

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.250006

工厂布局的概念设计

孔繁森^{1,3}, 卢振林^{1,3}, 孔亮²

(1. 吉林大学 机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 谢菲尔德大学 管理学院, 英国 谢菲尔德 S10 1FL;
3. 未来工厂规划与设计吉林省重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对传统工厂布局形态构建过程缺少概念设计的问题, 提出了一种工厂布局的概念设计框架。从功能和性能两个角度进行工厂布局的概念设计, 功能体现在作业单位的初步划分, 性能体现在构建布局方案。采用中心小组法收集顾客需求; 利用质量屋将设计需求转化工程特性, 并据此提出需要解决的关键问题; 利用头脑风暴法得出解决关键问题的设计概念; 在设计概念的指导下, 应用公理设计法划分作业单位; 应用进化树探究工厂的进化趋势, 从进化树中选取布局方案的可行解; 在设计概念的指导下采用形态学矩阵得出最优的布局概念解。最后, 通过一个工厂布局案例验证了概念设计框架的有效性和实用性。

关键词: 工厂布局; 概念设计; 公理设计; 进化树

中图分类号: TB491

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2025)02-0160-11

Conceptual Design of Plant Layout

KONG Fansen^{1,3}, LU Zhenlin^{1,3}, KONG Liang²

(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. Management School, University of Sheffield, Sheffield S10 1FL, United Kingdom;

3. Key Laboratory of Designing and Planning for the Digital Twin Intelligent Factory, Changchun 130022, China)

Abstract: To address the lack of conceptual design in the formation process of traditional plant layout, a conceptual design framework for plant layout is proposed. The proposed conceptual design considers both functional and performance aspects: the functionality is reflected in the preliminary division of activities, while the performance is reflected in the construction of layout schemes. The focus group method is adopted to collect customer demand. By using the House of Quality, the design demand is transformed into engineering characteristics, and the key issues to be solved are put forward accordingly. Brainstorming is used to generate design concepts for solving these key issues. Guided by the design concepts, the axiomatic design method is applied to divide the activities. The evolutionary tree is used to explore the evolutionary trend of the plant, and the feasible layout solution is selected from the evolutionary tree. The optimal layout concept solution is obtained by using the morphological matrix based on the design concepts. Finally, a factory layout case verifies the effectiveness and practicability of the conceptual design framework.

Key words: plant layout; conceptual design; axiomatic design; evolutionary tree

概念设计由德国学者 Palh 和 Beitz^[1]提出, 他们认为概念设计是在确定设计任务后, 通过抽象的方法, 拟定出产品的功能, 并寻找实现该功能的原理和结构。产品设计学认为: 概念设计即利用设计概念并以其为主线贯穿整个设计过程的设计活动^[2]。在概念设计阶段, 每一个方案都是问题识别、解答

和选择的过程, 这一过程也是设计概念形成的过程, 设计概念可看作设计方案的“灵魂”。工厂布局设计的主要任务是合理规划生产设施、辅助设施和办公设施等, 从而使工厂的物料、人员、能量和信息等合理流动。工厂布局设计可分为概念设计、基础设计、关键设计和施工图设计 4 个阶段。在当前

收稿日期: 2025-01-09

作者简介: 孔繁森 (1965—), 男, 山东省人, 教授, 博士, 主要研究方向为工业工程相关领域、工厂设计与规划、制造系统建模仿真与优化、以人为核心的生产工程问题。Email: kongfs@jlu.edu.cn

工厂布局设计中,许多设计者主要基于经验或照搬成功企业的布局形态构建布局方案,缺乏概念设计意识,导致布局“形似而神不似”,无法达到预期的设计效果。然而,概念设计只需花费整个设计过程5%的预算和15%的设计时间,却决定了80%的收益^[3-4]。如果工厂布局的前期规划不当,将会造成资源浪费、安全隐患以及物流不畅等问题,在运营阶段需要付出巨大的代价进行改善以降低运营成本提高效率。

传统的布局设计方法主要围绕从制表和相关图进行设计,常用方法有摆样法、图解法和系统布置设计法(systematic layout planning, SLP)等^[5]。虽然,这些设计方法遵循先整体布置,后详细布置,但是,与产品设计不同,布局设计更侧重参数设计,缺少独立的概念设计阶段,对设计概念以及隐含其中的企业运作哲学关注不够。Bouramtane等^[6]总结了近年来专家学者们解决设施布局问题的数学优化方法,这些方法采用数学规划或启发式算法生成和筛选布局方案,采用的优化指标多为物流距离、物流量和成本等通用指标,适用于详细设计阶段,缺乏对设计概念的探究和应用。Sagnak等^[7]提出了包含7个维度、19项指标的一种通用的布局综合评价框架,但是没有根据设计概念确定评价指标,不适用于概念方案的评选。齐二石等^[8]和Jia等^[9]分别提出精益工厂和精益生产线的设计框架及实施方法,在设计阶段引入精益概念,但是,没有给出明确的概念设计阶段。赵虎等^[10]将工厂设计过程划分为概念设计、布局块设计、详细布局设计和落地实施4个阶段,结合精益思想,应用价值流进行概念设计,并通过数字孪生实现全过程迭代优化。虽然作者已经划分出了概念设计阶段,并提出根据精益思想进行粗设计,但是没有将精益上升到设计概念的层面,需要进一步的规范化。由此可见,当前工厂布局设计方法缺少明确的概念设计阶段以及合适的概念设计方法。

概念设计源于产品设计,专家学者提出了多种产品概念设计方法。Dieter等^[11]将产品开发过程划分为概念设计、主体设计和详细设计,认为概念设计阶段需要依次完成问题定义、信息收集、概念生成和概念评选等任务,并总结了公理设计方法、发明问题解决理论(teoriya resheniya izobretatelskikh zadatch, TRIZ)和形态学矩阵等在概念设计中的应

用。闻邦椿^[12]提出了一种机械系统的概念设计方法,围绕功能映射求解概念方案,将设计过程划分为功能分析与功能结构设计、工艺动作的分解和构思、执行机构系统方案构思与设计等步骤。Chan等^[13]将TRIZ的科学效应与专利信息结合起来,使用数据挖掘技术帮助工程师获得创新的设计概念解决方案。杨波等^[14]提出一种面向概念设计的扩展功能建模策略,将功能描述的几个重要侧面,如功能模型、功能关联模型以及功能单元进行了扩展,这种扩展有助于实现功能与结构的同步综合设计。She等^[15]在概念设计阶段结合工作流分析和用户需求,以确保功能分析的语法正确性和设计空间探索的广度。郑浩^[16]等提出了基于性能演化的概念设计求解过程模型与实现方法,解决了重视功能结构映射,而忽略性能的演化规律、存在上下文孤立以及无法溯源等问题。

