

文章编号: 1001- 2486(2010) 04- 0049- 06

牵顶伞对大型降落伞抽打现象的作用*

王海涛¹, 秦子增¹, 宋旭民², 郭 鹏¹

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 装备指挥技术学院 重点实验室, 北京 101416)

摘 要: 对某大型降落伞系统的拉直过程进行多阶段、多有限段和多自由度的动力学建模。通过仿真研究了牵顶伞和剥离带等改进措施对主伞拉直后伞衣抽打现象影响, 重点分析比较了带与不带牵顶伞时伞衣位形、抽打速度、偏离距离等参数的变化, 分析结果可为大型降落伞的工程设计、改进和使用提供理论支持。

关键词: 牵顶伞; 抽打现象; 抽打速度; 偏离距离; 剥离带

中图分类号: V476. 2 **文献标识码:** A

Effects of the Attached Apex Drogue on Phenomenon of Bull Whipping in the Deployment Process of Large Parachute

WANG Hai-*tao*¹, QIN Zi-*zeng*¹, SONG Xu-*min*², GUO Peng¹

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

2. Key Laboratory of Academy of Equipment Commanding and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: Based on the finite element thought, a multistage, multi-finite element and multi-freedom dynamic model of the deployment process of a large parachute was built. The effects of the attached apex drogue and peel off band on the phenomenon of bull whipping formed after the deployment process of the main parachute were studied through simulation. The analysis was focused on the comparison of shape movements of canopy, velocity of bull whipping and distance of departure with or without the attached apex drogue. The conclusion can provide theoretic help for the engineering design department in designing, improving and using the large parachute.

Key words: attached apex drogue; phenomenon of bull whipping; velocity of bull whipping; distance of departure; peel off band

大型降落伞在拉直和初始充气过程中容易产生绳帆和抽打现象, 绳帆现象是指降落伞在拉直过程中, 拉出的伞绳或伞衣出现“部分弯曲”的现象^[1- 2]。而抽打现象则是指降落伞的伞衣在完全拉出而又未完成初始充气前, 其顶部出现的高速剧烈甩动现象, 亦有文献称之为抽鞭现象^[3- 4], 因为抽打现象形成时的速度低于抽鞭现象中的超音速, 故本文称之为抽打现象, 以示区别。抽打现象可能导致伞衣破损、开伞冲击过大, 非对称充气等后果, 严重情况下, 可能导致开伞失败。美国在 2004 年秋进行了四次针对新一代火星探测器降落伞回收系统的高空空投试验, 其中前两次均因大型主伞在拉直后产生抽打现象而导致回收失败^[5]。国内宋旭民系统总结了回收过程中出现抽打现象的案例, 并对其进行过初步的研究^[3- 4], 国外目前尚未看到相关研究文献。

为了抑制大型降落伞拉直后的抽打现象, 工程设计部门一般采用在主伞伞衣顶部附加牵顶伞的方式^[6]。相关空投试验观察表明, 牵顶伞在主伞的开伞过程中, 对主伞伞衣顶部的抽打现象具有一定的抑制作用。美国阿波罗飞船着陆系统的主伞, 俄罗斯联盟号飞船的主伞普遍采用牵顶伞, 我国神舟号飞船的回收系统中也即将加入牵顶伞和剥离带设计。但是, 目前对牵顶伞和剥离带对抽打抑制作用的研究大都基于试验分析, 国内外鲜见有理论和仿真研究的文献。余莉^[7]对牵顶伞对绳帆现象的作用做过一定仿真研究, 林斌^[8]对牵顶伞的作用做过基于空投试验的分析, 而本文则尝试从理论建模和仿真分析的角度去解释牵顶伞和剥离带对抽打现象的作用。

* 收稿日期: 2010- 03- 02
基金项目: 国家部委资助项目
作者简介: 王海涛(1982—), 男, 博士生。

1 分阶段动力学建模

1.1 拉直过程的阶段划分

根据系统实际工作过程中各阶段不同的动力学特点, 将主伞拉直和初始充气的整个过程分解为 8 个阶段分别建模, 每一个阶段的初始条件由前一阶段的仿真终端结果确定, 各个阶段依次计算直至初始充气结束。

(1) 减速伞分离阶段

减速伞解锁指令发出后, 减速伞带着连接接头脱离返回舱为减速伞分离阶段。这一阶段的系统结构如下: 主伞包和返回舱无相对运动, 作为一个刚体, 采用 6DOF 刚体模型。减速伞和旋转接头通过吊带连接, 减速伞采用 6DOF 模型, 旋转接头采用 3DOF 质点模型, 本阶段系统共有 15 个自由度。

