

直升机应急气囊充气及冲击着水过程数值分析

孙建红 周涛 李名琦 王从磊 陈悦

(南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016)

摘要:针对应急气囊充气展开过程以及直升机应急气囊冲击着水过程进行了数值模拟,得到了不同充气速率下气囊展开过程中内部压力分布情况,并根据气囊内压力变化规律,将气囊充气展开过程分为线性膨胀、深度膨胀和过度膨胀 3 个阶段,其中最大安全压力可为智能化充气控制提供阈值选择依据。同时,冲击着水受力状态和速度特性数值模拟结果与实验一致,可以用于应急气囊的工程设计。

关键词:直升机应急气囊;充气过程;冲击着水;水上迫降

中图分类号: V275.1; V244 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2012)05-0713-05

Numerical Analysis of Emergent Airbag Deployment and Ditching Crashworthiness Process

Sun Jianhong, Zhou Tao, Li Mingqi, Wang Conglei, Chen Yue

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The emergency airbag deployment process and the helicopter ditching process are numerically studied. The results show that the deployment processes can be subdivided into three different phases: linear expansion, depth expansion and over-expansion deployment, based on the variation of pressure and volume inside airbags. A meaning of safe maximum pressure is given to set a critical value for the intelligent deployment control. Meanwhile, the analyses result of ditching process show that force and speed characteristics are useful to design the airbag when helicopter emergent water landing.

Key words: helicopter emergent airbag; deployment process; ditching; water landing

现代直升机无论是陆用还是海用都要考虑抗坠毁能力,加强其生存力,目前一种有效的方案就是使用应急气囊。然而,无论是汽车防碰撞安全气囊、航天器着陆缓冲气囊^[1-3]等传统应用气囊,还是直升机漂浮气囊^[4-5]、航天用充气展开管^[6-7]等新型气囊系统,气囊能否快速而稳定地展开以及展开后性能是否能满足要求,都是目前气囊系统研究的重点问题之一。

由于气囊的充气展开过程大多是气体高速湍流流动,而且还涉及大变形、大位移、结构之间的接触以及内部气流流动等一系列非线性动力学问题,是一个极其复杂的物理过程。目前在国际上,气囊充气展开的仿真计算方法主要有:多体动力学法和

动态非线性有限元法^[8],其中又以动态非线性有限元法运用最为广泛。动态非线性有限元法适用于计算各种充气展开过程中结构的变形,各部分的速度和加速度值、能量、动量以及应力应变的分布情况^[9]。基于气囊的有限元分析方法,Marklund, Mestreau 和 Cirak 等人分别采用流场耦合法和新型拉格朗日-欧拉流壳法对气囊充气过程进行了数值模拟^[10-11]。对于充入气体和薄膜结构间相互作用的模拟,控制体积法(Control volume, CV)^[12-13]具有计算速度快的优点,模拟结果能够满足工程应用的需要,是目前气囊充气展开数值模拟中得到广泛应用的一种方法。

本文主要利用非线性有限元软件 ANSYS/

LS-DYNA,采用控制体积法,对气囊在不同充气速率下展开过程进行数值模拟,分析压力、温度变化情况。同时,对着水冲击过程也进行了初步研究,为工程研究提供参考依据。

1 气囊展开过程的数值模拟

根据守恒和热力学原理,可建立理想气体条件下单个气囊展开控制方程

$$p = (k - 1)\rho e \quad (1)$$

$$\ln e = (1 - k)\ln V \quad (2)$$

$$V = \iiint dx dy dz \quad (3)$$

式中 $k=c_p/c_v$,为比热容比,或质量热容比; e 为单位内能; V 为气囊体积。

图1所示为气囊经过简化后的有限元模型以及用于实验的实物模型^[14],其中有限元模型又分为未折叠的平铺模型以及3次折叠模型。利用LS-DYNA软件对气囊在充气速率为 $v_f=10.8\text{ m}^3/\text{h}$ 时展开过程进行数值模拟,得到了压力随时间变化分布曲线,并与实验进行对比,如图2所示。实验^[14]和数值结果吻合很好。

