

## 空投时运输机的实时仿真平台

常允刚<sup>1</sup>, 孙秀霞<sup>1</sup>, 李大东<sup>2</sup>, 董文瀚<sup>1</sup>, 贺磊<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军95039部队, 广东 汕头 515049)

**摘要:** 建立了涵盖刚体货物、牵引伞、舱内地板角等影响因素的复杂空投过程运动学模型, 提出了空投系统牵引伞力作用方向, 推导了空投货物与载机相互作用力大小及作用点, 设计了0-1控制变量对货物在空投的不同阶段进行分时控制, 简化了建模过程, 使模型具备不同空投模式下的仿真能力, 在此基础上设计了集空投系统设置、仿真、分析与显示为一体的实时仿真平台, 最后通过仿真对该模型与传统空投模型之间的动态响应误差进行了量化分析。

**关键词:** 空投系统; 仿真平台; 动力学模型; 动态响应

**中图分类号:** V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0056-05

## A Real-Time Simulation Platform for Airdrop of the Transport Aircrafts

CHANG Yun-gang<sup>1</sup>, SUN Xiu-xia<sup>1</sup>, LI Da-dong<sup>2</sup>, DONG Wen-han<sup>1</sup>, HE Lei<sup>1</sup>

(1. Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. No. 95039 Unit of PLA, Shantou 515049, China)

**Abstract:** In order to establish a more realistic airdrop kinematics model, the drag direction was presented and the interaction force between cargo and airplane were deduced. Many influence factors such as rigid body good, extraction parachute and the angle of cabin floor were considered in the model. The 0-1 control variables were designed for time-shared control of the cargo at different airdrop phases. The modeling process was simplified, which could simulate the different airdrop modes. A simulation platform for cargo airdrop system was designed, which integrated such functions as airdrop parameter setting, simulation, analysis and display. At last, a quantitative analysis was made to the dynamics response error of the proposed mathematical model and the tradition model through simulation.

**Key words:** airdrop system; simulation platform; dynamics model; dynamic response

### 0 引言

运输机空投是提高现代高技术战争条件下作战能力的必要手段, 围绕空投的研究与应用具有重要的军事意义和应用价值<sup>[1-2]</sup>。为配合我国某空投系统的研制、空投控制律设计及空投过程飞行品质规范的制定<sup>[3-5]</sup>, 本文建立了精确的空投模型(简称模型1), 并设计了空投过程实时仿真系统平台。

合理的建模方法及精确的运动学模型是研究空投系统的前提与基石。空投过程中, 刚体货物在牵引伞等合外力影响下向后舱门移动, 与载机空速、姿态等

耦合, 模型表现出强耦合性、强非线性等特点。当前对重装空投过程运动学建模可归结为以下两种: 1) 货物舱内运动模型已知, 即在建模过程中假设货物为质点, 在舱内做加速度已知的匀加速运动, 且运动轴与机体纵轴重合<sup>[6-8]</sup>(简称模型2); 2) 货物舱内运动模型未知, 即货物是在合外力(牵引伞力、自身重力分量、载机的相互作用力)的作用下, 相对舱内导轨做变加速直线运动的质点<sup>[9-11]</sup>。文献[12]在此基础上, 屏蔽货物为质点的假设条件, 视货物为刚体, 建立了当前可查文献中较为精确的空投过程运动学模型(简称模型3)。

模型2假设条件苛刻, 建模结果简单, 易于设计空投过程控制律<sup>[13-16]</sup>, 模型3较模型2复杂, 但更加贴近实际, 利于更准确地分析空投过程载机状态响应的变化<sup>[11-12]</sup>。

但模型3与实际空投系统相比, 存在以下偏差:

收稿日期: 2012-11-26

修回日期: 2014-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助(60904038)

作者简介: 常允刚(1989—), 男, 山东威海人, 硕士生, 研究方向为先控控制理论与应用。

1) 飞机与刚体货物相互作用力的作用点并非在刚体货物的质心上,应与质心有一偏差;2) 牵引力的方向应沿当前时刻载机空速的反向。

空投仿真平台为研究载机在执行不同空投任务时的动态响应特征、空投参数的选取提供了重要的地面仿真试验平台。仿真平台应具备较高的精确性、较强的适用性及简化的程序结构,同样要求空投模型具备较高的精确性与融合性,可用于4种空投模式(牵引伞牵引或重力牵引的单投与连投)试验。

