

# 交互操作行为驱动的手机产品人机工程设计

刘肖健<sup>1</sup>, 孙守迁<sup>1</sup>, 骆磊<sup>2</sup>, 李桂琴<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 现代工业设计研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072;  
3. 上海大学 CIMS 和机器人中心, 上海 200072)

**摘要:** 针对有复杂交互操作行为需求的手机产品, 研究了利用交互操作行为对产品形态进行驱动设计的方法。细致分解了手机的人机交互过程, 对持握和按键两个关键的操作行为进行了实验研究和实测数据的统计分析, 获得了手机在掌中的定位特征, 以及多键按键操作的综合舒适度和准确率的评价指标, 并计算了相关的影响参数。基于编码表达式建立了手机产品的设计模型, 利用遗传算法原理编写了手机设计方案的求解算法, 通过问题构建、自动求解和交互求解三个过程在方案解空间中搜索最优方案。开发了交互操作驱动的手机设计原型系统, 初步实现了求解过程。研究表明, 利用交互操作行为对产品形态进行驱动设计是可行的, 交互行为的表达方式和产品的编码设计质量对设计结果有较大影响。

**关键词:** 交互操作; 驱动设计; 人机工程; 手机

**中图分类号:** TP301 **文献标识码:** A

## Mobile product ergonomics design driven by interactive operations

LIU Xiaojian<sup>1</sup>, SUN Shouqian<sup>1</sup>, LUO Lei<sup>2</sup>, LI Guiqin<sup>3</sup>

(1. Institute of Contemporary Industrial Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. CIMS & Robot Center, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** To deal with product design method driven by interactive operations, mobile phone was studied as an object product with demands of complex interactions. Interaction process between mobile and human hand was analyzed in detail, and two major interactive operations—holding and key pressing—were observed through experiments, and were statistically studied. Evaluating goals of mobile positioning in palm and comprehensive comfort scale of key pressing were acquired, together with the related variables. Mobile product's design model was established based on coding representations. Problem solving algorithms were designed based on genetic algorithms, which generated optimal rational mobile designs in the solution space through three processes: problem construction, automatic solving and interactive solving in sequence. A prototype system was designed to realize the basic functions of the interactive operation-driven design of mobile. Study proved the feasibility of the driven design method, and showed that design results were influential to interactive operation's expressing method and product coding quality.

**Key words:** interactive operations; driven design; ergonomics; mobile phone

收稿日期: 2007-03-30; 修订日期: 2007-06-29。Received 30 Mar. 2007; accepted 29 June 2007.

基金项目: 国家 973 计划资助项目(2002CB312106); 上海市教育委员会科研资助项目(2006AZ025); 湖北省青年杰出人才基金资助项目(2002AC001)。**Foundation item:** Project supported by the National Basic Research Program, China(No. 2002CB312106), the Shanghai Education Committee Technological Research Program, China(No. 2006AZ025), and the Hubei Eminent Youth Fund, China(No. 2002AC001).

作者简介: 刘肖健(1972-), 男, 山东青岛人, 浙江大学现代工业设计研究所博士后, 主要从事人机工程学与计算机辅助工业设计等的研究。  
E-mail: crazylxj@126.com。

## 0 引言

手机类产品功能多样,人手的结构形态与姿态也很复杂,且人手形态与手机功能之间有多对一或一对多的关系,如手掌与手指对手机的持握,不同形态尺寸的手机持握方式亦不同,再如拇指对手机面板上多个键的按键操作。可见手机类产品的形态人机设计涉及到了更多的交互方式与交互因素,其设计方法对于人机交互复杂的产品具有典型性。

利用交互操作行为驱动设计的方法与一般的驱动设计方法有所不同,一般的驱动设计方法用于驱动设计的变量大多是独立变量,对结果的计算也比较明确;交互操作行为驱动的人机设计驱动源有多个变量和多种组合方式,这些变量或变量组合之间有一定的关联关系,它们都属于人体结构尺寸或姿态尺寸。驱动得到的计算结果也不唯一,只是一个可用的解空间,还需要考虑多种约束实施进一步的优化来获取最优解。因此手机的交互操作驱动设计是一个复杂的优化求解过程。

