

# 基于模型的空投任务飞行品质 试飞设计及评估

李雅静<sup>1</sup>, 申晓明<sup>2</sup>

(1. 中国飞行试验研究院 飞机所, 西安 710089;

2. 中国航空工业第一飞机设计研究院 总体气动所, 西安 710089)

**摘要:** 重装空投飞行试验过程中, 货物运动会导致飞机姿态变化过大, 影响飞行安全; 为了保证重装空投飞行试验安全, 建立了空投过程数学模型, 预测空投过程飞机响应、使用“预测→验证→比较→预测”的方法指导飞行试验循序渐进实施; 在空投试飞前, 分析空投货物时飞机响应特点, 确定载机平台飞行品质试飞内容, 评价空投构型飞行品质, 作为空投飞行试验的前提; 对于空投任务飞行试验设计从试飞状态选择、试飞员操纵方法设计两方面开展研究, 以飞机姿态控制为目标, 确定重力空投、牵引空投过程飞机飞行状态、给出飞行员操纵建议, 设计了空投过程评价要素表, 形成面向空投任务的飞行试验设计及飞行品质评价技术; 提出的基于模型的试验设计方法及飞行品质评价方法可以有效保障空投任务执行, 并全面充分地评价空投任务下的飞行品质。

**关键词:** 空投任务; 飞行试验; 飞行品质评估; 重力空投; 牵引空投

## Design and Evaluation on Flight Quality Test of Airdrop Mission Based on the Model

LI Yajing<sup>1</sup>, SHEN Xiaoming<sup>2</sup>

(1. The Aircraft Research Institute, Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China;

2. The First Aircraft Institute, AVIC, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** In the process of heavy load airdrop flight test, the movement of cargo will lead to excessive changes of aircraft attitude, which affects flight safety. In order to ensure the safety of heavy load airdrop flight test, a mathematical model of the airdrop system is built to predict aircraft response during airdrop process, the “prediction validation comparison prediction” method is used to gradually guide flight tests, analyze the aircraft's response characteristics with cargo airdropping before airdrop test flights, determine the flight quality and test flight of the carrier platform, and evaluate the quality of airdrop flight as a prerequisite for airdrop flight testing. The research on airdrop flight design is conducted from two aspects; the section of test flight states and the control methods of test pilots, The aircraft attitude control is taken as the target to determine the test flight status of the gravity airdrop and extraction airdrop, give the pilot manipulation suggestions, design the table of airdrop process evaluation elements, and achieve the flight quality flight test design and evaluation technology for the airdrop mission. The proposed design and flight quality evaluation method based the model provides a technical support for the execution of airdrop missions, and fully evaluate the flight quality of airdrop missions.

**Keywords:** airdrop mission; flight test; flight quality evaluation; gravity airdrop; extraction airdrop

## 0 引言

空投功能试验验证是军用运输机试飞过程中的重点和难点, 尤其是飞机在空投模式下, 从打开舱门货物开始移动, 到最终投出货物的过程中, 飞机的操纵性稳定性会发生很大的变化, 从而给空投试飞带来了很大的风险, 甚至造成严重的机毁人亡事件。

国外针对空投任务的建模仿真和飞行试验都有较为全

面深入的技术分析, 在建模仿真方面文献 [1] 为货物出舱过程建立了统一的动力学模型, 通过仿真分析了货物出舱过程对飞机俯仰姿态的影响, 文中对出舱时间及安全距离参数同牵引比、货物位置和飞机姿态的关系进行了讨论, 表明飞机姿态是空投过程中的重要控制参数。在飞行试验方面, 国外开展了大量研究, 文献 [2] 中对运输机空投试验计划、试验实施流程给出了比较明确的规定, 但对于空

收稿日期: 2023-09-03; 修回日期: 2023-10-12。

作者简介: 李雅静(1985-), 女, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 李雅静, 申晓明. 基于模型的空投任务飞行品质试飞设计及评估[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 308-313.

