

# 基于用户需求的地铁ETO产品设计特征确定方法

徐正军

中国铁建高新装备股份有限公司, 云南 昆明

收稿日期: 2023年12月6日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2024年1月29日

## 摘要

基于城市轨道交通迅猛发展, 地铁产品市场急速扩张背景下, 从过程分析的角度研究客户定制的因素在产品设计过程中的关联影响关系, 构建质量功能配置矩阵, 采用层次分析法对客户需求和产品特征关联分析, 解决ETO产品订单需求响应与产品方案规划的协调问题。同时选取地铁ETO项目案例来进行验证, 证明了该方法能够科学、有效的确定各影响因素与设计特征的关联评价, 为产品方案评价及优化改进提供了支撑。

## 关键词

地铁, ETO产品设计, 需求管理, 层次分析法

# Method for Determining the Design Features of Subway ETO Products Based on User Requirements

Zhengjun Xu

CRCC High-Tech Equipment Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: Dec. 6<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Under the fact of the rapid development and expansion of subway, this paper proposes to study the influence of customer customization factors on product plan in the process of product design from the perspective of process analysis, build the quality function configuration matrix based on HOQ, use the analytic hierarchy process to analyze the correlation between customer demand and

product characteristics, and solve the coordination problem of ETO product order demand response and product plan planning. At the same time, the case of subway ETO project is selected for verification, which proves that the method can scientifically and effectively determine the correlation evaluation between each influencing factor and design characteristics, and provides support for product plan evaluation and continuous optimization and improvement.

## Keywords

Subway, ETO Product Design, Requirements Management, Analytic Hierarchy Process

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

截止 2023 年 2 月，全国城市轨道交通运营线路 290 条，运营里程 9609.9 公里[1]，见图 1 所示。为了保障营运安全，每一条地铁线路都需要配备一定数量的施工维护车辆，地铁的工程车辆市场需求正在急速扩张。

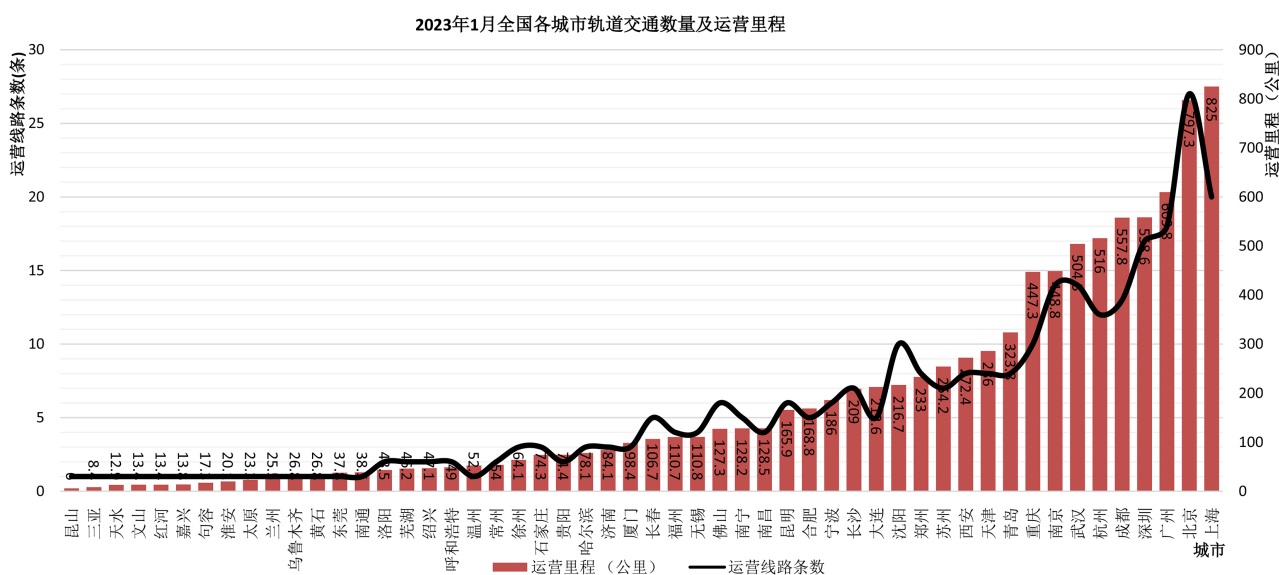


Figure 1. Number of urban rail transit and operating mileage in January 2023

图 1. 2023 年 1 月城市轨道交通数量及运营里程

在城市轨道交通快速发展市场环境下的地铁产品的供应商，接到客户需求后做到快速响应，依据客户需求开发产品，完成高度客户化的订单，是一个新的机遇也是一个新的挑战。

## 2. 定制设计的理论基础及研究现状

客户采用定制产品使用环境的特性及要求描述对产品的需求是 ETO (Engineering to Order 按订单设计)型企业开展客户需求分析、开发定制产品过程中的重要参考基础数据[2]。耿秀丽等提出竞争环境下基于特征选择技术的顾客需求重要度确定方法，包括顾客需求基本重要度计算、竞争性重要度计算和最终

