

基于设计方案树和知识库的产品设计方法研究

陈博洋, 胡晓兵, 邓 希

(四川大学机械工程学院, 成都 610065)

摘要: 针对现有产品设计系统中由设计人员按经验决定装配概念模型的局限性, 提出了一种基于设计方案树和知识库的产品快速设计方法. 将设计过程中的公式及经验, 优选原则等信息存入知识库中, 采用树结构, 以产品属性为节点, 将产品概念设计与零部件详细设计相结合, 在原理综合的同时对产品的各部件进行筛选和详细设计, 生成设计方案树. 再运用基于层次分析法(AHP)赋权的理想解法(TOPSIS)对备选方案集排序, 在获取最优解的同时增加了备选方案的多样性, 降低了产品的成本. 以启闭机设计为例, 验证了该算法的可靠性和实用性.

关键词: 产品设计; 设计方案树; 知识库

中图分类号: TP39 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.033001

Research on product design method with design scheme tree and knowledge base

CHEN Bo-Yang, HU Xiao-Bing, DENG Xi

(College of Mechanical Engineering, Sichuan university, Chengdu 610065, China)

Abstract: In view of the limitations in the process of assembling the conceptual model according to the the designer's experience in the current product design system, a product design method based on design scheme tree and knowledge base is proposed. The formulae, experience, optimization principles and other information in the design process are stored in the knowledge base in which the structure is the tree with the product attributes as its nodes. The product conceptual design and parts' detailed design are combined, and the product components are screened and designed while the principles are arranged. The tree structure is adopted and the product attribute is taken as the node to generate the design tree. Then the ideal solution method based on analytic hierarchy process is used to rank the alternatives, which increases the diversity of alternative schemes and reduces the cost of the product while obtaining the optimal solution. Taking the design of the hoist as an example, the reliability and practicability of the algorithm are verified

Keywords: Product design; Design tree; Knowledge base

1 引言

随着中国制造 2025 的提出, 市场对产品制造的效率和创新性也有了更高的要求. 产品的设计开发成本占产品总成本的比例较小, 但决定了绝大部

分的总成本^[1]. 产品设计阶段确定了产品的功能、结构组成和主要性能参数, 同时也决定了产品制造、维修和运输等成本.

因此, 产品方案设计方法成为现在学者们研究的热点. 面对结构复杂的产品往往采用自顶向下的

收稿日期: 2019-12-24

基金项目: 中国制造 2025 四川行动计划(2018ZZ011); 四川省科技支撑计划(2018GZ0125)

作者简介: 陈博洋(1995—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为智能制造. E-mail: 1171896179@qq.com

通讯作者: 胡晓兵. E-mail: xbh9009@qq.com

设计思想,首先对产品进行功能结构分析建立功能模型,再建立装配体概念模型,最终确定零部件详细设计信息^[2].计算机辅助产品设计方法主要是由设计人员依据经验知识与设计系统不断交互,完成产品由整体布局到零部件的设计和选型^[3].

安建军等^[4]基于 VB.NET 环境,开发了快锻压机液压参数化系统.杨雄等^[5]采用面向对象的自顶向下参数化设计方法实现对启闭机卷筒组的个性化、参数化建模.这种设计方法虽然在一定程度上减少了设计人员的重复劳动,但需要设计人员在前期完成产品的顶层基本骨架的设计,即确定零部件之间的装配位置关系.但产品在概念设计阶段信息较少使得装配体概念模型的设计体现出其主观性和局限性.特别是针对复杂产品时,仅仅在概念模型设计阶段难以判断其优劣性.

为了解决上述问题,提出了一种基于设计方案树和知识库的产品设计方法.将设计方案抽象为一组产品的属性,将产品属性转化为树结构的节点,将概念设计与详细设计相融合,利用知识库储存设计过程中的计算公式、设计参数和设计规则,在概念设计阶段就开始进行零部件的设计计算与选型,最终形成设计方案树,遍历可得一定数量的设计方案.设计方案既包含产品的原理组合也包含相对应的零部件的选型和结构信息,再对其进行评价和决

策有利于提高设计方案的科学性和可靠性.该方法进一步降低了成本,缩短了设计周期,减少了设计人员的交互时间和使用难度,同时提高了设计效率,增加了产品方案的数量及其多样性.

2 基于树结构的产品设计方法

2.1 设计方案树模型建立

现针对复杂产品设计的参数化设计系统一般过程是根据客户和工程需求输入产品信息,以设计人员的经验为原则确定产品的总体布局模型,再根据布局模型,对每个零部件进行详细设计,生成最终的产品模型^[6].为了改进设计人员根据经验和偏好需求确定布局模型的局限性和进一步增加产品方案的数量和多样性,采用树结构建立了设计方案树模型.

传统工业产品的结构是基本固定的,只是随订单需求的不同而在关键技术参数、装配方式、布局模式、主要零部件数量和型号上的选择不同.因此可以将一个产品方案抽象为一组产品属性(关键技术参数、主要零部件型号、主要零部件数量等)来描述产品的结构和功能.产品属性分为固有属性和生成属性,固有属性有固定的取值范围和规律,而生成属性是在每次设计过程中通过计算得出的参数,两者具体的分类规则如表 1 所示.

