

文章编号:1006-2467(2020)11-1172-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.99.016

基于区间数预测的产品功能退化性评估

赵志华¹, 李玉鹏¹, 褚学宁²

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 上海交通大学 机械工程学院, 上海 200240)

摘要: 顾客需求的动态性使产品演化成为必然, 表现为现有产品功能与顾客需求期望之间的差异, 称为产品功能退化. 识别退化的功能是开展产品再设计和促进产品演化的前提, 因此提出一种产品功能退化性评估方法. 首先, 基于质量功能展开将顾客需求转换为功能需求, 利用粗糙集理论和卡诺指数计算功能需求重要度. 其次, 以产品工程特性取值范围的预测值表征顾客需求映射的期望设计范围. 采用投影法计算现有产品工程特性取值范围和顾客需求期望设计范围间的差异度. 基于功能需求重要度、工程特性间差异度和工程特性权重定义功能退化指数来评估产品功能退化性. 最后, 以某型号履带式起重机为研究对象进行案例分析. 结果表明: 应用所提方法得出的功能退化性评估结果与实际分析结果一致, 因此所提方法具有一定有效性和实际可行性.

关键词: 产品演化; 功能退化; 工程特性; 区间数预测

中图分类号: TH 122 **文献标志码:** A

Product Functional Degradation Assessment Based on Interval Number Prediction

ZHAO Zhihua¹, LI Yupeng¹, CHU Xuening²

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The dynamics of customer requirement makes product evolution inevitable. The essence of product evolution is the divergence between the function of present product and customer requirements expectation, which is defined as product functional degradation. The identification of degraded function is the precondition for product redesign and evolution. Therefore, a method for assessing the degradation of product function is proposed. First, customer requirements are converted into function requirements based on quality function deployment, and the importance rate of function requirement is calculated by using the rough set theory and Kano index. Then, the predicted value of the value range of future product engineering characteristics is used to represent the expected design range. The difference between the value range of engineering characteristics of existing products and the design range of customer expectation is calculated by using the projection method. The functional degradation index is obtained based on the importance of functional requirements, the difference degree between engineering characteristics, and the weight of engineering characteristics. Finally, a crawler crane is taken as the research object for case analysis. The results show that the functional degradation evaluation obtained by the proposed method is

收稿日期: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(51505480, 51875345)资助项目

作者简介: 赵志华(1996-), 男, 江苏省南通市人, 硕士生, 主要研究方向为复杂产品系统演化设计.

通信作者: 李玉鹏, 男, 副教授, 电话(Tel): 18751508458; E-mail: ypeng_li@163.com.

consistent with the actual analysis results, which indicates that the proposed method has a certain effectiveness and practical feasibility.

Key words: product evolution; functional degradation; engineering characteristic; interval number prediction

随着设计与制造技术的进步,机械产品的功能和结构越来越复杂.顾客需求的多样化、个性化以及需求变更的迅速化给产品设计带来了巨大挑战,同时也迫使企业加快产品演化的步伐,变更驱动产品演化^[1-2].产品再设计作为实现产品演化的重要手段,在产品开发中的地位越来越高,通过调整或修改现有设计中的工程特性、功能模块或零部件等创造出满足顾客需求的变型产品,可有效地缩短设计周期,控制变型产品的开发成本^[3].识别再设计对象,即识别出现有产品中退化的功能或失效的功能模块以及其它影响产品质量和成本的薄弱环节是产品再设计的前提^[4-5].Stone 等^[6]将概念生成器集成到功能失效设计方法中,通过预测产品功能可能出现的失效模式来帮助设计人员进行产品再设计.Pnueli 等^[7]提出了基于加权 and/或图模型和启发式规则的产品残值量化方法,用以识别设计中的薄弱环节,从而提高产品效用.Ma 等^[8]基于顾客需求重要度和失效风险指数定义了组件再设计必要性程度指数,并构建了一种识别产品再设计功能组件的 0~1 整数规划模型.Zhang 等^[9]基于在线评论和意见挖掘提取产品特征和相应观点,通过考虑用户关注度与导向性提出了一种识别产品再设计技术特性的方法.以上研究主要基于顾客需求和功能结构与失效风险间的关系来识别再设计对象.

也有学者通过对产品性能(功能特性)的健康(退化)状况进行评估以识别产品再设计对象.Yu^[10]利用局部保留投影方法从众多原始特征中提取关键特征,提出了基于高斯混合模型的健康评价指标,即负对数似然率,以评估轴承性能的退化性.李书明等^[11]使用数据拟合的方法构建发动机性能参数的基线方程,通过计算性能参数测量值与基线值之间的偏差量化发动机的性能衰退程度.上述研究基于内部机理分析,建立模型来识别出退化的产品功能性能,要求各学科领域专家对产品结构和内部行为有深入了解,且建模过程复杂,往往需要耗费大量的人力及时间成本.Vichare 等^[12]提出了一种可有效分析产品生命周期环境和使用数据的方法,以评估电子产品在其应用环境中的健康状态,提供退化失效预警,借此优化产品设计方案.Ma 等^[13]将产品的时变使用数据转换为设计信息,利用高斯混

合模型来评估产品功能的退化性,定义 Kullback Leibler 散度作为性能衰退指数识别退化的功能及其失效时间点.以上研究基于产品历史使用数据、产品性能数据等多源数据,利用统计方法及人工智能技术进行数据处理和信息挖掘,寻找多源数据内隐含的退化信息,识别出退化的功能模块和失效模式,虽然不需或少需先验知识,但数据采集量庞大且数据处理和信息挖掘过程复杂.尽管以上两类退化研究方法不同,但其中提及的退化是由于产品组件的老化或故障致使产品性能和功能退化,其本质是产品的使用年限、结构、材料等内部因素的变化引起的^[14],未能体现其与顾客需求演化的关系.在此基础上,本文认为产品功能退化还应包括以下含义:受顾客需求演变的影响,现有产品功能与当前顾客期望之间存在差异,即现有产品工程特性的系统范围(借鉴公理设计理论的提法,表示当前产品能够实现的范围)和由当前顾客期望映射而来的设计范围间存在矛盾和冲突时,则认为产品功能发生了退化,差异(冲突)越大,退化越显著.因此,对产品功能进行退化性评估,识别出与顾客期望存在差异的功能并加以改进优化,对提高顾客满意度有着重要意义.

