

文章编号:1671-1637(2016)02-0125-07

## 航空运输物资空投过程动力学模型

孙秀霞<sup>1</sup>, 徐光智<sup>1,2</sup>, 刘 日<sup>1</sup>, 董文瀚<sup>1</sup>, 戚鹏春<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 中国人民解放军 94106 部队, 陕西 西安 710613)

**摘 要:**针对当前航空物资空投过程的运输机动力学建模条件过于简化、严重脱离空投过程实际的现状,研究了现有空投过程动力学模型的适用性,确立了分离体建模的方法。在无需分析货物与飞机整体的质心变化的情况下,分别以空投物资与飞机为对象进行受力分析,简化了建模过程且有利于定性分析货物对飞机的作用过程。为验证动力学模型的合理性,使用某型运输机数据进行了仿真试验。为验证空投过程中气动参数小扰动线性化的不合理性,通过3种模式对气动参数进行处理,对比分析了迎角响应曲线。对不同支持力、牵引力作用点、导轨模型、牵引力夹角模型、货物装载位置等条件下的空投过程运动学模型进行了量化分析,并与现有模型进行对比。仿真结果表明:气动参数小扰动线性化、视货物为运动规律已知的质点以及忽略舱内地板角等苛刻假设条件将导致较大的模型误差;在进行大牵引比、大质量货物空投时,应综合考虑牵引力数值与方向对空投动态响应的影响,并尽量将货物安装在飞机舱门附近,以缩短货物在舱内的运动时间,降低干扰力矩幅值。

**关键词:**运输机;航空运输物资;空投;动力学特性;分离体建模;动态响应;牵引伞;刚体;模型误差  
**中图分类号:**V217 **文献标志码:**A

## Dynamics model of airdrop process for air transportation cargo

SUN Xiu-xia<sup>1</sup>, XU Guang-zhi<sup>1,2</sup>, LIU Ri<sup>1</sup>, DONG Wen-han<sup>1</sup>, QI Peng-chun<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2. The 94106 Troops of Chinese PLA, Xi'an 710613, Shaanxi, China)

**Abstract:** In view of the status that the modeling condition of transport aircraft dynamic model in airdrop process for air transportation cargo was too much simplified, which was far away from the real airdrop project, the current airdrop process dynamic models and their applicabilities were systematic researched, and a separated-body modeling method was established. The forces of airdrop cargoes and aircraft were respectively analyzed without attention on the centroid of cargoes and aircraft, which simplified the modeling process and benefited the qualitative analysis of mechanism of the cargoes to the aircraft. In simulation experiment, the reasonability of dynamic model was verified by using the data of a certain-type transport aircraft. In order to verify the irrationality of small disturbance linearization of aerodynamic parameters, the aerodynamic parameters were processed through 3 modes, the corresponding curves of AOA were comparative analyzed. Under the conditions of different support forces, the application points of traction force, guide models, traction force angle models, and the loading positions of cargo, the built dynamic model of airdrop process was quantitative analyzed and compared with existed models. Simulation result shows that with the assumed conditions including the small disturbance linearization of aerodynamic parameters, assuming the cargoes with known motion law as particles, and ignoring the cabin angle, large model errors are introduced. In the missions of big

收稿日期:2015-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(61273141);航空科学基金资助项目(20141396012)

作者简介:孙秀霞(1962-),女,山东潍坊人,空军工程大学教授,工学博士,从事现代控制理论与鲁棒控制研究。

traction ratio and heavy weight airdrop, the influence of the value and direction of traction force on the airdrop dynamic response should be considered. Furthermore, it is significant to install the cargoes near the cabin door of aircraft, which can shorten the moving time of cargoes and reduce the amplitude of interference torque. 9 figs, 24 refs.

**Key words:** transport aircraft; air transportation cargo; airdrop; dynamic characteristic; separated-body modeling; dynamic response; extraction parachute; rigid body; model error

