

汽车人机界面人体上肢位姿建模与优化研究

张鄂, 洪军, 李彦山, 刘明利

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对汽车人机操控界面设计的匹配分析需要, 构建了一种用于人机操控界面设计分析的 5 自由度人体上肢运动模型, 来模拟人体上肢运动并计算掌心的位姿. 以人体上肢动作位姿舒适为优化目标, 建立了人体上肢舒适操作的优化模型, 通过求解能够获得人体上肢舒适操作的最优位姿. 仿真结果表明, 优化模型合理、实用, 以汽车驾驶舱中换挡杆布局设计为应用实例, 通过优化模型求得了相应的舒适位姿和舒适度曲线图. 研究结果可为汽车人机操控界面设计的合理匹配提供优化分析.

关键词: 汽车人机界面; 上肢; 位姿建模; 优化模型

中图分类号: TB18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0546-05

Optimal Design and Pose Modeling of Automobile Man-Machine Interface

ZHANG E, HONG Jun, LI Yanshan, LIU Mingli

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on the matching requirements of automobile man-machine interface devising, a 5-degree of freedom man upper arm movement model is established at automobile man-machine driving interface to simulate man upper arm movement and calculate palm center pose. Taking the man upper arm pose as a comfortable target, the optimal upper arm comfortable driving model is established. The model is verified reasonably and practically by simulation. Setting layout of gear lever in mobile driver cabin as an applied example, the corresponding optimal pose and optimal curve are obtained to provide a reference for the design of automobile man-machine driving interface.

Keywords: automobile man-machine interface; upper arm; pose modeling; optimal model

汽车人机界面设计的合理与否, 不仅影响驾驶员的操作舒适性和工作效率, 而且还会引起驾驶员的人体疲劳和疾病, 严重的甚至引起交通事故. 因此, 汽车人机界面设计的合理匹配研究已成为国内外人机工程学研究的一个重要课题. 在汽车人机界面中, 各种操控元件(如驾驶舱的方向盘、操纵杆等)的设计都直接决定了人体的操作姿态, 而不同的操作姿态又直接关系(影响)驾驶员的操作舒适性、工作效率和驾驶疲劳, 因而实现人机界面设计的优化(合理)匹配就极为重要. 为此, 需要研究人机界面中的人体上肢位姿模型和最佳操作区域, 以期为人

车人机操控界面的优化设计与分析提供技术支持.

1 人体上肢运动建模

由人体解剖学^[1]可知, 人体上肢的运动主要由肩关节、肘关节和腕关节的相对运动来实现. 依据人体上肢的驾驶动作分析和机器人机构学原理^[2], 可将人体上肢系统简化为由 3 个连杆(上臂、前臂和手腕)组成的铰链机构. 可用上臂水平屈伸、上臂侧举、上臂旋转、前臂弯曲和手腕弯曲(见图 1)表达的 5 自由度来建立人体上肢运动模型. 若以 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 分别代表 5 自由度, 则通过这些自由度

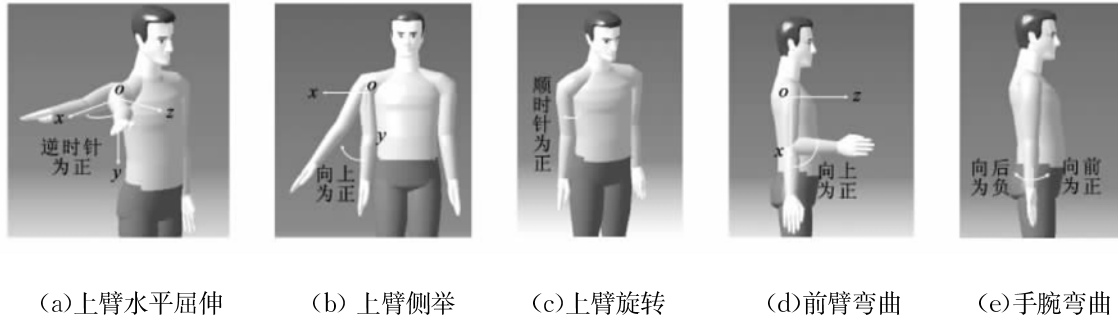


图1 人体上肢5自由度动作

动作就可实现人体上肢对操作域空间目标(操控元件)的拾取(操作). 其中, $A_1 \sim A_3$ 的动作可以实现肩部球面副运动, A_4 动作可实现肘部手臂的运动, A_5 动作可实现腕部手掌的运动.