功能退化性评估的基础是获取当前顾客需求和偏好.为了获取特定客户信息需预先设计问卷的选择方案^[15-16],但在预先设计好的问题引导下,顾客通常会被动地表达自身感受或经历.在此情况下,真实的需求和偏好往往不明显,而是隐藏在顾客的反应中,因此很难提取出待改进的产品特征或工程特性.质量功能展开(QFD)是需求驱动的产品设计工具,能确保在产品的研发、设计和制造等阶段听到顾客的声音,可在开发初期就产品的质量和适用性实施保证^[17-18].在工程实践中,随机和不确定的工作条件会导致产品工程特性的模糊性和不确定性^[13].为了体现这种模糊不确定性,设计团队根据顾客对产品功能的最低接受程度和企业技术最高实现水平设定工程特性值的上下限,该区间范围既能有效地表示模糊性又可以最大概率地满足顾客需求.当顾客需求不断变化时,设计人员需要持续调整与顾客需求和功能需求相关的工程特性的区间范围,设计出满足顾客需求的变型产品.

综上所述,本文提出一种新的产品功能退化性

评估方法. 首先,采用粗糙集理论和卡诺指数确定顾客需求重要度,结合 QFD 与专家打分法计算产品功能重要度. 其次,基于 QFD 明确顾客需求、产品功能和工程特性间的关系,顾客需求发生变化后,设计师通过调整与需求相对应的工程特性值获得相应的变型产品,因此将工程特性的调整过程视为变化的顾客需求的满足过程. 然后,由于历代工程特性的调整过程可以反映工程特性的调整趋势,即顾客需求的变化趋势,因此利用 GM(1,1)模型预测未来产品工程特性的取值范围,以此来表征变化的顾客需求映射出的期望设计范围. 最后,通过比较顾客期望设计范围和现有产品实际工程特性值区间范围,定义功能退化指数以评估产品功能退化性. 功能退化指数越大,实际功能越不能满足变化的顾客需求,实际功能与顾客期望之间冲突越大,产品功能退化性越明显. 识别出退化明显的产品功能对产品再设计及产品演化有重要意义.

1 产品功能重要度确定

由于各功能对应顾客需求的重要度不同,具有相同差异度的不同功能的退化效用是不同的,所以需要确定产品功能重要度. 首先,采用粗糙集理论和卡诺指数^[19]确定顾客需求重要度,粗糙集理论考虑了顾客需求的重要性,卡诺指数考虑了顾客需求的偏好性,两者结合可保证顾客需求在产品的设计过程中的充分表达^[20]. 然后,将顾客需求重要度输入 QFD 模型中,结合专家打分法计算功能重要度.

1.1 基于粗糙集计算顾客需求基本重要度

采用粗糙集理论^[21]计算顾客需求基本重要度的步骤如下:

步骤 1 分析企业历史产品实例,给出每代产品实例中顾客需求的重要度评价以及产品整体设计满意度评价.

步骤 2 根据实际情况建立需求决策表 $T = (U, R \cup D, I, \zeta)$. 确定顾客需求 r_1, r_2, \dots, r_N , 其中 r_n 表示第 n 个顾客需求 ($0 < n \leq N$), 定义顾客需求集 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$ 为条件属性集; 设 R 中元素值域为: I_1 -十分重要、 I_2 -一般重要、 I_3 -不重要, 定义 $I = \{I_1, I_2, I_3\}$ 为元素值域集; 选取历史产品实例 x_1, x_2, \dots, x_Q 为决策样本, 收集 R 中各元素的样本数据, 其中样本 x_1, x_2, \dots, x_Q 组成的集合称为样本论域 U ; 为判断产品整体设计满意度效果 d , 将产品满意程度分为 S_1 -整体设计很满意、 S_2 -整体设计一般、 S_3 -整体设计不满意 3 个等级, 定义为决策属性集 $D = \{S_1, S_2, S_3\}$; $\zeta = U \times (R \cup D) \rightarrow I$ 为信息

函数 (“ \times ” 表示叉乘), 每个样本的每个元素都具有与之对应的信息值, 即 $\forall r \in R, x \in U, \zeta(x, r) \in I$.

设 U/R 表示条件属性集 R 的等价关系^[21], 即 R 对论域 U 的划分, $\text{ind}(R)$ 表示 R 的等价集合. 如果 $\text{ind}(R) = \text{ind}(R - \{r\})$, 则称 R 中 r 可被约去, 反之 $P = R - \{r\}$ 是独立的, P 是 R 的一个约简.

记决策属性集 D 的 R 正域为 $\text{POS}_R(D)$,

$$\text{POS}_R(D) = \bigcup_{\forall x \in U/D} R(x) \quad (1)$$

D 的 R 正域是 U 中所有 U/R 的信息可以准确划分到 D 的等价类中的对象集合, x 为任意论域子集, $\overline{R(x)}$ 表示 x 的下近似.

步骤 3 计算 D 在 T 中关于 R 的依赖程度 $\rho_R(D)$:

$$\rho_R(D) = \frac{\text{card}(\text{POS}_R(D))}{\text{card}(U)} \quad (2)$$

式中: $\text{card}(\cdot)$ 表示集合的基数.

步骤 4 计算属性 r_n 的重要度 $\text{imp}(r_n)$:

$$\text{imp}(r_n) = \rho_R(D) - \rho_{R-\{r_n\}}(D) \quad (3)$$

步骤 5 对 r_n 重要度进行归一化:

$$w'_n = \frac{\text{imp}(r_n)}{\sum_{n=1}^N \text{imp}(r_n)} \quad (4)$$

式中: w'_n 即为经过粗糙集处理后属性 r_n 的重要度, 即第 n 个顾客需求的基本重要度.

