

产品操作界面元素布局多目标优化设计

康慧, 杨随先, 邓淑文, 王波
(四川大学, 成都 610065)

摘要: **目的** 针对产品设计中操作界面布局设计时存在的随意性、不确定性大等问题, 使用多目标优化的方法, 寻找界面元素的最优布置, 以提升界面的使用舒适性和人机交互效率。**方法** 在分析了工效学准则和界面布局美度评价准则的基础上, 确立了层次性、相关性、简洁性和舒适性四个界面布局基本原则, 并依据原则构建了界面元素布局多目标优化数学模型, 在此模型的基础上采用改进的遗传算法, 建立基于遗传算法的界面元素布局多目标优化方法。**结果** 给出产品操作界面布局设计的基本原则, 提出一种基于遗传算法的产品操作界面元素布局的多目标优化方法及流程。**结论** 提出的布局原则和优化方法能较好地协助设计师获得满足设计需求的布局方案, 实例结果表明了理论模型的合理性与遗传算法对于界面元素布局多目标优化问题求解的有效性。

关键词: 界面布局; 多目标优化设计; 遗传算法; 产品设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)08-0149-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.08.020

Multi-objective Optimization Design of Product Operation Interface Element Layout

KANG Hui, YANG Sui-xian, DENG Shu-wen, WANG Bo
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: The work aims to find the optimal layout of interface elements in the method of multi-objective optimization design, in order to boost the operating comfort and human-computer interaction efficiency of the interface, in view of the randomness and uncertainty in the operation interface layout design of the products. Four basic principles of interface layout were determined based on the criteria of ergonomics and aesthetics evaluation of interface layout, including gradation, correlation, conciseness and comfort. A multi-objective optimization mathematical model was established for the interface element layout according to the proposed principles. Based on this model, the improved genetic algorithm was applied to establish the multi-objective optimization method of interface element layout based on the genetic algorithm. The basic principles of layout design of product operation interface were presented to propose a multi-objective optimization method and process of element layout of product operation interface based on the genetic algorithm. The proposed layout principles and optimization method can better assist the designers in obtaining the layout solutions in line with the design requirements. The example results indicate the rationality of the theoretical model and the effectiveness of genetic algorithm in solving multi-objective optimization problem of interface element layout.

KEY WORDS: interface layout; multi-objective optimization design; genetic algorithm; product design

在体验经济时代的背景下, 人机交互逐渐受到用户及产品设计师的重视。人机界面作为信息的输入与

输出媒介, 也作为产品形态设计的一部分, 其元素的布局不仅影响用户的视觉感官, 而且对产品人机系统

收稿日期: 2020-01-23

作者简介: 康慧(1996—), 女, 湖南人, 四川大学硕士生, 主攻工业设计。

通信作者: 杨随先(1965—), 男, 四川人, 博士, 四川大学教授, 主要研究方向为产品设计理论、工业设计、计算机辅助设计、机器人机构学。

的交互效率的提升有重要作用。人机界面布局设计需要考虑多重因素,不仅要满足重要性、操作频率、相关性等工效学设计原则^[1],而且还需要注重界面美感设计,以提升用户的使用舒适性^[2]。当前,产品设计中操作界面元素的布局多依赖于设计者的经验,往往不能兼顾到上述的所有设计原则,得到的布局结果随意性和不确定性较大。

1 界面布局设计研究现状

界面布局优化是指在满足规定要求和约束的条件下,在规定区域内寻找最优布置的方式^[3]。人机界面布局问题涉及界面元素的人机工效学和美感设计等方面,其中,工效学研究者-机-环境之间的相互关系,其主要目的在于提高用户对产品的操作效率。Charwat H J^[4]讨论了符合工效学的控制室,以及相关控制台和控制面板的结构和布局,推导出了控制室中与设备和显示屏幕相关联的尺寸公式。王立刚^[1]等人归纳了用于人机控制面板的相容性、使用频率、重要性、功能分组和功能单元使用序列等工效学准则。此外,感性设计是人性化设计的重要内容,人机界面的美感设计也逐渐受到关注。周蕾^[2]等人提出了一种界面元素布局设计美度评价方法,运用灰色关联分析研究了设计方案的美度优势次序,进行了美度综合评价。张娜^[5]等人抽取了一系列美度意象指标,分别将其量化,提出了布局方案的综合美度计算方法。然而,将对产品操作界面布局有显著影响的工效学准则与美度评价指标进行结合的研究不多。