投时飞机飞行品质试验设计及评价并没有详细地阐述。文献 [3] 中对 C130-E 空投飞行试验过程进行大量飞行测试,分析了牵引比、襟翼位置、空投速度、重心变化及风切变等因素对空投过程飞行性能的影响。

近年空投技术在国内引起了很多研究学者的关注,在空投对飞行品质影响方面主要集中在理论、模型仿真研究,通过仿真对货物出舱过程建立统一的动力学模型<sup>[4-5]</sup>,通过仿真分析货物出舱对飞机俯仰姿态的影响,并引入出舱时间评估出舱过程对空投精度影响等。文献 [6] 设计了连投模式对飞机影响的分析模型,并通过实例计算分析了连投模式对空投物运动状态以及飞机的影响程度,分析了重装连投中因货物连续出舱运动对飞机状态的影响,实现了货物运动过程对飞机影响的可视化。

在空投飞行试验方面,国内相关文献较少,现行飞行品质国军标 GJB185-1986<sup>[7]</sup> 中对空投只有飞行阶段要求和一些开环指标要求,并没有明确提出面向任务的飞行品质评价方法。

综上所述,对于全新设计的运输机和空投系统,我国之前在空投过程中飞行品质试飞方面还没有形成一整套完善的理论研究和试验技术体系。为了保证重装空投飞行试验安全,建立了空投过程数学模型,预测空投过程飞机响应、使用“预测→验证→比较→预测”的方法指导飞行试验循序渐进实施;在空投试飞前,分析空投货物时飞机响应特点,确定载机平台飞行品质试飞内容,评价空投构型飞行品质,作为空投飞行试验的前提;对于空投任务飞行试验设计从试飞状态选择、试飞员操纵方法设计两方面开展研究,以飞机姿态控制为目标,确定重力空投、牵引空投过程飞机飞行状态、给出飞行员操纵建议,设计了空投过程评价要素表,形成面向空投任务的飞行试验设计及飞行品质评价技术,填补我国在空投飞行试验设计及飞行品质评估技术上的空白。

## 1 空投构型飞行品质试飞设计

在空投前,评估飞机空投构型操稳特性,飞行品质涉及空投过程中飞行安全。运输机空投构型下首先要满足飞行品质规范相关要求。重力空投和牵引空投都是货物在舱内运动到出舱的过程,对载机平台的影响类似,只是在飞行员操纵的过程有差别,在空投前飞机操稳评估中试飞内容相同。

GJB185-1986 有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质和美军军标 MIL-STD-1797A 中对空投构型下飞行品质要求一致,运输机空投属于轰运类(HY)航行阶段即 B 种飞行阶段。

空投过程是受扰动过程,需要考虑纵向和横航向运动模态特性、考虑稳定性和操纵性。空投包线范围内检查开舱门构型飞机飞行品质。

1) 纵向稳定性要求:对空投过程纵向稳定性的评估主要为静稳定性;

2) 纵向操纵性要求:评估操纵期望参数飞行品质

等级;

3) 空投过程中偏航运动会使飞机偏离预定航线,影响空投精度,评估横侧运动的飞行品质,要考虑稳定性和运动模态特性两方面;

4) 货物在移动并投出的过程中由于运动的不对称还会对飞机产生滚转或偏航扰动,空投构型下还需要检查滚转操纵效能、滚转操纵力及滚转操纵力限制,保证开门情况下的飞行横向操纵能力。

以上确定了投物前需要进行飞行品质评估的最小集合,完成飞机平台空投构型的飞行品质评估保证了空投任务安全性。

## 2 空投过程飞机响应分析

### 2.1 基于空投任务模型的空投响应预测

以牛顿多体动力学方法,分别分析飞机与运动货物所受的力与力矩。考虑到货物运动与货舱地板平行,在飞机机体轴系建立飞机-货物耦合的飞行动力学与运动学方程组,进行仿真模拟<sup>[8-22]</sup>。

选择分离法,将货物和飞机看作两个分离的子系统,分别对两者进行受力分析,得出他们之间的相互作用力,从而建立飞机的运动方程,货物运动对飞机产生的影响可以看作飞机受到的扰动。