由于手部操作在产品人机交互中最频繁,产品的手操作人机研究大致可以分为手部接触受力与疲劳、手抓握特征与被持物体(如手柄等)的尺寸适应性、按键操作的人机交互特征等几类。对手机交互操作而言,操作舒适度和按键识别率是两个重要指标,这方面需要大量的实验研究和数据分析的支持。文献[1]对平面布置的多键操作中手指的姿态变化特征进行了实验研究和数据分析,对按键操作的定位准确率和操作速度等指标给出了统计结论。文献[2]对手机产品的形态人机特征做了统计分析,对各种形态要素对消费偏好的影响因子做了分析。手操作的舒适性也是一个重要因素,文献[3]对手持物体的形态特征及其主观舒适度与客观舒适度做了实验研究,从接触力和物体尺寸等方面给出了设计建议,

产品的形态人机设计有较典型的参考价值。国内的相关研究也在实验和设计方法方面做了较多的工作,如湖北工业大学<sup>[6]</sup>、浙江大学<sup>[7]</sup>、西安交通大学<sup>[8]</sup>等。其他学者对计算机键盘、鼠标等多交互模式的操作效率与舒适度做了实验研究<sup>[9-11]</sup>,其研究结论

也都对手持产品的形态设计提供了很好的支持。

上述研究的内容主要在于评价,对形态设计方法的深入探讨仍较缺乏,对基于交互操作的驱动设计的研究则更少。笔者在相关方面做了长期的研究<sup>[12-13]</sup>,并取得了一定成果<sup>[14-15]</sup>。在本文的研究中,笔者结合前人的实验研究和数据分析结论,对复杂操作行为驱动的设计方法进行了较系统的探讨,以探索将评价研究成果转化为设计过程,并直接服务于高质量产品设计的方法。

## 1 产品的交互操作行为分析

### 1.1 设计过程描述

手机产品的人机交互过程可以用图1描述。

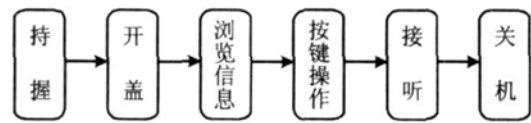


图1 手机产品的人机交互过程

驱动设计的过程和结果都体现在对一系列参数的操作上,如表1所示。

表1 设计对象要素的参数化表达

	参数	参数含义
外形	$L_m/W_m/H_m$	长/宽/高
开盖方式	$O(1)/O(2)/O(3)$	直板/翻盖/旋转
屏幕	$W_s/H_s$	宽/高
导航键	$P_d()$	各键的位置坐标
数字键盘	$P_n()$	各键的位置坐标
侧键	$P_s()$	各键的位置坐标

表1全面地描述了手机产品中与人机性能有关的形态设计对象要素,因此手机形态人机设计的概念方案可以表达为由表中各参数组成的向量形式,即设计向量,其表达式如下:

持握这一人机交互动作贯穿着手机人机交互的各个环节。持握交互主要是静态交互,在交互过程中很少有姿态动作的变化,其交互状态表现为手手的姿态。

在手机的体积尺寸不是太大的情况下,安全夹

持不会有很大的问题。因此, 持握交互环节实际上主要影响的是按键操作环节的人机性能, 因为持握的姿态决定了手机与人手之间的定位关系。因此持握环节的人机交互分析的主要目标是计算得到手机在人手中的定位, 以及持握交互中手部的姿态, 以便为按键操作的人机分析提供必要的分析计算条件。由于手机产品在手中的定位有很大的灵活性, 持握环节的人机分析采用实测数据与分析计算相结合的手段进行研究, 分析过程如图 2 所示。

