

文章编号: 1001-2486(2010)05-0034-05

大型降落伞拉直过程中的抽打现象分析*

王海涛¹, 秦子增¹, 宋旭民², 郭鹏¹, 陶午沙³

(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; 3. 总装备部武器装备论证中心, 北京 100101)

摘要: 针对某大型降落伞回收系统主伞拉直过程中出现的抽打现象进行了分析, 根据其拉直过程的特点将其划分为五个阶段, 分别建立了各阶段的实体模型和约束模型, 通过模型的组合建立了各阶段的多体动力学模型, 将各阶段模型连接进一步组成该型号大型降落伞拉直全过程的动力学模型。仿真分析了该型号大型降落伞出现抽打现象时的伞衣位形、顶部伞衣速度、伞绳和伞衣的偏离距离以及张力的变化, 总结了抽打现象形成时的一些特征数据, 分析结果可为大型降落伞设计、改进、使用等提供参考。

关键词: 抽打; 降落伞; 拉直; 伞衣; 空投试验

中图分类号: V475.9 文献标识码: A

Analysis of the Phenomenon of Bull Whipping in the Deployment Process of Large Parachute

WANG Hai-tao¹, QIN Zi-zeng¹, SONG Xu-min², GUO Peng¹, TAO Wu-sha³

(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;

3. General Armament Department Weapons Demonstration Centre, Beijing 100101, China)

Abstract: The bull whipping phenomenon in the deployment process of a large parachute was analyzed. Based on its character, the dynamic model of the whole process was built in five stages. At first, the basic model and restriction model were built respectively. Through their combination, the dynamic model of multibody systems of every stage was built. Then by connecting the dynamic model of five stages, the dynamic model of the entirely deployment process was accomplished. Through analyzing the results of simulation, the canopy displacement and shape, the velocity of top segment canopy, departure distance and tensile force distributing of canopy and lines when forming the bull whipping phenomenon are deduced, some important and character data of the bull whipping phenomenon are summarized. The conclusion can provide reference for the engineering design department to designing, improving and using the large parachute.

Key words: bull whipping; parachute; deployment; canopy; airdrop test

大型降落伞系统广泛应用于卫星、飞船等航天器的回收, 由于大型降落伞的伞绳/衣的整体尺寸长达数十米, 且其拉直过程并不是理想设计的均匀直线拉出, 常常出现非匀速、非连续拉出的情况, 这些因素将导致伞绳/衣在短时间内局部出现弯曲并形成抽打现象。

抽打现象是大型降落伞在拉直过程中, 顶部伞衣发生剧烈甩动并可能抽打到下部伞衣的一种现象。文献[1]将这种现象称为抽鞭现象, 日常生活中的抽鞭现象与本文定义的抽打现象机理有些类似, 只是抽打速度远低于抽鞭的超音速^[2-3], 故本文称其为抽打现象。抽打现象可能会造成伞绳与伞衣缠绕、充气时间延长、非正常充气、抽打到伞衣并使其破损等后果, 严重时甚至可能造成降落伞完全失效而导致回收失败^[4-6]。最典型的例子是美国 2004 年秋进行了四次火星探测器降落伞系统的空投试验, 其中前两次均因大型主伞在拉直过程中产生抽打现象而导致降落伞失效^[7]。

目前, 国内外对降落伞拉直过程中抽打现象的研究鲜有报道, 林斌^[8]在大量的工程试验基础上指出大型降落伞的拉直过程确实存在抽打现象, 宋旭民^[1]对美国回收系统降落伞开伞过程中出现的抽打现象及其后果进行了综述, 介绍了避免抽打现象的途径, 并对抽打现象进行了初步研究^[9]。本文是在前人工作的基础上, 系统总结了大型降落伞形成时的特点和各种特征参数, 为工程单位进一步认识和研究抽