货物在舱内移动过程中受到的力有<sup>[10]</sup>:牵引力、物体与货舱地板的摩擦力、飞机给货物的约束力及货物自身重力。

设货物质量为  $m_b$ , 飞机速度在机体轴上的分量为  $(u, v, \omega)$ , 角速度分量为  $(p, q, r)$ , 货物相对于飞机的速度为  $(v_b, 0, 0)$ , 加速度为  $(a_b, 0, 0)$ , 那么货物速度  $\vec{V}_{bB}$  在机体标系下的分量为  $(u+v_b, v, \omega)$ , 角速度在机体坐标系下分量是  $(p, q, r)$ 。根据货物力平衡方程可得货物对飞机的扰动力如下:

$$\begin{aligned} F_{N_x} &= -F_p \cos\alpha - m_b g \sin\theta - F_f + m_b(\dot{v}_r - \omega q - a_b - \dot{u}) \\ F_{N_y} &= m_b g \cos\theta \sin\varphi + m_b(\dot{\omega} p - \dot{u} r - v_b r - \dot{v}) \\ F_{N_z} &= -F_p \sin\alpha + m_b g \cos\theta \cos\varphi + m_b(\dot{u} q - \dot{v} p + v_b q - \dot{\omega}) \end{aligned} \quad (1)$$

货物离机前从飞机中心位置开始一直向后移动,因此它对飞机产生的是一个逐渐变化的扰动力矩,设3个方向的扰动力矩分别为  $L_t, M_t, N_t$ , 货物在机体坐标系下的坐标为  $(d, 0, 0)$ , 则:

$$\begin{aligned} L_t &= yF_{N_z} - zF_{N_y} = 0 \\ M_t &= zF_{N_x} - xF_{N_z} = \\ &= -d[m_b g \cos\theta \cos\varphi + m_b(\dot{u} q - \dot{v} p + v_b q - \dot{\omega})] \\ N_t &= xF_{N_y} - yF_{N_x} = \\ &= d[m_b g \cos\theta \sin\varphi + m_b(\dot{\omega} p - \dot{u} r - v_b r - \dot{v})] \end{aligned} \quad (2)$$

货物舱内移动过程飞机模型,空投飞机运动方程跟常规飞机相比只是多了一个货物运动产生的扰动项。设空投飞机空机质量为  $m_a$ , 领  $m_c = m_a + m_b$ , 运用牛顿定律,可得

机体坐标系下空投飞机力平衡方程如下：

$$\begin{aligned}
 m_c \dot{u} &= T \cos \varphi_T + A \sin \alpha - W \cos \alpha \cos \beta - m_c g \sin \theta + \\
 &\quad m_c v_r - m_w q - F_p \cos \alpha - m_b a_b \\
 m_c \dot{v} &= -W \sin \beta + Q \cos \beta + m_c g \cos \theta \sin \varphi + m_c w p - \\
 &\quad m_c u r + m_b v_b r \\
 m_c \dot{w} &= -T \sin \varphi_T - A \cos \alpha - W \sin \alpha \cos \beta - Q \sin \alpha \sin \beta + \\
 &\quad m_c g \cos \theta \cos \varphi + m_c u q - m_c v p - F_p \sin \alpha - m_b v_b q \quad (3)
 \end{aligned}$$

空投飞机力矩平衡方程表达式等同于常规飞机及力矩方程，不同的是其质心受到的力矩除了气动矩  $L_b$ ，推力矩  $L_r$ ，还包括货物对飞机产生的扰动力矩  $L_i$ ，其中  $L_i$  前面已经推导出具体表达式， $L_b$  和  $L_r$  与常规飞机力矩模型相同。

货物离机后，空投飞机的质量、质心及转动惯量产生突然变化，从力学上讲等同于给飞机尾部又突然施加一个向上的推力。此时，空投系统变为常规飞机系统，因此这个阶段的数学模型即为常规飞机的六自由度模型，这一点在仿真阶段容易实现，即货物离机后空投系统数学模型中的  $m_b = 0$ 。