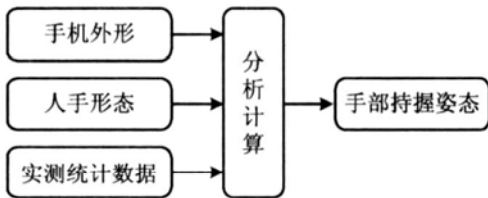


图2 持握环节人机交互分析过程

在图 3 所示的手机定位分析中, 影响持握交互的手机外形参数主要有长、宽、高三个, 这些参数可以在约束条件的限制范围内由程序随机生成。人手

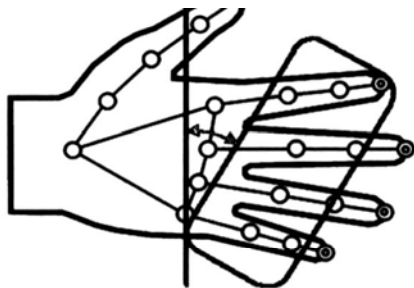


图3 手机在手掌中的定位

表 2 实测方法

项目	数据
1 实测目标	手机在手中的定位特征
2 实测人数	28 人 男 18 人 女 10 人
3 手机样品数	6
手机样品	1 103 × 44 × 20
外形数据	2 104.5 × 44.2 × 18.7
4 $L \times W \times H$ (单位 mm)	3 102 × 43 × 16
	4 85 × 46 × 23
	5 108 × 46 × 21
	6 106 × 45.5 × 19.6

图 4 为手机侧边的定位特征, 本文用手机侧边线与中指轴线的交点来描述。图 4 中  $P_0$  点为中指轴线根部与手掌相接处的点,  $P_1$  为手机侧边与中指轴线的交点。 $P_0P_1$  间的距离确定后, 手机在手掌中的定位就可以完全确定下来了。实测研究表明, 该距离仅与手机宽度有关。如图 5 所示, 当手机宽度  $W$  逐渐变大时,  $P_0$  点与  $P_1$  点之间的距离  $D$  的值变小并为负值, 但当  $W$  增大到一定程度时,  $D$  值趋于恒定。

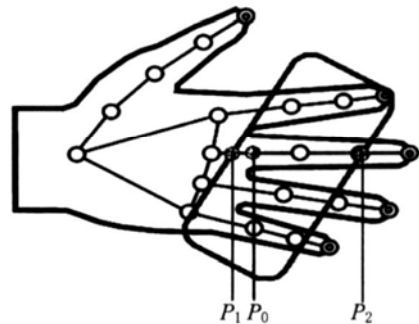


图4 手机侧边定位

手机宽  $W/cm$

图5 手机侧边定位统计数据

经过上述实测数据分析, 结合人体手部形态数据, 即可对一款给定外形尺寸的手机产品进行计算, 得到人手在持握交互该手机中的姿态, 其求解计算过程如图 6 所示。

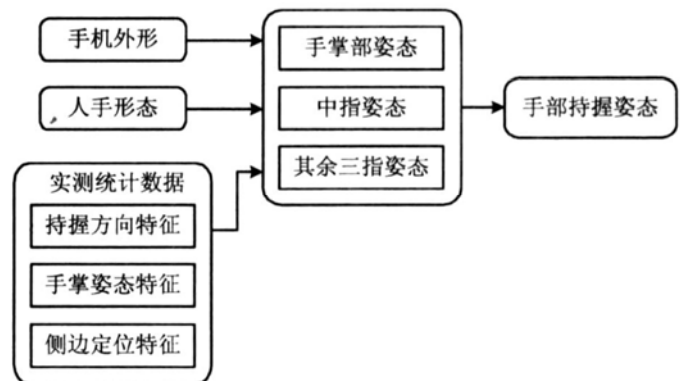


图6 人手持握姿态的计算求解

在人机交互模拟中, 保持手掌姿态不变作为定位基准。对于一款给定尺寸的手机, 其在手掌中的定位通过手掌面姿态特征(统计为  $128.2^\circ$  夹角)、持握方向特征(统计为  $27.2^\circ$  夹角)和图 4 中  $P_1$  的位