**Author resume:** SUN Xiu-xia(1962-), female, professor, PhD, +86-29-84787726, gcxsxxx@126.com.

## 0 引 言

近年来,中国自然灾害和公共安全事件频发,给国家安全和人民生命财产造成重大损失,需要应对力量迅速到达现场进行有效处置。在最短的时间内向事发地域投送力量,航空运输保障无疑是最有效的方式。空投技术是提高现代物资运输保障能力的必要手段,随着军民融合战略的深入推进,围绕重型物资空投的研究与应用具有重要的战略意义和应用价值<sup>[1-2]</sup>。国外可查文献主要集中于特定机型的空投试验<sup>[3-5]</sup>,对空投关键技术仍未公开。国内研究集中于空投过程动力学建模<sup>[6-16]</sup>、空投系统的研发<sup>[11-13]</sup>与空投过程控制律的设计<sup>[14-15,17-21]</sup>,对超低空重装空投、精确空投的研究刚刚起步,对空投过程操稳特性和飞行品质评价的研究目前仍处于空白<sup>[2]</sup>。

精确的空投过程动力学模型对于有效分析货物对飞机的作用过程与飞机的动力学特性从而合理安排空投任务具有十分重要的基础意义。对建立的力学模型进行不同条件下的数值仿真,可以确定有利于空投安全性的诸如牵引伞牵引比、空投速度、滑轨倾角等要素的最佳状态。同时,精确合理的动力学模型是进行空投运输机飞行控制系统设计的前提与关键。现有的空投动力学模型可为空投过程提供一定的参考,然而为了降低建模的复杂性,许多工程实际中的要素都被过分简化,使得其难以全面有效地反映运输机的特性。在空投过程中,刚体货物在牵引伞等合外力作用下向后舱门移动,与飞机空速、姿态等耦合,模型表现出强耦合性、强非线性等特点。当前空投过程动力学模型可总结为以下 2 种:1)货物舱内运动模型已知(简称模型 1),即在建模过程中假设货物为在舱内做加速度已知的匀加速运动的质点,且货物运动轴与机体纵轴重合<sup>[6-8,14-16,18,21]</sup>,然而,由于货物在出舱移动过程中飞机不断抬头使得货物重力沿滑轨的分量不断增大,

因此,货物运动的加速度在不断增大;2)货物舱内运动模型未知,即视货物在合外力(牵引伞力、自身重力分量、货物与飞机的相互作用力)作用下,相对舱内导轨做变加速直线运动<sup>[10-12,19-20]</sup>。赖志宏在假定货物做变加速直线运动且所受牵引力方向固定的基础上,屏蔽货物为质点的假设条件,视货物为刚体,建立了较为精确的空投过程动力学模型<sup>[13]</sup>(简称模型 2),但是,在此过程中,牵引伞的作用力方向不可简单视为固定的,这是因为随着货物不断移动,其与飞机相对位置也发生了变化,导致牵引力作用方向也会随之变化。

模型 1 相对简单,因此,被广泛用作控制律设计的被控对象。张晶等设计了变重心纵向控制律<sup>[14-15]</sup>;Chen 等基于反步控制方法设计了空投过程飞机高度控制器<sup>[17-18]</sup>;孙秀霞等提出了基于  $L_1$  自适应理论的飞行控制方案<sup>[21]</sup>。

模型 2 相对精确,因此,被广泛用作空投过程飞机动态特性分析平台。胡兆丰等基于 MATLAB 软件,仿真研究了空投过程飞机动力学特性<sup>[6-7]</sup>;孙宝亭等基于 C++ 软件开发了空投过程可视化仿真平台<sup>[11-13]</sup>。通过对建模过程的深入分析,可知模型 2 仍存在以下建模误差:货物舱内移动过程中,飞机对货物相互作用力的作用点是时变的,并非永远落在货物质心上;牵引力的方向应沿速度轴指向来流方向,并非为一固定夹角。

本文根据力矩平衡关系,首先以货物为研究对象,从理论力学与牛顿运动学的基本原理出发,通过对货物运动状态的分析,推导出飞机与货物相互作用力的作用点,并在考虑货物大小的情况下以刚体货物受力平衡与力矩平衡为条件推导出牵引伞力的作用方向,建立了涵盖多种影响因素的复杂空投过程动力学模型,为精确的地面仿真试验平台设计、空投过程飞机动态响应分析与飞行品质评价奠定良好基础。最后,仿真分析了不同假设条件下的空投过程建模误差及小扰动方法在空投过程中的适用性,

