

基于遗传算法的产品人机 CAD 研究¹

刘肖健 李桂琴 景韶宇 陆长德

(西北工业大学工业设计研究所 西安友谊西路 127 号 559 信箱 710072)

梁艳霞

(徐州师范大学工业设计系 江苏徐州 221000)

摘 要:将产品形态的人机设计问题从概念设计到详细设计分为交互模式设计、关联形态设计和独立形态设计三个紧密联系的层。应用进化设计和遗传算法的基本原理,针对不同层次人机设计问题的特点分别进行具体研究,制订了相应的解决策略,分析了其编码方案与适应度函数的构造方式。最后构建了基于设计/制造一体化的人机进化设计过程原型系统。

关键词: 产品设计 人机工程学 遗传算法 CAD

Product Ergonomics CAD Based on Genetic Algorithms

Liu Xiaojian Li Guiqin Lu Changde

Industrial Design Institute, Northwestern Polytechnical University

Liang Yanxia

Industrial Design Institute, Xuzhou Teacher's University, Xuzhou, Jiangsu

Abstract: In this paper, product's ergonomical design process was broken down to three periods: interactivity design, dimension design and individual form design. Based on Evolutionary design theory and genetic algorithms, ergonomical design problems were studied respectively for each period with encoding techniques and fitness function construction. And the proto system of the design process based on Design-Manufacture integrity system was also introduced.

Keywords: product design, ergonomics, genetic algorithms, CAD

1. 概述

产品功能与结构的复杂化是技术发展的必然结果,也是人机关系复杂化的直接原因。这种复杂的关系要求在人性化原则下协调其内部一致性。产品功能与技术的同质化竞争市场环境也使得人性化成为产品设计的基本趋势。人机工程学的理论与实验研究是产品人性化设计的基础,也是提高产品竞争力的关键^[1]。

目前许多基于人体测量数据、人机实验或作业分析结果等人机原则的设计与决策行为还没有实现自动化辅助,仍然是依靠设计师的领悟与判断能力。这种设计方式会产生两个问题:一是对人机原则的应用缺少量化评价准则,许多情况下需要建造高成本的实物模型来验证设计方案;二是对人机原则的使用带有很大的随机性,不能充分有效利用事实的、经验的和历史的的设计资源。这无形中增加了设计误差和验证成本,是人机设计进入设计/制造一体化过程主要障碍^[2]。

目前的高端 CAD 软件大多是面向制造过程而不是设计过程,从概念设计阶段到详细设计阶段都没有能够对人机设计提供很好的支持。概念设计多关注设计师思维的表达与再

¹国家自然科学基金:产品多感知因素设计过程研究(50275112)

国家 863 项目:面向产品创新的计算机辅助概念设计技术的研究(2002AA411110)

现,而没有将支持概念决策的客观人机原则纳入系统功能;详细设计则缺少在通用设计模块基础上进行人机性能整合的辅助设计方法。

遗传算法是近年来发展较快的一种寻优方法,在产品设计领域也逐渐找到越来越多的用武之地,特别是对于具有模糊性的设计方案的选择问题^[3]。遗传算法采用模拟生物自然进化的方法,通过选择、复制、交叉、变异等进化操作逐步得到优选个体,即问题的近似最优解。与传统的优化方法相比,遗传算法在处理产品设计问题时在交互性、创新性、直观性等方面具有很大的优势^[4]。

本文所论述的产品形态的人机设计即建立在遗传算法基础上的进化设计。作者根据产品人机设计过程的特点,结合设计/制造一体化过程,分析研究了产品形态的人机性能从概念设计到详细设计的基于遗传算法的辅助设计方法。

2. 人机设计问题的形式化

使用计算机辅助的方式处理具体设计问题的第一步是将设计问题形式化,即表达成计算机可以处理的形式。对基于遗传算法的人机设计来讲,形式化的主要任务是构造人机设计问题(亦称“表现型”)的合理编码方案(亦称“基因型”),即能够表达出所有有效设计方案的形式,并且具备算法操作上的可行性。