气囊充气展开过程中,分别在10,20和30 s这3个时刻状态下的压力云图(图3),即为气囊充气展开过程3个阶段的示意图。

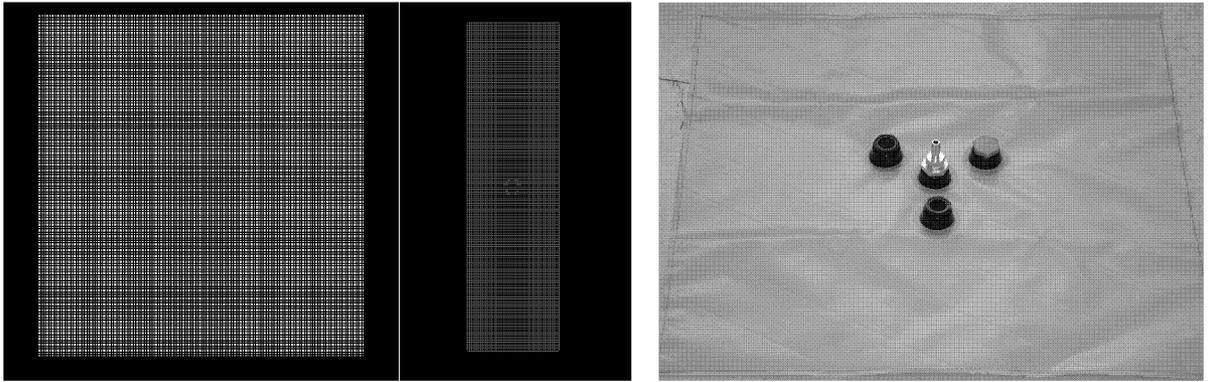


图1 未充气时气囊的有限元模型与实物模型

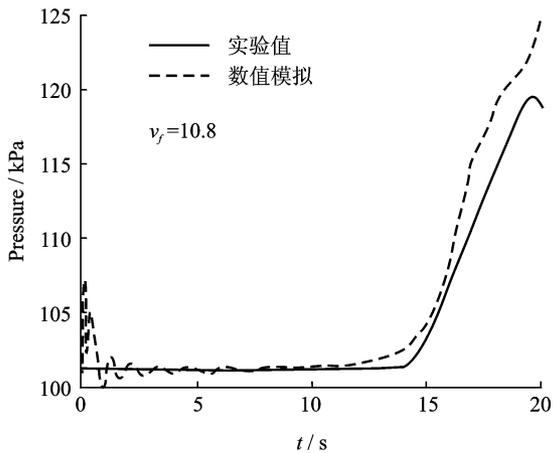


图2 充气速率为 $v_f=10.8\text{ m}^3/\text{h}$ 实验和数值模拟压力对比图

本文分别在4种不同充气速率($v_f=10.8, 16.2, 21.6$ 和 $32.4\text{ m}^3/\text{h}$)下对气囊展开过程进行了数值模拟研究,获得了该气囊在不同充气速率下的体积和压力变化图,如图4,5所示。从图4中可以看出,根据气囊体积变化及形态变化情况,可以明确地把气囊的展开过程分为3个阶段:第一阶段是气囊线性膨胀阶段,体积线性增加,压力几乎不变。气囊的展开主要集中在在这个过程中,在此过程中气囊体积随着气体的充入而线性增大,速度非常快,而压力却变化不大且气囊本身的张力可以忽略不计,充入的气体自由运动四处扩散,填充气囊以增大体积,因此可谓为线性膨胀阶段。

第二阶段,随着气体的不断充入,气囊体积继



图3 气囊展开过程压力云图($v_f=10.8\text{ m}^3/\text{h}$)