补充完善了当前空投过程控制器设计的理论基础。

## 1 复杂空投过程全量动力学模型

建模过程中引入 0-1 控制变量代表货物在舱内的不同状态(固定、移动与离机),通过对控制变量的选择,建立货物单投或连续空投过程动力学模型。

### 1.1 坐标定义及假设条件

分别定义地面坐标系为  $Ox_g y_g z_g$ , 机体坐标系为  $Ox_b y_b z_b$ , 航迹坐标系为  $Ox_k y_k z_k$ , 货物运动坐标系为  $Ox_j y_j z_j$ <sup>[13]</sup>, 见图 1。图 1 中:  $v_b$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $q$  分别为飞机的空速、迎角、航迹角、俯仰角、俯仰角速度;  $\varphi_i$  为机体轴  $Ox_b$  与货物运动轴  $Ox_j$  的夹角, 为常值或为时间的函数;  $T$  为发动机推力;  $C$  为货物质心;  $r$  为货物质心距飞机质心的距离;  $h$ 、 $l$  分别为货物高度与长度的 1/2;  $m_b$ 、 $m_c$  分别为飞机(空机)与货物的质量;  $g$  为重力加速度;  $F_A$  为飞机受到的空气动力;  $M_A$  为飞机受到的气动力矩;  $M_{bc}$  为非惯性系下货物运动产生的干扰力矩;  $\Delta M$  为惯性系下货物与飞机相互作用力产生的干扰力矩;  $N_c$  为飞机对货物的作用力;  $M_c$  为货物对飞机的干扰力矩。

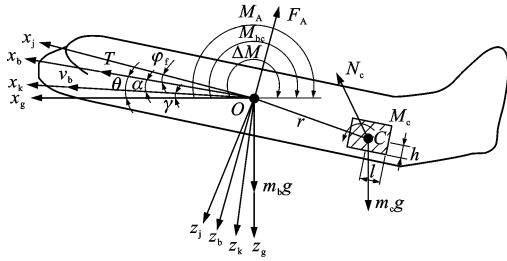


图 1 坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinates

结合空投过程特性,提出本文空投过程建模假设条件:货物为质量均匀分布的刚体,且货物质心落在机体铅垂面上,即  $x_b O z_b$  平面内。值得注意的是货物质心落在机体铅垂面在地面装载过程中可实现,这一点假设在实际工程中是符合的。

### 1.2 空投过程动力学建模

采用分离体的建模思想<sup>[10]</sup>,将货物在舱内的运动视为对飞机的扰动,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,飞机的动力学模型可表示为

$$\begin{cases} m_b \frac{dv_b}{dt} = F_A + \sum_{i=1}^n F_{ci} + m_b g \\ \frac{dH}{dt} = M_A + \sum_{i=1}^n M_{ci} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间;  $H$  为飞机的动量矩;  $F_{ci}$ 、 $M_{ci}$  分别为

第  $i$  件货物对飞机的干扰力与干扰力矩。

货物运动归结为解决在非惯性系中的刚体运动问题,货物在机内固定与牵引阶段的受力分析分别见图 1、2。根据空投阶段的划分,引入 0-1 控制变量  $\tau_{i1}$ 、 $\tau_{i2}$ , 代表第  $i$  件货物在空投过程中的不同状态,  $\tau_{i1} = \tau_{i2} = 0$  表示货物离机,  $\tau_{i1} = \tau_{i2} = 1$  表示货物牵引阶段,  $\tau_{i1} = 0$ 、 $\tau_{i2} = 1$  表示货物固定在机内, 则第  $i$  件货物的运动方程可表示为

$$\begin{cases} a_1 = a_2 + \tau_{i1}(a_3 + a_4) \\ a_2 = \frac{dv_b}{dt} + \frac{d\Omega}{dt}r + \Omega^2 r \\ a_3 = 2\Omega \frac{dr}{dt} \\ a_4 = \frac{d^2 r}{dt^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} N_{cix_j} = \tau_{i2}(-G_{cix_j} - \tau_{i1}F_{pix_j} + m_{ci}a_{cix_j}) \\ N_{ciy_j} = \tau_{i2}(G_{ciy_j} + \tau_{i1}F_{piy_j} - m_{ci}a_{ciy_j}) \\ N_{ciz_j} = \tau_{i2}(G_{ciz_j} + \tau_{i1}F_{piz_j} - m_{ci}a_{ciz_j}) \\ N_{ciz_j} = \mu |N_{cmz_j}| \end{cases} \quad (3)$$