(2) 拉主伞包阶段

从主伞包开始被拉出伞舱到外封包打开为拉伞包阶段。此阶段主伞包必须单独建模。系统结构为: 减速伞(6DOF) - 连接接头(3DOF) - 伞包(6DOF) - 返回舱(6DOF), 共 21DOF。

(3) 伞绳拉直阶段

从主伞包外封包打开到全部伞绳拉出伞包这一过程称为伞绳拉直阶段。本阶段与上一阶段不同之处在于伞包和返回舱之间由伞绳相连, 伞包和返回舱都受到伞绳张力的作用。系统结构如下: 减速伞(6DOF) - 连接接头(3DOF) - 伞包(6DOF) - 已拉出的伞绳($3n$ DOF) - 返回舱(6DOF), 模型共有 $21 + 3n$ 个自由度(n 为已拉出伞绳节点的数目)。当全部伞绳节点拉出后(共划分 215 个伞绳节点), 模型共具有 666 个自由度。

(4) 伞衣拉直阶段

从主伞内封包打开到主伞伞衣全部拉出为伞衣拉直阶段。系统的结构形式为: 减速伞(6DOF) - 连接接头(3DOF) - 伞包及未拉出的伞衣(6DOF) - 已拉出的伞衣与伞绳($3n$ DOF) - 返回舱(6DOF), 系统的总自由度数目为 $21 + 3n$ (n 为全部伞绳节点和伞衣节点的数目之和), 当全部伞衣和伞绳拉出后(共划分 145 个伞衣节点), 模型共有 1101 个自由度。

(5) 主伞包连接带剥离阶段

主伞伞衣通过顶孔绳将牵顶伞包拉出主伞包, 此阶段牵顶伞伞包和主伞包之间存在剥离机构, 故称主伞包连接带剥离阶段。系统的结构形式为: 减速伞(6DOF) - 连接接头(3DOF) - 主伞包(6DOF) - 牵顶伞包(3DOF) - 已拉出的伞衣与伞绳($3n$ DOF) - 返回舱(6DOF), 共 1104DOF。

(6) 牵顶伞连接带剥离阶段

主伞伞衣通过顶孔绳将牵顶伞的连接带拉直, 由于牵顶伞的连接带是剥离机构的形式, 故称为牵顶伞连接带剥离阶段。此阶段系统结构与上一阶段相同, 主伞包连接带剥离完成后, 牵顶伞外包上的剥离带开始剥离。

(7) 牵顶伞拉直和充气阶段

此阶段牵顶伞连接带将牵顶伞绳和伞衣拉直, 牵顶伞迅速充气。牵顶伞拉直采用简单的直线拉出模型, 系统自由度数与上一阶段相同。

(8) 主伞初始充气阶段

当牵顶伞拉直和充气完成后, “减速伞(6DOF) - 连接接头(3DOF) - 主伞包(6DOF) - 牵顶伞包(3DOF)” 作为一个整体脱离主伞系统, 而“牵顶伞(6DOF) - 全部拉出的主伞伞衣与伞绳($3n$ DOF) - 返回舱(6DOF)” 组成的系统继续运行, 此时系统共有 1092DOF。主伞初始充气过程完成, 仿真结束, 称此阶段为主伞初始充气阶段。

1.2 动力学模型

回收主伞的拉直过程很短, 仅 1s 多, 但是其间经历了很多动作。拉直过程的每一阶段都由若干运动基元模型构成, 是一个典型的多体系统。由于建模过程涉及的动力学基元模型较多, 本文仅介绍主要

的基元模型。

(1) 刚体和质点的动力学模型

建模中将返回舱、全张满状态下的减速伞和牵顶伞、主伞包等均视为刚体,采用通用的六自由度动力学模型,具体建模过程可参考相关资料,此处不再赘述。连接接头、旋转接头和牵顶伞包等基元由于体积较小,且其姿态变化对系统运动影响不大,故采用质点模型,建模中可忽略其气动力,仅考虑重力和约束力。

(2) 约束模型

各运动实体通过吊带和连接带建立约束关系,实现运动之间的耦合。因此,在建模中也需要建立对应的约束模型,建模中,吊带被近似为无质量的阻尼弹簧,其张力计算如式(1)所示:

$$T = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq 0 \\ K\varepsilon + B\dot{\varepsilon} & \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (1)$$