表 1 属性分类表
Tab. 1 Attribute classification

名称	定义	解释	来源	例子
固有属性	由产品本身特点限定,有固定的取值范围且不会因合同要求不同而改变取值范围和规律的离散型参数	主要零部件个数及对零部件选型设计有决定性影响的关键技术参数	属性数据库	卷筒个数(1,2,4) 卷筒层数(1,2,3) 减速器出轴形式(垂直,平行)
生成属性	由固有特征参数和其它参数经过相关设计计算或根据规则筛选得出的参数	主要零部件型号及其关键外形尺寸参数	设计过程	减速器型号 卷筒直径

设计方案树模型建立方法如下:
一个产品共有 n 个主要属性,则设计方案树共 n 层,每层代表产品的一个主要属性,产品属性集为 $S=\{s_1,s_2,\cdots,s_n\},n\geq 0$.第 i 层的叶子节点 S_i 表示第 i 层的属性值,即 $S_i=\{s_i-v_1,s_i-v_2,\cdots,s_i-v_{m_i}\},m_i\geq 0,m_i$ 为第 i 层属性值总数.叶子节点 s_i-v_j 的路径 $\text{Path}(s_i-v_j)$ 包含该路径上各节点的值,即 $\text{Path}(s_i-v_j)=\{s_1-v_k,s_2-v_l,\cdots,s_{i-1}-v_r\},k\in(1,m_1),l\in(1,m_2),\cdots,r\in(1,m_{i-1})$.

假设节点 s_i-v_j 的子节点为固有属性,则子节点 $\text{Node}(s_i-v_j)$ 从属性数据库中直接读出,即:

$$\text{Node}(s_i-v_j)=\{s_{i+1}-v_1,s_{i+1}-v_2,\cdots,s_{i+1}-v_{m_{i+1}}\};$$

若节点 s_i-v_j 的子节点为生成属性,则子节点 $\text{Node}(s_i-v_j)$ 需根据该节点路径上的各参数及其它所需设计参数经设计计算得出,即: $\text{Node}(s_i-v_j)=f(\text{Path}(s_i-v_j),v_1,v_2,\cdots,v_r),v_1,v_2,\cdots,v_r$ 为设计计算所需的其它设计参数.

产品的属性按设计流程需求的先后顺序依次转化为设计方案树中的各层节点.该模型的一条完整路径即为产品的一个设计方案.产品的属性结构表如表 2,设计方案树结构如图 1.

表 2 属性结构表
Tab. 2 Attribute structure

层数	名称	类别	数量	1	2	3	...
1	s_1	固有	m_1	s_1-v_1	s_1-v_2	...	...
2	s_2	固有	m_2	s_2-v_1	s_2-v_2	s_2-v_3	...
3	s_3	生成	m_3	s_3-v_1	s_3-v_2	...	...
...	...			...	...	...	...

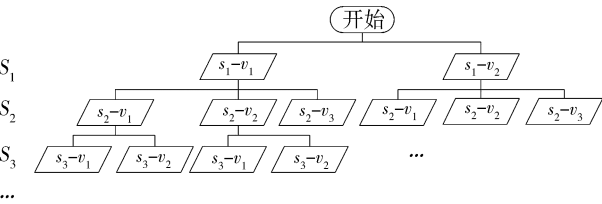


图 1 设计方案树结构
Fig. 1 Design tree structure

2.2 基于 AHP-TOPSIS 法的设计方案排序

产品生命周期成本包括设计阶段成本、制造阶段成本、销售阶段成本、使用和维护成本以及回收和报废成本^[7]. 由于产品生命周期总成本的 70% 以上是在设计初期承担的, 设计人员可以充分考虑设计决策对生命周期的影响, 从而大大降低产品生命周期成本^[8]. 因此, 尽早准确地估算和优化成本是非常重要的. 为了达到上述目的, 本部分主要使用产品概念设计阶段的典型属性^[9]估算备选方案的成本并对方案进行排序. 这类属性是指对产品成本产生主要影响的零部件成本和个数. 在部分情况下产品零部件的成本不明确, 可以利用零部件的其他参数对评价指标进行分组, 对方案进行评价. 根据评价对象, 各指标在综合评价中的作用并不同等重要, 传统 TOPSIS 的权重一般人为设定取平均值, 不能反映专家的偏好和个性. 为此, 通过结合 AHP 和 TOPSIS 的理论, 建立了 AHP-TOPSIS 产品方案评判指标体系模型^[10]. 专家根据产品的特性, 从属性集中选出若干个对产品方案决策有主要影响的属性作为评价指标, 基于 AHP 确定偏好权重. 采用赋权的 TOPSIS 对方案进行排序和优选, 得到最优方案. 基于 AHP-TOPSIS 法的设计方案排序的步骤如下.

步骤 1 专家从产品属性集中选取 m 个属性 $s_1, s_2, \dots, s_m$ 建立产品的评价指标体系. 运用 AHP 法计算各评价指标的权重 ω . 采用徐泽水^[11]的 $-2 \sim 2$ 的五标度法比较赋值, 根据赋值标准构造相应的判断矩阵 A , 如表 3 所示.

