

基于QFD、TRIZ和FMEA的送夹料装置 创新设计

周建行¹, 王起², 方建军³, 徐佳⁴, 顾怡红⁵

¹金华市凌意贸易有限公司, 浙江 金华

²金华集群科技有限公司, 浙江 金华

³浙江格普光能科技有限公司, 浙江 金华

⁴浙江领盛科技有限公司, 浙江 金华

⁵衢州职业技术学院机电工程学院, 浙江 衢州

收稿日期: 2024年7月5日; 录用日期: 2024年7月29日; 发布日期: 2024年8月6日

摘要

随着市场竞争的加剧, 产品创新设计逐渐被视为企业生存和发展的重要渠道。本文对产品的创新设计方法和模型进行了研究。针对现有产品创新设计方法和模型中的潜在问题, 综合质量功能展开(QFD)、发明问题解决理论(TRIZ)和故障模式影响分析(FMEA)各自的特点, 建立了一种基于QFD、TRIZ和FMEA的产品创新设计模型。通过在金属圆锯机的送夹料装置创新设计上的具体应用, 验证了本文提出的模型完善了当前的产品创新设计过程, 提高了用户满意度, 降低了设计成本, 同时保证了设计的可靠性, 为广泛的设计人员提供了更有效的创新设计的思路, 也为计算机辅助创新设计软件的开发提供了理论基础。

关键词

质量功能展开, 发明问题解决理论, 失效模式及故障分析, 产品创新设计

Innovation Design of Feed Clamp Device by Integrating QFD, TRIZ, and FMEA

Jianxing Zhou¹, Qi Wang², Jianjun Fang³, Jia Xu⁴, Yihong Gu⁵

¹Jinhua Lingyi Trading Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

²Jinhua Cluster Technology Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

³Zhejiang Gepu Light Energy Technology Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

⁴Zhejiang Lingsheng Technology Co., Ltd., Jinhua Zhejiang

⁵School of Mechanical Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

Received: Jul. 5th, 2024; accepted: Jul. 29th, 2024; published: Aug. 6th, 2024

文章引用: 周建行, 王起, 方建军, 徐佳, 顾怡红. 基于 QFD、TRIZ 和 FMEA 的送夹料装置创新设计[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(4): 297-304. DOI: 10.12677/met.2024.134034

Abstract

With the intensification of market competition, product innovation design is gradually regarded as an important channel for enterprise survival and development. This paper studies the innovative design methods and models of products. According to the potential problems in the existing product innovation design methods and model, a product innovation design model based on QFD, TRIZ and FMEA is established based on the characteristics of quality function development (QFD), theory of inventive problem solving (TRIZ) and failure mode and impact analysis (FMEA). Through the specific application of the innovative design of the feeding device of the metal circular saw, the model perfected the current product innovation design process, improved the user satisfaction, reduced the design cost, and ensured the reliability of the design, for a wide range of designers providing more effective innovative design ideas, also providing the theoretical basis for the development of computer-aided innovation design software.

Keywords

Quality Function Deployment (QFD), Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ), Failure Mode and Effect Analysis (FMEA), Innovation Design

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

产品创新设计是一项复杂的设计活动，利用系统化设计方法、基于决策的设计理论、基于 AI 的设计理论、公理化设计理论、基于科学的设计理论等设计理论和方法，针对设计目标，研究设计过程，从而建立有效创新的设计过程模型，对指导设计具有重要的意义。

以用户需求为驱动的 QFD 设计方法是分析问题的有效方法，但对于解决问题并没有给出相关的适当的途径；尽管 TRIZ 对解决冲突的工具、原理和方法等进行了深入的研究，但在如何确定冲突这个关键问题上却没有提出很好的解决方法；QFD 与 TRIZ 的结合模型虽然在产品创新上的应用较多，但仍然相对繁琐。

由于 QFD 与 FMEA 分别单独使用的局限性及两者之间的互补性，虽然其整合应用得到了广泛关注和研究，但研究成果很少提到对 QFD 和 FMEA 的集成，且少有的集成模型仅针对现有产品的再制造和改进设计，不能很好地适用于产品的创新设计过程[1] [2]。