本文的研究根据问题的性质,将产品形态人机设计从概念到详细设计过程分为三个层次:人机交互模式设计、关联形态人机设计和独立形态人机设计。针对不同的层次设计问题的实质以及编码的完全性、复杂性与算法效率等要求,制定了不同形式的编码方案^[5]。

1. 人机交互模式的编码方案

人机交互模式是将人机交互行为用统一方式进行表达的一种手段。对模式的基本要求是可以构造出包含理想设计方案在内的全部有效解空间,以供进化算法在其间搜索理想解。本文的研究将人机交互行为用3种模式来表达,这3种模式分别是:

- 1) 接触模式:产品与使用者身体部位的接触方式;
- 2) 力学模式:产品与使用者之间的力学支持方式;
- 3) 运动模式:产品与使用者双方在使用过程中的运动方式。

人机交互是人体部位对产品功能的参与以及与产品形态的交流方式,这些都是以人体部位与产品的接触为基础的。因此,对人机交互模式的编码以接触模式为依据,采用人体特征部位点(暂定义为“锚点”)的参与状态为编码的值。

锚点是人体体表特征部位上的点,锚点的数目与分布根据设计问题的具体需要与求解精度来确定。对刚体结构的人体部位(如外凸的骨骼)可以采用相对位置固定的刚性子锚点对主锚点进行细化;对弹性结构的人体部位(如肌肉较厚处)可采用相对位置可变的柔性子锚点对主锚点进行细化;对有刚体运动关系的人体部位则应在不同的运动部位上分设不同的主锚点。

人机交互模式设计的主要工作就是对锚点的参与状态值进行优化。以座椅靠背的设计为例,将人体各节脊椎定义为一系列主锚点,而在每节脊椎对应的身体部位上定义一系列子锚点,则靠背的形状设计就转化为脊椎锚点参与状态值的求解问题。就本例而言,锚点参与状态可采用二进制编码(即各锚点是参与还是不参与),接触模式与力学模式有效。

采用锚点做为概念阶段人机设计的编码可以全面地构造出人机问题的创新解空间,并通过适应度函数或交互方式从中选出满意的设计方案。

对锚点参与状态值编码的人机交互模式解空间的表达式是一个二进制向量,其基因型为:

$$G_1 = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n) \quad (1)$$

式中： a_i 为表征锚点参与状态的二进制数值量， $a_i = 1$ 表示该锚点参与影响产品形态设计； n 为与产品形体设计相关的人体部位中锚点的总数。

2. 关联形态的编码方案

人机交互模式设计确定了锚点的参与状态方案，关联形态人机设计在此基础上对相对位置有人机性能要求的锚点间关系参数（关联尺寸）进行优化设计。

从锚点的概念以及人体测量学相关内容来看，关联人机形态包括3种：第一种是人体测量学所提供的基本人体尺寸，如人体的臂长、腿长、肩宽等数据，这些数据可以表示为锚点之间的距离；第二种是各种角度尺寸，如各相连肢体的最佳运动角和极限运动角等，角度尺寸是基本人体尺寸之间的关系，这些角度尺寸是通过锚点位置进行二次运算得到的；第三种是需要根据基本人体尺寸换算得到的间接尺寸，如设计座椅所需的扶手与椅面的高度差、大拇指与其它四指的相对位置关系等。

三种关联尺寸分别被表式为 C_b, C_a, C_i 。其中 C_b 与 C_a 的部分数据可以由人体测量学来提供， C_i 要通过换算才可得到。由于涉及到不同的百分位与最佳区间范围， C_i 的换算工作可能会相当复杂。三种关联尺寸在实际的设计中也会彼此之间互相牵制无法同时取最优值。关联形态人机设计的工作是对 C_b, C_a, C_i 的值进行优化设计，使各关联尺寸处于最佳组合状态。

关联尺寸为数值量，可以直接用以生成浮点数编码。

人机关联形态解空间的表达式为一个浮点数向量：

$$G_2 = (C_{b_1}, C_{b_2}, \dots, C_{b_j}, C_{a_1}, C_{a_2}, \dots, C_{a_k}, C_{i_1}, C_{i_2}, \dots, C_{i_m}) \quad (2)$$