表 3 指标权重重要程度赋值标准

Tab. 3 Value-determined standard of the importance of index weight

标度值(n)	定义
2	s_i 比 s_j 强烈或极端重要
1	s_i 比 s_j 稍微或明显重要
0	s_i 比 s_j 同等重要
-1	s_i 比 s_j 稍微或明显次要
-2	s_i 比 s_j 强烈或极端次要

表 3 中, 比较第 i 个元素与第 j 个元素相对上一层某个因素的重要性时, 使用数量化的相对权重来描述. 设共有 m 个元素参与比较, 则 $A = (s_{ij})_{m \times m}$, 即 $s_{ij} = 1/n$.

$$A = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1m} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mm} \end{bmatrix}$$

(1)

步骤 2 假设备选方案集 P 共有 n 个方案, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, 方案的评价指标集 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$, 评价指标 r_{ij} 表示第 i 个方案的第 j 个评价指标, 其中, $i \in [1, n], j \in [1, m]$. 初始判断矩阵 P 可表示为

$$P = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

(2)

步骤 3 将初始判断矩阵 $P = (r_{ij})_{n \times m}$ 进行归一化处理, 得到矩阵 $Z = (z_{ij})_{n \times m}$, 其中的元素为

$$z_{ij} = r_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^n r_{ij}^2}$$

(3)

步骤 4 将矩阵的列向量与 AHP 法确定的评价指标权重 ω 相乘, 得到加权标准化决策矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times m}$, 其中的元素为

$$b_{ij} = \omega_i z_{ij}$$

(4)

步骤 5 计算正理想解和负理想解, 即由各指标的最优值和最劣值分别构成正理想解 B^+ 和负理想解 B^- :

$$B^+ = (b_1^+, b_2^+, \dots, b_m^+)$$

(5)

$$B^- = (b_1^-, b_2^-, \dots, b_m^-)$$

(6)

$$b_j^+ = \max(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj})$$
$$j = 1, 2, \dots, m$$

(7)

$$b_j^- = \min(b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{nj})$$
$$j = 1, 2, \dots, m$$

(8)

步骤 6 计算各设计方案的 n 维欧氏距离 Q_i^+ 和 Q_i^- , 计算公式如下。

$$Q_i^+ = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (b_{ij} - b_j^+)^2} \quad (9)$$

$$Q_i^- = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (b_{ij} - b_j^-)^2} \quad (10)$$

步骤 7 计算各设计方案对理想解 D_i 的相对接近度:

$$D_i = Q_i^- / (Q_i^+ + Q_i^-) \quad (11)$$

步骤 8 按照 D_i 的大小顺序对设计方案集 P 进行排序, 得到排序后的方案集 P_1 。

2.3 基于树结构的产品设计方法流程

基于树结构的产品设计方法的具体流程如图 2 所示, 步骤如下。

步骤 1 设计方案树模型初始化。

从产品属性数据库中读取产品的固有属性个数, 得到固有属性总数 n ; 设层数 $n=1$, 系统开始。

步骤 2 下层节点生成。

开始对当前模型进行判断。如果读取当前层数的属性为固有属性, 则加载下一层节点, 设 $i=i+1$; 如果当前层数的属性为生成属性, 则开始零部件设计。

步骤 3 零部件设计。

生成第 $(i+1)$ 层节点共读取 N 条路径, $N = m_1 \times m_2 \times \cdots \times m_i$ 。读取节点路径 $\text{Path}(s_i - v_j)$, $j \in [1, N]$, 获得零部件设计的必要参数。

设 $j=1$, 对零部件进行判断:

如果属于外购件, 则对其进行筛选。根据评价规则, 从外购零部件模型数据库中选择满足要求的零部件, 生成下层节点 $\text{Node}(s_i - v_j)$, 节点内容包含零部件厂家, 型号等信息;

否则, 通过设计计算生成下层节点 $\text{Node}(s_i - v_j)$, 节点内容包括零部件关键技术参数。

如果 $\text{Node}(s_i - v_j) \notin \emptyset$, 生成节点 $s_i - v_j$ 的下层节点, 即 $j=j+1$; 否则, 路径 $\text{Path}(s_i - v_j)$ 结束。

如果 $j \leq m_1 \times m_2 \times \cdots \times m_i$, 重复上述操作; 如果 $j > m_1 \times m_2 \times \cdots \times m_i$, 则 $(i+1)$ 层节点生成步骤完成。

