

集成 AHP/QFD/AD 的产品设计方法研究

周生祥, 郑枫

(齐鲁工业大学, 济南 250353)

摘要: **目的** 针对以用户需求为驱动的产品设计模式, 完善产品设计方法流程, 更有效地理解用户需求, 提高产品设计效率和质量。**方法** 使用层次分析法确定用户需求权重, 将用户需求及权重输入质量屋, 对用户需求与设计需求的相关关系度进行量化评价, 构建用户需求与设计需求相关关系矩阵, 确定各项设计需求重要度, 完成用户需求到设计需求的转化, 以相对重要度较高的设计需求定义功能域, 进行功能域与物理域之间的映射, 利用独立性公理和信息公理进行设计参数分析和设计方案评价。**结论** 构建了一种集成层次分析法、质量功能展开和公理化设计的产品设计方法, 对用户需求权重进行了更准确的分析, 完善了质量功能展开后续的方法流程, 并以板栗采收机概念设计为例进行了应用验证, 应用结果表明该方法能够有效地指导产品设计过程, 提高产品设计效率和质量。

关键词: 产品设计方法; 质量功能展开; 层次分析法; 公理化设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)02-0150-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.02.023

Product Design Method Integrating AHP/QFD/AD

ZHOU Sheng-xiang, ZHENG Feng

(Qilu University of Technology, Jinan 250353, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the product design method flow in view of the product design mode driven by user demand, so as to understand user demand more effectively, and improve product design efficiency and quality. Analytic hierarchy process was used to determine the weight of user demand, input the user demand and weight into the house of quality, make quantitative evaluation on the correlation between user demand and design demand, build the correlation matrix between user demand and design demand, determine the importance of each design demand, complete the transformation from user demand to design demand, define the functional domain with the relatively important design demand, conduct the mapping between functional domain and physical domain and use independence axiom and information axiom to analyze design parameters and evaluate design schemes. A product design method integrating analytic hierarchy process, quality function deployment and axiomatic design is constructed. The weight of user demand is analyzed more accurately, and the follow-up process of quality function deployment is improved. The application of the method is verified by the case of conceptual design of chestnut harvester. The application results show that the method can effectively guide product design process and improve product design efficiency.

KEY WORDS: product design method; quality function deployment; analytic hierarchy process; axiomatic design

在当今异常激烈的市场竞争环境中, 提高产品竞争力是企业生存的关键。产品设计的创新是提高产品竞争力的核心, 企业只有准确地掌握用户需求, 并快速地设计出满足用户需求的高质量产品, 从而获得用户的青睐, 才能赢得市场竞争。在产品设计过程中,

产品设计方法与理论能够帮助设计人员快速准确地做出分析与决策, 提高产品设计的效率和质量。

在以用户需求为驱动的产品设计方法中, 质量功能展开是解决用户需求, 提高产品设计质量的较好方法^[1]。用户需求权重是 QFD 进行资源分配和设计决

收稿日期: 2020-10-13

基金项目: 周生祥(1994—), 男, 山东人, 齐鲁工业大学硕士生, 主攻人机工程与产品设计。

作者简介: 郑枫(1981—), 男, 山东人, 硕士, 齐鲁工业大学副教授, 主要研究方向为感性工学。

策的重要依据,需求权重的准确度直接影响产品设计的质量好坏,而在 QFD 的实际应用中,传统的权重计算方法如:德尔菲法(专家评定法)、 α -方法,存在主观意识强、定性问题分析不足等问题^[2]。此外,在 QFD 后续的产品设计过程中,对于设计方案是否满足产品的设计需求和满足设计需求的程度如何等问题,QFD 没有给出确切的原则和判断标准。层次分析法是一种定性分析和定量分析相结合的多目标决策分析方法,该方法具有系统、客观、区分度高的优点,运用 AHP 确定 QFD 中的用户需求权重,可以有效地解决权重准确性的问题^[3]。公理化设计在产品应用中可以快速有效地对设计需求、设计参数和设计方案进行综合分析和评价,将 AD 与 QFD 相结合,可以弥补 QFD 对设计方案分析和评价上的缺陷^[4]。所以 AHP、QFD、AD 三种方法相结合的产品设计方法与其他设计方法相比,具有用户需求权重分析更精确、产品设计决策更快速、方法流程更完整的优点,因此,针对以用户需求为驱动的产品设计模式,本文将对集成 AHP/QFD/AD 的产品设计方法进行研究,并通过板栗采收机设计进行应用验证。

