

冲压式翼伞开伞仿真计算*

李国光 邓正才

(航天技术系)

摘要 本文分析了冲压式翼伞开伞的特点,提出了一个展弦向二维开伞模型,建立了伞衣的径向运动方程。在推导系统运动方程和分离体运动方程的基础上,建立翼伞开伞仿真状态方程,用龙格-库塔法求解,给出开伞充满时间、开伞动载、翼伞速度和位置坐标等参数的变化值。本文提供的开伞仿真计算软件包,可用于各类冲压式翼伞的开伞仿真计算。

关键词 翼伞, 开伞仿真, 充满时间, 开伞动载

分类号 V448.15, V445.23

1 前言

利用计算机仿真技术研究复杂的开伞过程,计算伞衣充满时间、冲击载荷及开伞过程中伞——回收物系统运动参数的变化规律,对于翼伞的设计有着重要意义。第一,翼伞在高空打开,各状态变量的瞬时值难以测量,翼伞系统的姿态难以监控,进行空投试验和风洞试验其成本又很高,利用仿真技术可以很方便地对开伞性能进行分析和预测,具有较好的经济效益;第二,开伞过程仿真能提供系统在某一条件下的开伞特性,因而对于已经确定的系统,在同一个初始数据的条件下,选取不同开伞方案进行仿真计算,能求出各种方案对应的过载系数,可达到开伞方案的最优化选择,如确定最佳开伞高度、开伞速度和开伞姿态等等,也可以通过开伞仿真计算来研究系统各设计参数对开伞过程的影响。

2 翼伞的开伞模型

翼伞的开伞过程是一个非常复杂的过程,至今尚无有关翼伞开伞机理分析的完善理论。根据对冲压式翼伞的空投试验分析,可以看出,翼伞的开伞过程是个边充气张开边充满气室的过程,并在气室充满后完成开伞过程。气室充满中气流可能从伞衣的任何一个进气口开始,不过从伞衣的结构和折叠方式看,从伞衣中间部分进气口开始充气的情形肯定会多些。此外再从开伞冲击最严重的情况考虑,本文提出从伞衣中间部分开始向展弦两个方向同时充气的二维开伞模型。

为了使建立的数学模型便于求解,把伞衣腔内的气体形状简化成一长方体和三棱柱

* 1992年12月15日收稿

的组合物,如图1所示,气室充气时,假定展向和弦向尺寸以同样速度变化,其尺寸在任一时刻的值为 L ,组合物断面的高度 h 取翼剖面的当量厚度,即由翼伞剖面面积 a 除以弦长 b 得到

$$h = a/b$$

3 伞衣展向运动方程

目前,一般的降落伞充气理论多是利用质量守恒方程来进行研究的。而翼伞是一种双层结构的柔性矩形翼,气流进口面积变化没有规律,很难用质量守恒方程来求解。七十年代开始,一些学者提出以伞衣径向运动方程为基础来研究开伞过程^[1],他们认为真正使伞衣张开的主要原因是径向力或径向压力分布。但是,如何建立翼伞的径向运动方程、如何确定使翼伞伞衣张开的径向力,目前还没有见到可参考的文献。作为研究翼伞开伞机理的探讨,本文提出下面简单算法。

由于翼伞的展长大于弦长,且气流又是沿着弦向流入翼伞的,故充满过程中必定是沿弦向方向先充满。这样,我们就只需建立展向方向的运动方程便可确定出伞衣的充满时间。为了简化方程的推导,考虑到伞衣结构的对称性和从中间进气口开始充气的模型,可取伞衣的一半作为研究对象,如图2所示。伞衣在展向力 F 的作用下沿展向打开,当展向伸长的尺寸为 $L/2$ 时,其伞衣扩展速度为 $L/2$,将受到端面阻力 f_1 、上下翼面的粘性阻力 f_2 的作用,当伞衣扩展到弹性变形阶段时,还受到弹性力 f_3 的作用。