步骤 4 设计方案集

当设计方案树模型完成, 即 $i > n$, 通过深度优先遍历 28 得到备选方案集 P 。

步骤 5 备选方案集排序

参照本文 2.2 节的方法生成排序后的备选方案集 P_1 。

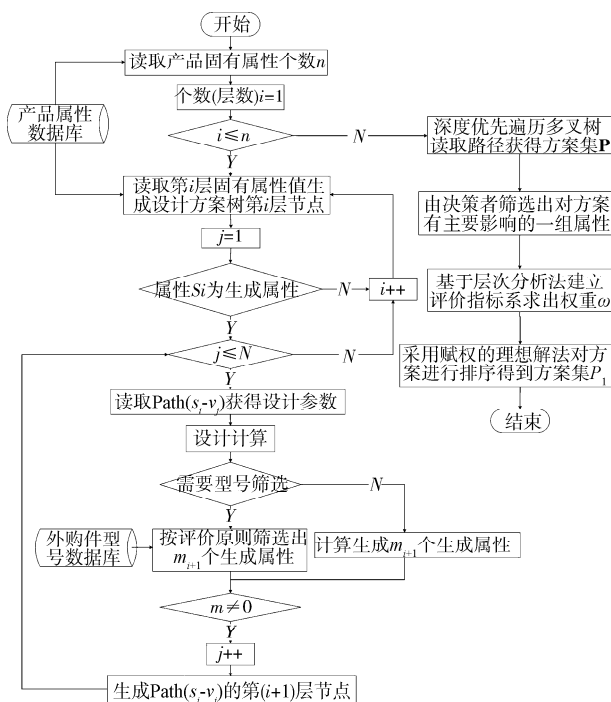


图 2 产品设计流程

Fig. 2 Product design process

3 知识库的建立

根据产品的功能需求, 形状结构, 布局模式等要素确定产品的设计方法和步骤, 是一个复杂的过程。不同类型的产品具有不同的设计流程, 即使是同一种类型的产品也会因为科学技术的不断发展而有所改变。而基于数据库的系统, 知识往往被硬编码到程序代码、存储过程或触发器中。只有程序员可以修改这些知识。基于知识库^[12-13]的系统直接由专家或设计人员按一定格式来设计和修改规则, 并将规则和相关参数存入数据库中, 程序中只需调用不同的规则来完成设计, 这种模式往往比基于数据库的更加强大大灵活和易于维护。

为了让系统能根据产品信息自行完成设计, 需要将产品的设计知识建成一个知识库。产品的设计知识主要包括设计原理、设计经验、设计流程和设计原则等几个方面^[14]。合理的建立知识库首先对知识进行分类。

(1) 设计参数。针对参数建立相应的参数数据库, 对参数进行唯一编码和管理。从参数来源分析参数分为 4 类: 特征参数、合同参数、数据库查询结果参数和计算参数。以钢丝绳选型为例, 对 4 类参数进行解释定义, 如表 4 所示。表 5 为钢丝绳选型所需的公式。

表 4 参数分类表
Tab. 4 Parameter classification

设计参数	参数来源	定义	实例
合同参数	XML 文件	项目需求及主要技术参数	启闭力_持住力
计算参数	计算参数数据库	在进行零部件设计计算时产生的中间参数	吊具重量
经验参数	经验参数数据库	由设计人员在长期设计中总结的经验参数	自重系数、滑轮组效率、钢丝绳安全系数
特征参数	特征数据库	涉及总体布局模型的关键产品特征参数	单双联、倍率、卷筒个数

表 5 钢丝绳选型公式表
Tab. 5 Formula of wire rope selection

公式名称	表达式
计算吊具重量	$G_{\text{dj}} = Q \cdot \eta_z$
计算钢丝绳最大拉力	$GSS_{\text{max}} = (Q + G_{\text{dj}}) / (D_s \cdot B \cdot \eta_h \cdot J_s)$
计算钢丝绳实际最小拉力	$GSS_{\text{min}} = GSS_{\text{max}} \cdot \eta_{GA}$

注: 钢丝绳最大拉力— GSS_{max} ; 启闭力_持住力— Q ; 吊具重量— G_{dj} ; 单双联— D_s ; 倍率— B ; 钢丝绳实际最小拉力— GSS_{min} ; 卷筒个数— J_s ; 自重系数— η_z ; 滑轮组效率— η_h ; 钢丝绳安全系数— η_{GA}

参数的查询流程如图 3 所示. 先确认参数的类别, 如特征参数、数据库查询结果参数及合同参数均以数据库和 XML 文件为查询依据而得出的结果. 而计算参数则先查询知识库中的公式库获得相应计算公式, 运用公式解析器获得计算公式中的参数再重复操作直到得到最终结果.

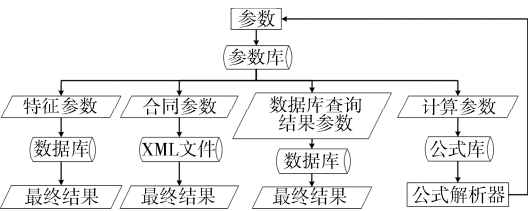


图 3 参数查询流程
Fig. 3 Parameter query process

(2) 设计规则主要包含产品的零部件决策原

表 6 零部件筛选规则
Tab. 6 Components filtering rules

规则类别	规则	规则表达式
筛选部件数量	卷筒个数小于等于 4 倍的吊点个数	$JN \leq 4 \cdot DN$
	减速器个数小于等于 8 倍的吊点个数	$JSQN \leq 8 \cdot DN$
	电机个数小于等于 8 倍的吊点个数	$DJN \leq 8 \cdot DN$
	联轴器个数小于等于 8 倍的吊点个数	$LZQN \leq 8 \cdot DN$
	制动器个数小于等于 16 倍的吊点个数	$ZDQN \leq 16 \cdot DN$
筛选部件组合路径	减速器个数等于 1/2 倍卷筒, 1 倍卷筒, 2 倍卷筒	$JSQN = 0.5 \cdot JN \mid JN \mid 2 \cdot JN$
	电机的个数及联轴器的个数等于减速器的个数	$DJN = LZQN = JSQN$
	制动器的个数等于 1 倍电机, 2 倍电机	$ZDQN = DJN \mid 2 \cdot DJN$

注: DN , JN , DJN , $JSQN$, LZQ , $ZDQN$ 表示吊点, 卷筒, 电机, 减速器, 联轴器, 制动器的个数

则, 零部件筛选规则, 零部件布局规则, 零部件布局评价原则等, 常采用产生式规则表示, 即 if 条件, then 结果的形式表示.

