

模块化产品优化配置问题的混合 PSO 求解方法*

刘琼 赵韩 郑彩霞 张明伟

【摘要】 针对产品优化配置问题,建立了客户需求与可配置产品模块实例之间的映射关系,采用动态惩罚函数处理约束条件,构建了产品优化配置问题的数学模型。采用遗传算法的交叉与变异策略和模拟退火算法的 Metropolis 准则改进粒子群算法,将形成的混合粒子群算法作为产品优化配置的求解方法。使用二进制编码方案表示可配置产品的配置方案。通过使用混合粒子群算法进行产品优化配置仿真试验,以及混合粒子群算法与遗传算法的仿真对比试验,证明该方法简单有效,效率较高。

关键词: 产品优化配置 客户需求 模块化 混合粒子群算法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Hybrid PSO for Solving Modular Product Configuration Optimization Problem

Liu Qiong Zhao Han Zheng Caixia Zhang Mingwei
(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

The relationship between customer demand and the modular instances of configurable product was established to solve the product configuration optimization problem. Constrained terms were processed by the dynamic penalty function and the mathematical model was built. The basic PSO algorithm was improved by using crossover and mutation strategy of genetic algorithm and Metropolis rule of simulated annealing algorithm. The hybrid PSO algorithm was used to solve modular product configuration optimization, and the binary encoding scheme was adopted to express the configurable product cases. Finally, a simulation comparison of product configuration optimization was carried out by the hybrid PSO and genetic algorithm respectively. The results show that the hybrid PSO algorithm is simple and effective.

Key words Product configuration optimization, Customer demand, Modular, Hybrid PSO

引言

产品配置是一种快速设计方法,适合于在大规模定制的生产环境下,根据客户需求和产品配置模型,对模块化的产品零部件进行组装,快速生成个性化产品^[1]。如何在产品配置问题的解中,按照一个或多个目标进行优化,得到一个最优或较优配置方案,是一个重要问题。

目前,大多是将产品优化配置问题转化为组合优化问题,采用智能优化算法求解。常用的方法有

Tabu 搜索算法^[2]、模拟退火算法^[3]、病毒进化遗传算法^[4]和混合鱼群蚁群算法^[5]等。本文采用文献^[3]的建模思想,对其进行改进以建立产品优化配置模型,采用一种简单、高效的计算方法进行产品优化配置。

1 基本描述

1.1 客户需求的表达

客户需求的表达就是将客户需求反映到产品性能指标上,实现客户需求域向产品功能域的映射。

收稿日期: 2007-09-03

* “十五”国家科技攻关计划资助项目(项目编号:2005BA201A83)

刘琼 合肥工业大学机械与汽车工程学院 博士生, 230009 合肥市

赵韩 合肥工业大学机械与汽车工程学院 教授 博士生导师

郑彩霞 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生

张明伟 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生

本文首先获取用户需求,通过用户需求-产品性能的相关度矩阵将用户需求转化为用户配置,然后通过产品族模块实例-产品性能的相关度矩阵将用户配置转化为工程配置。

1.2 可配置产品的模块化

模块是可配置产品中结构相对独立,且具有一定功能的零部件及其组合。按照模块在产品中发挥的作用,可以将模块分为基本模块、辅助模块和可选模块,基本模块和辅助模块可以合并为必选模块^[3]。

基于客户需求的多目标模块化产品优化配置问题可以描述为:产品族 P 由 M_1 个必选模块和 M_2 个可选模块组成,每个模块 M_i 有 n_i 个模块实例,每个模块实例对应着相应的产品性能相关度、价格和交货期。根据用户提出的需求,从 M_1 个必选模块中各选择一个实例,在 M_2 个可选模块中选择 N_2 ($N_2 \leq M_2$) 个实例,组成模块化产品配置实例,使配置后的产品实例相对于用户需求为最优解。

2 产品优化配置问题的数学模型

2.1 目标函数的建立

用户需求向量为: $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_n]^T$, 对应的权重向量为: $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 。

用户需求-产品性能的相关度矩阵表示为

$$\mathbf{M}_{C-F} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{f1} & \cdots & r_{fn} \end{bmatrix}$$