本文采用分离体法,提出牵引伞在货物上的作用力方向,推导出货物与载机相互作用力的作用点,建立了精确货物运动模型。引入0-1控制变量代表不同的货物运动阶段,简化了建模过程,提高了模型的融合性。在此基础上,设计了具备空投系统仿真、实时可视化显示与动态响应分析于一体的仿真平台,为空投过程控制律的设计和飞行品质的建立打下坚实基础。

### 1 坐标定义及基本假设

参考文献[17]中分别定义地面坐标系  $o_b x_g y_g z_g$ , 机体坐标系  $o_b x_b y_b z_b$ , 航迹坐标系  $o_b x_k y_k z_k$ 。此外,建立货物运动坐标系  $o_c x_j y_j z_j$ , 如图1所示。

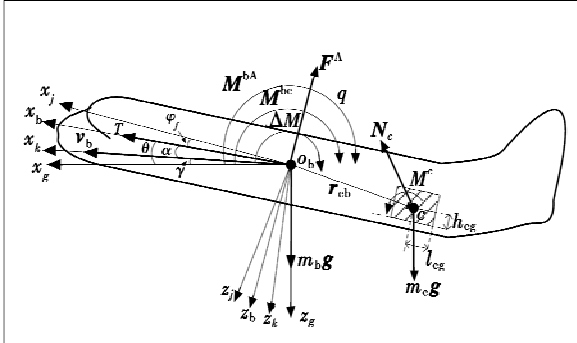


图1 坐标系定义

Fig.1 Definition of the coordinate systems

图1中: $v_b$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $q$ 、 $\dot{q}$ 分别表示载机的空速矢量、迎角、航迹角、俯仰角、俯仰角速度、俯仰角加速度; $\varphi_j$ 为机体轴  $o_b x_b$  与货物运动轴  $o_j x_j$  的夹角; $T$ 为发动机推力; $r_{cb}$ 为货物质心距载机质心距离矢量; $h_{cg}$ 、 $l_{cg}$ 表示货物1/2高度与长度; $m_b$ 、 $m_c$ 分别表示载机(空机)、货物的质量; $M^{bc}$ 表示货物对载机的干扰力矩,可进一步分解表示成  $M^{bc} = M^c + \Delta M$ ,其中, $M^c$ 、 $\Delta M$ 表示在非惯性系下货物运动产生的干扰力矩、惯性系下货物与载机相互作用力产生的干扰力矩。文中,用下标b代表载机,用下标c代表空投货物。

将空投过程分为以下3个阶段,即:1) 空运阶段,飞机进入空投地区,保持飞行速度、飞行高度,货物处于锁定状态;2) 货物机内牵引阶段,牵引伞张满,货物

开始运动,直到货台后缘到达机舱大门边缘为止;3) 货物出机阶段,货物完成整体出机。

结合重装空投模型特性,为使模型更具体,更贴近实际,放宽文献[6-12]部分理想空投假设,提出本文空投建模假设条件:1) 货物为质量均匀分布的刚体;2) 忽略出舱瞬间货物受到的气动力。

### 2 空投全量运动学模型

采用分离体的建模思想<sup>[10-12]</sup>,将货物的运动视为对载机的扰动,不论是单投模型还是连投模型,只需在飞机常规的运动方程上加入一个货物的扰动项,载机的动力学模型可表示为

$$\begin{cases} m_b \frac{dv_b}{dt} = F^A + \sum_1^n F_i^c + m_b \cdot g \\ \frac{dH}{dt} = M^{bA} + \sum_1^n M_i^{bc} \quad i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F^A$ 表示作用在载机上的气动力和推力的总矢量; $M^{bA}$ 表示  $F^A$ 对空机质心  $o$ 产生的力矩矢量; $F_i^c$ 、 $M_i^{bc}$ 表示第  $i$ 件货物对载机的干扰力与干扰力矩矢量,若为单投系统,则  $i = 1$ 。

货物运动归结为解决在非惯性系中的刚体运动问题,货物机内固定与牵引阶段受力分析如图1、2所示,根据空投阶段的划分,提出引入控制变量  $\tau_{i,1} \in [0 \sim 1]$ ,代表第  $i$ 件货物空投过程中的不同状态,如表1所示。