1.2 基于卡诺指数调整顾客需求重要度

在确定顾客需求的基础上, 利用粗糙集计算顾客需求的基本重要度, 该重要度只能体现顾客需求的重要性而无法体现顾客对需求的偏好性. 卡诺模型可根据顾客偏好将顾客需求划分为魅力需求、必备需求、意愿需求以及无差异需求 4 类. 不同需求类型对顾客需求重要度影响不同, 在产品设计中, 应首先考虑魅力需求, 因为该类需求可大幅提高顾客满意度, 是重点偏好需求. 其次应依次考虑必备需求以及意愿需求. 最后考虑无差异需求. 因此, 为了更充分获取顾客需求的全部信息, 体现顾客需求的偏好性, 本节基于卡诺模型确定顾客需求类型, 据此对顾客需求基本重要度进行调整. 梁洁等^[19]提出一种卡诺指数对顾客需求的类型进行分类, 结合该文献中的卡诺指数, 调整步骤如下:

步骤 1 确定顾客需求集 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_N\}$, 利用粗糙集计算顾客需求的基本重要度.

步骤 2 针对顾客需求集 R , 采用卡诺模型中卡诺调查表(表 1), 访问顾客 $\{p_1, p_2, \dots, p_M\}$, p_m 表示第 m 个受访顾客 ($0 < m \leq M$). $e_{mn}(a_{mn}, b_{mn}, t_{mn})$ 表示受访顾客 p_m 对需求 r_n 的评价结果, 其中 a_{mn} 表

示反向问题评价, b_{nm} 表示正向问题评价, a_{nm} 、 b_{nm} 根据表 2 确定相应满意度分数, t_{nm} 表示顾客所认为的需求 r_n 的重要性, 根据表 3 确定相应重要性分数。

步骤 3 定义需求 r_n 的顾客反向满意度平均水平为 a_n^- , 正向满意度平均水平为 b_n^- , 即

$$a_n^- = \frac{\sum_{m=1}^M t_{nm} a_{nm}}{M}$$

(5)

$$b_n^- = \frac{\sum_{m=1}^M t_{nm} b_{nm}}{M}$$

(6)

表 1 卡诺调查表
Tab. 1 Kano questionnaire

正向问题及回答	反向问题及回答
如果起重机变幅功能得到改进, 您觉得怎样?	如果起重机变幅功能没得到改进, 您觉得怎样?
① 我喜欢这样	① 我喜欢这样
② 它必须这样	② 它必须这样
③ 我无所谓	③ 我无所谓
④ 我能够忍受	④ 我能够忍受
⑤ 我讨厌这样	⑤ 我讨厌这样

表 2 正/反向问题满意度分数

Tab. 2 Satisfaction scores of positive/reverse problems

正向问题回答	分数	反向问题回答	分数
①	1	①	-0.5
②	0.5	②	-0.25
③	0	③	0
④	-0.25	④	0.5
⑤	-0.5	⑤	1

表 3 需求重要性分数

Tab. 3 Scores of requirement importance

不重要		有些重要		重要		很重要		非常重要	
0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

步骤 4 将 (a_n^-, b_n^-) 在二维坐标轴中表示, 横轴表示需求 r_n 的不满意度, 纵轴表示需求 r_n 的满意度。根据坐标位置对顾客需求进行分类。

步骤 5 将坐标 (a_n^-, b_n^-) 描绘为向量 $E_n = [l_n, \alpha_n]$, 其中 $l_n = \sqrt{(a_n^-)^2 + (b_n^-)^2}$ 为向量的模, 表示 r_n 的总体相对重要度, 称为重要度指数; $\alpha_n = \arctan(\bar{a}_n / \bar{b}_n)$ 为向量与横坐标的夹角, 表示顾客对 r_n 的满意度和不满意度的相对水平, 称为满意度指

数。 l_n ($0 \leq l_n \leq \sqrt{2}$) 和 α_n ($0 \leq \alpha_n \leq 90^\circ$) 合称卡诺指数。

步骤 6 需求分类。定义 l_n 的下界为 l_o , α_n 的下界为 α_o , 上界为 α_u 。 l_o 、 α_o 和 α_u 结合企业和市场实际情况确定。如图 1 所示, 如果 $l_n \leq l_o$, 需求 r_n 为无差异需求; 如果 $l_o < l_n$ 且 $0 < \alpha_n \leq \alpha_o$, 需求 r_n 为必备需求; 如果 $l_o < l_n$ 且 $\alpha_o < \alpha_n \leq \alpha_u$, 需求 r_n 为意愿需求; 如果 $l_o < l_n$ 且 $\alpha_u < \alpha_n \leq 90^\circ$, 需求 r_n 为魅力需求。

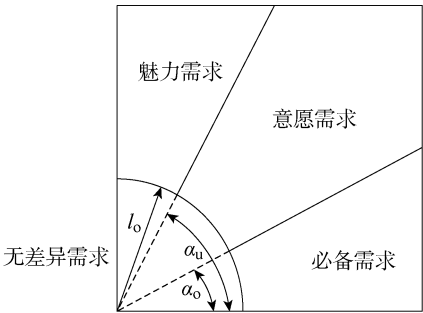


图 1 需求分类

Fig. 1 Classification of requirements

步骤 7 根据需求类型, 确定 r_n 的卡诺调整系数 γ_n 。 γ_n 的取值一般由设计团队参考以往研究^[20]并结合设计经验确定, 魅力需求、意愿需求、必备需求及无差异需求对应调整系数分别为 3、2、1 及 0。

步骤 8 计算顾客需求 r_n 的最终重要度 w_n :

$$w_n = \frac{w'_n \gamma_n}{\sum_{n=1}^N w'_n \gamma_n}, \quad n = 1, \dots, N$$

(7)