1 集成 AHP/QFD/AD 的产品设计方法理论基础

1.1 AHP 概述

AHP 于 20 世纪 70 年代初由美国运筹学家 Saaty 提出,是一种将与决策问题有关的因素进行层次化分解,并在此基础之上进行决策分析的方法^[5]。AHP 通过明确问题的因素,并将这些因素按支配关系建立递阶层次结构,通过逐对比较构造判断矩阵,然后求解判断矩阵的特征向量和最大特征值,得出各层次中诸因素的权重以及各层次因素对于总目标的综合权重^[6]。

1.2 QFD 概述

QFD 于 20 世纪 60 年代末由日本学者 Mizuno 和 Akao 提出,是针对满足顾客而去发展设计品质的一种方法^[7]。QFD 以市场为导向,以用户需求为驱动,可以将用户需求合理而有效地转换为产品开发各阶段的技术目标^[8]。质量屋是 QFD 的核心,其主要由用户需求、工程特性、顾客需求-工程特性的关系矩阵、工程特性之间的自相关矩阵、顾客需求的计划矩阵和工程特性的设计矩阵等组成^[9]。QFD 通过质量屋的构建与决策来有效地规划产品设计,保证产品设计过程始终不脱离用户需求。

1.3 AD 概述

AD 是美国麻省理工学院(MIT)SUH 教授于 1990 年提出的设计理论,其基本理论包括:域、层次、域间“之”字形映射、独立性公理和信息公理^[10]。公理化设计过程是以用户需求为驱动的域之间的映射

表 1 平均随机一致性指标

Tab.1 Average random consistency index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

过程,并在映射过程中利用独立性公理和信息公理来判断设计的合理性和最优解,从而将设计问题逐步解决^[11]。

2 集成 AHP/QFD/AD 的产品设计方法模型构建

2.1 基于 AHP 的用户需求权重分析

将通过调研获取的用户需求整理分类,并构建递阶层次结构。以上一层次的用户需求为比较基准,对同一层次的各项用户需求进行两两比较和评价,用 a_{ij} 表示用户需求 UR_i 与用户需求 UR_j 的相对重要性,则同一层次的用户需求比较结果构成判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,判断矩阵 A 所对应特征方程为:

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (1)$$

其中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根, W 为特征向量,将特征向量 W 进行归一化处理,即为用户需求相对权重值 w 。为避免相对重要度评价出现自相矛盾的情况,需要计算一致性比例 CR 对结果进行一致性检验,即:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

其中: CI 为一致性检验指标; n 为判断矩阵 A 的阶数,即层次所含因素个数; RI 的取值见表 1。当 $CR < 0.1$ 时,表示结果是满足一致性检验的,否则需要对判断矩阵进行修正。通过上述分析及计算,得出各项用户需求的权重 w_i 。平均随机一致性指标见表 1。

2.2 基于 QFD 的设计需求分析

在确定用户需求 UR_i 及其权重 w_i 后,依据用户需求和产品特性进行分析并确定产品的各项设计需求(Design Requirement, DR),将用户需求及权重和设计需求输入 QFD 质量屋,对用户需求与设计需求间的相关关系度进行量化评价,构建用户需求-设计需求关系矩阵,设 β_{ij} 表示用户需求 UR_i 与设计需求 DR_j 之间的相关关系大小,则设计需求 DR_j 的重要度 u_j 及相对重要度 r_j 分别为:

$$u_j = \sum_{i=1}^n w_i \times \alpha_{ij} \quad (4)$$

$$r_j = u_j / \sum_{j=1}^m u_j \quad (5)$$

其中: $i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m$; m 为设计需求的数量。通过上述分析及计算, 得出各项设计需求的重要度 u_j 。

