

文章编号: 1001-2486(2009)03-0011-05

# 基于正交试验的大型降落伞开伞冲击载荷影响因素分析\*

丁娣, 秦子增

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 对大型伞开伞过程冲击载荷的影响因素灵敏度进行研究。采用充气时间法对降落伞的充气过程进行建模, 并运用正交试验设计方法设计了数值试验来分析初始条件、回收物参数、减速伞参数、主伞参数和环境条件等 21 个影响因素对主伞和减速伞的 2 次开伞力峰值、主伞开伞时刻动压等 5 个指标的影响及灵敏度。通过对比 4 组不同初始条件的数值试验结果, 提出了影响减速伞和主伞开伞冲击载荷的主要因素, 并具体分析各个因素的影响方式。

**关键词:** 大型伞充气过程; 开伞冲击载荷; 充气时间法; 正交试验设计; 灵敏度分析

**中图分类号:** V455.23 **文献标识码:** A

## Analysis of Parachute's Deployment Load and Influential Factors Based on Orthogonal Experiment Method

DING Di, QIN Zi-zeng

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Influential factors' sensitivity in the huge parachute's deployment load is discussed in this paper. The dynamic model during parachute inflation is based on the inflation time method, the numerical experimentation is designed by orthogonal experiment approach for analyzing the influence and sensitivity of 21 parameters such as initial conditions, recovery object parameters, pilot parameters, main parachute parameters and environment conditions etc. about 5 indexes such as two parachutes' deployment force peak and the dynamic pressure when the main parachute deployed. Four numerical experiment results obtained from four different initial conditions are compared in this paper, the main factors which influence pilot and main parachute's deployment load are presented, and the influential mode of every factor is concretely analyzed.

**Key words:** huge parachute inflation process; deployment load; inflation time method; orthogonal experiment approach; sensitivity analysis

在飞行器回收领域, 降落伞系统已经在无人靶机和遥控飞行器回收、导弹和弹头回收、运载火箭回收、返回式卫星回收、行星际探测器着陆及减速、载人飞船返回着陆等多个方面得到了成功的应用<sup>[1]</sup>。在大型降落伞回收任务中, 开伞冲击(过载或力的峰值)直接影响降落伞能否正常开伞, 是非常重要的设计指标, 因此有必要通过分析来确定影响开伞冲击载荷的主要因素。通过影响因素分析, 可设计极端开伞环境和条件, 通过半实物仿真平台进行试验, 可得出最大/最小开伞过程参数, 如开伞冲击力、开伞动压等, 进而校验伞系统的安全可靠性。典型的大型降落伞回收系统采用减速伞、主伞来分阶段完成回收物的减速。为了减小减速伞和主伞开伞过程中的开伞冲击载荷, 二者都采用了收口技术, 使得降落伞的充气过程分为两次完成, 即两级开伞。减速伞和主伞的开伞充气过程对于大型降落伞回收系统来说非常关键, 是大型降落伞回收过程分析中很重要的方面。

大型伞的充气过程属于复杂的流固耦合过程, 是大型伞动力学问题研究的重点和难点。目前充气过程的主要研究方法有完全试验法<sup>[2]</sup>、半试验半理论方法和完全理论计算方法三种。完全试验方法是通过试验确定开伞力、充满距离、充满时间和伞衣形状变化等; 半试验半理论方法分为轴向动量方程模

\* 收稿日期: 2008-08-27

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 丁娣(1981-), 女, 博士生。

型(充气时间法<sup>[3-4]</sup>、充气距离法)和轴向径向动量方程模型<sup>[5-7]</sup>;完全理论计算方法即流固耦合计算方法,是目前发展的重点,虽然这种方法可以同时考虑伞衣变形和周围流场的变化,但对于大型伞系统而言,这种方法计算量极大。

从理论上来看,通过对降落伞的充气过程进行分析就能预测降落伞的开伞冲击载荷;但是由于受随机开伞环境的影响,无论是通过试验方法还是通过理论计算,开伞冲击载荷的准确预测都比较困难。在空投实验中,测得的开伞冲击数据一般都存在 10% 左右的散布,个别数据散布甚至可能达到 30% 以上。本文采用充气时间法对降落伞的充气过程进行建模分析,对某型降落伞回收空投 12 个架次测量数据的预测误差大部分在 15%~20% 以内,其最大误差与空投测量数据最大散布相当<sup>[8]</sup>。

