

# 坐姿下人体振动特性建模及实验分析

刘菲菲, 李建平, 陈国强, 罗斯特, 李增勇\*

(山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**为客观评价垂直振动条件下人体生物力学响应,依据多体动力学原理建立了七自由度无靠背坐姿下人体振动模型。根据不同频率下人体振动实验数据,采用最小二乘参数识别法以及加权计算得到人体动力学参数,根据识别出的参数进行人体振动特性分析,得到了特定频率下人体头部振动加速度响应特性。应用近红外光谱法无创检测脑部组织血氧参量,分析了不同频率下血氧参数变化。实验结果表明:该模型有较高的预测精度,可为动态环境下人机界面设计提供重要参考,对于客观评价人体坐姿舒适性,提高汽车人机界面设计宜人性能有指导意义。

**关键词:**最小二乘法;七自由度模型;系统辨识;血氧参量

**中图分类号:**R318.51 **文献标志码:**A

## Biomechanical model of seated human body exposed to vertical vibration

LIU Fei-fei, LI Jian-ping, CHEN Guo-qiang, LUO Si-te, LI Zeng-yong\*

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong)

**Abstract:** A 7 DOF (degree-of-freedom) biomechanical model of human on a seat without backrest based on multi-body dynamics theory was developed to predict the biodynamic responses of the seated human body in vertical vibration conditions. The parameters of the model were estimated to satisfy the STH (seat-to-head transmissibility) characteristic defined by a synthesis of published data for seated subjects without backrest support. The parameter identification technique involves the solution of a multivariable optimization function and comprises the sum of squared magnitude and phase errors associated with the seat-to-head transmissibility target values. The cerebral oxygenation was detected by NIRS to verify the accuracy of the studied model. The results showed that the proposed model could improve the vehicle seating system designs.

**Key words:** least squares; human-body vibration; Seven degrees of freedom; parameter identification; cerebral oxygenation

## 0 引言

动态环境下的机械系统(如行驶中的汽车、火车、飞机等)会产生振动,振动通过座椅传递到人体的臀部、后背部而引起全身振动<sup>[1-3]</sup>。振动的频率、

速度和加速度对人体的生理和心理都有影响<sup>[4]</sup>,当外界振动接近器官的共振频率时,振幅迅速增大,振动特性处于人体神经系统的敏感区域,这种刺激频繁传人大脑皮质,引起大脑皮质细胞兴奋,当达到一定限度时,皮质细胞的工作强度将减弱,易使人头晕、恶心,产生驾驶疲劳,甚至导致交通事故<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期:2012-02-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30870652,81071223);山东省自然科学基金资助项目(ZR2010HM024);山东大学2010年自主创新基金自然科学基金类资助专项(2010JQ007)

