DOI: 10.3901/JME.2019.17.153

基于属性映射的产品绿色设计方案优化方法^{*}

张雷 杨凯 张城 秦旭 赵希坤
(合肥工业大学机械工程学院 合肥 230009)

摘要: 针对产品绿色设计方案受多因素耦合影响, 不易对其优化的问题, 提出基于属性映射的产品绿色设计方案优化方法。基于产品功能结构分解模型, 建立产品模块实例库, 采用正交试验设计安排样本空间, 基于支持矢量回归(Support vector regression, SVR)理论, 对优化变量与优化目标间的映射关系进行拟合, 进而建立产品设计方案多绿色属性与多模块功能实例之间的映射关系; 采用非支配排序遗传算法(Non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II), 选取绿色属性最优的产品设计方案作为目标, 对离散变量进行多目标优化, 从众多可能解中快速、准确的寻出 Pareto 解集, 从而生成产品绿色设计优化方案。以喷墨打印机产品绿色设计方案优化为例, 验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 属性映射; 绿色设计; 方案优化; NSGA-II; 支持矢量回归

中图分类号: TH122

Optimization Method of Product Green Design Scheme Based on Attribute Mapping

ZHANG Lei YANG Kai ZHANG Cheng QIN Xu ZHAO Xikun
(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Due to the influences of multi-factors coupling on the green design of products, it is not easy to optimize the green design scheme. An optimization method of product green design scheme based on attribute mapping is proposed. By decomposing the function and structure of product, the product module instance library is established. The sample space is arranged by orthogonal experimental design. Using the support vector regression(SVR)theory to fit the mapping relationship between optimization variables and optimization objectives and establish the mapping relationship between the green attributes of products' design scheme and module function instance; Taking the optimal green attributes of products' design scheme as the goal and combining the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) to carry out the multi-objective optimization of discrete variables so that the Pareto solution set can be quickly and accurately found from many possible solutions and the optimized green product design schemes are obtained. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by taking the green design scheme generation of a ink jet printer as the case.

Key words: attribute mapping; green design; scheme optimization; NSGA-II; support vector regression

0 前言

随着科技水平、社会生产力的急剧提升, 人们的物质需求得到了有效保障, 但随之带来了环境和生态系统的恶化, 因此对产品进行绿色设计已成为产品设计的趋势。要从根本上提升产品的绿色属性, 本质上要从概念设计阶段对产品的设计方案进行优化。

目前有许多学者对产品设计方案生成与优化的

相关问题进行了研究。在设计方案生成方面, HSIAO等^[1]采用形态分析法提取产品外观特征, 结合模糊综合评价获得用户偏好信息, 以自行车设计为例验证方法的可行性; LI等^[2]综合考虑市场、商业等要素, 以客户需求为驱动, 融合贝叶斯聚类和粗糙集理论提出一种产品概念生成方案; LO等^[3]提出一种基于产品三维形态图的质量功能展开, 从而满足多方面需求下的典型产品改进设计; 在属性映射研究方面, 杨传明等^[4]构建矛盾矩阵, 描述主体低碳需求和低碳设计措施映射关系; 石宇强等^[5]在对顾客需求重要度使用层次分析法排序的基础上, 利用质量功能原理完成顾客需求重要度向产品技术需求的

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51575152)。20180711 收到初稿, 20181218 收到修改稿

映射;HSIAO 等^[6]将遗传算法与感性工程理论结合,将定性数据量化为虚拟变量,通过三维模型降低认知不一致性,利用快速原型机实现虚拟模型向真实模型转化;在多目标优化研究方面,白峻仁等^[7]建立轻油收率、焦炭产率和硫化物排量的多目标优化模型,利用改进的多目标量子粒子群算法进行求解,有效解决反应再生过程多目标优化问题;SHINDE 等^[8]使用田口正交数值处理,采用静态、动态、灰色关联综合分析,确定滑动轴承的最佳表面纹理参数;KANG 等^[9]对温度区间进行不同划分实验,归纳出一种基于最小接近温度划分的的热交换网络的多目标优化方法。

