

## 具有倒“Y”型吊挂的降落伞系统动力学建模\*

宋旭民 秦子增 程文科 郭叔伟

(国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

**摘要** :具有倒“Y”型吊挂的降落伞系统在回收领域具有广泛的应用。建立了这类系统的动力学模型,包括考虑附加质量的一般刚体动力学方程和基于“平衡点”假设的吊挂系统建模方法。利用该模型对某型飞船空投试验情况进行了仿真分析,通过与试验数据对比,验证了模型的有效性。

**关键词** :降落伞系统;动力学建模;倒“Y”型吊挂

中图分类号 :V455.23 文献标识码 :A

## The Dynamic Model of a Parachute System with the Inverted ‘ Y ’ Suspension

SONG Xu-min ,QIN Zi-zeng ,CHENG Wen-ke ,GUO Shu-wei

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

**Abstract** :The dynamic model of the parachute system with the inverted ‘ Y ’ suspension is established , which is widely used in recovery systems. The model is comprised of the general rigid-body equations considering apparent mass and the modeling method of suspension system based on the assumption of “ equilibrium points ”. A simulation analysis for a spaceship ’s airdrop experiment is carried out and the validity of models is showed by the experiment data.

**Key words** :parachute system ; dynamic modeling ; inverted ‘ Y ’ suspension

在飞行器回收、应急逃逸、装备空投、星际探测着陆等方面,降落伞回收系统得到了广泛的应用。在回收着陆的最后阶段,物体和降落伞之间往往采用倒“Y”型吊挂方式连接,其形式如图 1 所示。在美国“探路者”火星探测器着陆系统、俄罗斯“联盟”号飞船和中国“神舟”号飞船回收系统中,都采用了这种吊挂形式。

目前物伞组合体的动力学建模问题已经得到了较多的研究。文献 [1,2] 研究了物伞组合体的动力学模型,其吊挂形式为比较简单的单点吊挂。文献 [3] 建立了倒“Y”型吊挂物伞系统的动力学模型,对吊挂系统采用了几何方法建模,对吊索松弛状态的判断过程非常复杂,实现难度较大。文献 [4] 分析了采用小质量点模型建立物伞系统的平面运动方程,较好地解决了吊索松弛判断问题,但是由于方程的刚性,仿真中必须采用 Adams - Gear 方法并严格限制积分步长才能得到数值解,因而导致计算时间增加到不考虑吊索松弛时的 4 ~ 6 倍。文献 [5] 分析了利用小质量点模型建立“探路者”火星探测器降落伞系统在火星着陆过程的动力学模型,并进行了仿真分析,但也遇到与文献 [4] 相同的困难:计算稳定性和效率较低。本文将附加质量的概念应用到降落伞的建模中,建立了旋量形式的一般刚体的动力学方程,使载荷和降落

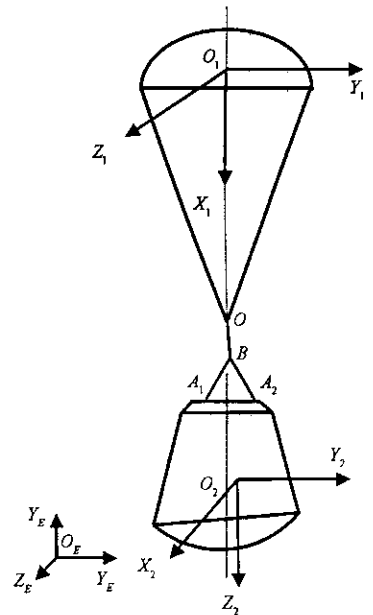


图 1 伞—舱组合体的系统结构图

Fig.1 Structure of parachute-cabin assembly

\* 收稿日期 2005 - 06 - 21

作者简介 宋旭民(1979—)男,博士生。

伞动力学模型具有统一的形式。并利用“平衡点”假设,提出了一种更有效的吊挂系统模型,从而建立了具有倒“Y”型吊挂的物伞系统动力学模型。

## 1 数学模型

### 1.1 基本假设

典型的舱伞组合体系统如图1所示,系统由伞、物体和吊带组成,降落伞和返回舱通过吊带连接。 $A_1$ 和 $A_2$ 分别为返回舱上的连接点, $B$ 为吊带的汇交点, $O$ 为伞绳汇交点。

在本文分析中,都采用以下假设:(1)平面大地;(2)降落伞和返回舱为六自由度刚体,伞衣带动空气的惯性效应用附加质量来表示;(3)吊带简化为无质量的非线性弹簧;(4)降落伞始终保持轴对称形状,其压心与伞衣质心重合;(5)降落伞运动引起的空气团的能量变化用附加质量张量来表示,而返回舱运动引起的空气团的能量变化可忽略不计;(6)物体尾流对伞的影响忽略不计。坐标系定义如图1所示。

