

救生伞背带分系统对假人动载的影响*

丰志伟¹, 张国斌¹, 张青斌¹, 王璐^{2,3}, 周喜生^{2,3}

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 航空防护救生技术航空科技重点实验室, 湖北襄阳 441003;

3. 航空工业航空救生装备有限公司, 湖北襄阳 441003)

摘要:为了改善救生伞背带分系统的安全性,建立降落伞-背带-假人系统的动力学模型,分析背带及脱离锁参数对假人质心过载的影响。针对救生伞假人高速开伞空投试验,采用多体动力学方法建立降落伞、背带脱离锁和假人的十五自由度动力学模型;采用半质量-阻尼弹簧模型建立背带模型,连接降落伞、脱离锁和假人;利用实测过载计算降落伞开伞力。利用所建立的动力学模型仿真典型状态下假人和背带的动力学响应,验证所建立模型的合理性。分析了脱离锁位置、背带松紧程度、背带材料特性对假人质心最大过载的影响,可用于指导背带设计以及确定最佳的背带脱离锁位置。

关键词:救生伞;背带;过载;空投假人

中图分类号:V244.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2019)06-044-06



听语音
与作者互动
聊科研

Influence of webbing subsystem of survival parachute on the dynamic load of the dummy

FENG Zhiwei¹, ZHANG Guobin¹, ZHANG Qingbin¹, WANG Lu^{2,3}, ZHOU Xisheng^{2,3}

(1. College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Life-Support Technology, Xiangyang 441003, China;

3. AVIC Aerospace Life-Support Industries, Ltd., Xiangyang 441003, China)

Abstract: To improve the safety of the webbing subsystem of the survival parachute, the dynamic model of parachute-webbing-dummy system was developed, and the load of the center of mass of dummy was analyzed for the varied parameters of webbing and detachment lock. For the airdrop test of dummy in the high speed, the fifteen degree of freedom dynamic model for the parachute, detachment lock and dummy was developed by using the multi-body dynamic method. The webbing was modeled by semi-mass-damping model to join the parachute, detachment lock and dummy. The parachute opening force was calculated by using the load of test. The dynamic process of dummy and the webbing for the typical condition was simulated by using the proposed model, and the reasonableness of the model was verified. The effect of the load of the dummy mass center was analyzed for the position of detachment lock, the length of webbing, and the property of the webbing material. The results of the analysis can be used for the design of the webbing and the determination of the position of the detachment lock.

Keywords: life-saving parachute; webbing; dynamic load; dummy for airdrop

救生伞是飞行员弹射救生的安全保障,其中开伞冲击过载是指在降落伞张开过程中,由于降落伞阻力突然增加通过伞绳和背带系统作用于人体的冲击过载。开伞冲击过载作用时间很短,极易对飞行员造成损伤^[1]。救生伞开伞力是通过救生伞操纵带、背带脱离锁传递至背带,再由背带作用于人体。背带系统是救生伞系统中飞行员防护救生的重要装备之一,在飞机飞行的不同姿态下对飞行员身体进行约束,固定在座椅上;在飞行

员弹射(跳伞)离机的过程中连接救生伞,传递开伞载荷,并保障开伞冲击过载在人体上合理分布^[2]。在具体的工程中,背带通常由飞行员自行穿着;受体型影响,同时为了穿着舒适,背带的松紧程度、脱离锁位置等因素通常会偏离设计位置,所以会造成飞行员质心处的过载发生变化。特别是当降落伞设计定型后,飞行员所受到的过载主要是受到背带设计以及背带脱离锁位置的影响。为了保证飞行员的安全,需要对这些因素的影响

* 收稿日期:2018-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11772353);航空科学基金资助项目(20152988004)