作者简介:刘菲菲(1988-),女,山东青岛人,硕士研究生,主要研究方向为车辆人机工程学. E-mail: yanliantaogf@sohu.com

\* 通讯作者:李增勇(1970-),男,山东莱芜人,副教授,主要研究方向为车辆人机工程学. E-mail: zyongli@sdu.edu.cn

因此,研究动态环境下人体振动建模对指导汽车人机界面设计有重要意义。

人体是一个复杂的动态系统,其振动响应特性往往随着时间的变化而变化,个体差异也会导致相应的变化。振动响应的特性分析常用数学模型来研究。常见的建模方法包括有限元模型法(FE)、多体模型法(MB)和集总参数模型法(LP)<sup>[7-10]</sup>。有限元模型法利用变分原理和加权余量法,计算系统的变形和应力以及动力学特性,计算量较大,常用于局部建模。多体模型法将人体视为各部分由柱销连接的刚性体,是考虑旋转运动的三维模型,建模过程相对复杂,常用于撞击试验。集总参数模型法将人体视为质量-刚度-阻尼刚性体,用线性或非线性的常微分方程来描述系统的动态特性,模型各变量与空间位置无关,而把变量看作在整个系统中是均一的,仅用于单方向振动的研究,建模方法比较简单。对于驾驶员,振动响应特性主要受竖直方向振动的影响,故本研究采用集总参数模型法建立坐姿下人体七自由度模型。国内外学者对人体振动特性进行了多方面的研究。Boileav P E 和 Kakheja S 于 1998 年通过臀部表观质量确定了生物动力学模型的基本参数<sup>[11]</sup>。Nawayseh N 等于 2005 年针对表观质量和传递特性建立了非线性人体模型<sup>[12]</sup>。Cho-Chung LIANG 等于 2007 年建立了垂直振动坐姿下人体 14 自由度模型<sup>[13]</sup>。路长德等于 2008 年通过 Adams/LifeMode 软件建立了坐姿人体-座椅系统的生物力学模型<sup>[14]</sup>。张鄂等于 2010 年依据人一车一路系统间的相互作用和多体动力学原理,建立了 9 自由度汽车乘坐动力学模型<sup>[15-16]</sup>。这些模型的构建为人体振动特性的研究提供了重要的参考依据。动态环境下,通过汽车座椅传入人体臀部和通过车体底板传入人体下肢(脚腿)的振动均会影响人体振动响应特性,因此需要全面考虑这些因素。本研究考虑人体臀部和下肢传入振动等因素的影响,构建了垂直振动条件下 7 自由度坐姿人体模型,对人体头部振动特性进行了相应分析,结合近红外光谱法无创检测脑部组织血氧参量<sup>[17-18]</sup>,分析了不同振动频率下脑氧参数响应特性,验证所建模型的精确性。

## 1 坐姿下人体七自由度模型的建立

人体可等效为一个由质量、弹簧、阻尼组成的多自由度振动系统,对于人车界面中的坐姿人体,可分为头部、上躯干、内脏器官、下躯干、臀部、左下肢、右下肢 7 个部分。本研究中不考虑水平、侧向振动的

影响,将人体简化为如图 1 所示的 7 自由度垂直振动模型。该模型的动力学参数主要有以下几个: $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7$  分别表示人体头部、上躯干、内脏器官、下躯干、臀部、左下肢、右下肢的质量,单位为 kg; $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{50}, k_6, k_7, k_{23}$  分别表示上述人体各部分的刚度,单位为 kN/m; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_{50}, c_6, c_7, c_{23}$  分别表示上述人体各部分的阻尼,单位为 N·s/m; $z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7$  分别表示人体各部分重心的位移,单位为 m; $z_0$  表示车体输入的位移激励,单位为 m, $m_0$  表示座椅的质量,单位为 kg。

