b 轴、 z_b 轴的单位向量，笔者所用的主要符号说明如表 1 所示，其他符号定义详见参考文献[11]。

表 1 主要符号说明

符号	物理意义	符号	物理意义
m_1	运输机质量	P	发动机推力
m_2	货物质量	L	运输机升力
g	重力加速度	D	运输机阻力
h	飞行高度	Y	运输机侧力
μ	摩擦系数	V	运输机速度
l	货舱导轨长度	V_2	货物速度
α	迎角	p	滚转角速度
β	侧滑角	q	俯仰角速度
θ	俯仰角	r	偏航角速度
ϕ	滚转角	T	牵引伞拉力
δ_T	油门偏度	δ_e	升降舵偏角
r	货物质心相对飞机质心的位置矢量	f	货物对飞机的作用力

Ω 为飞机 3 个轴向角速度，在机体坐标系中分解为 $\Omega = [p \ q \ r]^T$ ， V 在机体坐标系中分解为 $V = [u \ v \ w]^T$

空投开始前，调整运输机水平无侧滑飞行，此时运输机滚转角，侧滑角均为 0。货物在货舱内对称放置，因此货物运动对飞机横侧向影响较小。假设货舱与机体坐标系的 x_b 轴平行，则货物质心相对飞机质心的位置矢量在机体坐标系分解为 $r = ir_1 + j0 + kr_3$ 。假设发动机推力偏置角为 0，即 $P = iP$ 。

2.1 飞机运动方程

飞机进行超低空空投时所受的外力有飞机自身的重力 G_1 、总的空气动力 R 、发动机推力 P 和货物对飞机的作用力 f ，即外合力 F 可用下式表达：

$$F = G_1 + R + P + f \quad (1)$$

在地面坐标系，由牛顿第二定律可知外合力可由下式表示：

$$F = \frac{d}{dt}(m_1 V) = m_1 \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

式中：

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= 1_v \frac{\delta_v}{\delta_i} + \Omega \times V = \\ &i(\dot{u} + wq - vr) + j(\dot{v} + ur - wp) + k(\dot{w} + vp - uq) \end{aligned}$$

详细推导参见文献[10]。

在水平无侧滑条件下，将 F 、 G_1 、 R 、 P 、 f 分别向机体坐标系分解为：

$$\begin{cases} F = [m_1(\dot{u} + wq) \ m_1\dot{v} \ m_1(\dot{w} - uq)]_b^T \\ G_1 = [-m_1g \sin\theta \ 0 \ m_1g \cos\theta]_b^T \\ R = [L \sin\alpha - D \cos\alpha \ Y \ -L \cos\alpha - D \sin\alpha]_b^T \\ P = [P \ 0 \ 0]_b^T \\ f = [f_1 \ 0 \ f_3]_b^T \end{cases} \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (1)，整理可得：

$$\begin{cases} \dot{u} = -wq - g \sin\theta + (P + L \sin\alpha - D \cos\alpha + f_1)/m_1 \\ \dot{v} = Y/m_1 \\ \dot{w} = uq + g \cos\theta + (-L \cos\alpha - D \sin\alpha + f_3)/m_1 \end{cases} \quad (4)$$

利用气流坐标轴系与机体坐标轴系之间转换关系^[10]，可得飞机速度 V 与其在机体轴分量关系为：

$$V = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}_b = \begin{bmatrix} V \cos\alpha \cos\beta \\ V \sin\beta \\ V \sin\alpha \cos\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

在水平无侧滑飞行条件下，可得到：

$$\begin{cases} u = V \cos\alpha \\ v = 0 \\ w = V \sin\alpha \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 两边对时间微分，可得到：

$$\begin{cases} \dot{u} = \dot{V} \cos\alpha - \dot{\alpha} V \sin\alpha \\ \dot{v} = 0 \\ \dot{w} = \dot{V} \sin\alpha - \dot{\alpha} V \cos\alpha \end{cases} \quad (7)$$

由式 (7)，进一步，可得：

$$\begin{cases} \dot{u} \cos\alpha + \dot{w} \sin\alpha = \dot{V} \\ -\dot{u} \sin\alpha + \dot{w} \cos\alpha = V \dot{\alpha} \end{cases} \quad (8)$$

将式 (4) 代入式 (8)，整理得到：

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{1}{m_1} [(P + f_1) \cos\alpha + f_3 \sin\alpha - D] - g \sin(\theta - \alpha) \\ \dot{\alpha} = q - \frac{1}{m_1 V} [(P + f_1) \sin\alpha + f_3 \cos\alpha + L] - \frac{g \cos(\theta - \alpha)}{V} \end{cases} \quad (9)$$