(3) 设计经验: 产品设计中包含有基于设计人员主观的根据以往的实验或设计实例总结推理出的知识. 这些知识在产品设计中有着非常重要的地位, 在一定程度上提高了设计的效率.

(4) 计算公式: 传统的设计中的计算公式多以函数的形式储存在程序中, 会造成设计系统过于庞大复杂, 难以管理维护. 针对这个问题, 将计算公式进行唯一编码(公式名称)存入数据库, 只在设计系统过程中调用计算公式进行设计计算.

4 应用实例

为验证前述基于设计方案树和知识库的产品设计方法, 对某水利水电机械公司“1 000 kN 启闭力固定卷扬式启闭机”进行方案设计, 并开发了一套系统软件^[15].

4.1 启闭机的知识库设计

以启闭机零部件筛选规则为例, 证明知识库的可行性和可靠性. 启闭机产品设计方案树层数多达 16 层, 如果不经筛选直接生成最终结构, 会造成底层的节点数量过多, 这种情况会造成系统加载速度过慢, 影响设计效率. 为了解决这个问题, 提出了一系列减少节点数量的规则, 其中主要包含筛选零部件数量和筛选零部件组合路径两部分内容, 具体如表 5 所示.

启闭机由卷筒、减速器、电机、制动器和联轴器 etc 部件组成^[16]. 每个部件的个数初始设为 32 个, 通过筛选零部件数量的规则, 可以使零部件的数量减少至符合设计人员的需求. 零部件数量符合需求后, 为了进一步减少不合理的零部件组合路径, 运用表中规则将 3 375 种部件组合路径筛选为 16 种合理路径, 筛选结果如图 4 所示.

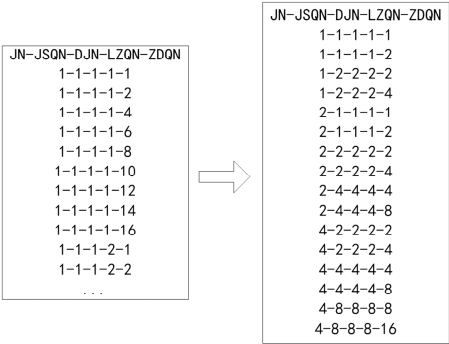


图 4 部件组合筛选结果

Fig. 4 Component combination screening result

4.2 基于树结构的启闭机设计系统

分别采用基于经验的参数化设计方法(方法 1)和上述方法(方法 2)对固定式卷扬启闭机进行设计(主要合同参数:启闭力为 1 000 kN,持住力为 0 kN,孔口长度为 3.6 m,孔口宽度为 3 m,扬程为 62 m,上极限为 4 m). 固定卷扬启闭机的属性如表 7 所示.

表 7 固定式卷扬启闭机属性表

Tab. 7 Attribute structure of hoist

特征名称	固有/生成	层级	1	2	3	4	5	6	7
吊点个数	固有	1	1	02	/	/	/	/	/
卷筒数量	固有	2	1	/	/	/	/	/	/
单/双联	固有	3	1	2	/	/	/	/	/
倍率	固有	4	2	4	6	8	10	12	14
钢丝绳型号	生成	5	线接触	面接触	/	/	/	/	/
卷筒层数	固有	6	1	2	3	/	/	/	/
卷筒直径	生成	7	Dmin	/	/	/	/	/	/
电机个数	固有	8	1	2	4	8	/	/	/
电机型号	生成	9	D_{x-1}	D_{x-2}	...	/	/	/	/
减速器出轴形式	固有	10	平行轴	垂直轴	/	/	/	/	/
减速器个数	固有	11	1	2	4	8	/	/	/
减速器型号	生成	12	J_{x-1}	J_{x-2}	J_{x-3}	...	/	/	/
联轴器个数	固有	13	1	2	4	8	/	/	/
联轴器型号	生成	14	L_{x-1}	...	/	/	/	/	/
制动器个数	固有	15	1	2	4	8	16	/	/
制动器型号	生成	16	Z_{x-1}	Z_{x-2}	...	/	/	/	/

表 7 中, D_{x-num} , J_{x-num} , L_{x-num} , Z_{x-num} 分别表示电机,减速器,联轴器,制动器的型号.

方法 1 由设计人员按经验选择布局参数,生成产品概念装配模型,再进行零部件的设计和选

型,可得方案 1.

方法 2 采用基于树结构的产品设计方法,共生成 4 288 个备选方案如表 8 所示.