然而,由于多因素关联耦合对产品绿色设计有一定的影响,产品绿色设计无法采用当前主要的设计方案优化方法。针对上述问题,本文提出了一种基于产品设计方案绿色属性映射的产品绿色设计方案优化。将产品设计方案相关绿色属性,具体为环境属性、拆卸属性、回收属性,与模块实例组合之间进行关联映射,采用 SVR 理论拟合目标函数,进而以模块实例为最小遗传单元,利用 NSGA-II 处理离散变量多目标优化问题,实现产品绿色设计方案的优化。

1 产品绿色设计方案优化问题描述

在进行产品绿色设计方案优化的过程中,研究人员需要在考虑多类绿色属性并进行综合决策。相关专家学者已经对产品多方面进行了研究,如拆卸属性^[10]、资源消耗^[11]、回收属性^[12]、能源消耗^[13]、材料环境属性^[14]等。产品具有复杂系统,在抽象并分解其功能后,能得出产品由不同功能的模块单元组合而成的结论,而不同的模块单元也对应着多种模块实例,“组合爆炸”也是在形成产品设计方案的过程中需要考虑的问题。并且,不同的模块实例会对产品的绿色性能造成不同程度的影响,这种影响程度(映射关系)一般具有两个特点,非线性和相互制约性。因此,在寻找最优产品绿色设计方案时,需要采用特定方法。产品绿色设计方案优化问题描述如下

$$\max F = [F_1(x), F_2(x), \dots, F_n(x)] \quad (1)$$

约束条件为

$$\begin{aligned} X &= [x_1, x_2, \dots, x_d, \dots, x_D] \\ x_d &\in DB \end{aligned} \quad (2)$$

式中, X 为 D 维决策矢量; F_n 为产品设计方案相关绿色属性映射函数; n 为优化目标总数; DB 为产品所有模块实例不同排列组合构成的集合。

2 产品设计方案绿色属性映射与优化

2.1 产品设计方案绿色属性映射

生成产品绿色设计方案的过程可定义如下:基于获取的客户产品需求的,用公理化设计方法和质量功能展开,对产品功能进行分解,实现功能到结构的映射,并生成些许模块单元,这些模块单元之间功能相互独立。基于独立的模块单元,构建产品模块实例库,通过组合不同模块实例,生成绿色性不同能的产品设计方案。产品绿色设计方案有大量绿色属性,不同的模块实例对产品设计方案绿色属性影响程度也会不同,因此产品设计方案绿色属性到模块实例的映射可定义如下

$$f_{g-m}: GP \rightarrow MF \quad (3)$$

式中, GP 反映了产品设计方案绿色属性; MF 为模块实例; f_{g-m} 则为映射函数;

图 1 为产品设计方案绿色属性映射。考虑到模块实例和绿色属性量大且类型较多,它们之间的映射函数通常来说无法通过普通的数学函数进行表达,所以要解决属性映射问题,就要寻找数据拟合的方法,即如何将绿色属性与模块实例之间的映射关系表示出来。SVR 作为一种新型机器学习方法,引入了不敏感损失函数,优化了支持矢量回归方法,用于对函数的估计。因此本文采用 SVR 算法来实现绿色属性和模块实例之间的映射关系表达。

图 1 产品设计方案绿色属性映射

现有 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k) \in \mathbf{R}^n \times \mathbf{R}$ 训练样本集, 利用非线性映射 φ 将 x 映射到高维特征空间, 之后在该空间建立线性回归函数, 并引入 ε 不敏感损失函数^[15], 考虑允许拟合误差, 引入松弛变量 ξ_i, ξ_i^* , 因此对回归问题的求解可以转化为求以下目标函数的最小值, 即

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\xi_i + \xi_i^*) \quad (4)$$