根据机器人机构学及其回转变换矩阵原理^[2], 以人体肩部球窝关节中心为坐标原点, 取人体上肢运动空间坐标系(见图2), 其中坐标系 $o_0x_0y_0z_0$ 为基础坐标系, $o_1x_1y_1z_1 \sim o_5x_5y_5z_5$ 为各局部坐标系; 坐标原点 o_0, o_1, o_2 重合在肩关节处, o_3 建立在肘关节上, o_4 建立在腕关节上, o_5 建立在掌心上; l_1, l_2, l_3 分别代表人体上臂长、前臂长和掌心距. 根据图2所示的坐标系, 采用 4×4 阶位姿矩阵 Q_i 表示初始位置时坐标系 $o_ix_iy_iz_i$ 在坐标系 $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ 中的位姿, 则在图2初始位置时可以得到相应的 4×4 阶位姿矩阵 $Q_1 \sim Q_5$. 从生理学知识及人体的实际动作姿态考虑, 本文规定肘关节在 $x_3o_3z_3$ 平面内与 x_3o_3 轴呈 45° , 其向量为 $O_3N = [2^{1/2}/2 \ 0 \ 2^{1/2}/2]$. 设 $A_1 \sim A_5$ 绕 y_0, z_1, y_2, z_3, z_4 的转动角度依次为 $\theta_1 \sim \theta_5$, 依据变换矩阵原理, 即可得到5自由度上

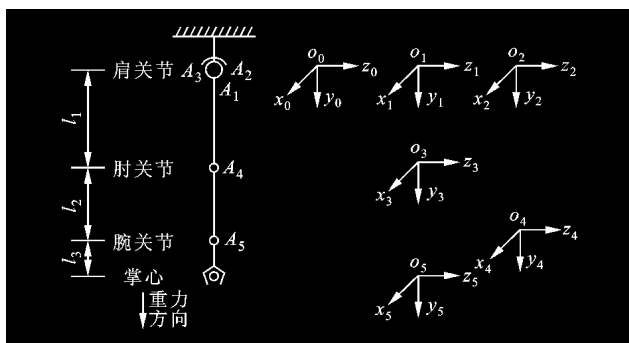


图2 人体上肢运动模型坐标系

肢动作的相应回转变换矩阵 $T_1 \sim T_5$. 上肢关节转动后的相应坐标系 $o_ix_iy_iz_i$ 在 $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ 中的位姿矩阵 P_i 可表示为 $P_i = T_i \times Q_i$, 故可得到手部掌心相对于基础坐标系的位姿矩阵

$$T = T_1 \times Q_1 \times T_2 \times Q_2 \times T_3 \times Q_3 \times T_4 \times$$

$$Q_4 \times T_5 \times Q_5 \quad (1)$$

$$T = [n \ o \ a \ p] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: n, o, a 分别表示掌心位置矢量的位姿; p 代表从基础坐标系原点指向掌心的矢量.

2 人体上肢舒适操作的优化模型

人体上肢动作实验表明, 不同的动作姿态会使人体有着不同的舒适感受. 目前, 有关人体姿势的准则已有较为深入的研究, 如 OWAS、NIOSH、RULA 等准则^[3-5], 都已成为产品设备设计的依据. 然而, 传统人机工程学研究大多以经验数据为依据, 并且很少考虑生物力学的影响. 为此, 文献^[6-8]在对 RULA 准则细化研究和人体上肢动作疲劳与静态施力研究的基础上, 得出肌肉的酸痛感与肌肉的收缩有关, 这种持续性肌肉紧张会使肌肉的张力(硬度)提高. 通过对人体上肢不同动作姿态所引起人体主要肌群肌肉硬度的测定, 得出上臂水平屈伸、上臂侧举、上臂旋转、前臂弯曲、手腕弯曲等分支动作的舒适曲线(见图3)及其评分函数

$$f_1(\theta_1) = -0.000\ 001\ 233\ 8\theta_1^3 + 0.000\ 803\ 885\ 2\theta_1^2 - 0.061\ 632\ 732\ 1\theta_1 + 1.461\ 45 \quad (3)$$

$$f_2(\theta_2) = 0.000\ 003\ 342\ 2\theta_2^3 - 0.001\ 111\ 767\ 1\theta_2^2 + 0.142\ 122\ 77\theta_2 + 1.398\ 54 \quad (4)$$

$$f_3(\theta_3) = 0.000\ 005\ 803\ 3\theta_3^3 + 0.001\ 484\ 465\theta_3^2 + 0.046\ 862\ 098\theta_3 + 0.4177 \quad (5)$$

$$f_4(\theta_4) = 0.000\ 001\ 144\ 11\theta_4^3 + 0.000\ 035\ 190\ 1\theta_4^2 - 0.003\ 194\ 36\theta_4 + 2.188\ 8 \quad (6)$$

$$f_5(\theta_5) = 0.000\ 010\ 61\theta_5^3 + 0.001\ 696\ 23\theta_5^2 - 0.005\ 510\ 86\theta_5 + 0.29\ 228 \quad (7)$$