### 1.2 降落伞的附加质量

在流体中作任意运动的物体,其运动的非定常性会引起其周围流体作非定常运动,在进行动力学建模时,这一效应一般由附加质量来表示。一般情况下,物体的平均密度和周围流体的密度相差较大,可以忽略附加质量,但在降落伞、鱼雷等物体的动力学中,则有必要考虑附加质量。

一般地,附加质量形成一个 $6 \times 6$ 的二阶张量。本文建模中建立了考虑附加质量的一般刚体动力学方程,采用矩阵表示。由于降落伞的对称性,其附加质量矩阵仅有3个独立的分量,仿真中采用试验确定。

### 1.3 一般刚体的动力学方程

以在任意流体中作一般运动的刚体 $B$ 为研究对象,设 $OXYZ$ 是刚体 $B$ 的任意连体系, $O$ 为原点。 $v$ 和 $w$ 是 $O$ 点的速度和刚体角速度在 $OXYZ$ 中的坐标列阵。 $F$ 、 $M$ 是刚体所受外力的主矢及对 $O$ 点的主矩在 $OXYZ$ 中的坐标列阵。

系统的广义惯量矩阵 $\Phi$ 可表示为 $\Phi = \Phi_B + \Phi_F$ ,其中 $\Phi_B$ 是刚体的广义惯量矩阵, $\Phi_F$ 为附加质量矩阵,它是一个的对称矩阵,其分量可用1.2节方法确定。

$\Phi_B$ 和 $\Phi_F$ 可表示为如下形式:

$$\begin{cases} \Phi_B = \begin{bmatrix} mE & mS^T(\rho_c) \\ mS(\rho_c) & J \end{bmatrix} \\ \Phi_F = [\alpha_{ij}]_{6 \times 6}, \\ \tilde{V} = \begin{bmatrix} S(\omega) & 0 \\ S(V) & S(\omega) \end{bmatrix} \end{cases}$$

$E$ 是 $3 \times 3$ 单位矩阵, $\rho_c$ 表示质心在 $OXYZ$ 中的坐标, $J$ 是刚体相对于坐标系 $OXYZ$ 的惯量张量矩阵, $S$ 表示向量的反对称矩阵,上标 $T$ 表示转置。

刚体的动力学方程为

$$\hat{F} = \dot{\hat{Q}} + \tilde{V}\hat{Q} \quad (1)$$

其中, $\hat{Q} = \Phi\hat{V}$ , $\hat{V}$ 是广义速度列阵, $\hat{F}$ 是广义力列阵。

降落伞全张满时 $\Phi$ 随时间的变化很小,本文中假定 $\dot{\Phi} = 0$ 。则由式(3)可得如下形式的刚体动力学方程:

$$\hat{V} = \Phi^{-1}(\hat{F} - \tilde{V}\Phi\hat{V}) \quad (2)$$

上述方程是最一般形式的刚体动力学方程,包含了附加质量的影响,计算坐标系可以取为刚体的任意关联坐标系,降落伞和返回舱的动力学方程可以该方程为基础得到。

### 1.4 降落伞的动力学方程

降落伞受到重力、气动力和吊带对 $B$ 点的拉力 $T$ 的作用,其中气动力由试验确定,拉力 $T$ 的确定方

法由约束模型确定。将伞的广义惯量矩阵和受力矩阵代入式(2),即可得到降落伞的动力学方程。

### 1.5 返回舱的动力学方程

返回舱受到重力、气动力和吊带拉力的作用。由于返回舱的密度远大于空气密度,舱的附加质量可忽略不计,即 $\Phi_F$ 的各分量恒为零。由式(2)可得到舱的动力学方程。

### 1.6 约束力模型

降落伞和返回舱的运动方程通过吊带约束力耦合在一起,其大小需由约束力模型确定。由于在运动过程中,各条吊带的松弛和绷紧状态不定,且频繁转换,使得约束力的求解非常困难。一般情况下,中间吊点的质量非常小,对于不平衡的外力响应很快,因而可假设中间吊点始终处于力平衡状态。

本文基于中间点的力平衡假设,提出了一种新的约束力建模方法,较好解决了约束力的求解问题。根据假设,吊带被简化为无质量非线性弹簧,则吊带的张力为应变的非线性函数,即 $f = f(\epsilon)$ (当 $\epsilon \leq 0$ 时, $f = 0$ ),其具体形式需要根据材料的特性确定。