若已知吊带两端点的相对位置 $\mathbf{r}$ 和相对速度矢量 $\mathbf{v}$, 吊带的原长为 l_0 , 则应变和应变率的表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{\|\mathbf{r}\|}{l_0} - 1 \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}}{\|\mathbf{r}\| l_0} \quad (2)$$

(3) 伞绳和伞衣的质量阻尼弹簧模型

针对伞绳和伞衣等柔性体的建模中,采用有限元(段)的思想,将其划分为若干绳段小单元,每个单元视为质量集中在中心的质点,质点之间通过阻尼弹簧相连接,如图1所示。

各个质点的动力学方程的矢量形式如下:

$$m_i \mathbf{r}_i = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_{gi} + \mathbf{F}_c \quad (3)$$

式中, $\mathbf{F}_a$ 、 $\mathbf{F}_t$ 和 $\mathbf{F}_{gi}$ 分别为绳段 i 的气动力、张力及重力, $\mathbf{F}_c$ 为绳段 i 所受到的约束力(例如伞绳在拉直过程中会受到主伞包内捆绑绳的约束),需要根据约束条件确定,将上述各个质点的动力学方程联立,即可建立伞绳和伞衣系统的质量阻尼弹簧动力学模型。

作用在绳段 i ($i = 1, 2, \dots, N$) 上的气动力可用下式表示^[9]

$$\mathbf{F}_{ai} = -C_{n,i} \frac{\rho l_i s_i}{2} \|\mathbf{V}_n^i\| \mathbf{V}_n^i - C_{t,i} \frac{\rho l_i s_i}{2} \|\mathbf{V}_t^i\| \mathbf{V}_t^i \quad (4)$$

其中, d_i 为绳段 i 横截面的直径, $\mathbf{V}_n^i$ 和 $\mathbf{V}_t^i$ 分别为绳段 i 中点相对于气流的法向速度和切向速度, ρ 为大气密度。 $C_{n,i}$ 和 $C_{t,i}$ 分别为绳段 i 的法向力系数和切向力系数。

2 仿真算例及结果分析

2.1 初始条件设置

本文主要研究牵顶伞和剥离带对抽打现象的作用,因此,在有和无牵顶伞两种情况中,采用相同的仿真初始条件,即仿真开始时(减速伞尚未分离时)返回舱和减速伞组成的吊挂系统采用相同的初始计算条件。仿真中取伞舱系统高度为 8000m,速度为 80m/s,弹道倾角为 -75° 。将改进前没有加牵顶伞和剥离带的仿真算例称为算例 1,而将改进后加牵顶伞和剥离带之后的仿真算例称为算例 2,通过两者计算结果的比较,定量地分析牵顶伞和剥离带对抽打现象的作用。

2.2 仿真结果及分析

利用本文建立的动力学模型,可以分析返回舱的运动状态、伞绳和伞衣的拉出过程以及伞绳和伞衣的位形、速度和张力分布等参数。由于本文主要研究抽打现象,故选取能够较明显反映抽打现象的伞衣位形、伞衣顶部节点速度以及伞衣的偏离距离^[10]三个指标来进行对比分析。

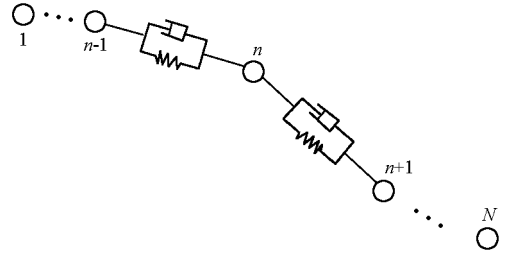


图1 伞绳和伞衣的质量阻尼弹簧模型
Fig.1 Mass damping spring model of the lines and canopy

(1) 伞衣位形对比

抽打现象主要表现为伞衣顶部的剧烈电动, 一般情况下, 伞衣顶部向不同的方向电动两次后, 主伞的初始充气完成, 主伞伞衣也就停止了电动。因此, 伞衣位形的变化是抽打现象的一个重要特点。图 2 和图 3 分别是算例 1 和算例 2 计算得到的具有典型特征的伞衣位形, 文中选取相同仿真时刻的伞衣位形作对比。值得说明的是, 由于主伞系统增加了剥离带和牵顶伞, 其拉直时间相应增加了约 0.02s, 但延迟时间太短, 对伞衣位形变化的影响不大, 故本文仍采用两种算例相同时刻的伞衣位形进行比较。