约束条件为

$$\begin{cases} y_i - \omega \cdot \varphi(x_i) - b_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ \omega \cdot \varphi(x_i) + b_i - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

式中, ω 为权值变量, b 为偏置, C 为惩罚因子。引入 Lagrange 乘子继续求解, 得到基于核函数的 SVR 回归函数。

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad (6)$$

其中, α_i, α_i^* 是引入的非负拉格朗日乘子, $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$ 为核函数, 该函数满足 Mercer 条件。本文需要对核函数进行处理, 处理函数选用高斯径向基函数(Radial basis function, RBF)。并且本文通过均方根误差(Root mean square error, RSME)来评估 SVR 模型性能。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i^* - y_i)^2} \quad (7)$$

式中, y_i^* 为预测值; y_i 为评价价值; n 为样本数量。

基于 SVR 的绿色属性映射过程主要分为四个阶段。

(1) 产品模块实例库构建: 产品功能结构模块分解模型需要在产品设计任务阶段得到确定, 之后基于产品模块分解模型对功能独立的模块单元进行生成, 以实例的形式对模块单元进行分类与存储, 模块实例库得以形成。

(2) 样本容量确定: 在正交试验设计中, 有代表性的样本被选为对象, 用于分析全面试验样本中的正交性, 被选样本具有两个特点, 分别是均匀分散和整齐可比。本文从产品模块实例库出发, 对产品模块单元(因素)和模块实例(水平)进行确定, 从标准正交试验表中选择适合的正交表, 继而对样本进行合理的选择。

(3) 绿色属性映射: 本文从模块层面出发, 采用 SVR 算法对产品设计方案的环境现状进行打分评估。SVR 训练模型的输入矩阵选用模块实例组合矩阵, 输出矢量选为产品设计方案绿色属性, 优选惩罚系数 c 和核函数半径 g , 通过 SVR 训练模型得到映射函数。

(4) 映射模型性能评估: 基于生成的映射函数, 另选模块实例组合矩阵作为输入矩阵, 通过 SVR 预测模型预测产品设计方案绿色属性。与此同时,

采取打分的形式评估输入模块实例组合矩阵的绿色属性, 最后用 RMSE 评估映射模型的性能, 实现产品设计方案绿色属性与模块实例的映射。

在产品设计方案绿色属性映射过程的前两个阶段, 产品族 P 通过功能模块分解, 生成 M 个模块单元, 每个模块单元包含 N 个模块实例, 对生成的模块实例进行分类与存储形成模块实例库。在多个功能模块里选择多个不同的模块实例, 这些功能模块具有不同的模块实例库。因此, 理论上可构成 N^M 种绿色性能相异的产品设计方案。当 N 和 M 数值较大时, 会出现“组合爆炸”问题。基于正交试验设计方法, 研究对象定为有代表性的产品绿色设计方案, 对产品设计方案的样本容量进行确定。图 2 为产品模块实例组合过程。

图2 产品模块实例组合过程

2.2 基于 NSGA-II 的产品绿色设计方案优化

在产品绿色设计方案优化的过程中, 会有多个目标函数同时存在, 并会有相同的决策变量对各目标进行相互制约。若对其中单个子目标进行优化, 则可能会同步影响到其他单个甚至多个目标的性能, 想要同时获得所有最优的子目标通常是困难的, 因此很难判断多目标问题解的优劣。

美国学者 DEB 提出了一种新型的带精英策略的多目标遗传算法 NSGA-II^[16]。该算法将快速非支配排序方法和精英保留策略方法相结合, 并基于拥挤距离算子和非劣等级排序的锦标赛选择算子, 使得算法能够快速找出全局最优解。

该算法具体过程如下所述。

(1) 初始种群 P_0 随机产生, 非劣排序种群 P_0 , 对同一集合的所有个体进行相同的非支配序 i_{rank} 的赋值, 直到全部个体被分级; 之后对 P_0 进行常规遗传算法的操作, 得到新种群 Q_0 。

