

文章编号:1004-7220(2012)06-0642-06

拦阻着舰过程中飞行员头颈部的动力学响应

鲁 廷¹, 王亚伟¹, 柳松杨^{1,2}, 杨春信¹

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 空军航空医学研究所, 北京 100142)

摘要: **目的** 分析航母舰载机拦阻着舰过程中飞行员在佩戴和不佩戴头盔时的头颈部动力学响应以及主要肌肉应变变量。**方法** 建立包括头部、7个颈椎和2个胸椎共10个刚体的人体头颈部的多体动力学模型;采用集总参数法描述韧带、椎间盘等软组织的力学特性;应用非线性应力-应变关系描述人体头颈部15组肌肉的力学特性。采用多组汽车碰撞过程人体头颈部动力学响应实验数据对模型进行验证。**结果** 获取了拦阻着舰过程飞行员头部的过载曲线和15组肌肉的应变,结果表明颈夹肌拉伸程度最大,在不佩戴头盔时其应变可达50%,佩戴2.7 kg头盔时其应变可达56%。**结论** 佩戴防护头盔会增加飞行员在拦阻着舰过程的颈部肌肉拉伸,仿真结果可用于进一步的损伤评估。

关键词: 头颈部; 飞行员; 动力学响应; 拦阻着舰

中图分类号: TP 391.1 文献标志码: A

Dynamic responses of head-neck complex in pilots during arrested deck landing

LU Ting¹, WANG Ya-wei¹, LIU Song-yang^{1,2}, YANG Chun-xin¹ (1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Institute of Aviation Medicine, Beijing 100142, China)

Abstract: **Objective** To analyze the dynamic response and strain of the major muscles in head-neck complex of pilot with or without wearing the helmet during carrier aircraft arrested deck landing. **Methods** Ten-rigid body dynamic model of human head-neck complex was created including head, seven cervical vertebrae and two thoracic vertebrae; mechanical properties of the ligaments, intervertebral discs and other surrounding soft tissues were described by lumped parameter method; mechanical properties of the 15 pairs of muscles in this human head-neck complex were represented by non-linear stress-strain relationship. The model was validated by using experimental data of dynamic responses from the human head-neck complex in a set of different types of automobile crashes. **Results** The overload curve and strain of this 15 pairs of muscles in head-neck complex of the pilot during arrested deck landing were obtained. The results showed that the extension of splenius cervicis was the largest. The strain of splenius cervicis could reach 50% when the pilot wore the helmet, and it could reach as high as 56% if the helmet's weight was 2.7 kg. **Conclusions** Wearing helmet would extend the stretch of neck muscles, and the simulation result could be used for further evaluation on head/neck injury of the pilot.

Key words: Head-neck complex; Pilot; Dynamic response; Arrested deck landing; Muscle

头颈部肌肉损伤是舰载机飞行员在拦阻着舰过程中常见的损伤形式。随着我国航母科研训练任务提上日程,加强对头颈部损伤的研究成为迫切需要;

