

重型货物空投偏摆式脱离锁可靠度仿真分析

王晶,周燕飞,陈海松,朱方晨
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:脱离锁是重型货物空投系统中降落伞和货台分离的关键部件。针对一种偏摆式脱离锁的可靠度,分析其故障和失效原因,确定影响脱离锁脱离的主要参数;将影响参数用均匀分布和正态分布随机化,设计脱离锁的可靠度仿真试验方案;应用蒙特卡罗方法,进行多次仿真试验并对数据进行分布拟合,计算得到脱离锁的可靠度约为99%,同时得到脱离锁的主要影响参数。该方法可用于定量计算脱离锁的可靠度,为重型货物空投提供理论依据。

关键词:可靠度;脱离锁;仿真分析;蒙特卡罗方法;重型货物空投

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0091-04

Reliability Simulation Analysis on Parachute Ground Release for Heavy Cargo Airdrop

WANG Jing, ZHOU Yanfei, CHEN Haisong, ZHU Fangchen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Parachute ground release is the key to the separation of parachute and cargo platform in heavy cargo airdrop system. To study its reliability, the main parameters that influence release are determined based on the analysis of the failure reasons. Through randomizing influence parameters with uniform distribution and normal distribution, the reliability simulation test scheme of the parachute ground release is built. By Monte Carlo method, several reliability simulation tests are carried out and the data are fitted, with the reliability of the parachute ground release being calculated about 99%, and the main influence parameters being obtained as well. The research method as above can be used to calculate the reliability of the parachute ground release in quantity, which provides theoretical basis for heavy cargo airdrop.

Keywords: reliability; parachute ground release; simulation analysis; Monte Carlo method; heavy cargo airdrop

0 引言

重型货物空投指的是用降落伞等减速装置将重型货物从空中投送到指定区域的一种运输方式。重型货物空投系统主要由牵引伞、辅助引导伞、减速伞、主伞、连接绳、主伞脱离锁和货台等部分组成^[1]。其整个工作过程可分为牵引离机、减速稳降、着陆3个阶段。在着陆阶段,主伞脱离锁承担着及时分离降落伞和货台的任务。依据结构和工作原理的不同,主伞脱离锁主要分为弹簧式、杠杆式和偏摆式,本文的研究对象为偏摆式脱离锁。在实际的空投试验中,发生过着陆时主伞脱离锁失效,没有脱离,导致主伞拉翻货台并拖行,使货物受到挤压而变形等现象。因此,研究脱离锁的脱离可靠度,对于优化货物空投系统的结构,保障货物空投系统的安全是大有裨益的。

针对重型货物空投脱离锁,国内外的研究主要集中在结构性设计和强度校核等方面^[2-8],关于脱离问题的研究比较少。北京航空航天大学的王亚伟、杨春信等为了研究空投系统一种弹簧式自动脱离锁在较大地面风速条件下的成功脱离概率,基于着陆阶段系统动力学分析,建立了

脱离锁成功脱离概率分析模型,并依据均匀分布和正态分布两个随机模型对其进行了分析,得出了脱离锁成功脱离概率与设计开锁力和风速之间的定性关系^[9];南京航空航天的展亚南、丁阳春等为了研究货物空投系统脱离锁的空中解脱特性,引入定位销最小拉出力和解脱力两个特性指标,基于Adams动力学仿真分析,用控制变量法得出了定位销最小拉出力与弹簧预紧力、载荷重力、伞系统气动阻和空投速度等因素间的定性关系^[10]。文献[9-10]的研究对象为弹簧式脱离锁,研究内容为对影响脱离锁解脱因素的定性分析,并没有进一步研究脱离锁的可靠度水平。在此基础上,本文研究一种偏摆式脱离锁,由分析故障和失效原因确定影响脱离的主要参数,通过Adams动力学仿真试验,定量分析了脱离锁的可靠度水平。