产品操作界面元素的布局设计本质上是一个多目标优化问题。该多目标问题的求解方案组合数随界面布局的规模增大呈指数级增长,一般需要借助启发式算法求解,包括遗传算法^[6-7]、模拟退火法^[8-9]、粒子群算法等^[10],这些求解算法已在许多布局优化问题研究中得到了运用。徐立云^[11]等人采用遗传算法,建立了生产车间多行布局的多目标优化模型。Luigi Troiano^[12]等人提出了将遗传算法应用于界面菜单布局优化,并验证了其可行性。Aysun Coskun^[8]等人基于模拟退火法建立了网站布局优化模型,实现了动态网页的创建。许或青^[10]等人提出了基于粒子群优化算法的控制面板布局设计,并证明了该方法解决此类问题的有效性。这些方法在应用过程中各有优缺点,优点在于模拟退火法和粒子群算法计算方便,运行时间较短,但缺点是全局搜索能力差,求解过程存在容易陷入局部最优问题;而遗传算法能很好地跳出局部最优,最终得到全局最优解,但缺点是运行时间较长,且容易受参数的影响。改进的遗传算法在保证得到全局最优解的同时,有效地提高了求解效率。

界面布局多目标优化问题已经受到学者关注,出现了许多相关的研究成果和应用案例,但是针对产品

操作界面元素布局多目标优化设计的研究相对较少,具体应用于布局优化设计的数学模型也很局限,其优化目标一般只考虑重要性和使用频率等准则,都未对界面布局的美度方面进行讨论。本文综合考虑工效学和界面布局美度评价准则,提出了产品操作界面元素布局设计的原则,构建了界面布局优化设计数学模型,运用改进后的遗传算法对界面元素布局多目标优化问题进行求解,为产品操作界面元素布局设计提供一种新思路。

2 界面元素布局原则

界面布局设计原则是布局设计的依据,本文选取了对产品操作界面布局有显著影响的工效学准则和美度评价指标,包括重要性、使用频率、功能分组和功能单元使用序列等工效学准则,以及简单度、平衡度和优势度等美度评价指标,并将其中部分准则与美度评价指标进行整合,如将重要性、使用频率准则和优势度评价指标整合为层次性原则,将功能分组和功能单元使用序列准则整合为相关性原则,最终得到层次性、相关性、简洁性和舒适性四个产品操作界面布局原则,实现界面布局感性设计与理性设计的融合。

2.1 层次性原则

层次性原则是指把重要程度大、使用频率高的元素布置在人的最佳视野范围或手部的最佳操作范围内,以减少用户的操作负荷,提高人机交互效率。元素的重要程度和使用频率由相应领域的专家和有丰富的经验的操作人员确定,并使用层析分析法进行计算。根据文献信息,界面信息的呈现存在明显差异,如人眼对左上角的信息获取明显优于右下角,各区域优势度的权重从左至右下分别为33%、28%、23%、16%^[2]。界面布局的层次度由公式(1)计算:

$$\max F_a = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^n \lambda_k \frac{s_{ik} g_i}{s} \quad (1)$$

其中: F_a 为界面布局的层次度; $k=1,2,3,4$,分别表示界面左上、右上、左下和右下区域; λ_k 为 k 区域的优势度权重; n 为界面元素总数; s_{ik} 为元素 i 在 k 区域的面积; s 为界面元素的总面积; $g_i = \frac{m_i + f_i}{2}$ 为元素 i 的重要度和使用频率的链值;各元素的重要度矩阵为 $\mathbf{m}_i = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_n]^T$,其中 m_i 为元素 i 的重要程度大小;各元素的使用频率矩阵为 $\mathbf{f}_i = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n]^T$,其中 f_i 为元素 i 的使用频率大小。