式中 r_{ij} ——第 i 项客户需求与第 j 项产品性能的相关度

附加权重后,得到客户需求对产品性能的相关度向量为

$$\mathbf{G} = \mathbf{M}_{C-F} \mathbf{W} =$$

$$\left[\sum_{m=1}^n (r_{1m} \omega_m), \sum_{m=1}^n (r_{2m} \omega_m), \dots, \sum_{m=1}^n (r_{fm} \omega_m) \right]^T \quad (1)$$

产品族的模块实例-产品性能的相关度矩阵表示为 \mathbf{M}_{M-F} 。

产品各项性能的权重向量为: $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_f]^T$, 则产品模块实例所能提供的基于客户需求的综合性能相关度可以表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{M-F} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_f \end{bmatrix} \mathbf{G}$$

使用模块实例选择向量 $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \dots,$

$\sigma_{M_1+M_2}]^T$ 表示模块实例是否被选择。模块实例选择后所确定的一个产品实例基于客户需求的综合性能表示为 $P = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{M}$ 。用函数表示为

$$P = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{M_i} \sum_{k=1}^{c_{ij}} \left\{ \sigma_{ijk} \sum_{h=1}^f \left[t_{ijkh} x_h \sum_{m=1}^n (r_{im} \omega_m) \right] \right\} \quad (2)$$

令各模块实例的价格向量为: $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_{M_1+M_2}]^T$, 则模块实例选择后所确定的产品实例价格为 $C_i = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{C}$ 。价格约束为 $C_i \leq C_m$, C_m 为客户的预算价格。

2.2 模块之间的约束

采用罚函数法将有约束的组合优化问题转化为无约束的组合优化问题,采用动态惩罚的方式:在搜索开始时,给不可行解较小的惩罚,使搜索可以跨过可行区域进行;随着搜索次数的增加,对不可行解的惩罚逐渐加大,从而使搜索收敛到可行区域^[2]。

3 算法概述

3.1 基本粒子群算法

粒子群算法的基本参数为: $P_i(t)$ 表示粒子 i 经过 t 次迭代后,相对目标函数的最好位置; $X_i(t+1)$ 为粒子 i 经过 $t+1$ 次迭代后,当前所在位置; $P_g(t)$ 为 t 次迭代后的全局最优位置。

由于粒子群算法是用于求解连续型函数优化问题,当该算法用于求解离散的组合优化问题时,求解过程容易产生早熟、参数敏感等问题。因此,在运用粒子群优化(particle swarm optimizer,简称 PSO)算法解决组合优化问题时,需要对基本的 PSO 算法进行改进。

3.2 混合 PSO

混合 PSO 相对于基本 PSO 有 3 方面的改进。进化策略借鉴遗传算法的交叉运算:将粒子群中每个粒子的个体最优位置与当前的全局最优位置作为父代,进行交叉运算,形成下一代的粒子。为了避免 PSO 因为参数设置与初始解空间的影响而产生早熟的现象,在求解过程中对个体最优位置按照一定概率进行变异操作,并将模拟退火算法的 Metropolis 抽样准则融入到 PSO 算法中的全局最优位置计算中。算法的终止条件设定为完成指定的迭代次数。混合 PSO 算法的流程图如图 1 所示。