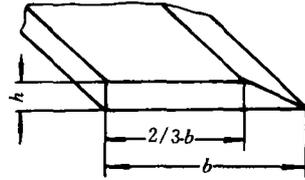


图1 腔内气体形状简化图

由于翼伞的展长大于弦长,且气流又是沿着弦向流入翼伞的,故充满过程中必定是沿弦向方向先充满。这样,我们就只需建立展向方向的运动方程便可确定出伞衣的充满时间。为了简化方程的推导,考虑到伞衣结构的对称性和从中间进气口开始充气的模型,可取伞衣的一半作为研究对象,如图2所示。伞衣在展向力 F 的作用下沿展向打开,当展向伸长的尺寸为 $L/2$ 时,其伞衣扩展速度为 $L/2$,将受到端面阻力 f_1 、上下翼面的粘性阻力 f_2 的作用,当伞衣扩展到弹性变形阶段时,还受到弹性力 f_3 的作用。

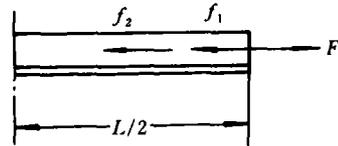


图2 展向打开瞬时受力图

展向力由气流动压产生,当气流的速度为 v 时,沿展向方向打开的展向力为

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 a_1 \quad (1)$$

式中 a_1 是瞬时翼剖面面积。

端面阻力,当伞衣扩展速度为 $L/2$ 时,其值为

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{L}{2} \right)^2 \frac{L}{|L|} \cdot a_1 \quad (2)$$

式中 $L/|L|$ 表示阻力的方向与扩展速度方向相反。

粘性阻力,根据勃拉修斯的平板边界层理论^[2],对于我们所研究的问题,可推导出

$$f_2 = \frac{1}{2} \tau_w (2b_1 \cdot L) = 0.332 \rho \left(\frac{L}{2} \right)^2 \cdot \frac{L}{|L|} \cdot \sqrt{\frac{2\mu L}{\rho |L|}} \cdot b_1 \quad (3)$$

式中 b_1 是瞬时弦长, $\mu = 1.824 \cdot 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

弹性力,设伞衣展向弹性系数为 K ,稳态展长 L_0 ,则展向变形值 L 超过稳态值时产生的弹性力为

$$f_3 = \frac{K}{2} (L - L_0) \quad (4)$$

由此可得到展向运动方程为

$$\text{在非弹性阶段}(t \leq t_m) \quad \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{\dot{L}}{2} \right) = F - f_1 - f_2 \quad (5)$$

$$\text{在弹性阶段}(t > t_m) \quad \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{\dot{L}}{2} \right) = F - f_1 - f_2 - f_3 \quad (6)$$

式中 m 为伞衣充气时的瞬时质量。伞衣从中间气室开始充气, 开始将推动整个伞衣运动, 即初始的瞬时质量应等于伞衣质量, 其后将逐渐减小, 但同时将有充气质量和附加质量的出现, 所以近似取 $m = m_i$ (伞衣质量)。

因为气室充满时间 t_m 是指气室充满到静态体积 V_s 时所用的时间, 可用充气体积变化公式对时间进行积分来确定, 为此将上面推导的展向运动方程做某些变换。气室充满过程中, 某一时刻的充气体积为

$$V = a_1 \cdot L$$

$$\text{故有} \quad L = \frac{V}{a_1} \quad (7)$$

将 F 、 f_1 、 f_2 、 f_3 的表达式代入展向运动方程, 并将式中的 L 用式 (7) 代替, 经整理后得到的展向运动方程为:

在非弹性阶段 ($t \leq t_m$)

$$m\dot{V} = 2\rho v^2 a_1^2 - \frac{1}{2}\rho|\dot{V}|\dot{V} - 0.332|\dot{V}|\dot{V}\sqrt{\frac{2\mu\rho V}{|\dot{V}|}} \frac{b_1}{a_1} \quad (8)$$