将 QFD、TRIZ 和 FMEA 相结合进行机械创新设计，可以形成一个完整的创新设计流程。首先，通过 QFD 分析顾客需求，明确设计目标；然后，应用 TRIZ 的原理和方法解决设计过程中的问题，提高设计的创新性和可行性；最后，通过 FMEA 分析潜在的失效模式及其影响，确保产品的可靠性和安全性。这种综合性的设计方法可以有效地提升机械设计的创新性和可靠性，为企业的竞争力和市场地位提供有力支持[3] [4]。

2. 结合 QFD 的 TRIZ 创新设计方案

2.1. 基于 QFD 的技术特性展开

技术特性是将用户需求产品化的重要参数，是评价产品质量的重要指标，为此要将感性的用户需求具体化为技术特性，构建“用户需求-技术特性”质量屋，其中技术特性必须满足：技术特性是针对相

应用户需求而设定的；技术特性是可测量的；技术特性不能涉及具体的设计方案。

(1) 建立“用户需求-技术特性”相关矩阵

以现有用户需求为“左墙”，产品技术特性为“天花板”，技术特性间矛盾为“屋顶”，建立“用户需求-技术特性”关系矩阵。用“5分”、“3分”、“1分”或“4分”、“2分”、“1分”等适当数值，分别表示“用户需求”各元素与“技术特性”各元素的“强相关”、“中等相关”、“弱相关”关系。

(2) 计算技术特性重要度

采用独立分配法，对用户需求重要度与技术特性重要度进行转换计算。

(3) 构建“用户需求-技术特性”质量屋

在上述的基础上，用“+号”，“-号”分别表示“技术特性”各元素的“正相关”，“负相关”关系，构建“屋顶”即技术特性之间的相互关系是质量屋的最重要组成部分，是产品创新设计问题的出现点。构建“用户需求-技术特性”质量屋。

2.2. 结合 QFD 的 TRIZ 问题解决

产品创新的核心是解决设计中的冲突，TRIZ 为设计者提供了解决冲突的工具、原理和方法。它包括发明原理、冲突矩阵、标准解和发明问题算法(ARIZ)等。尽管 TRIZ 对解决冲突的工具、原理和方法等进行了深入的研究，但在如何确定冲突这个关键问题上却没有提出很好的解决方法[5]。目前基于 QFD 的冲突确定和基于公理化设计(AD)的冲突确定应用较广。基于上述问题和现状，本文在前文模型基础上采用基于 QFD 的冲突确定方法，辅助 TRIZ 对问题进行求解，结合前文结果，建立了较完整的问题解决模型，包括基于 QFD 的问题确定模块和基于 TRIZ 的问题解决模块，如图 1 所示。

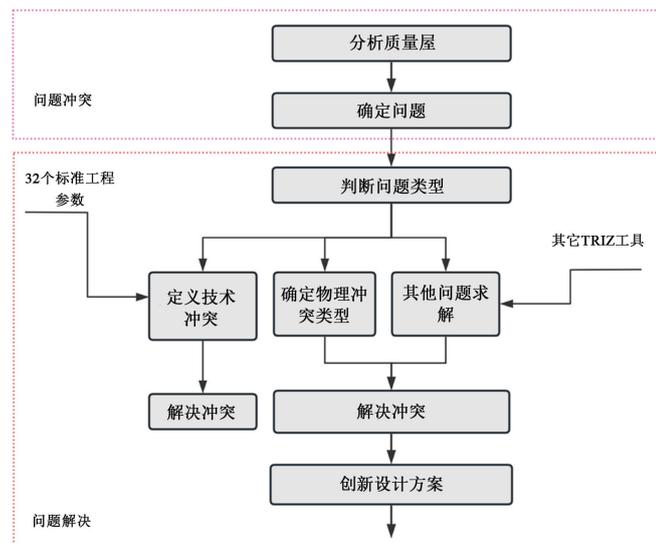


Figure 1. A TRIZ problem-solving model combined with QFD
图 1. 结合 QFD 的 TRIZ 问题解决模型

3. 基于 QFD、FMEA 和 TRIZ 的创新方案优化

3.1. 研究方法

(1) 质量功能展开(QFD)

本研究首先采用了质量功能展开(QFD)方法来分析用户需求,明确设计目标。通过构建“用户需求-技术特性”质量屋,我们将用户的感性需求转化为可测量的技术特性,并确立了它们之间的对应关系。这一步骤是确保设计满足用户期望和市场需求的关键。

(2) 发明问题解决理论(TRIZ)