在牵引伞已确定的条件下，空投过程典型的影响因素包括飞行速度、货物质量，将飞行速度和货物重量的影响均等效到牵引比参数上进而进行影响因素分析。

一定速度时，机组不施加操纵输入、不同货物质量（对应特定牵引比），货物质量越大牵引比越小，空投过程的典型参数增量结果如图 1 所示。

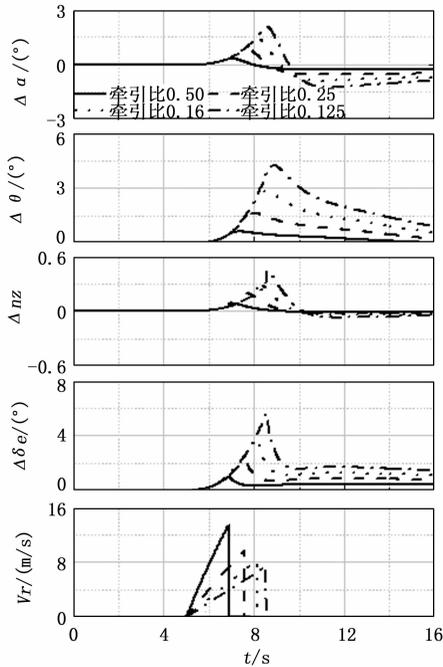


图 1 不同货物重量飞机与货物典型状态量增量

如图 1 所示，第 0~5 s 保持稳定飞行并打开牵引伞，第 5 s 货物开始运动。图中： $\Delta\alpha$  为迎角变化量； $\Delta\theta$  为俯仰角变化量； $\Delta n_z$  为法向过载变化量； $\Delta\delta e$  为升降舵变化量； $V_r$  为货物相对飞机向后运动的速度。

一定货物质量时，机组不施加操纵输入、不同飞行速度（对应特定牵引比），飞行速度越大牵引比越大，空投过程的典型参数增量结果如图 2 所示。第 0~5 s 保持稳定飞行并打开牵引伞，第 5 s 货物开始运动。

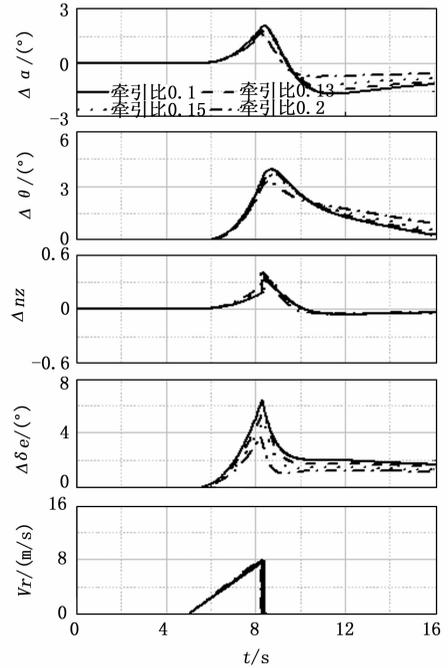


图 2 不同空投飞行速度飞机与货物典型状态量增量

空投开始以后，货物先向飞机机身后部的舱门移动，然后从出舱口投出。当货物向出舱口移动时并在到达出舱口之前时，为保持载机的定直平飞状态，驾驶员需要推杆，以抑制飞机俯仰角的增加。当货物到达出舱口并投出时，为保持载机的平衡状态，驾驶员需要拉杆，以抑制飞机俯仰角的减小。根据仿真结果，货物重量、空投速度不同对空投飞机响应特性影响可概括为：

- 1) 飞行速度增加是有利的，空投牵引比增加，起始俯仰角明显减小，空投过程飞机典型状态量的增量略减小；
- 2) 货物质量增加是不利的，牵引比明显减小，起始俯仰角略增加，空投过程飞机典型状态量的增量明显增加；

通常大质量货物、小空投速度为严酷工况。小速度空投大质量货物时，舱内运动时间长，明显增加飞机俯仰角。

### 2.2 空投过程俯仰角控制

俯仰角保持是空投段飞行员主要任务之一。正的俯仰角时货物重力产生一个沿滑轨出舱方向的分离，同时由于垂直滑轨方向的分力减小使摩擦力有所减小，有利于货物出舱过程。希望空投段飞机俯仰角为正值，但并非越大越好。空投段俯仰角应控制在恰当的范围内。

对于重力空投，姿态要求为正，可以使货物由重力作用出舱，但姿态不可太大，姿态太大会导致货物被“倾倒”出舱，货物间存在交叉干扰，不利于货物顺利着陆。根据出舱速度确定俯仰姿态最优值。