(2) 结合第 t 代产生的新种群 Q_t 与父代 P_t 种群, 形成种群 R_t , 非支配排序种群 R_t , 得到部分非支配集 Z_t 。

(3) 对所有非支配集 Z_t 进行拥挤度计算, 根据计算得出的拥挤度继续进行排序, 并结合锦标赛法

选取最优个体, 形成种群 P_{t+1} , 种群规模记为 N 。

(4) 对种群 P_{t+1} 执行常规遗传操作, 包括选择、交叉、变异, 得到种群 Q_{t+1} , 在终止条件成立时, 结束算法。

图 3 为基于 NSGA-II 的产品绿色设计方案优化过程。根据 SVR 算法, 算法优化适应度函数选定为映射函数, 编码可行解域的个体, 之后生成初始种群, 该种群由个体随机生成而得到, 基于 SVR 映射函数对个体适应度值进行计算后, 非支配排序所有适应度值, 得到非支配解集。当终止条件成立时, 即可寻得产品最优绿色设计方案, 否则继续根据遗传算子进行算法操作(选择、交叉、变异)。

图 3 基于 NSGA-II 的产品绿色设计方案优化

本文选取的决策变量是整数变量, 而随机初始化的父代和遗传操作后产生的子代中的变量取值很可能不是整数值, 因此有必要对这些变量进行一些处理^[17]

$$x_i = \begin{cases} \lceil x_i \rceil & \text{rand} < 0.5 \\ \lfloor x_i \rfloor + 1 & \text{rand} \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

采用随机的方式, 对变量的取值进行向上取整或者向下取整。

3 应用实例

喷墨打印机作为现代办公常用产品, 产品种

类繁多、市场需求量大、市场竞争激烈。随着客户对打印机绿色性能要求的提升, 为了应对更好的环境性能要求。本文以一种市场需要较大的某品牌喷墨打印机为例, 对已构建的理论体系进行实例分析。

基于打印机功能的不同, 将该品牌打印机划分为 7 个模块单元。分别为 A 走纸模块、B 打印模块、C 传动模块、D 清洗模块、E 控制模块、F 检测模块、G 支撑与保护模块。各类模块单元又可以具体展开为 4 个典型模块实例。以模块实例为基准, 进行分类、筛选、数据库构建。根据打印机模块实例库中各模块实例的随机组合, 理论上可以形成 4^7 种不同的产品设计方案。本文采用前述方法实现该系列打印机的绿色设计方案优化。该系列喷墨打印机的主要结构如图 4 所示。

图 4 喷墨打印机主要结构图

3.1 设计方案绿色属性映射

绿色属性通常包含材料环境属性、资源消耗属性、能源消耗属性、拆卸属性、回收属性等方面。由于喷墨打印机制造材料、硒鼓纸张等损耗材料消耗过高, 打印机拆卸工艺复杂难以再利用等问题所带来的环境影响日益突出; 同时, 由于国内外关于产品绿色属性的政策法规日益严格, 喷墨打印机的绿色属性成为了生产中必须要考虑的因素。

本文主要考虑喷墨打印机材料环境属性、拆卸属性、回收属性, 基于项目历史数据、综合分析各方面研究成果, 形成产品设计方案绿色属性评价, 具体建立环境现状评价表, 如表 1 所示。

综合考虑喷墨打印机走纸、打印、传动等 7 个模块(A, B, C, D, E, F, G), 假设每个模块因素有 4 个水平(1, 2, 3, 4), 采用正交试验原理, 建立正交试验表。同时, 聘请绿色设计领域专家对正交试验表中产品设计方案进行百分制打分, 利用均值处理得到产品设计方案的环境属性、拆卸属性、回收属性评估值, 如表 2 所示。

