

文章编号: 1004-7220(2023)01-0071-06

水平负向加速度对不同座椅靠背角假人模型 颈部损伤的差异

张 珺¹, 李鸣皋²

(1. 中国人民解放军总医院, 北京 100048; 2. 中国人民解放军总医院第六医学中心 特勤科, 北京 100048)

摘要:目的 基于假人模型,研究水平负向加速度($-G_x$)作用下不同靠背角与颈部损伤的关系。方法 将假人模型面朝轨道方向,固定在加速度平台底座上,设置靠背角为 17° 、 22° 、 30° 3个实验组,每个实验组按照相同的加速度曲线分别进行10次重复试验,比较相同 $-G_x$ 条件下颈椎上、下部加速度差异,通过曲线拟合计算并比较颈部损伤指数(neck injury criteria, NIC)。结果 颈椎上、下部在前后向、垂直向的加速度变化曲线形态一致,存在峰值差异;在前后向(X 轴),靠背角 22° 实验组的加速度峰值稍高于 17° 、 30° 靠背角实验组的加速度峰值;在垂直向(Z 轴),靠背角 22° 实验组的加速度峰值低于 17° 、 30° 靠背角实验组的加速度峰值;在前后向及垂直向,靠背角 22° 实验组测得的 NIC_{max} 较小,靠背角 30° 实验组测得的 NIC_{max} 次之,靠背角 17° 实验组测得的 NIC_{max} 较大。结论 靠背角度与颈部损伤之间呈非线性关系。本实验中在 $-G_x$ 作用下,靠背角为 22° 时假人模型的颈部损伤较小。

关键词: 加速度; 靠背角度; 颈部损伤; 假人模型

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.01.010

Differences in Neck Injuries of Dummy Models at Different Backrest Angles under Horizontal Negative Acceleration

ZHANG Jun¹, LI Minggao²

(1. Chinese PLA General Hospital, Beijing 100048, China; 2. Department of Special Operations Medicine, the Sixth Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100048, China)

Abstract: **Objective** Based on the dummy model, to study the relationship between different backrest angles and neck injuries under the effect of horizontal negative acceleration ($-G_x$). **Methods** The dummy model was fixed on the base of the acceleration platform facing the orbital direction, and the backrest angle was set at 17° , 22° , 30° , respectively. Each experimental group performed 10 repeated tests according to the same acceleration curve, differences between the upper and lower acceleration of the cervical spine under the same $-G_x$ conditions were compared, and the neck injury criteria (NIC) was calculated and compared through curve fitting. **Results** The time-acceleration curves of the upper and lower cervical spine in the anteroposterior and vertical directions had the same shape with peak differences. In the anteroposterior direction (X -axis), the acceleration peak of the 22° backrest angle experimental group was slightly higher than that of 17° and 30° backrest angle experimental groups, but in the vertical direction (Z -axis), the acceleration peak of the 22° backrest experimental group was lower than that of 17° and 30° backrest angle experimental groups. In the anteroposterior and vertical directions, the NIC_{max} measured by 22° backrest angle experimental group was relatively smaller, NIC_{max} measured by 30°

收稿日期: 2022-06-30; 修回日期: 2022-08-11

通信作者: 李鸣皋, 主任医师, E-mail: liminggao6899@163.com

backrest angle experimental group was in the middle, and NIC_{max} measured by 30° backrest angle experimental group was relatively larger. **Conclusions** There was a nonlinear relationship between the backrest angle and the neck injury. The neck injury of the dummy model with the backrest angle of 22° was smallest under the effect of $-G_x$ in this experiment.

Key words: acceleration; backrest angle; neck injury; dummy model

加速度是飞行过程中影响人体生理机能的重要生物动力学因素,而且不同加速度对飞行员会造成特定的生理损伤^[1]。研究表明,在战斗机降落过程中产生的加速度会对飞行员脊柱带来损伤,尤其在舰载机阻拦着舰过程中更是如此^[2]。阻拦着舰过程中,飞行员不仅会受到垂直向加速度的影响,还会受到持续水平加速度的影响,对颈椎会带来挥鞭样损伤^[3]。该损伤机制较为复杂。研究表明,颈部损伤可能与人体初始体位、所受力学负荷等因素有关^[4]。其中,飞行员座椅靠背角是重要影响因素,也是飞机设计过程中需要考虑的重要因素。本研究利用目前国内唯一一台能够实现短距离条件下有效模拟持续性水平负加速度的试验平台^[5],以假人模型为实验对象,观察水平负加速度作用下不同座椅靠背角对颈部损伤的影响,并探索两者之间可能的关系。