2.2 相关性原则

相关性是指界面各元素在功能和操作逻辑顺序上的密切程度。把相关度高的元素布置在一起,可减少用户视觉上的搜索时间,从而使用户更容易找到目

标元素。元素间的相关度越高，其中心点之间的距离越小。界面布局的相关度由公式(2)计算：

$$\max F_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{|x_i - x_j|}{A} - \frac{|y_i - y_j|}{B} \right) \cdot r_{ij} \quad (2)$$

其中： F_r 为界面布局的相关度；各元素之间的相

关度矩阵为 $r = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix}$ ， r_{ij} 为元素*i*与*j*之

间的相关度大小； x_i 和 y_i 分别表示元素*i*中心点*x*轴和*y*轴的坐标； A 和 B 分别表示界面的长度和宽度。

2.3 简洁性原则

简单易用的产品操作界面始终都是赢得用户的关键^[13]。界面中元素尽可能对齐，可有效提升界面的简洁性，减少视觉上的干扰，从而降低用户对界面形式的理解难度。界面布局的简洁度由公式(3)给出：

$$\max F_s = \frac{n_x + n_y}{2n} \quad (3)$$

其中： F_s 为界面布局的简洁度； n_x 和 n_y 分别表示*x*轴和*y*轴坐标相等的元素数量。

2.4 舒适性原则

通过使界面水平和垂直对称轴两边元素总体重量之间的差异最小化，来提升界面整体的平衡协调感，避免视觉混乱感，从而提高用户的使用舒适性。界面布局的舒适度由公式(4)确定：

$$\max F_c = 1 - \left(\left| \frac{P_L - P_R}{\max(|P_L|, |P_R|)} \right| + \left| \frac{P_U - P_D}{\max(|P_U|, |P_D|)} \right| \right) / 2 \quad (4)$$

其中： F_c 为界面布局的舒适度； L 和 R 分别表示界面的左、右区域， U 和 D 分别表示界面的上、下区域； $P_k = \sum_{i=1}^n s_{ik} d_i$ ， $k = L, R, U, D$ ， s_{ik} 为元素*i*在*k*区域的面积， d_i 为元素*i*的中心点与界面上下或左右对称轴间的距离。

3 界面元素布局优化数学模型

首先建立界面布局的坐标系，假定界面为矩形结构，将需要放置的元素抽象为矩形，其长和宽已知，各元素在界面中与坐标轴平行。根据上述布局原则构建优化目标函数，并要求各元素之间满足间距约束和边界约束条件，最后得到满足要求的设计变量，即元素坐标集 $X = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

3.1 目标函数

依据上述的设计原则和数学描述，构建布局目标

函数见公式(5)：

$$\begin{aligned} \max F = & \alpha_1 \beta_1 \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^n \lambda_k \frac{s_{ik} g_i}{s} + \\ & \alpha_2 \beta_2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \left(1 - \frac{|x_i - x_j|}{A} - \frac{|y_i - y_j|}{B} \right) \cdot r_{ij} + \\ & \frac{\alpha_3 \beta_3 (n_x + n_y)}{2n} + \\ & \alpha_4 \beta_4 \left(1 - \left(\left| \frac{P_L - P_R}{\max(|P_L|, |P_R|)} \right| + \left| \frac{P_U - P_D}{\max(|P_U|, |P_D|)} \right| \right) / 2 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中： α 为归一化因子，以保证两部分量纲统一，并使它们的最优结果最大值接近1； β 为加权因子，根据各目标函数的权重大小来确定，须满足 $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1$ 。

3.2 约束条件

界面布局参量和参考线见图1，各元素布局时须满足以下约束条件。

1) 间距约束。元素间应保持一定的距离，即满足公式(6)：

$$\begin{aligned} |x_i - x_j| - \frac{L_i}{2} - \frac{L_j}{2} - d_{x\min} & \geq 0 \quad \text{或} \\ |y_i - y_j| - \frac{W_i}{2} - \frac{W_j}{2} - d_{y\min} & \geq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中： $d_{x\min}$ 和 $d_{y\min}$ 分别表示元素*i*与*j*在*x*方向和*y*方向的最小间距； L_i 和 W_i 分别表示元素*i*的长与宽的大小。