式中： $C_{b_i}, C_{a_i}, C_{i_i}$ 为代表锚点关联尺寸的十进制数值量； j, k, m 为三种关联尺寸的数量。

3. 独立形态的编码方案

独立机形态人机设计把锚点扩展成符合人机要求的形态，即形态面的详细设计。

独立形态人机设计的编码研究主要是针对复杂的曲面设计，包括运动曲面和自由曲面，可以对曲面的控制节点进行编码^[6]。

考虑到曲面控制节点是三维数据，用作浮点数编码计算量较大，可以固定节点坐标的两维，通过变动第三维坐标来产生所需的曲面形状。在曲面起伏不大的情况下，此法对绝大多数曲面设计是有效的。曲面的控制网格为一个 $M \times N$ 矩阵， M 和 N 为曲面控制网格的行列数，矩阵元素为网格节点的第三维（自由）坐标值，设计/制造一体化平台可以利用该矩阵方便地调用曲面造型模块来生成精确的曲面形态。

因此，独立形态的解空间可以表示为一个 $M \times N$ 节点坐标矩阵的形式：

$$G_3 = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中， P 为曲面控制点的自由坐标值。

对局部需要精确调整的地方，可根据需求在节点坐标矩阵中插入行列进一步细化以提高

对曲面的局部精确控制能力。

3. 适应度函数构造

适应度函数是决定随机产生的众多设计方案取舍的评价准则。从产品形态人机设计实践来看，与人机有关的形态设计主要受到三种约束：1) 生理人机原则，考虑人体尺寸的百分位与人机交互方式的随机程度；2) 物理或技术原则；3) 主观设计倾向或强制性要求（如语义、设计师的个人创新、功能结构的限制或客户要求）。适应度函数的构造工作即建立这三种约束的量化模型。

1. 人机交互模式设计的适应度函数

在锚点编码的基础上，通过力学模式构造人机交互模式的适应度函数。人机交互模式的力学适应度有两方面评价标准：1) 产品或人体的受力平衡性与稳定性；2) 人体受力的健康标准。前者可以通过计算锚点位置与产品或人体的重心位置来进行判断；后者则需要计算锚点处的受力大小与分布情况，然后根据人体生理健康指标判别其合理性，并通过调整锚点分布来进行局部优化。

人体与产品交互运动包括两种形式：多工位静态交互与使用过程的动态交互。前者对每一个工位单独进行力学平衡性与稳定性计算，后者则要进行复杂的动态计算，在算法效率允许的情况下，可以把动态过程离散为多个静态工位并按照静态交互进行计算。

人机交互模式设计属于概念设计阶段，由于涉及复杂的发散性概念创意，方案的确定主要依靠设计师的创新思维与客户对产品的宏观要求，因此在随机产生的众多设计方案（即种群）中做出取舍主要还是通过设计师与程序的交互操作来进行，适应度函数的主要功能不是优选，而是通过物理和生理方面的评价准则进行方案的合理性判断以保证种群中个体的有效性^[7]。

2. 关联形态人机设计的适应度函数

理想的关联人机形态是所有关联尺寸都位于最优区间中心。但是由于彼此之间的牵制，往往很难同时达到最优，因此以关联尺寸值距离最优区间中心的方差和作为适应度函数，其计算公式为：

$$F_f = \sum w_i s_i^2 \quad (4)$$

式中： F_f —— 适应度函数；

s_i^2 —— 关联尺寸值距离最优区间中心的方差；

w_i —— 关联尺寸的权值。

3. 独立形态人机设计的适应度函数

曲面的人机适应度主要考虑三个方面的因素：1) 产品形态与人体体表形态的吻合程度，考虑使用者人体参数的百分位与使用方式的模糊性；2) 产品形态的生理力学效应，即产品形态与体表的局部接触符合生理力学原则，如压力的均布程度等；3) 对形态的确定性要求，如对称等。

在构造适应度函数时以第一个因素为主要考虑对象，第二个因素通过实验测试以修正系数的方式加入到适应度函数的计算中，第三个因素通过算法程序来保证。

评价产品形态与人体体表形态的吻合程度需要研究两个问题：1) 人体体表不同的锚点处的形态。这种形态可以通过实验的方法近似得到。最简洁的近似方法是将人体体表形态简化为球体、椭球体或圆柱体的一部分。考虑到人体尺寸的百分位和使用方式的随机程度，这种简化还是切实可行的。2) 产品形态与人体体表形态最合理的接触方式。通常情况下，100