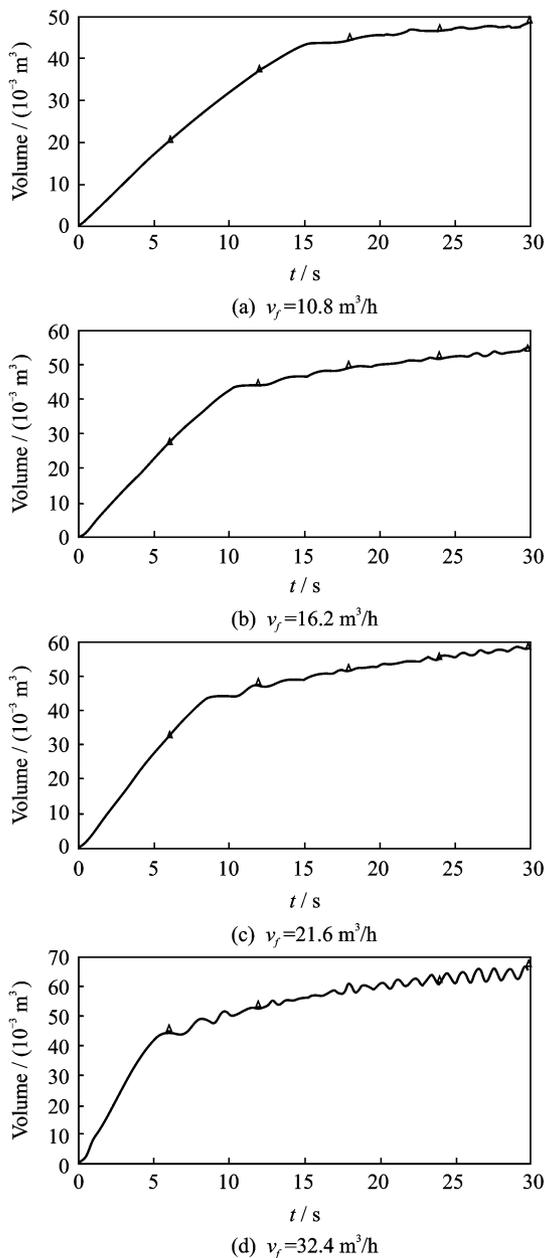


图4 不同充气速率时气囊体积随着时间的变化

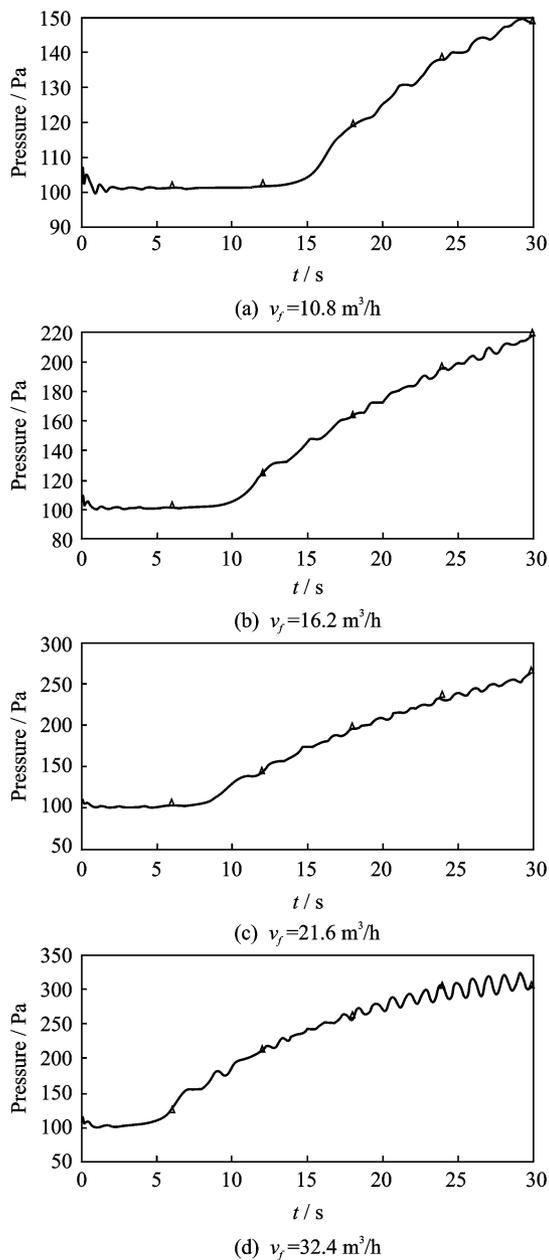


图5 不同充气速率时气囊压力随着时间的变化

续增大,但体积变化的梯度变小,并出现了轻微的振荡现象。这个过程中气囊的压力不再保持不变,而是逐渐增大,此时气囊本身的张力已经不能忽略,同时充入的气体运动还需要克服压差阻力。因此,充气过程的动量绝大部分用于增大气囊内部的压力以及克服气囊张力的影响,此过程称为气囊深度膨胀阶段。