表 8 实例方案集

Tab. 8 Scheme set

方案特征	方案集						
	1	2	3	...	4286	4287	4288
钢丝绳直径/mm	22	22	22	...	38	38	38
卷筒直径/mm	957	957	957	...	1335	1335	1335
电机厂家	D_{C-1}	D_{C-1}	D_{C-1}	...	D_{C-1}	D_{C-1}	D_{C-1}
电机系列号	D_{X-1}	D_{X-1}	D_{X-1}	...	D_{X-2}	D_{X-2}	D_{X-2}
电机重量/kg	390	390	390	...	402	402	402
减速器厂家	J_{C-2}	J_{C-2}	J_{C-2}	...	J_{C-2}	J_{C-2}	J_{C-2}
减速器系列号	J_{X-1}	J_{X-1}	J_{X-1}	...	J_{X-1}	J_{X-1}	J_{X-1}
减速器重量/kg	380	380	380	...	180	180	180
工作制动器类型	G_{L-1}	G_{L-1}	G_{L-1}	...	G_{L-2}	G_{L-2}	G_{L-2}
工作制动器厂家	G_{C-1}	G_{C-1}	G_{C-2}	...	G_{C-1}	G_{C-2}	G_{C-2}
工作制动器系列号	G_{x-1}	G_{x-1}	G_{x-2}	...	G_{x-3}	G_{x-4}	G_{x-4}
工作制动器质量/kg	105	105	104	...	135	103	103
安全制动器厂家	A_{C-1}	A_{C-2}	A_{C-1}	...	A_{C-2}	A_{C-1}	A_{C-2}
安全制动器系列号	A_{x-1}	A_{x-2}	A_{x-1}	...	A_{x-2}	A_{x-1}	A_{x-2}
安全制动器重量/kg	1100	1120	1100	...	1120	1100	1120
联轴器厂家	L_{C-1}	L_{C-1}	L_{C-1}	...	L_{C-1}	L_{C-1}	L_{C-1}
联轴器系列号	L_{X-1}	L_{X-1}	L_{X-1}	...	L_{X-1}	L_{X-1}	L_{X-1}
联轴器重量/kg	29.5	29.5	29.5	...	29.5	29.5	29.5

表 8 中, D_{C-num} , D_{X-num} , J_{C-num} , J_{X-num} , G_{C-num} , G_{X-num} , A_{C-num} , A_{X-num} , L_{C-num} , L_{X-num} 分别表示电机,减速器,工作制动器,安全制动器,联轴器的厂家,系列号的名称.

对备选方案集运用 AHP-TOPSIS 法进行方案排序,步骤如下.

步骤 1 采取 AHP 法求得属性权重 ω .

由设计人员选出钢丝绳直径,卷筒直径,电机质量,减速器质量,工作制动器质量,安全制动器质量,联轴器质量作为指标建立启闭机设计方案的评价指标体系,如表 9 所示.

根据表 9 构造指标层 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 对准则层 B_1 的判断决策矩阵,解析矩阵可得:

$$\omega = (0.0102, 0.2602, 0.0633, 0.2602, 0.0198, 0.0198, 0.3664).$$

表 9 启闭机方案评价指标体系

Tab. 9 Technical index system of scheme of hoist.

对象层 A	准则层 B	指标层 C
方案成本	选择成本 B ₁	钢丝绳直径 C ₁
		卷筒直径 C ₂
		电机重量 C ₃
		减速器重量 C ₄
		联轴器重量 C ₅
		工作制动器重量 C ₆
		安全制动器重量 C ₇

判断决策矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & -2 & -1 & -2 & -1 & -1 & -2 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -2 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 2 & 2 & 0 \\ 1 & -2 & -1 & -2 & 0 & 0 & -2 \\ 1 & -2 & -1 & -2 & 0 & 0 & -2 \\ 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

步骤 2 采用 TOPSIS 算法,得到正理想解和负理想解,并将所有方案排序,步骤如下.

(1) 将表 8 中的方案属性值构成的决策矩阵 **S** 进行归一化处理得到矩阵 **Z**.

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 22 & 957.34 & 390 & 380 & 105 & 1100 & 29.5 \\ 22 & 957.34 & 390 & 380 & 105 & 1120 & 29.5 \\ 22 & 957.34 & 390 & 380 & 104 & 1120 & 29.5 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 38 & 1335.86 & 402 & 180 & 135 & 1120 & 29.5 \\ 38 & 1335.86 & 402 & 180 & 103 & 1100 & 29.5 \\ 38 & 1335.86 & 402 & 180 & 103 & 1120 & 29.5 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 0.0184 & 0.0209 & 0.0276 & 0.0175 & 0.0239 & 0.0254 & 0.0103 \\ 0.0184 & 0.0209 & 0.0276 & 0.0175 & 0.0239 & 0.0258 & 0.0103 \\ 0.0184 & 0.0209 & 0.0276 & 0.0175 & 0.0236 & 0.0254 & 0.0103 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0.0318 & 0.0291 & 0.0284 & 0.0083 & 0.0307 & 0.0258 & 0.0103 \\ 0.0318 & 0.0291 & 0.0284 & 0.0083 & 0.0234 & 0.0254 & 0.0103 \\ 0.0318 & 0.0291 & 0.0284 & 0.0083 & 0.0234 & 0.0258 & 0.0103 \end{pmatrix}$$

(2) 生成 AHP 法加权的决策矩阵 **B**.