在弹性阶段 ($t > t_m$)

$$m\dot{V} = 2\rho v^2 a_1^2 - \frac{1}{2}\rho|\dot{V}|\dot{V} - 2K(V - V_s) - 0.332|\dot{V}|\dot{V}\sqrt{\frac{2\mu\rho V}{|\dot{V}|}} \frac{b_1}{a_1} \quad (9)$$

4 系统运动方程

4.1 基本假设

(1) 假设物—伞系统的运动为弹性杆连接的双质点平面运动。将伞绳简化成一根粗细均匀、不计质量、两端固定于伞压心与回收物吊点的线弹性杆, 该杆的等效刚度可由各根伞绳的刚度和分布情况来确定。

(2) 伞衣、内含气体和附加质量三者所受重力的合力作用在翼型压心上。

(3) 将回收物看成一圆柱体, 其直径为 D 、高度为 H 、质量为 m_w , 则回收物对吊点轴的转动惯量为

$$J_w = m_w \left(\frac{H^2}{3} + \frac{D^2}{16} \right) \quad (10)$$

4.2 物—伞系统的运动方程

翼伞系统的受力情况如图 3 所示, 在纵向

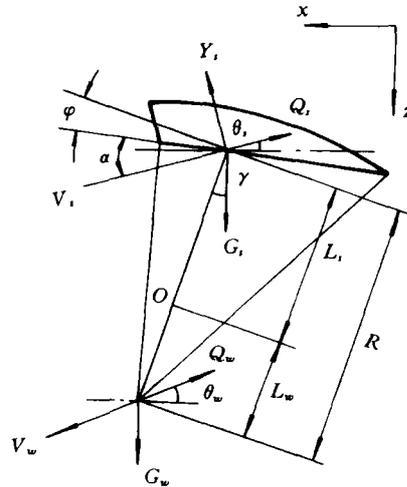


图 3 系统受力图

平面内的运动方程可列如下:

$$m_{xi}\ddot{x} = Y\sin\theta_i - Q_i\cos\theta_i - Q_w\cos\theta_w \quad (11)$$

$$m_{xi}\ddot{z} = m_{xi}g - Y\cos\theta_i - Q_i\sin\theta_i - Q_w\sin\theta_w \quad (12)$$

$$J_{xi}\ddot{\tau} = M_0 + L_i[\theta_i\cos(\alpha_i + \varphi) - Y_i\sin(\alpha_i + \varphi)] \\ - L_w\theta_w\cos(r + \theta_w) + (G_iL_i - G_wL_w)\sin r - M_z(\omega_z) \quad (13)$$

式中 m_{xi} 是系统质量, J_{xi} 是系统转动惯量, Y_i 和 Q_i 是伞的气动升力和阻力, Q_w 是回收物的阻力, M_0 是气动力矩, $M_z(\omega_z)$ 是阻尼力矩。

4.3 分离体运动方程

为了分析弹性杆的内力, 计算开伞冲击载荷, 把系统分离成伞衣、连接杆、回收物三部分, 其受力如图 4 所示, 可得到下列方程。

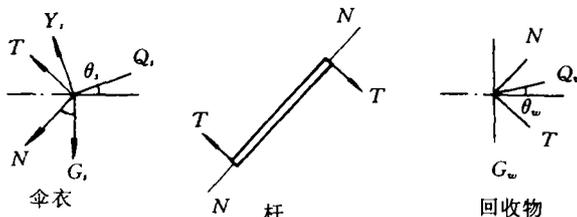


图 4 分离体受力图

翼伞的运动方程

$$(m_{xi} - m_w)a_{ix} = Y_i\sin\theta_i - Q_i\cos\theta_i \\ + T\cos r + N\sin r \quad (14)$$

$$(m_{xi} - m_w)a_{iz} = -Y_i\cos\theta_i - Q_i\sin\theta_i - T\sin r + N\cos r \\ + (m_{xi} - m_w)g \quad (15)$$