* 收稿日期: 2010-05-05

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 王海涛(1982-), 男, 博士生。

打现象提供一种理论方法。

1 拉直过程的分阶段动力学建模

1.1 拉直过程的阶段划分

大型降落伞拉直过程复杂,在短时间内完成很多关键动作。由于在拉直过程中构成系统的运动实体及其运动状态均在不断变化,而抽打现象与这些变化因素密切相关,因此,为了研究抽打现象,必须针对该型号大型主伞的拉直过程进行分阶段动力学建模。根据该大型主伞拉直过程的动力学特点,可将其过程分为5个阶段,各阶段划分标准如下:

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;从主伞包开始被拉出伞舱到外封包打开为拉伞包阶段;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;从主伞内封包打开到拉断绳断裂为伞衣拉直阶段;拉断绳断裂后,减速伞带着主伞包脱离回收系统直至主伞初始充气完成成为拉断绳断裂后阶段。由于每个阶段都有其自身的特点,因此需要分别建立各阶段的动力学模型^[9]。

1.2 拉直各阶段实体模型

拉直过程各阶段的动力学模型涉及多体和变自由度系统动力学建模,本文采用分层建模的思路,下面仅列出拉直过程建模中一些主要的动力学模型。

(1) 返回舱和减速伞的动力学模型

返回舱和充气后的减速伞均采用六自由度刚体模型,设 $OXYZ$ 是刚体的任意连体系, O 为原点, v 和 ω 分别是 O 点的速度和刚体角速度在 $OXYZ$ 中的坐标列阵, F 、 M 分别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。则刚体动力学方程的旋量形式如下:

$$\dot{\hat{F}} = \hat{Q} + \tilde{V} \hat{Q} \tag{1}$$

其中, $\hat{Q} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}$, \tilde{V} 是广义速度列阵, \hat{F} 是广义力列阵, $\hat{F} = \begin{bmatrix} F \\ M \end{bmatrix}$ 。 Φ 是系统的广义惯量矩阵, $\Phi = \Phi_0 + \Phi_1$, Φ_0 是刚体的广义惯量矩阵, Φ_1 为附加质量矩阵,以上参数的详细定义也可参见文献[9-10]。

(2) 伞包的动力学模型

空伞包被简化成为一个薄壁空心圆柱体,其内外半径都为伞包半径 R ,高度为 h ,空伞包质量为 m ,则其相对于体坐标系的惯量张量为

$$\begin{cases} I_{xx} = mR^2 \\ I_{yy} = I_{zz} = m(R^2/2 + h^2/3) \end{cases} \tag{2}$$

封装在伞包内的伞衣和伞绳被简化为圆柱体,其惯量张量计算公式此处不再列出。根据质心平移定理,将以上三部分惯量张量合成,即可得到伞包的惯量张量。

(3) 伞绳和伞衣的质量阻尼弹簧模型

伞绳和伞衣利用质量阻尼弹簧模型建模,如图1所示。质量阻尼弹簧模型适合于柔性绳索的动力学建模,尤其是对于伞绳/衣的拉直过程这一变自由度系统进行建模,其建模思想和拉直过程中各节点运动参数的计算方法参见文献[5]和文献[9]。

列写各个节点的动力学方程的矢量形式如下:

$$m \dot{\mathbf{r}}_i = \mathbf{F}_{ai} + \mathbf{F}_{ti} + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{ci} \tag{3}$$

式中, \mathbf{F}_{ai} 、 \mathbf{F}_{ti} 和 \mathbf{F}_{gi} 分别为节点 i 的气动力、绳索的张力及节点的重力,其计算方法和计算参数的选取可参考文献[9]。 \mathbf{F}_{ci} 为节点 i 所受到的约束力,需要根据约束条件确定,将上述各个节点的动力学方程联立,即可建立伞绳和伞衣系统的动力学模型。