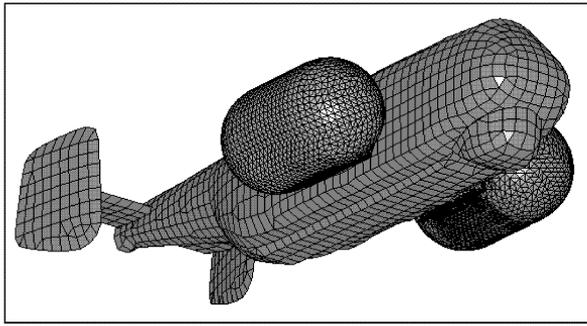
第三阶段,再继续充气,气囊将达到饱和。这时随着气体的不断充入,气囊的体积振荡增大,而压力和体积一样表现为振荡增大,但是其梯度和体积相反,当体积在峰值时,压力为谷值,反之亦然。这个过程称为过度膨胀阶段。

从图5可以看出,气囊内压力的增加速率随充气速率的增大而加大。随着气体的不断充入,压力

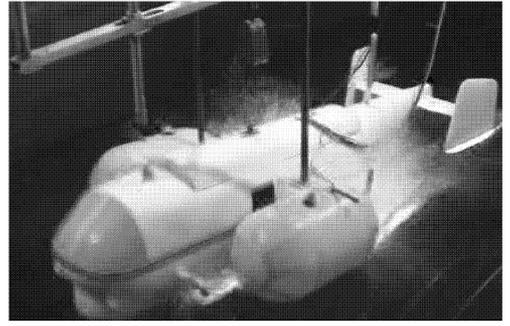
越来越大,当增大到一定程度时就会在某些区域形成应力集中,造成振荡现象。气囊发生应力集中时的压力就是气囊展开的最大安全压力。超出最大安全压力,气囊的安全性质得不到保障。因此,最大安全压力可作为智能化充气过程控制的阈值。

2 气囊冲击着水过程的数值模拟

为了研究气囊对直升机冲击着水的影响,建立了带气囊直升机模型(图6)。直升机模型的主要参数如下:机长2 260 mm;机宽616 mm。从受力情况(图7,8)变化可以看出,由于气囊对称安装,机形也基本为左右对称,所以两侧气囊的受力情况基本一致。整个冲击过程在0.3 s后趋于平稳,最大载荷



(a) 有限元模型



(b) 实物图

图6 直升机/气囊的有限元模型与实物图

发生在气囊与水面发生碰撞后的 $0.1 \sim 0.2$ s 之间。左右两个气囊的压力变化情况也基本一致。冲击过程中,在气囊所受外力达到峰值时(约在 0.23 s 时刻),气囊受到挤压的程度也最高,气囊内压(图9)也在此时刻达到峰值。

气囊着水过程中速度变化情况如图10所示,为了能够与实验^[15]进行对比,直升机和气囊的水平初始速度设为 4.5 m/s,接触水面之前以很小的斜率进行减速运动,碰撞开始后速度变化率增大,减速作用明显。减速过程基本呈线性关系,但在接触载荷最大的阶段(约在 0.23 s 时刻),机体/气囊与水之间的激励作用最强,因此造成了速度波动。

如图11(a)所示,直升机气囊入水的初始 z 向(垂直向)速度为 -0.7 m/s,在重力与浮力的合力作用下,着水后垂直速度仍会增加至约 -0.9 m/s。随后浮力逐渐增大并超过重力,垂直速度则逐渐减小至 0 ,但在水波的作用和干扰下,速度减小过程中存在明显的波动。如图10(b)和图11(b)所示,整个着水冲击过程中,系统加速度变化并不大,并且受水波的影响出现振荡,尤其在碰撞最强烈的 0.3 s 左右出现较大幅度的振荡。从冲击过程的持续时间上来看,数值分析与实验两者得到的结果都是 $0.3 \sim 0.4$ s 之间,基本吻合。而冲击载荷的大小、变化率、峰值及起始时刻等数据与实验数据基本吻合,冲击载荷