表 1 环境现状评价表

拆卸属性					
拆卸时间/h	拆卸工具	拆卸可达性	夹具	防护工具	评价值
$t>4$	无合适工具	不可达	非常困难	非常困难	0
$4>t>3$	专用工具	视力可达	困难	困难	4
$3>t>2$	原厂配套工具	实体可达	难	难	8
$2>t>1$	常用机械工具	较好的拆卸空间	一般	一般	12
$1>t>0.5$	常用电动工具	零部件不干涉	简单	简单	16
$0.5>t>0$	无	直接可达	不使用	无	20
回收属性					
回收目的	回收技术水平	回收资源属性	回收环境收益	回收经济性	评价值
一般处理	很低	无	无	无	0
控制污染	低	小	小	低	4
回收能量	较低	较小	较小	较低	8
回收材料	一般	一般	一般	一般	12
可用于再制造	较高	较大	较大	较高	16
直接重用	高	大	大	高	20
材料环境属性					
材料的可替代性	材料的环境影响	材料价格	材料可加工性	评价值	
不可替换	大	高	非常差	0	
低	较大	较高	差	5	
较低	一般	一般	较差	10	
一般	较小	较低	一般	15	
较高	小	低	较好	20	
高	无	非常便宜	非常好	25	

表 2 基于正交试验的 SVR 输入输出训练样本

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
模块(A)	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A4	A4	A4	A4
模块(B)	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
模块(C)	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C2	C1	C4	C3	C2	C1	C4	C3
模块(D)	D1	D2	D3	D4	D2	D1	D4	D3	D3	D4	D1	D2	D4	D3	D2	D1
模块(E)	E1	E2	E3	E4	E2	E1	E4	E3	E4	E3	E2	E1	E3	E4	E1	E2
模块(F)	F1	F2	F3	F4	F3	F4	F1	F2	F1	F2	F3	F4	F3	F4	F1	F2
模块(G)	G1	G2	G3	G4	G3	G4	G1	G2	G2	G1	G4	G3	G4	G3	G2	G1
拆卸属性	48.4	55	60.2	63.2	50.8	65.8	56.5	60.6	48	52.6	59.8	55.2	52	48.4	53.2	48.4
回收属性	48.8	47.6	60.4	60	49.2	55.6	50.4	50.8	60	66	48.2	63.2	52.8	57.6	47.8	60.4
材料环境属性	64	49.5	54	59.5	48.5	58.5	42	56.5	46.5	66	62.5	46.5	60.5	69.5	70	57
试验号	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
模块(A)	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A4	A4	A4	A4
模块(B)	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
模块(C)	C4	C3	C2	C1	C4	C3	C2	C1	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C1	C2
模块(D)	D1	D2	D3	D4	D2	D1	D4	D3	D3	D4	D1	D2	D4	D3	D2	D1
模块(E)	E4	E3	E2	E1	E3	E4	E1	E2	E1	E2	E3	E4	E2	E1	E4	E3
模块(F)	F2	F1	F4	F3	F4	F3	F2	F1	F2	F1	F4	F3	F4	F3	F2	F1
模块(G)	G3	G4	G1	G2	G1	G2	G3	G4	G4	G3	G2	G1	G2	G1	G4	G3
拆卸属性	60.4	67.2	55.6	54.8	68	66	64	55.6	70	54.4	46.8	62.4	51.6	59.6	60.8	55.2
回收属性	65.2	54.8	52.8	53.2	60.8	55.2	54.4	53.2	50.8	59.2	63.2	60.4	58.8	53.2	58.8	64
材料环境属性	56.5	53	56	46.5	54.5	46.5	54.5	53	54	49.5	58.5	49	65	56.5	54.5	60

