

文章编号: 1001-2486(2009)03-0016-04

# 空间飞网发射动力学建模仿真研究与地面试验\*

陈 钦, 杨乐平, 张青斌

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 空间飞网是近来提出的一个创新的空间系统概念, 在空间碎片处理和在轨服务方面具有独特的应用潜力。针对飞网系统的发射过程, 利用建模仿真和地面试验两种手段进行了研究, 建立了飞网发射的集中质量模型, 设计了基于燃气助推质量块的飞网发射地面试验装置, 开展了多次飞网发射试验。地面试验结果与模型仿真结果基本吻合, 说明所建立的动力学模型可用于空间飞网系统设计。

**关键词:** 空间飞网; 飞网发射动力学; 集中质量模型; 建模仿真; 地面试验

**中图分类号:** V423      **文献标识码:** A

## Dynamic Model and Simulation of Orbital Net Casting and Ground Test

CHEN Qing, YANG Le-ping, ZHANG Qing-bin

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

**Abstract:** Orbital net capture is an innovative mission concept, and has special potential on space debris disposal and OOS (on-orbit service). Dynamics of orbital net casting is a key technique of the orbital net capture system design and application, for which two major feasible investigation means have been suggested: dynamic modeling, simulation and ground test. Based on dumped-mass model, a model of the system dynamics was derived, and a ground test device was designed to verify the simulation result. The comparison of several ground tests and simulations shows that the model can be used to design orbital net capture systems. Relevant pictures of ground test and simulation were presented.

**Key words:** orbital net; casting dynamics; dumped-mass model; model and simulation; ground test

随着近年来绳系卫星系统(TSS)的发展, 利用全柔性部件来提高航天系统的灵活性成为航天技术中的一个新的热点<sup>[1-3]</sup>。其中飞网捕获技术在非合作/合作目标捕获、远距离捕获等方面展现了极大的应用潜力。飞网捕获是一种新型的非合作目标捕获方式, 也可以用于合作目标的捕获。在飞网捕获中, 飞网捕获器平台向被捕获目标方向展开一张由细绳编织成的网, 通过绳网包裹住目标航天器, 利用飞网收口机构收拢网口并形成死锁防止目标脱离。研究人员研究了利用飞网来完成其他技术手段难以完成的空间捕获任务<sup>[2-4]</sup>。柔性飞网的发射可以采用发射牵引质量块的方式来完成, 这种发射系统质量较轻, 适用于对非合作目标实施近距离快速捕获。

空间飞网发射动力学与空间飞网系统设计密切相关。对于全柔性绳网的轨道动力学, 没有成熟的模型和测量结果可供参考, 因此本文重点在于建立全柔性空间飞网发射的动力学模型, 并通过地面试验来对模型进行检验。

## 1 飞网发射动力学建模

### 1.1 柔性绳索动力学建模

对于飞网的全柔性结构, 要建立起动力学模型, 必须以柔性绳段的动力学模型为基础, 结合柔性绳段的相互连接关系。柔性绳段的建模方法有连续体动力学模型和集中参数模型两类<sup>[5-7]</sup>。

\* 收稿日期: 2008-12-20

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2007AA0975)

作者简介: 陈钦(1980-), 男, 博士生。

一般所采用的绳索一维连续体动力学模型是通过分析绳段中某个微元的 2 个端面应力以及其他外力, 考虑绳中某微元的空间位置和变形两方面, 以时间  $t$  和绳长方向广义坐标  $s$  为自变量, 建立绳的空间位置坐标  $x(s, t), y(s, t), z(s, t)$  的二阶偏微分方程, 这个方程为双曲形式, 类似于波动方程。上述二阶偏微分方程必须以绳段的初始空间位形以及初始形变状态作为初值进行求解。连续体动力学模型可以很细致地刻画整个绳段中应力波的传播过程, 能够可靠得到绳段的形状和变形情况, 但是方程为较为复杂的二阶偏微分方程, 积分计算量大。再考虑飞网编织结构, 将构成非常复杂的边界条件。

集中质量法将绳段简化为 2 个由弹簧阻尼单元连接的两个质点(称为集中质点), 集中质点的质量为整个绳段质量的一半。系统的动力学模型可以通过分析每个绳段对应的两个质点的受力情况来得到, 系统的动力学方程为二阶常微分方程, 方程的变量为各个集中质点的空间坐标  $x(t), y(t), z(t)$ 。集中质量法简化了柔性绳段的空间位形和绳段内部的应力/应变分布情况, 只能近似得到系统中柔性绳的位形和应力分布; 但是建立方程的过程简单, 计算也限于积分常微分方程, 便于工程应用。