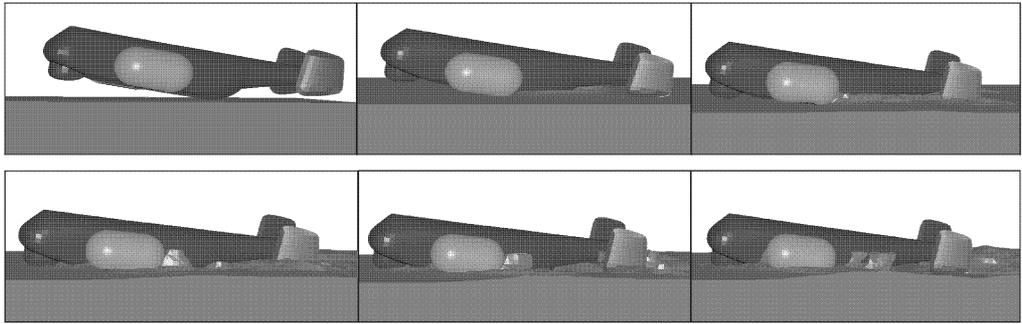


图7 气囊冲击着水过程模拟结果(0~0.6 s)

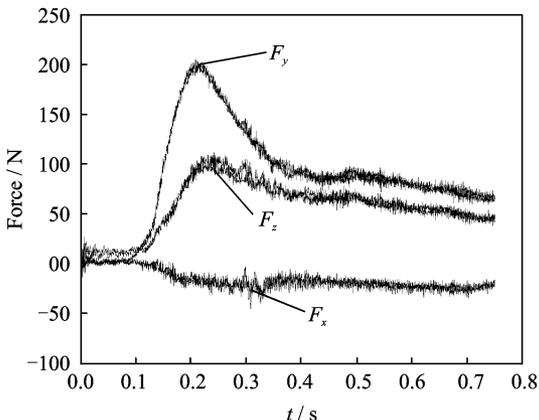


图8 左右两侧气囊所受载荷时间历程曲线

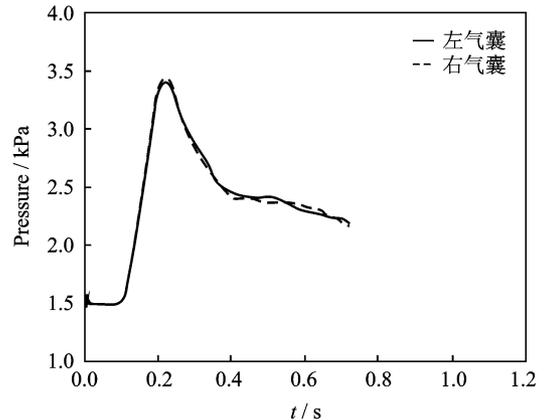
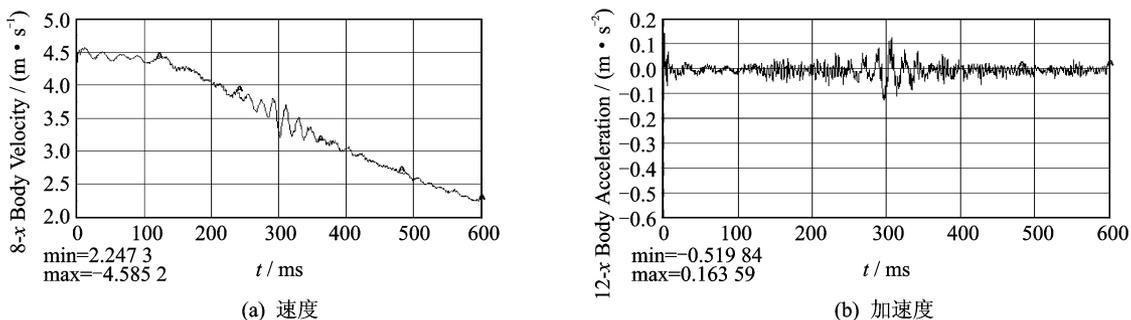
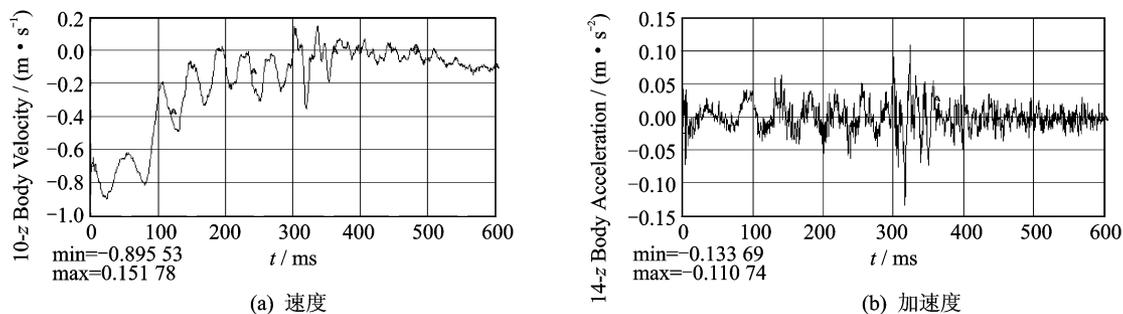