重要度计算三部分等[3]。宋新基于供应链理论视角，重新诠释大规模定制平衡模型的内容，总结在大规模生产和定制生产两种模式中寻求到平衡点和平衡区域的模式和实施关键技术条件[4]。越来越多的轨道交通装备企业开始转向采用产品族设计开发技术进行轨道交通系列产品的研发[5]。孙杰提出了面向电气行业客户定制需求的产品设计方法和基于产品物料清单的功能层次解构方法，将定制产品设计技术与企业实际应用结合起来[6]。汪星刚研究了定制机械产品的设计方案及评价方法，通过构建配置产品特征模型、对产品特征数据冗余处理、配置模块化产品部组件，根据不同客户需求模块化组合产品方案，构建基于大数据的产品配置设计策略[7]。张文雅研究数字经济背景下大规模服装定制的优化创新[8]。俞炜挺构建大规模个性化定制标准体系，研究覆盖企业销售、设计、制造、采购、管理以及后续服务等产品全生命周期的标准[9]。宋勤宇研究定制产品响应时间的不确定性与产品功能配置和企业利润之间的影响[10]。现在研究在针对约束理论本身的理论完善和技术策略优化方面有一定的研究，还有在应用快消品和家居方面的设计及生产制造流程有优化的研究成果，鉴于目前日益发展的城市轨道交通，通过地铁轨道交通客户需求前期响应的方法进行研究，为 ETO 产品客户需求高效率响应及产品设计模式的进一步应用提供极具说服力的论证。

### 3. 研究框架

ETO 产品以客户需求作为直接依据进行产品设计及产品制造。通过分析和类比目前 ETO 产品的研究现状，结合城市轨道交通客户群的特性，以 GT 公司研发团队所经历的一年在地铁行业的产品开发及实施的历史项目数据，作定性及定量分析，对存在问题进行归纳整理，总结归纳出地铁 ETO 产品设计特征确定方法。

需求分析过程将客户需求转化为产品功能，产品设计过程将产品功能转化为产品图纸，工艺设计过程中将产品设计图纸转化为产品加工工艺，进而生产组装制造。客户需求与产品设计过程之间的关系如下图 2 所示。

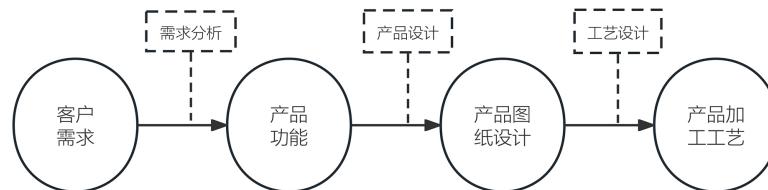


Figure 2. Diagram of customer requirements and product design process  
图 2. 客户需求与产品设计过程的关系图

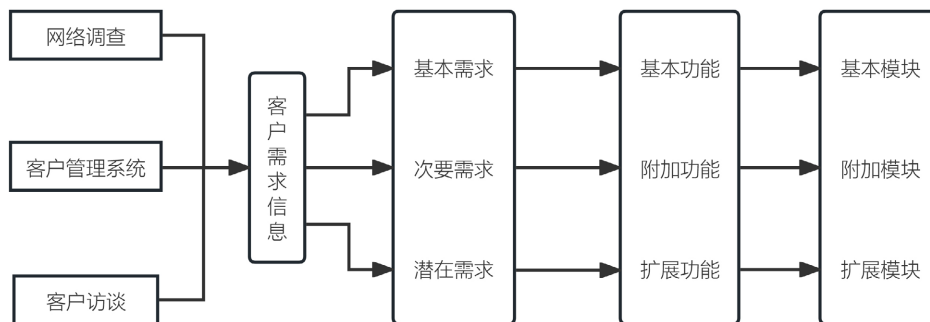


Figure 3. Diagram of customer requirements and product functions  
图 3. 客户需求与产品功能关系图

客户需求信息分解过程中，通过对客户需求信息进行判断梳理出需求信息中的基本需求、次要需求、

潜在需求。产品交付时，基本需求转换成产品的基础功能，作为产品的核心功能，代表产品的核心竞争力；次要需求转换成附加功能，作为选配亮点功能，满足部分客户定制需求的特殊需求；潜在需求转换成产品扩展功能，是依据市场发展预测未来可能会演变的需求功能，作为产品前瞻性扩展功能，作为超出客户预期的功能储备，能提高客户的期望值，获得更高的满意度。客户需求与产品功能之间的关系如图3所示。

#### 4. 案例分析

##### (一) ETO 产品订单需求响应与产品方案规划的协调解决思路

产品设计过程中，产品由部组件构成，部组件也会分解成更小部组件，最终部组件分解为一个零件；对于产品性能来说，亦会逐级分解，产品性能参数分解为部组件设计参数，部组件的设计参数分解为零部件设计参数，彼此之间如同树状分布。零部件和设计参数之间也有对应关系，具体如图4所示。