1.3 功能重要度计算模型

顾客需求到功能需求的映射关系可由设计人员通过 QFD 制定, 功能重要度的计算过程如图 2 所示。功能需求集 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_H\}$, f_h 表示第 h 个功能需求 ($0 \leq h \leq H$); w_n 表示顾客需求 r_n 的最终重要度; r'_{hk} 表示第 h 个功能与第 k 个功能间的相

	f_H			
	$\cdots f_h \cdots$		$\cdots r'_{hk} \cdots$	
	f_1			
			$\cdots f_h \cdots$	f_H
r_1	w_1			
$\cdots r_n \cdots$	$\cdots w_n \cdots$		$\cdots R'_{hn} \cdots$	
r_N	w_N			
		g_1	$\cdots g_h \cdots$	g_H

图 2 质量功能展开过程

Fig. 2 Process of quality function deployment

互关系; R'_{hn} 表示第 h 个功能与第 n 个顾客需求的关系. r'_{hk} 和 R'_{hn} 采用弱相关 1 分、较弱 3 分、一般 5 分、较强 7 分及强相关 9 分的五级评分法. 因此, 功能 f_h 的重要度 g_h 表示为

$$g_h = \frac{\beta_h \sum_{n=1}^N (\omega_n R'_{hn})}{\sum_{h=1}^H [\beta_h \sum_{n=1}^N (\omega_n R'_{hn})]}, \quad h = 1, 2, \dots, H \quad (8)$$

式中:

$$\beta_h = \frac{\sum_{k=1}^H r'_{hk}}{\sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^H r'_{hk}}, \quad h = 1, 2, \dots, H \quad (9)$$

2 产品功能退化性评估模型

每个功能可由一个或多个工程特性实现. 由于产品实际操作环境不同且具有受制于产品功能本身的特点, 设计者根据顾客对产品功能的最低接受程度和企业技术最高实现水平设定工程特性的上下限, 运用区间数表征工程特性的适用范围. 当顾客需求发生变化时, 企业需要调整工程特性范围以满足顾客需求. 因此, 本文尝试基于历史产品的工程特性值预测未来产品的工程特性, 以表征变化的顾客需求映射出的期望设计范围.

2.1 期望设计范围预测准确性说明

为说明以预测值表征顾客需求期望的可行性与准确性, 用预测出的工程特性范围与设计团队实际设计范围进行相似性度量. 一般来说, 设计团队最终设计出的工程特性范围大概率地反映着顾客需求. 因此, 预测出的工程特性范围与设计团队最终设计出的工程特性范围相似度越高, 说明顾客需求被满足的概率越大, 也可间接说明以工程特性的预测值表示顾客需求期望设计范围的可行性. 在此基础上进行多代产品工程特性的相似性度量, 若相似度大概率偏高, 说明以工程特性预测值表征顾客需求期望具有较高普遍性和准确性.

定义 1 设 $A = [a'_o, a'_u]$ 为一个区间数, a'_o 为 A 的下界, a'_u 为 A 的上界, $a'_o < a'_u$. 当 $a'_o = a'_u$ 时, 区间数 A 退化为实数.

定义 2 区间数 A 的宽度为 $l'(A) = a'_u - a'_o$.

定义 3 设区间数 $A = [a'_o, a'_u]$ 和 $B = [b'_o, b'_u]$, 则区间数 A, B 间的相似度^[22] 为:

$$s'_{A,B} = \frac{l'(A \cap B)}{l'(A \cup B)} \quad (10)$$

若将式(10)按照区间数在数轴上的位置分布情况表示, 则 $s'_{A,B}$ 可以表示为如下分段函数:

$$s'_{A,B} = \begin{cases} 0, & a'_u \leq b'_o \text{ 或 } b'_u \leq a'_o \\ \frac{a'_u - b'_o}{b'_u - a'_o}, & a'_o < b'_o \leq a'_u < b'_u \\ \frac{b'_u - b'_o}{a'_u - a'_o}, & a'_o \leq b'_o < a'_u \leq b'_u \\ \frac{b'_u - a'_o}{a'_u - b'_o}, & b'_o < a'_o \leq b'_u < a'_u \\ \frac{a'_u - a'_o}{b'_u - b'_o}, & b'_o \leq a'_o < a'_u \leq b'_u \end{cases} \quad (11)$$

当 $s'_{A,B} = 1$ 时, 区间数 A, B 完全相似. $s'_{A,B}$ 越大, 二者间的相似程度越高, 反之则越低.

2.2 区间数预测

定义 4 由区间数 $A_i = [a'_o, a'_u]$ ($i = 1, 2, \dots, I'$) 构成的序列称为区间数序列 $X(A) = \{A_1, A_2, \dots, A_{I'}\}$.

定义 5 若区间数 $A_i = [a'_o, a'_u]$, 称 $\otimes_i = \frac{a'_o + a'_u}{2}$ 为区间数的核. 由 \otimes_i 构成的序列称为核序列 $X(\otimes) = \{\otimes_1, \otimes_2, \dots, \otimes_{I'}\}$.

定义 6 若区间数 $A_i = [a'_o, a'_u]$, a'_u 与 a'_o 间的区域称为区间数的信息域, 称 $L(A_i) = a'_u - a'_o$ 为信息域值. a'_u 与核 \otimes_i 间的区域称为区间数的上部信息域, 差值 $L_u(A_i) = a'_u - \otimes_i$ 称为上部信息域值. \otimes_i 与 a'_o 间的区域称为区间数的下部信息域, 差值 $L_o(A_i) = \otimes_i - a'_o$ 称为下部信息域值. 由 $L_u(A_i)$ 构成的序列称为上部信息域值序列 $X(L_u(A)) = \{L_u(A_1), L_u(A_2), \dots, L_u(A_{I'})\}$, 由 $L_o(A_i)$ 构成的序列称为下部信息域值序列 $X(L_o(A)) = \{L_o(A_1), L_o(A_2), \dots, L_o(A_{I'})\}$.