4 产品配置问题的混合 PSO 设计

把产品配置问题的数学模型转化为混合 PSO 的计算方案是解决该问题的关键。它包括个体编码、目标函数、进化策略以及动态惩罚等。

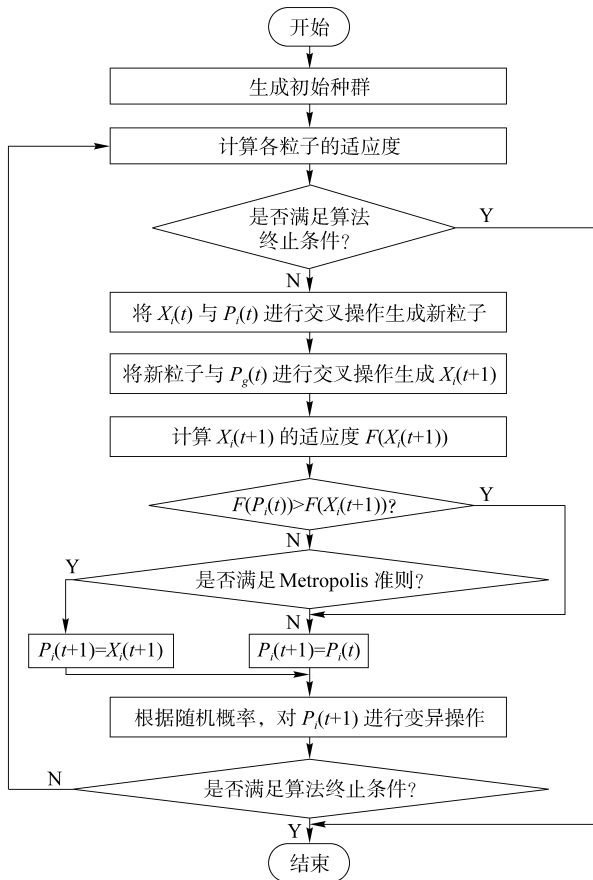


图 1 混合 PSO 算法流程图

Fig.1 Flowchart of HPSO algorithm

4.1 个体编码

一个个体编码由 m 个二进制码组成, 对应着 m 个模块实例。编码值为 1 表示该模块实例被选中; 编码值为 0 表示该模块实例不被选中。由于一个产品模块包含若干个模块实例, 这若干个模块实例对应的编码段组成了一个产品模块编码段。在模块内部, 各模块实例是互斥的, 因此在一个产品模块编码段内至多有一个编码的值为 1。必选模块对应的编码段内必须有一个编码的值为 1, 在可选模块对应的编码段内编码的值可以都为 0。

4.2 数学模型

模块化配置优化设计是以客户的需求为驱动因素的, 通过建立用户需求到产品性能指标的映射, 以及产品性能指标到模块实例的映射, 得到用户需求与模块实例性能的相关度。以可配置产品实例的性能与客户需求的相关度最大为目标函数, 以产品价格作为约束条件, 在满足约束条件下求目标函数的最大值 $\max(P)$ 。

4.3 进化策略

采用 3.2 节所描述的交叉、变异和模拟退火策略, 具体流程见图 1。

4.4 动态惩罚

采用动态惩罚方法解决模块化配置优化设计中

模块实例之间的约束问题, 表示为

$$f(t+1) = \begin{cases} 0 & (\text{约束满足}) \\ (C_S/T_S)M & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $f(t+1)$ ——惩罚项
 C_S ——当前搜索次数
 T_S ——总搜索次数
 M ——一个较大的数

5 混合 PSO 仿真

采用混合 PSO 方法来对某自行车产品族进行模块化优化配置。自行车产品模块、各模块实例及价格等如表 1 所示。

表 1 自行车产品模块、各模块实例及其价格

Tab.1 Modules, instances and prices of each instance

序号	模块名称	模块实例选项	模块属性	价格/元
1	车体	普通城市车	必选	160
		男士城市车		190
		折叠车		230
		淑女车		260
2	车把	弯把	必选	40
		直把		30
3	制动件	普通车闸	必选	15
		耐用型车闸		30
4	车轮	小轮	必选	60
		大轮		55
5	链罩	全链罩	必选	15
		半链罩		12
6	传动系	普通型	必选	50
		变速型		80
7	车座	普通型	必选	20
		舒适型		30
8	车筐	车筐	可选	7
9	车锁	车锁	可选	8
10	变速系	变速系	可选	35

约束定义如下: 当选择折叠车时, 车轮只能选择小车轮; 如果选择变速系, 传动系就要选择变速型。

自行车的性能指标主要有: 速度、重量、耐用度、安全性、舒适度、尺寸和外形。采用层次分析法, 得到自行车的各项性能指标权重向量为: $[0.142\ 3, 0.121\ 5, 0.169\ 8, 0.156\ 1, 0.161\ 0, 0.107\ 0, 0.142\ 3]$ 。客户提出的需求为: 速度快、重量轻、舒适性好、尺寸小巧, 价格不超过 500 元。客户需求权重向量为: $[0.405\ 0, 0.236\ 3, 0.132\ 6, 0.226\ 1]$ 。