由于人体上肢手部在操作(拾取)某个操控元件时, 任意动作的姿态均对应着5自由度的角度, 因此上

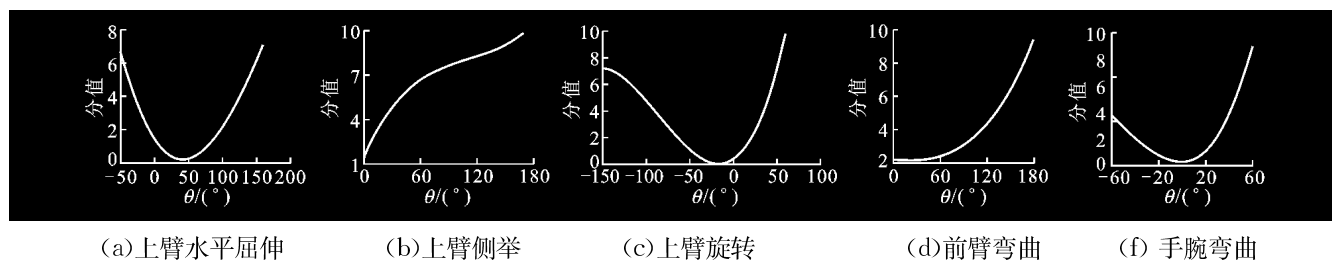


图3 上肢动作的舒适性曲线

肢操作(拾取)该操控元件时的动作舒适度实质上是对5自由度舒适性的综合评价。上肢动作的舒适度可表示为

$$S = w_1 f_1(\theta_1) + w_2 f_2(\theta_2) + w_3 f_3(\theta_3) + w_4 f_4(\theta_4) + w_5 f_5(\theta_5) \quad (8)$$

$$w_1 = 0.14, w_2 = 0.65, w_3 = 0.13$$

$$w_4 = 0.06, w_5 = 0.02$$

式中: $w_1 \sim w_5$ 分别为5自由度舒适性的权重系数。

依据 RULA 准则^[5], S 的分值越低表示对应动作的舒适度愈好。因此, S 可作为位姿优化的追求目标。考虑到驾驶操作时, 人体上肢各关节的一般动作范围的限制, 得到人体上肢舒适操作的优化模型为

$$\min S = f(x) = w_1 f_1(\theta_1) + w_2 f_2(\theta_2) + w_3 f_3(\theta_3) + w_4 f_4(\theta_4) + w_5 f_5(\theta_5)$$

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)^T$$

$$\text{s. t. } h_1(x) = M_1(x) - p(x) = 0$$

$$h_2(x) = M_1(y) - p(y) = 0$$

$$h_3(x) = M_1(z) - p(z) = 0$$

$$h_4(x) = M_1(y) - l_1 \cos \theta_2 - (l_2 + l_3) \cos(\theta_2 + \theta_4) = 0$$

$$g_1(\theta_1) = -45^\circ - \theta_1 \leq 0 \quad g_2(\theta_1) = \theta_1 - 90^\circ \leq 0$$

$$g_3(\theta_2) = 0 - \theta_2 \leq 0 \quad g_4(\theta_2) = \theta_2 - 90^\circ \leq 0$$

$$g_5(\theta_4) = -90^\circ - \theta_3 \leq 0 \quad g_6(\theta_3) = \theta_3 - 70^\circ \leq 0$$

$$g_7(\theta_4) = 0 - \theta_4 \leq 0 \quad g_8(\theta_4) = \theta_4 - 180^\circ \leq 0$$

$$g_9(\theta_5) = -60^\circ - \theta_5 \leq 0 \quad g_{10}(\theta_5) = \theta_5 - 60^\circ \leq 0 \quad (9)$$