2.3 基于独立性公理的设计参数分析

选取相对重要度较高的设计需求定义功能域中的功能需求, 并以满足功能需求的设计参数组成物理域, 根据公理化设计理论, 将功能域中的功能需求 FR_i 与物理域中的设计参数 DP_j 进行映射, 映射关系可表示为:

$$FR = B \times DP \tag{6}$$

式中 B 为设计矩阵, 用 B_{ij} 表示功能需求 FR_i 与设计参数 DP_j 的映射关系, 则有:

$$FR_i = \sum_{j=1}^d B_{ij} \times DP_j \tag{7}$$

$$B_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \tag{8}$$

其中: $i=1,2,\dots,k, j=1,2,\dots,d$; k 为功能需求的数量, d 为设计参数的数量。

设计矩阵 B 通常呈现如以下几种形式。对角矩

阵: $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$; 三角矩阵: $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$; 一般矩阵: $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ 。

矩阵中“1”表示为功能需求与设计参数之间有关联; “0”表示无关联。其中对角矩阵称为非耦合设计, 三角矩阵为准耦合设计, 一般矩阵为耦合设计。设计矩阵为对角矩阵和三角矩阵时, 满足独立性公理, 当设计矩阵为一般矩阵时, 不满足独立性公理, 需要进行解耦^[12]。满足独立性公理的设计即为可接受的设计。

2.4 基于信息公理的最佳方案选择

以满足独立性公理的设计参数为参考, 进行产品概念设计, 得到多种备选设计方案。依据信息公理:

最佳的设计方案具有最少的信息含量^[13], 进行最佳方案选择。对于每一个确定的功能需求 FR_i , 其信息量 I_i 是满足功能需求 FR_i 的概率 P_i 的对数函数, 即:

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P_i} = -\log_2 P_i \tag{9}$$

在有 k 个功能要求 FR_i 的系统中, 设计方案的信

$$I = \sum_{i=1}^k I_i = -\sum_{i=1}^k \log_2 P_i \tag{10}$$

3 集成 AHP/QFD/AD 的产品设计方法应用实践

中国是世界板栗第一生产大国, 板栗种植面积和产量均居世界第一, 目前我国板栗采收工作基本依靠人工进行, 人工采收存在费时、费力、人工成本较高的问题, 在板栗产量不断增长的情况下, 高效的机械化采收已经成为板栗采收工作的重要需求。针对板栗采收工作的机械化需求, 本文将运用集成 AHP/QFD/AD 的产品设计方法进行板栗采收机概念设计。

3.1 板栗采收机的用户需求权重分析

通过用户访谈和产品分析收集板栗采收机的用户需求, 收集到的用户需求主要有采收成熟落地的板栗、采摘树上成熟的板栗、作业时机械安全稳定、工作效率高等, 对收集到的用户需求进行整理和分类, 将用户需求分为功能需求、人机需求、经济需求、审美需求四大类, 形成清晰的需求层次关系, 建立递阶层次结构, 用户需求递阶层次结构见图 1。

运用 AHP 对板栗采收机的用户需求进行权重分析, 首先使用九个重要性等级及其赋值对各层用户需求进行两两比较和评价, 九种重要度取值分别为数字 1~9 及其倒数, 然后将评价结果收集整理后构造判断矩阵 A 。依据公式(1)~(3)求解最大特征根和特征向量, 将特征向量归一化处理得到各项用户需求的权重值, 板栗采收机用户需求权重见表 2。其中 CR 值均小于 0.1, 符合一致性检验标准。