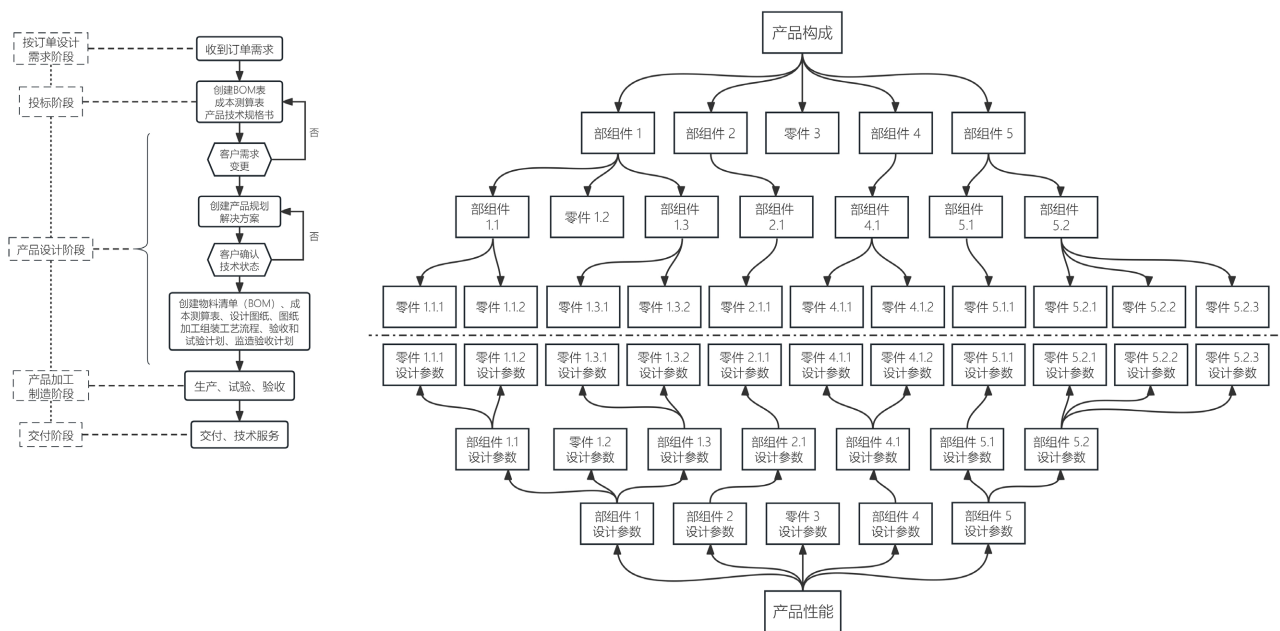


Figure 4. Information structure of product composition and product configuration

图 4. 产品构成和产品配置信息结构图

文章分析在 ETO 产品订单设计过程中的客户需求与设计特征的匹配策略。

##### (二) 质量功能配置及产品开发阶段划分

采用质量屋的结构化工具，将用户需求逐级逐层的转化分解，将用户需求转化为产品技术规格、零部件的设计特征、加工工艺特征和生产加工品质控制等，从而实现从客户需求到产品可量化的分级管理，实现客户订单需求转化为 ETO 产品。分解过程如下图5所示。

##### (三) ETO 产品客户需求重要度计算方法

ETO 产品的设计过程基于客户需求对应展开产品设计。在综合文献[11]和[12]有关内容的基础上，首先建立关联包含了客户需求和技術特征两方面内容的关系矩阵；其次构造客户需求项判断矩阵作为研究对象展开计算分析，比较任意两项客户需求项的重要性，最终得到可行的客户需求与产品的技术特征结合起来的计算方法。

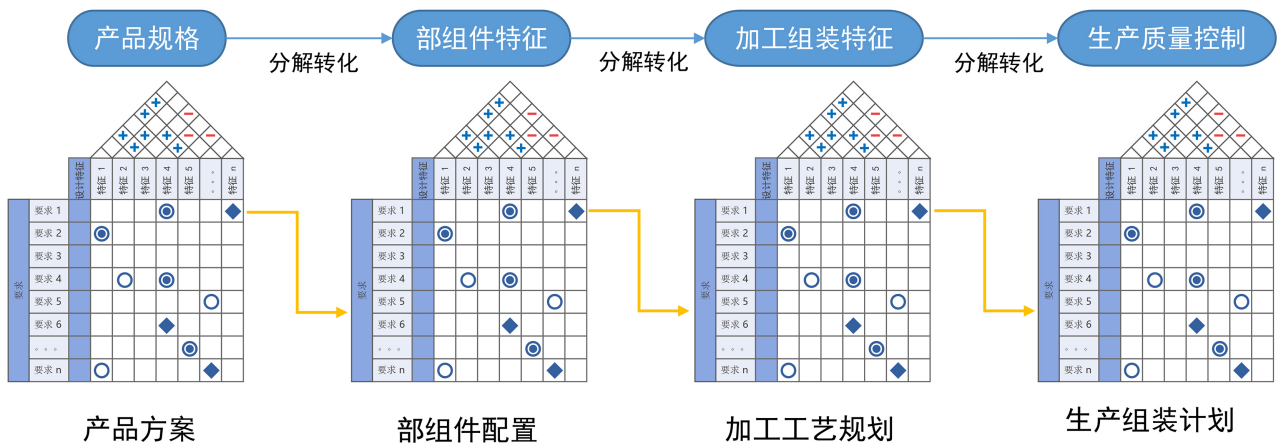


Figure 5. The four stages of quality function configuration  
 图 5. 质量功能配置四阶段

(四) 基于质量屋关系矩阵的客户需求重要度算法

通过层次化分解，将复杂系统中的定性因素和定量因素通过重组进行比较，结合文献[13]建立影响因素之间判断矩阵、展开排序计算，检验核查矩阵元素一致性。构造的层次结构模型如图 6 所示，从多种方案中抉择除最优方案：