应用发明问题解决理论(TRIZ)的原理和方法,以解决设计过程中遇到的创新问题。TRIZ 提供了一套系统化的工具和算法,帮助我们识别和解决设计中的冲突,从而提高设计的创新性和可行性。

(3) 故障模式影响分析(FMEA)

在设计阶段的后期,引入故障模式影响分析(FMEA)来评估潜在的失效模式及其对产品性能的影响。通过这一分析,我们能够识别和优先处理那些可能对产品可靠性和安全性造成严重影响的问题。

(4) QFD 与 FMEA 的集成模型

将 QFD 与 FMEA 相结合,建立了一个集成模型,用于产品创新设计过程中的方案选优阶段。该模型通过技术特性重要度和故障模式风险度作为接口,实现了用户需求和产品可靠性的综合评估。这一集成方法不仅提高了设计决策的质量,而且为实现设计优化提供了有力的支持。

在产品创新设计的 QFD 过程中,用户需求重要度是其中关键的定量性元素,企业根据用户重要度的排序来确定工程技术目标,用户重要度的确定还将引导着后续阶段的配置决策。由于 QFD 的局限性,用户需求的重要度确定过程或转换过程并没有充分考虑产品可靠性[6]。

进行产品设计时,通过 FMEA 分析故障模式及其重要度、发生度、发生原因、检测度,输出潜在故障模式清单和故障模式的风险度排序,以便设计人员尽快有效的采取应对措施。同样的,FMEA 主要针对产品可靠性的分析,并没有充分考虑用户的各项需求[7]。

通过前文和上述的分析,将 QFD 与 FMEA 的结合起来应用,针对目前 QFD 与 FMEA 集成模型的研究结果的匮乏,尤其是在产品创新设计过程的应用,本文以技术特性重要度和故障模式风险度分别为 QFD 和 FMEA 的接口,建立 QFD 与 FMEA 的集成模型,并应用于产品创新设计过程中的方案选优阶段,同时,引入 TRIZ 的问题解决方法对方案进行改进设计。结合 QFD 与 FMEA 的集成模型和 TRIZ 理论建立基于 QFD、FMEA 和 TRIZ 的方案持续优化模型,模型如图 2。

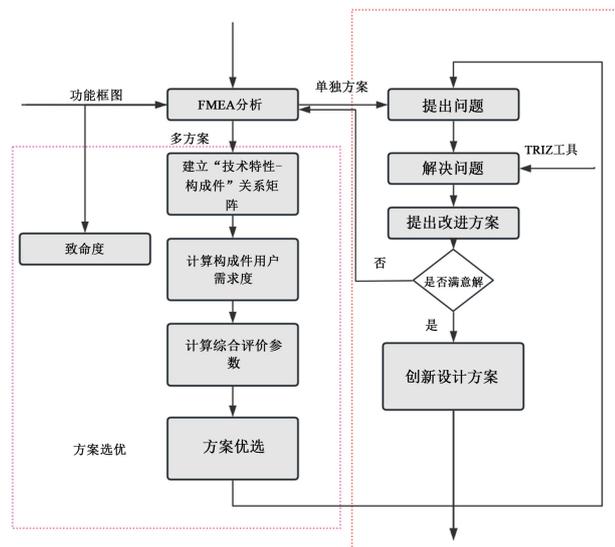


Figure 2. Scheme optimization model based on QFD, FMEA and TRIZ

图 2. 基于 QFD、FMEA 和 TRIZ 的方案优化模型

3.2. FMEA 分析

在进行 FMEA 分析时, 我们首先对送夹料装置的每个关键功能件和构成件进行了彻底的审查, 识别出可能的故障模式。例如, 对于接触件, 我们识别了接触面损坏作为潜在故障模式。然后, 我们根据故障对安全性和功能性的影响, 以及故障发生的可能性和可检测性, 对每个故障模式进行了严重性(S)、发生度(O)和检测度(D)的评分。评分结果用于计算风险优先级(RPN = S × O × D), 以确定需要优先考虑的故障模式。此外, 我们详细记录了每个故障模式的原因、潜在后果, 并制定了相应的预防和纠正措施。