针对传统布局设计方法缺乏概念设计阶段的问题,本文将工厂视为广义的产品,引入产品概念设计方法。但是,如表1所示,工厂具有其特殊性,不能照搬产品的概念设计模型和方法。因此,本文结合工厂特性,提出了一套系统完整的、设计概念贯穿整个设计过程的工厂布局概念设计框架和方法体系。

表1 产品设计与工厂设计的比较

Table 1 Comparison between product design and plant design

对比因素	产品设计	工厂设计
设计对象规模	小	大
更新换代速度	快	慢
技术升级负责人	设计者为主、 使用者可能参与	使用者为主、 设计者可能参与
等比例原型机	有	无
主要影响因素	顾客需求	顾客需求、产品属性

1 概念设计

“设计”的主流解释是为某事出谋划策,建立和确定以前尚未解决的问题的相关结构和方案,或采用新方案处理以前解决过的问题。“概念”可以理解为人们结合实践经验对事物本质属性的概括。设计概念是设计师赋予设计对象的“灵魂”,用于定义设计方案的基调而不是表征具体的结构,整个设计过程将围绕设计概念,也就是问题的解决过程展开。即使生产相同产品的工厂,设计概念不同,其布局方式也千差万别。概念设计处于整个设计过程的初始

阶段，是一个问题求解的过程，以设计概念为主线、以功能实现和性能优化为目的，输出概念方案。设计概念和概念方案是完全不同的两个概念，设计概念是一种指导概念设计过程的理念，通常用一段简短的文字表达，而概念方案是一种概念结构，用草图或模型表达。

概念设计具有层次性、多样性和创新性等特点。层次性体现在设计过程涉及多个层次，由粗到精，逐渐递推，例如，在布局时依次完成工厂的总平面布局、车间布局和生产线布局等；多样性体现在根据不同的设计概念可设计出各种形态的工厂布局方案，即使同一种设计概念，也会生成各种不同的概念方案；创新性旨在打破思维定势，并构思未来工厂的演化趋势。

2 工厂布局的概念设计框架

霍尔三维结构为解决大型复杂系统的规划、组

织、管理问题提供了一种统一的思想方法，本文引入霍尔三维结构^[7]创建工厂布局的概念设计框架(见图 1)，分别从时间维、逻辑维和方法维讨论工厂布局的概念设计过程，为设计师提供一种在设计概念的指导下划分并布局作业单位、形成概念方案的设计框架。在逻辑维使用 IDEF0 图(见图 1b)来体现概念设计步骤的层次性和相关性。A0 层表示概念设计的总任务是输入相关信息，输出布局概念方案。A0 层进一步分解为生成设计概念和在设计概念指导下构建方案。A1 层又细分为识别顾客需求、定义关键问题、生成设计概念 3 个步骤；A2 层进一步细分为划分作业单元和构建概念方案两个步骤。值得注意的是，A2 层是在 A1 层设计概念的指导下进行的。时间维用于表征概念设计各阶段的时间占比及其产物。方法维则列举了与概念设计每个步骤相适应的典型设计方法供设计选择，例如识别顾客需求可以采用中心小组法和调研法等(见图 1c)。