模块与产品性能指标相关度矩阵 M_{M-F} 及客

户需求与产品性能指标相关度矩阵 M_{C-F} 为

$$M_{M-F} = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 3 & 3 & 9 & 1 & 1 \\ 3 & 9 & 3 & 3 & 1 & 3 & 3 \\ 9 & 9 & 3 & 3 & 9 & 9 & 9 \\ 3 & 3 & 9 & 9 & 9 & 1 & 9 \\ 0 & 1 & 9 & 3 & 9 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 9 \\ 0 & 0 & 3 & 9 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 9 & 9 & 3 & 3 & 1 \\ 9 & 3 & 9 & 1 & 9 & 9 & 3 \\ 9 & 3 & 3 & 3 & 3 & 9 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 9 & 3 & 3 & 3 \\ 9 & 1 & 1 & 3 & 1 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 \\ 9 & 3 & 3 & 3 & 9 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 9 & 1 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 9 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 1 & 9 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & 9 & 1 & 0 & 1 \\ 9 & 1 & 3 & 3 & 3 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

$$M_{C-F} = \begin{bmatrix} 9 & 1 & 3 & 1 \\ 3 & 9 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & 9 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 9 \\ 0 & 1 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$

设定迭代次数为 400, 模拟退火的初温为 1000。采用 Matlab 进行模拟, 得到的最优粒子为: $[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1]$, 性能值为 94.6129, 价格 497 元。

6 算法的仿真对比

为了比较混合 PSO 算法与遗传算法两者的效率, 设计了一组仿真对比试验, 分别使用混合 PSO 算法与遗传算法对算例进行求解。每次求得全局最优解时, 记录最优值首次出现的代数与时间, 每种算法记录 15 次仿真结果。运行环境为 Windows XP professional SP2, CPU 为 AMD Athlon XP1600+, 内存为 512 MB DDR, 使用的仿真软件为 Matlab 6.5。

使用与混合 PSO 算法相同的个体编码方式作为遗传算法染色体的编码方式。目标函数与混合 PSO 算法相同。种群中的染色体个数为 300, 交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.1。遗传算子的选择采用轮盘赌的方法, 交叉操作采用两点交叉。终止条件为给定一个最大的进化代数: 100。得到的最优染色

体为: $[0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1\ 1]$, 对应的性能值为 94.6129, 价格为 497 元。由此可见, 遗传算法与混合 PSO 算法所求得的最优解相同。

采用混合 PSO 算法与遗传算法各计算 15 次, 得到的仿真结果对比如表 2 所示。

表 2 混合 PSO 算法与遗传算法的仿真结果对比

Tab.2 Comparison of simulation results between HPSO and GA

仿真次序	混合 PSO 算法		遗传算法	
	最优值首次出现代数	所需时间/s	最优值首次出现代数	所需时间/s
1	33	1.863	19	8.162
2	49	1.742	23	7.961
3	22	1.632	64	7.921
4	102	1.672	66	7.931
5	25	1.583	40	7.902
6	58	1.682	13	7.911
7	109	1.572	78	7.921
8	101	1.572	40	7.911
9	18	1.593	28	7.931
10	29	1.582	56	7.841
11	70	1.593	83	7.992
12	68	1.603	91	8.312
13	37	1.602	31	8.112
14	45	1.883	30	7.872
15	49	1.733	21	8.883
平均值	54	1.660	46	8.038

试验数据表明: 混合 PSO 算法与遗传算法相比, 全局最优解首次出现的代数略高, 但所需时间却大为减少。对于产品优化配置问题, 求解时间才是更为重要的因素。以上对比试验数据表明混合 PSO 算法比遗传算法的效率, 并且具有简单、高效的特点。