2) 边界约束。保证元素与界面边界保持一定距离，即满足公式(7)：

$$\begin{cases} d_{a\min} + \frac{L_i}{2} \leq x_i \leq A - \frac{L_i}{2} - d_{a\min} \\ d_{b\min} + \frac{W_i}{2} \leq y_i \leq B - \frac{W_i}{2} - d_{b\min} \end{cases} \quad (7)$$

其中： $d_{a\min}$ 和 $d_{b\min}$ 分别表示元素与边界在*x*方向和*y*方向的最小间距。

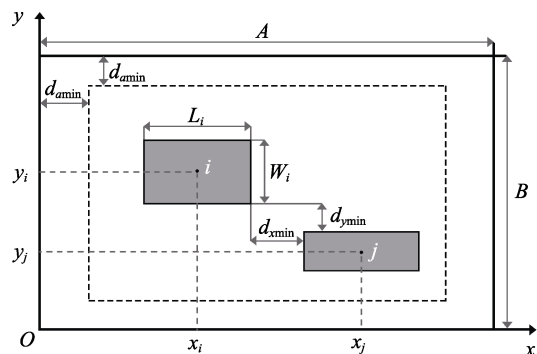


图1 界面布局参量和参考线

Fig.1 The parametric and reference lines of interface layout

4 基于遗传算法的界面元素布局

遗传算法^[14]是一种基于生物遗传和进化机制的随机搜索算法,其原理是模拟大自然优胜劣汰的自然规律,淘汰适应度值低的个体,并通过选择、交叉、变异等操作来保证染色体的多样性,具有较强的全局搜索能力,适用于解决复杂系统优化问题,但缺点是运行速度较慢,且容易受参数的影响。在遗传算法中,两点交叉和两点变异相较于单点交叉与单点变异,更有利于增强种群的多样性^[15]。本文在界面元素布局优化模型的求解中,为了扩大种群的搜索范围并提升求解效率,在求解算法设计中采用两点交叉和两点变异操作,并增大交叉概率和变异概率,通过加入精英保留策略,使每代种群中的最优个体得以保留,从而提升算法的求解效率。

4.1 染色体的编码和评价

界面布局优化问题是较为复杂的非线性连续优化模型,由于二进制编码时杂交操作的搜索能力比十进制编码强^[15],所以本文采用二进制的编码方式编写染色体。根据布局优化的要求,优化变量为元素的位置坐标,若元素总数为 n ,设计染色体的编码见公式(8):

$$X = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \quad (8)$$

染色体的评价根据每对染色体 X_i 的优化目标函数值 $F(X_i)$ 计算得到,适应度值与目标函数值成正比,目标函数值越大,个体的适应度越高。

4.2 种群初始化和选择操作

若取遗传群体大小为 N ,随机产生 N 对染色体,并判断个体是否满足约束条件,若条件成立则将其加入到初始种群,否则抛弃,并补充符合约束条件的染色体,直至种群大小达到 N 。确定初始父代群体后,采用比例法选择个体,则个体 X_i 被选中的概率 P_i 由公式(9)确定:

$$P_i = \text{fit}(X_i) / \sum_{i=1}^N \text{fit}(X_i) \quad (9)$$

其中: $\text{fit}(X_i)$ 为个体 X_i 的适应度, $i=1,2,\dots,N$ 。

4.3 交叉与变异操作

随机选取两个染色体,使用两点交叉的方式,再随机生成交叉位置,将交叉位置两边的基因互换,从而得到新的染色体,见图2,交叉概率 P_c 越高,算法搜索新区域的能力越强。变异操作选用两点变异方式,随机选择变异基因位置并将其值取反,变异概率 P_m 越大,寻优效率越高,越有利于克服早熟收敛^[15]。