回收物的运动方程

$$m_w a_{wx} = -N\sin r - T\cos r \\ - Q_w\cos\theta_w \quad (16)$$

$$m_w a_{wz} = -N\cos r + T\sin r - Q_w\sin\theta_w + m_w g \quad (17)$$

设弹性杆的伸长量为 δ , 抗拉刚度为 EA , 杆长为 R , 则杆的轴向力

$$N = \frac{EA}{R}\delta \quad (18)$$

4.4 回收物相对伞压心的运动方程

为了考虑回收物和伞绳弹性变形对翼伞开伞的影响, 这里推导回收物相对伞压心的运动方程。回收物的运动可分解为随同伞压心的平动、随同弹性杆绕伞压心的转动和沿弹性杆轴线方向的变形运动, 如图 5 所示。若取伞压心为坐标原点, 则回收物的速度公式为

$$\vec{v} = \vec{v}_r + \vec{v}_e$$

式中, $\vec{v}_r = \delta(\sin r \dot{r} + \cos r \dot{k})$, $\vec{v}_e = [(R + \delta) \cdot \dot{r}](\cos r \dot{r} - \sin r \dot{k})$

回收物的加速度为^[3]

$$\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_e + \vec{a}_k$$

式中,

$$\vec{a}_r = \delta(\sin r \ddot{r} + \cos r \ddot{k})$$

$$\vec{a}_e = [(R + \delta)(\dot{r})^2](- \sin r \dot{r} - \cos r \dot{k}) + [(R + \delta)\ddot{r}](\cos r \dot{r} - \sin r \dot{k})$$

$$\vec{a}_k = 2\dot{r}\delta(\cos r \dot{r} - \sin r \dot{k})$$

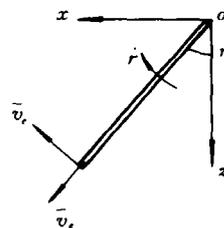


图 5 回收物的运动图

于是有

$$\begin{aligned}\bar{a} = & [\ddot{r}(R + \delta)\cos r - (\dot{r})^2(R + \delta)\sin r + \delta\sin r + 2\dot{r}\delta\cos r]\vec{i} \\ & + [-\ddot{r}(R + \delta)\sin r - (\dot{r})^2(R + \delta)\cos r + \delta\cos r - 2\dot{r}\delta\sin r]\vec{k}\end{aligned}$$

实际上,该加速度 \bar{a} 表示的只是回收物加速度 \bar{a}_w 与伞加速度 \bar{a}_s 之差,即

$$\bar{a} = \bar{a}_w - \bar{a}_s = (a_{wx} - a_{sx})\vec{i} + (a_{wz} - a_{sz})\vec{k}$$

故有 $a_{wx} - a_{sx} = \ddot{r}(R + \delta)\cos r - (\dot{r})^2(R + \delta)\sin r + \delta\sin r + 2\dot{r}\delta\cos r$ (19)

$$a_{wz} - a_{sz} = -\ddot{r}(R + \delta)\sin r - (\dot{r})^2(R + \delta)\cos r + \delta\cos r - 2\dot{r}\delta\sin r$$
 (20)

为了使此方程和弹性杆的内力、系统质量力、气动力建立联系,再作如下变换。将式(16)与式(14)相减,式(17)与式(15)相减,可得到

$$\begin{aligned}a_{wx} - a_{sx} = & \frac{-Q_w\cos\theta_w}{m_w} + \frac{\theta_s\cos\theta_s - Y_s\sin\theta_s}{m_{xi} - m_w} \\ & - \frac{m_{xi}}{m_w(m_{xi} - m_w)}(N\sin r + T\cos r)\end{aligned}$$
 (21)

$$\begin{aligned}a_{wz} - a_{sz} = & \frac{-Q_w\sin\theta_w}{m_w} + \frac{\theta_s\sin\theta_s - Y_s\cos\theta_s}{m_{xi} - m_w} \\ & + \frac{m_{xi}}{m_w(m_{xi} - m_w)}(N\cos r + T\sin r)\end{aligned}$$
 (22)