1 材料与方法

1.1 实验对象及分组

假人模型由自主研发设计,以 Hybrid III 型假人为基础,根据 GJB 4856-2003 确定第 95 百分位的主要外形尺寸,使仿真试验假人的外形尺寸符合现役飞行员相应百分位人体尺寸,其关键部位头颈部与 Hybrid III 型假人完全相同。考虑到加速度平台承重能力及实验有效性,假人模型为半身假人。在半身假人的颈椎上、下各布置 1 个 9 轴传感器,同时在底座布置 9 轴传感器,传感器采集频率均设为 500 Hz,传感器数据以加速度-时间变化曲线及实测数据(保留至小数点后 5 位)表示。假人模型及传感器布置如图 1 所示。该假人模型已通过计量标定及有限元分析检测,为标准假人模型。本实验通过调节假人模型靠背支撑实现靠背角度变化,以靠背角度不同设置 3 个实验组。结合相关行业标准,以铅垂面为基准,本实验设置后倾 3 种靠背角度,分别为 17° 、 22° 、 30° 。

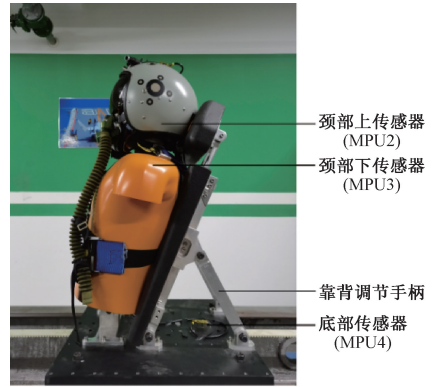


图 1 假人模型及传感器设置

Fig. 1 Dummy model with sensor setting

1.2 实验设备

本实验所用的加速度平台基于西门子运动控制模块 D435 及交流伺服电机设计,能够产生规定的 $-G_x$ 加速度变化曲线,其主要功能指标为:导轨长度 25 m、双向最大速度 ± 25 m/s、双向最大加速度 $\pm 5 G$,相关指标已通过具备资质的第三方机构计量标定,是国内首次实现短距离条件下有效模拟持续性水平负加速度试验平台。

1.3 假人模型固定

安装好假人模型头戴系统,并通过背带约束系统将假人模型固定在靠背上,面朝轨道方向,其底座与加速度平台刚性连接,通过调节靠背支撑手柄长度使靠背角度符合实验方案设计。飞行员及驾驶员使用的安全带具有自由拉伸和收回的功能,当安全带未拉紧时,身体可以轻松地前倾,但在受到过性载荷人体急速前倾时,安全带会突然收紧并将人体紧紧固定好。一般来说,当加速度超过 $2 G$ 时,安全带会迅速锁死以保证飞行员安全。考虑到实验设定最大载荷为 $4.8 G$,远超过 $2 G$,故在本实验中,舍弃了安全带自由伸缩的功能,采用四点式安全带(全背带式)直接将假人固定在靠背上,使假人的头盔及背部紧贴靠背及头靠上(见图 2)。



图2 假人约束方式

Fig.2 Dummy restraint mode

1.4 实验过程

假人模型固定好后进行水平负加速度实验,水平加速度作用条件为:加速度作用方向为由胸至背,加速度作用峰值 $4.8 G$,加速度作用时间为 $2 s$,加速度呈梯度减小,具体加速度设定参数及实际输出加速度如图 3 所示,其中加速度正值部分为实际实验所需。