置来计算确定,  $P_1$  的位置则通过手机宽度  $W$  和图 5 的统计数据曲线计算获得。中指的姿态根据手机的尺寸与位置  $P_0$  点和  $P_2$  点的位置用反向动力学方法求解得到,  $P_2$  点按照一般的持握习惯, 选为中指末端指节的指肚位置。

### 1.3 按键动作的人机交互分析

按键操作的人机交互分析评价首先要求解每一个按键动作的人体姿态(在持握姿态已定的情况下主要是拇指的姿态), 然后对姿态参数计算评价指标。

经过实测分析, 人手拇指在按键操作时, 决定拇指姿态的主要有拇指第一指节的弯曲角度、第二指节的弯曲角度和指根指节绕手掌边缘掌骨的旋转角度三个参数。

对按键操作的人机交互评价有两个指标: 操作舒适度和按键辨认效率。

舒适度系数与拇指操作姿态偏离放松姿态的距离有密切关系, 距离越大, 舒适度越差, 其计算表达式为

$$c = \frac{1}{3} \sqrt{(\alpha - \alpha_0)^2 + (\beta - \beta_0)^2 + (\gamma - \gamma_0)^2} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  分别为拇指第一指节的弯曲角度、第二指节的弯曲角度和指根指节绕手掌边缘掌骨的旋转角度;  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$  分别为三个角度的放松姿态值, 该值通过实测统计计算得到。通常评价系数指标应该采用无量纲的形式, 但  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ,  $\gamma_0$  (放松姿态角度值) 的值可能过小或接近零, 这样会给计算带来极大的误差, 权衡后的结果是采用有量纲的计算方法。

当对多个按键同时评价时, 其综合舒适度系数取各按键舒适度系数的加权平均值, 如式(3)所示。

$$C = \frac{1}{n} \sqrt{w_1 c_1^2 + w_2 c_2^2 + \dots + w_n c_n^2} \quad (3)$$

按键的辨认效率影响按键误操作率的大小。经过实测统计发现, 按键的误操作率主要与拇指宽度与按键之间距离的比值有关。其关系曲线如图 7 所示。

根据图 7 给出的曲线, 拟合出的按键误操作率计算公式是一个二次曲线, 具体形式为

$$p = a \left| \frac{w_i}{d_s} \right|^2 + b \left| \frac{w_i}{d_s} \right| + c \quad (4)$$

式中,  $d_s$  和  $w_i$  分别为按键之间的距离和拇指宽度。

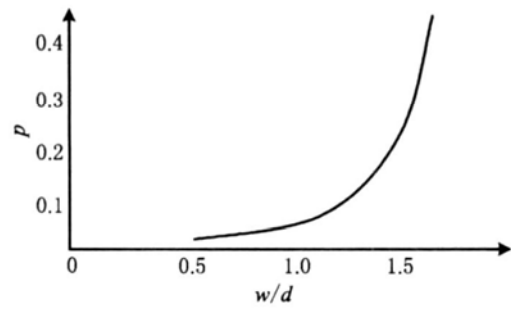


图7 按键误操作率的影响因素曲线

## 2 交互操作驱动的手机设计方案求解

手机的形态人机设计最后被归结为若干优化求解问题。该优化问题有两个特点: ①设计目标多, 手机的外形形态和众多的按键尺寸都在优化之列; ②约束条件多, 除了各设计要素的形态与位置约束外, 各设计要素彼此的关系也有诸多的约束。鉴于这种特点, 用传统的优化方法求解手机的形态人机问题有很大困难, 本文采用遗传算法进行求解。