对于牵引空投,空投前配平姿态和空投过程中姿态需要控制在一定范围,不能过大或过小。若空投姿态过大,有可能导致牵引伞绳打到机尾,损坏飞机结构。若空投姿态过小甚至为负姿态时不利于货物出舱,一方面在该状态下,当牵引伞牵引力不足以克服货物重力时,有可能出现货物拖着牵引伞向货舱内部移动的情况,此时,有可能在货台的撞击作用下损坏飞机结构;另一方面,假设牵引伞可牵引货物出舱,则在该过程中,伞绳会在牵引力作用下紧贴在货桥边缘左右摆动,有可能出现伞绳被割断的情况,使得货物快速移向货舱内部,损坏飞机结构。所以根据牵引伞牵引力、飞机与牵引伞几何关系,确定空投俯仰姿态范围。

根据俯仰姿态角限制,对于重力空投(一般小件连投使用),在空投过程中要求精确地保持飞机的姿态,需要持续操纵飞机,货物舱内后移时推杆,在货物出舱后稍拉杆,以期精确保持姿态。对于牵引空投(中间、大件、重装单投或联投空投使用),在空投过程中,只要姿态不超过限制即可,在投物重量较小时引起飞机姿态变化量较小时可以不进行干预,但对于较大重量货物空投,引起姿态变化较大可能超过姿态限制时,需要进行干预,在货物舱内后移时适量推杆,在货物出舱后及时拉杆。

### 2.3 空投过程滚转角控制

飞机滚转会影晌偏航运动,使飞机偏离预定航线,影响精度,空投段希望控制滚转角 $0^\circ$ ,实际操纵过程中存在控制误差,建议滚转角控制在 $5^\circ$ 以内。

## 3 空投任务飞行试验设计技术

飞机飞行试验方法设计一般包括两方面:1)试飞状态选择;2)试飞员操纵方法设计。对于空投任务飞行试验设计也从两方面开展研究。

### 3.1 空投任务飞机状态选择

空投任务的襟缝翼构型和速度的选择都以空投姿态控制为目标。为了保证货物能够顺利出舱,并且不超出飞机姿态角、迎角等限制值,空投前保持稳定且合适的配平姿态角尤其重要。

对于重力空投,空投重量较小,空投过程对飞机姿态影响较小,飞行员给予一定操纵干预,即可保持飞机飞行状态,配平状态要求不严格。

对于牵引空投,由于空投重量较大,空投过程对飞机姿态影响大,特别需要进行初始配平姿态设计。

对于牵引空投,由于空投重量较大,空投过程对飞机姿态影响大,若初始配平姿态较大,则随着货物出舱引起的飞机抬头增量的增加,使得空投姿态过大,超出俯仰姿态的限制,当飞机处于较大负姿态时不利于货物出舱。对于试验机,空投时姿态角要求控制在一定范围之内,为了将姿态角控制在要求的范围之内,就需要合理选择配平时的姿态,也就是要合理选择襟缝翼构型和速度。

空投中考虑载机状态的同时,还需将影响载机安全的空投系统也纳入分析范畴,而空投系统也有其自身的使用限制条件和包线。综合考虑影响飞机姿态的变量,即飞机重量、飞行速度和襟缝翼构形,以及姿态角限制、空投包线、货台使用包线等多个因素,设计了空投试验点选取矩阵并绘制成图,见图3,以便选取最优的试验点用于牵引空投试飞。图3中,横坐标表示飞机空投时的表速,纵坐标表示飞机平飞配平迎角,亦是平飞姿态角;图3中给出不同襟翼角度、不同重量、不同速度下的飞机配平姿态角,左右垂直虚线表示货台使用的速度包线,上下水平虚线表示姿态角限制范围。