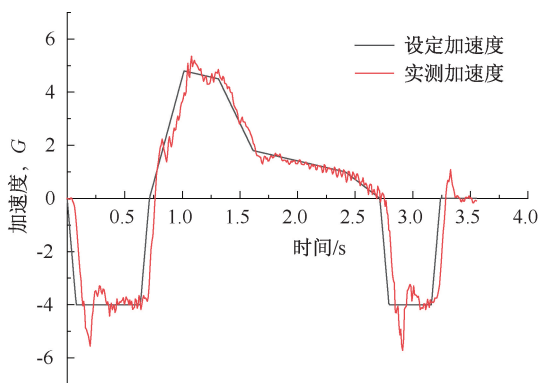


图3 加速度平台设定加速度及输出加速度

Fig.3 Setting the acceleration and output acceleration

每次实验后休息 5 min ,然后进行下一次实验。每个实验组进行 10 次有效实验后调整靠背角度,进行下一实验组的加速度实验。所有实验程序相同,不同实验组仅存在靠背角度区别。

1.5 数据提取

根据加速度平台特性及传感器设置,采集假人模型颈部上(定义为 MPU2)、颈部下(定义为 MPU3)及底座(定义为 MPU1)传感器数据,因假人模型与加速度平台底座刚性连接,运动一致,故而

以底座传感器 X 轴加速度为依据截取实验数据后,选取零点附近波动的时间戳为起始点和终止点,截取时间长约 1800 ms 相对应的颈部上、下传感器数据。由于在加速度平台运行过程中,可产生前后向、左右向及垂直向加速度、位移,其中左右向加速度、位移主要由震动及背带捆绑不牢引起,不作为本实验研究点。由于颈部上、下传感器均为九轴姿态传感器(加速度、角速度、磁感应),其中角速度、磁感应在本实验中可忽略不计,选取颈部上部加速度传感器、颈部下部加速度传感器的 X 、 Z 轴数据为研究对象。

1.6 数据处理

同一实验组实验条件一致,利用 SPSS 26.0 软件对同一靠背角、同一传感器、同一方向的数据进行数据同质性检验,确保数据差异无统计学意义后取平均值。不同实验组仅有靠背角度唯一一个实验条件差异,其他实验条件一致,利用 SPSS 26.0 软件对不同靠背角、同一传感器、同一方向的数据进行统计学分析,并利用 ORIGIN 软件进行曲线拟合,计算不同实验条件下颈部损伤差异,分析不同座椅靠背角条件下,持续性水平附加加速度作用中假人模型的颈部损伤是否存在统计学差异,探究座椅靠背角与颈部损伤的关系。

2 结果

在同一实验组中,对 10 次有效实验采集到的 4 组数据(颈部上、下两个传感器的 X 、 Z 方向)分别进行重复测量方差分析。结果发现,同一靠背角、同一传感器、同一方向的数据差异均没有统计学意义($P>0.05$)。在此基础上,将 10 次实验数据按照传感器及方向两因素分类汇总,并取算数平均值。为进一步明确不同实验组之间的关系,采用配对 t 检验对不同靠背角、同一传感器、同一方向的数据进行统计学分析,并利用 ORIGIN 软件进行曲线拟合后计算颈部损伤指数(neck injury criteria, NIC)。

2.1 $-G_x$ 对不同座椅靠背角假人模型颈部损伤的比较

对同一传感器、同一方向的数据进行配对 t 检验的结果表明,在两个传感器、两个方向上,不同靠背角度实验条件下测得的数据差异均有统计学意义($P<0.05$),见表 1。

表1 不同靠背角测得加速度的配对 *t* 检验结果

Tab.1 Pairing *t*-test results of acceleration measured at different backrest angles

位置	方向	座椅 后倾角/(°)	<i>t</i>	自由度	显著性 (双尾)
颈部上	X 轴	17,22	22.30	899	<0.001
		22,30	39.08	899	<0.001
		17,30	-7.76	899	<0.001
	Z 轴	17,22	20.79	899	<0.001
		22,30	24.80	899	<0.001
		17,30	-7.71	899	<0.001
颈部下	X 轴	17,22	19.78	899	<0.001
		22,30	37.56	899	<0.001
		17,30	12.64	899	<0.001
	Z 轴	17,22	21.04	899	<0.001
		22,30	11.02	899	<0.001
		17,30	27.15	899	<0.001