$$F_p = m_b g \lambda \quad (4)$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  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;  $\Omega$  为飞机角速度;  $m_{ci}$  为第  $i$  件货物的质量;  $a_{ci}$  为第  $i$  件货物的加速度;  $\mu$  为货物与导轨之间的摩擦因数;  $N_{cix_j}$ 、 $N_{ciy_j}$  与  $N_{ciz_j}$  分别为  $N_{ci}$  在  $Ox_j$ 、 $Oy_j$ 、 $Oz_j$  轴的分量;  $G_{ci}$ 、 $F_{pi}$ 、 $a_{ci}$  分量的意义与  $N_{ci}$  分量意义类似;  $G_{ci}$  为第  $i$  件货物所受重力;  $F_{pi}$  为第  $i$  件货物所受牵引伞拉力;  $F_p$  为牵引伞拉力;  $\lambda$  为牵引比<sup>[9]</sup>。

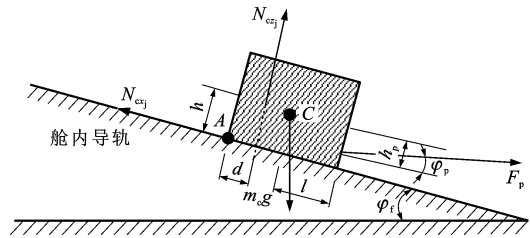


图 2 牵引阶段货物受力分析

Fig. 2 Force analysis of cargo at traction stage

针对当前模型对牵引伞作用力夹角均假定为常值(或为 0),在参考牵引伞模型<sup>[9,22]</sup>的基础上,提出牵引力方向沿速度轴  $Ox_k$  指向来流方向,如图 2 所示。  $\varphi_p$  为牵引力方向与货物运动轴  $Ox_j$  的夹角,  $h_p$  为牵引伞作用点距离货物质心的垂直距离,即  $\varphi_p$  的值随迎角  $\alpha$  的变化而变化,满足以下关系

$$\varphi_p = \alpha + \varphi_i \quad (5)$$

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,货物在此点满足力矩平衡,即

$$N_{c_{xj}} d = G_{c_{xj}} l - G_{c_{xj}} h - F_{p_{xj}} (h - h_p) + 2F_{p_{xj}} l \quad (6)$$

式中: $d$  为飞机对货物支持力的作用点距离点  $A$  的纵轴距离; $G_c$  为货物所受重力。

则货物对飞机产生的干扰力矩  $M_c$  为

$$\begin{cases} M_{c_{x_b}} = (z_c^j + h) N_{c_{y_j}} \\ M_{c_{y_b}} = (x_c^j - l + d) N_{c_{x_j}} - N_{c_{x_j}} (h + z_c^j) \\ M_{c_{z_b}} = x_c^j N_{c_{y_j}} \end{cases} \quad (7)$$

式中; $x_c^j$ 、 $z_c^j$  分别为货物在货物运动坐标系中  $Ox_j$ 、 $Oz_j$  轴的位置分量。

综合式(1)~(7),通过设置控制变量  $\tau_{i1}$ 、 $\tau_{i2}$  与牵引比,可实现牵引单投、连投,重力单投、连投的动力学模型。

## 2 仿真分析与量化评估

为验证所建立模型的合理性及其相比现有模型的改进之处,以某型运输机为例进行数值仿真。首先通过对模型的 3 种不同处理方式得到飞机的迎角(Angle of Attack, AOA)响应曲线,对比验证了空投过程中气动参数小扰动线性化的不合理性;其次,对不同牵引比、货物初始装载位置、牵引伞作用力方向等假设条件下所建立的空投过程动力学模型进行了量化分析。

### 2.1 小扰动方法分析

以某型运输机为例,空投高度为 100 m,空速为  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,襟翼为 0,舱内地板角为 0。空投货物参数如下:质量  $m_c$  为 8 000 kg,  $h$  为 1.2 m,  $l$  为 1.5 m。牵引比  $\lambda$  为 0.2,牵引伞拉力作用于货物底部,即  $h_p$  为 1.2 m,飞行 5 s 后启动空投。采用本文空投过程建模,对同一运输机的气动参数采用模式 1~3 进行处理,分别为传统小扰动气动模型、全量气动参数模型(不考虑由质心变化引起的气动参数变化)、全量气动参数模型(气动参数随质心变化而变化)。

参考张晶等的研究成果<sup>[14-15]</sup>计算仿真中质心变化量。仿真结果见图 3,可知:空投过程中,由于整机质心变化导致飞机气动参数呈现非线性变化,因此,气动参数小扰动线性化将导致较大的模型误差。