需要注意的是, 在产品的设计开发阶段实施 FMEA 的目的主要是确定产品的可靠性和安全性, 此处将采用故障模式“致命度”而不是“风险度”来评估故障的重要性。

$$\text{致命度} = \text{故障发生度(O)} \times \text{故障影响度(S)}$$

3.3. 建立 QFD、FMEA 集成模型进行方案选优

通过对供选方案的功能分析, 基于 QFD 建立“技术特性 - 构成件”的关系矩阵 G。该矩阵明确了技术特性与构成件之间的对应关系, 并通过独立配点法, 将技术特性的重要性权重映射到构成件的用户需求度上。这一步骤确保了设计方案能够精确满足用户的关键需求。

$$y_j = \left(\sum_{i=1}^m j_i g_{ij} \right) / \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m j_i g_{ij}, (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: y_j 为第 j 项构成件的用户需求度; g_{ij} 为关系矩阵 G 中第 i 行第 j 列的值; j_i 为第 i 项技术特性的权重值。

关系矩阵中 g_{ij} 表示技术特性和构成件之间的相关关系。 g_{ij} 的值由专家打分确定。G 的值为由[-3, 3]的自然数组成, 其含义分别为: -3 (构成件非常不利于对应项技术特性的满足), -2 (构成件不利于对应项技术特性的满足), -1 (构成件稍微不利于对应项技术特性的满足), 0 (构成件与对应项技术特性无直接关系), 1 (构成件稍微利于对应项技术特性的满足), 2 (构成件利于对应项技术特性的满足), 3 (构成件非常利于对应项技术特性的满足)。

可以看出, g_{ij} 的值越大表示构成件对对应项技术特性的贡献度越大, 所以计算得到的构成件的用户需求度越大, 表示相应的构成件对技术特性的综合贡献越大。需要注意的是, 在对 g_{ij} 进行赋值时, 构成件对技术特性满足程度的高低更多的是通过比较现有产品和供选方案中构成件对技术特性的贡献大小。

通过实施 FMEA 将得到供选方案之间同一功能不同构成件的致命度, 表示构成件在可靠性和安全性的破坏能力大小。致命度的值越大, 说明该项构成件对产品可靠性和安全性的破坏力越大; 反之, 致命度的值越小, 对产品可靠性和安全性的危害越小。本质上产品的用户需求度和小致命度都是为了提高用户的满意度, 进而提高产品的市场竞争力。此处, 将致命度引入“用户需求 - 构成件”的关系矩阵中, 以评价参数 p_j 作为供选方案的评价指标, 其计算公式如下所示。

$$p_j = \frac{y_j}{1 + (z_j - K)c}, (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$z_j - K = \begin{cases} z_j - K, & z_j \geq K \\ 0, & z_j < K \end{cases} \quad (3)$$

式中: y_j 为构成件的用户需求度; z_j 为构成件的致命度; K 为专家认为无需参与方案评价过程最低 z_j 值; c 值为调整系数; K 和 c 由专家根据产品的实际情况而确定。

可以看出, 集成的评价参数 p_j 与用户需求度 y_j 呈正相关, 与评价参数 p_j 致命度 z_j 呈负相关。

$$P = \sum_{j=1}^n d_j p_j, (j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中， d_j 为对应 p_j 的权重向量， P 作为特定方案的综合评价价值，比较供选方案的 P 值， P 值越大说明该项方案越好。以此为依据对产品创新设计的方案进行选优[8] [9]。

3.4. 基于 QFD、FMEA 和 TRIZ 的方案改进

在产品设计的过程中，我们面临着设计目标与多项需求无法同时满足的挑战。为了应对这一问题，本文采用了一种综合的方法，将 QFD、FMEA 和 TRIZ 理论相结合，以实现方案的持续优化。

首先，我们依据用户需求的重要性和致命度来选择关注的重点。用户需求的重要性指导我们确定设计的关键方向，而致命度则帮助我们识别可能对产品可靠性和安全性造成重大影响的因素。然而，用户需求和产品可靠性之间可能存在冲突，需要通过创新的方法来解决。

本文采用了 TRIZ 理论提供的问题解决方法，结合 QFD 与 FMEA 的集成模型，对方案的选优过程和结果进行了深入分析。通过定义并解决冲突，我们改进了较优方案，期望进一步提高用户满意度。例如，在送夹料装置的创新设计中，我们发现了接触片磨损的问题。利用 TRIZ 理论，我们提出了使用耐磨材料来制造接触片的改进措施，以减少磨损并提高产品的可靠性和耐用性。