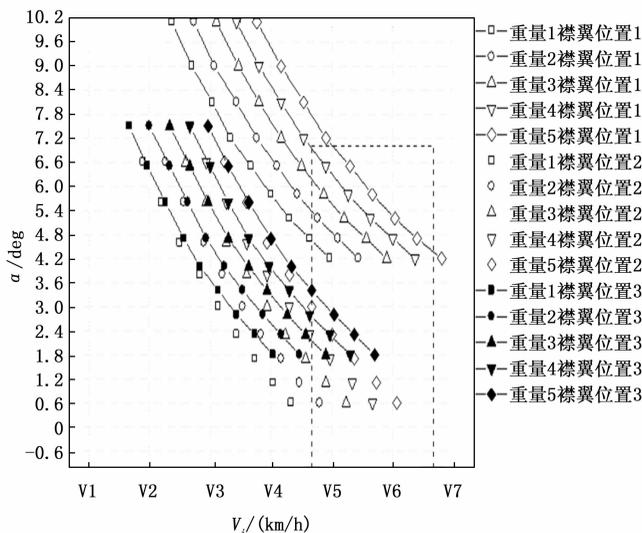


图3 空投试验点选取

当空投表速和飞机起飞重量一定时,可根据图3先确定合适的空投襟翼角度,然后通过飞机耗油特性来控制飞机空投时的总重量,从而达到将空投平飞姿态控制在虚框包线范围内的目的,使货物能够以合适的角度顺利出舱。该图同时也可用于指导空投包线扩展试飞。

### 3.2 空投时飞行员操纵建议

大多数情况下,如果明确了飞机构型、货台重量、牵引比、重心和空投速度,就可以在起飞前预测不操纵情况下飞机的姿态响应。根据预测结果给出空投操纵建议,可有效降低试飞风险。

由于飞机的电传飞控系统有自动配平和姿态保持功能,在较小的扰动下飞机可自动保持平衡,不需要操纵,但在大的扰动下则需要飞行员人工干预,对于不同重量下空投操纵建议,使用“预测→验证→比较→预测”的方法,仿真数据结合轻重量过渡试验,预测下一重量下空投操纵建议。

考虑空投前的配平俯仰角,机组无操纵输入时,空投过程可能存在俯仰角超出限制值的情况。

由于空投影响因素多,对于不同重量货物,操纵建议为:可确定一个空投前配平俯仰角(该开始值距俯仰角限

制值有一定余量), 空投过程重点监控俯仰角数值及变化趋势, 接近或达到开始值时进行操纵, 避免俯仰角超出限制。

空投试飞时, 空投货物重量由小到大逐步过渡, 利用过渡重量下飞行试验飞机姿态变化数据与仿真预测对比, 仿真与试验结果一致, 预测下一重量空投姿态变化, 预测姿态变化加上初始配平姿态接近或大于限制俯仰角, 建议适当操纵干预保证飞机空投姿态控制在要求的范围内, 否则可以不人为干预。具体的确定流程如图 4 所示。

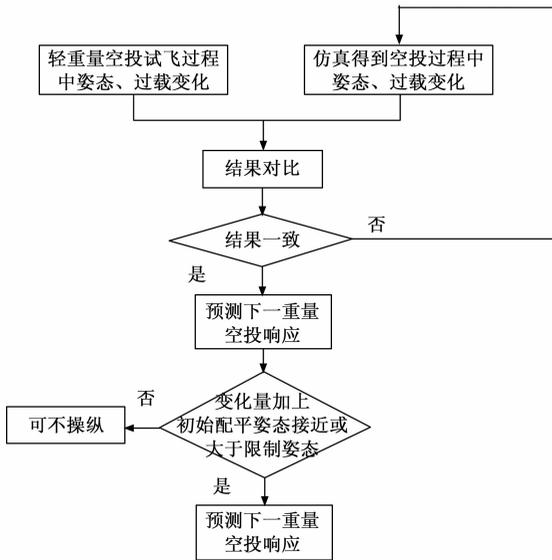


图 4 空投操纵建议确定流程

空投过程仿真除了需要计算得到高度、速度、姿态、过载等参数变化, 还需要给出飞机装载货物的重心范围、飞机空投货物全机重心最后点位置、货物卡滞在最临界状态的安全性及操纵建议<sup>[23]</sup>等。

## 4 面向空投任务的飞行品质评估

### 4.1 空投阶段品质评估

由于货物空投会给飞机带来纵向和横向扰动, 改变飞机空投初始时刻的平衡状态, 为保证飞机和空投任务的安全, 必须通过驾驶员或者飞机控制系统操纵飞机消除空投货物引起的飞行状态扰动量, 如俯仰角和滚转角等。空投时, 较快的货物移动过程、较低的空投高度和较高飞行速度有利于空投过程的进行和载机的安全性。装载的货物越重, 飞机运动状态变化越剧烈, 飞机的俯仰角和迎角的峰值越大。