在手机人机形态方案的求解过程中, 首先是对方案进行编码, 即把要操作的形态要素以数值参数的形式写成数组变量, 成为算法中要操作的具体对象。约束条件则是以编码中的参数为变量的方程式或不等式组。手机形态的原型方案是在编码的驱动下建立的手机形态方案, 在遗传算法中称为“表现型”。相同的编码经过不同的解码算法或者解码参数可以得到不同的表现型, 具体到手机产品, 即一组人机参数相同而形态不同的手机设计方案。编码操作用于求解产品形态的人机设计方案, 在此基础上的解码过程则用于美学、风格等其他形态要素的设计。这种方式把人机设计内容从产品形态设计中分离了出来, 有效缓解了设计过程中各形态要素之间互相冲突的问题。

遗传算法在编码的基础上随机生成方案并进行人机性能评价, 然后依据评价值进行选择等操作, 将最后的编码方案进行解码产生形态, 供操作者进行交互式选择, 以控制进一步的优化方向。

本文对产品形态设计所采用的遗传算法设计过程基本可分为问题构建、自动求解和交互求解三个子过程。问题构建子过程根据设计师的输入调用相应的模板建立设计问题实例、个体方案的编码表达式、评价函数、解空间和约束条件等, 这是对用户输入的处理过程, 这些行为在支持层的支持下完成。自动求解子过程是程序内部对设计问题展开搜索的过程, 该过程在已配置好的遗传算法程序指导下自

动进行,不需要设计师的参与,设计师只要在开始时给定算法程序工作参数即可。交互求解子过程是在自动求解子过程获得一定满意程度的种群质量后开始的。此时种群经过自动求解,已经保证了种群中的个体全部有效并多数已处在满意范围内。这种情况下,进一步的自动求解已很难获得更优的方案,且此时种群收敛速度较慢,方案之间在人机性能方面的微弱差异性也不再适合程序的自动评价。

设计师的交互操作对方案的评价与选取起到了最后决定性的作用。为了使设计师能够对方案进行评价,首先必须将自动求解得到的种群中的个体解码呈现给设计师。设计师通过交互方式对种群进行操作,主要操作行为有适应度的强制分配、父个体的强制选择和种群中个体方案的存储、加载、增删,以及个体编码的交互修改等高级操作。在交互求解子过程中,设计师有很大的自由度,设计师可以根据个人设计思路来控制种群的演化方向,甚至可以采用单步演化控制的方式展开个性化搜索。程序由自动求解转为交互求解的判定条件由用户设定,可以是收敛速度或种群进化代数。

笔者曾在文献[16]中论述过使用遗传算法求解人机设计问题的详细过程,此处不再赘述。

### 3 驱动设计方法的实现

笔者基于 Solidworks 平台开发了一个驱动设计模块,以实现基于操作行为的手机人机设计的基本功能。模块结构如图8所示。

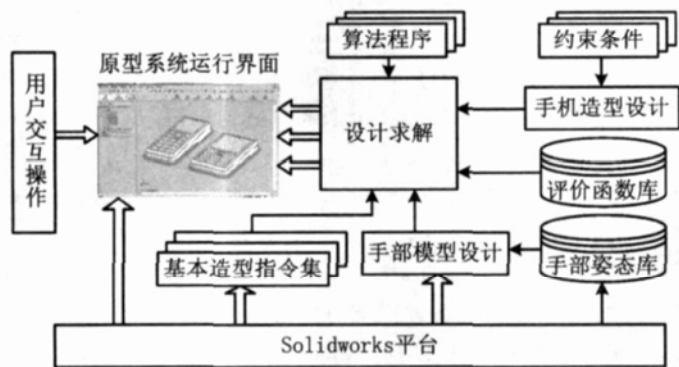


图8 手机人机设计模块结构

该模块将手机的人机尺寸与人手结构尺寸和姿态尺寸通过链接尺寸和方程式建立关联。通过人手的结构尺寸和姿态尺寸设定手的典型交互操作方式,然后使用遗传算法计算合理的手机人机尺寸范围,并在此范围内随机生成若干解方案。解方案以参数表的形式表达,通过对参数表数据的操作实现