%吻合的形态并非最合理的人机形态,这种产品形态与人体形态的吻合方式需要通过人体生理和物理上的分析来得到。

4. 产品形态人机性能进化设计的原型系统

作者在西北工业大学工业设计研究所自主开发的工业设计软件“中华设计 R1.0”^[8]基础上建立了产品形态人机性能进化设计的原型系统。

1. 产品形态人机性能进化设计过程模型

包含三个层次的产品形态人机性能设计工作流程如图 1：

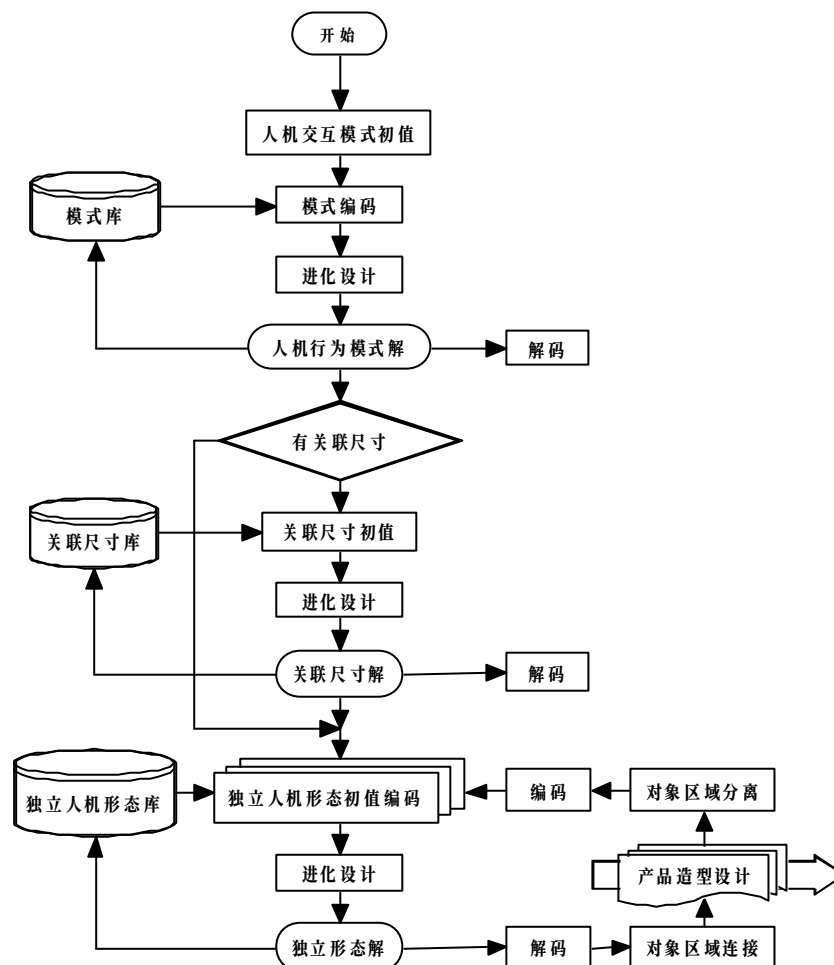


图 1 产品形态人机性能的进化设计流程图

产品形态的人机设计过程会受到许多非人机的因素影响,如希望某种被证明成功的形态风格在新设计中得到延续;或者构造一个具有某种语义的形态;或者由于物理功能或技术的需要,使设计只能在一个初具雏形的形态基础上进行;或者对形状有诸如对称、曲率等方面的要求;或者某些没有明确的原因但客户要求的形态等等。形态人机的进化设计过程需要考虑这些情况,并为设计师的个人创意行为提供一定的设计自由度。

对非人机形态因素的处理可以按如下方式进行：

- 1) 首先按层次分类,划归到不同的设计阶段内处理；
- 2) 对要求具有某种雏形的形态,从淘汰率和后代个体数量两方面人为提高其适应度,使其在对进化方向的影响力上占据优势；

