

# 无人机回收减震气囊的理论研究

张元明

## Study of Air Bag Impact Attenuation System for UAV

ZHANG Yuan-ming

(西北工业大学第 365 研究所, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 该文针对无人机回收减震气囊的工作原理及性质, 建立了带有排气卸压口的活塞汽缸工作原理的气囊分析数学模型。在简化模型的基础上, 对缓冲气囊系统的着陆吸能、排气释能过程进行了能量分析、力学分析和热力学分析等研究, 建立了一套理论分析方法。并针对某设计条件进行了初步的计算分析, 给出了一种气囊的设计参数。

**关键词:** 无人机; 气囊; 减震

中图分类号: TH138 文献标识码: B 文章编号: 1000-4858(2005)01-0007-03

伞降回收系统是小型无人驾驶飞机较为常用的回收方式。无人机在回收降落伞的作用下, 将飞机的稳定着陆速度减低到约  $6 \text{ m/s}$ 。然后利用着陆缓冲装置来缓释  $6 \text{ m/s}$  着陆带来的冲击能量, 降低着陆过载, 避免损伤。无人机伞降回收系统的着陆缓冲方式基本包括 3 种: 滑撬减震器式、结构破损吸能式和气囊减震式<sup>[1~2]</sup>。

3 种着陆缓冲方式在国外无人机伞降回收中均有成功使用的先例<sup>[3]</sup>。而在我国无人机领域, 较为成熟、使用较多的是滑撬减震器式减震方式像 ASN-206、ASN-105、ASN-7 等。气囊减震式减震方式在无人机上应用技术还不成熟。

气囊缓冲减震技术首先应用于航天器的回收工程。由于其重量轻, 充气前可折叠成小体积收藏, 容易

实现小的减速过载等特点得到无人机设计师的青睐。在无人机上的应用研究大概开始于 20 世纪 60 年代, 像美国的 USD-5、AQM-34V、加拿大的 CL-89、阿根廷的 MQ-2 BIGUA 等无人机均采用气囊缓冲减震技术<sup>[3~4]</sup>。

### 1 无人机着陆缓冲减震气囊

无人机着陆缓冲减震气囊是一种用非弹性的、柔性的、不透气的材料制成的可充气的囊体系统<sup>[4]</sup>。在无人机飞行过程中, 气囊被折叠放置在飞机内部。当伞降回收时, 在适当的时机, 减震气囊被放出展开并充气至初始压力, 于是当无人机着陆时, 气囊在冲击载荷

收稿日期: 2004-07-09

作者简介: 张元明(1964—), 女, 陕西西安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事无人机设计研究工作。

构的结构参数进行优化选择, 很好地满足了平台使用的要求。

### 4 结论

机器人仿真技术在复杂机器人系统中的应用越来越受到重视, 仿真环境可模拟平台在空间运动的状态, 并进行结构干涉校核, 为平台机构参数的优化提供了可靠保证。

针对具体的模拟平台的设计, 给出了运动学描述, 建立了仿真平台, 并在此平台上完成了各种姿态的运动实时模拟, 为设计参数的检验提供了可靠的保证。结果表明仿真作为一种有力的辅助手段, 可以使平台结构参数的选择更加趋于合理, 使它在满足要求运动空间的同时, 又具有优化的几何结构。

### 参考文献:

- [1] Jui-Ha Kim, Woon-Sung Lee, Il-Kyeong, Park, Kyung Kyun, Park et al. A design and characteristic analysis of the motion base for vehicle driving simulator[R]. Sendai: 6th IEEE International Workshop, 1997.
- [2] Graf, R, Dillmann, R. Active acceleration compensation using a Stewart-platform on a mobile robot[R]. Brescia: Second EUROMICRO workshop, 1997.
- [3] Li, D, Salcudean, S. E. Modeling, simulation, and control of a hydraulic Stewart platform[R]. Albuquerque: 1997 IEEE International Conference, 1997.
- [4] 王立荣, 徐雷麟. 仿真技术在 6 自由度并联机器人运行中的应用[J]. 中国纺织大学学报, 1999, 25(6).
- [5] 丁洪生, 王迪华, 刘惠林. B-KX—I 型变轴数控机床运动学仿真建模及实现[J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(4).