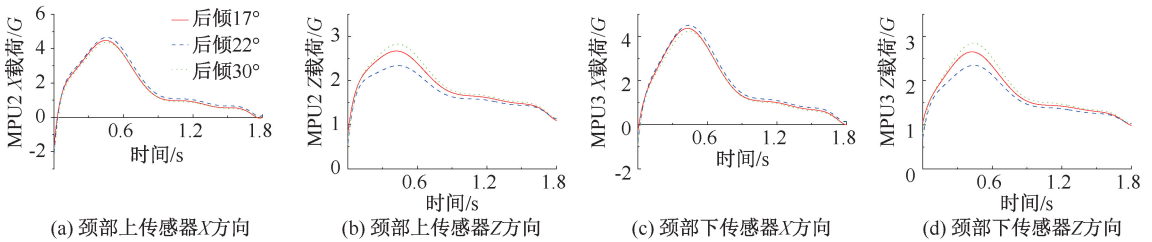


图4 不同传感器、不同方向时间-加速度拟合曲线

Fig.4 Time-acceleration fitting curves of different sensors in different directions (a) Acceleration of upper cervical spine in X-axis, (b) Acceleration of upper cervical spine in Z-axis, (c) Acceleration of lower cervical spine in X-axis, (d) Acceleration of lower cervical spine in Z-axis

2.3 颈部损伤分析

颈部损伤准则是利用一个或者多个物理参数的函数来评价颈部损伤的危险程度,目前国际上常用的颈部损伤评价准则有 NIC、标准化 NIC (normalized neck injury criterion, N_{ij})、颈部保护标准 (neck protection criterion, N_{km})、颈部位移标准 (neck displacement criterion, NDC) 以及颈椎间损伤标准 (intervertebral neck injury criterion, IV-NIC) 等。根据本实验中载荷作用于假人颈部的方式及输出数据类型,采用 Bostrom 等^[6]提出的 NIC 评估假人模型颈部损伤。NIC 是由头部相对于第 1 胸椎在水平方向上的速度和加速度构成的函数:

$$NIC = 0.2\alpha_{relative} + v_{relative}^2$$

式中: $\alpha_{relative}$ 和 $v_{relative}$ 分别是第 1 颈椎相对于第 1 胸椎的加速度和速度;0.2 是长度量。NIC<15 m²/s² 是安全的。在本实验中,根据假人模型颈部设计及

2.2 不同靠背角条件下假人模型在不同方向颈部损伤比较

将同一靠背角、同一传感器、同一方向的 10 次实验数据取算数平均值,利用 Origin 进行线性拟合。结果发现,同一靠背角、同一传感器、同一方向的时间-加速度拟合曲线 $r^2 > 0.8$,拟合程度高。比较同一传感器、同一方向的实验数据,结果发现,颈椎上、下部在前后向、垂直向的加速度变化曲线形态一致,存在峰值差异;在前后向(X 轴),靠背角 22° 实验组的加速度峰值稍高于其他两个靠背角实验组的加速度峰值;在垂直向(Z 轴),靠背角 22° 实验组的加速度峰值明显低于其他两个靠背角实验组的加速度峰值;前后向加速度峰值显著高于垂直向加速度峰值(见图 4)。

传感器布置,将颈椎上部定义为第 1 颈椎,颈椎下部定义为第 1 胸椎,并利用拟合曲线获取 $\alpha_{relative}$ 和 $v_{relative}$ 的最大值,根据公式计算 NIC 的最大值 NIC_{max} 。结果发现,不同靠背角实验条件下,各组实验测得的 NIC 均小于 15 m²/s²;在前后向及垂直向,靠背角 22° 实验组测得的 NIC_{max} 较小,靠背角 30° 实验组测得的 NIC_{max} 次之,靠背角 17° 的实验组测得的 NIC_{max} 较大(见表 2)。

3 讨论

挥鞭样损伤是一种由突然的加速-减速机制造成的颈部损伤^[7]。传统意义上,挥鞭样损伤被定义为机动车受到碰撞时,乘员头颈部受到的过伸、过屈力^[8]。更为广义的定义为使颈椎产生相似动作所造成的损伤。飞机着陆时,飞行员随飞机呈水平减速运动,由于飞行员上半身被躯干约束带捆绑,

表 2 不同靠背角度 NIC_{max} 计算结果Tab. 2 NIC_{max} calculation results at different backrest angles

靠背角度/ (°)	传感器 位置	X 向		NIC	Z 向		NIC
		最大加速度	最大速度		最大加速度	最大速度	
17	颈部上	45.11	15.85	0.60	26.96	16.88	1.55
	颈部下	43.42	16.36		27.00	15.64	
22	颈部上	46.48	17.00	0.41	23.32	15.54	1.24
	颈部下	44.95	17.33		23.81	14.47	
30	颈部上	43.69	15.35	0.50	27.95	17.25	1.37
	颈部下	42.32	15.83		28.09	16.09	