表1 控制变量

Table 1 Control variables

	$\tau_{11}$	$\tau_{12}$	$\tau_{21}$	$\tau_{22}$	...	$\tau_{n1}$	$\tau_{n2}$
空投准备	0	1	0	1	...	0	1
1 牵引	1	1	0	1	0	0	1
1 离机	0	0	0	1	0	0	1
2 牵引	0	0	1	1	0	0	1
2 离机	0	0	0	0	0	0	1
$n$ 牵引	0	0	0	0	0	1	1
$n$ 离机	0	0	0	0	0	0	0

表1中, $\tau_{i,1} = \tau_{i,2} = 0$ ,表示货物离机; $\tau_{i,1} = \tau_{i,2} = 1$ ,表示货物牵引阶段; $\tau_{i,1} = 0$ 、 $\tau_{i,2} = 1$ ,表示货物机内固定,则第  $i$ 件货物运动方程可表示为

$$\begin{cases} a_c = a_q + \tau_i (a_r + a_g) \\ a_q = \frac{dv_b}{dt} + \frac{d\Omega}{dt} \times r_{cb} + \Omega \times (\Omega \times r_{cb}) \\ a_g = 2\Omega \times \frac{\tilde{d}r_{cb}}{dt} \\ a_r = \frac{\tilde{d}^2 r_{cb}}{dt^2} \\ N_{c,1x_j} = \tau_i (-G_{c,1x_j} - \tau_i F_{p,1x_j} + m_c a_{c,1x_j}) \\ N_{c,y_j} = \tau_i (G_{c,y_j} + \tau_i F_{p,1y_j} - m_c a_{c,1y_j}) \\ N_{c,1z_j} = \tau_i (G_{c,z_j} + \tau_i F_{p,1z_j} - m_c a_{c,1z_j}) \\ |N_{c,1x_j}| = \mu |N_{c,1z_j}| \end{cases} \quad (2)$$

式中： $a_e, a_q, a_g, a_r$  分别为货物的绝对加速度、牵连加速度、哥氏加速度、相对加速度矢量； $\Omega$  表示飞机相对地面坐标系  $ox_e y_e z_e$  的旋转角速度矢量； $N_{c,ix}, N_{c,iy}, N_{c,iz}$  表示载机与货物的相互作用力在货物运动轴  $ox_j y_j z_j$  上的3个分量； $G_{c,ix}, G_{c,iy}, G_{c,iz}$  表示货物重力在货物运动轴  $ox_j y_j z_j$  上的3个分量； $\mu$  为货物与导轨之间的摩擦系数； $F_p = m_b g \lambda$ ，为牵引伞拉力， $\lambda$  为所选定的牵引比； $\varphi_p$  为牵引力方向与货物运动轴  $ox_j$  的夹角； $h_{cp}$  为牵引伞作用点距离货物质心的垂直距离。

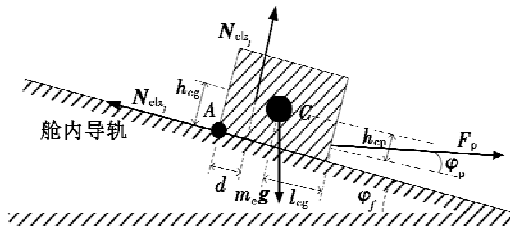


图2 牵引阶段货物受力分析

Fig.2 Force analysis of cargo in traction stage

针对当前模型对牵引伞作用力夹角  $\varphi_p$  均假定为常值(或为零),为使模型更加贴近实际,提出牵引力方向沿速度坐标系指向来流方向,即  $\varphi_p$  的大小随迎角  $\alpha$  的变化而变化,满足以下关系

$$\varphi_p = \alpha + \varphi_f \quad (3)$$

货物在空投过程中不会发生侧滑、翻倒,即只沿着导轨纵轴运动。取货物前缘点A为参考点,货物在此点应满足力矩平衡。

$$N_{c,iz} d = G_{c,ix} l_{cg} - G_{c,iy} h_{cg} - F_{p,ix} (h_{cg} - h_{cp}) + 2F_{p,iz} l_{cg} \quad (4)$$