在地面坐标系中，飞机在外合力矩 ΣM 作用下的角运动方程为：

$$\Sigma M = \frac{d}{dt}(L) \quad (10)$$

式中， L 为动量矩。

在机体坐标系下，动量矩 L 可以表示如下：

$$L = [L_x \ L_y \ L_z]_b^T = [pI_x - rI_z \ qI_y \ rI_z - pI_x]_b^T \quad (11)$$

式中， I_x, I_y, I_z, I_{xz} 为飞机绕相应坐标轴的转动惯量

和惯性积, 详细推导参见文献[11]。

货物出舱过程中, 外力对飞机质心的力矩为: 空气动力矩 ΣM_1 及货物对飞机质心的力矩 ΣM_2 , 将其分别在机体轴系下分解, 可得到:

$$\begin{cases} \Sigma M_1 = [\bar{L} \quad M \quad N]^T \\ \Sigma M_2 = r \times f = [0 \quad f_1 r_3 - f_3 r_1 \quad 0]^T \end{cases} \quad (12)$$

其中: \bar{L} 、 M 、 N 分别为气动力矩在机体坐标系上的分量, 所以有:

$$\Sigma M = \Sigma M_1 + \Sigma M_2 = [\bar{L} \quad M + f_1 r_3 - f_3 r_1 \quad N]^T \quad (13)$$

将式 (11) 和式 (13) 代入式 (10), 整理可得:

$$\dot{q} = (M + f_1 r_3 - f_3 r_1) / I_y \quad (14)$$

利用机体坐标轴系和地面坐标轴系之间的转换关系^[11], 可以得到:

$$\dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \quad (15)$$

利用水平无侧滑飞行条件, 由式 (15), 可得:

$$\dot{\theta} = q \quad (16)$$

由地面坐标轴系与气流坐标轴系之间的转换关系^[10], 可以得到:

$$\dot{h} = V \sin(\theta - \alpha) \quad (17)$$

整理式 (9), (14), (16) 和 (17), 得到空投时货物舱内移动过程的飞机纵向运动模型为:

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{1}{m_1} [(P + f_1) \cos \alpha + f_3 \sin \alpha - D] - g \sin(\theta - \alpha) \\ \dot{\alpha} = q - \frac{1}{m_1 V} [(P + f_1) \sin \alpha + f_3 \cos \alpha + L] + \frac{g \cos(\theta - \alpha)}{V} \\ \dot{q} = (M + f_1 r_3 - f_3 r_1) / I_y \\ \dot{h} = V \sin(\theta - \alpha) \end{cases} \quad (18)$$

其中状态向量为 $x^T = [V \quad \alpha \quad q \quad \theta \quad h]$, 控制输入向量为 $u^T = [\delta_T \quad \delta_e]$ 。

2.2 货物动力学方程

在地面坐标系下, 根据牛顿力学第二定律可得货物质心动力学矢量方程如下:

$$m_2 \frac{dV_2}{dt} = G_2 - f + T \quad (19)$$

上式中, 货物质心绝对速度可以由下式计算得到:

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{dR_2}{dt} = \frac{d(R_1 + r)}{dt} = \frac{dR_1}{dt} + \frac{dr}{dt} = V + \frac{dr}{dt} = \\ &V + r_1 \frac{di}{dt} + i \frac{dr_1}{dt} + r_3 \frac{dk}{dt} + k \frac{dr_3}{dt} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: R_2 为货物相对地面坐标系位置矢量; R_1 为飞机相对地面坐标系位置矢量。

1) 货物静止时。

飞机在进行空投之前, 货物静止在货舱中, 货物受到自身的重力, 还受到了飞机对货物的反作用力 $-f$, 此时牵引伞拉力为 0, r_1 和 r_3 是常量。

2) 货物滑动时。

货物滑动时, 货物受到牵引伞的拉力, 且货物在机体轴 x_b 上的位移 r_1 时刻变化, 并且其导数 $dr_1/dt \neq 0$; 由于假设货舱导轨与机体坐标系的 x_b 轴平行, 所以货物在 z_b 上的位移 r_3 仍为已知, 且其导数 $dr_3/dt = 0$ 。此时, $-f_3$ 为飞机对货物的支持力, $-f_1$ 为滑动摩擦力, 所以有 $f_1 = \mu f_3$ 。