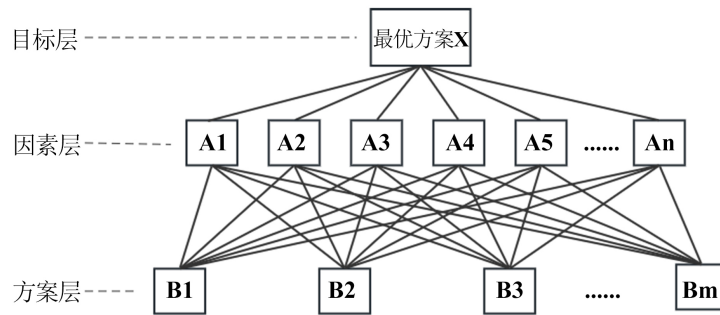


Figure 6. Hierarchical model of the optimal choice  
 图 6. 抉择最优方案层次结构模型图

标度值 $a$	含义 (两个元素比较后)
1	两个元素具有同等重要性
2	同等重要 < 所处标度 < 稍微重要
3	稍微重要
4	稍微重要 < 所处标度 < 明显重要
5	明显重要
6	明显重要 < 所处标度 < 强烈重要
7	强烈重要
8	强烈重要 < 所处标度 < 极端重要
9	极端重要
倒数 ( $1/a_{mn}$ )	$a_{mn}$ : 元素m与元素n比较后的结果 $1/a_{mn}$ : 元素n与元素m比较后的结果

Figure 7. Numerical scale table of judgment results of matrix elements  
 图 7. 矩阵元素判断结果数值标度表

采用以下步骤来构建判断矩阵:

1) 构建客户需求项之间的相关矩阵  $B_{n \times n}$ :

通过选择某一层次的任一元素,与上一层次的某个相关联元素,两两比较其重要性,采用标度 1~9 及其倒数来比较得出各元素的相对重要性,得到判断矩阵。矩阵元素判断结果数值标度表如下图 7 所示。

即客户需求与技术特征关系矩阵需要进行转变为同因素层(客户需求)项之间的判断矩阵如公式 1 所示。

$$B_{n \times m} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ \frac{1}{M} \sum_{k=1}^m a_{ik} a_{jk}, & i \neq j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$a_{ik}, a_{jk}$ , 为来自公式 1 中的元素;

$M$ , 取  $M = \max_{i,j} \left( \left| \sum_{k=1}^m a_{ik} a_{jk} \right| \right)$ , 正数。

2) 排序及其一致性检验

构建判断矩阵进行层次分析时,需要对方案  $B$  进行排序和一致性检验,保持递进层次模型准确,避免出现重要度循环判断现象。采用如下计算步骤进行检验:

① 校验判断矩阵  $B_m$  每行数值

通过对每一行的数值求乘积并计算其  $m$  次方根。

$$\bar{w}_i = \sqrt[m]{M_i} = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m a_{ij}} \quad (3)$$

② 对于符合计算规则的矩阵,有:

$$\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]^T$$

即,

$$W_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum \bar{w}_i} \quad (4)$$

计算各客户需求项的重要度:

$$q_i = \frac{9W_i}{\max(W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)} \quad (5)$$

得到客户需求重要度矩阵:

$$Q = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_n] \quad (6)$$

其结果表述了图 7 中因素层  $A_i$  的排序依据,即方案  $B$  任一排列的顺序。

③ 校验判断矩阵的因素层的因素  $A_1$  最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \sum \frac{(A_1 W)_i}{m W_i} \quad (7)$$



④ 校验判断矩阵元素的一致性值  $CR$ 

$$CR = CI/RI \quad (8)$$

$$CI = |\lambda_{\max} - m| / (m-1) \quad (9)$$

其中,  $RI$  可通过与指标数, 对应表 1 查询所得。

**Table 1.** Table of query  $RI$  values corresponding to the number of indicators

**表 1.** 对应指标数查询  $RI$  值表

指标数	$RI$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45
-----	------	---	---	------	-----	------	------	------	------	------

采用公式 8 计算判断矩阵元素的一致性值  $CR$ , 当  $CR < 0.1$  时, 判断矩阵一致性满足要求, 进行下一步计算, 否则就需要优化完善判断矩阵内得各元素的顺序, 校验后一致性值  $CR < 0.1$ 。

4) 检验需求项之间的相关矩阵  $B_{n \times n}$ , 求解判断矩阵  $C_{n \times n}$  (见公式 1), 判断矩阵的元素  $C_{ij}$  如下所得:

$$C_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{l=1}^n b_{il}} / \sqrt[n]{\prod_{l=1}^n b_{jl}} \quad (10)$$