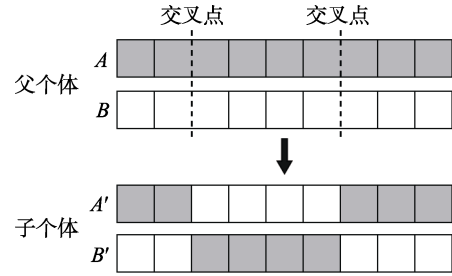


图2 交叉操作
Fig.2 The crossover operation

4.4 精英保留策略

在算法中加入精英保留策略,父代种群中适应度高的个体不参与交叉运算和变异运算,并用其替换掉子代种群中适应度最低的个体^[16]。具体实现过程是在将交叉和变异产生的子代重插入到父代时,依据适应度大小对子代和父代进行排序选择,适应度高的保留到下一代,使得父代种群中的优秀个体能遗传到下一代,提升了遗传算法的收敛性能。

5 应用实例

选取某产品界面为研究对象,界面尺寸为 $A=200\text{ mm}$, $B=120\text{ mm}$,待布局元素包括一个显示屏和七个操纵器件,将布局元素抽象为包络元素的最小矩形,其尺寸及名称见表1。通过问卷调查经验丰富的用户,确定相关度矩阵 r_{ij} 及各元素的重要度矩阵 m_i 和使用频率矩阵 f_i 。考虑到操作空间的问题,元素间 x 方向和 y 方向的最小间距 $d_{x\min} = d_{y\min} = 8\text{ mm}$,元素与界面边界最小间距 $d_{a\min} = d_{b\min} = 10\text{ mm}$ 。简洁性误差范围设置为 $\pm 0.5\text{ mm}$ 。

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.6 & 0.6 & 0.2 \\ 0.3 & 1 & 0.4 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.4 & 1 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 1 & 0.9 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 & 1 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$m_i = [0.24 \quad 0.10 \quad 0.05 \quad 0.05 \quad 0.08 \quad 0.15 \quad 0.15 \quad 0.18] \quad (11)$$

$$f_i = [0.20 \quad 0.05 \quad 0.03 \quad 0.03 \quad 0.05 \quad 0.20 \quad 0.20 \quad 0.24] \quad (12)$$

表1 元素尺寸和名称
Tab.1 The dimensions and names of elements

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
名称	显示屏	预约键	变频键	模式键	水量调节旋钮	升温键	降温键	开关键
尺寸/mm	68×46	20×20	20×20	20×20	32×32	20×20	20×20	20×20