作者简介:丰志伟(1984—),男,山西临汾人,讲师,博士,E-mail:fengzhw@nudt.edu.cn

进行定量分析。

国内相关大学和科研院所开展了空投假人试验和动力学建模研究。北京航空航天大学刘丹阳等^[3]与航空工业航宇救生装备有限公司联合开展了救生伞假人高速空投开伞动载试验,基于小波分析解决了动载测量值离散度大的问题。航空工业航宇救生装备有限公司的谢俊杰和王雷^[4]提出了一种新的测试方案,研究了降落伞试验中假人姿态对过载测量的影响。在弹射救生系统动力学建模和分析方面,薛晓中等^[5]针对飞机弹射座椅开展了人伞系统运动分析;蒋伟^[6]建立了弹射救生系统全过程,包括救生伞拉直、充气 and 稳降过程的动力学模型。在目前救生过程动力学分析中,人伞系统动力学模型虽然能够对整个工作过程进行分析,但是没有考虑背带的作用,也无法反映背带脱离锁位置等对人体过载的影响。为了改进背带系统的安全性和舒适性,就必须建立降落伞-背带-假人系统动力学模型,进行相应的仿真分析。

1 降落伞-脱离锁-假人动力学模型

1.1 建模思路和假设

救生伞开伞力是通过救生伞操纵带、背带脱离锁传递至背带,再由背带作用于人体。为了分析背带设计和穿着因素对假人质心过载的影响,动力学模型中需要考虑降落伞到假人传力路径中的所有部件,主要包括操纵带、背带脱离锁和背带。其中操纵带连接降落伞和背带脱离锁,背带连接脱离锁和假人。

降落伞-脱离锁-假人模型示意以及坐标系定义如图1所示。假人通过 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 四个点与背带连接, B_1 和 B_2 为脱离锁分别与两条背带的连接点,开伞力 F 作用于两条操纵带交汇点 P 。

由于开伞时间较短,开伞冲击力作用时间则更短,将降落伞视为质点,不考虑其绕质心运动,将其质量等效于开伞力作用点 P 。由于体积较小且不易发生转动,背带脱离锁也作为质点考虑,一侧通过操纵带与降落伞连接,另一侧通过背带作用于假人。假人与背带之间的传力特性是建立动力学模型的难点,如果考虑背带假人接触,就应该采用接触碰撞算法,数值计算效率较低。为了避免该问题,本文假设背带上存在相对假人无相对滑动的一点(通常是大腿根部),将背带固定于假人肩部最高点和大腿根部,如图2所示。背带和操纵带的建模不考虑其抗弯刚度,建立质量阻尼弹簧模型。

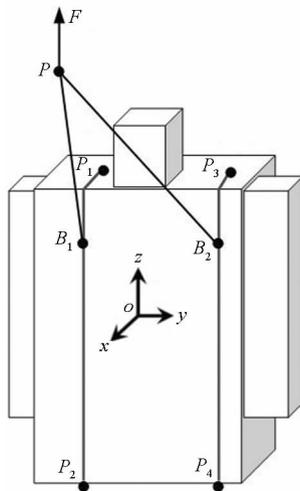


图1 背带分系统简化模型示意

Fig. 1 Simplified model of the webbing subsystem

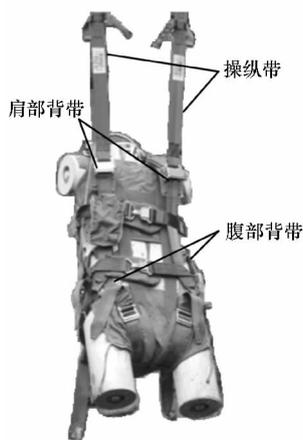


图2 背带分系统组示意

Fig. 2 Illustrated figure of group for the webbing subsystem

为简单起见,首先建立随假人一起运动的体坐标系 $oxyz$:原点位于假人质心; z 轴沿脊柱方向,向上为正; x 轴位于假人对称面内,垂直于 z 轴,向前为正; y 轴与 oxz 满足右手准则。另外,为描述假人姿态运动,建立惯性坐标系,初始时刻与假人坐标系重合。

1.2 假人 Newton-Euler 动力学模型

设假人质量为 m ,惯量张量为 I 。根据 Newton-Euler 方程^[7],假人质心运动和绕质心运动的动力学方程为:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = m\mathbf{g} + \sum_{i=1}^4 \mathbf{F}_{pi} \quad (1)$$

$$I\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (I\boldsymbol{\omega}) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{r}_{pi} \times \mathbf{F}_{pi} \quad (2)$$

其中, \mathbf{r} 为惯性坐标系中假人质心位置矢量, \mathbf{g} 为重力加速度矢量, \mathbf{F}_{pi} 为背带对假人作用力, $\boldsymbol{\omega}$ 为假人转动角速度, \mathbf{r}_{pi} 为背带连接点相对假人质心