3) 货物离机。

当货物脱离飞机时, 货物与飞机之间不再相互作用, 故此时有 $f = 0$ 。

当货物沿滑轨滑行至某一位置因机构故障被卡死时, 货物相对飞机, 其位置是固定的, 所以货物在机体轴 x_b 上的位移 r_1 不再变化, 即 $dr_1/dt = 0$ 。

由式 (19) 和 (20) 解得 f_1 和 f_3 如下:

$$\begin{cases} f_1 = \frac{1}{(m_1 + m_2)^2 I_y + m_1 m_2 (m_1 + m_2) (r_1^2 + r_3^2)} \cdot \\ [-m_1 m_2 (m_1 + m_2) r_3 M + m_1 m_2 (m_1 + m_2) r_1 q^2 I_y + \\ m_1^2 m_2^2 r_1 (r_1^2 q^2 + r_3^2 q^2) + (m_1 + m_2) (m_1 T_x - m_2 F_x) I_y - \\ m_1 m_2^2 r_1 (r_1 F_x + r_3 F_z) + m_1^2 m_2 r_1 (r_1 T_x + r_3 T_z)] \\ f_3 = \frac{1}{(m_1 + m_2)^2 I_y + m_1 m_2 (m_1 + m_2) (r_1^2 + r_3^2)} \cdot \\ [m_1 m_2 (m_1 + m_2) r_1 M + m_1 m_2 (m_1 + m_2) r_3 q^2 I_y + \\ m_1^2 m_2^2 r_3 (r_1^2 q^2 + r_3^2 q^2) + (m_1 + m_2) (m_1 T_x - m_2 F_x) I_y - \\ m_1 m_2^2 r_3 (r_1 F_x + r_3 F_z) + m_1^2 m_2 r_3 (r_1 T_x + r_3 T_z)] \end{cases} \quad (21)$$

上式中, T_x 和 T_z 分别是牵引伞拉力沿机体坐标系 x_b 轴和 z_b 轴的分量。

选取货物沿机体坐标系 x_b 轴的位移和速度作为状态变量, 分别用 x_1 、 x_2 表示货物的位移和速度, 可得到货物在货舱内运动的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{r}_1 \end{cases} \quad (22)$$

初始值选取为 $x_1 = 0$, $x_2 = 0$ 。

3 姿态保持控制律设计

3.1 模糊控制器设计

一般将模糊控制器的输入变量个数称为模糊控制器的维数。理论上, 维数越高, 控制精细度越

高，但模糊规则越复杂，越难以实现；因此，目前广泛采用的是二维模糊控制器。

1) 取误差 E 的论域为 $\{-3,-2,-1,0,1,2,3\}$ ，误差变化 E_c 的论域为 $\{-0.3,-0.2,-0.1,0,0.1,0.2,0.3\}$ ，控制量 U 的论域为 $\{-3,-2,-1,0,1,2,3\}$ ，语言变量值均为 $\{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB\}$ 。控制器的输入输出信号采用三角形、全交叠、均匀分布的隶属函数， E 、 E_c 和 U 的隶属函数如图 1 所示。

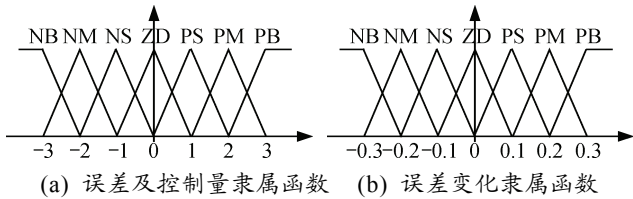


图 1 E 、 E_c 和 U 的隶属函数

2) 模糊规则：模糊控制规则如表 2 所示。

表 2 模糊控制规则

U	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
E_c	ZO	PM	PM	PS	ZO	NM	NM
PS	PM	PS	PS	NS	NS	NM	NB
PM	PS	PS	ZO	NM	NM	NB	NB
PB	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB

3) 去模糊化处理：模糊决策采用 Mamdani 决策法并采用重心法解模糊。

3.2 自动油门控制

空投过程中，速度保持系统采用 PD 控制，其控制律为 $\delta_T = (k_p + k_D s)\Delta V$ 。发动机的特性环节为： $G_T(s) = 1/(Ts + 1)$ 。