作用下囊内气体被压缩产生变形,吸收无人机冲击能量,然后通过排气装置排除囊内气体,及时释放所吸收的能量,从而达到缓冲无人机冲击过载、保护无人机回收安全的目的。图 1 所示为有着陆缓冲减震气囊的无人机伞降回收降落状态。

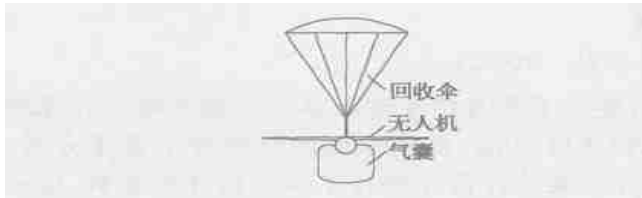
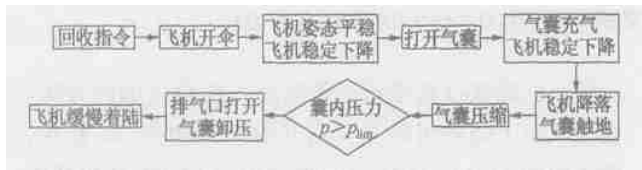


图 1 无人机回收降落状态

无人机着陆缓冲减震气囊的工作过程如下:



设计成功的无人机气囊缓冲系统不仅可吸收和释放足够的冲击能量,降低无人机着陆冲击载荷,同时在着陆过程中还不能出现反跳现象,使无人机在着陆过程中稳定下降接地,安全着陆。

无人机减震气囊是针对无人机回收重量、着陆速度等条件进行设计的,设计中要控制气囊的工作过程。其主要参数如气囊体积、气囊高度、触地面积、着陆速度、初始内压、卸压压力(特征压力)、泄气口面积及等直接影响其缓冲特性,也是工程设计和理论分析中主要关注的对象。近年来,对无人机着陆撞击、排气释能过程的理论分析出现了数种方法<sup>[5~10]</sup>,其理论思想各有特色。本文将介绍一种基于简化模型的分析方法。

## 2 气囊减震系统理论分析

将气囊着陆撞击、排气释能过程作为一个大系统来研究。由于气囊是用非弹性材料制成的,因此可作以下假设:气囊在压缩过程中,只有囊体高度发生变化,而忽略其横截面形状和面积的变化;气囊的排气口面积恒定;系统气体变化遵从理想气体状态方程。在上述假设的基础上,可将系统简化为图 2 所示的汽缸模型进行分析。其中:汽缸相当于气囊体,活塞重量相当于回收重量,小孔相当于泄气口。

### 2.1 能量分析

无人机伞降回收时系统的总能量为

$$U = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v_d^2 \quad (1)$$

式中  $W$  ——无人机回收重量  
 $v_d$  ——无人机伞降匀速下降速度

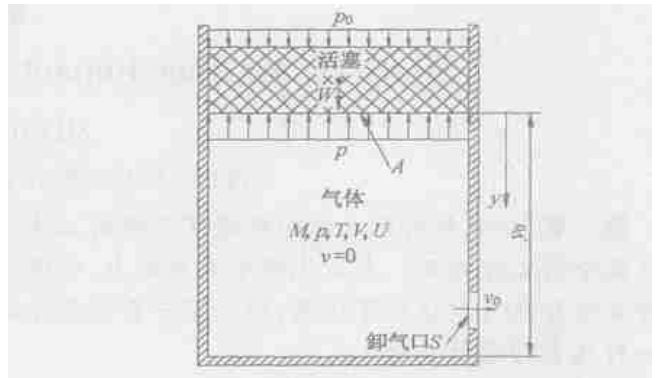


图 2 气囊工作原理简化模型

系统总能量由气囊减震系统消化,系统在吸能释能过程中能量守恒,即

$$\frac{dU}{dt} = -hM_0 + p \frac{dW}{dt} \quad (2)$$

式中  $U$  ——系统内能  
 $M_0$  ——气囊排除气体的质量  
 $h$  ——单位焓

$$\frac{dM}{dt} = M_0$$

又  $U = Mu$   
 $du = C_v dt$

于是式(2)可变为

$$\frac{dT}{T} = \frac{pV}{C_v MT} \frac{dM}{M} - \frac{pV}{C_v MT} \frac{dV}{V} \quad (3)$$

式中  $M$  ——气体质量  
 $u$  ——单位内能  
 $T$  ——气体温度  
 $V$  ——气体体积,即气囊体积

根据流体的连续性(假定气体不可压缩并以恒定速度流出),可得:

$$p = p_0 + \frac{1}{2} \rho v_{go}^2$$

而  $M_0 = \rho v_{go} S$   
 $= \frac{M}{V}$

于是  $M_0 = \sqrt{\frac{M}{V} (p - p_0) S}$

即  $\frac{dM}{dt} = \sqrt{\frac{M}{V} (p - p_0) S} \quad (4)$

式中 ——气体密度

$v_{g0}$  ——排气口气体流出速度

$S$  ——排气口面积

$p$  ——气囊内部压力

$p_0$  ——气囊初始压力

## 2.2 力学分析

着陆时的冲击载荷是时间的函数,即

$$F = n_y(t) \times W(5)$$

最大冲击过载  $n_{y \max}$  是气囊减震系统设计的指标之一。于是最大冲击载荷为

$$F_{\max} = n_{y \max} \times W$$

着陆过程中飞机下降速度

$$v(t) = \frac{dy}{dt} \quad (6)$$

其中:  $t=0, v=v_d; t=t_0, v=0$ 。

对图 1 所示简化模型,根据牛顿第二定律

$$\frac{W}{g} \frac{d^2 y}{dt^2} = -W + A(p - p_0) \quad (7)$$

式中  $A$  为活塞面积。

由于气囊压缩时,触地面积和冲击载荷是随时间变化的,因此对公式(7)修正,于是

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -n_y(t)g + \frac{A}{W}(p - p_0) \quad (8)$$

## 2.3 动量分析

系统着陆撞击时,冲击载荷于下降速度之间满足动量原理(忽略气囊体和气体的质量),于是

$$\int_0^t F dt = \frac{W}{g} v_t - \frac{W}{g} v_d \quad (9)$$

## 2.4 热力学分析

认为气囊系统气体变化遵从理想气体状态方程,

$$pV = \frac{M}{\mu} RT$$

对上式进行进行变换,于是

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dM}{M} + \frac{dT}{T} \quad (10)$$

将式(3)代入式(10)整理得:

$$\frac{dp}{p} = \left(1 + \frac{pV}{C_v MT}\right) \frac{dM}{M} - \left(1 - \frac{pV}{C_v MT}\right) \frac{dV}{V}$$

令  $\frac{pV}{C_v MT} = k$  于是

$$\frac{dp}{p} = (1+k) \frac{dM}{M} - (1+k) \frac{dV}{V}$$

$$\text{则} \quad \frac{dp}{dt} = p \left( \frac{k+1}{M} \frac{dM}{dt} - \frac{k+1}{M} \frac{dV}{dt} \right) \quad (11)$$

## 3 设计计算及结果

利用上述理论方法对回收重量 300 kg,伞降着陆速度为 6 m/s 的减震气囊进行了设计计算,着陆过载控制在不大于 10 g。经过迭代计算,得出减震气囊的体积为 0.78 m<sup>3</sup>,气囊的初始压力为 0.05 kg/cm<sup>2</sup>,气囊的卸压压力(特征压力)为 0.2 kg/cm<sup>2</sup>,排气口面积为 175.3 cm<sup>2</sup>,气囊的压力变化和过载变化见图 3 曲线所示。

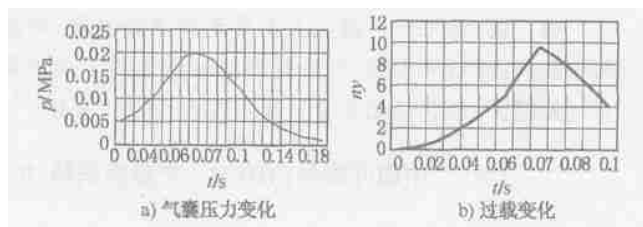


图 3 压力和过载的计算结果

## 4 结论

(1) 将减震气囊简化为带有排气卸压口的活塞汽缸式数学模型,能较好地反映气囊缓冲减震的吸能、释能过程的工作原理,是一种比较合理的减震气囊分析模型。

(2) 在简化模型分析的基础上,通过力学分析、能量分析和热力学分析等,可以对气囊的主要设计参数进行分析计算并确定。

## 参考文献:

- [1] 孙希任,等. GB2019-94, 无人机回收系统通用要求[S].
- [2] [美]尤因 E G, 纳克 T W, 比克斯比 H W. 回收系统设计指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 1988.
- [3] 樊邦奎,等. 国外无人机大全[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [4] Turner C T, Grard Jr L A. Air bag impact attenuation system for the AQM-34V RPV[J]. AIAA 81-1917R, 1981, 1-2.
- [5] Esgar J B, Morgan W C. Analytical study of soft landings on gas-filled bags[R]. NASA TRR75.5-20.
- [6] 万志敏,等. 缓冲气囊的特征内压[J]. 力学与实践, 1998(6).
- [7] 朱兴元, 吴幼明. 量纲分析法在缓冲气囊动态特性研究中的应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2000(5).
- [8] 戈嗣诚, 施允涛. 无人机回收气囊缓冲特性研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1999(8).
- [9] Kennerly H. Digges. Theory of an air cushion landing system for aircraft[R]. AD-728647, 1971.
- [10] Henry B. McCuddenetal. Conceptual design of an air cushion landing system for an unmanned aircraft[R]. AD-764774, 1973.