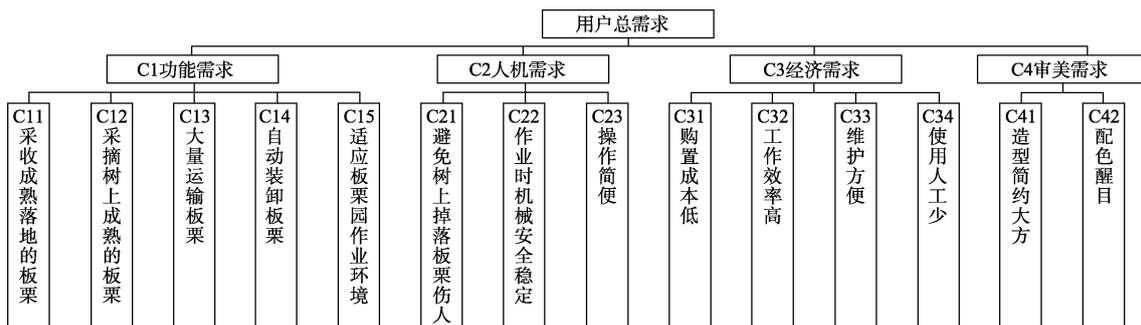


图 1 用户需求递阶层次结构
Fig.1 Hierarchical structure of user demands

表 2 板栗采收机用户需求权重
Tab.2 User demand weight of chestnut harvester

需求	C11	C12	C13	C14	C15	C21	C22	C23	C31	C32	C33	C34	C41	C42
权重	0.197	0.141	0.042	0.045	0.090	0.097	0.097	0.032	0.047	0.108	0.047	0.022	0.018	0.018

3.2 板栗采收机的设计需求分析

设计需求是构建质量屋的关键因素之一，依据用户需求和产品特性，对板栗采收机的相关设计需求进行分析，从功能需求、人机关系、底盘特性、结构外观四个方面分析得到板栗采收机的设计需求，板栗采收机设计需求见表 3。将 AHP 分析后得到的用户需求及权重输入质量屋，建立用户需求-设计需求质量屋，采用“强”“中”“弱”“无相关”四种关系强度对用户需求与设计需求间的相关关系进行量化评价，评价结果构成用户需求-设计需求关系矩阵，用户需求与设计需求相关关系矩阵见表 4。依据公式(4)–(5)计算得各项设计需求的重要度，其中重要度较高的设计需求主要有：批量采摘、批量拾取、高通过性、自动装卸等。

3.3 板栗采收机的设计参数分析

将 QFD 分析得到的重要度较高的设计需求定义 AD 中的功能需求，其中高通过性和高稳定性均为对底盘的功能需求，所以将两者合并为同一功能需

求，针对每一项功能需求，提出相应的满足需求的设计参数，板栗采收机功能需求与设计参数对照见表 5。

表 3 板栗采收机设计需求
Tab.3 Design demands of chestnut harvesters

一级设计需求	二级设计需求
D1 功能需求	D11 批量采摘功能
	D12 批量拾取功能
	D13 自动装卸功能
	D14 装载运输功能
D3 底盘特性	D21 高通过性
	D22 高稳定性
D3 人机关系	D31 安全防护
	D32 操作系统
D4 结构外观	D41 功能分区
	D42 外观配色
	D43 材料工艺

表 4 用户需求与设计需求相关关系矩阵
Tab.4 Matrix of relevance between user demand and design demand

	D1				D2		D3		D4			用户需求权重
	D11	D12	D13	D14	D21	D22	D31	D32	D41	D42	D43	
C1	C11		◎									0.197
	C12	◎										0.141
	C13				◎	○						0.042
	C14			◎								0.045
	C15					◎						0.090
C2	C21						◎					0.097
	C22					◎						0.097
	C23							◎				0.032
C3	C31								△		◎	0.047
	C32	○	○	○	○	△		○				0.108
	C33								◎			0.047
	C34	△	△	△	△			○				0.022
C4	C41									◎		0.018
	C42									◎		0.018
设计需求权重	0.164	0.208	0.089	0.087	0.107	0.075	0.075	0.086	0.044	0.028	0.037	

注：◎表示“强”相关，取值为 5；○表示“中”，取值为 3；△表示“弱”相关，取值为 1；空格表示无相关关系，取值为 0

表5 功能需求与设计参数对照表、
Tab.5 Comparison between functional requirements and design parameters