的矢径。

1.3 背带(操纵带)质量阻尼弹簧模型

背带分系统共有两条操纵带 B_1P 和 B_2P , 四条背带 B_1P_1 、 B_1P_2 、 B_2P_3 和 B_2P_4 , 对这六条带子建立质量阻尼弹簧模型^[8-9], 背带质量集中于最近的质点, 如背带脱离锁、伞衣力等效点, 刚度和阻尼则根据背带性能参数计算得到。

根据阻尼弹簧模型, 背带 pb 上 b 点受到的内力可采用式(3)计算。

$$\mathbf{F}_{pb} = \begin{cases} (k\Delta L + c\Delta \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{r}/L) \Delta \mathbf{r}/L & \Delta L > 0 \\ \mathbf{0} & \Delta L \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $k = EA/L_0$ 为背带刚度, E 为背带弹性模量, A 为截面积, L_0 为实际长度; ΔL 为背带伸长量, $\Delta L = |\Delta \mathbf{r}| - L_0$, $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_p - \mathbf{r}_b$ 为背带所连接两点矢量 \mathbf{r}_p 和 \mathbf{r}_b 之差; c 为背带阻尼; $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_p - \mathbf{v}_b$ 为背带所连接两点速度 \mathbf{v}_p 和 \mathbf{v}_b 之差。

需要说明的是, 肩部背带穿过假人背后连接到腹部背带上, 为了计及该部分背带在受力后的伸长, 在计算肩部背带等效刚度时, 增加这部分长度, 即肩部背带的 L_0 要比实际的大。

1.4 背带脱离锁、开伞力作用点集中质量动力学

利用牛顿第二定律建立背带脱离锁和开伞力作用点集中质量动力学方程:

$$m_{bi} \ddot{\mathbf{r}}_{bi} = m_{bi} \mathbf{g} + \sum_{j=1}^2 \mathbf{F}_j + \mathbf{F}_{bi} \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$$m_p \ddot{\mathbf{r}}_p = m_p \mathbf{g} + \sum_{j=1}^2 \mathbf{F}_{bj} + \mathbf{F}_p \quad (5)$$

其中, m_{bi} 、 \mathbf{r}_{bi} ($i = 1, 2$) 分别为背带脱离锁处集中质量(含相连接背带和操纵带的部分质量)和相对惯性系原点的矢径, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{F}_j 为背带对该点的作用力, \mathbf{F}_{bi} ($i = 1, 2$)、 \mathbf{F}_{bj} ($j = 1, 2$) 分别为操纵带对脱离锁和开伞力作用点的力, m_p 、 \mathbf{r}_p 分别为开伞力作用点集中质量(含相连接操纵带的部分质量以及伞衣质量)和相对惯性系原点的矢径, \mathbf{F}_p 为降落伞阻力。

2 假人 Euler 运动学方程

在动力学仿真中为了避免假人大幅转动时欧拉角出现奇异, 采用四元数来描述假人的姿态运动。四元数采用如下定义^[10]

$$\mathbf{q} = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T = \left(\cos \frac{\theta}{2}, \mathbf{E}^T \sin \frac{\theta}{2} \right)^T \quad (6)$$

其中, \mathbf{E} 是欧拉轴, θ 是绕欧拉轴转过的角度。四元数运动学关系如下:

$$\begin{cases} \dot{q}_0 = \frac{1}{2}(-q_1\omega_x - q_2\omega_y - q_3\omega_z) \\ \dot{q}_1 = \frac{1}{2}(q_0\omega_x - q_3\omega_y + q_2\omega_z) \\ \dot{q}_2 = \frac{1}{2}(q_3\omega_x + q_0\omega_y - q_1\omega_z) \\ \dot{q}_3 = \frac{1}{2}(-q_2\omega_x + q_1\omega_y + q_0\omega_z) \end{cases} \quad (7)$$

为了方便分析, 将四元数结果转化为欧拉角画图, 按 321 顺序旋转定义欧拉角分别为绕 z 轴的自转角 ψ 、绕 y 轴的俯仰角 θ 和绕 x 轴的侧摆角 φ 。欧拉角与四元数转换关系如下:

$$\begin{cases} \sin\theta = 2(q_0q_2 - 2q_1q_3) \\ \tan\psi = \frac{2(q_0q_3 + 2q_1q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \\ \tan\varphi = \frac{2(q_0q_1 + 2q_2q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \end{cases} \quad (8)$$