### 2.2 模型 1 对比仿真

采用上文仿真参数,货物在空投启动后 2.18 s 时离机,为与模型 1 进行对比,以货物在舱内运动时间相同为原则,反算出货物加速度,代入模型 1,仿真结果见图 4。图 4 中:峰值误差为 0.016 rad,可

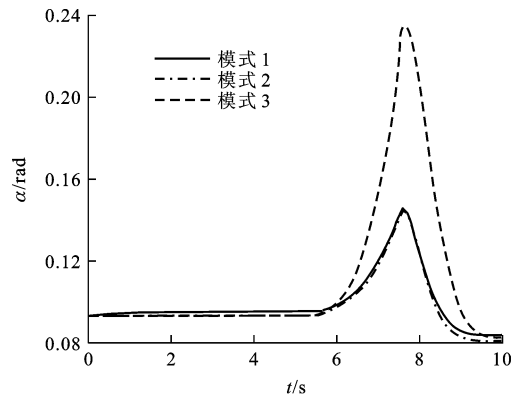


图 3 不同气动参数处理模式的迎角响应曲线

Fig. 3 Corresponding curves of AOA with different aerodynamic parameters processing modes

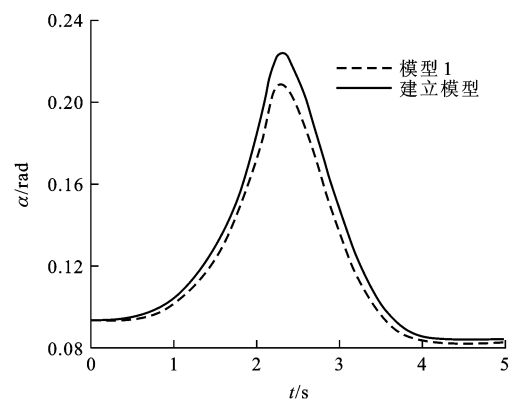


图 4 建立模型与模型 1 的迎角响应曲线

Fig. 4 Corresponding curves of AOA of built model and model 1

知,建模过程中若假设货物舱内运动模型已知,将引起较大的模型误差。

当前对空投过程的控制律设计均基于气动参数小扰动化的模型 1,鉴于模型 1 为具有未建模动态的仿射非线性系统,张晶等在线性化解耦的基础上,设计相应的鲁棒控制器<sup>[14,18]</sup>,由于建模误差的存在,张晶等采用的动态逆方法难以保证实时可逆解耦,冯艳丽等采用的输入-输出反馈线性化方法须增加模型误差满足匹配性<sup>[23-24]</sup>的假设条件,如此方能保证滑模变结构控制器的鲁棒性与可达性;Chen 等以系统升降舵偏转量为单输入,以飞机迎角响应为输出,设计了基于 Backstepping 方法的控制器<sup>[17]</sup>,而对空投过程模型此类不确定非纯(严)反馈非线性系统,缺乏相应的鲁棒性证明。

### 2.3 模型 2 对比仿真

#### 2.3.1 刚体货物与质点货物模型误差分析

本文建立的刚体货物模型与传统质点货物模型在建模过程中有 2 点区别:区别 1 中飞机对货物的支持力不同,对于质点货物模型,支持力落在货物质

心上,对于刚体货物模型,支持力与货物质心存在式(6)的力臂距离,对货物产生附加的干扰力矩;区别2中牵引力作用点不同,对于质点货物模型,牵引力指向货物质心,对于刚体货物模型,牵引力作用点与货物质心存在图2的力臂距离,对货物产生附加的干扰力矩。