而计算机硬件、多体系统动力学和有限元技术的飞速发展,使得建立基于解剖结构的人体头颈部计算机仿真模型作为经济高效的研究手段受到更多的重视。

收稿日期:2011-11-01; 修回日期:2012-03-27

通讯作者:杨春信,教授,Tel:(010)82339528;E-mail:yangchunxin@sina.com。

在多刚体动力学模型方面,国外研究人员开展了大量研究。Tien 等^[1-2]基于多体系统动力学 Kane 方程开发了人体头颈部系统数值模拟的算法和程序,使用集总参数模型描述椎间盘、韧带和肌肉的力学特征,这种模型具有简单和方便实施的优点;然而由于不能单独考虑各项组织的力学特性,其仿真结果精度有限,无法模拟肌肉等软组织的力学行为。Merrill 等^[3]建立了考虑 2 个胸椎、7 个颈椎与头部,并使用无质量的弹簧和阻尼连接这些刚体的三维动力学模型,相比 Tien 等的模型精度有一定程度的改善,同时可以对肌肉的力学行为进行简单的模拟;但该模型是二维的,肌肉模型也存在不足。Deng 等^[4]在 Merrill 等工作的基础上,改进肌肉模型,将 15 组主要头颈部肌肉从集总参数模型里分离出来,使用 3 点肌肉模型模拟肌肉在绕过颈椎时的弯曲,从而使肌肉模型更接近真实情况。Jager 等^[5-6]在前人模型的基础上,建立了用于不单独考虑肌肉的全局模型和单独考虑肌肉作用的细化模型,计算结果有了部分改善。国内开展的头颈部动力学仿真方面的研究相对较少,张竞等^[7]使用多体动力学软件 ADAMS 及其插件 LifeMOD 建立了简单的人体头颈部多刚体动力学模型,但该模型仅考虑了 4 组主要肌肉,对肌肉力学行为的模拟不足。同时,国内外科研工作开展的上述工作主要针对汽车碰撞问题,在航空领域研究较少^[8-9]。

舰载机拦阻着舰过程的过载曲线形式与汽车碰撞过程存在很大不同,属于峰值较低的持续过载,对飞行员头颈部的影响也不同。因此,本文参照 Jager 等^[5-6]单独考虑肌肉作用的细化模型,建立了考虑人体头颈部 15 组主要肌肉的 10 刚体模型,包括头部、7 个颈椎和 2 个胸椎;在进行实验验证后,开展了针对舰载机拦阻着舰过程飞行员头颈部动力学响应的仿真,评估了 15 组主要肌肉的应变变量。本研究为进一步的个体防护及舰载机飞行员训练措施提供了理论依据。

1 数学物理模型

人体头颈部 10 刚体模型中刚体 i, j 的随体坐标系以及全局坐标系的定义如图 1 所示。其中,刚体 T_2 的局部坐标系定义为全局参考坐标系,坐标系方

向符合右手法则,全局坐标系中正前为 x 轴,竖直向上为 z 轴。刚体 j 的质心坐标系相对于其局部坐标系的位置由 g_x, g_y 和 g_z 表示。图中 S_x, S_z 表示刚体 j 坐标系原点在刚体 i 坐标系中的位置, θ_y 表示刚体 j 坐标系相对 i 坐标系 y 轴的旋转。

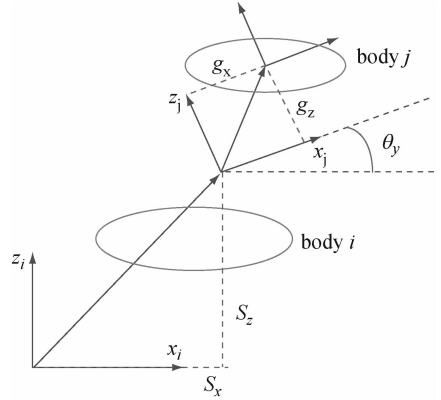


图 1 全局坐标系和局部坐标系

Fig. 1 Global coordinates and local coordinates

根据生物力学研究结果,获取韧带、椎间盘等软组织的集总关节参数矩阵来表示模型中相邻两刚体之间的软组织力学性能^[6],即相邻两刚体间的约束力直接决定于相邻两刚体间软组织的材料属性,以及相对位移和相对运动速度,如下式所示:

$$F = \Delta(K \cdot S + d \cdot \dot{S}) \quad (1)$$

式中: K 为集总关键刚度矩阵,考虑到颈椎间软组织的线性黏弹性性质和人体中矢面的几何对称性, K 为对称矩阵,且对角线上的元素呈双线性,取值如下式:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 8\,000 & 0 & -800 & 0 \\ & 122\,000 & 0 & 450 & 0 & 300 \\ & & k_{33} & 0 & -380 & 0 \\ & & & 171.9 & 0 & -1.5 \\ \text{symmetrical} & & & & k_{55} & 0 \\ & & & & & 149 \end{bmatrix} \quad (2)$$