## 5) 总排序计算

根据公式 4, 计算得出任意因素  $A$  下任意方案  $B$  的排列顺序结果。计算因素  $A$  对应联系下的  $B_j$  方案的排序值  $P_{Bj}$ :

$$P_{Bj} = a * W_{A1j} + b * W_{A2j} + \dots + n * W_{Anj} \quad (11)$$

式中,

$a$ , 因素  $A_1$  对方案  $B$  选择的影响权重值;

$b$ , 因素  $A_2$  对方案  $B$  选择的影响权重值;

$n$ , 因素  $A_n$  对方案  $B$  选择的影响权重值。

通过对计算所得的排序值  $P_{Bj}$  大小比较, 即可得到在任意因素  $A$  相互关联影响下不同方案  $B$  的重要度排序值, 根据排序值大小得出方案  $B$  的排列顺序, 从中选出最优方案。

设客户需求  $CR_i$  的计算后重要度为  $Q_{CRi}$ , 通过公式 1, 计算得出客户需求和技术特征之间的相关联的关系矩阵  $A_{n \times m}$ , 则技术特征  $EC_j$  的重要度  $Q_{ECj}$  计算公式如下:

$$Q_{ECj} = \sum_{i=1}^n a_{ij} \times Q_{CRi} \quad (12)$$

建立关系矩阵将客户需求重要度结果与质量屋相结合, 公式 7 和公式 12 得出具体某个技术特征计算结果重要度, 即用户需求与设计特征的关联计算思路。

## (五) 案例分析

根据上年度的项目历史项目数据, 图 8 所示为招投标共计 69 个 ETO 产品项目的响应时间和人力消耗, 图 9 所示中标后的 15 个 ETO 项目的响应时间和人力消耗。根据图表信息, 得出每次 ETO 产品设计响应的时间和人力消耗存在较大差异。

基于地铁 ETO 产品历史项目数据, 根据 GT 公司的项目总结分析研讨会数据, 对最后的投标结果“成功”和“失败”, 做出统计表, 具体见表 2 所示, 以“成功”的项目为参考基准, 对每个项目当中的影响因素进行罗列, 列出在项目投标过程中, 按照 A~G 的英文顺序对重要程度进行排列, 字母越靠前代表越相关, 罗列出排在前面六位的影响因素。

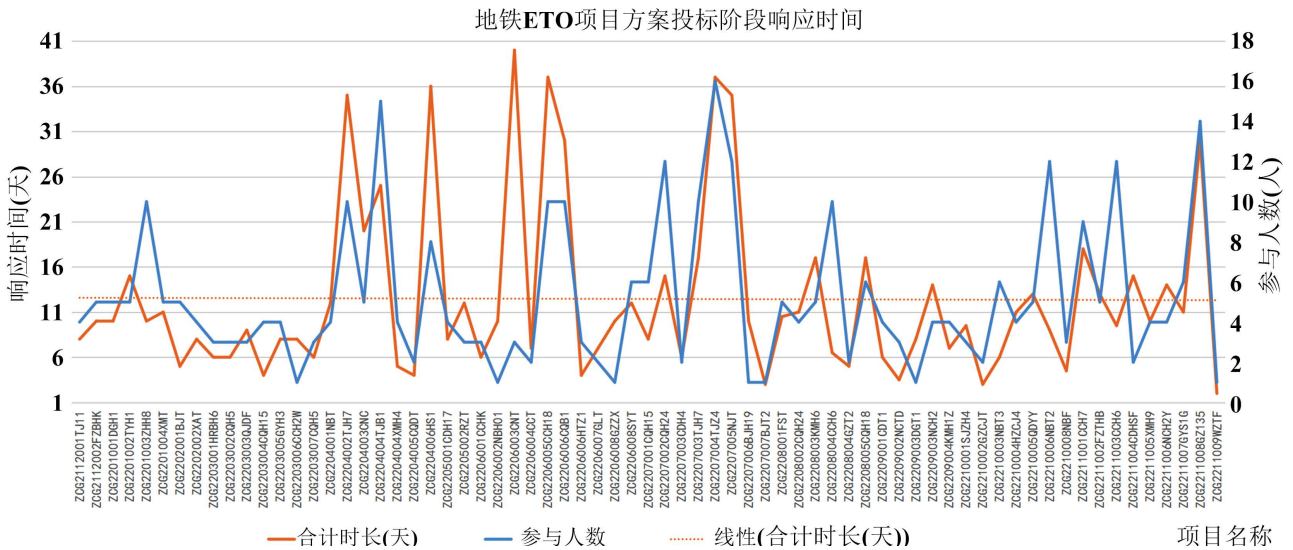


Figure 8. Statistical table of human cost & response time I  
图 8. 订单需求咨询阶段响应时间统计表