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0.000188 & 0.0054 & 0.0017 & 0.0046 & 0.000473 & 0.000502 & 0.0038 \\ 0.000188 & 0.0054 & 0.0017 & 0.0046 & 0.000473 & 0.000511 & 0.0038 \\ 0.000188 & 0.0054 & 0.0017 & 0.0046 & 0.000468 & 0.000502 & 0.0038 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0.000324 & 0.0076 & 0.0018 & 0.0022 & 0.000608 & 0.000511 & 0.0038 \\ 0.000324 & 0.0076 & 0.0018 & 0.0022 & 0.000464 & 0.000502 & 0.0038 \\ 0.000324 & 0.0076 & 0.0018 & 0.0022 & 0.000464 & 0.000511 & 0.0038 \end{pmatrix}$$

(3) 求得正理想溶液 **B⁺** 和负理想溶液 **B⁻** 如下式.

$$\mathbf{B}^+ = (0.000324 \quad 0.0084 \quad 0.0024 \quad 0.0105 \quad 0.000608 \quad 0.000511 \quad 0.0191)$$
$$\mathbf{B}^- = (0.000188 \quad 0.0052 \quad 0.00027 \quad 0.0017 \quad 0.000464 \quad 0.000502 \quad 0.0038)$$

(4) 计算每个设计方案到正、负理想解的距离 **C⁺** 和 **C⁻** 如下式.

$$\mathbf{C}^+ = (0.0252 \quad 0.0252 \quad 0.0252 \quad \cdots 0.0251 \quad 0.0253 \quad 0.0253)^T$$
$$\mathbf{C}^- = (0.0046 \quad 0.0046 \quad 0.0046 \quad \cdots 0.0047 \quad 0.0045 \quad 0.0046)^T$$

(5) 计算各设计方案对理想解的相对接近度 **D** 如下式.

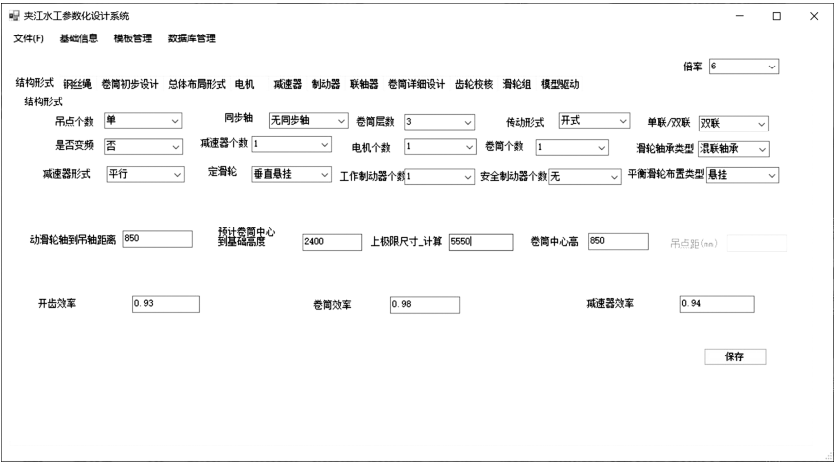
$$\mathbf{D} = (0.1548 \quad 0.1551 \quad 0.1546 \quad \cdots 0.1574 \quad 0.1523 \quad 0.1526)^T$$

(6) 按照 D_i 的大小顺序,对各个设计方案进行排序,根据排序结果筛选出排名第一的方案,即方案 2.

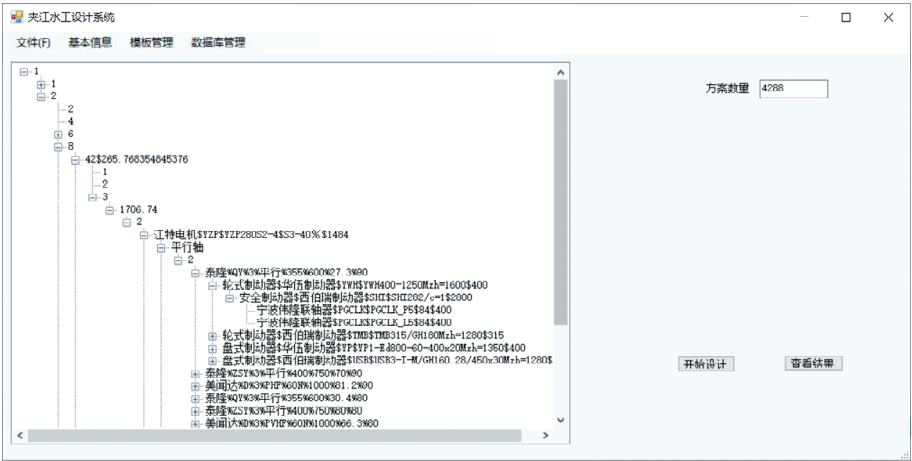
4.3 结果分析

如图 5(a)所示,设计人员利用基于经验的参

数化设计系统^[15]完成了从结构形式的确定到卷筒、电机等各个零部件的设计,最后到驱动模型的设计过程.如图 5(b)所示,设计人员使用基于树结构的设计系统生成了一个 Treeview 控件支持的设计方案树模型.