遗传算法多方案生成和寻优等操作。人手结构采用图3中的球关节和棒肢体表示,共使用了16个关节和18节肢体(包含前臂)。图9为利用该模块的遗传算法操作生成的符合人机性能要求的方案群,等待设计师从中作出交互选择。

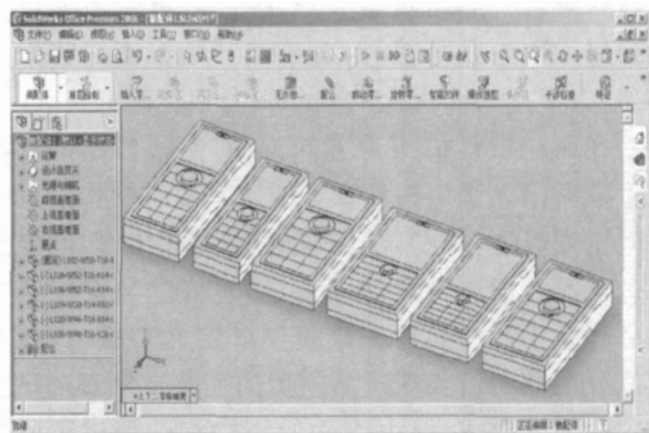


图9 遗传算法生成的方案群

基于人机性能的手机概念设计完成后,需要为手机添加细节。细节的形态并不影响人机交互操作的质量,但是对手机的使用者来说,细节形态是造就产品心理印象的重要因素。本文采用类似的方法规划手机的形态细节设计。手机形态的编码由表示各具体细节形态的参数组成。编码表达式的形式为

$$X = \{F_0, F_1, F_2, \dots, F_{n-1}\}, F_i \in [F_{i0}, F_{i1}] \quad (5)$$

式中的  $F$  表示产品的  $n$  种细节形态,  $F$  的取值表示该细节形态的参数,如长度、弧度等。各项形态细节不同的参数取值,经过组合得到所有可能的手机形态编码表达式的集合构成了方案的解空间。手机形态方案的设计过程就是在解空间中搜索最佳产品编码表达式的过程。图10为添加细节后的两款中选手机,这里只设置了最简单的圆角特征作为形态细节。

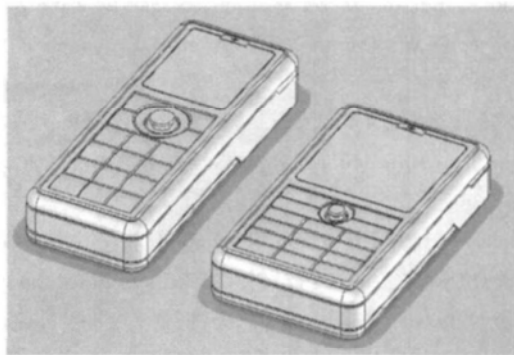


图10 添加细节后的手机产品方案

### 4 结束语

本文的研究基于遗传算法自动计算解空间,并

结合设计师的交互操作选择最后的方案,是一种比较有效的人机结合设计过程,在保证了解方案的合理性的同时,兼顾了设计师的个性化设计思想。为了方便人机求解,在概念的初期,方案省略了大部分细节,以提高效率和避免干扰。在必要的情况下,也可以在概念初期连同细节一并考虑,只是需要设计更长更细致的方案编码,而解空间的维度也将大大增高,方案搜索和优化的效率则会相应降低。

在驱动设计的实现方式方面,本文使用的驱动人手模型用人手结构参数与姿态参数共同构造的一个向量来表达,并没有实际建立三维模型,驱动过程通过计算完成。对设计师来说,更好的驱动设计方法是建立手和产品的三维模型并定义关联,直接拖动修改手模型而实现产品模型的变化。笔者尝试实现这种设计模式,但由于手的结构和约束过于复杂而未能得到满意的结果。实践表明,细致的约束定义和进一步的结构简化将会产生更接近设计师工作模式的智能化工具。