3.3 系统结构

使用模糊控制器设计纵向姿态保持控制器，系统结构图如图 2 所示。

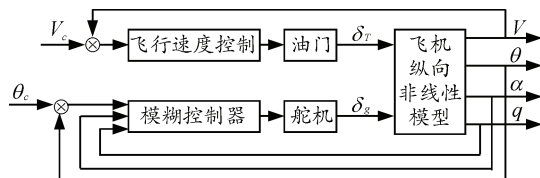


图 2 系统结构框图

笔者的模糊控制器的输入误差量为 θ 和 α ，输入的误差变化为 q 和 $\dot{\alpha}$ 。为了减少模糊控制器的输入变量个数，使模糊控制规则易于实现，笔者采用了融合技术，其主要思想是将单一复杂的模糊控制转化为多级简单的嵌套控制策略，可以表示为：

$$x \xrightarrow{f_1} z \xrightarrow{f_2} y \quad (23)$$

即通过算法 f_1 先对输入量 x 进行处理，以减少输入维数，简化控制工作，然后通过算法 f_2 根据前一级的输出进行控制。算法 f_1 主要利用系统状态量的相关性来实现数据的组合等功能，也称为融合函数。笔者构造了融合函数 $f_1(X) = [E \ E_c]^T = KX$ 来实现将两个或以上的误差量乘以不同的权值融合成一个变量，其中 K 是一个 4×2 阶的矩阵。

4 仿真分析

仿真条件：运输机质量 120 t，货物质量 20 t，重力加速度 9.8 m/s^2 ，货台与导轨间摩擦系数 0.1，货台初始位置 $r = [0 \ 0 \ 0]^T$ ，货舱导轨长度 10 m。

因为货物转动惯量一般只有运输机的 1% 左右，在仿真时将货物视为质点。因为引导伞半径较小，对系统影响较小，故忽略牵引伞质量，假设飞机空投过程中牵引伞产生的牵引力为恒定值，仿真时牵引伞拉力按 $T_x = \lambda m_2 g$ ， $T_y = T_z = 0$ 估算，式中 λ 为牵引比^[12]，取为 1。

仿真过程：运输机携带货物在配平状态下飞行 3 s，然后牵引伞打开，0.5 s 后货物解锁并在牵引伞拉力作用下沿货舱导轨向后滑动。配平状态下飞行速度为 0.23 Ma，迎角为 1.023° ，平尾为 -10.482° ，油门偏度为 29.3576° ，飞行高度为 5 m。

不加控制条时，飞机空投时响应如图 3 所示。

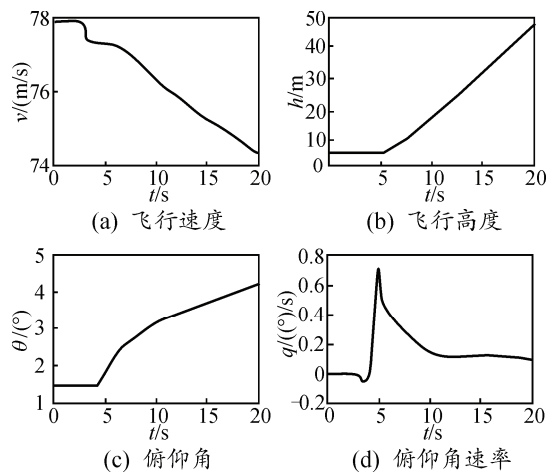


图 3 无控条件下运输机纵向响应结果

由图 3 可以看出，在牵引伞打开而货物未解锁移动时，牵引伞拉力直接作用在飞机上成为阻力，会使飞机速度降低，俯仰角减小，高度先下降；货物移动时，飞机俯仰角增加较快，高度上升；货物出舱后，飞机质量减小，飞机高度上升。

出现货物卡死故障时，会产生一个冲击力，同

时牵引力成为飞机阻力,使飞机速度下降,需切断牵引绳,以避免飞机掉高,影响飞机拉起;同时应避免飞机俯仰角增加过快,以防止飞机触地。进行仿真时,假设货物滑动到导轨末段时因机械故障卡死,并在 3 s 内解除牵引伞对货物的牵引。

进行闭环控制系统仿真时,限制升降舵响应在 $[-25^\circ, 20^\circ]$ 内,升降舵传递函数为: $10/(s+10)$ 。模糊控制器参数为: $K_c=10, K_{cc}=-1, K_u=-11$,

融合矩阵 K 为 $\begin{bmatrix} -100 & 1.9446 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -61.4253 & 0 \end{bmatrix}$ 。

自动油门系统中,发动机的传递函数为: $1/(6s+1)$ 。为避免故障时控制输入剧烈变化而影响发动机正常工作,在控制器输入端加上一个上下限为 $[-0.6, 0.6]$ 的限幅环节和一个上下限为 $[-1, 1]$ 的速率限制环节。PD 控制器的参数为: $k_p=75, k_d=80$ 。仿真结果如图 4 和图 5 所示。