1 脱离锁的结构和原理

该型偏摆式脱离锁主要由6个部分组成:主伞连接件、锁环体、控脱转体、控脱摆板、夹板和吊带连接件,如图1所示。

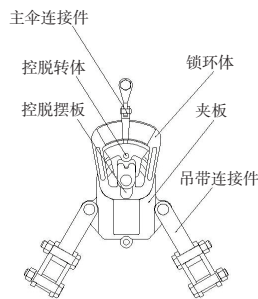


图1 脱离锁结构图

脱离锁在空投系统中的位置如图2所示,其中主伞连接件和降落伞连接绳相连,吊带连接件和吊带相连。

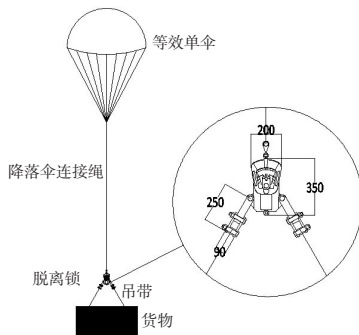


图2 脱离锁在空投系统中的安装位置

该型脱离锁的工作过程可以分为3个阶段:在牵引离机阶段,吊带处于松弛状态,脱离锁还未开始工作;在减速稳降阶段,脱离锁的作用是稳定连接主伞系统和货台系统,待计时撞击作动器计时周期结束后,主伞脱离锁保险装置打开,为着陆脱锁提供条件;在着陆阶段,在主伞拉力的作用下,锁环体受控脱摆板制约进行偏心旋转,旋转的同时带动控脱转体相对锁环体作向下移动,使锁环体和控脱摆板的间隙尺寸由9.5 mm增加到19.5 mm,如图3所示。最终主伞连接件与脱离锁分离,完成脱离。

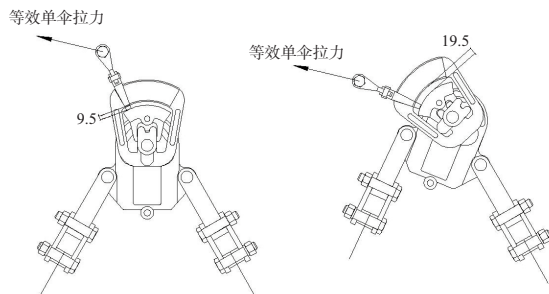


图3 脱离锁原理

2 基本假设

对空投系统及其工作环境进行如下假设:

1) 实际使用的降落伞是结构复杂的伞群,在仿真计算中用等效单伞的水平分力和垂直分力代替结构复杂的伞群;

2) 忽略着陆瞬间降落伞的结构变形,假定地面风为水平定常风,即产生的等效单伞力的大小和方向是固定的;

3) 空投质量在几吨到几十吨的范围内,但脱离锁作用于货物着陆后,空投质量对脱离锁没有影响,所以假定货物着陆后静止于地面;

4) 只考虑系统的平面运动。

3 动力学仿真建模

3.1 动力学模型

本文运用动力学分析的方法,对脱离锁的脱离过程进行数值计算,其原理如下:

1) 动力学方程的建立

首先选用刚体B的质心笛卡儿坐标及其欧拉角 $q = [x, y, z, \psi, \theta, \varphi]^T$ 作为广义坐标,然后用带拉格朗日乘子的朗格朗日第一类方程的能量形式得到系统的动力学方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j + \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{\partial \phi}{\partial q_j} \quad (1)$$

其中: T 是广义坐标的动能; q_j 是广义坐标; Q_j 是在广义坐标方向上的广义力;最后一项是在广义坐标方向上的约束反力。

2) 动力学方程的求解

对于微分-代数方程的求解,可以采用直接求解的方法,通过引入广义速率将所有二阶微分方程全部降阶为一阶微分方程。

$$\begin{cases} P = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \\ u = \dot{q} \\ \phi(q, t) = 0 \\ F = f(u, q, t) \\ \dot{P} - \frac{\partial T}{\partial q} + \phi_q^T \lambda + H^T F = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中: u 是广义速率; P 是广义动量; H 是外力的坐标转换矩阵。