- 3) 对编码的局部码段的权重进行处理，以区分不同的重要性；
- 4) 刚性的形态约束通过算法处理；
- 5) 提供对编码进行强制操作和对方案进行人工选择的交互界面。

2. 进化设计计算过程模型

对进化计算中主要进化概念与行为的算法构想如下：

- 1) 种群：代表设计问题潜在解集的一系列编码方案。

以两种方式产生初始种群：随机方式与目标方式。随机方式在编码的有效值范围内以随机的方式产生多种个体方案组成种群；目标方式产生的种群个体则带有某种设计期望，或是一些经过编码的成功设计实例，或是上一轮进化计算得到的优化方案。

- 2) 继承：子代设计方案对种群中部分强适应性个体的部分特性的保留。

以复制（reproduction）与重组（crossover）两种方式进行继承操作。继承是对已经存在的局部特性群寻找其最佳组合方案的一种方法。

- 3) 变异：编码的局部码段值的改变。

变异是进化设计算法产生创造力的主要来源。本文的研究以创新、调整和渐变三种方式实施变异操作。创新是一种幅度较大的随机变异，主要用于概念设计，为了保留创新的内容不被淘汰掉，可以人为地调低适应度阈值，或用交互操作取代适应度函数来控制创新方案的选取。调整是对码段值进行局部小规模修改以获得多样性和随机产生高适应度个体，多用于对创新方案的进一步加工。渐变是基于某些特殊要求让部分代码段的值固定地朝某个方向持续变异来观察设计结果，也可以根据具体设计需求让基因型（即设计问题的编码）的多个基因片断以较复杂的函数关系进行变异。

- 4) 选择：根据适应度函数值或交互操作来确定父个体选取、子代的存活和种群中被子代替换掉的个体。选择是控制种群向高适应度方向进化的行为。

对每一层次内的进化设计计算，其基本工作流程如图 2：

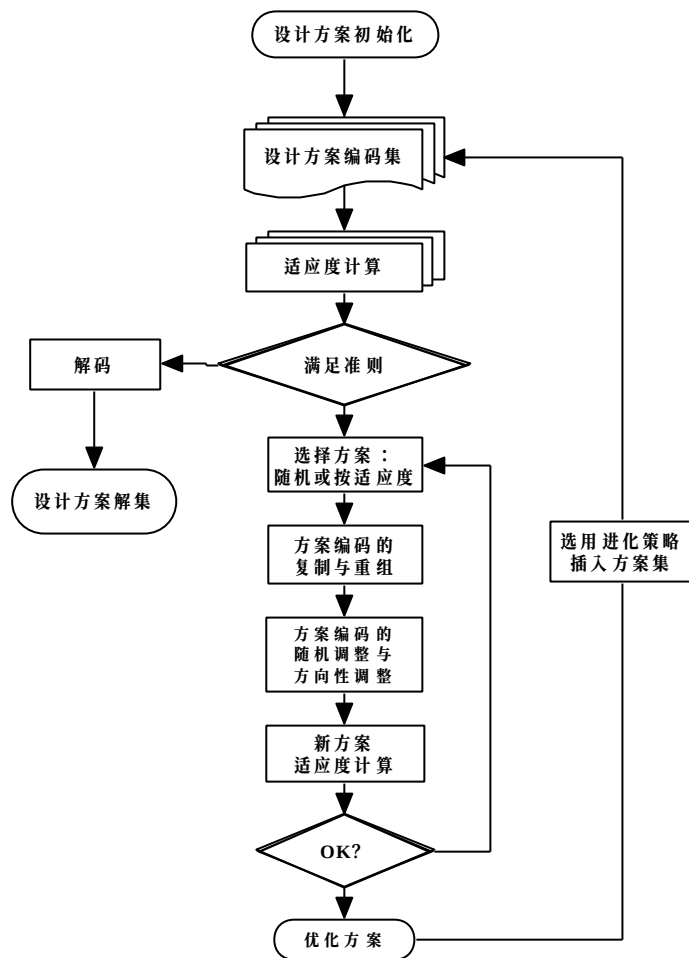


图2 进化算法流程图

5. 结论

基于遗传算法的人机设计在某种模式构成的解空间中由计算机自动产生多种设计方案，并通过程序中内置的评价准则或设计师的交互操作对方案进行选择，经过多轮改进与选择最终得到满意的方案。与基于逻辑的传统设计方法不同，这种设计方法以随机搜索的方式寻找设计问题的解，但它们都需要共同的设计方案表达工具，即某种通用设计平台，这是与设计/制造一体化流程接轨的必要条件。