大型伞两级开伞冲击载荷即降落伞充气过程的 2 个开伞力峰值,对降落伞设计而言是非常重要的指标,也是评估大型伞回收系统工作可靠性的重要参数。对于工程单位而言,知道哪些设计参数对开伞冲击载荷影响较大,哪些影响较小是非常重要的。在充气模型和仿真程序的支持下,本文采用正交试验设计方法设计了一套分析影响因素的影响及灵敏度的数值试验;通过试验分析了工程单位比较关心的 21 个影响因素,包括初始条件、回收物参数、减速伞参数、主伞参数和环境条件,对主伞和减速伞的 2 次开伞力峰值、主伞开伞时刻动压等 5 个指标的影响。

## 1 灵敏度数值试验设计

对于工程单位关心的两级最大开伞冲击力,当考虑多个影响因素(包括初始速度、姿态角、角速度、回收物气动系数、质量、阻尼特征、大气密度等)时,不光涉及充气阶段模型,还包括单舱运行、拉直等阶段模型,其模型复杂程度更高,采用解析方法分析影响因素灵敏度非常困难。

### 1.1 正交试验设计方法

正交设计方法是一种已经发展成熟的工程试验设计方法,它适用于多因素多指标的优选问题。假设需要设计试验讨论  $M$  个影响因素对  $N$  个指标的影响灵敏度。对于  $M$  个影响因素,每个因素取  $k$  个水平,通过一般的穷举试验分析,需要进行  $k^M$  次试验才能完成分析。而采用正交分析法,选取  $L_a(k^M)$  正交表安排试验,其中  $a$  为正交表的行数(即试验次数),最多能安排的影响因素数量是固定的(假设为  $b$ ),只需选择  $b > M$  的正交表即可。在一般情况下  $a \ll k^M$ ,所以能大大减少试验的次数。采用正交表安排的试验,可以保证在  $a$  次数值仿真试验中  $j$  因素取  $i$  水平的试验为  $a/k$  次,通过对这  $a/k$  次试验进行分析,可以得到  $j$  因素取  $i$  水平对于某个指标的平均影响结果。记  $j$  因素  $i$  水平的试验指标均值(简称水平均值)为  $k_i^j$ ,  $j$  因素在该试验指标下的极差为  $R^j$ ,并且可以对极差进行无量纲化处理,对于  $L_a(k^M)$  正交表对应的仿真试验有

$$\begin{cases} k_i^j = \frac{\sum_{i=1}^{a/k} y_i^j}{a/k} \\ R^j = [\max(k_i^j) - \min(k_i^j)] / \text{mean}(k_i^j) \end{cases} \quad (1)$$

依据(1)式得到的各影响因素对应每一试验指标的极差大小,可排出每一试验指标被影响的大小顺序,极差大的说明某个指标对该因素的变化敏感,极差的正负号则对应影响的正负。

### 1.2 数值试验方案

本文所考虑的 21 个影响因素及其变化范围如表 1 所示。需要讨论的开伞过程关键参数共有 5 个,分别是:(1) 减速伞一级开伞力峰值;(2) 减速伞二级开伞力峰值;(3) 主伞一级开伞力峰值;(4) 主伞二级开伞力峰值;(5) 开主伞时刻的动压。对于 21 个影响因素,每个因素选择 2 个水平,选择  $L_{32}(2^{21})$  的正交表,需要进行 32 次试验来完成分析。

数值试验仿真的对象为苏联的联盟号 TM 回收过程,采用程控模拟程序来发出开伞等相关指令,并针对 4 条典型的联盟号回收再入弹道来选择初始条件,一般选择离地面高度 10km 处的弹道和回收物数据作为回收系统仿真初始条件。本文选择的 4 组不同初始条件如表 2 所示,21 个影响因素中的系统参

数及环境参数采用设计标准值及理想大气模型参数。

表 1 影响因素及变化范围

Tab. 1 Influencing factors and distributing area

影响因素类别	影响因素	最大最小偏差
初始条件变量	初始偏航、俯仰、滚转角	$\pm 10^\circ$
	初始攻角、侧滑角	$\pm 5^\circ$
	初始合速度	$\pm 30\text{m/s}$
	3 个方向的初始角速度	$\pm 15^\circ/\text{s}$
回收物变量	压心、法向力、轴向力系数偏差	$\pm 10\%$
	质量	$\pm 50\text{kg}$
减速伞变量	收口阻尼、张满阻尼特征	$\pm 10\%$
	解除收口时序	$\pm 1\text{s}$
主伞变量	拉直阻尼、收口阻尼、张满阻尼特征	$\pm 10\%$
	解除收口时序	$\pm 1\text{s}$
环境变量	大气密度	$\pm 10\%$