因此, 运输机必须具有对扰动的抵抗能力和恢复能力, 在保证飞行安全的前提下提高空投任务的完成能力, 这也是评估空投过程飞行品质的重要依据。

此外, GJB185-1986 有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质和美军表 MIL-STD-1797A 中对货物投放时的品质要求必须考虑在内, 在货物投放时不应引起抖振、配平变化或其他对飞机在相应飞行状态下的战术效能有所损害的特性, 所

以空投过程需要关注过载和配平量。

飞行品质标准 GJB185-1986 提出的飞行品质无法完全反映空投过程中飞行品质变化特点, 也无法全面评估空投过程的飞行品质, 需要对评估体系进行完善。运输机必须具有对空投过程干扰的抵抗能力和恢复能力, 才保证飞行安全的前提下提高空投任务的完成能力, 这也是评估空投过程飞行品质的重要依据, 运输机在空投阶段的任务性能可用各飞行状态量的变化范围来衡量, 飞行品质评估体现在飞机空投过程中是否能将飞机控制在一定状态的能力。关键参数如下:

- 1) 对应飞机重量, 基础信息;
- 2) 速度变化量, 飞行速度降低不导致失速;
- 3) 姿态变化量, 姿态保持在要求的范围的能力;
- 4) 出舱时间, 对应高度、速度、姿态下货物移动能力, 一般单个货物出舱时间 5 s 以内;
- 5) 操纵补偿量, 操纵量不能太大, 留有操纵余量, 建议不大于操纵总行程的 75%;
- 6) 过载变化量, 过载变化不能太大, 一般不大于 0.3。

上述状态量是否能易于控制在一定范围, 标志着飞机空投阶段的任务能力。总结重力空投和牵引空投关注的关键参数, 不同重量空投过程中通过飞行员干预是否可以控制飞机姿态保持在要求的范围内, 检查飞机的操纵能力。

### 4.2 空投任务飞机飞行品质评价

首先以重力连投为例进行分析, 记录表 1 中的 12 项关键参数, 以姿态控制为目标, 在要求的空投重量下, 确定合适的襟缝翼构型和配平速度, 对于单个小件货物, 出舱时间较短, 连投货物出舱时间视连投件数而定。检查驾驶员操纵补偿、升降舵使用量是否合适且留有足够余量。试验机一次连投过程中, 推拉杆量不超总操纵量的 1/5, 姿态可保持在 3~4°范围, 升降舵用量不超 3°, 不超舵面偏度总行程的 20%, 飞机过载变化在 0.3 以内, 说明飞机有足够的机动能保证空投安全。

表 1 重力连投关键参数表

序号	关键参数
1	空投时飞机重量
2	襟缝翼构型和计划空投速度
3	货物出舱时间
4	驾驶员杆位移补偿量
5	气压高度变化量 $\Delta H_p$
6	指示空速变化量 $\Delta V_i$
7	俯仰角变化量 $\Delta \theta$
8	配平迎角 $\alpha_0$
9	迎角变化量 $\Delta \alpha$
10	法向过载变化量 $\Delta n_z$
11	升降舵使用量

对于牵引空投, 特点是空投重量较大, 记录表格 2 中所有 14 项关键参数, 以姿态控制为目标, 在要求的空投重

量下,确定合适的襟缝翼构型和配平速度,对于大件或重装牵引空投出舱时间需要重点关注,重装单投的货物出舱时间不大于5 s。检查驾驶员操纵补偿、升降舵使用量是否合适且留有足够余量,某次单投,飞行员未进行操纵补偿,姿态可控制在 $0\sim 6^\circ$ 范围,升降舵用量不超 $3^\circ$ ,不超舵面总行程的20%,过载变化可控制在0.3范围内,说明飞机有足够的机动能力保证空投安全。