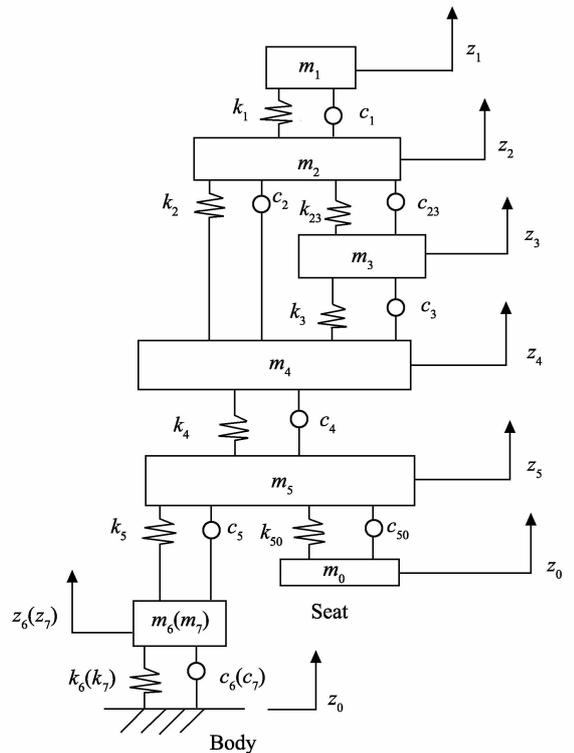


图 1 7 自由度模型

Fig. 1 The 7 DOF model of human body under vertical vibration

由牛顿第二定律得 7 自由度人体模型的振动方程为

$$[M][\ddot{Z}] + [C][\dot{Z}] + [K][Z] = [B][Q]. \quad (1)$$

为便于计算,设人体左、右下肢的质量、刚度、阻尼均相等,即  $m_6 = m_7, k_6 = k_7, c_6 = c_7$ 。对式(1)进行拉氏变换可得

$$S^2[M][Z(s)] + S[C][Z(s)] + [K][Z(s)] = [B] \begin{bmatrix} 1 \\ S \end{bmatrix} Z_0(s), \quad (2)$$

整理得

$$\{S^2[M] + S[C] + [K]\}[Z(s)] = [B] \begin{bmatrix} 1 \\ S \end{bmatrix} Z_0(s). \quad (3)$$

令

$$[A] = S^2[M] + S[C] + [K],$$

则

$$[A]Z(s) = [B] \begin{bmatrix} 1 \\ S \end{bmatrix} Z_0(s).$$

人体响应的传递函数表达式为

$$H(s) = [H_1(s), H_2(s), H_3(s), H_4(s), H_5(s), H_6(s)]^T = [A]^{-1}[B] \begin{bmatrix} 1 \\ S \end{bmatrix}.$$

即

$$STH = \frac{Z(s)}{Z_0(s)} = [A]^{-1}[B] \begin{bmatrix} 1 \\ S \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中,  $H_1(s), H_2(s), \dots, H_6(s)$  分别为车体-人体头部、车体-上躯干、车体-内脏器官、车体-下躯干、车体-臀部、车体-左下肢、车体-右下肢等人体各部分的传递函数。对于车体-人体头部传递函数  $H_1(s)$  的表达式为

$$H_1(s) = \frac{Z_1(s)}{Z_0(s)}. \quad (5)$$

## 2 坐姿下人体模型动力学参数识别

### 2.1 振动试验数据

国外研究者曾对人体振动特性进行了大量的实验研究,人体在垂直振动环境下的头-座椅传递函数值(STH)可见表1中头-座椅传递函数实验值部分<sup>[7]</sup>。

表1 各频率垂直振动下头-座椅传递函数实验值与理论值  
Table 1 Experimental and theoretical STH values of human vertical vibration

频率/Hz	头-座椅传递函数实验值	头-座椅传递函数理论值
0.50	1.01	1.00
0.63	1.01	1.01
0.80	1.01	1.01
1.00	1.02	1.02
1.25	1.03	1.02
1.60	1.06	1.04
2.00	1.08	1.08
2.50	1.10	1.13
3.50	1.16	1.31
4.00	1.29	1.41
5.00	1.45	1.46
6.30	1.23	1.10

表1中实验数据的适用条件:(1)垂直振动条件下无背靠支持;(2)脚部有支撑且受到振动激励;(3)仅考虑竖直方向的振动;(4)振动激励为随机振

动或者正弦信号,激励幅值小于  $5 \text{ m/s}^2$ 。

### 2.2 振动参数的识别

由表1中人体振动特性的实验数据,利用最小二乘系统辨识法对图1中人体振动模型的参数进行识别,识别时设定优化目标函数是使表1中各频率下参量STH的理论计算值与其试验值之差的平方和为最小,即

$$\min F = \sum_{i=1}^n [ |H(s_i)| - H_0(s_i) ]^2. \quad (6)$$

式中,  $H_0(s)$  为表1所示的为各角频率下STH的实验值;  $i$  为表1中12个频率的序号,即  $i = 1, 2, \dots, 12$ ;  $H(s)$  为式(4)所表达的STH在各角频率下的理论计算值;为简化参数识别过程,人体各部分质量的约束参照国标GB/T 17245-2004成年人人体惯性参数,人体各部分刚度和阻尼的约束为

$$110 \leq c_i \leq 950 (\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1});$$

$$10 \leq k_i \leq 200 (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}), i = 1, 2, \dots, 7.$$