和表 1 所示; d 是阻尼矩阵,为主对角矩阵,其中元素 $d_{11} = d_{22} = d_{33} = 300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, $d_{44} = d_{55} = d_{66} = 1.0 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$ ^[6]; S 为位移向量; \dot{S} 为速度矢量; Δ 表示颈椎间关节因子^[2](见表 2)。

表1 式(2)中的变量取值

Tab.1 Values for variables in equation (2)

	$k_{11}/$		$k_{33}/$		$k_{55}/$	
	(kN · m ⁻¹)		(kN · m ⁻¹)		(kN · m · rad ⁻¹)	
	$t_x \geq 0$	$t_x < 0$	$t_z \geq 0$	$t_z < 0$	$\varphi_y \geq 0$	$\varphi_y < 0$
k 值	140.0	50.0	390.0	1083.0	151.8	185.6

注: t_x 、 t_y 和 φ_y 分别为沿 x 、 z 轴方向的变形和绕 y 轴的选择变形

表2 关节因子取值

Tab.2 Values for joint factor

关节	C0~1	C1~2	C2~3	C3~4	C4~5	C5~6	C6~7	C7~1	T1~2
Δ	4.67	3.47	1.00	1.38	1.27	1.51	1.84	1.98	0.50

肌肉模型采用被动式的力—应变关系^[4]定义:

$$F = \begin{cases} \frac{A \cdot k \cdot e}{1 - e/a}, & e > 0 \\ 0, & e \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a=0.7$, $k=33.4$ kPa, e 为肌肉应变, A 为肌肉截面积。本文考虑了 15 对起主要作用的头颈部肌肉(见表3)。为保持头颈部直立, 肌肉必须有初始预紧力, 建模时将肌肉的刚性常量适当放大以接近真实情况, 通过计算发现放大 10 倍效果最佳^[6]。

表3 人体头颈部 15 组肌肉名称与截面积^[4]

Tab.3 Names and cross-sectional areas for 15 pairs of human head-neck complex muscles

名称	截面积/cm ²	名称	截面积/cm ²
头最长肌(LGSCP)	0.800	头半棘肌(SEMCP)	1.500
颈最长肌(LGSCV)	0.800	颈半棘肌(SEMVCV)	0.718
颈长肌(LONCL)	2.000	头棘肌(SPICP)	0.800
头长肌(LONCP)	2.000	颈棘肌(SPICV)	0.800
前斜角肌(SCAA)	1.656	头夹肌(SPLCP)	2.244
中斜角肌(SCAM)	0.436	颈夹肌(SPLCV)	0.847
后斜角肌(SCAP)	1.360	斜方肌(TRAP)	3.500
胸锁乳突肌(SCM)	3.586		

本文采用较为简便的两点式肌肉模型, 即肌肉的张力沿其两端附着点的连线方向。每组肌肉的两端附着点坐标详见文献[4]。两点式肌肉模型的优点是实施方便、能够给出合理的结果, 但其相对于更复杂的有限元肌肉模型来说精度较低。

2 模型验证

由于无法获取舰载机拦阻着舰过程中飞行员头颈部动力学响应的相关试验数据, 目前仅能采用文献中提供的汽车碰撞试验数据对本文建立的动力学模型进行初步验证。下面分别采用文献[6]中引用的 Ewing 等的前碰撞实验数据和 Davidsson 等的追尾碰撞实验数据进行验证, 这两项试验均是使用真人志愿者开展的。

2.1 头颈部前碰撞仿真验证

图2为前碰撞实验中记录的 T1 胸椎的 x 向加速度曲线^[6], 可将该曲线作为头颈部前碰撞仿真的边界条件施加在胸椎 T1 上。对模型中的 T1 胸椎施加 x 向的移动约束, 加载如图2所示的加速度载荷开展仿真计算, 获得的仿真结果如图3~5所示。