图9 左右气囊压力变化曲线

图10 直升机/气囊 x 方向速度和加速度变化曲线图11 直升机/气囊 z 方向速度加速度变化曲线

峰值的差异在 8%~12.8% 范围之内,气囊压力变化的差异在 5% 左右。

3 结束语

数值方法表明,气囊的充气展开过程根据其内压的变化特性可以将充气展开过程分为线性膨胀、深度膨胀和过度膨胀 3 个阶段。3 个阶段的不同特性可以提供在气囊设计以及智能化控制中的阈值选择。冲击着水过程中系统减速基本呈线性关系,但在接触载荷最大时($t=0.23$ s),机体/气囊与水之间的激励作用最强,因此造成了速度波动,结果与实验一致。

参考文献:

- [1] Sandy C R. Development of the mars pathfinder inflatable airbag subsystem[R]. AIAA-97-1545,1997.
- [2] Steltzner A. The mars exploration rovers entry descent and landing and the use of aerodynamic decelerators[R]. AIAA-2003-2125,2003.
- [3] Nguyen H T. Thermal/pressure modeling of the mars pathfinder airbag system [R]. AIAA-1998, 1998.
- [4] Reilly M J. Lightweight emergency flotation system for the CH-46 helicopter [R]. NADC-79169-60, 1981.
- [5] Muller M, Greenwood R. Survey and analysis of rotorcraft flotation system [R]. DOT/FAA/AR-95/53,1995.
- [6] Clem A L, Smith S W, Main J A. Deployment dynamics of inflatable solar array[R]. AIAA-99-1520, 1999.
- [7] Clem A L, Smith S W. A pressurized deployment model for inflatable space structures [R]. AIAA-2000-1801,2000.
- [8] Wang J T, Johnson A R. Deployment simulation methods for ultra-lightweight inflatable structures [R]. NASA/TM-2003-212410 ARL-TR-2973, 2003.
- [9] Greschik G, Mikulas M. A preliminary study of some dynamic characteristics of deployment of L/Garde in-STEP inflatable antenna flight experiment [R]. IAF Report, 1995.
- [10] Cirak F. A new Lagrangian-Eulerian shell-fluid coupling algorithm based on level sets[R]. AIAA 2003-1691,2003.
- [11] Mestreau E. Airbag simulation using fluid/structure coupling[R]. AIAA-96-0798,1996.
- [12] 王晓华.空间充气展开结构折叠及展开过程仿真分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [13] Wang J T, Protard A R. Deployment simulation methods of ultra-lightweight inflatable structures [R]. AIAA-2002-1261,2002.
- [14] 周涛.某型气囊展开过程数值模拟及试验研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [15] 李名琦.应急气囊着水冲击特性的试验研究及数值模拟[D].南京:南京航空航天大学,2008.