式中, $d$  表示载机对货物支持力的作用点距离点A的纵轴距离。则式(1)中货物对载机产生的干扰力矩  $M^c$  为

$$\begin{cases} M_{ix}^c = (z_c^j + h_{cg}) N_{c,iy} \\ M_{iy}^c = (x_c^j - l_{cg} + d) N_{c,iz} - N_{c,ix} (h_{cg} + z_c^j) \\ M_{iz}^c = x_c^j N_{c,iy} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $x_c^j, z_c^j$  为  $r_{ob}$  矢量在货物运动轴上的分量； $M_{ix}^c, M_{iy}^c, M_{iz}^c$  表示货物对载机的干扰力矩在机体坐标轴  $ox_b y_b z_b$  上的3个分量。

结合式(1)~式(5),并补充相应推力及气动力方程<sup>[17]</sup>,建立全量空投过程数学响应模型。模型通过配置货物质量、牵引比数值与控制变量  $\tau$  实现4种空投模式的自由切换。

### 3 仿真平台结构与功能

实时仿真平台集空投系统设置、仿真、分析与显示为一体,仿真系统结构如图3所示。

图3中,仿真软件系统由人机交互界面、飞行仿真计算、结果显示与分析、数据管理4个子系统组成。其中,人机交互界面提供了友好的用户界面形式;飞行仿

真计算子系统完成空投过程模型求解,为系统的核心部分;结果显示与分析子系统为仿真数据提供了数据查看和图形分析等可视化功能,利用网络通讯技术,将仿真结果数据发送至视景显示计算机,驱动 FlightGear 可视化引擎实现空投实时可视化显示;数据管理子系统贯穿系统运行始终,与各子系统相互交互,对所有相关数据进行调度与管理。

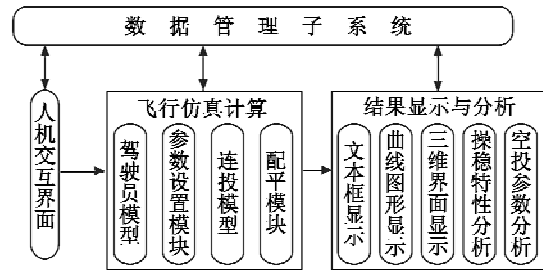


图3 仿真平台结构图

Fig.3 Structure of simulation platform

## 4 仿真试验

### 4.1 模型对比分析

以完成单列单投任务为例,将本文模型1与文献[6-8]模型2、文献[9-12]模型3进行仿真对比。仿真参数如下:选取文献[6,9]的运输机模型为仿真载机模型,飞行高度  $H=4000$  m,载机空速  $v_b=120$  m/s,舱内地板角  $\phi_f=5^\circ$ ,摩擦系数  $\mu=0.02$ ,货物质量  $m_c=7000$  kg,  $h_{cg}=l_{cg}=0.5$  m,牵引伞作用点  $h_{cp}=0.3$  m,牵引比  $\lambda=0.35$ ,选取模型2中货物运动加速度  $a_r=5.5$  m/s<sup>2</sup>,模型3中牵引力夹角  $\varphi_p=0^\circ$ 。仿真如图4所示,货物离机时间及动态响应峰值见表2。

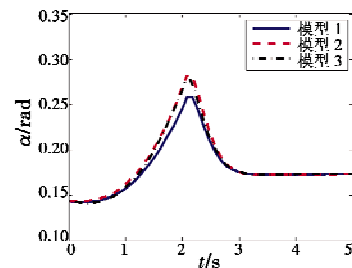


图4 3种模型迎角响应曲线对比

Fig.4 AOA curves of different models

表2 响应峰值对比

Table 2 Comparison of response peak

模型	动态响应参数				
	离机时间/s	迎角峰值/rad	俯仰角峰值/rad	俯仰角速度峰值/(rad·s <sup>-1</sup> )	俯仰角加速度峰值/(rad·s <sup>-2</sup> )
1	2.08	0.2582	0.3367	0.2258	0.2722
2	2.08	0.2820	0.3553	0.2728	0.3496
3	2.05	0.2762	0.3566	0.2700	0.3262