表 2 4 组不同初始条件

Tab. 2 Four different initial conditions

初始条件	第一组	第二组	第三组	第四组
初始偏航角( $^\circ$ )	0	116.35	- 45.54	- 78.10
初始俯仰角( $^\circ$ )	- 80	- 38.79	- 52.01	- 77.36
初始滚转角( $^\circ$ )	0	140.09	106.61	1.88
初始高度(m)	10 300	13 549	13 549	11 728
初始合速度(m/s)	180	234.29	234.29	208.622

## 2 灵敏度试验结果及分析

### 2.1 试验结果

运行数值仿真并依据正交试验设计所确定的数据处理流程可以得到的不同初始条件下各个指标对应各影响因素的无量纲化极差。因为需要分析的因素有 21 个之多, 因此对每个指标单独考虑, 通过初步的比较选择每组初始条件对应的结果中极差绝对值最大的 4 个影响因素, 组成最后综合分析时重点考虑的因素集合, 如表 3 所示。

表 3 影响因素无量纲化极差表: 减速伞一级开伞力

Tab. 3 Influencing factors' dimensionless range table: pilot first deployment load

影响因素	第一组	第二组	第三组	第四组
初始俯仰角	- 3.21	- 3.03	- 4.50	- 9.63
初始合速度	60.76	10.16	12.63	33.74
初始角速度 $W_x$	0.60	4.91	7.26	1.41
初始角速度 $W_y$	- 7.13	0.73	- 1.24	- 3.47
回收物轴向力系数	- 0.69	- 15.38	- 11.90	- 5.75
减速伞收口阻尼面积	19.42	18.64	20.20	21.06
大气密度	17.02	4.39	4.40	11.09

表4 影响因素无量纲化极差表: 减速伞二级开伞力

Tab. 4 Influential factors' dimensionless range table: pilot second deployment load

影响因素	初始条件	第一组	第二组	第三组	第四组
初始俯仰角		- 9.25	- 5.75	- 3.84	- 7.01
初始合速度		- 17.32	4.40	3.11	7.39
回收物轴向力系数		- 7.00	- 8.88	- 10.42	- 8.87
减速伞收口阻尼特征		- 12.52	- 11.12	- 13.02	- 13.72
减速伞张满阻尼特征		22.70	25.40	22.22	23.05
解除收口时序		- 7.25	- 10.91	- 10.38	- 8.96

表5 影响因素无量纲化极差表: 主伞一级开伞力

Tab. 5 Influential factors' dimensionless range table: main parachute first deployment load

影响因素	初始条件	第一组	第二组	第三组	第四组
回收物轴向力系数		- 5.17	- 2.47	- 4.73	- 4.75
回收物质量		3.96	5.81	4.04	4.05
减速伞张满阻尼特征		- 8.71	- 6.93	- 9.06	- 8.96
主伞收口阻尼特征		8.41	8.98	8.51	8.29
大气密度		- 6.92	- 7.99	- 7.67	- 7.78

表6 影响因素无量纲化极差表: 主伞二级开伞力

Tab. 6 Influential factors' dimensionless range table: main parachute second deployment load

影响因素	初始条件	第一组	第二组	第三组	第四组
回收物质量		4.67	7.32	4.73	4.13
主伞收口阻尼特征		- 14.89	- 14.00	- 15.19	- 15.40
主伞张满阻尼特征		6.27	4.83	5.49	5.40
主伞解除收口时序		- 7.80	- 7.62	- 7.72	- 8.04
大气密度		- 9.77	- 9.82	- 9.47	- 9.99

表7 影响因素无量纲化极差表: 主伞开伞时刻动压

Tab. 7 Influential factors' dimensionless range table: main parachute deployment pressure

影响因素	初始条件	第一组	第二组	第三组	第四组
回收物轴向力系数		- 5.32	- 4.97	- 5.76	- 5.47
回收物质量		3.05	3.7	2.99	3.39
减速伞张满阻尼特征		- 15.14	- 14.37	- 15.82	- 15.41
减速伞解除收口时序		4.58	4.79	4.78	4.87
大气密度		- 2.16	- 3.59	- 3.41	- 3.06

## 2.2 试验结果分析

从试验结果中可以看出, 初始条件对开伞冲击载荷的影响集中在减速伞工作段。从数值试验结果中可以看到, 在不同的回收物姿态和初速度下, 减速伞的开伞冲击载荷对于各个因素的灵敏度分析结果没有很好的一致性。减速伞工作段影响因素的灵敏度受初始条件影响较大, 特别是初始姿态对因素灵敏度的影响还需要做更深入的讨论。

在主伞冲击载荷分析中, 敏感性较大的因素为伞、回收物的系统参数和大气密度。从试验结果上看, 对不同的初始条件, 主伞开伞冲击指标对各因素的敏感性具有非常好的一致性, 这说明本文设计的数值试验对于主伞开伞冲击灵敏度分析的结果具有较高的可信性。