在得到最终设计方案之前，设计者可以根据模型对产品进行持续的优化，直到达到满意的解决方案。这一过程不仅提高了设计决策的质量，而且为实现设计优化提供了有力的支持。通过这种循环反馈机制，我们能够不断调整和完善设计方案，确保最终产品能够满足用户的需求并具有高可靠性。

4. 送料夹紧装置的创新设计方案优化

送夹料装置是金属圆锯机的重要组成部分，在全自动金属圆锯机中，送夹料装置需要完成送料、夹紧、举料的功能，一般包括送料装置、夹紧装置和举料装置，具体结构如图 3 所示。

以送夹料装置的创新设计得到的多方案设计结果作为基于 QFD、FMEA 和 TRIZ 的方案持续优化模型的输入，来验证该模型的有效性。设计方案的功能框图如图 4 所示。

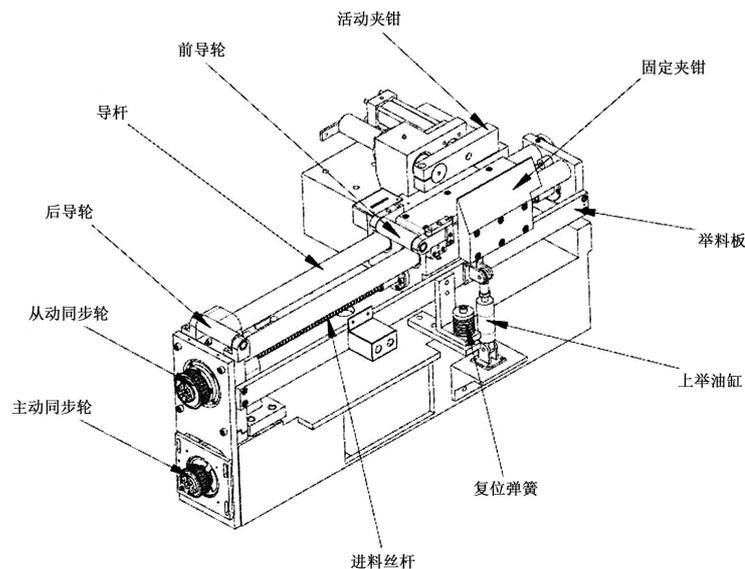


Figure 3. Structure diagram of existing product feeding device
图 3. 现有产品送夹料装置结构图

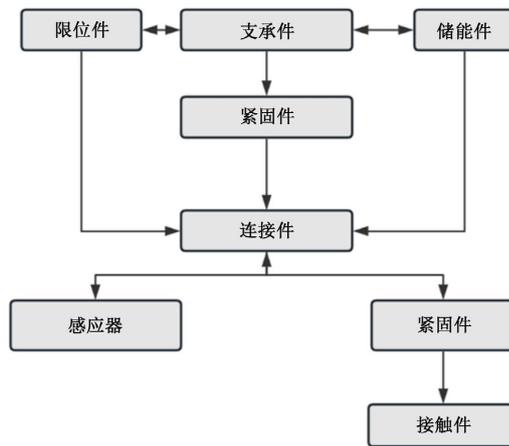


Figure 4. Functional block diagram of feeding innovation mechanism
图 4. 送夹料创新机构功能框图

对送夹料装置的创新设计方案进行 FMEA 分析, 由于完整的 FMEA 表格较大, 这里只列出核心部分内容。对每个故障模式的影响度和发生度进行打分和计算, 得到致命度值。评分准则及 FMEA 分析表如表 1 和表 2。

Table 1. scoring criteria for fault severity and occurrence
表 1. 故障严重度和发生度评分准则

评价值	严重度 S	发生度 O
1	几乎没有影响	不可能
2~3	影响很小	很少
4~6	较大影响	少
7~8	严重影响	中等
9~10	特别严重影响	高

Table 2. FMEA analysis table of feeding innovation mechanism
表 2. 送夹料创新机构 FMEA 分析表