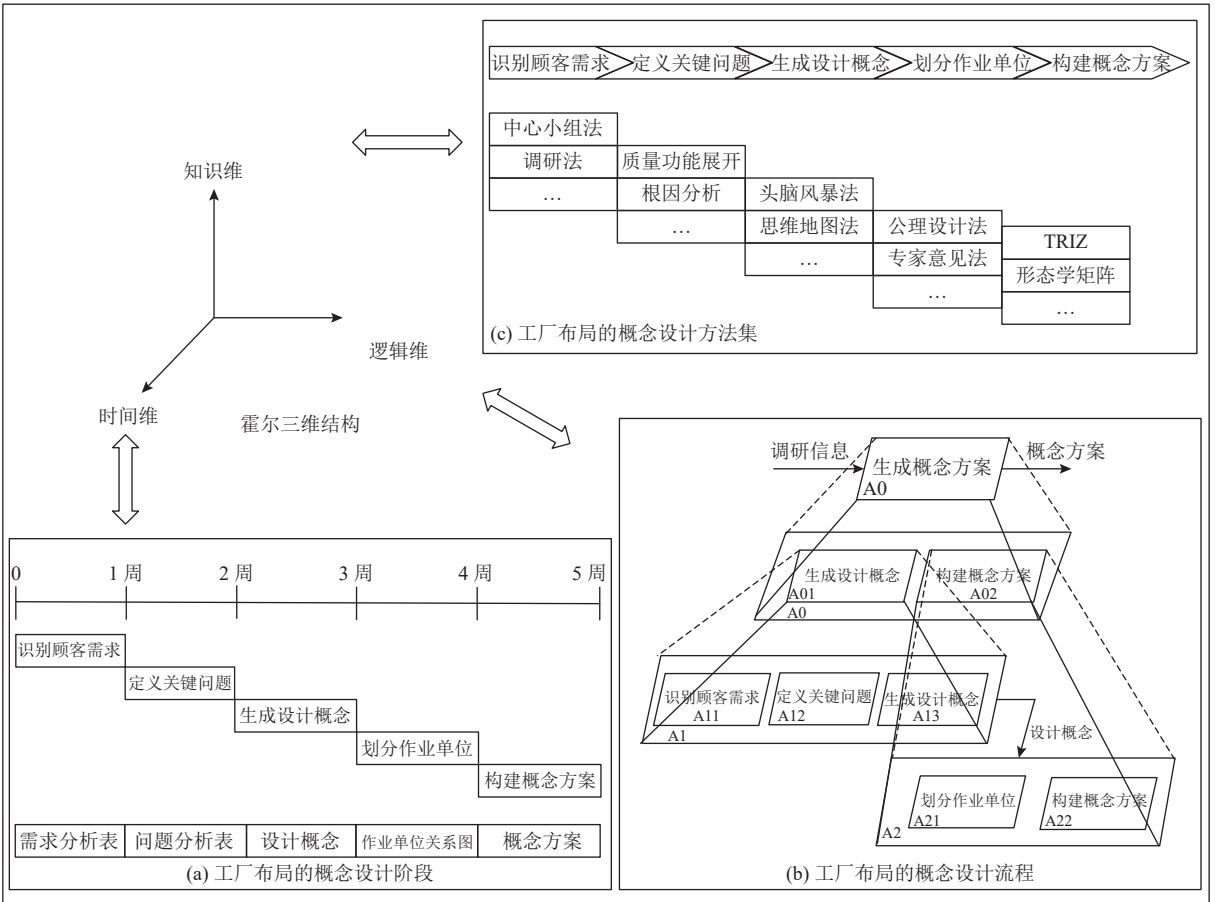


图 1 工厂布局的概念设计框架

Figure 1 Conceptual design framework of plant layout

下面讨论每个步骤的详细内容及所采用的具体方法。

2.1 识别顾客需求

对于工厂而言, 内部顾客需求主要来源于生产和管理部门的相关诉求, 例如效率、宜人性和安全性等。外部顾客需求主要来源于营销部门收集到的市场信息, 例如产品种类、需求量等。识别顾客需求的方法大致包括走访、调查问卷和中心小组法等。在系统化布置设计方法中, 主要收集产品规格、产量、生产工艺、工艺流程和时间信息, 侧重于产品特性, 致力于满足外部顾客的需求。对于一个工厂而言, 只关注产品显然不行, 还需要考虑工厂的运营者以及工人等内部顾客的需求。工厂的内部顾客主要集中在业主公司, 包括董事会、工艺人员、生产工人以及销售人员等。一般采用中心小组的方式进行信息收集: 首先, 根据公司组织架构组建专家小组; 其次, 召开会议, 鼓励大家围绕需求踊跃发言; 最后, 汇总整理, 得出典型的顾客需求。

2.2 定义关键问题

顾客需求是一种定性的描述, 比较抽象, 专业化程度低, 难以直接应用。通常采用质量功能展开法将顾客需求转化为定量的工程特征。该方法的核心是质量屋(见图2), 主要包含顾客需求(左墙)、工程特性(天花板)、相关矩阵(房间)和工程特性重要度(地板)等几个主要区域。

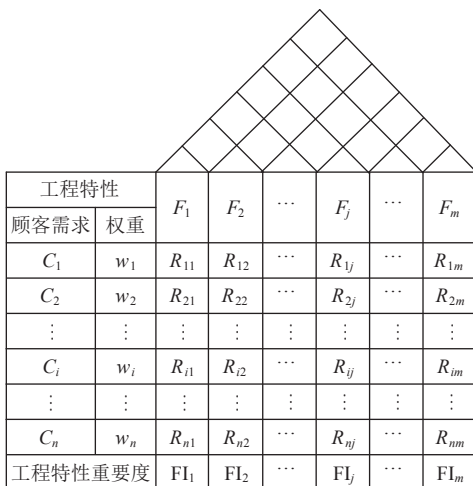


图2 顾客需求质量屋

Figure 2 House of quality of customer demand

在顾客需求栏填入上一步得到的典型顾客需求, 并基于粗糙集理论^[18]等确定这些需求的权重。在工程特性栏填写满足顾客需求的工程特性。专家

对顾客需求和工程特性的相关性进行评分, 一般采用9, 3, 1, 0评分法, 分别代表强相关、相关、弱相关以及不相关。工程特性重要度的计算公式如式(1)所示。

$$FI_j = \sum_{i=1}^n w_i R_{ij}; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (1)$$

式中, w_i 表示第*i*个顾客需求的重要度; R_{ij} 表示第*i*个顾客需求与第*j*个方案工程特性的相关程度; FI_j 表示第*j*个方案工程特性的重要度。因为在概念设计阶段, 尚未形成布局方案, 无法进行详细的定量计算, 因此只需根据功能特征提出关键问题。

2.3 生成设计概念

生成设计概念是指采用创新思维方法提出解决问题的各种指导思想, 并在此基础上提出设计概念。设计概念的产生属于创新设计过程, 主要有头脑风暴法、类比法和仿生法等。本文采用头脑风暴法, 主要包括组建讨论小组、阐明问题、提出设想和汇总整理4个步骤。在生成设计概念后, 还需要组织中心小组围绕设计概念进一步讨论, 从而确定与设计概念相关的设计原则。

2.4 划分作业单位

一般将布局设计中需要确定位置的最小对象称为作业单位。作业单位在工厂、车间和生产线等不同的维度对应的实体不同, 在总平面布局时, 作业单位对应车间级, 在车间布局设计时, 作业单位对应生产线级。基于经验的布局设计, 设计者大多根据经验或工艺划分作业单位。

工厂设计主要通过功能—结构映射得到产品的功能载体, 常用的方法有功能方法树、公理设计法、功能—行为—结构设计法和创新设计法等。工厂的功能可以看作输入原材料, 在能量的驱动、生产信息的控制和必要的人员参与下输出产品, 分为主要功能和辅助功能。工厂的主要功能是制造产品, 因此, 根据产品的工艺程序确定主要功能(见图3a)。由于, 功能和工艺都采用“动词+名词”的语义形式, 因此, 可以将工序定义为功能元。在工艺转化为功能的过程中, 要根据设计概念对功能进行分解与综合。例如, 根据成组原则将工艺和结构相似的零件合并为零件族, 零件族采用同一工艺设备, 转化为同一功能元。辅助功能支撑主要功能, 使工厂的功能更加完善, 由顾客需求(见图3b)确定, 例如转运物料、为员工提供办公场所等, 采用“动