整个参数识别过程是运用MATLAB优化工具箱来完成的,参数识别结果见表2。

表2 人体模型动力学参数  
Table 2 Human dynamic parameters

编号	刚度 $k/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	阻尼 $c/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
1	134.50	245.00
2	191.50	910.00
3	20.50	320.00
4	83.95	160.00
5	65.00	112.00
6	11.00	120.00
23	10.00	195.00
50	30.00	200.00

将表2中的参数代入式(4)中可得人体振动头-座椅传递函数理论值(STH),为与实验值进行比较分析,将理论值也列在表1中,见表1中理论值部分。

通过分析发现理论数据与实验数据的相关性系数为0.91,为更加形象地描述理论值与实验值的吻合程度,检验参数识别结果的合理性,得STH值理论曲线与实验曲线的对比图,见图2。

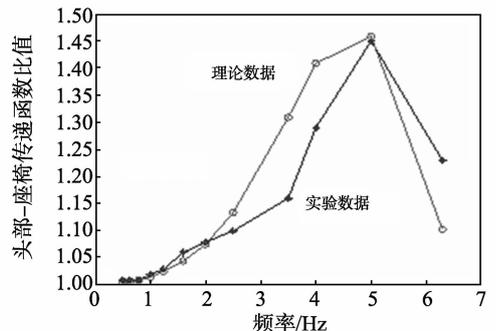


图2 STH理论曲线与实验曲线的对比图

Fig.2 The comparison curve of experimental and theoretical data

### 3 不同振动条件下脑氧参数响应特性分析

#### 3.1 实验仪器

本研究使用清华大学研制的近红外组织血氧参数无损检测仪(TSAH-100型),该仪器使用双波长(760 nm和850 nm)和双检测器的近红外光谱技术,采用反射型探头测出血氧饱和度的绝对值,以及其中总血红蛋白、氧合血红蛋白和还原血红蛋白的浓度相对其初始值的变化量(单位为 $\mu\text{mol/L}$ ),该仪器能检测到的各脑氧参数浓度变化范围在 $-30 \sim 30 \mu\text{mol/L}$ 之间,精确度为 $0.0001 \mu\text{mol/L}$ 。实验随机招募10名健康青年人(平均年龄为 $22 \pm 2$ 岁)参与实验。实验选择在每天上午8:00进行,以避免时差因素影响,确保样本之间的可比性。试验前试验对象保证充足的睡眠和正常的精神状态,避免烟、酒、茶和咖啡等任何刺激性的食物和药物。实验时间为30 min,实验对象以舒适坐姿坐在振动实验台驾驶席上。本研究所用实验台如图3所示,主要由实车模型(桑塔纳2000)、液压伺服系统和控制系统(计算机)3部分组成。试验过程主要通过计算机界面输入特定的频率、振幅、加速度等参变量,通过相关软件系统来控制液压伺服系统,通过液压缸的升降运动来实现汽车运动过程中的俯仰、侧倾等动

作,以及路面平整度的模拟,可实现频率从1 Hz到10 Hz、振幅从10 mm到50 mm的振动模拟实验。



图3 振动实验台  
Fig. 3 Vibration test bed

#### 3.2 数据处理

前10 min实验台不振动,中间10 min实验台以一定频率振动,最后10 min实验台停止振动。在30 min内始终使用血氧检测仪检测并记录头部组织血氧参数。仪器主要记录4个血氧参量:(1)还原血红蛋白浓度变化 $C_{\text{Hb}}$ ,单位为 $\mu\text{mol/L}$ ;(2)氧合血红蛋白浓度变化 $C_{\text{HbO}_2}$ ,单位为 $\mu\text{mol/L}$ ;(3)总血红蛋白浓度变化 $C_{\text{tHb}}$ ,单位为 $\mu\text{mol/L}$ ;(4)组织氧饱和度TOI。