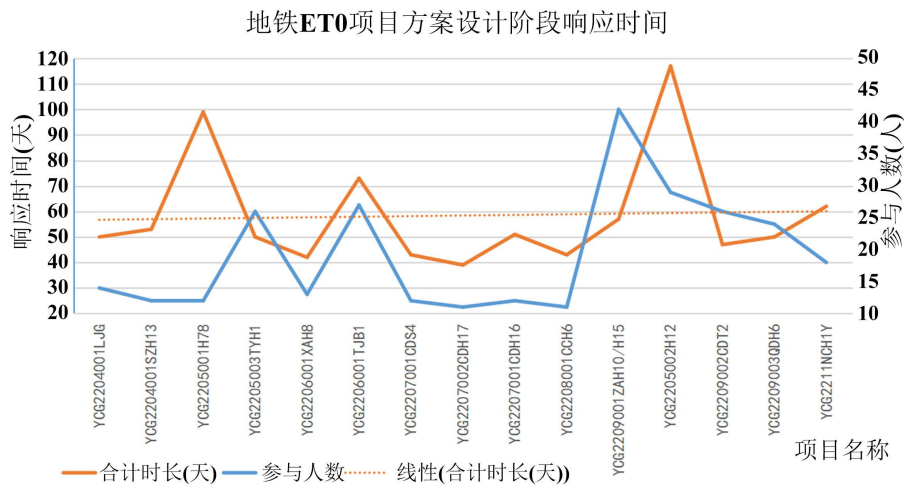


Figure 9. Statistical table of human cost & response times II  
图 9. 订单产品设计阶段响应时间统计表

Table 2. Statistical table of historical project data and influencing factors  
表 2. 历史项目数据及影响因素统计清单

序号	项目名称	影响因素							项目结果
		产品价格	产品性能 (正/负偏离项)	设计方案	产品 交货期	品牌资质	项目经验	其他因素	
1	ZCG2112001TJ11	B	A	C	E	F	C	G	成功
2	ZCG2112002FAJHK	A	B	D	C	G	E	F	失败
3	ZCG2201001DGH1	C	B	A	D	F	E	G	失败
4	ZCG2201002TYH1	D	C	A	B	F	F	E	失败
5	ZCG2201003ZHH8	C	A	B	E	F	D	G	成功
...				.....					...
69	ZCG2211009WZTF	D	B	A	C	E	G	F	失败



采用鱼骨图对统计的影响因素进行分解梳理，具体如下图 10 所示。

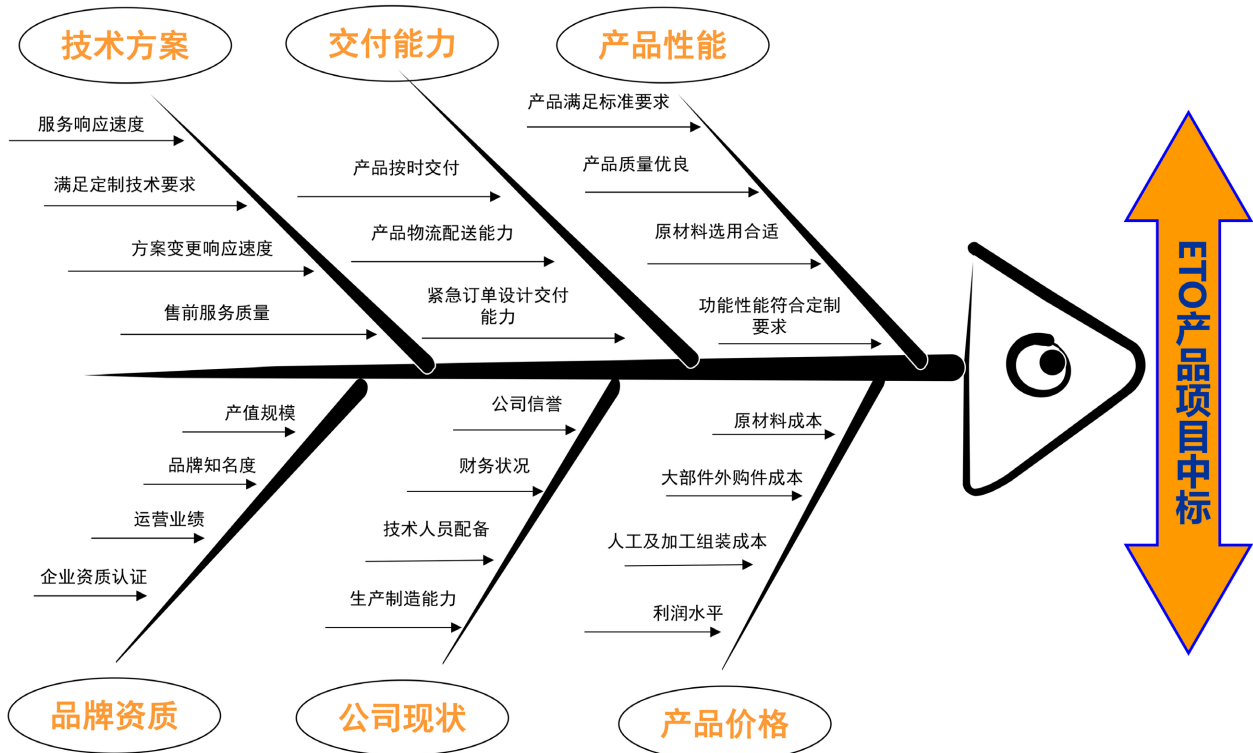


Figure 10. Fishbone diagram analysis of the influencing factors of winning ETO projects  
图 10. 产品项目中标的影响因素分析