词+名词”的形式定义。为了便于分析，可以将功能逐层分解，一直分解到与所在维度对应的功能元，并按层次关系构建功能树。本文采用公理设计法划分作

业单位(见图 3c)，通过“之”字形映射分层次地完成从功能域到结构域的转换。利用公理设计定义工厂功能域和结构域之间的映射关系，如式 (2)~(3) 所示。

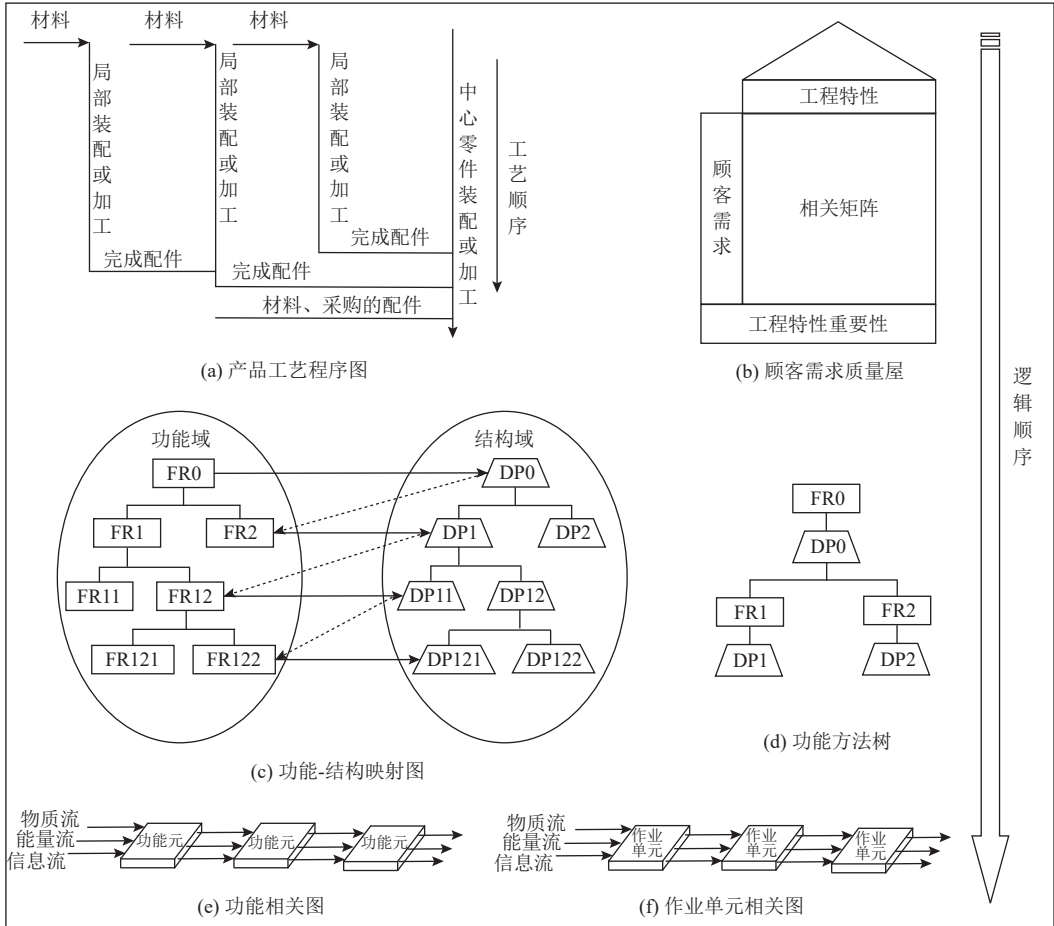


图 3 工厂布局的公理设计模型

Figure 3 Axiomatic design model for plant layout

$$FR = A \cdot DP; \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ \vdots \\ FR_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ \vdots \\ DP_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，**FR**为功能矩阵；**DP**为作业单元矩阵；**A**为设计矩阵。

设计矩阵**A**分为无耦合矩阵、耦合矩阵和准耦合矩阵 3 种形式(见表 2)，只有无耦合矩阵和准耦合矩阵才能满足独立性，因此，耦合矩阵需要通过解耦运算转化为准耦合矩阵^[19]。布局设计过程中的解耦，主要是为了减少某个作业单位位置变更后，对其他作业单位的影响，提高生产效率。耦合性分析还能发现功能高度相关的作业单位，在工厂布局

概念设计中，可以将这些作业单位集合为一个作业单位，从而提高工厂的集成性。

表 2 设计矩阵 A 的 3 种形式

Table 2 Three forms of design matrix A

无耦合矩阵	耦合矩阵	准耦合矩阵
$\begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix}$

公理设计的结果可以通过功能方法树(见图 3d)的形式呈现，但是功能方法树只是简单地表示了功能的分解与作业单元的划分情况，对功能元之间关系的表征不多^[20]。在设计时，通过物质流、能量流和信息流将功能元以串并联的方式联结起来，形成功能关系图(见图 3e)。值得注意的是，工厂存在着

大量的人员流动, 为了保证生产安全, 需要单独考虑人流, 因此, 将物质流分为物流和人流。相应地, 将作业单位连接起来, 形成作业单元关系图(见图 3f)。

2.5 构建概念方案

作业单元划分是为了进行功能结构映射; 构建概念方案则是确定这些作业单元的位置, 主要考虑性能。在构建概念方案阶段则需要根据推理逻辑依次构思影响工厂性能的布局原则、总平面布局、车间内物流路线、仓储系统和转运系统 5 大要素的可行解。布局方案的可行解来源于相似工厂的布局形态、工程图纸、设计手册和相关标准等。这些知识仅简单罗列了已有的设计知识, 难于按照科技发展的趋势表征工厂的演化形态。因此, 本文采用工程系统进化树, 表示工厂布局形态的演化规律。尼古拉·什帕科夫斯基^[21]将进化路线归类为 10 条典型技

术路线(见表 3), 并通过统一的树状结构表征进化路线及其相互关系。工厂布局的进化树如图 4 所示, 进化树的每个分支代表一条进化路线。在进行概念方案构建时, 需根据具体的情境, 结合顾客需求从进化树中选择合适的工厂布局概念设计方案。

表 3 典型的技术系统进化路线

Table 3 Typical evolutionary routes of technology systems		
序号	技术路线	方法
1	单一—双—多	加入元素和联系
2	扩展—裁剪	替换系统中的元素和联系
3	组件裁剪	去掉元素和联系
4	表面特性进化	改变表面特征, 获得资源
5	内部进化	应用内部空间资源
6	几何进化	改变尺寸和形状
7	动态化	改变联系, 使参数可变
8	分割路线	将系统分割成多个部分
9	协调性路线	提高协调性的程度
10	可控性路线	提高可控性的程度