将区间数序列 $X(A)$ 转换成 3 个实数序列 $X(\otimes), X(L_u(A))$ 及 $X(L_o(A))$ 是实现区间数预测的常用方法^[23]. 采用 GM(1, 1) 模型进行区间数预测, 设原始序列 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(I')\}$, 得到时间响应序列为

$$X^{(1)}(i+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{b'}{a'} \right] e^{-a'i} + \frac{b'}{a'} \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, I'$$

还原值为

$$\hat{X}^{(0)}(i+1) = \hat{X}^{(1)}(i+1) - \hat{X}^{(1)}(i) = (1 - e^{a'}) \left(X^{(0)}(1) - \frac{b'}{a'} \right) e^{-a'i} \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, I'$$

式中: a' 为灰色模型的发展系数; b' 为灰作用量.

区间数预测实现过程如下:

步骤 1 分别构建核序列 $X(\otimes) = (\otimes_1, \otimes_2, \dots, \otimes_{I'})$ 、上部信息域值序列 $X(L_u(A)) =$

$\{L_u(A_1), L_u(A_2), \dots, L_u(A_{I'})\}$ 和下部信息域值序列 $X(L_o(A)) = \{L_o(A_1), L_o(A_2), \dots, L_o(A_{I'})\}$ 的 GM(1,1) 模型, 得到序列预测模型:

$$\hat{\otimes}^{(0)}(i+1) = (1 - e^{a_{\otimes}}) \left[\hat{\otimes}^{(0)}(1) - \frac{b_{\otimes}}{a_{\otimes}} \right] e^{-a_{\otimes} i} \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, I'$$

$$\hat{L}_u^{(0)}(i+1) = (1 - e^{a_{L_u}}) \left[L_u^{(0)}(1) - \frac{b_{L_u}}{a_{L_u}} \right] e^{-a_{L_u} i} \quad (15)$$

$$i = 1, 2, \dots, I'$$

$$\hat{L}_o^{(0)}(i+1) = (1 - e^{a_{L_o}}) \left[L_o^{(0)}(1) - \frac{b_{L_o}}{a_{L_o}} \right] e^{-a_{L_o} i} \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, I'$$

式中: a_{\otimes} 、 b_{\otimes} 为核序列灰色预测模型的发展系数与灰作用量; a_{L_u} 、 b_{L_u} 为上部信息域值序列灰色预测模型的发展系数与灰作用量; a_{L_o} 、 b_{L_o} 为下部信息域值序列灰色预测模型的发展系数与灰作用量。

步骤 2 由定义 6 可知, 上部信息域值 $L_u(A_i) = a_u^i - \otimes_i$, 下部信息域值 $L_o(A_i) = \otimes_i - a_o^i$. 因此, 区间数上下边界值 a_u^i 、 a_o^i 可以表示为

$$a_u^i = \otimes_i + L_u(A_i), \quad i = 1, 2, \dots, I' \quad (17)$$

$$a_o^i = \otimes_i - L_o(A_i), \quad i = 1, 2, \dots, I' \quad (18)$$

根据式(12)~(18)可以推出区间数上下边界值预测模型:

$$\begin{aligned} \hat{a}_u^{(0)}(i+1) &= \hat{\otimes}^{(0)}(i+1) + \hat{L}_u^{(0)}(i+1) = \\ &(1 - e^{a_{\otimes}}) \left[\hat{\otimes}^{(0)}(1) - \frac{b_{\otimes}}{a_{\otimes}} \right] e^{-a_{\otimes} i} + \\ &(1 - e^{a_{L_u}}) \left[L_u^{(0)}(1) - \frac{b_{L_u}}{a_{L_u}} \right] e^{-a_{L_u} i} \end{aligned} \quad (19)$$

$$i = 1, 2, \dots, I'$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_o^{(0)}(i+1) &= \hat{\otimes}^{(0)}(i+1) - \hat{L}_o^{(0)}(i+1) = \\ &(1 - e^{a_{\otimes}}) \left[\hat{\otimes}^{(0)}(1) - \frac{b_{\otimes}}{a_{\otimes}} \right] e^{-a_{\otimes} i} - \\ &(1 - e^{a_{L_o}}) \left[L_o^{(0)}(1) - \frac{b_{L_o}}{a_{L_o}} \right] e^{-a_{L_o} i} \end{aligned} \quad (20)$$

$$i = 1, 2, \dots, I'$$

2.3 产品功能退化性评估

对工程特性区间范围进行预测获得顾客需求的期望设计范围, 计算现有工程特性区间值与顾客需求期望值间的差异度, 定义功能退化指数来评估产品功能退化性. 退化指数越大, 现有功能越不能满足顾客的需求, 实际功能与顾客期望之间存在冲突, 产品功能退化明显。

设区间数 $A = [a_o', a_u']$, $B = [b_o', b_u']$, 利用投影法^[24]度量两个区间数间标准化相似度 $S'_B(A)$,

$$S'_B(A) = \frac{P'_B(A)}{P'_B(A) + |1 - P'_B(A)|} \quad (21)$$

式中: $P'_B(A) = \frac{a_o' b_o' + a_u' b_u'}{(b_o')^2 + (b_u')^2}$ 表示区间数 A 在 B 上的投影. $0 \leq S'_B(A) \leq 1$, $S'_B(A)$ 越接近 1, 区间数 A 和 B 越接近^[24]. 则区间数 A 和 B 之间的差异度可以表示为

$$d'(A, B) = 1 - S'_B(A) = \frac{|1 - P'_B(A)|}{P'_B(A) + |1 - P'_B(A)|} \quad (22)$$

设 $C' = \{C^1, C^2, \dots, C^H\}$ 为工程特性集, 其中 $C^h = \{c_1^h, c_2^h, \dots, c_K^h\}$ ($h = 1, 2, \dots, H$), c_k^h 表示与第 h 个功能相关的第 k 个工程特性 ($0 < k \leq K$). 设表征顾客需求期望的工程特性 c_k^h 的预测值为 $A^{hk} = [a_o^{hk}, a_u^{hk}]$, c_k^h 的实际范围为 $B^{hk} = [b_o^{hk}, b_u^{hk}]$, 则根据式(22)可知 c_k^h 的差异度为 $d^{hk}(A^{hk}, B^{hk})$. 因为每个功能可以由一个或多个工程特性表征, 而且各功能相对于不同顾客需求的重要度不同, 具有相同差异度的功能, 其功能的退化对顾客需求满足度的影响程度是不同的. 因此, 综合考虑工程特性权重和数量以及功能对顾客需求重要度, 定义功能 f_h 的退化性为

$$D'_h = \sum_{k=1}^K \epsilon_k^h g_h d^{hk}(A^{hk}, B^{hk}), \quad h = 1, 2, \dots, H \quad (23)$$

式中: D'_h 为功能 f_h 的退化指数; ϵ_k^h 为对应工程特性权重, $\sum_{k=1}^K \epsilon_k^h = 1$.