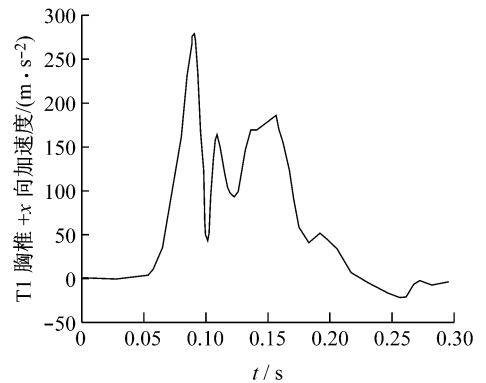
图2 全局坐标系下 T1 胸椎 x 向加速度载荷

Fig.2 +x acceleration for T1 in global coordinate

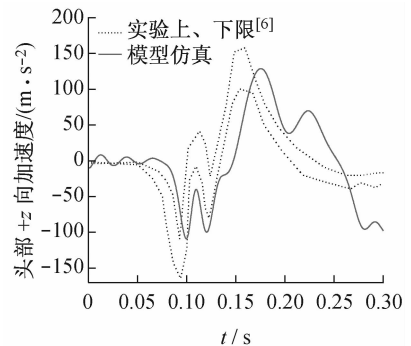
图3 头部 z 向加速度对比曲线

Fig.3 Head +z acceleration curve

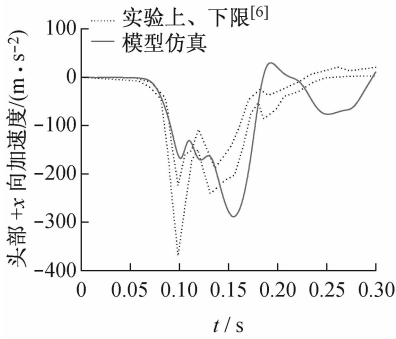


图4 头部 x 向加速度对比曲线

Fig.4 Head x acceleration curves

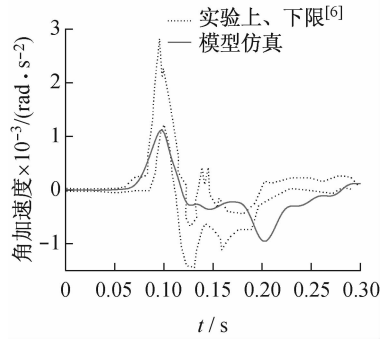


图5 头部角加速度对比曲线

Fig.5 Head angular acceleration curves

由图3可知,头部 z 向的加速度仿真结果前0.1 s内比实验值略小,在0.12 s左右明显大于实验值,在0.2 s以后仿真结果与实验值有较大偏差,这可能是被动式肌肉模型没有体现主动收缩做功的性能而造成的结果偏差,但总体运动趋势基本一致。

图4、5分别给出了头部 $+x$ 向加速度曲线和头部角加速度曲线与实验数据的对比情况。可以看出,头部 $+x$ 向加速度和头部角加速度与试验数据有一定差距,具体体现在:①实验数据显示在0.10 s时头部 $+x$ 向加速度出现第1个负向峰值,该峰值是整个碰撞过程中最大值,但仿真结果在此时间上并未出现峰值,仅是小幅波动,同时仿真结果的最大峰值出现在0.16 s处;②头部角加速度第1个正向峰值出现的时间和数和图值都在实验数据上下限内,趋势符合很好,但实验数据显示在出现该正向峰值后紧接着出现负向峰值,但仿真结果则未能体现