由仿真数据可知,模型2、3动态响应相近,而本文

所建立的精确模型与二者相比,存在着近 20% 的响应误差。

因此,由于空投过程模型的强耦合性,建模中应综合考虑各种影响因素,对相应因素的屏蔽容易导致较大的模型误差。

### 4.2 空投参数

文献[6-10]均对不同的空投参数(如货物重量、货物的安装位置、牵引比大小、空投间隔时间等)引起的载机的动态响应进行了详细分析。本文主要针对牵引伞作用点的不同对空投载机动态响应进行分析。选取如下投状态点  $H = 100\text{ m}$ ,  $v_b = 100\text{ m/s}$ ,  $m_c = 4000\text{ kg}$ ,  $h_{cg} = l_{cg} = 1\text{ m}$ 。货物安装位置在机体轴坐标为  $(0, 0, 1)$ , 牵引比  $\lambda = 0.4$ , 分别选取牵引伞作用点位置为货物底部 ( $h_{cp} = h_{cg}$ ) 与货物中部 ( $h_{cp} = 0$ )。载机迎角响应曲线如图 5 所示。

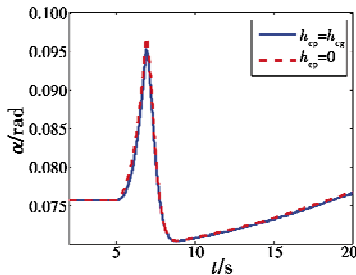


图 5 不同牵引伞作用点下的迎角响应曲线

Fig.5 AOA curves at different points of drag

由图 5 可知,当牵引伞作用点位于货物底部时,载机产生的动态响应峰值较小,主要由于牵引伞作用点越接近货物底部,货物与载机相互作用力臂  $d$  越小,产生的干扰力矩越小,如图 6 所示。

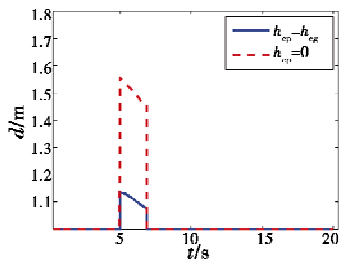


图 6 不同牵引伞作用点下的力臂变化曲线

Fig.6 Force arm curves at different points of drag

### 4.3 实时仿真平台试验

以飞行高度  $H = 100\text{ m}$ , 载机空速  $v_b = 100\text{ m/s}$ , 襟翼  $\delta_f = 0$ , 完成 4 件相同货物连续空投, 货物均为  $m_c = 1000\text{ kg}$ ,  $h_{cg} = l_{cg} = 0.5\text{ m}$ , 牵引比均为  $\lambda = 0.2$ , 作用点参数  $h_{cp} = 0.3\text{ m}$ , 空投时间间隔均为  $t = 2\text{ s}$ , 驾驶员模型参数  $k_1 = 0.8, k_2 = 2, k_3 = 0.2$ 。分别选取“本体空投仿真”、“人工控制仿真”对空投过程进行仿真。仿真平台运行界面如图 7 所示。

图 7 中,蓝色、红色曲线分别为无操纵情况下与人

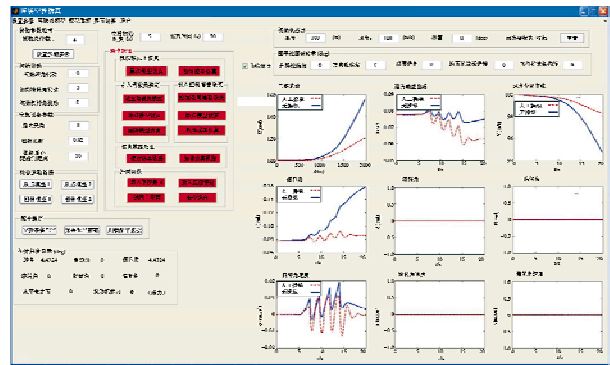


图 7 飞行仿真平台下人工操纵与无操纵曲线对比界面截图

Fig.7 Screenshots of curves with pilot control and without control under the flight simulation platform

工操纵下的载机动态响应曲线。采用人工操纵部分改善了载机在空投过程中的操稳特性,相对减小了  $\Delta H$ 、 $\Delta \theta$  的变化量,但由于存在时间延迟,驾驶员的控制对载机的短周期动态响应改善效果不大,即对短周期参数  $\Delta \alpha$ 、 $\Delta q$  改善不明显,同时在减小了正过载峰值的同时,易于引起较大的负过载,需要飞行员注意。货物导轨在飞机纵轴上,则空投过程对载机横侧向动态性能影响可忽略,输出为零。无操纵情况下 FlightGear 视景平台截图如图 8 所示。