企业综合考虑生产、市场等多方面运行情况确定退化指数阈值 D'_θ . 若 $D'_h > D'_\theta$, 则表明功能 f_h 所能提供的实际贡献明显不能满足顾客需求, 实际功能与顾客需求期望之间冲突明显. 若 $D'_h \leq D'_\theta$, 则功能 f_h 的退化程度目前对顾客的影响不大, 但企业需要持续观察此类功能, 尽量弱化其退化程度。

通过功能退化性评估识别出退化程度高的产品功能, 对产品进行再设计、提高顾客满意度有重要意义。

3 案例分析

3.1 产品功能重要度计算

以某型号履带式起重机的功能退化评估为例, 说明所提方法的有效性. 通过市场调研确定 $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$, 其中 r_1 表示性能可靠、 r_2 表示多变幅、 r_3 表示拆装容易、 r_4 表示行驶便捷、 r_5 表示采购成本; 与需求相关的产品功能集 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$, 其中 f_1 表示动力供给功能、 f_2 表示起吊功能、 f_3 表示变幅功能、 f_4 表示回转功能、 f_5 表示行驶功能、 f_6 表示制动功能. 根据上文提到

的产品功能重要度计算模型,对产品功能重要度进行计算,具体过程如下:

(1) 计算顾客需求基本重要度

选取企业历史产品实例 $U = \{x_1, x_2, \cdots, x_{12}\}$ 作为决策样本,基于 1.1 节步骤 1~2 建立需求决策表,如表 4 所示.

由式(2)~(4)计算顾客需求 w'_n ,结果如表 5 所示.

表 4 需求决策表

Tab. 4 Requirements decision table

U	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	d
x_1	I_1	I_2	I_3	I_3	I_1	S_3
x_2	I_2	I_1	I_3	I_2	I_2	S_3
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
x_{12}	I_1	I_1	I_3	I_2	I_3	S_2

表 5 顾客需求基本重要性权重

Tab. 5 Basic importance weights of customer requirements

R	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
w'_n	0.240	0.223	0.178	0.200	0.159

(2) 顾客需求重要度调整

以卡诺调查表的形式回访 50 位顾客获取顾客对需求的偏好.由式(5)~(6)确定顾客需求类型,如表 6 所示.

表 6 顾客需求分类

Tab. 6 Classification of customer requirements

R	a_n^-	b_n^-	l_n	α_n	需求类型
r_1	0.66	0.73	0.98	47.88	意愿需求
r_2	0.64	0.91	1.11	54.88	意愿需求
r_3	0.75	0.64	0.99	40.48	意愿需求
r_4	0.62	0.18	0.65	16.19	必备需求
r_5	0.23	0.68	0.72	71.31	魅力需求

基于需求分类,选择相应的调整系数,根据式(7)对顾客需求基本重要度进行调整获得顾客需求最终重要度 w_n ,结果如表 7 所示.

表 7 顾客需求重要度

Tab. 7 Importance of customer requirements

R	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5
w_n	0.245	0.228	0.182	0.102	0.243

(3) 计算功能重要度

结合 QFD 和专家打分法确定产品功能重要度,评价过程如图 3 所示.

f_6	9	9	5	5	3	3
f_5	9	9	7	5	5	5
f_4	5	7	9	1	3	1
f_3	5	5	1	9	3	1
f_2	3	5	3	3	9	7
f_1	3	5	1	1	7	9
w_n	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
r_1	0.245	7	9	5	5	7
r_2	0.228	5	3	9	3	1
r_3	0.182	1	3	7	1	5
r_4	0.102	1	5	3	3	9
r_5	0.243	7	5	3	3	5
r_5	0.243	7	5	3	3	5

图 3 产品功能重要度计算

Fig. 3 Calculation of importance for product functions

由式(8)~(9)计算与顾客需求相关的功能重要度 g_h ,结果如表 8 所示.

表 8 功能重要度汇总

Tab. 8 Summary of functional importance

F	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
g_h	0.196 137	0.246 052	0.173 044	0.089 43	0.160 864	0.134 443

3.2 产品功能退化性评估

(1) 准确性说明

以前 10 代履带式起重机的“行走速度”为例,用预测出的工程特性范围与设计师实际设计范围进行相似性度量.前 10 代产品的“行走速度”数据如表 9 所示.

表 9 某型号履带式起重机前 10 代行走速度系统范围值

Tab. 9 System range value of walking speed in the first 10 generations of a crawler crane

产品代数	行走速度/ (km · h ⁻¹)	产品代数	行走速度/ (km · h ⁻¹)
1	(2.2,3)	6	(2.5,3.55)
2	(2.25,3.2)	7	(2.55,3.63)
3	(2.35,3.35)	8	(2.65,3.75)
4	(2.45,3.35)	9	(2.7,3.8)
5	(2.45,3.4)	10	(2.7,3.85)

以第 1~5 代产品数据为基本预测量预测第 6 代产品的“行走速度”,表示顾客对第 6 代产品的期望设计.比较第 6 代产品“行走速度”的预测范围和实际设计团队综合顾客需求等多方面因素后设计出

的第 6 代产品的系统范围,计算两者相似度.若相似度很高,则表明通过 1~5 代产品数据预测的第 6 代工程特性范围值可以有效地代表顾客期望设计范围.类似地,计算第 7~10 代“行走速度”的相似度,以说明该表征的普遍性,具体计算结果如表 10 所示.