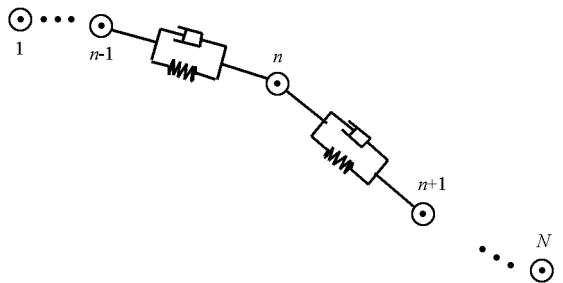


图1 伞绳和伞衣的质量阻尼弹簧模型
Fig.1 Mass damping spring model of the lines and canopy

1.3 约束模型

上节中的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,将各实体部分的动力学方程耦合起来,组成各阶段的动力学模型。各阶段的动力学模型相互连接,上一阶段终端计算结果为下一阶段计算的初始条件,从而完成拉直全过程的仿真计算。

在建模中,吊带被近似为无质量的阻尼弹簧,具有可拉不可压的性质,即当吊带两端点之间的直线距离小于吊带的原长时,其所受的张力为零,吊带张力计算如式(4)所示。

$$T = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq 0 \\ K \varepsilon + B \dot{\varepsilon} & \varepsilon > 0 \end{cases} \quad (4)$$

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

$$\varepsilon = \frac{\|r\|_b}{l_0} - 1 \quad \dot{\varepsilon} = \frac{r \cdot v}{\|r\|_b l_0} \quad (5)$$

2 拉直过程和抽打现象的仿真研究

仿真中取伞舱系统高度为 8000m, 速度为 80m/s, 弹道倾角为 -65° , 加入平均风场, 将形成抽打现象的算例称为算例一; 通过减小算例一中初始条件中的风场, 可得到一组抽打现象较弱的算例, 称为算例二。本节将从仿真分析的角度出发, 利用算例一和算例二来分析抽打现象的特点。

2.1 伞衣运动轨迹和顶部节点速度的对比分析

图2是由算例一和算例二计算得出的伞衣特征时刻的运动轨迹。其中上方图像为算例一中具有典型特征的伞衣位形图, 下方图像为对应时刻算例二的伞衣位形图。

由图2可知, 算例一中伞衣顶部首先向左甩动, 甩动到一定程度后, 开始向相反方向即向右甩动, 一般经历两次甩动之后主伞初始充气完成, 伞衣不再甩动。算例一中伞衣甩动较为明显, 幅度较大, 认为其形成明显的抽打现象。算例二则显示伞衣顶部存在一定尺度的左右摆动, 但幅度较小, 故认为抽打现象较弱。