#### 参考文献:

- [1] YUN M H, EOH H J, CHO J. A two-dimensional dynamic finger modeling for the analysis of repetitive finger flexion and extension[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2002, 29(4): 231-248.
- [2] CHUANG M C, CHANG C C, HSU S H. Perceptual factors underlying user preferences toward product form of mobile phones[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2001, 27(4): 247-258.
- [3] KUIJT-EVERS L F M, BOSCH T, HUYSMANS M A, et al. Association between objective and subjective measurements of comfort and discomfort in hand tools[J]. *Applied Ergonomics*, 2006, 38(5): 643-654.
- [4] TREJO A, JUNG M C, OLEYNNIKOY D, et al. Effect of handle design and target location on insertion and aim with a laparoscopic surgical tool[J]. *Applied Ergonomics*, 2006, 38(6): 745-753.
- [5] LAI H H, CHEN Yucheng. A study on the blind's sensory ability[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2006, 36(6): 565-570.
- [6] XIONG Yunfei, LIU Gang. Ergonomic research on cell-phone keyboard placement design[J]. *Package Engineering*, 2006, 27(4): 171-174 (in Chinese). [熊云飞, 刘刚. 手机键盘布局设计的人机工程实验研究[J]. *包装工程*, 2006, 27(4): 171-174.]
- [7] SUN Shouqian, TANG Mingxi, PAN Yunhe. Research on ergonomic-based layout design[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2000, 12(11): 870-872 (in Chinese). [孙守迁, 唐明晰, 潘云鹤. 面向人机工程的布局设计方法的研究[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, 12(11): 870-872.]
- [8] KUANG Junsheng, JIANG Pingyu. Product configuration design with customization mode based on Kansei engineering[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2007, 19(2): 178-183 (in Chinese). [邝俊生, 江平宇. 基于感性工学的产品客户化配置设计[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(2): 178-183.]
- [9] GERARD P, LIESKER H, HAAN A D. Effects of a vertical keyboard design on typing performance, user comfort and muscle tension[J]. *Applied Ergonomics*, 2007, 38(1): 99-107.
- [10] WOODS V, HASTINGS S, BUCKLE P, et al. Development of non-keyboard input device checklists through assessments [J]. *Applied Ergonomics*, 2003, 34(6): 511-519.
- [11] GUSTAFSSON E, HAGBERG M. Computer mouse use in two different hand positions: exposure, comfort, exertion and productivity[J]. *Applied Ergonomics*, 2003, 34(2): 107-113.
- [12] LIU Xiaojian. Computer-aided industrial design study on the ergonomic properties of product forms[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005: 54-72 (in Chinese). [刘肖健. 机电产品形态设计中的人机工程辅助设计方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005: 54-72.]
- [13] LUO Lei. Study on theories and methods of product form's ergonomics design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007: 36-43 (in Chinese). [骆磊. 工业产品人机形态设计理论方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007: 36-43.]
- [14] LUO Lei, LIU Xiaojian, LU Changde. Ergonomic design oriented parametric human body modelling system[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(34): 16-18 (in Chinese). [骆磊, 刘肖健, 陆长德. 面向人机工程学设计的参数化人体建模系统[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(34): 16-18.]
- [15] LUO Lei, LIU Xiaojian, LU Changde. Integral product dimension optimization design based on ergonomic principles [J]. *Microelectronics & Computer*, 2006, 23(7): 39-42 (in Chinese). [骆磊, 刘肖健, 陆长德. 基于人机学原理的产品尺寸综合优化设计[J]. *微电子学与计算机*, 2006, 23(7): 39-42.]
- [16] LIU Xiaojian, LI Guiqin, LU Changde. Product ergonomics CAD based on genetic algorithms[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(33): 35-37 (in Chinese). [刘肖健, 李桂琴, 陆长德. 基于遗传算法的产品人机CAD研究[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(33): 35-37.]