方程组运用一阶向后差分公式对 (u, q, λ) 求导得Jacobian矩阵,然后利用Newton-Rapson求解得到结果。

3.2 仿真模型

利用三维建模软件SolidWorks建立脱离锁的模型,然后将其导入多体动力学仿真软件Adams,各构件之间依据真实运动状态添加约束关系;降落伞连接绳与主伞连接件之间添加旋转约束;主伞连接件两个钳形腿与锁环体、控脱转体之间添加接触约束;控脱摆板与夹板之间添加接触约束;锁环体与控脱摆板之间添加旋转副;控脱转体与夹板之间添加接触约束;控脱转体与锁环体之间添加接触约束;吊带连接件与夹板之间添加旋转约束;吊带连接件与吊带之间添加旋转约束;吊带与大地之间添加固定约束,如图4所示。

在Adams中对降落伞连接绳顶端施加等效单伞水平分力和垂直分力后,锁环体进行偏心旋转,旋转同时带动

控脱转体相对锁环体作向下移动,使锁环体和控脱摆板的间隙尺寸增大,最终主伞连接件与脱离锁分离,完成脱离,如图5所示。



图4 初始状态



图5 脱离状态

4 基于蒙特卡罗方法的可靠度仿真分析

由于依托实际空投试验的结果,以传统的脱离概率和置信区间的方法进行脱离锁可靠度计算,费时费力。因此本文依托 Adams 仿真软件,引入蒙特卡罗方法,进行可靠度计算。

4.1 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗方法是一种以概率论和数理统计等数学知识为基础,使用随机数解决实际问题的随机模拟方法。其主要原理为:将需要求解的工程问题和某个特定的概率模型联系起来,用计算机进行统计模拟或者抽样计算来获得问题的近似解。利用蒙特卡罗方法进行脱离锁可靠度仿真试验分析的具体步骤为:

- 1) 使用随机数发生器,为影响脱离的参数生成随机输入变量序列,这些序列服从特定的分布,同时需要确定抽样次数 N ,每次为一组;
- 2) 将随机变量作为结构功能的输入变量,进行 N 组仿真计算,得到 N 组计算数据;
- 3) 将 N 组计算结果绘制成分布直方图,利用可靠度计算软件拟合其分布函数,最后计算出其可靠度。

4.2 确定仿真模型的随机化参数

通过对故障发生后的“人机料法环”进行全面分析,脱离锁可能发生的故障失效原因主要包括:脱离锁装配错误、计时火工品未工作、保险未打开、脱离锁零件损伤产生的卡滞、着陆时吊带连接件双边受力、空投总质量过大、地面风速过大。

对故障原因进行逐一分析,失效原因定位于着陆时吊带连接件双边受力和地面风速过大。依据实际检查,同时考虑到仿真模型的复杂性、对设计改进的指导性以及对比验证的可操作性,随机化参数的选取如下:等效单伞的水平分力和垂直分力;控脱摆板和夹板之间的摩擦系数;锁环体和控脱摆板之间的摩擦系数;主伞连接件两个钳形腿和锁环体之间的摩擦系数;主伞连接件两个钳形腿和控脱转体之间的摩擦系数,如表1所示。

表1 随机参数的分布类型和分布参数

变量	含义	分布	均值	范围
DV_1	控脱摆板和夹板间的摩擦系数	正态	0.12	0.12±10%
DV_2	锁环体和控脱摆板间的摩擦系数	正态	0.12	0.12±10%
DV_3/kN	等效单伞垂直分力	均匀	—	[25,40]
DV_4/kN	等效单伞水平分力	均匀	—	[0,25]
DV_5	钳形腿1和锁环体间的摩擦系数	正态	0.15	0.15±10%
DV_6	钳形腿2和锁环体间的摩擦系数	正态	0.15	0.15±10%
DV_7	钳形腿1和控脱转体间的摩擦系数	正态	0.15	0.15±10%
DV_8	钳形腿2和控脱转体间的摩擦系数	正态	0.15	0.15±10%