本文中喷墨打印机产品设计方案采用 RBF 结合 SVR 理论构建绿色属性到模块实例的映射。非线性训练样本集通过 RBF 核函数反馈到高维的特征空间,再利用线性回归函数完成线性回归。具体输入训练样本为表2中前7行正交试验确定的模块实例,输出训练样本为表2中后3行绿色属性参数,利用 SVR 训练映射函数模型。因输入为小规模训练样本,为避免过学习和欠学习,需要寻找最优的训练参数 (c, g) 。本文在 Matlab 软件中采用网格搜索和交叉验证法(K-fold Cross Validation)^[21]寻找最优训练参数并通过支持向量机工具箱 LIBSVM^[22-23]建立产品设计方案绿色属性与模块实例间的映射关联。最优的训练参数 (c, g) 分别为:拆卸属性映射方面 $(1.741, 0.045)$ 、材料环境属性映射方面 $(0.660, 0)$ 、回收属性映射方面

$(0.500, 0)$ 。

为了进一步验证预测模型泛化性能,再选取10个产品模块实例组合方案作为输入样本数据集。采用专家评分的方式对产品设计方案形成绿色属性评估试验值;再利用训练好的映射函数模型,基于 RBF 核函数和最优参数 c, g ,形成产品设计方案绿色属性预测值,如图5所示。通过拟合线段观察发现,产品设计方案映射函数预测值与试验值的拟合良好;但是,由于 SVR 模型是在模型的复杂性与模型学习能力等多方面因素制约下寻求最优,所有少数点存在一定误差。同时,计算拆卸属性、回收属性、材料环境属性方面 RMSE 分别为 0.696、0.465、0.628,验证 SVR 预测模型泛化性能,如表3所示。因此基于 RBF 核函数的 SVR 方法可以实现产品设计方案绿色属性与模块实例的映射。

表3 预测模型的泛化性能

试验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
模块(A)	A1	A2	A1	A4	A4	A3	A1	A3	A3	A2	RMSE
模块(B)	B3	B1	B4	B2	B1	B4	B2	B3	B4	B3	
模块(C)	C4	C4	C3	C4	C3	C3	C2	C2	C1	C1	
模块(D)	D4	D3	D2	D1	D2	D2	D3	D1	D1	D4	
模块(E)	E1	E2	E4	E3	E2	E4	E4	E4	E3	E1	
模块(F)	F4	F1	F3	F4	F3	F1	F2	F2	F1	F3	
模块(G)	G2	G4	G1	G2	G2	G3	G1	G4	G3	G1	
拆卸属性	试验值	68.4	61.8	65.0	58.6	56.6	60.0	55.2	62.2	55.4	0.696
	预测值	67.7	61.3	66.3	58.1	56.3	59.8	54.1	62.3	53.6	
回收属性	试验值	57.0	55.6	56.0	55.8	55.4	57.6	55.2	58.2	60.8	0.465
	预测值	56.5	55.8	55.5	56.1	55.7	57.4	55.2	57.8	60.7	
材料环境属性	试验值	55.5	52.0	49.5	56.5	58.5	54.5	46.0	55.0	56.5	0.628
	预测值	56.2	51.5	50.3	55.9	58.7	54.4	46.9	53.9	56.2

(a) 拆卸属性映射

(b) 回收属性映射

图 5 基于 RBF 的 SVR 属性映射

3.2 产品绿色设计方案的优化

从拆卸属性、回收属性、材料环境属性三个方面考虑,选取已训练 SVR 映射函数预测模型为目标函数,结合 NSGA-II 算法处理离散变量的多目标优化问题,寻找绿色属性最优的产品设计方案。由于初始化后产生的父代和交叉变异后产生的子代的随机性,决策变量的数值存在非整数的可能性。在本文优化过程中采用式(8)对决策变量进行取整;选择算子采用锦标赛法,即采取放回取样的形式从种群中选择 N 个个体,选择适应度最好的个体,将其送入新生成的种群,直至新的种群达到原始种群的规模停止放回取样,并将锦标赛规模 N 设置为 2;采用模拟二进制的交叉方式使父辈染色体中的模式信息在传递到子辈种群时得以保存,并将交叉分布系数 η_c 设置为 20;变异算法采用多项式变异方法^[16],并将变异分布系数 η_m 设置为 20。