式中: $M_1(x)$ 、 $M_1(y)$ 、 $M_1(z)$ 及 p_x 、 p_y 、 p_z 分别表示人体上肢所操作的操控元件以及上肢掌心在基础坐标系 x 、 y 、 z 轴上的坐标分量; $g_1 \sim g_{10}$ 为约束条件。

3 人机操控界面换挡杆位置的布置

3.1 上肢舒适操作优化模型的验证

为验证上肢舒适优化模型的正确性, 分别采用所建立的舒适优化模型和 CATIA 系统中的人机仿

真分析模块, 对上肢操作的舒适性进行评价, 通过对比两者评价结果来验证舒适优化模型的正确性。

3.1.1 汽车换挡杆操作舒适性的评价分析 首先, 在上肢基础坐标系内任意取出汽车操控界面中换挡杆布局的5个位置点(坐标的单位为 mm): $D_1(230, 430, 270)$; $D_2(250, 300, 330)$; $D_3(330, 350, 360)$; $D_4(230, 260, 420)$; $D_5(500, 220, 260)$, 通过式(9)对操作换挡杆的上肢位姿进行优化求解, 结果见表1。然后, 将本课题组研制的汽车乘驾实验台的可调乘驾环境^[9]导入 CATIA 系统, 并将乘驾环境中的换挡杆握取(操作)点置于上述5个位置点。以我国50百分位男性人体模型(GB10000-88)对优化出的各动作角度操作换挡杆, 对其进行 RULA 评分来评价其操作的舒适性。由表1可见, CATIA 评价结果与优化求解得出的舒适度趋势基本一致。

3.1.2 上臂屈伸动作的舒适性分析 图4为分别采用优化模型式(9)和 CATIA 系统方法对人体上臂屈伸动作进行分析的结果。其中, 图4a、4b为50

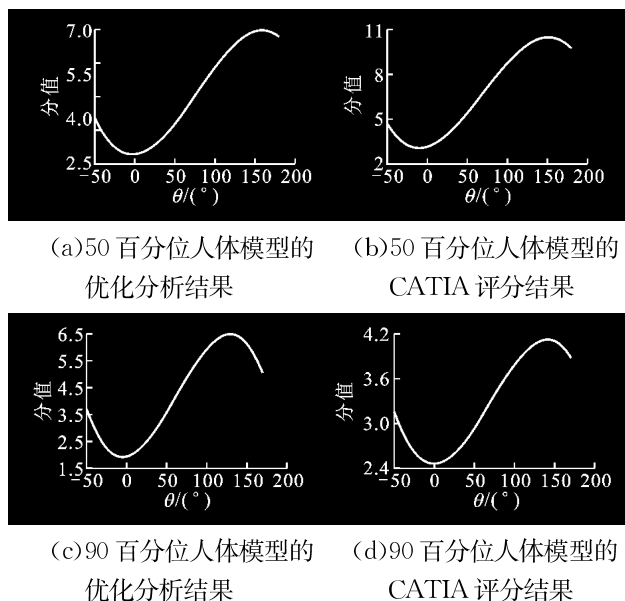


图4 人体上臂屈伸动作的舒适度曲线

百分位男性人体模型的分析结果, 图4c、4d为90百分位男性人体模型的分析结果。由图可见, 2种方法所得出的舒适度评价结果趋势基本一致, 曲线的

表1 换挡杆操控舒适性的评价分析结果

位置 点	CATIA 仿真评价										各动作优化角度 $\theta_i^*/(^{\circ})$					S
	上臂	前臂	腕部	手腕 扭转	A组	颈部	躯干	腿部	B组	总分	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	
D_1	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	-0.14	22.3	50.3	62.2	21.6	3.95
D_2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	3	6.30	34.3	51.9	77.8	26.3	4.66
D_3	2	2	2	1	2	1	2	1	2	3	30.80	59.5	6.4	37.5	45.0	4.64
D_4	2	3	2	1	4	1	2	1	2	4	23.00	59.8	28.1	71.9	41.0	5.01
D_5	3	2	2	1	5	1	3	1	2	5	15.40	75.5	-6.8	34.2	45.0	5.03

谷底及峰顶位置基本相同. 上述验证研究证明所建立的上肢动作优化模型合理且实用.