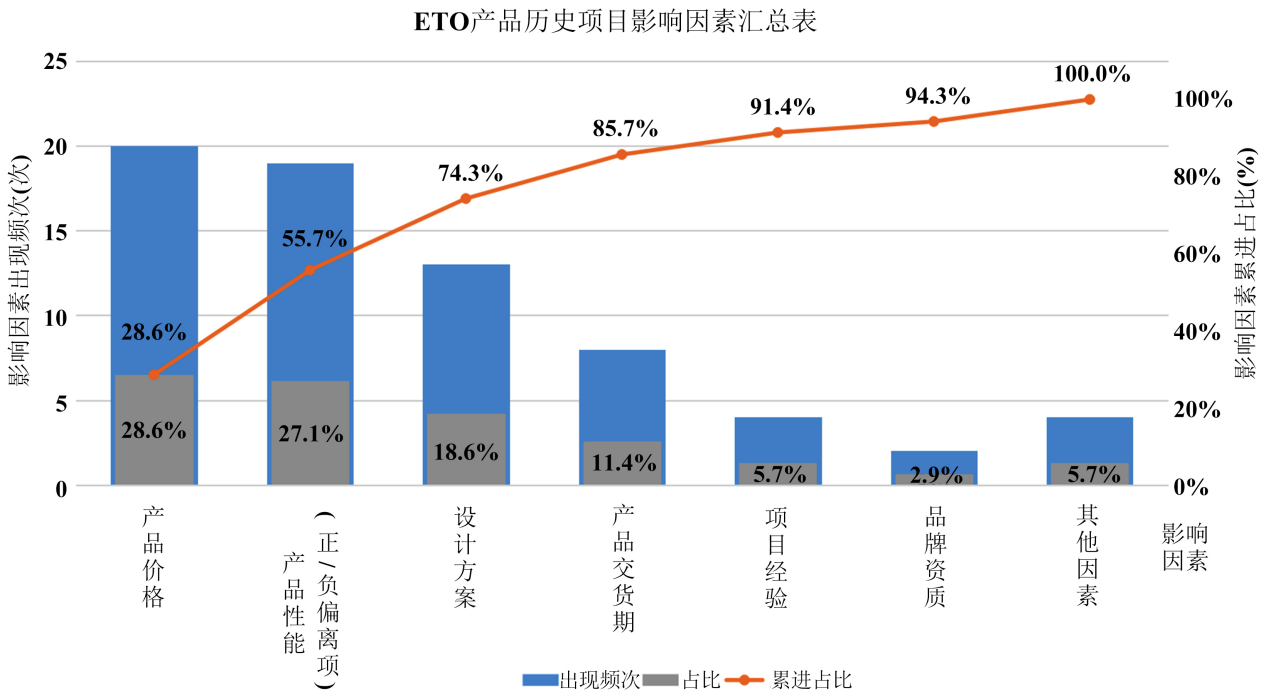


Figure 11. Statistical table of the influencing factors of ETO historical projects  
图 11. ETO 历史项目影响因素统计表

通过鱼骨图对“ETO 产品项目中标”目标的影响因素进行分解,细化每个影响因素下的相关联条件,梳理影响原因,所得主要影响因素的频次结果见图 11 所示。

整理出影响因素排在出现频次前六项分别是产品价格、产品性能、设计方案、产品交付期、项目经验、品牌资质。建立需求关系和技术特征映射关系表(见表 3)。

**Table 3.** Relationship table for customer requirements & technical characteristics  
**表 3.** 客户需求和技術特征映射关系表

技术特征		作业效果优异	简单实用功能	安全可靠牢固	维护保养便捷	乘坐舒适	数智化操作	美观好看	便于转运
客户需求		EB1	EB2	EB3	EB4	EB5	EB6	EB7	EB8
产品价格	BR1	9	3	9	1	1	1	3	3
设计方案	BR2	1	1	1	9	9	1	3	3
其他因素	BR3			1	1	1			
产品交货期	BR4	3		3	3		9		
项目经验	BR5		9				3		3
产品性能	BR6								
品牌资质	BR7	3	3					9	

用质量功能配置方法进行产品的规划,建立客户需求与技术特征的关系矩阵为:

$$A_{7 \times 8} = \begin{bmatrix} 9 & 3 & 9 & 1 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 1 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 3 & 3 & 0 & 9 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 3 \\ 0 & 9 & 3 & 3 & 0 & 1 & 3 & 9 \\ 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 0 \end{bmatrix}$$

#### 1) 客户需求重要度理论计算

采用比较法计算用户需求重要度,构建判断矩阵:

$$B_{\text{比较}} = \begin{bmatrix} 1 & 1.336 & 4.376 & 1.497 & 1.538 & 1.053 & 3.212 \\ 0.748 & 1 & 3.275 & 1.120 & 1.151 & 0.788 & 2.404 \\ 0.228 & 0.305 & 1 & 0.342 & 0.352 & 0.241 & 0.734 \\ 0.668 & 0.893 & 2.924 & 1 & 1.028 & 0.704 & 2.147 \\ 0.650 & 0.869 & 2.845 & 0.973 & 1 & 0.685 & 2.088 \\ 0.950 & 1.270 & 4.155 & 1.421 & 1.461 & 1 & 3.051 \\ 0.311 & 0.417 & 1.362 & 0.466 & 0.479 & 0.328 & 1 \end{bmatrix}$$