3 仿真参数和工况

3.1 仿真参数

开展假人动载分析需要用到的假人质量特性、背带力学性能等参数见表 1, 假人、背带几何参数如图 3 所示。

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameters of the model

参数名称	符号/单位	数值
假人质量	m/kg	86
假人转动惯量	$I/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	[5.86, 5.86, 1.42]
背带弹性模量	E/GPa	1.114
背带截面积	A/mm^2	44 × 3
脱离锁质量	m_b/kg	0.1
降落伞伞衣质量	m_p/kg	20

注: 假人质量 86 kg 包括飞行员自重和携带的各种装备质量。

3.2 降落伞阻力

假设伞衣攻角为 0, 并且阻力与速度方向相反。降落伞阻力数值根据试验测得的过载换算得到。典型开伞冲击过载如图 4 所示。

3.3 仿真初始条件

假人初始落速为 120 m/s, 初始状态体坐标系与惯性坐标系坐标轴平行, 因此四元数初始条件为 [1, 0, 0, 0]。降落伞相对假人的位置根据仿真要求进行设置。

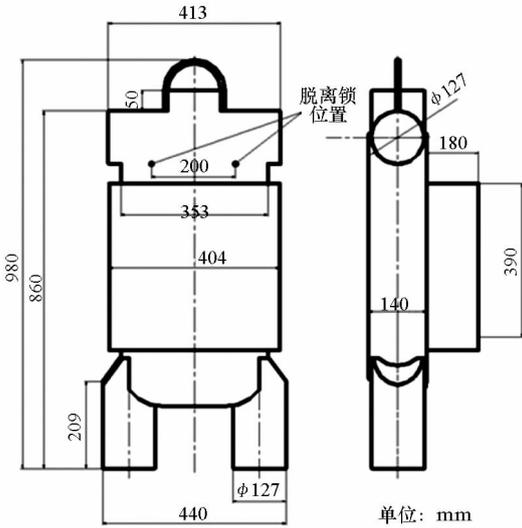


图3 假人主要尺寸

Fig.3 Main size of the dummy

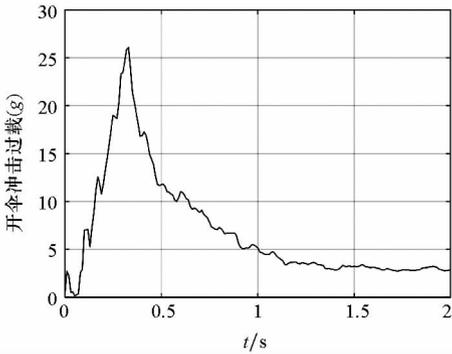


图4 开伞冲击过载曲线

Fig.4 Curves of parachute-opening shock overload

4 仿真结果及分析

首先对典型工况(理想的假人姿态和降落伞位置)下假人姿态、过载的动态响应进行仿真和分析,验证所建立的动力学模型的有效性;然后分析脱离锁位置、背带长度和背带弹性模量对最大过载的影响规律,其中最大过载为不同假人姿态以及降落伞相对位置下加速度最大值;给出假人体坐标系的分量。

4.1 典型工况仿真结果

固定背带长度、脱离锁位置以及降落伞相对假人位置,仿真假人过载(体坐标系)及姿态动态过程,如图5和图6所示,背带内力和伸长量如图7和图8所示。其中脱离锁位于肩部最高点向下0.08 m,降落伞位于假人纵向对称面内,并与脊柱成15°角。

仿真结果表明:在开伞载荷作用下,假人姿态存在俯仰振荡,俯仰角逐渐收敛到20°附近;由于

未考虑假人气动力和力矩,收敛过程较慢。降落伞位于假人对称面内,因此侧向(y)过载为0,脊柱(z)最大过载稍小于开伞最大过载;受姿态振荡的作用,前向(x)过载振荡收敛。左右背带力对称性好,腹部背带力和伸长量大于肩部背带;腹部背带最大伸长量为54 mm。