由伞、舱的位置和姿态可以得到点 $O$ 、 $A_1$ 和 $A_2$ 的位置矢量,分别用 $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 表示。设 $B$ 点的位置矢量为 $r_B$ 。点 $B$ 受到三根吊带的拉力,该力为 $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 及 $r_B$ 的函数,根据点 $B$ 的静力平衡条件可建立一组非线性方程组,迭代求解该方程组可得 $r_B$ ,进而求得各条吊带的约束力。

本文方法实现较为简单,自动实现了吊索松弛和绷紧情况的统一处理,避免了复杂的几何判断以及“小质量点”模型的数值刚性问题,而且可以很容易地推广到多点吊挂的情形,具有较好的通用性。

## 2 仿真结果及其验证

转换吊挂是某型飞船回收程序中的一个重要过程。在该过程中,飞船由单点斜吊挂转换为倒“Y”型吊挂,飞船的各项动力学参数剧烈变化,各条吊索频繁地加载和卸载甚至出现松弛,这给数值仿真带来了很大的困难。采用本文模型对某型飞船一次空投试验中的转换吊挂过程进行了仿真分析,取得了较好的效果。图2为返回舱摆角变化曲线。

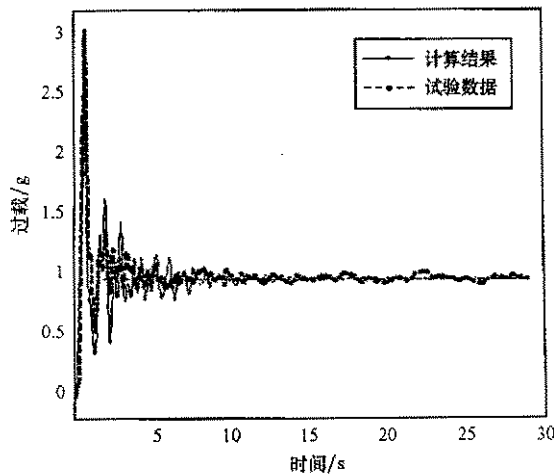


图2 转换吊挂过程中返回舱过载对比

Fig.2 Comparison of the cabin's over-loading

由图2可以看出,转换吊挂过程开始约0.8s,出现过载峰值3.05g,经20s左右,过载稳定到1g。仿真结果在峰值、波动趋势及达到稳定的时间上都与实测结果比较接近,但波动要比实测结果大。

由于缺乏材料的动态应力-应变数据,在模型中采用了静态应力-应变曲线。很多文献研究了材料变形的动态特性对张力的影响,文献[6]通过对降落伞中常用的尼龙和凯夫拉材料在不同应变速率下进行反复的加载卸载循环,研究了其动态应力-应变关系。从文中给出的曲线可以看出,材料在前几次加载过程中刚度较大,且加载过程的材料刚度比卸载过程大,加载和卸载循环存在一个阻尼过程。由于转换吊挂过程中,伞绳频繁而快速的加载和卸载,因而应力-应变曲线的动态特性对仿真结果的影响

较大。由于材料的静态应力-应变曲线没有反映材料的加载循环过程中的阻尼,因而仿真中振动衰减较慢。

### 3 结 论

建立了具有12个自由度的返回舱-降落伞组合体的动力学模型,仿真计算表明,本文模型计算效率较高,计算结果与实测数据符合较好,能有效地应用于类似系统的仿真计算。

通过引入附加质量矩阵,建立了形式简洁的一般刚体的动力学模型,可很好地应用于降落伞系统动力学建模。在“平衡点”假设的基础上,提出了倒“Y”型吊挂系统的约束力求解方法,该方法实现起来较简单,意义明确,可很容易地推广到多点吊挂的情形,具有较好的通用性。本文模型对一般物伞系统的动力学建模也具有借鉴意义。

### 参 考 文 献:

- [1] 程文科,杨小伟,秦子增. 物伞系统动力特性研究[J]. 国防科技大学学报,1998,20(4):27-30.
- [2] 丛明煜,邵成勋等. 低空伞弹外弹道动力学模型[J]. 弹道学报,2002,12(1):31-36.
- [3] 程文科,秦子增等. 具有倒“Y”吊挂的物伞组合体动力分析[J]. 弹道学报,1998,10(2):10-14.
- [4] Moulin J. Recovery System Simulation: Link Modelization[C]. AIAA 12<sup>th</sup> Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, AIAA 93-1249, London, 1993, 296-304.
- [5] Raiszadeh B, Queen E M. Virginia Partial Validation of Multibody Program to Optimize Simulated Trajectories II(POST II): Parachute Simulation With Interacting Forces[R]. NASA/TM-2002-211634, 2002.
- [6] Taylor A P, Delurgio P R. A Summary of Materials Characteristics as They Apply to Detailed Parachute simulation[C]. AIAA 14th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, AIAA 97-1537, San Francisco, 1997, 474-480.