采用上文仿真参数,将牵引力作用点置于飞机质心处,则仿真结果只分析区别1引起的建模误差。不同支持力的仿真结果见图5,二者峰值误差为0.003 rad。

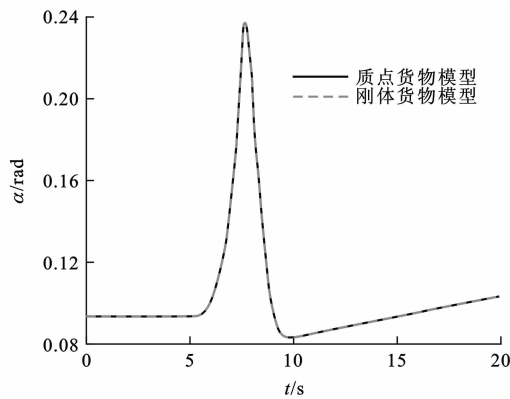


图5 不同支持力的迎角响应曲线

Fig. 5 Corresponding curves of AOA with different support forces

为分析区别2,选取牵引力作用点位于货物质心处与货物底部进行仿真对比,结果见图6,二者峰值误差为0.005 rad。

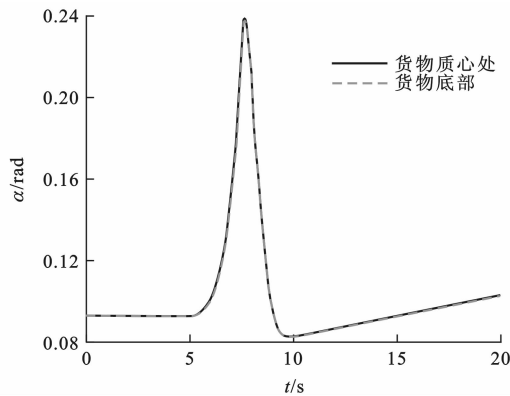


图6 不同牵引力作用点的迎角响应曲线

Fig. 6 Corresponding curves of AOA with different application points of traction force

建模误差为区别1与区别2的叠加。若进行大牵引比、大型或重型物资空投,建模误差较大,不能忽略。

### 2.3.2 不同导轨模型误差分析

舱内地板角不同导致货物重力、飞机支持力与牵引力在纵轴分量的不同。采用上文仿真参数,分析不同舱内导轨夹角模型的建模误差,分别选取导轨固定( $\varphi_i=0$ )与逐渐下偏( $\varphi_i=2.5t$ )2种模型(启

动空投时 $t=0$ ,货物完全离机时停止)。仿真结果见图7,峰值误差为0.115 rad。由图7可知:地板角越大则货物相对加速度越大,货物对飞机的干扰时间越短导致迎角峰值越小。由于不同的舱内导轨模型将引起较大的建模误差,因此,空投过程中应考虑舱内导轨夹角的影响。

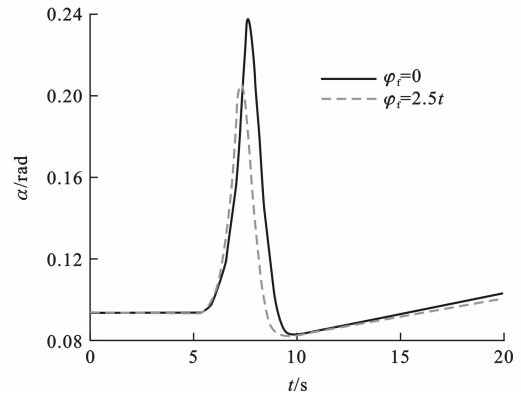


图7 不同导轨模型的迎角响应曲线

Fig. 7 Corresponding curves of AOA with different guide models

### 2.3.3 不同牵引力夹角模型误差分析

采用上文仿真参数,选取式(5)牵引力方向时变与牵引力方向不变2种模型,仿真结果见图8。

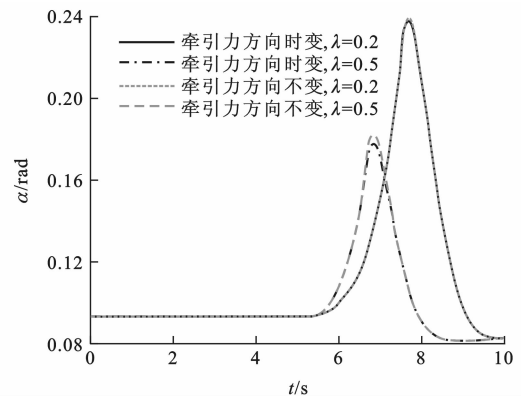


图8 不同牵引力夹角模型的迎角响应曲线

Fig. 8 Corresponding curves of AOA with different traction force angle models

由图8可知:牵引比越大则货物相对加速度越大,货物对飞机的干扰时间越短,导致迎角峰值越小,与胡兆丰等的仿真结论<sup>[9-11]</sup>相同;牵引比越大时则干扰力矩偏差增大,不同牵引力夹角模型动态响应误差越大,因此,在进行大牵引比空投时,应综合考虑牵引力大小与方向对空投动态响应的影响。