## 1.2 飞网发射动力学方程

在地面发射试验中, 建立惯性坐标系,  $x$  方向指向重力的反方向,  $y$  方向和  $z$  方向构成水平面并与  $x$  构成右手系。飞网对应的集中质点和飞网牵引质量块的运动方程都可以写成

$$\ddot{x} = F_x/m - g; \quad \ddot{y} = F_y/m; \quad \ddot{z} = F_z/m \quad (1)$$

飞网捕获系统的最终应用是处于空间轨道上, 空间轨道上的动力学状态与地面试验的动力学状况有所差别。假设捕获平台的基准轨道为近圆轨道, 建立参考轨道坐标系, 其中  $y$  指向轨道速度方向,  $x$  指向地心相反方向,  $z$  指向轨道面法向, 构成右手系。在这个参考系下, 飞网对应的所有集中质点和飞网牵引质量块的运动都可以用 C-W 方程来近似描述:

$$\ddot{x} = F_x/m + 2m\dot{y} - 3n^2x; \quad \ddot{y} = F_y/m - 2m\dot{x}; \quad \ddot{z} = F_z/m - n^2z \quad (2)$$

其中,  $n$  为轨道运动的周期, 有

$$n = \sqrt{\mu_e/a^3} \quad (3)$$

其中,  $\mu_e$  为地球的引力常数,  $a$  为近圆轨道的半径。基准轨道上捕获平台的运动速度为

$$\mathbf{v}_0 = [0, \sqrt{\mu_e/a}, 0]' \quad (4)$$

对应方程(1)或(2), 质点  $i$  所受的外力为

$$\mathbf{F}_i = [F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}]' = \mathbf{T}_i + \Phi_i + \mathbf{P}_i \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{T}_i$  表示弹簧单元的弹性力,  $\Phi_i$  表示阻尼单元的阻尼力, 而  $\mathbf{P}_i$  为大气阻力。弹簧单元的弹性力可以表达成

$$\mathbf{T}_i = \sum_j \left\{ \frac{|\mathbf{r}_{ij}| - l_{ij}}{l_{ij}} EA \cdot \mathbf{e}_{ij} \right\} \quad (6)$$

其中,  $l_{ij}$  为连接质点  $i$  和质点  $j$  的绳段原长,  $\mathbf{r}_{ij}$  为从质点  $i$  到质点  $j$  的矢量,  $E$  为绳段的杨氏系数,  $A$  为绳段截面面积,  $\mathbf{e}_{ij}$  为从质点  $i$  指向质点  $j$  单位矢量, 式中的求和是对于通过绳段连接到  $i$  的所有集中质点或者牵引质量块中绳段张紧的质点  $j$ , 也就是有

$$|\mathbf{r}_{ij}| > l_{ij} \quad (7)$$

等效粘性阻尼力为

$$\Phi_i = \sum_j c \cdot (\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{e}_{ij}) \cdot \mathbf{e}_{ij} \quad (8)$$

其中,  $c$  为系绳的等效粘性阻尼系数,  $\mathbf{v}_{ij}$  为质点  $j$  相对于质点  $i$  的速度。式(8)中的求和与式(6)相同, 即要求满足不等式(7)。

对于牵引质量块来说, 大气阻力为

$$\mathbf{P}_{i0} = -\frac{1}{2} \rho |\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{wind}| C_D \cdot A_i \cdot (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_{wind}) \quad (9)$$

其中,  $\rho$  为当地大气密度,  $C_D$  为阻力系数,  $A_i$  为对应的等效阻力面积,  $\mathbf{v}_i$  为质量块  $i$  的速度(对地面试

验,  $v_i = [x, y, z]'$ ; 而对于轨道发射的情况下,  $v_i = [x, y, z] + v_0$ ,  $v_{wind}$  为当地风速。对于连接质点  $i$  到质点  $j$  的绳段所受的大气阻力, 按速度均匀分布假设来进行计算, 并忽略系绳切向的大气阻力, 只计算系绳法向的大气阻力。如果系绳张紧, 即满足不等式(7), 则有

$$P_{ij} = \int_0^l -\frac{1}{2}\rho |v_i + x \cdot v_j - v_{wind}| C_D \cdot r_{ij} \cdot \mu \cdot \frac{r_{ij}}{l_{ij}} \cdot d_l \left( v_i + x \cdot v_j - v_{wind} \right) dx \quad (10)$$