7 结束语

当产品配置问题的规模较大, 而配置约束条件或客户需求较少, 或者用户的需求比较模糊时, 会产生数量众多的可行解, 导致用户难以决策。针对这一问题, 使用动态惩罚函数惩罚违反约束的配置方案, 改进了 PSO 算法, 用于进行产品优化配置。以自行车作为配置实例, 建立了产品优化配置模型, 根据用户需求求得最优配置方案, 仿真结果证明了该方法可有效用于基于客户需求的多目标模块化产品优化配置。最后将混合 PSO 算法与遗传算法进行了比较, 结果证明该算法具有简单、高效的特点。

参 考 文 献

- 1 Chao Ping Yi, Chen Tsung Te. Analysis of assembly through product configuration [J]. Computers in Industry, 2001, 44 (2): 189~203.
- 2 雒兴刚,汪定伟,姜慧研,等. 基于 Tabu 搜索算法的产品族配置问题研究[J]. 系统仿真学报,2006, 18(5):1 131~1 135.
Luo Xinggong, Wang Dingwei, Jiang Huiyan, et al. Research for configuration problem of product family based on tabu search algorithm[J]. Journal of System Simulation,2006,18(5):1 131~1 135. (in Chinese)
- 3 王海军,孙宝元,张建明,等. 客户需求驱动的模块化产品配置设计[J]. 机械工程学报,2005,41(4):85~91.
Wang Haijun, Sun Baoyuan, Zhang Jianming, et al. Modular product configuration design for customer requirement-driven engineering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(4):85~91. (in Chinese)
- 4 胡仕成,徐晓飞,战德臣. 大型产品结构优化问题的病毒进化遗传算法[J]. 计算机集成制造系统-CIMS,2003,9(3): 202~205.
Hu Shicheng, Xu Xiaofei, Zhan Dechen. A virus evolutionary genetic algorithm for large product structure optimization problem[J]. CIMS,2003,9(3):202~205. (in Chinese)
- 5 高德芳,赵勇,郭杨,等. 基于混合鱼群-蚁群算法的模块化产品配置设计[J]. 机械,2007,34(1):7~10.
Gao Defang, Zhao Yong, Guo Yang, et al. Modular product configuration design based on artificial fish-swarm-ant colony algorithm[J]. Machinery,2007,34(1):7~10. (in Chinese)
- 6 周宏明,薛伟,李峰平,等. 面向客户定制需求的产品配置系统[J]. 农业机械学报,2007,38(8):132~136.
Zhou Hongming, Xue Wei, Li Fengping, et al. Research on product configuration system based on customization demand [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(8):132~136. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 116 页)

- 8 戚 ■ 徽. 面向能源节约的产品绿色设计理论[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.  
Qi Yunhui. Research on theory and method of green design for energy saving[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 9 戚 ■ 徽,王淑旺,刘志峰,等. 面向能量优化的产品结构要素组合设计[J]. 机械工程学报,2008,44(1):161~167.  
Qi Yunhui, Wang Shuwang, Liu Zhifeng, et al. Product structure element clustering design for energy optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2008,44(1):161~167. (in Chinese)
- 10 孟明辰,韩向利. 并行设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- 11 冯毅雄,谭建荣,伊国栋. 零件结构的联动式进化设计方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(1):40~46.  
Feng Yixiong, Tan Jianrong, Yi Guodong. Scheme of linkage-evolutionary design for parts structure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(1):40~46. (in Chinese)
- 12 张建明,魏小鹏,张德珍,等. 基于能量交互模型的机械系统原理方案设计[J]. 中国机械工程,2004,15(9):820~823.  
Zhang Jianming, Wei Xiaopeng, Zhang Dezhen, et al. Principle scheme design of mechanical systems based on energy interaction model[J]. China Mechanical Engineering, 2004,15(9):820~823. (in Chinese)
- 13 黄海鸿,戚 ■ 徽,刘光复,等. 面向产品设计的全生命周期能量分析方法[J]. 农业机械学报,2007,38(11):88~92.  
Huang Haihong, Qi Yunhui, Liu Guangfu, et al. Method for life cycle energy analysis of product design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(11):88~92. (in Chinese)