利用社会科学统计软件包SPSS version 15.0对所测脑部组织血氧参数进行方差分析计算,得出各频率振动前后各血氧参数的变化显著性水平,见表3。

表3 各血氧参数变化的显著性水平比较  
Table 3 Significant levels of all oxygen parameters

频率/ Hz	$C_{\text{Hb}}$ 变化显著水平 $P$		$C_{\text{HbO}_2}$ 变化显著水平 $P$		$C_{\text{tHb}}$ 变化显著水平 $P$		TOI变化显著水平 $P$	
	振前第 10 min与 加振第 15 min均 值比较	加振第 20 min与 振后第 25 min均 值比较						
1	0.037 109	0.049 828	0.049 911	0.041 913	0.035 642	0.045 134	0.836 071	0.858 869
3	0.031 188	0.047 438	0.035 622	0.039 414	0.021 615	0.035 129	0.227 245	0.954 708
5	0.024 683	0.041 879	0.010 978	0.021 320	0.016 884	0.033 715	0.796 521	0.077 285
6	0.036 864	0.045 842	0.024 315	0.035 483	0.024 525	0.035 431	0.548 435	0.772 688

通过对实验数据的分析发现,在各个频率的振动实验中,加振前后脑组织血氧参数浓度 $C_{\text{Hb}}$ 、 $C_{\text{HbO}_2}$ 都有显著性变化( $P < 0.05$ )。通过比较发现,在5 Hz振动实验中,各血氧参数浓度变化最为明显,尤其是代表脑组织输氧能力的 $C_{\text{HbO}_2}$ 变化最为显著,在加振前后的显著性水平 $P$ 分别达到0.011和0.021,明显小于1 Hz和3 Hz振动实验中 $C_{\text{HbO}_2}$ 变化的显著性水平。

### 4 讨论

(1) 通过对实验数据与理论数据相关性分析( $R = 0.91$ )得出基于传递函数STH值所建立的坐姿人体7自由度垂直振动模型具有较高的精确度,能有效地描述振动环境下人体头部振动响应特性。

(2) 通过不同振动频率下人体脑氧参数响应特

性分析可知,随着振动的施加,一方面受试者头部受到振动的刺激,脑组织耗氧量会增加,另一方面头部的振动会阻碍人体血液向头部的流动,最终会造成脑组织缺血缺氧,从而易产生驾驶疲劳,由 1 Hz、3 Hz、5 Hz、6 Hz 振动对脑氧参数影响显著性水平可以知道 5 Hz 频率振动下对人体脑氧参数影响最为显著,说明该频率对脑部的刺激最大,容易造成脑部组织缺血缺氧,因而容易产生疲劳,即在 5 Hz 时驾驶员最容易发生驾驶疲劳。

(3) 通过人体坐姿下动力学参数的辨识,得出 1~6 Hz 振动频率下振动从座椅传递到头部的强弱情况,而在不同强弱振动刺激作用下,人体脑部响应会不同,主要反应在脑组织氧含量变化不同。将两者结合起来研究,一方面揭示脑氧参数随振动频率的变化情况;另一方面可为人体坐姿下动力学模型优化提供理论依据,力求使人体在坐姿振动环境下达到最舒适状态,如在 5 Hz 时振动向头部有一个最大的传递,而人体头部脑氧参数在 5 Hz 频率振动下变化也最为显著,因此在汽车振动隔离系统的设计时应尽量隔离 5 Hz 频率段的振动。