这个特点,而是进入平缓的变化,负向峰值的出现时间在0.21 s处。导致这些符合情况不好的原因将在模型验证结束时统一讨论。

2.2 头颈部追尾碰撞仿真验证

图6为追尾碰撞实验中记录的T1胸椎 x 向和 z 向的位移曲线^[6];对模型的T1胸椎施加图6的位移曲线载荷,仿真计算结果及验证如图7、8所示。图7的验证结果显示,模型的头部 x 向加速度仿真曲线与实验曲线的运动趋势基本一致,只是仿真结果曲线的正负峰值较大,在仿真临近结束的0.15 s内出现一定的波动,可能是肌肉模型没有体现主动收缩的功能,主要靠刚度阻尼慢慢消减的原因。图8为追尾碰撞过程中人体头颈部的动力学响应过程,可以看出,头部会出现明显的后仰与反弹,与实际情况一致。

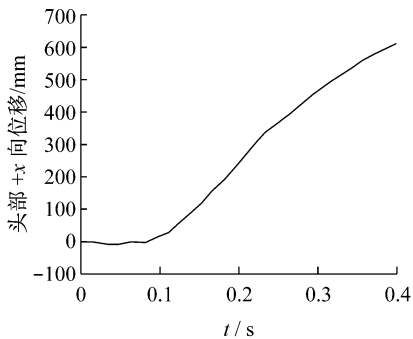


图6 追尾碰撞实验曲线

Fig.6 Experimental curve for frontal impact

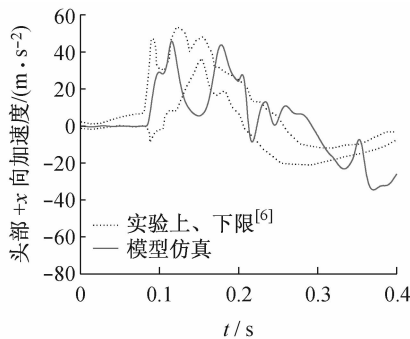


图7 头部 z 向加速度曲线

Fig.7 Head z acceleration curves

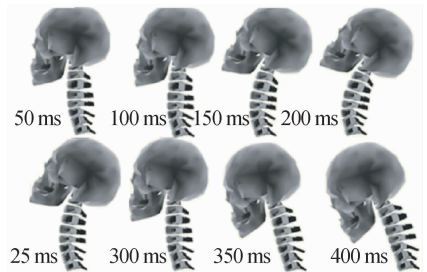


图8 追尾碰撞过程人体头部姿态变化过程

Fig.8 Model configurations for frontal impact

从头颈部前碰撞和追尾碰撞两个验证算例可以看出,应用仿真模型获得的头部加速度和角加速度的峰值与实验结果符合较好;在峰值出现的时间及曲线走势上头部 $+z$ 向加速度与实验数据符合相对较好,而头部 $+x$ 向加速度和头部角加速度与实验结果符合程度较差。经分析认为这主要是由于肌肉模型的缺陷导致的,原因如下:

(1) 本研究仿真模型考虑了人体头颈部 10 个刚体组成的系统,通过描述包括椎间盘、韧带等关节软组织的集总参数模型和单独的 15 组主要肌肉的力学模型来实现刚体间的力学约束,其中关键集总参数模型中的相关参数是通过大量生物力学实验获得的,且不存在神经控制的问题,故该模型的精度是可以保证的。

(2) 尽管肌肉模型也是通过生物力学实验获得,但由于实验对象与真实的人体之间存在神经主动控制与否的差别,这会导致使用被动肌肉模型时头部在碰撞过程中发生的抖动无法通过主动的神经作用去抑制,从而导致仿真结果出现与实验结果不符的波动和峰值出现时间不一致的情况。同时,本文仿真模型采用较易实施的两点式肌肉模型,无法考虑肌肉环绕颈椎的情况,而肌肉拉伸过程中产生的作用力的方向也会与实际情况有些差别,成为影响仿真结果的一个因素。