图 8 FlightGear 视景仿真截图

Fig.8 Screenshots of FlightGear visual simulation

图 8 为载机的三维航迹显示过程截图,可直观展示载机的俯仰角等动态性能变化过程,为辅助理解评估的视觉效果图。

## 5 结论

本文基于 GUI 设计了空投过程仿真平台,并通过网络通讯技术与基于 FlightGear 的视景仿真平台相连接,开发了集空投参数设置、过程仿真、结果显示与分析于一体的空投模拟仿真平台。通过引入 0-1 控制变量及货物在舱内运动的精确建模,使平台更加贴近实际且能综合完成不同空投模式的仿真试验,软件平台精度高、适用性强、实时性好、为空投过程控制律的设计及飞行品质的建立打下重要基础。

### 参考文献

[1] 步恒祚. 浅议我国军用运输机的发展[J]. 航空科学技

- 术,2006,9(2):3-5.
- BU H Z. Brief discussion on the development of Chinese airlifters[J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2006, 9(2):3-5.
- [2] 李广义. 国外大型军用运输机发展现状与趋势[J]. *航空制造技术*, 2005, 12(9):36-43.
- LI G Y. Status and trends of the large foreign military cargo planes[J]. *Aeronautic Manufacturing Technology*, 2005, 12(9):36-43.
- [3] CHANG R C, YE C E. Flying qualities for a twin-jet transport in serve atmospheric turbulence[J]. *Journal of Aircraft*, 2009, 46(5):1673-1680.
- [4] YANG M H, HO C S. Longitudinal flight handling quality analysis by reduced order motion of a civil transport aircraft encountering turbulence[C]//Proc. of AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Chicago: AIAA, 2009: 1-14.
- [5] BALAS G G, HODGKINSON J. Control design methods for good flying qualities[C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference, Chicago, AIAA, 2009:1-20.
- [6] 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:北京航空学院, 1980.
- HU Z F, XIAO Y L. The method of the aircraft characteristics with cargoes moving in its cargo cabin[R]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1980.
- [7] CHEN J, SHI Z K. Aircraft modeling and simulation with cargo moving inside[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 18(22):191-197.
- [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):80-84.
- FU B X. The longitudinal dynamic analysis of Y-8 airplane in continuous airdrop[J]. *Flight Dynamics*, 1993, 11(1):80-84.
- [9] 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.
- OUYANG S X, DING C S. The study on the dynamic characteristics of aircraft with cargoes moving in its cargo cabin[J]. *Flight Dynamics*, 1992, 10(1):77-86.
- [10] 孙宝亭. 飞机连投货物实时仿真软件及应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 1994, 20(1):71-77.
- SUN B T. A real time simulation software of sequential airdropping of cargoes from aircraft and its application[J]. *Journal of Beijing University Aeronautics and Astronautics*, 1994, 20(1):71-77.
- [11] 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.
- KE P, YANG C X, YANG X S, et al. System simulation and analysis of heavy cargo airdrop system[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(5):856-860.
- [12] 赖志红. 飞机空投运动响应的数学模型[R]. 北京:北京航空学院, 1986.
- LAI Z H. Aircraft dynamic modeling with cargo airdrop[R]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1986.
- [13] 冯艳丽, 史忠科. 超低空空投货物出舱过程的动态逆鲁棒控制[J]. *控制工程*, 2010, 17(5):579-583.
- FENG Y L, SHI Z K. Robust dynamic inversion control of cargo extraction during airdrop at super low attitude[J]. *Control Engineering of China*, 2010, 17(5):579-583.
- [14] 张晶, 申功璋, 杨凌宇. 基于逆动力学和重心估计的飞行控制系统设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(11):1315-1319.
- ZHANG J, SHEN G Z, YANG L Y. Design of flight control system based on inverse dynamics and center of gravity estimation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(11):1315-1319.
- [15] 杨晓科, 杨凌宇, 张晶, 等. 变重量/重心飞机建模及姿态控制律设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(1):54-57.
- YANG X K, YANG L Y, ZHANG J, et al. Modeling and attitude control of aircraft with variations in mass or center of gravity[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(1):54-57.
- [16] ZHANG H Y, SHI Z K. Variable structure control of catastrophic course in airdropping heavy cargo[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(2):520-527.
- [17] 蔡满意. 飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社, 2007:33-42.
- CAI M Y. Flight control system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007:33-42.

欢迎投稿 网址: <http://www.dgykz.com>