4.3 可靠度仿真试验分析

为进行可靠度仿真试验分析,引入额定脱锁间距和最小间距两个特征指标。

额定脱锁间距:控脱摆板圆孔与锁环体内环上端的间距为 113.5 mm,脱离时锁环体与控脱转体之间的距离 s_1 为 19.5 mm,控脱转体上端与控脱转体转轴圆心的间距为 34 mm,故额定脱锁间距为 $113.5 - 19.5 - 34 = 60$ mm。

最小间距:着陆阶段在等效单伞力的作用下,控脱摆板圆孔与控脱转体转轴圆心间的距离 s_2 的最小值。

两个特征指标的示意如图6所示。脱离锁要完成分离主伞和货台的任务,锁环体与控脱转体间的距离必须足够释放主伞连接件钳形腿的下部,即锁环体与控脱转体间的距离 s_1 必须 > 19.5 mm,所以控脱摆板圆孔与控脱转体转轴圆心间的距离 s_2 必须 < 60 mm,故脱离锁的脱离判据为:最小间距 \leq 额定脱锁间距。

在 Adams 试验设计模块中设置 8 个随机参数,利用随机数发生器分别生成 500 个、1 000 个、2 000 个输入变量序列,设置控脱摆板圆孔与控脱转体转轴圆心间的距离 s_2 为测量对象,利用蒙特卡罗方法分别进行 500 次、1 000 次、2 000 次抽样仿真计算,得到最小间距的计算结果。将计算结果分别绘制频率分布直方图,如图7-图9所示。

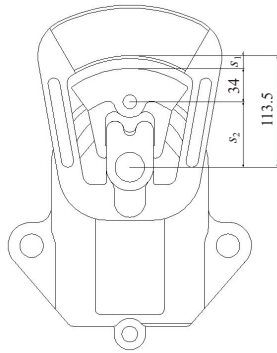


图 6 特征指标示意

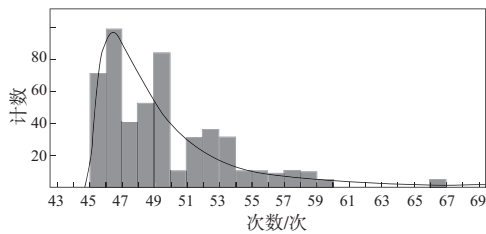


图 7 500 次脱离可靠度分析

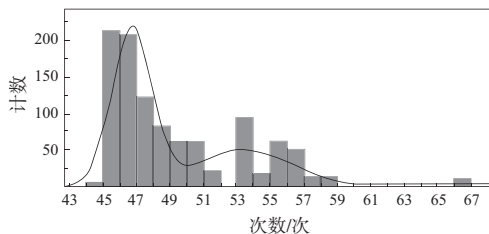


图 8 1 000 次脱离可靠度分析

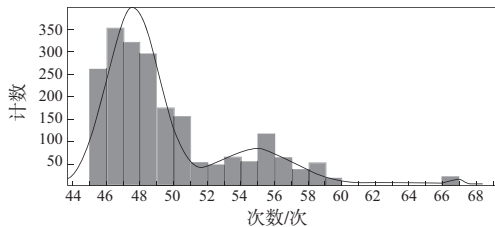


图 9 2 000 次脱离可靠度分析

拟合其分布状况,3 组仿真试验分析的结果分别接近 Johnson SI 分布、3 正态混合分布和 3 正态混合分布,设置 60 mm 为上限值,分别计算其失效概率,由可靠度和失效概率互为对立事件可以计算得到 3 组抽样仿真试验计算的可靠度,结果如表 2 所示。

表 2 分布状况、失效概率及可靠度

次数/次	分布状况	失效概率/%	可靠度/%
500	Johnson SI 分布	3.9	96.1
1 000	3 正态混合分布	0.9	99.1
2 000	3 正态混合分布	1.1	98.9