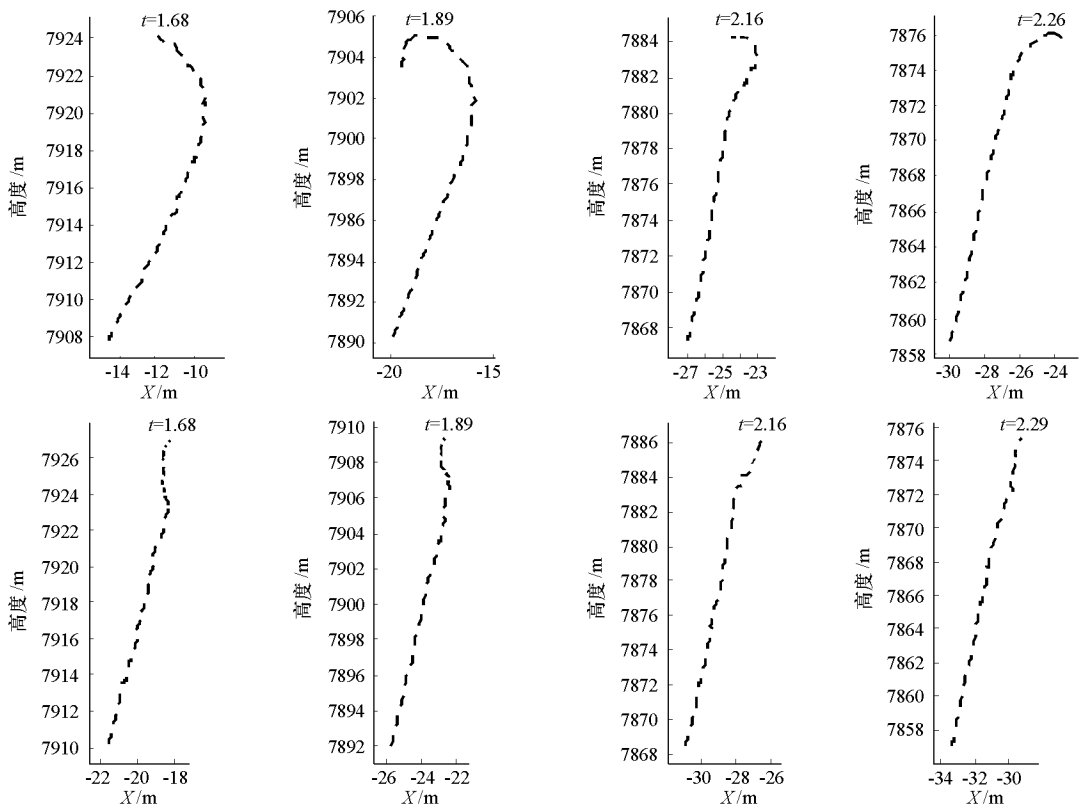


图2 算例一和算例二的伞衣运动轨迹比较

Fig. 2 Compare of the trace of canopy between case one and case two

2.2 伞衣顶部节点速度和偏离距离的比较分析

图3给出算例一和算例二的伞衣顶部节点速度比较,算例一的计算结果表明,当形成抽打时伞衣顶部节点存在一个速度峰值,达270m/s左右;而在算例二的计算结果中,由于抽打现象较弱,其顶部节点的速度峰值仅有140m/s左右,且从整体看,其速度偏离返回舱速度的程度比算例一的要小,反映了其仅存在小幅度的甩动且很快衰减。

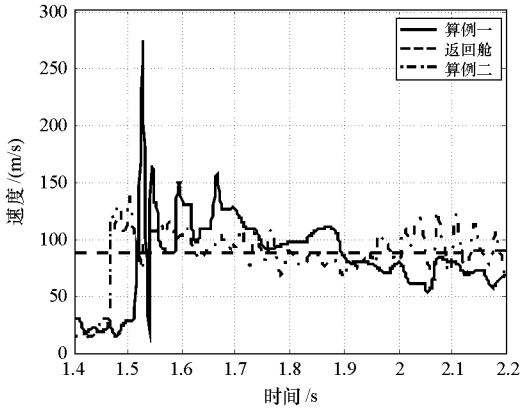


图3 伞衣顶部节点速度比较

Fig. 3 Comparison of top segment velocity of canopy

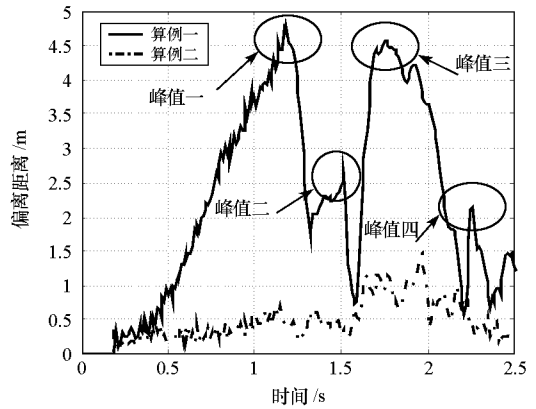


图4 两个算例中的偏离距离随时间变化

Fig. 4 Departure distance of two cases

为了描述伞绳和伞衣的弯曲程度,引入偏离距离概念,所谓偏离距离是指各个时刻伞绳和伞衣偏离拉直方向的最大距离^[11]。图4即是两个算例中偏离距离随时间的变化。图4中出现了四个偏离距离峰值,前两个峰值分别反映了伞绳拉直和伞衣拉直阶段绳帆现象的严重程度,偏离距离峰值三反映了伞衣第一次甩动时的弯曲程度,偏离距离峰值四反映伞衣在第二次相反方向的甩动中弯曲的程度,表1是两个算例中四个偏离距离峰值的统计结果。