#### 参考文献:

- [1] 张济民,胡用生,陆正刚. 轨道车辆运行过程中人体振动仿真研究[J]. 振动与冲击,2007,26(10):76-80.  
ZHANG Jiming, HU Yongsheng, LU Zhenggang. Vibration simulation of human body on running railway vehicle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(1):76-80.
- [2] 汤小红,杨岳,彭波. 铁路卧铺客车人体振动舒适性建模与仿真[J]. 振动与冲击,2010,5(29):157-161.  
TANG Xiaohong, YANG Yue, PENG Bo. Modeling and simulation of vibration comfort of human body in a railway sleeper carriage [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 5(29):157-161.
- [3] 单丽岩,侯相深,马松林. 行车舒适性路面不平度评价标准[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,6(40):935-938.  
SHAN Liyan, HONG Xiangshen, MA Songlin. Evaluation standard of pavement roughness based on ride comfort [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 6(40):935-938.
- [4] WILDER D, WOODWORTH B B, FRYMOYER J W, et al. Vibration and the human spine [J]. Spine, 1982(7):243-254.
- [5] 段振伟,景国勋,杨书召. 基于安全人机工程学的驾驶疲劳因素及其产生机理分析[J]. 河南理工大学学报,2008,27(1):21-27  
DUAN Zhenwei, JING Guoxun, YANG Shuzhao. Analysis of driving fatigue factors and mechanism based on safety ergonomics [J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2008, 27(1):21-27.
- [6] 李增勇,代世勋,张小印,等. 驾驶员疲劳状态下脑氧饱和度的近红外光谱法检测及其分析[J]. 光谱学与光谱分析,2010,1(30):58-61.  
LI Zengyong, DAI Shixun, ZHANG Xiaoyin, et al. Assessment of cerebral oxygen saturation using near infrared spectroscopy under driver fatigue state [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 1(30):58-61.
- [7] LIANG C C, CHIANG C F. A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2006(36):869-890.
- [8] KIM T H, KIM Y T, YOON Y S. Development of a biomechanical model of the human body in a sitting posture with vibration transmissibility in the vertical direction [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005(35):817-829.
- [9] MARIANA A, SIMONA R. Study of human body stability under the vertical vibration action into an autovehicle using Laplace transforms [J], PAMM, 2007, 7(1):4020001-4020002.
- [10] MOSTAFA A M, ABDEEN W A. Analytic investigation and numeric prediction for biodynamic response of the seated human body [J]. Journal of American Science, 2010, 6(11):161-165.
- [11] BOILEAU P E, RAKHEJA S. Whole-body vertical biodynamic response characteristics of the seated vehicle driver Measurement and model development [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1998(22):449-472.
- [12] NAWAYSEH N, GRIFFIN M J. Non-linear dual-axis biodynamic response to fore-and-aft whole-body vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005(282):831-862.
- [13] LIANG C C, CHIANG C F. Modeling of a seated human body exposed to vertical vibrations in various automotive postures [J]. Industrial Health, 2008, 46(2):125-137.
- [14] 李晓玲,张鄂,陆长德. 人体生物力学模型的驾驶舒适度仿真研究[J]. 西安交通大学学报,2008,42(5):556-560.  
LI Xiaoling, ZHANG E, LU Changde. Biomechanical model of human Simulation for driving comfort [J], Xi'an Jiaotong University Journal, 2008, 42(5):556-560.
- [15] 张鄂,许林安,刘中华,等. 多自由度人体上体系统动力学建模与振动特性研究[J]. 工程设计学报,2008,15(4):244-249.