在水平负向加速度作用下,飞行员头颈部产生相对于躯干部更大的位移,表现为头颈部的后倾、后屈,造成颈部的挥鞭样损伤^[9-10]。研究表明,飞行员颈椎疾病患病率高,在患病疾病谱中构成比占比重^[11]。飞行员颈部损伤受到多种因素影响,其中座椅的靠背角度是重要的影响因素之一。靠背能够减轻飞机减速时人体受到的水平载荷作用。本实验基于假人模型,通过研究相同水平负加速度作用下靠背角度与颈部损伤的关系,探索颈部损伤防护新策略,为改进飞机座舱设计提供一定的数据支持。

本文仅从靠背角度与颈部损伤关系上进行实验并讨论,目前相关领域该方向研究较少。成德等^[12]研究认为,直升机座椅靠背角大于 5° 时即可有效改善座椅的舒适度。但不能无限增大靠背角度,多项基于汽车碰撞试验的研究证实,较大的靠背角度容易带来安全性问题。屈文涛等^[13]研究证实,较大的靠背角度更容易造成椎骨和椎间盘的损伤,靠背角 20° 左右时椎间盘所受应力稳定,且趋于最小值。曹立波等^[14]研究表明,较大的靠背角会降低约束系统的作用,引起更为严重的头颈部损伤。本实验的结果表明,头颈部产生的 X 向加速度峰值显著高于 Z 向加速度峰值,同靠背角度无关。李鸣皋等^[15]利用人椅背带系统动力学的研究表明, $-G_x$ 作用下,头部的 X 向位移大于 Z 向位移,表明头部的运动主要由于身体前倾和颈部弯曲产生的位移叠加,这两者产生的位移主要集中于前向位移,这与本实验结果相似。据此推测,靠背角度越大, X 向加速度、位移越大,颈部损伤越大。但本研究结果表明,靠背角度与颈部损伤之间呈现非简单的线性关系。本文发现,在 X 向,靠背角 22° 的加速度峰值稍高于其他两个靠背角的加速度峰值;在 Z 向,靠背角 22° 的加速度峰值明显低于其他两个靠背角的

加速度峰值。通过计算发现,在前后向及垂直向,靠背角 22° 的实验组测得的 NIC_{max} 均小于其他两个实验组测得的 NIC_{max} 。但本实验仅设计 17° 、 22° 、 30° 这 3 种靠背角度,是否存在 1 个合适的靠背角度,使飞机减速运动时飞行员受到的颈部损伤最小,仍需要进一步实验进行研究。另外,本实验的样本量较小,后期考虑加大样本量进一步验证实验结果。

目前国内外关于 $-G_x$ 对颈部损伤的研究,多采用计算机有限元建模仿真或汽车碰撞试验,考虑到采集真实舰载机飞行员数据的难度及保密性,本研究基于假人模型设计实验,与以往研究相比,数据更为真实,但仍存在以下不足:①将人体颈部简单化为一个整体,忽略了多节颈椎之间的相互作用及颈部肌肉的主动收缩作用。柯鹏等^[16]研究发现,在 $-G_x$ 作用下,相比于轴向损伤,颈椎更容易受到剪切损失,仍需进一步优化假人设计。②默认飞行员减速时以假人模型姿势固定,但在实际飞行中飞行员会产生许多动作操作,头颈部姿势多变,后续需完善头颈部姿势与颈部损伤相关研究。③假人模型固定条件与真实飞行员之间不完全相同,未考虑座椅坐垫、靠背等材质因素。本实验发现,靠背角度与颈部损伤之间呈非线性关系,该结论能否推广到飞机座椅设计中,仍需进一步验证。

4 结论

本实验基于假人模型,研究 $-G_x$ 对不同座椅靠背角假人模型的颈部损伤。结果表明,靠背角度与颈部损伤之间呈非线性关系。在 $-G_x$ 作用下,靠背角为 22° 时假人模型的颈部损伤较小。

参考文献:

[1] 沈功田, 贺贵军, 张勇, 等. 载人设备人体加速度反应研究

- 综述及应用展望 [J]. 机械设计与研究, 2020, 36(6): 1-7.
- [2] 聂宏, 彭一明, 魏小辉, 等. 舰载飞机着舰拦阻动力学研究综述 [J]. 航空学报, 2014, 35(1): 1-12.
- [3] GODINEZ A, LISTON DB, AYZENBERG R, *et al.* G-loading and vibration effects on heart and respiration rates [J]. *Aviat Space Environ Med*, 2014, 85(9): 949-953.
- [4] 贾治伟, 李海峰, 王德利, 等. 颈椎挥鞭样损伤的致伤机制研究进展 [J]. 脊柱外科杂志, 2012, 10(3): 190-192.
- [5] 徐建中, 李鸣皋, 钱阳明, 等. 加速度试验装置: 中国, CN202974614U [P]. 2013-06-05.
- [6] PANJABI MM, ITO S, IVANCIC PC, *et al.* Evaluation of the intervertebral neck injury criterion using simulated rear impacts [J]. *J Biomech*, 2005, 38(8): 1694-1701.
- [7] SPITZER WO, SKOVRON ML, SALMI LR, *et al.* Scientific monograph of the Quebec task force on whiplash-associated disorders: Redefining "whiplash" and its management [J]. *Spine*, 1995, 20(8 Suppl): 1S-73S.
- [8] BUNKETORP L, NORDHOLM L, CARLSSON J. A descriptive analysis of disorders in patients 17 years following motor vehicle accidents [J]. *Eur Spine J*, 2002, 11(3): 227-34.
- [9] 蔡亚飞, 洪毅, 王方永, 等. 挥鞭样损伤的研究进展 [J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(3): 324-329.
- [10] 杨欢, 刘小川, 白春玉, 等. 典型航空座椅/乘员系统水平冲击特性实验研究 [J]. 航空学报, 2022, 43(6): 526238-526238.
- [11] 周家兴, 韩磊, 周必业, 等. 2011~2015 年度海军某型战机飞行员住院疾病谱分析 [J]. 中华保健医学杂志, 2018, 20(4): 327-330.
- [12] 成德, 王欣宇, 刘舒宁, 等. 直升机驾驶员座椅舒适性指标量化研究 [J]. 直升机技术, 2021(4): 32-37.
- [13] 屈文涛, 孔维聪, 徐剑波. 基于腰椎有限元分析的驾驶座椅靠背角研究 [J]. 机械研究与应用, 2018, 31(2): 9-11.
- [14] 曹立波, 戴黄伟, 张瑞锋, 等. 乘用车座椅靠背角对乘员碰撞安全性的影响分析 [J]. 汽车工程, 2014, 36(12): 1461-5.
- [15] 李鸣皋, 柳松杨, 柯鹏, 等. 拦阻着舰过程中不同百分位人体运动幅度的差异研究 [J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(6): 406-410.
- [16] 柯鹏, 诸斌, 柳松杨, 等. 拦阻着舰过程中不同百分位人体颈部损伤风险的差异对比 [J]. 医用生物力学, 2018, 33(5): 383-389.
- KE P, ZHU B, LIU SY, *et al.* Differences of neck injury risks for different dummies during arrested landing [J]. *J Med Biomech*, 33(5): 383-389.
-
- (上接第 64 页)
- [17] 王文娟. 机械振动分析的 Matlab/Simulink 仿真研究 [J]. 现代电子技术, 2006, 29(25): 46-48.
- [18] BIALOSKY JE, GEORGE SZ, HORN ME, *et al.* Spinal manipulative therapy-specific changes in pain sensitivity in individuals with low back pain (NCT01168999) [J]. *J Pain*, 2014, 15(2): 136-148.
- [19] 张延海, 曹金凤, 吕杰, 等. 基于多刚体力学模型腰椎推拿斜扳法的优化 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(2): 277-283.
- ZHANG YH, CAN JF, LV J, *et al.* Optimization of lumbar oblique-pulling manipulation based on multi-rigid body mechanical model [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 277-283.
- [20] EL OUAAD Z, SHIRAZI-ADL A, PLAMONDON A. Effects of variation in external pulling force magnitude, elevation, and orientation on trunk muscle forces, spinal loads and stability [J]. *J Biomech*, 2015, 49(6): 946-952.