功能需求 FR	设计参数 DP
批量采摘功能 FR_1	振动式机械臂 DP_1
批量拾取功能 FR_2	真空吸取装置或滚轮拾取装置 DP_2
自动装卸功能 FR_3	机械传输装置 DP_3
装载运输功能 FR_4	储粮仓 DP_4
底盘具有高通过性、高稳定性 FR_5	三角橡胶履带轮或轮式底盘及 MT 轮胎 DP_5
作业人员的安全防护 FR_6	封闭驾驶室 DP_6
操作系统简单智能 FR_7	智能辅助操作系统 DP_7



图2 板栗采收机设计效果

Fig.2 Design effect of chestnut harvester

将功能需求 FR 与设计参数 DP 进行映射，依据公式 (6)、(7)、(8) 得到设计矩阵

$$B = \begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \\ FR_6 \\ FR_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \\ DP_6 \\ DP_7 \end{bmatrix}, \text{ 此矩阵为对}$$

角矩阵，属于非耦合设计，满足独立性公理，所以设计参数是可接受的。

3.4 板栗采收机的最佳方案选择

通过设计参数分析可知，满足用户需求的板栗采收机应该具备振动式机械臂、真空吸取装置或滚轮拾取装置、传送带、储粮仓、三角橡胶履带轮或轮式底盘及 MT 轮胎、封闭驾驶室、智能辅助操作系统等产品特征。依据设计参数分析结果，对板栗采收机进行概念设计，得到两种备选设计方案。依据公式(9)一(10)对两种设计方案分别进行信息量计算，计算结果为 $I_A < I_B$ ，即方案 A 具有最少的信息含量，所以概念设计方案 A 为板栗采收机最佳设计方案，板栗采收机设计效果见图 2。

4 结语

集成 AHP/QFD/AD 的产品设计方法主要以用户需求为驱动，通过需求转化与设计评价，解决用户对产品的需求问题。该方法一定程度上弥补了单一设计方法的不足，具有准确清晰、系统完整的优点，可以指导设计师在产品过程中快速地做出正确的设计决策和评价，提高产品设计效率和质量。通过板栗采收机设计的应用，验证了此产品设计方法的可行性和有效性，为以用户需求为驱动的产品设计模式提供新思路。

参考文献:

- [1] 姚君, 唐晓腾, 李亚捷. 基于 QFD 的尘肺病家用康复产品系统设计[J]. 包装工程, 2019, 40(6): 152-158.
YAO Jun, TANG Xiao-teng, LI Ya-jie. Systematic Design of Home Rehabilitation Products for Pneumococniosis Based on QFD[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(6): 152-158.
- [2] 尉少坤, 李淑娟, 李言. 用层次分析法(AHP)确定 QFD 中客户需求权重[J]. 机械设计与制造, 2005(6): 170-172.
WEI Shao-kun, LI Shu-juan, LI Yan. Confirming Weight of Voice of the Customer in QFD Using the Method of AHP[J]. Mechanical Design and Manufacture, 2005(6): 170-172.
- [3] 何超, 李萌, 李婷婷. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 172-178.
HE Chao, LI Meng, LI Ting-ting. Comparison and Analysis of Four Weight Determining Weights in Multi-objective Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Hubei University(Natural Science), 2016, 38(2): 172-178.
- [4] 刘悦, 容芷君, 但斌斌. 公理设计在产品中的研究综述[J]. 机械设计, 2013, 30(2): 1-9.
LIU Yue, RONG Zhi-jun, DAN Bin-bin. Research Summary of Axiomatic Design in Product Design[J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 30(2): 1-9.
- [5] 邓雪, 李家铭, 曾浩健. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian. Research on Computation Methods of AHP Weight Vector and Its Applications[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [6] 周清华, 杨萍, 肖吉军. 基于层次分析法的包装质量分析[J]. 包装工程, 2015, 36(1): 145-150.
ZHOU Qing-hua, YANG Ping, XIAO Ji-jun. Packaging Quality Analysis Base on Analytic Hierarchy Process[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(1): 145-150.

(下转第 166 页)