3 拦阻着舰过程仿真

采用文献[10]中提供的舰载机拦阻着舰过程中的拦阻力行程关系曲线以及飞机的重量,获取着舰过程中的加速度位移曲线(见图9)。

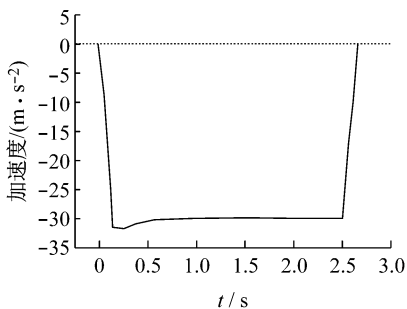


图9 拦阻着舰过程的加速度曲线

Fig.9 Acceleration curve for arrested deck landing

考虑到飞行员在座椅上的约束,假设此过载即

为人体胸椎 T2 上的过载以此曲线作为拦阻着舰过程人体头颈部动力学仿真的胸椎 T2 运动约束,获得的 $+G_x$ 的变化曲线如图 10 所示,15 组主要肌肉的应变律如图 11 所示。

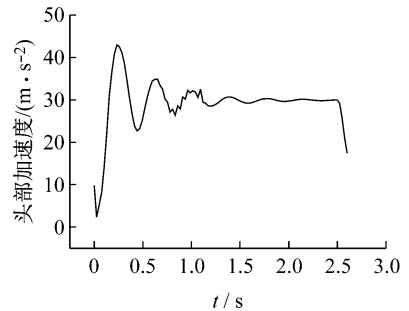


图10 拦阻着舰过程飞行员头颈部 $+G_x$ 变化过程

Fig.10 $+G_x$ of head-neck complex in pilot during arrested deck landing

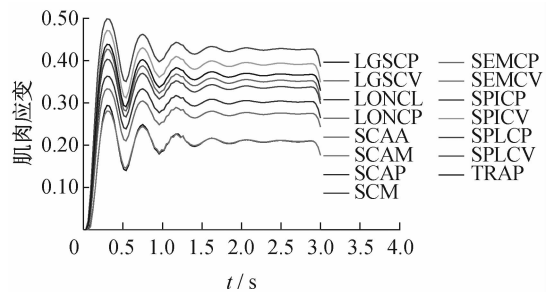


图11 拦阻着舰过程飞行员头颈部肌肉应变曲线

Fig.11 Strain curves of head-neck complex muscles in pilot during arrested deck landing

从图 11 可以看出,在人体头颈部 15 组主要肌肉中颈夹肌在拦阻着舰过程中的应变最大,达到 50%,需要注意相应的防护措施。

假设飞行员头盔重量为 2.7 kg,图 12、13 分别给出了人体头部在佩戴和不佩戴头盔时(3.5 kg 和 6.2 kg)的头部 $+G_x$ 曲线和颈夹肌肌肉应变量的对比情况。

从图 12、13 可以看出,头部质量(即佩戴头盔)增大,会导致 $+G_x$ 略有增大,并导致拦阻过程中的过载波动幅度增大,同时肌肉应变最大的颈夹肌应变会增大 15% 左右,达到 56%。由于头盔的设计不仅需要考虑飞行员的个体承受能力,还要考虑到抗冲击等防护要求,故在保证其防护能力的前提