式中,  $\mu$  为系绳的泊松系数,  $d_l$  为绳索直径。如果不等式(7)不成立, 即系绳松弛, 则有

$$P_{ij} = \int -\frac{1}{2}\rho |v_i + x \cdot v_j - v_{wind}| C_D \cdot r_{ij} \cdot d_l \left( v_i + x \cdot v_j - v_{wind} \right) dx \quad (11)$$

式(9)~式(11)中间的阻力系数  $C_D$  对于圆柱体的系绳来说, 在自由原子态的气体中为 2.8, 在连续流体中约为 1.24; 对于球体, 相应为 2.7~0.92。对应轨道上的状态, 大气基本处于自由原子态; 而在地面试验中, 则应该选择连续流体对应的阻力系数。

最后得到质点  $i$  所受的气动力为

$$P_i = \frac{1}{2} \sum_j P_{ij} \quad (12)$$

## 2 飞网发射地面试验机构

### 2.1 地面发射试验机构

为验证发射动力学而设计的飞网发射地面试验机构如图 1 所示, 由膨胀气室、抛射筒、活塞、点火器、火药和储网箱组成。图 2 为发射试验过程。在发射飞网时, 通过点火器点燃火药在膨胀气室中燃烧, 气体通过对活塞施加推力, 在抛射筒中发射出质量块, 通过质量块的牵引, 从储网箱中拉出飞网并展开在发射器上方。

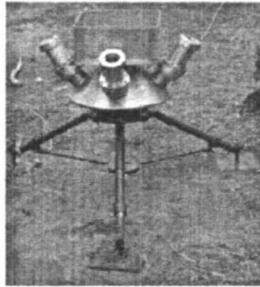


图 1 飞网地面发射机构  
Fig.1 Net casting device

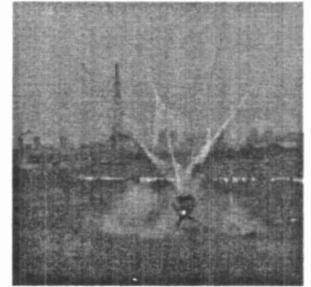


图 2 飞网发射试验过程  
Fig.2 Snapshot in net casting test

在弹射过程中, 活塞行程  $L = at^2/2$ , 其中  $a$  为加速度,  $t$  为活塞运动时间。  $t = \sqrt{(M \cdot V)/F}$ , 其中  $M$  为总质量,  $V$  为抛射速度,  $F$  为活塞总作用力, 有  $a = F/M$ 。对活塞和质量块组成的整体进行受力分析, 有

$$F = (P - P_a)S - f - Mg \cos \theta \quad (13)$$

其中,  $P$  为抛射筒压强,  $P_a$  为环境压强,  $S$  为 4 个活塞的总面积,  $f$  为活塞总摩擦力,  $\theta$  为抛射筒与垂直方向的夹角。另外由于  $S = \pi D^2$  ( $D = 60\text{mm}$ , 为每个活塞的横截面直径)  $f = \mu_0 Mg \sin \theta$  ( $\mu_0 = 0.4$ , 为摩擦系数), 可以得到

$$P = P_a + \frac{Mg(\mu_0 \sin \theta + \cos \theta)}{\pi D^2} + \frac{MV^2/2L}{\pi D^2} \quad (14)$$

对于点火的火药量可以采用下面的公式估计

$$m_g = PV_c / \chi f_g \quad (15)$$

其中,  $V_c$  为碰撞气室自由容积 ( $6.2e-3\text{m}^3$ ),  $\chi$  为能量损失修正系数, 这里取  $\chi = 0.75$ ,  $f_g$  为火药力 ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg}$ ), 对于试验所用黑火药,  $f_g = 29e4\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg}$ 。

### 2.2 牵引质量块发射试验

在飞网发射试验之前, 对发射器的弹射速度和不同的装药量之间的关系进行试验。试验选择了 4 种药量, 测量了质量块的弹射距离, 并根据飞行的行程来计算发射的初始速度, 与理论结果进行比较(见表 1)。从试验可以看出, 发射器的实际发射速度基本上吻合计算的结果。