表 10 第 6~10 代产品行走速度预测值及相似度计算
Tab. 10 Prediction of walking speed and calculation of similarity for the 6th to 10th generation

产品代数	行走速度/(km·h ⁻¹)	预测值/(km·h ⁻¹)	s'
1	(2.2,3)	—	—
2	(2.25,3.2)	—	—
3	(2.35,3.35)	—	—
4	(2.45,3.35)	—	—
5	(2.45,3.4)	—	—
6	(2.5,3.55)	(2.552,3.478)	0.88
7	(2.55,3.63)	(2.551,2.579)	0.95
8	(2.65,3.75)	(2.575,3.739)	0.93
9	(2.7,3.8)	(2.706,3.874)	0.93
10	(2.7,3.85)	(2.777,3.903)	0.89

由表 10 相似度计算结果可以发现,第 6~10 代产品行走速度的预测范围和设计团队综合顾客需求等多方面因素后设计出的新产品的系统范围的相似度均高于 0.85 甚至高达 0.95,具有极高相似性.因此,预测未来履带式起重机工程特性的取值范围并以此来表征变化的顾客需求期望设计范围具有较高准确性.

(2) 工程特性值预测

以 f_6 制动功能为例,选择最具代表性的 3 个工程特性 c_1^6 、 c_2^6 及 c_3^6 描述其退化程度,其中 c_1^6 表示制动时间、 c_2^6 表示 CPU 温度、 c_3^6 表示报警音量.专家打分获知各工程特性权重如表 11 所示.

表 11 制动功能工程特性及权重
Tab. 11 Engineering characteristics and weights of brake function

C^6	c_1^6	c_2^6	c_3^6
ϵ_k^6	0.4	0.2	0.4

为了满足顾客需求,参考履带式起重机设计手册,以 c_1^6 、 c_2^6 、 c_3^6 的前 6 代工程特性值为预测基本量,如表 12 所示,根据式(14)~(20)预测未来产品的工程特性区间范围即顾客需求的期望设计范围 B^{6k} ,预测结果如表 13 所示.

表 12 工程特性值预测基本量
Tab. 12 Basic prediction quantities of engineering characteristic value

C^6	c_1^6	c_2^6	c_3^6
1	(0.6,1.0)	(42,65)	(85,90)
2	(0.45,0.7)	(40,64)	(82,85)
⋮	⋮	⋮	⋮
6	(0.2,0.3)	(25,45)	(75,85)

表 13 工程特性值预测结果
Tab. 13 Prediction results of engineering characteristic value

C^6	c_1^6	c_2^6	c_3^6
B^{6k}	(0.14,0.22)	(25,41)	(70,84)

(3) 退化性评估

基于表 13 中顾客需求期望范围 B^{6k} 和表 12 中现有产品工程特性区间范围 A^{6k} ,评估制动功能的退化性.根据式(21)~(23),得出制动功能的退化性结果,详细计算过程如表 14 所示.

同理,其他功能的功能退化性结果如表 15 所示.

表 14 制动功能的功能退化性
Tab. 14 Functional degradation of brake function

C^6	c_1^6	c_2^6	c_3^6
A^{6k}	(0.2,0.3)	(25,45)	(75,85)
B^{6k}	(0.14,0.22)	(25,41)	(70,84)
$d^{6k}(A^{6k},B^{6k})$	0.201	0.068	0.024
ϵ_k^6	0.40	0.20	0.40
g_6		0.134	
D'_6		0.014	

表 15 产品功能退化性评估结果
Tab. 15 Product function degradation evaluation results

F	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
D'_h	0.066	0.174	0.067	0.088	0.054	0.014

企业综合考虑生产、市场等多方面运行情况确定退化指数阈值 $D_{\ominus}=0.1$,根据计算结果发现, f_1 、 f_3 、 f_4 、 f_5 及 f_6 的退化指数均在退化指数阈值之内,唯独 f_2 起吊功能的功能退化指数超过阈值,因此初步判定 f_2 起吊功能存在明显退化情况.

3.3 结果分析

传统退化性评估方法中不仅需要充足的先验知识、大量的人力资源和昂贵的时间成本,还需要庞大的多源数据以及复杂的数据处理和信息挖掘技术,且现有研究仅考虑到退化是由于产品的使用年限、

产品的结构、材料等内部因素的变化引起,忽略了产品现实与顾客需求的直接关系问题.本文拓展了“退化”的内涵,并从顾客需求演化的角度入手提出一种新的产品功能退化性评估方法,该方法仅需历代产品设计手册和较少的先验知识,具有较高的可行性.

参考已有研究中提及的偏差原理及公理化设计理论,以实际系统范围与顾客期望设计范围间的偏差来定义和量化功能的退化程度,在理论上具有一定有效性.同时,设计工程师比较退化评估结果与现有产品实际情况发现,顾客需求在起吊功能方面期望逐渐提高,顾客期望履带式起重机的主卷单绳绳速能够提升至 113 m/min,起吊重量增加到 790 t,起吊高度能突破至 136 m,但现有产品在起吊功能方面单绳绳速最大为 108 m/min,起吊重量极限为 650 t,起吊高度极点为 116 m,不能满足顾客更高的需求,产品功能实际贡献与顾客需求期望之间冲突明显,起吊功能存在退化现象.所评估结果与产品实际情况吻合,一定程度上也说明了所提方法在实践中的有效性.