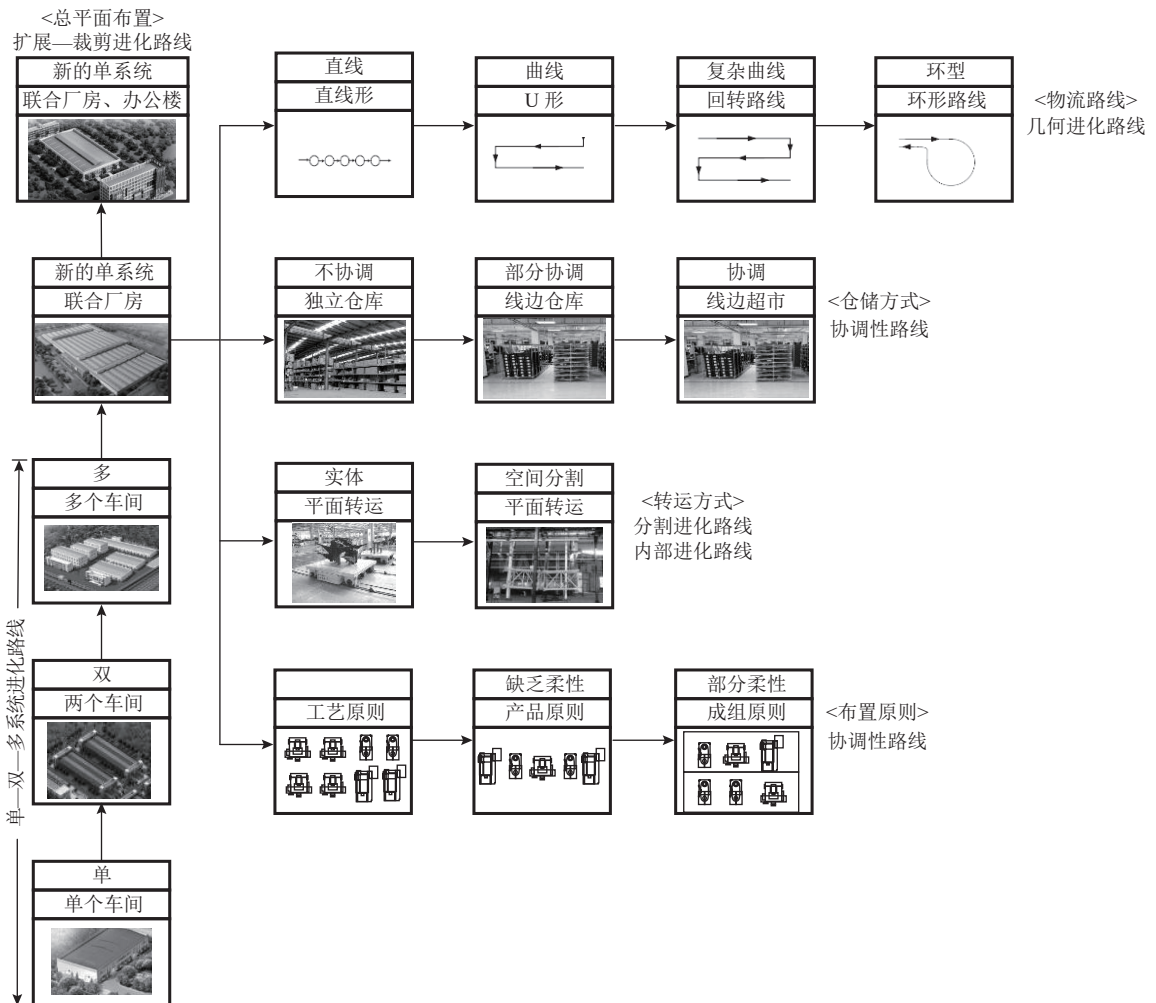


图 4 工厂布局的进化树 (部分)

Figure 4 Partial evolutionary tree of plant layout

根据工厂特性选取进化树上的可行解，填写工厂布局概念方案形态学矩阵分析表(见表 4)，从而形成典型的布局概念方案。根据布局原则对布局形态进行筛选，将最优解设为 10 分，其他可行解与其比较后评分。然后组合可行解，形成多种概念方案的备选方案。最后，汇总评分结果，对概念方案进行排序，选取得分最高的方案。

表 4 概念方案形态学矩阵¹⁾

Table 4 Morphological matrix of conceptual scheme

性能因素	设计任务	设计概念	设计原则	权重	可行解			
					1	2	...	i
A	A1	A2	...	Ai
B	B1	B2	...	Bi
...
N	N1	N2	...	Ni
合计				
排序				

1) “...”表示省略。具体内容根据工厂具体情况填写。

3 案例研究

以 Z 消防装备公司生产基地设计项目为例，验证工厂布局概念设计框架的有效性。

步骤 1 识别顾客需求。

Z 公司的组织架构如图 5 所示，内部顾客需求来自生产总监的下属部门和企业领导，外部顾客需求来自营销总监的下属部门。因此，分别从生产部、工艺部、物流部、市场部、销售部和行政部中各选取 2 人与总经理和总监一起召开小组会议。根据会议研讨整理后得到 Z 公司的主要顾客需求为：适应定制生产、适应多品种小批量、投入产出比高、物流顺畅、便于更改布局、空间集约和安全性 7 项需求。