表1 牵引质量块发射试验结果  
Tab. 1 Result of towed masses shooting

装药量 (g)	弹射角 $\theta$ ( $^{\circ}$ )	射程 (m)	发射速度 (m/s)	计算速度 (m/s)
7	60	12.00	11.7	12.0
9	60	13.75	12.5	13.0
14	60	18.35	14.4	14.5
20	60	22.00	15.8	16.0



图3 飞网发射仿真结果  
Fig. 3 Simulation of net casting

### 3 飞网发射地面试验—仿真结果比较

飞网发射地面试验按照操作规程进行火药装药、膨胀气室密封、飞网折叠、质量块放置之后, 每步经过检查无误后通过电池点火。首先是质量块被活塞推动, 按照抛射筒的方向被发射出来, 依次拉出飞网的边缘和底部; 随着牵引质量块的飞行, 飞网在空中展开成形。由于重力的作用, 质量块在达到最高点后落向地面, 飞网随后也落向地面。飞网的发射展开过程平稳, 没有剧烈振动现象, 在拉出的过程中存在飞网部分重叠的现象, 但是没有形成缠绕, 最终在达到最高点时完全展开了飞网编织的形状。

通过试验发现, 飞网经过有规律的折叠放置, 能够有效地被牵引质量块发射展开。气体膨胀发射方案能够可靠地发射牵引质量块, 发射的同步性很好。由于牵引绳索和飞网的柔性特征, 飞网展开的过程非常平稳, 没有发现剧烈振动的情况。另外, 从地面发射试验中观察到地面突风对地面试验中飞网的展开有较大的影响。

利用式(1)建立描述飞网地面发射过程的常微分方程组, 并根据式(9)~(11)计算气动力, 最后积分求解得到仿真结果。通过仿真结果与实验结果比较, 发现集中质量模型可以很好地用于描述飞网被牵引质量块拉出并在空中展开的过程, 在计算中也没有出现剧烈振荡的情况, 与试验的视频吻合得很好, 如图3。另外对视频进行处理得到的部分数据与仿真计算的结果也较为一致, 如表2。

在仿真的结果中, 没有出现试验中出现的飞网部分重叠的现象, 其原因在于对飞网的折叠状态和内部的相互碰撞现象, 仿真中没有进行很好的描述。表2中出现的位置和高度误差主要由试验当地地面大气流动所造成。

### 4 结论

飞网发射地面试验所得到的拉出展开过程可以通过集中质量模型进行有效的描述, 通过仿真能够较好地再现飞网发射的过程, 这表明集中质量模型可用于轨道飞网发射建模, 支持轨道飞网捕获系统的设计和仿真; 通过飞网发射地面试验, 可以证明通过气体膨胀推动活塞的方式能够有效地发射质量块并牵引飞网发射展开, 飞网发射的初始速度通过选择不同的装药量也能很方便地进行控制。

### 参考文献:

- [1] Paul W. In-plane Payload Capture with an Elastic Tether[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 29(4): 810-821.
- [2] Zhai G, Yue Q, Liang B, et al. Research and Design of Orbital Net-capture Robot System[C]//36<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, Beijing, 2006.
- [3] Sorensen K. Momentum eXchange Electrodynamic Reboost(MXER) Tether Technology Assessment Group Final Report[R]. NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
- [4] Hoyt R P, Slostad J T, Frank S S. A Modular Momentum-exchange Electrodynamic-reboost Tether System Architecture[R]. AIAA2003-5214, 2003.
- [5] Mankala K K, Agrawal S K. Dynamic Modeling and Simulation of Impact in Tethered Gripper Systems[J]. Multibody System Dynamics, 2004, 11(3): 235-250.
- [6] Kim E, Vadali S R. Modeling Issues Related to Retrieval of Flexible Tethered Satellite Systems[R]. AIAA-92-4661, 1992.
- [7] Cosmo M L, Lorenzini E C. Tethers in Space Handbook[M]. 3<sup>rd</sup> ed, Smithsonian Astrophysical Observatory, 1997.

表2 飞网发射试验—仿真对照

Tab. 2 Comparison of simulation and ground test

时间 (s)	质量块水平 位移测量值	质量块水平 位移仿真值	飞网中心 高度测量	飞网中心 高度仿真
	(m)	(m)	值(m)	值(m)
0	0	0	0	0
0.375	1.84	2.32	2.56	3.35
0.708	3.44	3.91	4.68	4.86
1.042	3.92	3.87	4.96	5.65
1.167	4.32	3.61	5.08	5.83
2.460	3.36	2.12	0.20	0.40