### 2.3.4 不同货物装载位置的模型误差分析

在空投准备阶段,确定货物的初始安装位置对于运输机的动力学特性影响同样是一个关键条件。货物装载位置不同导致货物对飞机的干扰力矩不同,从而影响飞机的俯仰状态响应。为分析并验证

货物的不同初始安装位置对飞机的影响,更加安全高效地完成航空运输物资的空投任务,采用相同的仿真参数,并假设货物初始安装位置分别位于飞机质心前 2 m( $r=-2$  m)、质心( $r=0$ )、质心后 2 m( $r=2$  m),仿真结果见图 9。

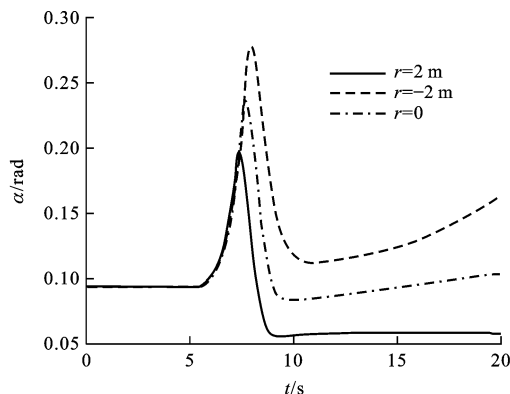


图 9 不同货物装载位置的迎角响应曲线

Fig. 9 Corresponding curves of AOA with different loading positions of cargo

由图 9 可见:在其他初始条件不变的情况下,随货物安装离舱门的距离的增加,飞机迎角响应峰值逐渐增大,表明货物安装位置越靠前,对飞机纵向的状态影响越显著。这主要是由于货物安装位置越靠前,货物在舱内导轨运动的时间就越长,飞机受干扰时间越长,飞机的迎角响应峰值就越大,这一点在本质上和牵引比对飞机动态响应的影响趋势是一致的。因此,空投过程建模应考虑货物装载位置的影响,同时,在实际的空投操作中,在不影响任务完成的前提下应该尽可能将货物安装在靠近出舱口放置,以便于减小货物运动对飞机的不良影响,提高空投的安全性。

### 3 结 语

在深入研究运输机空投系统“飞机-货物”耦合运动关系与当前运输机空投货物的动力学建模现状的基础上,确立了更加易于分析飞机与货物之间作用关系的分离体建模方法。以飞机和货物之间的相互作用关系为切入点,分别对货物和飞机进行受力分析。在以货物为研究对象时,综合考虑了大小不可忽略的刚体货物、舱内地板角、牵引伞作用方向与大小等多种影响因素,建立了货物运动加速度未知、牵引伞作用方向不定的更加贴近工程实际的运输机空投动力学模型。通过与当前关于空投运输机动力学建模的 2 种常见模型的仿真对比可以看出本文模型具有更高的精确度和工程参考价值。与现有的模

型相比,本文模型能够综合表示单件货物空投、多件货物连续空投、牵引空投和重力空投等多种空投模式,具有良好的可扩展性。

通过对影响空投运输机动态响应的牵引比、牵引伞作用力方向、货物初始安装位置等要素进行了定量分析,在验证模型可靠性的同时也为实际的空投提供了参考:在不影响物资运输任务的前提下应尽可能增大牵引伞的牵引比,以减小货物对飞机的影响;货物的初始安装位置应尽量靠近出舱口;在空投过程中,货物受到的牵引力方向并非保持不变。本文考虑了实际工程中的复杂因素,所建立的模型将为空投过程模拟试验系统开发、控制律设计与飞行安全性评估奠定基础,并可为安全高效地完成物资空投提供重要的理论依据。

### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 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 Guang-yi. Status and trends of the large foreign military cargo planes[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005, 12(9): 36-43. (in Chinese)
- [2] 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 Heng-zuo. Brief discussion on the development of Chinese airlifters[J]. Aeronautical Science and Technology, 2006, 9(2): 3-5. (in Chinese)
- [3] ZHANG Hui-yuan, SHI Zhong-ke. Variable structure control of catastrophic course in airdropping heavy cargo[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(5): 520-527.
- [4] ZHANG Jiu-xing, XU Hao-jun, ZHANG Deng-cheng, et al. Safety modeling and simulation of multi-factor coupling heavy-equipment airdrop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(5): 1062-1069.
- [5] DESABRAIS K J, RILEY J, SADECK J, et al. Low-cost high-altitude low-opening cargo airdrop systems[J]. Journal of Aircraft, 2012, 49(1): 349-354.
- [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 Zhao-feng, XIAO Ye-lun. Research method for the motion of an aircraft with a cargo moving inside its cabin[R]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980. (in Chinese)
- [7] 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 Bai-xian. The longitudinal dynamic analysis of Y-8 airplane in continuous air-drop[J]. Flight Dynamics, 1993, 11(1): 80-87. (in Chinese)
- [8] CHEN Jie, SHI Zhong-ke. Aircraft modeling and simulation