仿真结果与假人空投试验观察到的假人姿态俯仰振荡并收敛到固定值、背带伸长到假人头部中点附近的现象较为一致,充分说明仿真模型是可信的。

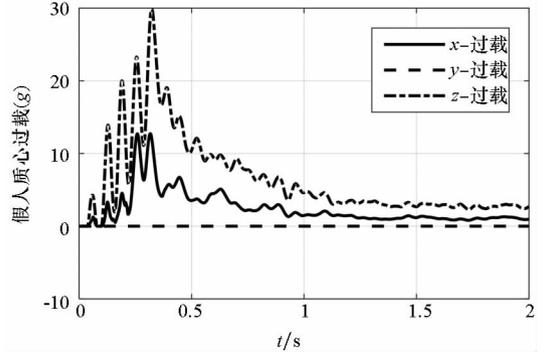


图5 假人质心过载随时间变化曲线

Fig.5 Overload of the dummy mass center versus time

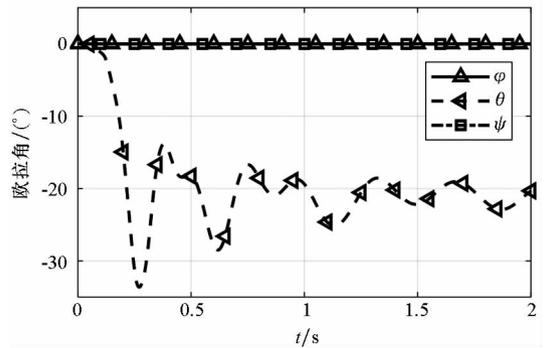


图6 假人姿态随时间变化曲线

Fig.6 Attitude angle of the dummy versus time

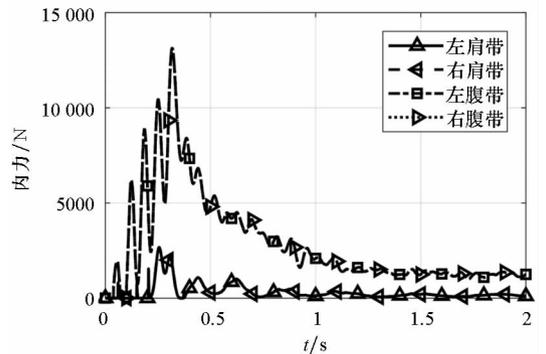


图7 背带内力随时间变化曲线

Fig.7 Internal force of the webbing versus time

4.2 脱离锁位置影响分析

在典型工况仿真的基础上,进一步仿真分析

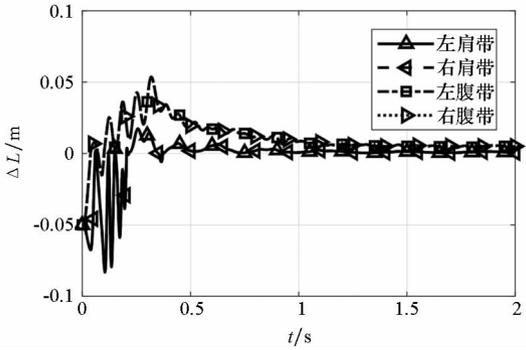
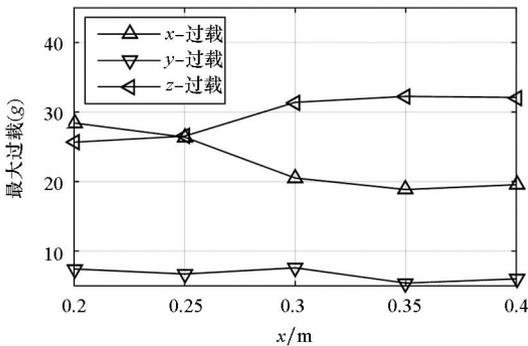


图 8 背带伸长量随时间变化曲线

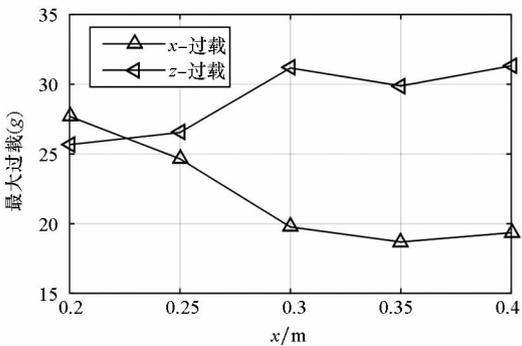
Fig. 8 Elongate length of the webbing versus time