从数值试验结果可看出, 大气密度是影响开伞冲击载荷的一个比较重要的因素。大气密度变化对物伞系统有两个方面的影响: 通过作用在回收物上的气动力, 大气密度增大, 回收物的落速被降低, 从而使得开伞冲击载荷有减小的趋势; 另一方面, 大气密度越大, 作用在伞上面的气动力就越大, 从而使得开伞冲击载荷有增大的趋势。从试验结果上看, 大气密度对减速伞一级开伞力的影响是大气密度偏大, 一级开伞力较大, 这是因为在减速伞工作段, 物伞系统的落速较大(一般在  $200\text{m/s}$  左右), 同时由于减速伞面积较主伞小, 对回收物的减速作用不大, 因此大气密度增加引起减速伞气动力增加较为明显, 开伞冲击载荷体现为增大的趋势。对于主伞工作段而言, 由于主伞面积达上千平方米, 主要起到对物伞系统减速的作用(开伞后落速可减小 10 倍以上), 因此大气密度增加对回收物气动力影响较大, 开伞冲击载荷体现为减小的趋势。

伞(减速伞/主伞)的系统参数(阻尼特征等)对于开伞冲击载荷具有直接的影响。从数值试验结果中看出, 初始条件对它们的影响不大, 在减速伞和主伞工作段都具有很好的一致性。首先, 降落伞各个阶段对应的阻尼面积越大, 该阶段的开伞冲击载荷越大。其次, 上一阶段对应的阻尼面积越小, 这个阶段的开伞冲击载荷就越大。同时降落伞解除收口时序也对伞的二级开伞冲击载荷有较大的影响, 保持收口的时间越长, 物伞系统被减速的时间越长, 相应的二级开伞冲击载荷就越小。对于开主伞时刻的动压, 由于减速伞工作段的时间是固定的, 减速伞解除收口时序越长, 减速伞全充满下降时间就越短, 到拉主伞时刻物伞系统的速度就越大, 因此, 开主伞时刻动压也就越大。

回收物质量和轴向力系数对于开伞冲击载荷的各个阶段都有较明显的影响。其中回收物质量增加会增大开伞冲击载荷, 而回收物轴向力系数增加有减小开伞冲击载荷的作用, 这与理论分析相符。回收物的这两个参数对于主伞的影响较为明显, 因此在回收系统设计中, 对于不同回收物的质量和气动外形, 必须详细地校验主伞的开伞冲击载荷, 保证回收的安全。

### 3 结论

(1) 不同初始条件较大地影响了减速伞工作段的两级开伞冲击载荷影响因素灵敏度分析, 得出的减速伞开伞冲击载荷影响因素灵敏度排序一致性较差。

(2) 不同初始条件对主伞工作段的两级开伞冲击载荷及开伞时刻动压影响因素灵敏度分析影响较小, 通过数值试验得到的影响因素灵敏度排序结果较为可信。

(3) 伞的系统参数(特别是阻尼特征)对两级开伞冲击载荷具有直接的影响。除此之外, 大气密度、回收物质量及其轴向力系数在设计开伞冲击载荷时也不可忽略, 在回收物质量和轴向力系数发生变化时, 必须重新校验回收系统的设计。

(4) 回收过程中的再入状态和空投中的初始条件将显著影响减速伞的工作过程和开伞冲击载荷, 需要加以注意。

在分析过程中, 由于采用了正交试验设计方法, 使得数值试验计算次数大大降低。对于文中所讨论的物伞系统而言, 得到的各指标的影响因素灵敏度排序及大小评估具有一定的普遍意义, 能为工程设计提供参考和数据支持。

### 参考文献:

- [1] 马宏林. 国内外航天飞行器回收技术发展情况[R]. GF- A0013916G, 1987.
- [2] Ewing E G, Bixby H W. 回收系统设计指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 1988.
- [3] McEwan A J. An Investigation of Parachute Opening Loads and a New Engineering Method for Their Determination[R]. AIAA 70- 1168, 1970.
- [4] Heinrich H G. Analysis of Parachute Opening Dynamics with Supporting Wind Tunnel Experiments[R]. AIAA 68- 0924, 1968.
- [5] Toni R A. Theory on the Dynamics of a Parachute System Undergoing Its Inflation Process[R]. AIAA 70- 1170, 1970.
- [6] Wolf D F. A Simplified Dynamic Model of Parachute Inflation[J]. Journal of Aircraft, 1974(1).
- [7] Macha J M. A Simple Approximate Model of Parachute Inflation[R]. AIAA 93- 1206, 1993.
- [8] 国防科技大学回收课题组. 半实物仿真系统仿真结果验证[R]. 国防科技大学, 2008.