本文使用 Matlab 工具,利用十进制编码数目为 200 个的初始种群,进行 600 次迭代,执行编码程序后,经过 600 次全局寻优,得到 Pareto 解集。具体解集如图 6 所示。

3.3 结果分析

(1) 产品设计方案绿色属性到模块实例的映射关联过程分析:观察图 5 可知,本文建立的 SVR 映射模型能够较好的学习绿色属性与模块实例间隐含的规律。进行样本训练可增强本文建立的映射模型对非训练样本具有良好的推广能力。分析表 3 可得,通过对若干测试样本的映射分析,预测产品设

图 6 NSGA-II 三目标空间 Pareto 优化

计方案绿色属性精度满足设定的误差范围,验证了映射模型的泛化能力。

(2) 产品绿色设计方案的优化过程分析:对拆卸属性、回收属性、材料环境属性三目标,使用 NSGA-II 算法进行优化,生成 Pareto 非劣解。观察图 6 可知,三目标属性间相互耦合,最优的产品设计方案无法保证各项属性皆为最优值;且由于 Pareto 解集规模较大,传统的方案评价方法难以有效筛选,需要制定并采用更适合的方法进一步选择,为后期产品的详细设计提供有效指导。

4 结论

(1) 绿色属性映射方面:通过正交试验设计确

定样本空间,选取喷墨打印机模块实例组合为输入,绿色属性为输出,建立样本数据集。引入支持矢量回归 SVR 模型,实现产品设计方案的拆卸属性、回收属性、材料环境属性与模块实例的映射关联。

(2) 多目标优化方面:结合 NSGA-II 算法对产品绿色设计方案的拆卸属性、回收属性、材料环境属性三目标优化;以产品设计方案绿色属性最优为目标,最终得到若干 Pareto 非劣解。

(3) 本文对产品绿色设计方案的优化问题进行了研究。而产品绿色设计的选择与后期的产品详细设计是密切相关的,如何结合产品详细设计过程从众多的 Pareto 非劣解中选择最终的产品绿色设计方案,将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] HSIAO S W, KO Y C. A study on bicycle appearance preference by using FCE and FAHP[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2013, 43(4): 264-273.
- [2] LIN L, GUO G. Customer requirement driving new product concept generation method based on Naïve bayes cluster and RST[J]. Advanced Materials Research, 2012, 490-495: 2160-2164.
- [3] LO C H, TSENG K C, CHU C H. One-step QFD based 3D morphological charts for concept generation of product variant design[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(11): 7351-7363.
- [4] 杨传明, 李晓峰. 多粒度复杂产品供应链低碳设计[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(7): 1717-1725.
YANG Chuanming, LI Xiaofeng. Supply chain low-carbon de-sign of multi-granularity complex product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(7): 1717-1725.
- [5] 石宇强, 吴隔格, 张涛. 瓦楞纸箱包装设计需求分析映射方法[J]. 包装工程, 2015(17): 39-43.
SHI Yuqiang, WU Gege, ZHANG Tao. Requirement mapping method in corrugated cardboard box packaging design[J]. Packaging Engineering, 2015(17): 39-43.
- [6] HSIAO S W, CHIU F Y, LU S H. Product-form design model based on genetic algorithms[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2010, 40(3): 237-246.
- [7] 白峻仁, 易军, 李倩, 等. 面向反应再生过程的量子粒子群多目标优化[J]. 化工学报, 2019, 70(2): 750-756.
BAI Junren, YI Jun, LI Qian, et al. Multi-objective optimization of QPSO for thereaction-regeneration process[J]. CIESC Journal, 2019, 70(2): 750-756.
- [8] SHINDE A B, PAWAR P M. Multi-objective optimization of surface textured journal bearing by Taguchi based Grey relational analysis[J]. Tribology International, 2017, 114: 349-357.
- [9] KANG L, LIU Y, LIANG X. Multi-objective optimization of heat exchanger networks based on analysis of minimum temperature difference and accumulated CO₂ emissions[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 736-748.
- [10] 刘志峰, 杨明, 张雷. 基于 TRIZ 的可拆卸连接结构设计研究[J]. 中国机械工程, 2010(7): 852-859.
LIU Zhifeng, YANG Ming, ZHANG Lei. TRIZ based revised design for disassembly of joint structure[J]. China Mechanical Engineering, 2010(7): 852-859.
- [11] 韩涛, 潘卫国, 王文欢. 基于 LCA 的燃煤锅炉 FGD 超低排放对资源消耗与环境影响评价[J]. 热能动力工程, 2016, 31(9): 75-82.
HAN Tao, PAN Weiguo, WANG Wenhuan. Resource consumption of the ultra low emissions from a coal-fired boiler in the process of flue gas desulfurization (FGD) and evaluation of the impact on the environment based on the life cycle assessment (LCA)[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2016, 31(9): 75-82.
- [12] 朱虎兵, 王玉琳, 刘光复, 等. 废弃液晶显示屏中液晶的回收与性能检测[J]. 环境科学研究, 2013, 26(3): 300-306.
ZHU Hubing, WANG Yulin, LIU Guangfu, et al. Liquid crystal recovery and performance test from wasted liquid crystal display screens[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(3): 300-306.
- [13] MOHAMMADI A, AHMADI M H, BIDI M, et al. Exergy analysis of a combined cooling, heating and power system integrated with wind turbine and compressed air energy storage system[J]. Energy Conversion & Management, 2017, 131: 69-78.
- [14] ALLIONE C, GIORGI C D, LERMA B, et al. From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material[J]. Energy, 2012, 39(1): 90-99.
- [15] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. London: Springer, 1995.
- [16] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [17] 成晓升, 余军合, 战洪飞. 基于 NSGA II 的齿轮减速器多目标优化研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5): 568-572.
CHENG Xiaosheng, YU Junhe, ZHAN Hongfei. Multi-objective optimization of gear reducers based on NSGA II [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(5): 568-572.