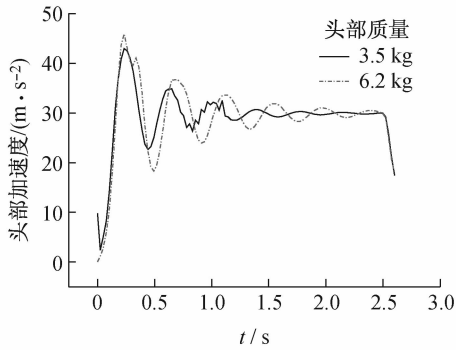


图 12 不同质量头部 +Gx 变化过程对比

Fig. 12 +Gx curves for different head mass

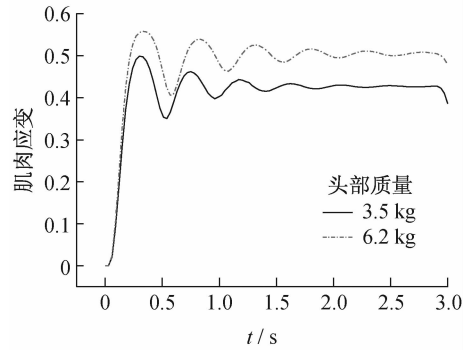


图 13 不同质量头部颈夹肌应变变量对比

Fig. 13 Strain curves of SPLCV for different head mass

下,结合新材料的应用和结构的优化设计可以降低头盔重量,从而降低其对飞行员拦阻着舰过程中头颈部肌肉的损伤。

4 结论

本研究参照国外研究成果,建立了 10 刚体人体头颈部模型,考虑了人体头颈部 15 组主要肌肉的影响。采用文献中提供的实验数据对模型进行了验证,验证结果表明模型具有较好的精度。进一步针对舰载机拦阻着舰过程中飞行员头颈部的动力学响应进行了仿真,仿真结果表明:① 采用接近 30 m/s^2 的方波过载时,飞行员头颈部 +Gx 会出现波动变化,最大值可达到约 43.0 m/s^2 ;② 在 15 组主要肌肉中,颈夹肌应变变量最大,在不佩戴头盔时可达 50%;③ 同样载荷条件下,佩戴头盔会使 +Gx 略有增大,并导致振幅增大;④ 佩戴头盔会导致具有最大应变量的颈夹肌应变变量增加约 15%。

由于肌肉模型的限制,本文模型与实验结果还存在一定差距,下一步研究将重点针对肌肉的神经控制模型及能考虑环绕颈椎的详细模型深入开展。

参考文献:

[1] Tien CS, Huston RL. Biodynamic modeling of the head/neck system. In: Field accidents data collections, analysis, methodologies and crash injury reconstructions [M]. Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 1995: 359-364.

- [2] Tien CS, Huston RL. Numerical advances in gross-motion simulations of head/neck dynamics [J]. J Biomech Eng, 1987, 109(2): 163-168.
- [3] Merrill T, Goldsmith W, Deng YC. Three dimensional response of a lumped parameter head neck model due to impact and impulsive loading [J]. J Biomech, 1984, 17(2): 81-85.
- [4] Deng YC, Goldsmith W. Response of a human head/neck/upper-torso replica to dynamic loading-II analytical/numerical model [J]. J Biomech, 1987, 20(5): 487-497.
- [5] Jager M, Sauren A, Thunnissen J, et al. A three-dimension head-neck model: Validation for frontal and lateral impacts [C]// Proceedings of the 38th Stapp Car Crash Conference. Fort Lauderdale, USA: [s. n.], 1994.
- [6] Jager M, Sauren A, Thunnissen J. A global and a detailed mathematical model for head-deck dynamics [C]// Proceedings of the 40th Stapp Car Crash Conference. Albuquerque, USA: [s. n.], 1996.
- [7] 张竞, 韩旭, 文桂林. 基于 ADAMS.LifeMOD 的人体头颈部动力学仿真与验证 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2718-2721.
- [8] 柳松杨, 丛红, 王鹤, 等. 军机飞行员的颈部损伤研究 [J]. 医用生物力学, 2010, 25(4): 262-265.
Liu SY, Cong H, Wang H, et al. Study on neck injuries in military pilots [J]. J Med Biomech, 2010, 25(4): 262-265.
- [9] 樊瑜波, 柳松杨. 航空生物力学 [J]. 医用生物力学, 2010, 25(4): 235-238.
Fan YB, Liu SY. Biomechanics in aviation [J]. J Med Biomech, 2010, 25(4): 235-238.
- [10] 周建斌, 金栋平, 张澎森. 舰载机拦阻系统动力学建模与控制 [J]. 动力学与控制学报, 2009, 7(4): 352-357.