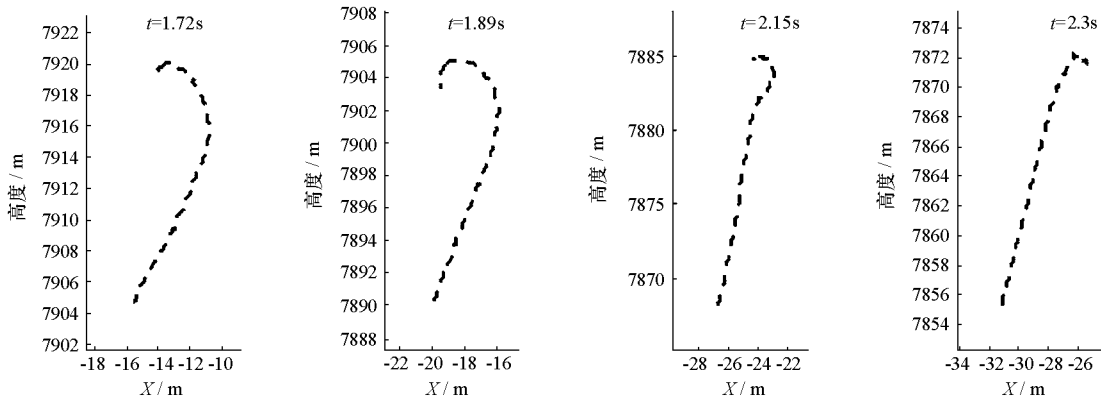


图 2 未加牵顶伞的伞衣位形
Fig. 2 Displacement of canopy without attached apex drogue

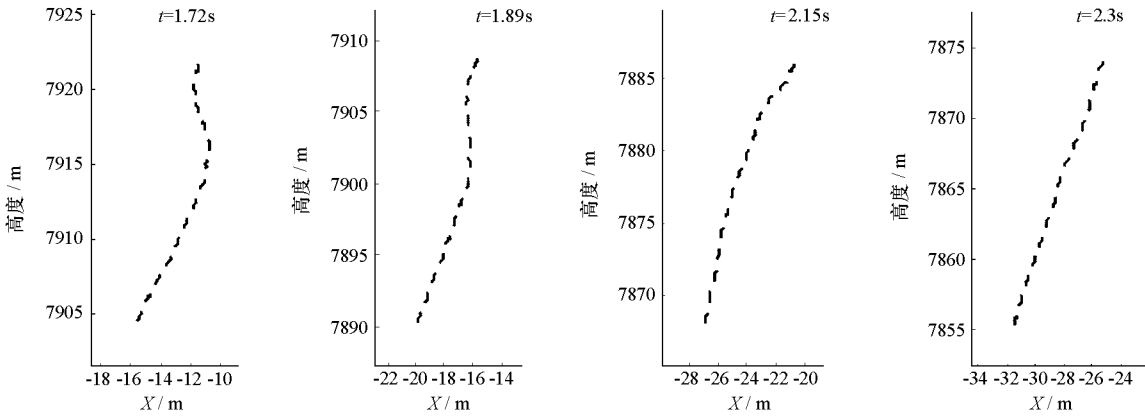


图 3 加牵顶伞时伞衣的位形
Fig. 3 Displacement of canopy with attached apex drogue

仿真计算到 1.72s 时, 未加牵顶伞的主伞伞衣已经显示向左电动, 并呈现比较明显的“鱼钩”状弯曲; 而此时加牵顶伞的主伞伞衣出现“S”状弯曲, 但其弯曲程度比未加牵顶伞的主伞伞衣的弯曲程度要小。这种现象表明主伞伞衣在向左电动的过程中受到牵顶伞的阻力, 由于牵顶伞对靠近牵顶伞的主伞伞衣部分的抑制作用比较明显, 而远离牵顶伞的主伞伞衣部分则保持原来的运动趋势继续向左电动, 故主伞伞衣呈“S”状。

仿真计算到 1.89s, 此时未加牵顶伞的主伞伞衣顶部向左电动到最大, 而加牵顶伞的主伞伞衣的弯曲的下半部分保持原来的运动趋势, 向返回舱空速方向摆动, 故此时显示的“S”状弯曲程度小于 1.72s 时的计算结果。