- with cargo moving inside[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(2): 191-197.
- [9] 胡兆丰,肖业伦. “运八”飞机投放重型货物问题的数值计算和模拟试验结果[R]. 北京:北京航空学院,1980.
- HU Zhao-feng, XIAO Ye-lun. Numerical calculation and simulation experiment results of Y-8 airplane with heavy cargo airdrop[R]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980. (in Chinese)
- [10] 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 Shao-xiu, DING Chong-shun. The study on the dynamic characteristics of aircraft with cargos moving in its cargo cabin[J]. Flight Dynamics, 1992, 10(1): 77-86. (in Chinese)
- [11] 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 Bao-ting. A real-time simulation software of sequential airdropping of cargoes from aircraft and its application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, 20(1): 71-77. (in Chinese)
- [12] 柯 鹏,杨春信. 货台空投系统的三维动画仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(5):1253-1256.
- KE Peng, YANG Chun-xin. Heavy cargo airdrop simulation with 3D animation[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(5): 1253-1256. (in Chinese)
- [13] 赖志宏. 飞机空投运动响应的数学模型[R]. 北京:北京航空学院,1986.
- LAI Zhi-hong. Mathematical model of aircraft airdrop motion response[R]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986. (in Chinese)
- [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 Jing, SHEN Gong-zhang, YANG Ling-yu. 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. (in Chinese)
- [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):54-57,62.
- YANG Xiao-ke, YANG Ling-yu, ZHANG Jing, 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, 62. (in Chinese)
- [16] CHEN Jie, MA Cun-bao, SONG Dong. Kinetic characteristics analysis of aircraft during heavy cargo airdrop[J]. International Journal of Automation and Computing, 2014, 11(3): 313-319.
- [17] CHEN Jie, SHI Zhong-ke. Flight controller design of transport airdrop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 600-605.
- [18] 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):579-583,586.
- FENG Yan-li, SHI Zhong-ke. Robust dynamic inversion control for cargo extraction during airdrop at super low attitude[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(5): 579-583, 586. (in Chinese)
- [19] LIU Ri, SUN Xiu-xia, DONG Wen-han. Dynamics modeling and control of a transport aircraft for ultra-low altitude airdrop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(2): 478-487.
- [20] LIU Ri, SUN Xiu-xia, DONG Wen-han, et al. Projection-based adaptive backstepping control of a transport aircraft for heavyweight airdrop [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2015, 2015(1): 1-10.
- [21] 孙秀霞,常允刚,董文瀚,等. 最优控制  $L_1$  自适应在重装空投纵向控制器设计中的应用[J]. 控制理论与应用,2015,32(5): 598-606.
- SUN Xiu-xia, CHANG Yun-gang, DONG Wen-han, et al. Design of longitudinal controller for flight in heavy-weight airdrop based on optimal control and  $L_1$  adaptive [J]. Control Theory and Applications, 2015, 32(5): 598-606. (in Chinese)
- [22] 王亚伟,杨春信,柯 鹏,等. 货物空投系统自动脱离锁成功脱离概率分析[J]. 航空学报,2010,31(2):265-270.
- WANG Ya-wei, YANG Chun-xin, KE Peng, et al. Probability analysis on parachute ground release for cargo airdrop system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(2): 265-270. (in Chinese)
- [23] 刘晓韵,王 静,李宇明. 基于反馈线性化/LQR方法的高超声速飞行器姿态控制系统设计[J]. 航天控制,2014,32(4):37-41.
- LIU Xiao-yun, WANG Jing, LI Yu-ming. The hypersonic vehicle attitude control based on feedback linearization/LQR method[J]. Aerospace Control, 2014, 32(4): 37-41. (in Chinese)
- [24] 刘燕斌. 高超声速飞行器建模及其先进飞行控制机理的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- LIU Yan-bin. Research on modeling and advanced flight control theories for hypersonic vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)