表1 最大偏离距离统计

Tab. 1 Statistical results of the maximal departure distance

算例	峰值一/m	峰值二/m	峰值三/m	峰值四/m
算例一	4.7	2.6	4.5	2.2
算例二	0.75	0.6	1.4	1.0

由表1可以看出,算例一中偏离距离峰值一和二要远大于算例二,这反映了算例一在拉伞绳和拉伞衣的过程中均存在严重的绳帆现象。算例一中偏离距离峰值三和四也远大于算例二,这反映了算例一中伞衣在拉断绳断裂后发生了明显的抽打现象,伞衣存在剧烈的甩动。算例二中伞衣也存在一定程度的甩动,但幅度较小,反应其抽打现象较弱。图4和表1也反映了在伞绳/衣的拉直过程中,其严重的绳帆现象是导致抽打现象形成的重要条件。

2.3 抽打时的伞绳和伞衣张力变化分析

图5是算例一的拉直过程中伞绳底部所受张力随时间的变化曲线,由图可知,在伞绳拉直阶段(约0.18~1.15s),刚开始拉出伞绳时(约0.25s)存在一个张力峰值,约为22kN,主要由拉开主伞包外封包扣产生。伞包外封包解开后,伞绳张力迅速降至2~3kN,反映把伞绳拉出主伞包所需拉直力较小,伞绳并没处于完全绷紧的状态。

在拉伞衣阶段(约1.15~1.52s),开始拉伞衣的时候,伞绳张力急剧增加,由3kN增至最大为34kN。这主要是因为伞衣底部质量大且密度也大,故拉伞衣阶段的拉直力也较大,导致伞绳张力急剧增加。伞绳的张力比较大且变化剧烈(变化范围在10~37kN),这反映在拉伞衣阶段,由于伞衣大部分无捆绑绳约束,导致拉出速度不连续、不均匀,使伞绳和伞衣时紧时松而张力激烈变化。

图6显示是算例一中主伞伞衣最顶端的节点在拉断绳断裂之前有一个张力急剧增加的过程,迅速由0增加至5400N左右,拉断绳断裂后又在0.05s之内迅速降至几百N的张力,由于伞衣顶部节点的质量很小,故张力的急剧变化会导致其顶部节点位移和速度的剧烈变化,而力、加速度、速度和位移的急剧变化正是抽打现象发生前后的特征。

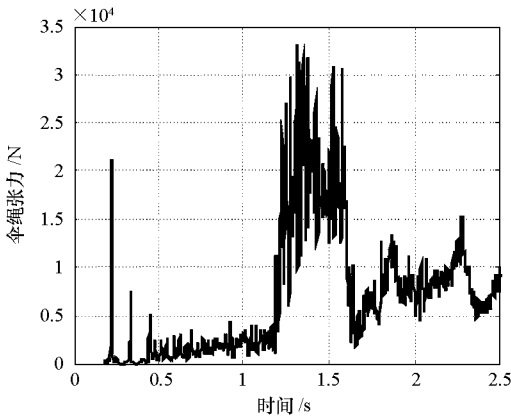


图5 伞绳张力随时间的变化

Fig. 5 Tensile force of lines variety with time

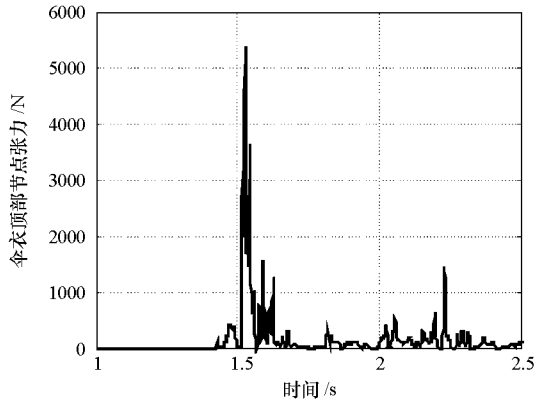


图6 伞衣顶部节点张力随时间的变化

Fig. 6 Tensile force of top segment node of canopy variety with time

当形成抽打现象时, 伞绳和伞衣的张力分布也在剧烈变化, 图7是算例一中拉断绳断裂前后伞绳和伞衣节点在不同时刻的张力分布。图中显示, 1.51s时, 伞衣顶部节点尚未被拉出, 此时其所受张力为0; 1.52s时, 拉断绳断裂, 伞衣顶部节点受到36kN的张力峰值; 1.53s时, 在距伞衣顶部6.8m的伞衣部分受到35kN的张力峰值; 1.54s时, 张力峰值消失。张力峰值的变化会导致伞衣顶部迅速地加速和减速, 从而引起剧烈的甩动, 形成抽打现象。