表2 牵引空投关键参数表

序号	关键参数
1	空投时飞机重量
2	构形及计划空投速度
3	牵引伞落下降到货物移动时间
4	货物移动到货物出舱时间
5	前一货物出舱到后一货物移动时间
6	货物出舱速度
7	驾驶员杆位移补偿量
8	气压高度变化量 $\Delta H\rho$
9	指示空速变化量 $\Delta V_i$
10	配平俯仰角 $\theta_0$
11	俯仰角变化量 $\Delta\theta$
12	配平迎角 $\alpha_0$
13	迎角变化量 $\Delta\alpha$
14	法向过载变化量 $\Delta n_z$
15	升降舵使用量

## 5 结束语

针对空投任务进行空投前操稳特性试飞设计及空投过程中飞行品质评估方法,利用文中提出的试验状态选取方法、飞行操纵建议方法,完成试验机空投飞行试验。

在空投过程中,以姿态保持为目标,总结重力空投、牵引空投过程飞机状态选择、操纵建议、空投过程品质评估方法,分析关键特征参数,设计了空投过程评价表,形成基于模型的空投任务的试飞设计及飞行品质评估技术,结果表明提出的基于模型的试验设计方法及飞行品质评价方法可以有效保障空投任务执行,并全面充分评价空投任务下的飞行品质。

### 参考文献:

[1] KE P, YANG C X. Extraction phase simulation of cargo airdrop system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19 (4): 315-321.

[2] HUNTER H J. Developmental airdrop testing techniques and devices [R]. AGARD-AG-300- Vol6.

[3] MARTIN K, FRANZEN R, RAMIREZ R. Evaluation of the C-130E stability and control characteristics and the A/32H-4 dual rail cargo handling system during low level cargo deliveries [R]. FTC-TR-66-43, 1967.

[4] 欧阳绍修,丁重舜. 货物在舱内移动时飞机动态特性的研究

[J]. 飞行力学, 1992, 10 (1): 77-86.

[5] 黑文静,林浩. 重装空投出舱过程对飞机动态响应的影响 [J]. 系统仿真学报, 2008 (s2): 345-347.

[6] 张恒铭,王军. 重装空投中连投模式对飞机的影响分析 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (12): 24-28.

[7] 空军第八研究所,航空工业部. 有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质: GJB185-1986 [S]. 北京:国防科学技术工业委员会, 1986.

[8] 甘欣. 空投问题两种动力学方法的等价性研究 [J]. 力学与实践, 2014, 36 (5): 622-625.

[9] 张海妮,张培田,程伟豪. 两种空投建模方法的研究 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (16): 3896-3900.

[10] RAISSI K, SABZEHPAVAR M M. A single heavy load airdrop and its effect on a reversible flight control system. Aircraft Engineering and Aerospace Technology [J]. An International Journal, 2008, 80 (4): 400-407.

[11] 杨雨,陆宇平. 飞机超低空牵引空投动力学响应研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44 (3): 294-300.

[12] 韩艳铨,陆宇平. 运输机超低空空投重物动力学分析与H $\infty$ 鲁棒控制设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44 (1): 75-80.

[13] 杨妙升,屈香菊. 运输机空投的飞行力学建模及仿真 [J]. 飞行力学, 2010, 28 (3): 9-12.

[14] 韩艳铨,陆宇平. 重装空投动力学分析与控制方案研究 [J]. 飞行力学, 2011, 29 (3): 28-31.

[15] 贺磊,孙秀霞,董文瀚,等. 重装空投系统的动力学建模与控制律设计 [J]. 计算机应用, 2012, 32 (11): 3235-3239.

[16] 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): 315-321.

[17] ZHANG H Y, SHI Z K. Variable structure control of catastrophic course in airdropping heavy cargo [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22 (5): 520-527.

[18] CHEN J, SHI Z K. Aircraft modeling and simulation with cargo moving inside [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22 (2): 191-197.

[19] CHEN J, SHI Z K. Flight controller design of transport airdrop [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24 (5): 600-606.

[20] KE P, YANG C X, YANG X S. Extraction phase simulation of cargo airdrop system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19 (4): 315-321.

[21] 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): 54-62.

[22] 仇江,王鑫怡,高亚奎,等. 基于自然飞机的超低空重装空投特性分析 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24 (4): 933-937.

[23] 巩磊,何超,王博,等. 重装空投卡滞特情飞行控制及应急操纵方法研究 [J]. 飞行力学, 2018, 36 (4): 64-68.