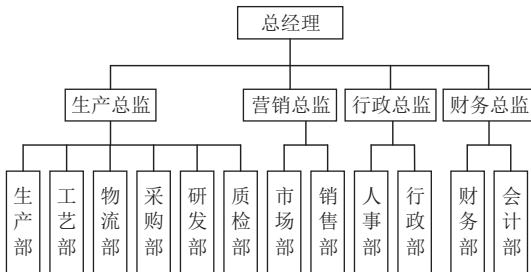


图 5 Z 公司的组织架构

Figure 5 Organizational structure of company Z

步骤 2 定义关键问题。

Z 公司的顾客需求质量屋如图 6 所示，生产成

本和产品可变性两项工程特性的重要性评分最高，涉及消除浪费和增强适应性两个问题，其他工程特征大部分可归为这两类问题(见表 5)。

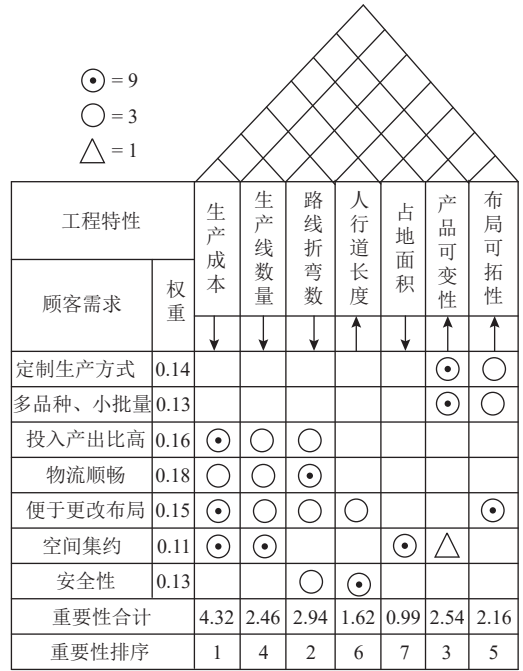


图 6 Z 公司顾客需求质量屋

Figure 6 House of quality for customer demand of company Z

表 5 问题定义表

Table 5 Problem definitions

问题	设计指标
消除浪费	物流成本、生产线数量、路线折弯数、占用面积
增强适应性	产品可变性、布局可拓性

步骤 3 生成设计概念。

组建讨论小组，采用头脑风暴法构思解决关键问题的概念设想。接下来，汇总这些设想，提出精益工厂和柔性工厂两个设计概念，并给出相应的布局原则(见表 6)，用于构思和筛选布局概念方案。

表 6 设计概念分析表

Table 6 Analysis of design concepts

问题	设想	设计概念	布局原则
消除浪费	精益	精益工厂	一个流
	多能工		减少库存
	节能减排		立体空间
增强适应性	精益	柔性工厂	成组原则
	单元生产技术		混合生产
	智能化		灵活机动

步骤 4 划分作业单位。

绘制消防车和高空作业车的生产工艺程序图

(见图 7)。根据工艺程序图和步骤 2 得到的顾客需求质量屋, 采用公理设计的“之”字映射进行功能分解与综合(见表 7~10), 通过功能方法树表示递推关系(见图 8)。

在进行功能分析时, 结合精益工厂和柔性工厂的相关原则对功能元进行合并, 例如根据成组原则将消防车和高空作业车相同工艺所对应的功能进行合并。

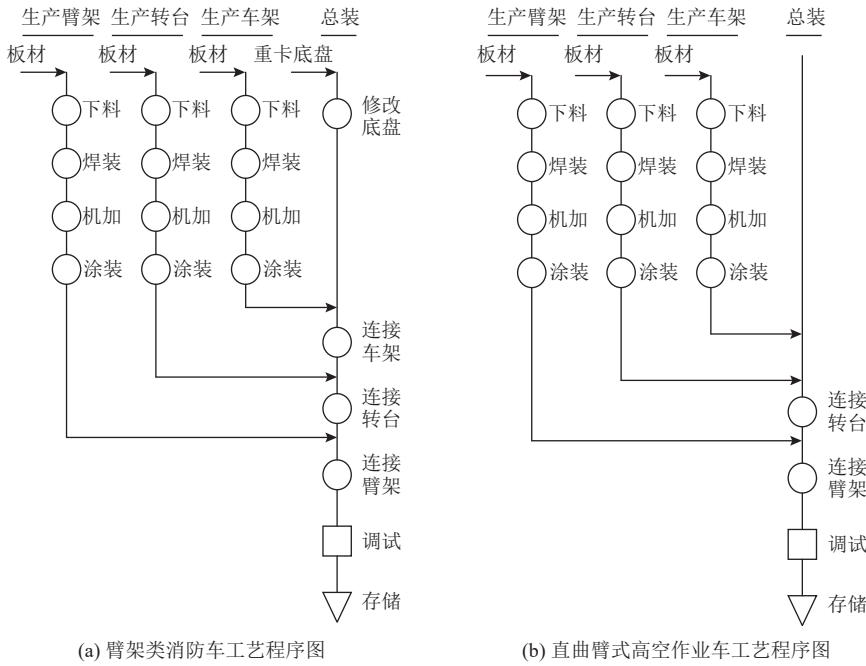


图 7 Z 公司典型产品工艺程序图

Figure 7 Typical product processes of company Z

本文以第 3 层 $FR1i-DP1i$ 映射的推理过程为例, 说明公理设计的应用过程。根据两种产品的生产工艺可知, 生产设施需要满足下料、生产臂架、生产转台、生产车架、涂装结构件、装配整机、调试整机和存放整机等子功能, 并构思实现这些功能的作业单位。从表 8 可以看出各个子功能与作业单位一一对应。由以上分析得出式 (4), 可以看出设计矩阵是非耦合矩阵, 满足独立公理。

表 7 第 1 层: $FR0-DP0$ 映射

Table 7 Layer 1: $FR0-DP0$ mapping

FR0	DP0
制造产品	工厂

表 8 第 2 层: $FR2i-DP2i$ 基础映射

Table 8 Layer 3: $FR2i-DP2i$ mapping

FRi	DPi
FR1 生产消防装备	DP1 生产设施
FR2 辅助生产消防装备	DP2 辅助设施

表 9 第 3 层: $FR1i-DP1i$ 映射

Table 9 Layer 3: $FR1i-DP1i$ mapping

$FR1i$	$DP1i$
FR11 下料	DP11 下料区
FR12 加工臂架	DP12 臂架生产线
FR13 加工车架	DP13 车架生产线
FR14 加工转台	DP14 转台生产线
FR15 涂装结构件	DP15 涂装线
FR16 装配整机	DP16 装配线
FR17 调调整机	DP17 调试场
FR18 存放整机	DP18 停车场

表 10 第 3 层: $FR2i-DP2i$ 映射

Table 10 Layer 3: $FR2i-DP2i$ mapping

$FR2i$	$DP2i$
FR21 供给能源	DP21 能源系统
FR22 转运物料	DP22 转运系统
FR23 提供办公场所	DP23 办公中心
FR24 提供生活场所	DP24 生活中心