功能件	方案	构成件	故障模式	故障原因	故障影响	S	O	z_j
接触件	A	接触片	接触面损坏	磨损	工件刮损 误感测	7	5	35
	B	接触片	接触面损坏	磨损	工件刮损 误感测	7	5	35
紧固件	A	螺钉	螺钉松	磨损	无法紧固	8	2	16
	B	螺钉	螺钉松	磨损	无法紧固	8	2	16
连接件	A	连杆 连杆支点	转动失常	磨损 连接松	无法感测	8	2	16
	B	滑块 盖板	滑动失常	磨损	滑动困难 刮损盖板	6	6	36
储能件	A	弹簧	弹性失效	工作环境	无法感测	9	2	18
	B	弹簧	弹性失效	工作环境	无法感测	9	3	27
限位件	A	螺栓 螺母	顶面损耗 螺母松	磨损	限位延迟 无法限位	5	2	10
	B	滑块凸缘	凸缘接触面不平 整	磨损	限位延迟 滑块偏位	7	5	35

续表

支承件	A	支承板 活动夹钳	连杆支点松	磨损	连杆转动失常	6	2	12
	B	支承板	与滑块接触面不 平整	滑动磨损	滑块滑动困难 加速磨损	6	3	18

在经过基于 QFD 与 FMEA 集成模型方案选优后,可见方案 A 相比方案 B 在用户需求度上略逊色,但在可靠性方面却有更大程度的优越性,故最终方案 A 可能被设计者采纳。基于前文对送夹料装置的创新设计方案 A 的 FMEA 分析,可以从中发现问题并采用 TRIZ 理论来解决。

接触片可由耐磨材料制成,但由于其与工件保持干摩擦接触的关系,容易磨损,造成接触片的表面不平整,因为与不同尺寸的工件摩擦接触,容易产生尖锐处从而刮伤工件。另外,接触片的损耗会造成连杆前端比正常状态要更大角度的转动才能使接触片与工件相接触,以致于连杆后端可能脱离感应器的感应范围,造成误感测问题。这时候为了避免故障影响,需要经常更换接触片。

5. 结束语

本论文就产品创新设计模型及其应用做了系统的研究,构建了结合 QFD 的 TRIZ 问题解决模型,针对单独运用 QFD 和单独运用 FMEA 的局限性,以及 QFD 和 FMEA 的互补性,建立 QFD 与 FMEA 的集成模型,并创新地应用于产品创新设计过程中的方案选优阶段,将设计方案通过 FMEA 分析得到的潜在故障致命度反馈到“技术特性-构成件”质量屋中,将“用户需求度”和“致命度”相集成,根据“综合评价参数”选出较优方案。不仅如此,引入 TRIZ 的问题解决方法建立了基于 QFD、FMEA 和 TRIZ 的方案持续优化模型,该模型有效综合用户需求和产品的可靠性对产品进行选优和改进,克服了现有产品创新设计的片面性,并形成了一个循环系统直到得到设计者的满意解。最后通过送料夹紧装置的创新设计,验证了提出模型的有效性。

参考文献

- [1] 蒯苏苏, 马履中. TRIZ 理论机械创新设计工程训练教程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2021.
- [2] Nelson, P. (2021) Repenning Understanding Fire Fighting in New Product Development. *The Journal of Product Innovation Management*, **18**, 285-300. [https://doi.org/10.1016/S0737-6782\(01\)00099-6](https://doi.org/10.1016/S0737-6782(01)00099-6)
- [3] 邹慧君, 汪利, 王石刚, 等. 机械产品概念设计及其方法综述[J]. 机械设计与研究. 2018(2): 9-12.
- [4] 侯智, 陈世平. TRIZ 理论与 KANO 模型的集成研究[J]. 机床与液压, 2015, 6(2): 47-51.
- [5] (美)斯泰蒙迪斯 D.H. 故障模式影响分析 FMEA 从理论到实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [6] 高洋, 刘志峰, 胡迪, 等. 面向绿色设计的客户需求工程参数转化方法[J]. 中国机械工程, 2021, 22(5): 580-587.
- [7] Twiss, B. (2022) *Managing Technological Innovation*. 4th Edition, Pitman Publishing.
- [8] Chen, W.C. and Rau, H. (2023) A Product Evaluation and Innovation Process Based on the Circular Design Degree and Patents Evolution. *Journal of Cleaner Production*, **405**, 136888.1-136888.17.
- [9] Barabba, V. and Zaltman, G. (2021) *Hearing the Voice of the Market: Competitive Advantage through the Creative Use of Market Info*. Harvard B. S. Press.