比较式(19)和式(21)、式(20)和式(22),并将式中的 N 用式(18)代替,可得到

$$\begin{aligned}& -\frac{m_{xi}}{m_w(m_{xi} - m_w)}\left(\frac{EA}{R}\delta\sin r + T\cos r\right) \\ = & [\ddot{r}(R + \delta)\cos r + 2\dot{r}\delta\cos r - (\dot{r})^2(R + \delta)\sin r] \\ & + \frac{Q_w\cos\theta_w}{m_w} + \frac{Y_s\sin\theta_s - Q_s\cos\theta_s}{m_{xi} - m_w} + \delta\sin r\end{aligned}$$
 (23)

$$\begin{aligned}& \frac{m_{xi}}{m_w(m_{xi} - m_w)}\left(-\frac{EA}{R}\delta\cos r + T\sin r\right) \\ = & [-\ddot{r}(R + \delta)\sin r - 2\dot{r}\delta\sin r - (\dot{r})^2(R + \delta)\cos r] \\ & + \frac{Q_w\sin\theta_w}{m_w} - \frac{Y_s\cos\theta_s + Q_s\sin\theta_s}{m_{xi} - m_w} + \delta\cos r\end{aligned}$$
 (24)

令

$$C_1 = \frac{m_{xi}}{m_w(m_{xi} - m_w)}$$

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{EA}{R}$$

$$\begin{aligned}A_1 = & \ddot{r}(R + \delta)\cos r + 2\dot{r}\delta\cos r - (\dot{r})^2(R + \delta)\sin r \\ & + \frac{Q_w\cos\theta_w}{m_w} + \frac{Y_s\sin\theta_s - Q_s\cos\theta_s}{m_{xi} - m_w}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A_2 = & -\ddot{r}(R + \delta)\sin r - 2\dot{r}\delta\sin r - (\dot{r})^2(R + \delta)\cos r \\ & + \frac{Q_w\sin\theta_w}{m_w} - \frac{Y_s\cos\theta_s + Q_s\sin\theta_s}{m_{xi} - m_w}\end{aligned}$$

则方程(23)、(24)简化为

$$-C_2\delta\sin r - C_1T\cos r = A_1 + \delta\sin r$$
 (25)

$$-C_2\delta\cos r + C_1T\sin r = A_2 + \delta\cos r \quad (26)$$

联立求解此方程组,得到一个反映伞、回收物、弹性杆相互关系的运动方程

$$\dot{\delta} = -C_2\delta - A_1\sin r - A_2\cos r \quad (27)$$

5 仿真状态方程与求解

经过前面的公式推导,得到五个独立的开伞动力学方程:式(9)、(11)、(12)、(13)、(27)。引入下面一组状态变量。

$$Y_1 = \dot{x} \text{ (水平方向速度)}$$

$$Y_2 = \dot{z} \text{ (垂直方向速度)}$$

$$Y_3 = \dot{r} \text{ (系统转动角速度)}$$

$$Y_4 = x \text{ (水平方向位移)}$$

$$Y_5 = z \text{ (垂直方向位移)}$$

$$Y_6 = r \text{ (系统转动角位移)}$$

$$Y_7 = V \text{ (瞬时充气体积)}$$

$$Y_8 = \dot{V} \text{ (充气体积变化率)}$$

$$Y_9 = \dot{\delta} \text{ (弹性杆的伸长速度)}$$

$$Y_{10} = \delta \text{ (弹性杆的伸长量)}$$

可得到如下一组翼伞开伞仿真状态方程

$$\dot{Y}_1 = (Y_1\sin\theta_s - Q_s\cos\theta_s - Q_w\cos\theta_w)/m_{xi}$$

$$\dot{Y}_2 = (m_{xi}g - Y_2\cos\theta_s - Q_s\sin\theta_s - Q_w\sin\theta_w)/m_{xi}$$