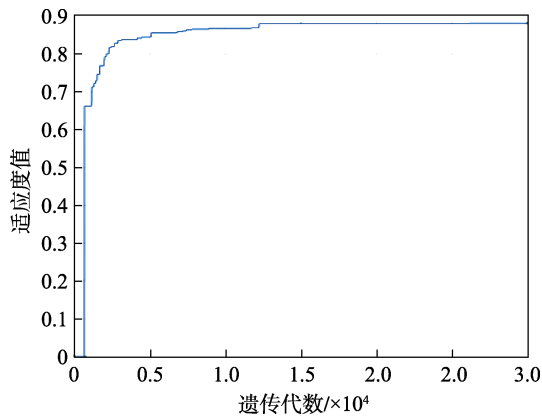


图 3 适应度随迭代次数的变化曲线

Fig.3 The fitness curve changing with the number of iterations

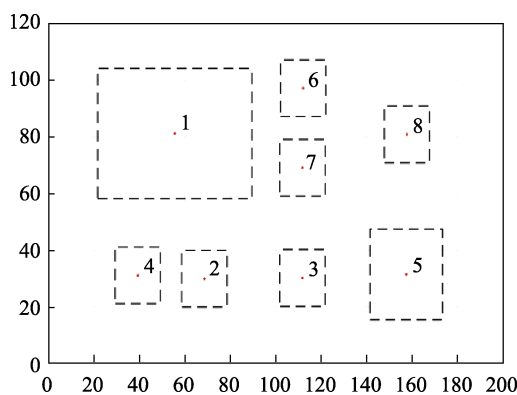


图 4 计算结果布局

Fig.4 The layout of calculation results

针对本布局实例,运用遗传算法对界面元素布局进行优化。设置种群规模 $N=200$, 最大进化代数 $Gen=30000$, 二进制编码长度为 24, 交叉概率 $P_c=0.9$, 变异概率 $P_m=0.1$, 归一化因子 $\alpha_1=18.52$, $\alpha_2=0.26$, $\alpha_3=1$, $\alpha_4=1$, 通过问卷调查设计专业人员, 确定加权系数 $\beta_1=0.31$, $\beta_2=0.35$, $\beta_3=0.12$, $\beta_4=0.22$ 。根据初始化信息和约束条件, 使用 MATLAB 编写相关程序, 得到适应度随迭代次数的变化曲线, 见图 3, 最高适应度为 0.8815, 所得最优解为 $\{(55.52, 81.45), (68.58, 31.39), (112.22, 31.55), (39.18, 32.07), (157.63, 32.54), (112.12, 98.04), (111.82, 69.98), (157.88, 81.14)\}$, 由计算结果得到界面元素具体布局, 见图 4。

布局结果显示, 重要度和使用频率较高的显示屏、开关键及温度调节按键, 设定在左上和右上上较优区域内; 相关度高的升温键和降温键布置在一起, 与显示屏相关度高的按键也布置在周围; 界面元素中心坐标对齐度较高; 界面整体平衡协调性较好; 各元素满足间距约束与边界约束的条件。该布局优化结果满足设计需求, 表明应用本文的布局设计原则和算法, 可以获得较为合理的布局方案。

6 结语

界面元素布局设计的目标是为了提高界面的舒适性和人机交互效率。为此, 本文从工效学准则和界面布局美度评价准则出发, 提出了产品操作界面布局设计的基本原则。针对界面布局设计的多目标优化特点, 提出了一种基于遗传算法的产品操作界面元素布局的多目标优化方法, 构建了优化目标函数, 解决了产品设计中操作界面元素布局设计时存在的随意性、不确定性大等实际问题。在具体的设计需求下, 使用该布局原则和优化方法, 可协助设计师高效率地获得满足设计需求的布局方案, 为产品操作界面元素布局设计提供了设计参考。

参考文献:

- [1] 王立刚, 袁修干. 基于工效学的控制面板计算机辅助设计[J]. 航空学报, 1999, 20(S1): 45-46.
WANG Li-gang, YUAN Xiu-gan. Computer Aided Design of Control Panels Based on Ergonomics[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1999, 20(S1): 45-46.
- [2] 周蕾, 薛澄岐, 汤文成, 等. 界面元素布局设计的美度评价方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(5): 758-766.
ZHOU Lei, XUE Cheng-qi, TANG Wen-cheng, et al. Aesthetic Evaluation Method of Interface Elements Layout Design[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2013, 25(5): 758-766.
- [3] GANTOVNIK V B, TIWARI S, FADEL G M, et al. Multi-objective Vehicle Layout Optimization[C]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [4] CHARWAT H J. The Arrangement of Control Panels in Control Rooms[J]. Regelungs Technische Praxis, 1984, 26(9): 395-401.
- [5] 张娜, 王家民, 杨延璞. 人机界面形态元素布局设计美度意象的评价方法[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(10): 1594-1598.
ZHANG Na, WANG Jia-min, YANG Yan-pu. Evaluation Method of Aesthetic Image for Man-machine Interface Form Elements Layout Design[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(10): 1594-1598.
- [6] 曾强, 沈玲, 潘启东, 等. 基于 NSGA II 的多目标车间设施布局优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(27): 223-228.
ZENG Qiang, SHEN Ling, PAN Qi-dong, et al. Multi-objective Optimization Method for Workshop Facility Layout Based on NSGA II[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(27): 223-228.
- [7] 张屹, 卢超, 张虎, 等. 基于差分元胞多目标遗传算法的车间布局优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4): 727-734.