在进行仿真试验的同时记录了脱离成功和失败的次数,可通过计算其脱离概率,判断分析结果的正确性(表 3)。

表 3 脱离概率与可靠度误差分析

总次数/次	成功/失败次数/次	脱离概率/%	可靠度/%	误差/%
500	496/4	99.2	96.1	3.1
1 000	994/6	99.4	99.1	0.3
2 000	1 986/14	99.3	98.9	0.4

通过分析表 2、表 3 可知:当仿真试验次数较少时,分布模型比较接近于 Johnson SI 分布,此时可靠度和脱离概率之间还存在一定的误差;随着仿真试验次数越来越多,分布模型越来越接近于 3 正态混合分布,与脱离概率之间的误差也变得很小。根据某空降空投公司的试验资料表明,每进行 200 次空投试验,会出现 1~2 次失败的情况,即脱离概率在 99% 左右,与表 3 中数据一致,这说明了分析结果的正确性。

同时,根据仿真动画表明,故障失效原因为在地面风速较低时,吊带连接件双边受力,锁环体没有发生偏心旋转,控脱转体与锁环体之间的距离无法释放主伞连接件钳形腿,这与故障原因定位的结果是一致的。

在可靠度仿真试验分析的基础上,可以计算出各个影响参数的灵敏度,如表 4 所示。其中,灵敏度为正值时,表示初始值向正方向变化对结果影响较大;灵敏度为负值时,表示初始值向负方向变化对结果影响较大。

表 4 参数灵敏度

变量	含义	灵敏度
DV_1	控脱摆板和夹板间的摩擦系数	0.9
DV_2	锁环体和控脱摆板间的摩擦系数	-4.68
DV_3/kN	等效单伞垂直分力	1.82
DV_4/kN	等效单伞水平分力	-12.41
DV_5	钳形腿 1 和锁环体间的摩擦系数	-2.99
DV_6	钳形腿 2 和锁环体间的摩擦系数	-1.78
DV_7	钳形腿 1 和控脱转体间的摩擦系数	4.93
DV_8	钳形腿 2 和控脱转体间的摩擦系数	-0.44

根据仿真试验分析和各个影响参数的灵敏度,提出 3 条避免脱离锁出现故障的措施:

- 1) 减小各个运动副之间的摩擦系数;
- 2) 在保证降落阶段安全的情况下,减小主伞连接件钳形腿的长度;
- 3) 为主降落伞添加侧向小降落伞,引导锁环体发生偏心旋转。

5 结语

本文针对一种偏摆式脱离锁,分析了其故障和失效的原因,定量计算了其可靠度水平,结论如下:

- 1) 通过仿真试验分析和实际试验数据验证,该型脱离锁的脱离可靠度约为 99%;
- 2) 找到了该型脱离锁发生故障的原因,并依据仿真试验分析和灵敏度,提出了避免出现故障的措施;
- 3) 引入了额定脱锁间距和最小间距两个特性指标,可作为脱离锁设计和改进的辅助指标。

(下转第 102 页)

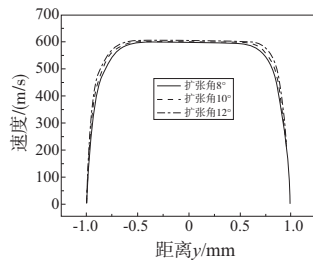


图9 不同扩张角下出口速度沿轴向方向分布图

由图9与表1知:在面积比确定的情况下,改变扩张角的大小对截面出口速度影响较小。因此在合理范围内扩张角的选择有较大的灵活性。同时在实际工业生产中为达到较大气体流速,首先应参考目前能提供的气源压力与出口背压之间的比例大小,然后根据压力关系选择面积比合适的拉法尔喷管,不可盲目选择大面积比的拉法尔喷管。

4 结语

拉法尔喷管出口速度的影响因素主要分为外部因素和内部因素,外部因素即工作压力,内部因素即拉法尔喷管的几何结构变化,其中主要包括拉法尔喷管喉口直径、出口截面直径、扩张段扩张角。因此,综合模拟得知:

1) 喷管出口背压与进气压力的比值决定了喷管内部的流动状态,随着进气压力与出口背压压差的增大,喷管出口气体流速逐渐变大,在达到一定值后出口流速的增速逐渐变小,直至稳定。其后增大进气压力或减小出口背压,出口流速始终不变。

2) 大的喉口面积比可以增大喷管出口气体速度,但同时所需的进气压力也相应增大。

3) 拉法尔喷管的收缩角与扩张角的变化对喷管出口流速影响较小,在 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 的变化范围内出口流速的变化幅度在0.6%左右。而改变喷管出口截面与喷管喉部截面的面积比时,喷管出口速度发生显著改变。

参考文献:

- [1] 李军英. 浅议拉瓦尔喷头[J]. 宽厚板, 2002, 8(2): 25-26, 48.
- [2] 肖安红. 气力压运系统中的拉伐尔喷管[J]. 武汉工业学院学报, 2002, 21(4): 31-32, 35.
- [3] EL-DESSOUKY H, ETTOUNEY H, ALATIQUI I, et al. Evaluation of steam jet ejectors[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2002, 41(6): 551-561.
- [4] KROLL A E. The design of jet pumps[J]. Chemical Engineering Process, 1947, 43(1): B21-B24.
- [5] CROFT D R, LILLEY D G. Jet pump design and performance analysis[C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Sciences Meeting. 14th, Washington, D. C.: 1976.
- [6] RIFFAR S B, OMER S A. CFD modelling and experimental investigation of an ejector refrigeration system using methanol as the working fluid[J]. International Journal of Energy Research, 2001, 25(2): 115-128.
- [7] SUN D, EAMES I W. Recent developments in the design theories and application of ejectors: review[J]. Journal of the Institute of Energy, 1995, 68(475): 65-79.
- [8] 徐海涛. 蒸汽喷射器的理论及数值研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2003.
- [9] 张博, 沈胜强, 李海军, 等. 二维流动模型的喷射器性能分析研究[J]. 热科学与技术, 2003, 2(2): 149-153.
- [10] 李素芬, 沈胜强, 刘岚, 等. 蒸汽喷射器超音速喷射流场的数值分析[J]. 中国造纸, 2001, 20(6): 33-36.
- [11] 郭金基. 亚音速气体喷射器的性能分析及其计算方法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1981, 20(1): 20-31.
- [12] 王权, 向雄彪. 蒸汽喷射压缩机喷射系数计算方法研究[J]. 太阳能学报, 1997, 18(3): 314-321.
- [13] 叶卫东, 张岩, 候宇, 等. 基于FLUENT的变径防气抽油泵性能数值模拟及研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(4): 133-135, 144.
- [14] 郭喜龙. 负压输送中真空发生器研究及数值模拟[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.

收稿日期: 2020-09-09

(上接第94页)

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李奇, 范常红. 一种脱离锁: 中国, 106343663A[P]. 2017-01-25.
- [3] 邹长庚, 郭海军, 聂德新. 一种着陆脱离锁: 中国, 211543892U[P]. 2020-09-22.
- [4] 鲁霄光. 燃气解脱式闭锁机构动力学分析与优化[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 1-2.
- [5] 于思淼. 某火箭炮闭锁机构力学特性实验与仿真分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 1-2.
- [6] 王乃光. 火箭武器燃气闭锁解脱机构动力学分析[D]. 北京:

北京工业大学, 2016: 1-2.

- [7] CLOTH H. Pressure dependent release device for a parachute: US, 4858856[P]. 1989-08-22.
- [8] GIONFRIDDO M. A survey of the us army rld programs in airdrop [C]//Aerodynamic Deceleration Systems Conference. USA. Reston, Virginia: AIAA, 1966: 1525.
- [9] 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.
- [10] 展亚南, 丁阳春, 蒋伟, 等. 货物空投系统脱离锁空中解脱特性仿真研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(7): 49-53.

收稿日期: 2020-09-18