仿真计算到 2.15s 时, 未加牵顶伞的主伞伞衣弯曲部分的下半部分基本稳定在返回舱空速方向, 而顶部伞衣则向相反方向电动。加牵顶伞主伞伞衣顶部约 1/5 部分向右电动, 但其弯曲程度较小, 且偏离返回舱空速方向不大。

仿真计算到 2.3s 时, 未加牵顶伞的主伞伞衣向右弯曲到最大程度, 呈“鱼钩”状。而加牵顶伞的主伞伞衣顶部基本已呈拉直状态。

两者的对比结果表明,牵顶伞能够抑制伞衣电动,使伞衣较快地稳定在返回舱空速方向,即牵顶伞对主伞伞衣抽打现象具有较好的抑制作用。

(2) 抽打速度的对比分析

图4是算例1和算例2的伞衣顶部节点的速度比较,由图可以看出,在算例1中,抽打现象发生时,伞衣顶部节点瞬时速度增加到270m/s,因此,抽打现象的形成具有瞬时性和速度剧烈变化的特点。而算例2中,由于加入了剥离带和牵顶伞,当抽打现象发生,抽打速度峰值由于剥离带的影响由270m/s降至220m/s,当1.61s牵顶伞充气张满时,伞衣顶部节点的速度由150m/s迅速降至返回舱的速度附近,反映了剥离带和牵顶伞很好地抑制了伞衣顶部速度的急剧变化,从而抑制了伞衣顶部的剧烈电动。

图5是剥离带强度对抽打速度的影响分析,其中Force1表示主伞包连接带的剥离强度,Force2表示牵顶伞连接带的剥离强度。图中显示,当主伞包连接带的强度增加到2000N时,抽打速度峰值由270m/s降至160m/s,反映了剥离带对主伞伞衣顶部的抽打速度具有一定的控制作用,且随着其强度的增加控制效果愈加明显。

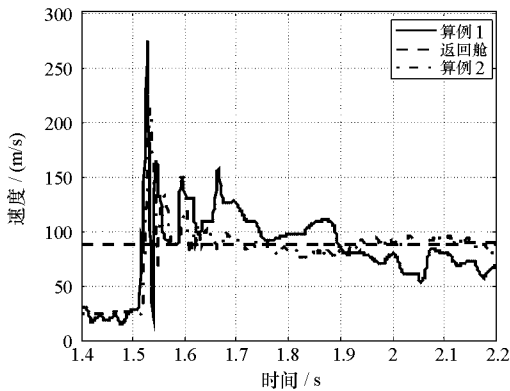


图4 抽打速度的比较
Fig. 4 Comparison of velocity of bull whipping

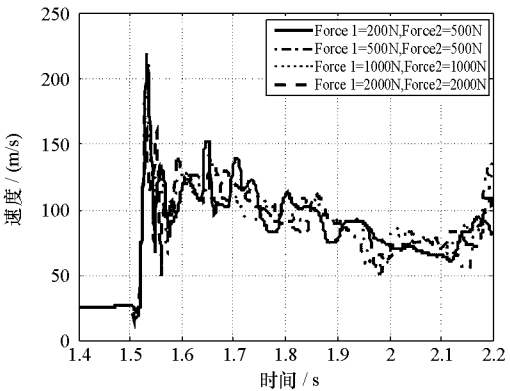


图5 剥离带强度对抽打速度的影响
Fig. 5 Influence of peel off band on the velocity of bull whipping

(3) 牵顶伞面积的影响分析

当剥离完成之后,牵顶伞拉出并开始充气,由于牵顶伞面积较小,故在建模中忽略了牵顶伞的充气过程,即牵顶伞拉直完成后直接处于全充满状态。图6是牵顶伞面积对抽打合速度的影响,图中显示,在1.61s牵顶伞全张满时,伞衣顶部节点速度有一个急剧减速的过程。牵顶伞全充满时可将伞衣顶部节点的合速度由120m/s迅速降为80m/s左右,即将抽打速度迅速降到和返回舱速度接近的程度。

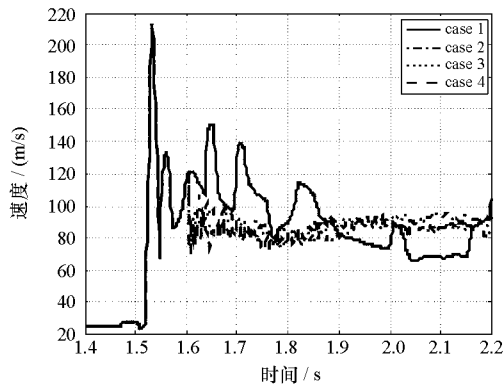


图6 牵顶伞对抽打速度的影响
Fig. 6 Influence of attached apex drogue on the velocity of bull whipping