验证可得  $B_{\text{比较}}$  矩阵满足互反性的要求,计算判断矩阵的一致性:

$$W_{\text{比较}} = [0.173 \quad 0.129 \quad 0.040 \quad 0.116 \quad 0.112 \quad 0.164 \quad 0.054]^T$$

$$W_{\text{比较}} B_{\text{比较}} = [1.557 \quad 1.685 \quad 0.356 \quad 1.040 \quad 1.012 \quad 1.478 \quad 0.485]^T$$

根据公式 3,公式 4 计算得出一致性值  $CR$ :

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\frac{|\lambda_{\max} - n|}{n-1}}{\frac{\sum \left( \frac{B_{\text{比较}} W_{\text{比较}} - n}{n-1} \right)}{RI}} = 1.73 \times 10^{-5} < 0.1$$

针对  $B_{\text{比较}}$  矩阵, 通过结合公式 11 至公式 17 的计算, 得出用户需求重要度见表 4 所示。

**Table 4.** The results of the importance of customer demand

**表 4.** 客户需求重要度计算结果

用户需求	BR1	BR2	BR3	BR4	BR5	BR6	BR7
重要度	9	6.73	2.06	6.01	5.85	8.55	2.80

### 2) 技术特征重要度理论计算

将表 4 所示用户需求重要度计算结果, 代入公式 12 即得到各项关联技术特征的重要度计算结果(见表 5)。

**Table 5.** The results of the importance of product technical characteristics

**表 5.** 产品技术特征重要度计算结果

技术特征	EB1	EB2	EB3	EB4	EB5	EB6	EB7	EB8
重要度	153.19	169.61	166.67	145.7	88.27	8.55	2.80	108.26

### 3) 客户需求影响因素和技术特征排序

根据表 5 对应表 3 中的各项元素名称, 可得用户需求重要度排序计算结果: BR1 (产品价格) > BR6 (产品性能) > BR2 (设计方案) > BR4 (产品交货期) > BR5 (项目经验) > BR7 (品牌资质) > BR3 (其他因素), 根据“产品价格”、“产品性能”、“设计方案”、“产品交货期”等客户等用户需求排在前列, 计算得出影响 GT 公司 ETO 项目获得成功的最重要影响因素, 指导产品响应阶段与用户沟通的偏重点。

根据表 5 对应表 3 中的各项元素名称, 可得技术特征重要度排序计算结果: EB2 (简单实用功能) > EB3 (安全可靠牢固) > EB1 (作业效果优异) > EB4 (维护保养便捷) > EB8 (便于转运) > EB5 (乘坐舒适) > EB6 (数智化操作) > EB7 (美观好看), 即“EB2 简单实用功能”、“EB3 安全可靠牢固”、“EB1 作业效果优异”等项点排在前三位, 结合设计开发阶段流程指导产品设计阶段偏重点。

## 5. 结论

文章分析 ETO 产品地铁客户的用户需求, 将客户需求分解并关联产品技术特征, 从设计的角度出发, 将用户需求和产品技术特征关联结合, 对地铁用户的需求数据进行统计和细化分析, 研究客户定制的因素在产品方案的影响作用, 建立关系矩阵进行量化分析计算, 得出客户需求和产品技术特征的重要度顺序。通过历史项目数据实例, 结合地铁客户需求及设备供应商的特点, 验证 ETO 订单业务设计过程中的优化改进策略, 实例验证基于用户需求的地铁 ETO 产品设计特征确定方法。

## 参考文献

- [1] 2023 年 1 月城市轨道交通运营数据速报[N]. 中国交通报, 2023-02-08(003).
- [2] 楼健人, 张树有, 谭建荣. 面向大批量定制的客户信息表达与处理技术研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(8): 685-687.
- [3] 耿秀丽, 叶春明. 基于特征选择技术的顾客需求重要度确定方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(7): 1751-1757.

- 
- [4] 宋新. 大规模定制平衡理论应用探索[J]. 合作经济与科技, 2023(7): 116-118.
- [5] 刘兴中, 韩鑫, 黎荣, 等. 基于数据挖掘的产品族规划方法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(5): 7-11.
- [6] 孙杰. 电气行业 ETO 型产品设计土土一体化研究及其应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [7] 汪星刚. 大数据环境下机械产品配置设计关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [8] 张文雅, 朱广舟. 面向数字经济的大规模服装定制应用研究[J]. 针织工业, 2023(11): 67-71.
- [9] 俞炜挺. 面向制造业大规模个性化定制模式的标准体系探究[J]. 中国标准化, 2023(S1): 103-107.
- [10] 宋勤宇. 不确定环境下的产品平台设计和生产决策研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 对外经济贸易大学, 2021.
- [11] 贾华. 层次分析法中权重算法的一种改进[J]. 武测科技, 1995(3): 25-30.
- [12] 黄洪钟. 模糊设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [13] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法——一种简易的新决策方法[M]. 北京: 北京科学出版社, 1986.