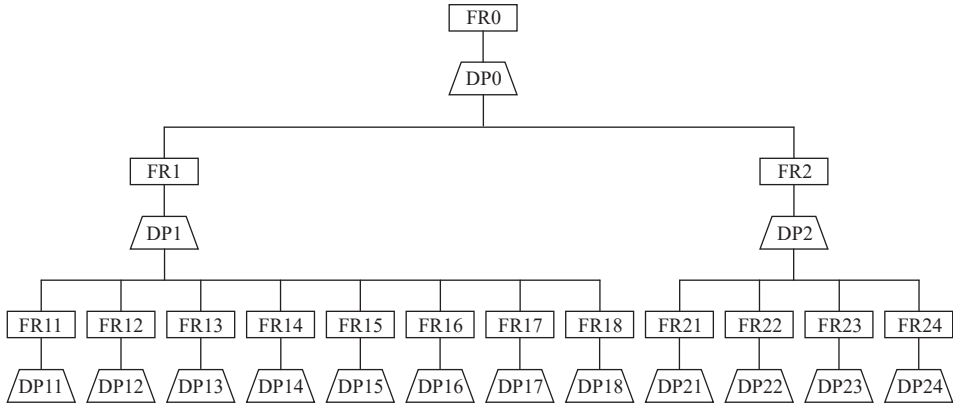


图 8 Z 公司布局设计的功能方法树

Figure 8 Functional method tree of layout design for company Z

$$\begin{matrix}
 \text{FR11} \\
 \text{FR12} \\
 \text{FR13} \\
 \text{FR14} \\
 \text{FR15} \\
 \text{FR16} \\
 \text{FR17} \\
 \text{FR18}
 \end{matrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{matrix}
 \text{DP11} \\
 \text{DP12} \\
 \text{DP13} \\
 \text{DP14} \\
 \text{DP15} \\
 \text{DP16} \\
 \text{DP17} \\
 \text{DP18}
 \end{matrix}
 \quad (4)$$

在得到功能元及其对应作业单元后，绘制功能方法树 (见 图 8)，由功能方法树分析得出的作业单元分别为下料区、臂架生产线、车架生产线、转台生产线、涂装线、装配线、调试场、停车场、能源系统、转运系统、办公中心和生活中心；根据工艺程序通过物料流、能量流、信息流和人员流将功能元关联起来，构成作业单位关系图 (见 图 9)。

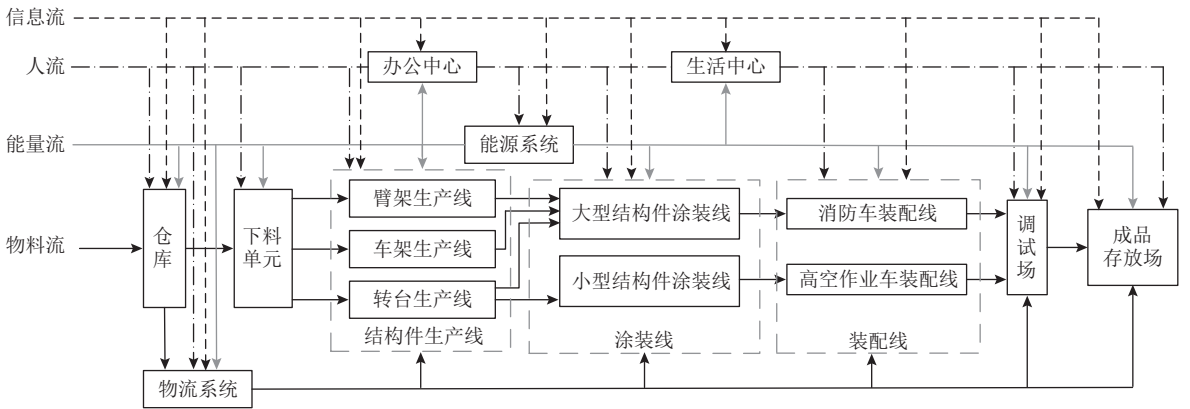


图 9 Z 公司的作业单位关系图

Figure 9 Operation activity relationships of company Z

步骤 5 构建概念方案。

结合 Z 公司的特性，从进化树中选取可行概念解填写表 11。根据布局原则对布局概念方案进行筛选，将最优解评为 10 分，其他概念解与其比较后评分，评分结果填写在表 11 中相应的【】内。例如线边仓库更符合减少库存原则、最短距离原则、灵活机动原则，评分为 10 分，而独立仓库评分为 6 分。最终，求得各个方案的性能因素评分与权重的加权乘积和，并根据结果对布局概念方案进行排序。由于受具体情境和技术限制，在构建工厂布局

的概念设计方案时，有时难以使各个性能因素同时达到最优。因此，在最优方案中部分满足性能指标的子方案可能为次优解。

如图 10 所示，方案 2 得分最高，为最优方案。为了实现柔性生产方式，采用成组原则设置生产线，将生产车间集成为联合厂房，从而缩短运输距离，为了防止结构件加工区和装配区的相互干扰，在两个区域之间设置隔离墙。此外，为了缩短人员行走距离将联合厂房与办公生活中心集成到同一建筑内，在交界处设置门禁，防止外来人员进入

表 11 工厂布局概念方案评选

Table 11 Selection of plant layout concept schemes

性能因素	设计任务	设计概念	设计原则	权重	概念方案		
					方案 1	方案 2	方案 3
布置原则	选择最佳布置原则		最短距离原则、物流顺畅原则、成组原则、混合生产原则	0.21	产品原则【6】	单元布置【10】	单元布置【10】
总平面布置	选择最佳厂房类型		最短距离原则、物流顺畅原则	0.23	独立厂房、办公中心、生活中心【7】	联合厂房、办公生活中心综合体【10】	联合厂房、办公中心、生活中心【9】
车间内物流路线	选择最佳流动路径	精益工厂、柔性工厂	安全满意原则、灵活机动原则	0.25	直线型【8】	环型【10】	S 型【6】
仓储方式	选择最优仓储类型		减少库存原则、最短距离原则、灵活机动原则	0.18	独立仓库【6】	线边仓库+独立仓库【8】	线边仓库【10】
转运方式	选择最佳转运方式		立体空间原则、灵活机动原则	0.13	平面转运【8】	立体转运(板式链)【10】	立体转运(积放链)【9】
合计				1	6.99	10	8.64
排序					3	1	2

生产区。在联合厂房内, 根据物流顺畅原则, 采用环形物流路线, 减少路线折弯数。根据物流路线和工艺路线选择, 采用直线型生产线布局。为了实现安全满意原则, 将物流和人流分开, 规划不同的行走路线, 设置人行道。结合利用立体空间的原则, 采用积放链、板式链等立体转运方式进行物料搬运。然而, 在仓储方式选择时, 尽管采用线边库能够提高物料的可获取性, 由于物料规格和工厂空间

面积限制, 部分工位线旁无法放置相应的物料, 因此只能设置独立仓库。在确定工厂的概念设计方案后, 经过后续的基础设计、关键设计和施工图设计, 应用于生产车间, 取得了良好的效果, 实践验证了该方法的有效性和可行性。例如, 部署新方案后, 与该厂原有车间相比, 物流成本降低了 10%, 工人满意度提高了 36%, 而且库存成本降低 27%。