脱离锁上下位置的影响。对于每个脱离锁位置,改变降落伞相对假人的方向(以降落伞与脱离锁连线相对脊柱的夹角 γ 和与对称面的夹角 δ 来表示),计算假人质心过载三个方向上的最大值,绘制假人质心过载随脱离锁位置的变化曲线,如图 9(a) 所示。当降落伞在假人纵向对称面内时,假人质心过载随脱离锁位置变化曲线如图 9(b) 所示。图中横轴为脱离锁的 z 坐标, γ 和 δ 的计算范围均是 $0^\circ \sim 45^\circ$, 间隔 15° 。



(a) 降落伞在空间变化

(a) Parachute varied in the space



(b) 降落伞位于假人对称面内

(b) Parachute varied in the plane of symmetry of the dummy

图 9 假人质心过载随脱离锁位置变化曲线

Fig. 9 Overload of the dummy mass center versus the location of the detachment lock

从图 9 可以看出,随着脱离锁位置的增大,脊柱(z)最大过载增大,最大为 $32.26g$,前向(x)最大过载逐渐减小,侧向(y)最大过载较小且变化不明显。由于脊柱抗过载能力较强,前向较弱,同时考虑到脱离锁太高不利于操作使用,脱离锁位置在 0.35 m 时前向过载最小。考虑质心到肩部最高点的距离为 0.43 m ,则该位置到肩部最高点的垂直距离为 0.08 m 。

4.3 背带长度影响分析

针对背带使用过程中,为了穿戴舒适出现背带松弛的现象,开展背带长度影响分析。如图 10 所示为背带在典型工况附近变化时对假人质心过载的影响。除背带长度外,仿真参数与典型工况一致。考虑到 y 方向质心过载较小,且为侧向,下面仅对 x 和 z 向过载进行分析。