(a) 基于经验的参数化设计系统
(a) Parametric design system based on experience



(b) 基于树结构的设计系统
(b) The design system based on tree structure

图 5 启闭机设计系统
Fig. 5 Design system of hoist

在相同条件下,方案 1 由公司设计人员采用公司的基于经验的设计系统进行设计,方案 2 采用本文提出的方法进行设计.从经济方面考虑,启闭机的评价指标均为负向指标,指标越小,成本越低,方案越好.根据表 10 可得,方案 2 共有 5 个指标即钢丝绳直径,卷筒直径,减速器重量,工作制动器重量和安全制动器重量小于方案 1,且减少率分别达为 7.14%,0.63%,11.1%,23.0%,1.8%;而剩余指标均与方案 1 持平.由此可得,采用方法 2 得出的方案的各项指标均优于或等于方法 1 得出的方案.

表 10 方案对比结果							
Tab. 10 Scheme comparison							
方案	钢丝绳直径/mm	卷筒直径/mm	电机重量/kg	减速器重量/kg	工作制动器重量/kg	安全制动器重量/kg	联轴器重量/kg
方案 1	28	986	287	180	135	1120	29.5
方案 2	26	913.2	60.7	140	103	1100	29.5
减少率	7.14%	0.63%	78.9%	22.2%	23.7%	1.8%	0

从设计工具、设计周期、备选方案数量、结果可靠性和经济性等方面对两方法进行了综合比较.结果如表 11 所示.

表 11 性能对比结果
Tab. 11 Performance comparison

方法	设计工具	设计周期/h	备选方案数量	结果可靠性	经济性
基于经验的参数化设计方法	设计经验和计算机	2~3	1	可靠	一般
基于树结构的设计方法	计算机	0.5	>1 000	可靠	很好
提升程度	极大	很大	极大	一点	很大

5 结 论

本文提出了一个将产品属性融合于树结构的设计方法,利用计算机特性快速生成大量可行的设计方案,且设计方案包含了概念模型和零部件模型两部分,超越了专家设计的局限,在所有可能的方案里根据一定的指标得出最好最合适的方案,使评价和决策过程更客观和科学. 在降低产品成本的同时提高了备选方案的数量和多样性;通过建立产品知识库,将设计过程中的经验知识,设计原则,计算公式等从系统框架中抽离出来,有效地提高了设计系统的通用性和适应性;本文以某水利水电机械公司固定式卷扬启闭机设计为例,验证了方法的可行性和实用性,相比于其它已公开的产品快速设计方法该方法更为可靠和有效.

参考文献:

[1] 李晓. 面向成本设计(DFC)在机电产品开发中的应用研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2013.

[2] Pan Z, Wang X, Teng R, *et al.* Computer-aided design-while-engineering technology in top-down modeling of mechanical product[J]. *Comput Ind*, 2015, 75: 151.

[3] 徐许林, 李宏博, 李昌平, 等. 机床液压管道三维自动布线系统开发[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2017, 54: 991.

[4] 安建军, 张晓丽, 薛飞, 等. 快锻压机液压系统参数

化设计[J]. *锻压技术*, 2018, 43: 105.

[5] 杨雄, 胡晓兵, 曾文, 等. 面向对象的自顶向下参数化设计方法[J]. *机械设计*, 2018, 35: 7.

[6] 吕琳. 复杂产品参数化设计几个关键技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2005.

[7] Laura C S, Vicente D C. Life-cycle cost analysis of floating off shore wind farms[J]. *Renew Energ*, 2014, 66: 41.

[8] Seo K K, Park J H, Jang D S, *et al.* Approximate estimation of the product life cycle cost using artificial neural networks in conceptual design [J]. *Int J Adv Manuf Tech*, 2002, 19: 461.

[9] Saravi M, Newnes L, Mileham A R, *et al.* Estimating cost at the conceptual design stage to optimize design in terms of performance and cost [C]//*Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World*. London: Springer, 2008.

[10] 龚剑, 胡乃联, 崔翔, 等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33: 1442.

[11] 徐泽水. 层次分析新标度法[J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 18: 74.

[12] 任工昌, 张魏, 张强, 等. 基于 TRIZ 与知识库的创新模型构建及在注塑机设计中的应用[J]. *制造技术与机床*, 2019, 6: 93.

[13] 王竹君, 朱颖琪, 孙界平. 基于矩阵分解的电力物资需求预测 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 639.

[14] Chapman C B , Pinfold M. The applications of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure[J]. *Adv Eng Softw*, 2001, 32: 903.

[15] 霍云亮, 胡晓兵, 杨雄, 等. 基于模糊综合评价方法的实例检索策略研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2018, 55: 1197.

[16] 邹今春, 赵春龙, 李岗, 等. BIM 技术在乌东德水电站启闭机设计中的应用[J]. *制造业自动化*, 2019, 41: 93.

引用本文格式:
中 文: 陈博洋, 胡晓兵, 邓希. 基于设计方案树和知识库的产品设计方法研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2021, 58: 033001.
英 文: Chen B Y, Hu X B, Deng X. Research on product design method based on design tree model and knowledge base [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2021, 58: 033001.