3 结论

通过分阶段动力学建模和仿真分析的方法, 对某型号大型降落伞的拉直过程及抽打现象进行了研究, 主要得出以下结论:

(1) 抽打现象形成时, 伞衣顶部存在左右两次较大幅度的甩动, 且在拉断绳断裂时伞衣顶部节点存在一个约270m/s的抽打速度峰值, 伞衣的张力分布也产生剧烈的变化。

(2) 在拉直过程中, 拉伞绳时的拉直力较小, 而拉伞衣时拉直力较大且变化剧烈。

大型降落伞拉直过程存在强弱不同的抽打, 虽说抽打不一定打到伞衣下部, 但存在可能的风险, 因此, 抽打问题的研究具有重要的意义。大型降落伞拉直过程中的抽打现象与抽鞭子时鞭梢的运动具有相似的特点, 其运动机理研究涉及柔性体动力学及应力波的传播理论, 具有较大难度^[12]。因此, 本文的研究仅是初步的, 尚需从机理上进一步加强对抽打现象的理解。

参考文献:

[1] 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.
 [2] Goriely A, McMillen T. Shape of a Cracking Whip [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(24).
 [3] Krühl P, Engemann S, Schwenkel D. The Puzzle of Whip Cracking—uncovered by a Correlation of Whip-tip Kinematics with Shock Wave Emission [J]. Shock Waves, 1998, 8: 1- 9.
 [4] Bruce R, David H, Wolf D F. A Textile Vent Hoop Replacement for Parachute Vent Line [R]. AIAA- 2001- 2041, 2001.
 [5] Moog R D. Aerodynamic Line Bowing During Parachute Deployment [R]. AIAA- 75- 1381, 1975.
 [6] 夏刚, 程文科, 秦子增. 航天器回收中几种主伞失效案例介绍 [J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(4).
 [7] Mächelnee R, Bruno R. High Altitude Test Program for a Mars Subsonic Parachute [C]// AIAA- 2005- 1659.
 [8] 林斌. 伞顶伞设计分析 [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] 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.
 [10] 程文科. 一般降落伞—载荷系统动力学及其稳定性分析 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2000.
 [11] 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.
 [12] 武际可. 甩鞭子为什么会响? ——兼谈鞭梢效应 [J]. 力学与实践, 1995, 17(5): 72- 73.

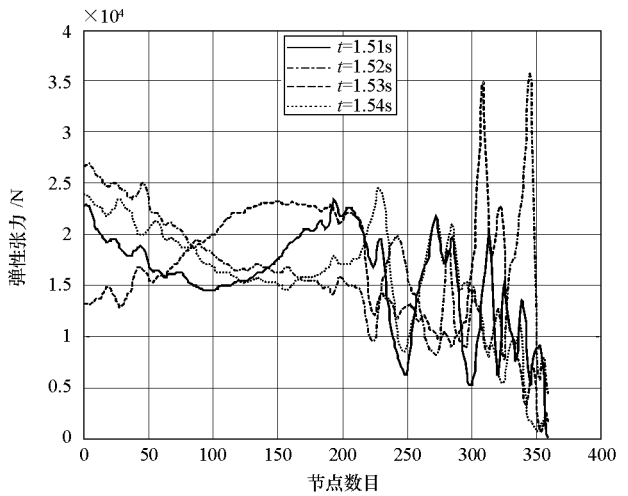


图7 拉断绳断裂前后节点的张力分布

Fig. 7 Tensile force distributing around rupture time of snap line