从图 10 可以看出,随着背带长度增加,脊柱最大过载减小,前向最大过载变化不明显,说明增加背带长度有利于降低脊柱最大过载。

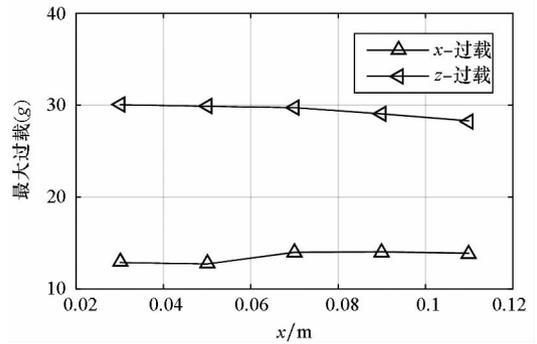


图 10 假人质心过载随背带长度变化曲线

Fig. 10 Overload of the dummy mass center versus the length of the webbing

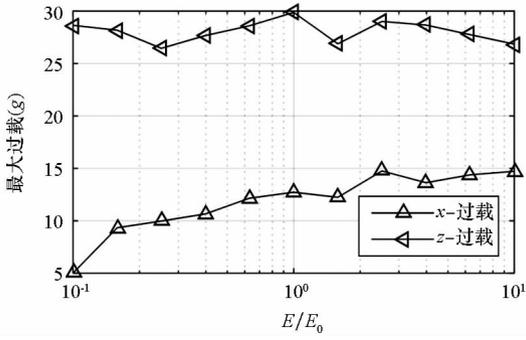
4.4 背带材料特性影响分析

在典型工况基础上,改变背带材料弹性模量和阻尼,得到最大过载变化规律如图 11 所示。

从图 11 可以看出,随着背带弹性模量增加,脊柱向最大过载变化不明显,但是前向最大过载明显增加。此外,随着背带阻尼增加,脊柱和前向最大过载均呈减小趋势。

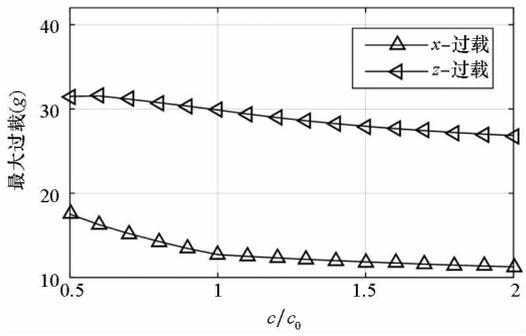
5 结论

针对改进背带系统的救生任务需求,建立了救生伞开伞过程降落伞、脱离锁和假人的复杂动力学模型。仿真了典型工况下开伞过程假人姿态、背带伸长量和质心过载等参数的动力学过程,验证了模型的合理性。分析了脱离锁位置、背带长度、背带材料特性对开伞最大过载的影响规律,



(a) 背带弹性模量影响规律

(a) Influence rule of the elasticity modulus of the straps



(b) 背带阻尼影响规律

(b) Influence rule of the damp of the straps

图 11 假人质心过载随背带材料变化曲线

Fig. 11 Overload of the dummy mass center versus the material characteristic of the straps

得到如下结论:

- 1) 随着脱离锁位置逐渐上移, 脊柱最大过载增大, 前向最大过载减小且存在极小值 ($x=0.35\text{ m}$);
- 2) 随着背带长度增大, 脊柱最大过载稍有减小, 前向最大过载稍有增加;
- 3) 随着背带材料弹性模量增大, 前向最大过载增加, 脊柱最大过载变化不明显;
- 4) 随着背带材料阻尼增加, 前向和脊柱最大过载均呈减小趋势。

参考文献 (References)

[1] 王利荣. 降落伞理论及应用 [M]. 北京: 宇航出版社, 1997.

WANG Lirong. The theory and application of parachutes [M]. Beijing: China Astronautic Press, 1997. (in Chinese)

[2] 都承斐, 兰文昌, 柳松杨, 等. 救生伞背带材料的力学性能研究 [J]. 航天医学与医学工程, 2015, 28(4): 288-292.

DU Chengpei, LAN Wenchang, LIU Songyang, et al. Study on mechanical performance of webbing materials in parachute harness [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2015, 28(4): 288-292. (in Chinese)

[3] 刘丹阳, 贾月红, 杨春信, 等. 救生伞假人高速空投开伞动载试验 [J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1623-1632.

LIU Danyang, JIA Yuehong, YANG Chunxin, et al. Experiment in parachute-opening shock of life-saving parachute and dummy high-speed airdrop [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1623-1632. (in Chinese)

[4] 谢俊杰, 王雷. 降落伞试验中假人姿态对过载测量影响的研究 [J]. 信息通信, 2016(7): 117-119.

XIE Junjie, WANG Lei. The study in the parachute test overload is affected by posture [J]. Information & Communications, 2016(7): 117-119. (in Chinese)

[5] 薛晓中, 糜志浩, 黄长强, 等. 某型飞机弹射救生人伞系统运动分析 [J]. 兵工学报, 2002, 23(1): 126-128.

XUE Xiaozhong, MI Zhihao, HUANG Changqiang, et al. Kinematic analysis of an ejecting rescue man-parachute system [J]. Acta Armamentarii, 2002, 23(1): 126-128. (in Chinese)

[6] 蒋伟. 基于 MATLAB 弹射救生系统全过程仿真研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

JIANG Wei. The whole trajectory simulation research of ejecting seat and occupant system with MATLAB [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)

[7] Shabana A A. Dynamics of multibody systems [M]. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2013.

[8] 张青斌, 彭勇, 程文科, 等. 降落伞拉直过程的质量阻尼弹簧模型 [J]. 弹道学报, 2003, 15(1): 31-36.

ZHANG Qingbin, PENG Yong, CHENG Wenke, et al. A mass spring damper model of parachute deployment [J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(1): 31-36. (in Chinese)

[9] 张青斌, 孙国鹏, 丰志伟, 等. 柔性绳网动力学建模与天地差异性分析 [J]. 宇航学报, 2014, 35(8): 871-877.

ZHANG Qingbin, SUN Guopeng, FENG Zhiwei, et al. Dynamics modeling and differential analysis between space and ground for flexible cable net [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(8): 871-877. (in Chinese)

[10] Wie B. Space vehicle dynamics and control [M]. 2th ed. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2008.