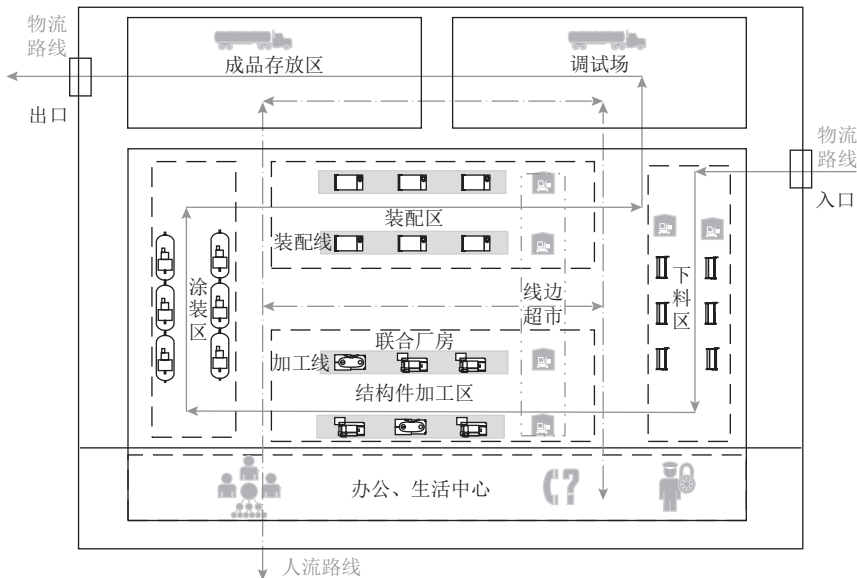


图 10 Z 工厂布局最优概念方案

Figure 10 Optimal conceptual scheme of plant layout for company Z

4 总结

针对传统工厂布局形态构建过程缺少概念设计的问题, 本文提出了一种工厂布局的概念设计框

架, 主要研究内容和结论如下。

- 1) 结合工厂特性提出一种工厂布局的概念设计框架, 弥补了传统布局设计方法缺乏概念设计阶段的缺陷。

2) 构建了基于质量功能展开与公理化设计法相结合的作业单元划分方法, 解决了凭借经验划分作业单元, 缺少系统化方法的问题。

3) 引入工程系统进化理论, 探讨了工厂布局方式的进化规律, 并通过形态学矩阵筛选最优布局概念方案。

4) 指出了利用经验法或标杆法进行布局设计的不足, 提出依据设计概念构建概念方案的工厂布局概念设计框架。这一设计框架可以广泛应用在布局设计的各个层面, 如宏观布局、中观生产线设计和微观工作站设计等。

参考文献:

- [1] PAHL G, BEITZ W. Engineering design: A systematic approach [M]. London: Springer, 1996.
- [2] SONG B, MILLER S, AHMED F. Attention-enhanced multimodal learning for conceptual design evaluations[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2023, 145(4): 041410.
- [3] 孔繁森. 工厂规划与设计指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2023.
- [4] DAVID G U. The mechanical design process [M]. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [5] 周宏明. 设施规划[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [6] BOURAMTANE K, KHARRAJA S, RIFFI J, et al. A comprehensive review of static and dynamic facility layout problems[J]. *Annual Reviews in Control*, 2024, 58: 100970.
- [7] SAGNAK M, ADA E, A new holistic conceptual framework for layout performance assessment[J]. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2019, 30(1): 233-260.
- [8] 齐二石, 张洪亮. 工厂精益设计的框架及实施方法[J]. *科学与科学技术管理*, 2009, 30(9): 167-171.
QI Ershi, ZHANG Hongliang. The frame of factory's lean design and its realization method[J]. *Science of Science and Management of S. & T.*, 2009, 30(9): 167-171.
- [9] JIA Z. Design and implementation of lean facility layout system of a production line[J]. *International Journal of Industrial Engineering Theory Applications & Practice*, 2011, 18(5): 260-269.
- [10] 赵虎, 赵宁, 张赛朋. 结合价值流程图与数字孪生技术的工厂设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 025(006): 1481-1490.
ZHAO Hu, ZHAO Ning, ZHANG Saipeng. Factory design approach based on value stream mapping and digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 025(006): 1481-1490.
- [11] DIETER G E, SCHMIDT L C. Engineering design [M]. 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2013.
- [12] 闻邦椿. 机械系统概念设计与综合设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [13] CHAN E M, KOR A L, NG K W, et al. A conceptual design framework based on TRIZ scientific effects and patent mining[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2021, 12(12): 43-50.
- [14] 杨波, 高常青, 尹晓玲, 等. 面向概念设计的扩展功能建模方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(15): 153-162.
YANG Bo, GAO Changqing, YIN Xiaoling, et al. Extended Product Function Modeling for Conceptual Design[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(15): 153-162.
- [15] SHE J, BELANGER E, BARTELS C, et al. Improve syntax correctness and breadth of design space exploration in functional analysis[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2022, 144(11): 111402.
- [16] 郑浩, 冯毅雄, 高一聪, 等. 基于性能演化的复杂产品概念设计求解过程研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(9): 214-223.
ZHENG Hao, FENG Yixiong, GAO Yicong, et al. The solving process of conceptual design for complex product based on performance evolution[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(9): 214-223.
- [17] ZHANG Z. Research on enterprise financial risk conduction mechanism based on system dynamics[J]. *Systems*, 2022, 10(6): 247.
- [18] 严正峰, 程伟平. 基于改进风险顺序数的产品质量功能展开方法[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(5): 582-588,632.
YAN Zhengfeng, CHENG Weiping. Quality function deployment method of productbased on improved risk priority number[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2017, 40(5): 582-588,632.
- [19] 李壮, 杨伯军, 刘南兵, 等. 公理设计解耦在工艺设计的应用研究[J]. *现代制造工程*, 2023(12): 38-47.
LI Zhuang, YANG Bojun, LIU Nanbing, et al. Research on the application of axiomatic design decoupling in process design[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2023(12): 38-47.
- [20] HANDAWI K AI, BRAHMA A, WYNN D C, et al. Design space exploration and evaluation using margin-based trade-offs[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2024, 146(6): 061701.
- [21] 尼古拉·什帕科夫斯基. 进化树——技术信息分析及新方案的产生[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.

(责任编辑: 孟晓燕)