(下转第 172 页)

- [5] 王黎. 养老机构老年人总体健康状况及影响因素[J]. 中国老年学杂志, 2016, 36(8): 5-6.
WANG Li. General Health Status and Influencing Factors of the Elderly in Nursing Institutions[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2016, 36(8): 5-6.
- [6] 李婧, 罗茹茹, 董茂江, 等. 老年人护理需求调查研究[J]. 医学与哲学, 2016(23): 55-58.
LI Jing, LUO Ru-ru, DONG Mao-jiang, et al. Investigation and research on elderly care needs[J]. Medicine and philosophy, 2016(23): 55-58.
- [7] 徐慧蓉. 家庭养老模式下失能老年人心理健康问题及其影响因素探究——基于河北省张家口市的访谈调查[J]. 老龄科学研究, 2017(4): 55-62.
XU Hui-rong. Research on Mental Health Problems of Incapacitated Elderly under the Family Endowment Model and Its Influencing Factors Based on the Interview Survey in Zhangjiakou, Hebei Province[J]. Scientific Research on Aging, 2017(4): 55-62.
- [8] LAZAROVA V, SAVOYE P, JANEX M L, et al. Advanced wastewater Disinfection Technologies: State of the Art and Perspectives[J]. Water Science & Technology, 1999, 40(4/5): 203-213.
- [9] LAZAROVA V, JANEX M L, FIKSDAL L, et al. Advanced Wastewater Disinfection Technologies: Short and Long Term Efficiency[J]. Water Science & Technology, 1998, 38(12): 109-117.
- [10] LIBERTI L, NOTARNICOLA M, LOPEZ A. Advanced Treatment for Municipal Wastewater Reuse in Agriculture[J]. Ozone Science & Engineering, 2000, 22(2): 151-166.
- [11] 程润东. 智能马桶设计的要点及原则[J]. 江西建材, 2016(19): 249-251.
CHENG Run-dong. Key Points and Principles of Intelligent Toilet Design[J]. Jiangxi Building Materials, 2016(19): 249-251.
- [12] 上海福苑养老事业发展中心. 失能老人长期照护实务——压疮护理[J]. 社会福利, 2010(11): 40-41.
Shanghai Fuyuan Center for the Development of Elderly Care. Long-term Care Practice for Disabled Elderly People Pressure Ulcer Care[J]. Social Welfare, 2010(11): 40-41.
- [13] 张影. 失能失智老年人的排泄照料[J]. 社会福利, 2015(4): 45-46.
ZHANG Ying. Discharge Care for Incapacitated and Mentally Retarded Elderly[J]. Social Welfare, 2015(4): 45-46.

(上接第 153 页)

- ZHANG Yi, LU Chao, ZHANG Hu, et al. Workshop Layout Optimization Based OB Differential Cellular Multi-objective Genetic Algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(4): 727-734.
- [8] COSKUN A. Simulated Annealing Algorithm and Layout Optimization for the Contents of a Web Page[C]. International Conference on Electronics Computer Technology. IEEE, 2011.
- [9] BALAKRISHNAN J, CHENG C H, WONG K F. FACOPT: a User Friendly Facility Layout Optimization System[J]. Computers & Operations Research, 2003, 30(11): 1625-1641.
- [10] 许彧青, 孟庆鑫, 杨治, 等. 基于粒子群优化算法的控制面板布局优化方法研究[J]. 高技术通讯, 2012, 22(8): 869-874.
XU Yu-qing, MENG Qing-xin, YANG Zhi, et al. An Optimizing Method of Control Panel Layout Based on Particle Swarm Optimization[J]. High Technology Letters, 2012, 22(8): 869-874.
- [11] 周娜, 徐克林, 郭爽. 基于遗传算法的车间布局多目标优化[J]. 工业工程, 2011, 14(5): 104-109.
ZHOU Na, XU Ke-lin, GUO Shuang. GA-Based Multi-objective Optimization of Workshop Layout[J]. Industrial Engineering Journal, 2011, 14(5): 104-109.
- [12] TROIANO L, BIRTOLO C, ARMENISE R, et al. Optimization of Menu Layouts by Means of Genetic Algorithms[C]. European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Springer-Verlag, 2008.
- [13] COLBORNE G. 简约至上: 交互式设计四策略[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
COLBORNE G. Simple and Usable Web, Mobile, and Interaction Design[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2011.
- [14] GOLDBERG D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. MA: Addison-Wesley, 1989.
- [15] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案——加速遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 8-12.
JIN Ju-liang, YANG Xiao-hua, DING Jing. An Improved Simple Genetic Algorithm: Accelerating Genetic Algorithm[J]. System Engineering Theory and Practice, 2001, 21(4): 8-12.
- [16] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms Theory and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.