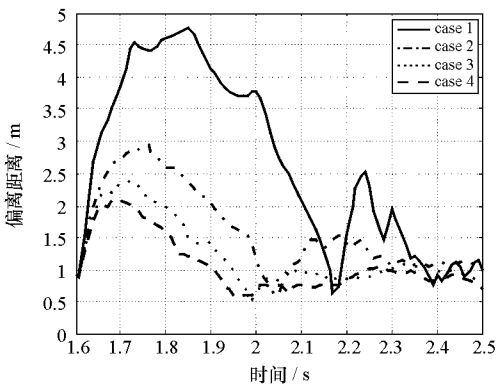


图7 牵顶伞对偏离距离的影响
Fig. 7 Influence of attached apex drogue on the departure distance

图7是在不同牵顶伞面积情况下伞绳和伞衣偏离距离随时间的变化,偏离距离本是指拉直过程中的各个时刻伞绳和伞衣偏离拉直方向的最大距离^[10]。由图可以看出,偏离距离有两个峰值,反映了伞

衣两次方向相反的电动, 第一次电动幅度较大, 第二次方向相反的电动幅度较小; 不加牵顶伞时偏离距离的变化幅度明显大于加牵顶伞时, 不加牵顶伞时第一次电动的最大偏离距离达 4.7m, 第二次为 2.5m, 而牵顶伞投影面积为 1m^2 时, 第一次电动的最大偏离距离达 2.9m, 第二次为 1.6m, 明显小于不加牵顶伞时对应的数据; 随着牵顶伞投影面积增加, 其对应的最大偏离距离均有所减小, 第一个峰值尤其明显, 而当牵顶伞面积由 2m^2 增加到 3m^2 时, 第二次电动的偏离距离变化不大, 此时偏离距离已经很小, 基本上在 1m 左右, 反映此时伞衣的电动幅度已经不大。

3 结 论

(1) 当增加牵顶伞和剥离带时, 形成抽打时的伞衣位形由原来明显的“鱼钩状”变化为电动幅度受到限制的“S”状, 这和录像观察到的现象基本相符;

(2) 剥离带能够减小伞衣顶部节点的抽打速度峰值。当采用强度为 200N 的剥离带时, 抽打速度峰值由 270m/s 降至 220m/s, 剥离带强度增加至 2000N 时, 抽打速度峰值降至 160m/s;

(3) 牵顶伞能够有效抑制伞衣的电动幅度和速度。当从不加牵顶伞到附加 1m^2 的牵顶伞时, 其效果很明显, 随着牵顶伞面积的增加, 其抑制作用也在增强, 但变化将不再那么显著。

本文的研究结果表明, 牵顶伞和剥离带有效地抑制了大型降落伞的抽打现象, 为主伞的初始充气提供了一个良好的初始状态。由于大型降落伞的抽打现象是一种复杂的柔性体力学现象, 因此, 尚需从机理进一步对其运动规律进行深入研究。

参 考 文 献:

[1] Moog R D, Sheppard J D. Space Shuttle Solid Rocket Booster Decelerator Subsystem Drop Test Results [R]. AIAA 79- 0463, 1979.

[2] Purvis J W. Improved Prediction of Parachute Linesail During Lines First Deplyment[R]. AIAA 84- 0786, 1984.

[3] 宋旭民. 大型降落伞开伞过程中的“抽鞭”现象[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(3): 16- 21.

[4] 宋旭民. 大型降落伞系统动力学建模及抽鞭现象研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.

[5] Mitchell R, Bruno R, et al. High Altitude Test Program for a Mars Subsonic Parachute[R]. AIAA 2005- 1659, 2005.

[6] 林仙友. 开伞系统中牵顶伞的功能[J]. 航天返回与遥感, 1993, 14(4): 14- 16.

[7] 余莉, 史献林, 袁文明. 牵顶伞在降落伞拉直过程中的作用[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(2): 198- 201.

[8] 林斌. 牵顶伞设计分析[C]// 中国宇航学会返回与再入专业委员会学术会议, 2006: 74- 78.

[9] Huston R L, Kamman J W. A Representation of Fluid Force in Finite Segment Cable Models [J]. Computers and Structure, 1981, 14: 281- 287.

[10] 张青斌. 载人飞船降落伞回收系统动力学研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.