经过本文的分析研究得出如下结论：

- 1) 应用进化原理和遗传算法的数学工具进行产品形态的人机性能设计是可行的。
- 2) 采用分层的方式规划人机设计从概念设计到详细设计的不同阶段，针对不同层次的人机设计问题采用不同形式的编码方案与适应度函数，便于进化设计辅助方法的研制；对产品形态的人机设计问题的分层方式可以较好地反映人机设计的实际工作方式，有利于设计问题的编码与适应度函数的构造。
- 3) 由于其特殊的性质，人机设计与设计过程的其它方面有许多交叉，细节方面的协调将是人机进化设计的计算机辅助研究的重点。

参考文献

- [1] 陆长德, 余隋怀. 计算机辅助工业设计在 NC 机床造型设计中的应用, 机械工程学报, 1995.5
- [2] 陆长德, 余隋怀, 刘芳. 机电产品 CAID 的图库管理系统, 机械工程学报, 1997.5
- [3] M. A. Rosenman. An exploration into evolutionary models for non-routine design. Artificial Intelligence in Engineering, Volume 11, Issue 3, July 1997, Pages 287-293
- [4] I. J. Graham. Genetic algorithms in computer-aided design. Journal of Materials Processing Technology. Volume 117, Issues 1-2, 2 November 2001, Pages 216-221
- [5] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现. 西安交通大学出版社. 2002
- [6] 雷德明. 多维实数编码遗传算法. 控制与决策. 2000 (3)
- [7] 郝博. 基于遗传算法的机械方案设计系统的研究. 机械 1999 (5)
- [8] 蔡波, 陆长德, 余隋怀, 杨海成. 自顶向下的计算机辅助工业设计几何建模研究. 计算机辅助设计与图形学学报. 2001 Vol.13, No.12

作者简介：

刘肖健, 男, 1972 年生, 博士生, 主要研究方向为计算机辅助产品人机设计。

Email: crazylxj@hotmail.com

李桂琴, 女, 1965 年生, 博士生, 主要研究方向为设计过程的计算机辅助技术。

景韶宇, 男, 1974 年生, 博士生, 主要研究方向为产品大规模网络定制设计。

陆长德, 男, 1939 年生, 博士生导师, 主要研究方向为计算机辅助工业设计技术。

梁艳霞, 女, 1974 年生, 讲师, 主要研究方向为产品 CAD 与计算机图形学。

《CIMS 论文的天地》声明

本站免费向大家提供论文全文, 本站论文除了特别说明的以外都是从作者手中征集得到的。如果您有论文希望上网, 本站可以免费提供论文全文的上网服务。也欢迎您向有关人士推荐我站!

目前网上论文网站较多, 有人非法转载本站论文, 在此提出警告, 本站将对这类行为进行追究。

本站镜像：

- 1、上海付费空间镜像：<http://www.cimspaper.com> <主站, 推荐访问>
- 2、教育网内的镜像：<http://xcchen.yeah.net>
- 3、山东泰安网页吧镜像：<http://cimspaper.wy8.net>
- 4、北京虎翼网镜像：<http://cimspaper.51.net>
- 5、广东阳江中联科技：<http://cimspaper.icpcn.com>

欢迎您参加我站提供的邮件列表 希网提供的列表 分类首页/科学.技术/另类科学

<http://www.cn99.com/cgi-bin/catalog?viewcat=58>

为您提供《CIMS 论文的天地》更新通知, 以及有关的论文和学术信息, 每月至少发送一次。本站有机械制造及自动化、计算机集成制造系统(CIMS)方面的学术论文全文, 也有有关学科的学术论文。