4 结语

针对现有产品功能退化研究仅认为产品功能退化是由于产品的使用年限、产品的结构、材料等内部因素的变化引起,忽略了产品现实与顾客需求的直接关系问题,拓展了“退化”的内涵,并提出一种产品功能退化性评估方法.首先,基于粗糙集理论和卡诺指数分别从专家和顾客两方面考虑顾客需求的重要性和偏好性计算顾客需求重要度,并将该权重作为 QFD 输入确定功能重要度.然后,以功能相关的工程特性的调整过程表示顾客需求的满足过程,基于历史工程特性的区间范围(系统范围)预测顾客需求的期望设计范围,计算现有工程特性区间范围和顾客需求的期望设计范围间的差异度,基于功能重要度、工程特性间的差异度和工程特性权重定义功能退化指数以评估产品功能退化性.功能退化指数超过功能退化阈值,表明现有功能不能满足变化的顾客需求,实际功能与顾客期望之间冲突大,产品功能退化性明显.最后,以某型号履带式起重机为例,说明了该方法的有效性.

参考文献:

- [1] MONTALVILLO L, DÍAZ O. Requirement-driven evolution in software product lines: A systematic mapping study[J]. *Journal of Systems and Software*, 2016, 122: 110-143.
- [2] SMITH S, SMITH G, SHEN Y T. Redesign for product innovation[J]. *Design Studies*, 2012, 33(2): 160-184.
- [3] HE Y H, WANG L B, HE Z Z, *et al.* A fuzzy TOPSIS and Rough Set based approach for mechanism analysis of product infant failure[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, 47: 25-37.
- [4] KWONG C K, BAI H. A fuzzy AHP approach to the determination of importance weights of customer requirements in quality function deployment[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2002, 13(5): 367-377.
- [5] CHEN L H, WENG M C. An evaluation approach to engineering design in QFD processes using fuzzy goal programming models[J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 172(1): 230-248.
- [6] STONE R B, TUMER I Y, VAN WIE M. The function-failure design method[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(3): 397-407.
- [7] PNUELI Y, ZUSSMAN E. Evaluating the end-of-life value of a product and improving it by redesign[J]. *International Journal of Production Research*, 1997, 35(4): 921-942.
- [8] MA H Z, CHU X N, LI Y P. An integrated approach to identify function components for product redesign based on analysis of customer requirements and failure risk[J]. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2019, 36(2): 1743-1757.
- [9] ZHANG L, CHU X N, XUE D Y. Identification of the to-be-improved product features based on online reviews for product redesign[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(8): 2464-2479.
- [10] YU J B. Bearing performance degradation assessment using locality preserving projections and Gaussian mixture models[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(7): 2573-2588.
- [11] 李书明, 任沛, 黄燕晓. 航空发动机基线方程的拟合[J]. *机械工程与自动化*, 2016(1): 153-154.
LI Shuming, REN Pei, HUANG Yanxiao. Baseline equation fitting of aeroengine[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2016(1): 153-154.
- [12] VICHARE N, RODGERS P, EVELOY V, *et al.* Environment and usage monitoring of electronic products for health assessment and product design[J]. *Quality Technology & Quantitative Management*, 2007, 4(2): 235-250.
- [13] MA H Z, CHU X N, LYU G L, *et al.* An integrated approach for design improvement based on analysis

- of time-dependent product usage data[J]. **Journal of Mechanical Design**, 2017, 139(11): 111401.
- [14] 孟祥慧, 谢友柏, 戴旭东. 面向复杂产品时变性能设计的理论与方法[J]. **机械工程学报**, 2010, 46(1): 128-133.
- MENG Xianghui, XIE Youbai, DAI Xudong. Methodology of designing for time-varying performance of complex products[J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2010, 46(1): 128-133.
- [15] LIU C, RAMIREZ-SERRANO A, YIN G F. An optimum design selection approach for product customization development[J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2012, 23(4): 1433-1443.
- [16] GANGURDE S R, AKARTE M M. Customer preference oriented product design using AHP-modified TOPSIS approach[J]. **Benchmarking: An International Journal**, 2013, 20(4): 549-564.
- [17] AKAO Y. Quality function deployment: Integrating customer requirements into product design [M]. Cambridge: Productivity Press, 1990.
- [18] CHAN L K, WU M L. Quality function deployment: A literature review[J]. **European Journal of Operational Research**, 2002, 143(3): 463-497.
- [19] 梁洁, 张鹏, 韩侠. 面向顾客满意度改进决策的 I-Kano 模型研究[J]. **统计与决策**, 2009, 20: 152-153. [知网]
- LIANG Jie, ZHANG Peng, HAN Xia. Research on I-Kano model for customer satisfaction improvement decision[J]. **Statistics and Decision**, 2009, 20: 152-153.
- [20] 胡东方, 李奕辰, 李彦兵. 基于卡诺和人工免疫系统
- 的顾客需求产品设计[J]. **计算机集成制造系统**, 2018, 24(10): 2536-2546.
- HU Dongfang, LI Yichen, LI Yanbing. Design for customer requirement product based on KANO and artificial immune system[J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2018, 24(10): 2536-2546.
- [21] 李延来, 唐加福, 蒲云, 等. 质量功能展开中顾客需求的最终重要度确定方法[J]. **计算机集成制造系统**, 2007, 13(4): 791-796.
- LI Yanlai, TANG Jiafu, PU Yun, *et al.* Final importance ratings determining of customer requirements in quality function deployment[J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2007, 13(4): 791-796.
- [22] 黄衍, 王应明, 杨隆浩. 基于 SBM 区间模型的决策单元相似度[J]. **控制与决策**, 2017, 32(17): 2090-2098.
- HUANG Yan, WANG Yingming, YANG Longhao. Similarity of decision making unit based on SBM interval model [J]. **Control and Decision**, 2017, 32(17): 2090-2098.
- [23] 党耀国, 叶璟. 基于残差思想的区间灰数预测优化模型[J]. **控制与决策**, 2018, 33(6): 182-187.
- DANG Yaoguo, YE Jing. Interval grey number prediction optimization model based on residual thought [J]. **Control and Decision**, 2018, 33(6): 182-187.
- [24] YUE Z, JIA Y. A direct projection-based group decision-making methodology with crisp values and interval data[J]. **Soft Computing**, 2015, 21(9): 2395-2405.

(本文编辑:陈晓燕)