- [18] 张城, 刘志峰, 杨凯, 等. 产品环境性能优化潜力识别方法[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 145-153.
ZHANG Cheng, LIU Zhifeng, YANG Kai, et al. Recognition for optimization potential on product environmental performances [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 145-153.
- [19] 高洋, 刘志峰, 黄海鸿, 等. 产品拆卸性能的设计过程评估[C]// 安徽节能减排博士科技论坛, 2007.
GAO Yang, LIU Zhifeng, HUANG Haihong, et al. Design process assessment of product disassembly performance [C]//. Anhui Energy Saving and Emissions Reduction Doctoral Technology Forum, 2017.
- [20] 王淑旺, 刘志峰, 刘光复, 等. 产品回收性能评价方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(3): 611-616.
WANG Shuwang, LIU Zhifeng, LIU Guangfu, et al. Methodological study on recyclability assessment of products[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(3): 611-616.
- [21] HSU C W, CHANG C C, LIN C J. A practical guide to support vector classification[J]. Taipei, Taiwan: Department of Computer Science & Information Engineering, Taiwan University, 2003.
- [22] LIBSVM. A library for support vector machines[EB/OL]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [23] LIBSVM-faruto Ultimate Version. A toolbox with implements for support vector machines based on libsvm[EB/OL]. <http://www.ilovematlab.cn>.
-
- 作者简介: 张雷, 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为产品生命周期评价、环境意识下的产品设计、绿色制造。
E-mail: zhlei@hfut.edu.cn.
- 杨凯, 男, 1991 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为产品生命周期评价, 绿色设计及制造。
E-mail: yangkaiw@163.com.
- 张城, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为产品绿色设计及制造。
E-mail: zhangchengchina@163.com.
- 秦旭, 男, 1991 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为产品绿色设计及制造。
E-mail: 2412104630@qq.com
- 赵希坤, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为产品绿色设计及制造。
E-mail: zhaoxikun1992@163.com