- LI Siwen, YU Hong, ZHANG Xin. Simultaneous determination of trifluoromethanesulfonate, tetrafluoroborate and common inorganic anion by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2010, 38(11):1665-1669.
- [19] 周旭,王金平,崔成来,等. 非抑制离子色谱法测定炼油厂脱硫液中N-甲基二乙醇胺[J]. 石油炼制与化工, 2011, 42(6):88-92.
- ZHOU Xu, WANG Jinping, CUI Chenglai, et al. Determination of N-methyldiethanolamine in refinery desulfurized liquid by ion-exchange chromatography with non-suppressed conductivity detection[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2011, 42(6):88-92.
- [20] 傅彤,刘庆生,范志影,等. 应用离子色谱测定青贮饲料中有机酸含量的研究[J]. 中国畜牧兽医, 2005, 32(5):16-17.
- FU Tong, LIU Qingsheng, FAN Zhiying, et al. Research of the application of ion chromatography in the determination of organic acids content in ensilage[J]. Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2005, 32(5):16-17.
- [21] 严全鸿,钟新林. 离子色谱法测定帕米膦酸二钠注射液的含量[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(1):48-49, 66.
- YAN Quanhong, ZHONG Xinlin. Determination of pamidronate disodium injection by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2009, 19(1):48-49, 66.
- [22] 傅厚曦,周姣. 离子色谱法分析布洛芬片剂中的布洛芬含量[J]. 分析化学, 2001, 29(7):788-789.
- FU Houtun, ZHOU Jiao. Determination of Brufen in Brufen Troche by high performance ion chromatography[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2001, 29(7):788-789.
- [23] 周海云. 离子色谱法分析盐酸头孢吡肟成品中的N-甲基吡咯烷[J]. 色谱, 2003, 21(2):184-186.
- ZHOU Haiyun. Analysis of N-methylpyrrolidine in cefepime hydrochloride product by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2003, 21(2):184-186.
- [24] 杨绍美,陆建平,曹家兴,等. 离子色谱同时测定中草药中磷硫含量[J]. 分析试验室, 2011, 30(7):119-122.
- YANG Shaomei, LU Jianping, CAO Jiaying, et al. Simultaneous determination of sulfur and phosphorus contents in traditional Chinese herbal medicine by ion-exchange chromatography[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2011, 30(7):119-122.
- [25] 张维森,许启荣,江朝强,等. 离子色谱法测定尿碘及其在流行病学调查研究中的应用[J]. 南方医科大学学报, 2007, 27(3):286-289.
- ZHANG Weisen, XU Qirong, JIANG Chaoqiang, et al. Epidemiological application of ion chromatography for urinary iodine monitoring[J]. Journal of Southern Medical University, 2007, 27(3):286-289.
- [26] 周政华,杨元,洪君蓉,等. 固相萃取-离子色谱-积分脉冲安培法测定人血清中游离氨基酸[J]. 分析化学, 2007, 35(7):1063-1066.
- ZHOU Zhenghua, YANG Yuan, HONG Junrong, et al. Determination of free amino acids in human serum using solid phase extraction followed by anion-exchange chromatography with integrated pulsed amperometric detection[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2007, 35(7):1063-1066.
- [27] 朱岩. 离子色谱原理及其应用[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2002:1-2.

(编辑:胡春霞)

(上接第107页)

- ZHANG E, XU Lin'an, LIU Zhonghua, et al. Study on multi-DOF human upper body system dynamics modeling and vibration characteristics[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(4):244-249.
- [16] 张鄂,刘中华,邵晓春. 九自由度乘坐动力学模型的人体振动特性仿真[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4):58-64.
- ZHANG E, LIU Zhonghua, SHAO Xiaochun. Dynamic simulation of nine DOF model of seated human in vibration[J]. Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4):58-64.
- [17] 张亮亮,李建平,王岩,等. 汽车驾驶员脑氧参数的振动响应特性分析[J]. 山东大学学报:工学版, 2011, 41(1):91-94.
- ZHANG Liangliang, LI Jianping, WANG Yan, et al. Assessment of cerebral oxygenation response to vibration in drivers[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41(1):91-94.
- [18] 代世勋. 汽车驾驶疲劳的近红外光谱法检测与分析[D]. 济南:山东大学机械工程学院, 2009.
- DAI Shixun. Study on the methods for driver fatigue detection based on INRS[D]. Jinan: School of Mechanical Engineering Shandong University, 2009.

(编辑:孙培芹)