3.2 汽车换挡杆位置布置的优化研究

文献[10]的研究是将换挡杆握取点在上肢基础坐标系中的布局可行域(见图5)定义为

$180\text{ mm}\leq M_1(x)\leq 380\text{ mm}; 190\text{ mm}\leq M_1(y)\leq 480\text{ mm}; 180\text{ mm}\leq M_1(z)\leq 380\text{ mm}$

应用优化模型对人体上肢进行换挡杆舒适操作的最优位姿求解,采用 MATLAB 中的 constr 约束功能函数进行求解,优化结果得出的换挡杆最佳布局点为(210,380,280). 图6和图7是以50百分位男性成年人体数据进行上肢位姿舒适度的优化求解,可为汽车人机操控界面设计的合理匹配提供优化分析依据.

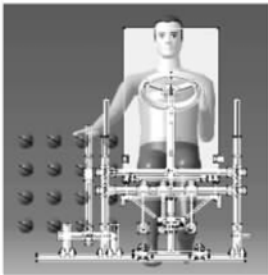


图5 换挡杆握取点的布局可行域示意图

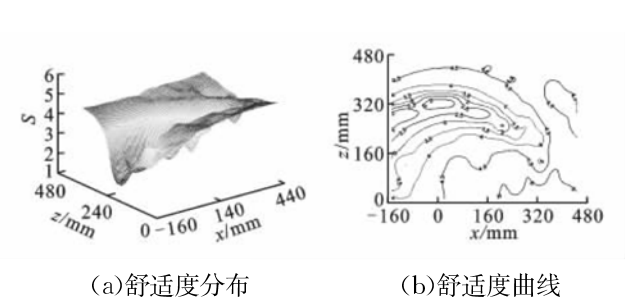
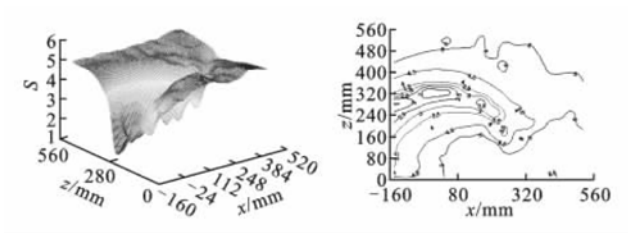


图6 平面布局内的舒适度分布曲线($y=380\text{ mm}$)



(a)舒适度分布 (b)舒适度曲线
图7 平面布局内的舒适度分布曲线($y=260\text{ mm}$)

4 结 论

- (1)本文构建出的5自由度人体上肢运动模型,能够模拟人体上肢运动并能计算掌心的位姿.
- (2)本文建立的人体上肢舒适操作的优化模型,能够求解人体上肢舒适操作的最优位姿. 仿真分析表明,所建的优化模型合理、实用.
- (3)汽车换挡杆布局设计的实例优化表明,求出的舒适位姿及舒适度曲线可为汽车人机操控界面设计的优化匹配提供分析依据,对提高汽车人机操控界面设计的宜人性和人机工效具有重要技术意义.

参考文献:

[1] 于葆. 运动解剖学、运动医学大辞典[M]. 北京:人民体育出版社,2000:53-61.

[2] 马香峰. 机器人机构学[M]. 北京:机械工业出版社,1991:121-134.

[3] HEINSALMI P. Method to measure working posture loads at working site (OWAS)[C]// The Ergonomics of Working Postures. London, UK: Taylor & Francis, 1986: 100-104.

[4] DEMPSEY P G. Usability of the revised NIOSH lifting equation[J]. Ergonomics,2002, 45(12): 817-828.

[5] MCATAMNEY L,CORLETT E N. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper

- limb[J]. *Applied Ergonomics*, 1993, 24(2): 91-99.
- [6] HAN Xiuli, HONG Jun, TI Zhaoyao, et al. Biomechanics-based evaluating criteria on the ergonomic performance in vehicle driving[C]// The 16th CIRP International Design Seminar. Kananaskis, Canada: University Press of Calgary, 2006: 531-535.
- [7] 提召尧. 基于生物力学的车辆操控人机评价准则研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院, 2006.
- [8] 韩秀丽. 基于生物力学的人体静态操作评分准则研究[D]. 西安:西安交通大学机械工程学院, 2007.
- [9] 张鄂,洪军,梁建,等. 汽车乘驾体位生物力学实验台的设计分析[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5): 531-535.
- ZHANG E, HONG Jun, LIANG Jian, et al. Design and analysis of test stand for biomechanics of man-machine interface in automobile driving [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(5): 531-535.
- [10] 宋正河. 机械系统人机界面优化设计方法的研究[D]. 北京:中国农业大学机械工程学院, 2000.
- (编辑 管咏梅)