$$\dot{Y}_3 = \{M_0 + L_s[Q_s\cos(\alpha + \varphi) - Y_3\sin(\alpha + \varphi)] - L_wQ_w\cos(Y_6 + \theta_w) + (G_sL_s - G_wL_w)\sin Y_6 - M_z\}/J_{xi}$$

$$\dot{Y}_4 = Y_1$$

$$\dot{Y}_5 = Y_2$$

$$\dot{Y}_6 = Y_3$$

$$\dot{Y}_7 = Y_8$$

$$\dot{Y}_8 = [2\rho v^2 a_1^2 - \frac{1}{2}\rho Y_8 |Y_8| - 0.332 Y_8 |Y_8| \sqrt{\frac{2\rho\mu Y_7}{|Y_8|}} \cdot \frac{a_1}{b_1} + \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ -2K(Y_7 - V_s) \end{array} \right\}]/m$$

$$\dot{Y}_9 = -C_2 Y_{10} - A_1 \sin Y_6 - A_2 \cos Y_6$$

$$\dot{Y}_{10} = Y_9$$

采用四阶龙格-库塔法,通过仿真程序对此方程进行求解,便可得到翼伞开伞的充满时间、最大开伞冲击载荷以及开伞速度、开伞姿态和空间坐标等参数的变化情况。

6 算例

本文所提供的算法和仿真程序在文献 [5] 中得到了较好的应用。这里给出对一个 60 平方米翼伞, 在不同开伞高度、开伞速度、回收物重的条件下, 所得到的仿真计算结果, 列入表 1 和表 2 中。图 6 是某一种参数下开伞冲击力的变化曲线。计算结果表明: 计算结果和试验值相近, 说明本文所提供的算法和程序软件是可行的。

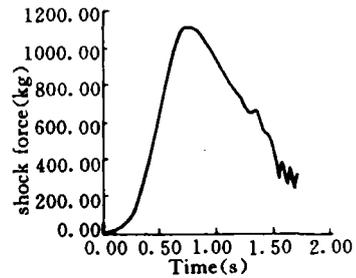


图 6 开伞冲击力变化曲线

表 1 垂直开伞

开伞高度(米)	630	530	430	400
开伞速度(米/秒)	50	40	40	40
回收物重(公斤)	170	200	170	150
充满时间(秒)	1.24	1.45	1.48	1.51
最大动载(公斤)	1599.0	1272.5	1141.7	1053.9
最大过载系数	7.52	5.29	5.4	5.49
过载试验值	7.0	5.5	6.5	5.0

表 2 倾斜 3°开伞

开伞高度(米)	630	530	430	400
开伞速度(米/秒)	50	40	40	40
回收物重(公斤)	170	200	170	150
充满时间(秒)	1.31	1.51	1.56	1.59
最大动载(公斤)	1361.3	1128.7	999.4	912.6
最大过载系数	6.49	4.74	4.76	4.76
过载试验值	7.0	5.5	6.5	5.0

参 考 文 献

- 1 降落伞充气理论的发展. 南京航空学院一〇五教研室
- 2 徐文熙, 徐文灿编著. 粘性流体力学. 北京理工大学出版社, 1989
- 3 王连起编著. 理论力学. 国防科技大学出版社, 1984
- 4 E L Keck. A Computer Simulation of Parachute Opening Dynamics. AIAA paper: 75~1379
- 5 邓正才. 冲压式翼伞开伞仿真技术研究. 国防科技大学研究生论文, 1991

Simulation of Parafoil Opening

Li Guoguang Deng Zhencai

(Department of Aerospace Technology)

Abstract

In this paper, based on analysis of parafoil opening properties, two-dimensional opening model of parafoil is presented, canopy radial equation of motion is established. At the same time, parafoil system is assumed to be a two-particle-elastic rod model, then the equation of motion for parafoil system, canopy, and payload is derived. Finally, parameters such as filling time, shock force, inflow velocity, etc. are obtained using computer simulation. The simulation program can be used in some parafoil design.

Key words parafoil, opening simulation, filling time, opening force