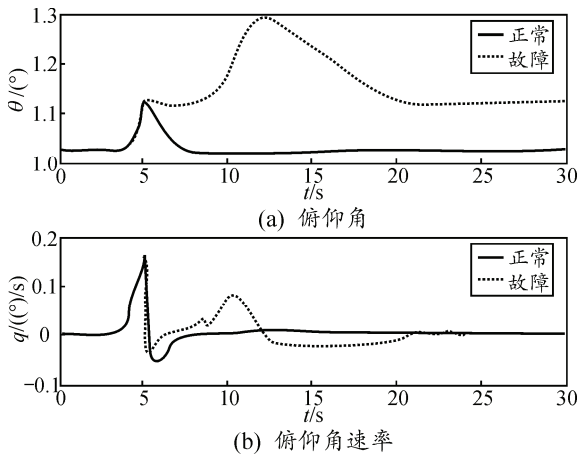


图 4 运输机纵向响应曲线

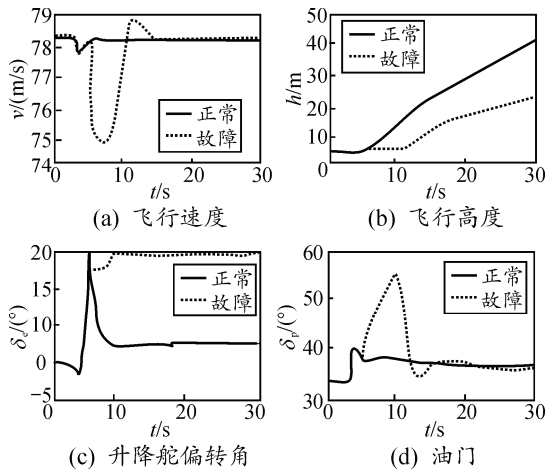


图 5 运输机速度、高度、升降舵及油门响应曲线

仿真结果显示,速度保持系统较好地抑制空投过程中速度的偏差,避免可能出现失速问题,具有较好的控制效果。正常空投中,货物解锁后,在货

舱内滑行过程经历约 1.7 s,货物掉落约 12 s 飞机趋于稳定,俯仰角稳定在配平俯仰角附近,且飞行高度在空投结束后快速上升,模糊控制器能较快地抑制货物移动对运输机姿态的影响,比较显著地改善了运输机姿态运动特性;在空投出现故障时,即货物在滑行 1.7 s 后,因机械故障卡在导轨末端时,会产生一个冲击,对飞行速度及姿态产生影响,经过约 15 s,在控制器作用下运输机趋于稳定。

5 结语

针对货物出舱过程,笔者利用分离法,分别对飞机和货物的运动进行分析,运用牛顿第二定律建立了运输机的动力学方程,给出纵向运动非线性方程组。为了抑制货物出舱过程出现故障时对运输机产生的影响,设计了模糊控制器。仿真结果表明:笔者设计的模糊控制律能较好地抑制因货物出舱出现故障状况时对运输机纵向姿态产生的扰动,在飞机的姿态保持控制上具有良好的控制效果,降低了飞机触地的可能性,对于分析空投时飞机飞行安全具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Bagdonovich B, Desabrais K J, Benney R, et al. Overview of the Precision Airdrop Improvement Four-powers Long Term Technology Project [C]. AIAA Paper, 2003.
- [2] Brown G., Haggard R. The Affordable Guided Airdrop System[C]. AIAA Paper, 1999.
- [3] 欧阳绍修,丁重舜. 货物在货舱内移动时飞机动态特性的研究[J]. 飞行力学, 1992, 10(1): 77-86.
- [4] 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.
- [5] 韩雅慧,杨春信,肖华军,等. 翼伞精确空投系统关键技术和发展趋势[J]. 兵工自动化, 2012, 31(7): 1-7.
- [6] 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.
- [7] Ke Peng, Yang Chun-xin. Extraction Phase Simulation of Cargo Airdrop System [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(4): 315-321.
- [8] Chen Jie, Shi Zhongke. Aircraft Modeling and Simulation with Cargo Moving Inside[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 191-197.
- [9] 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.
- [10] Zhang Hui-yuan, Shi Zhongke. Variable structure control of catastrophic course in airdropping heavy cargo[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(5): 520-527.
- [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: 12-15.
- [12] 王利荣. 降落伞理论与应用[M]. 北京:宇航出版社, 1997: 454-456.