专辑策划:绿色集成设计与低碳制造研究(续)

编辑委员会:李方义 教授(山东大学) 曹华军 教授(重庆大学)
王海斗 研究员(陆军兵种大学) 向 东 教授(北京科技大学)
黄海鸿 教授(合肥工业大学) 李聪波 教授(重庆大学)
何 斌 教授(上海大学) 张 雷 教授(合肥工业大学)
王黎明 教授(山东大学) 马国政 副研究员(陆军兵种大学)
彭 涛 副教授(浙江大学) 李 涛 副教授(大连理工大学)
陶 璟 副研究员(上海大学)
策 划 编 辑:袁兴玲

基于功能-结构-材料-工艺模型的产品全生命周期设计冲突量化与消解

王忆同[1,2] 蔡泽康[1,2] 王黎明[1,2*] 李剑峰[1,2] 李方义[1,2]
1.山东大学机械工程学院,济南,250061
2.山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室,济南,250061

摘要:在全生命周期设计中,高维度、多目标的设计冲突难以有效量化与消解,为此,提出了一种基于功能-结构-材料-工艺(FSMP)多层级模型的全生命周期设计冲突量化与消解方法。首先构建FSMP信息模型,实现跨生命周期设计信息的集成表达;然后将设计冲突分解为目标冲突和决策冲突,目标冲突采用层次分析法和模糊综合评价进行量化,决策冲突基于元素-参数-量值模型与相似性度量进行求解;最后提出融合剪枝策略的广度优先搜索算法,在约束消解域内高效搜索目标冲突最小设计方案。风力发电机组的设计案例冲突消解验证了方法的有效性。结果表明,该方法能够实现目标冲突与决策冲突的量化和消解。

关键词:全生命周期设计;功能-结构-材料-工艺模型;设计冲突;冲突量化;冲突消解
中图分类号:TH122
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Quantification and Resolution of Design Conflicts in Product Life Cycle Based on FSMP Model

WANG Yitong[1,2] CAI Zekang[1,2] WANG Liming[1,2*] LI Jianfeng[1,2] LI Fangyi[1,2]
1.School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan,250061
2.Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of the Ministry of Education, Shandong University, Jinan,250061

Abstract: In life cycle design, high-dimensional and multi-objective design conflicts are difficult to effectively quantify and resolve. To address this, a life cycle design conflict quantification and systematic resolution method based on a multi-level FSMP model was proposed. First, an FSMP information model was constructed to achieve integrated representation of life cycle design information. Second, design conflicts were decomposed into objective conflicts and decision conflicts: objective conflicts were quantified using the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation (FCE); decision conflicts were resolved based on the element-name-value model and similarity measure. Then, a breadth-first search algorithm integrated with a pruning strategy was proposed to efficiently search for design solutions with minimized objective conflicts within the constraint resolution domain. Finally, the effectiveness of the method was verified through a case study on conflict resolution in wind turbine system design. The results demonstrate that the proposed method can achieve the quantification and resolution of both objective and de-

收稿日期:2025-12-01
基金项目:国家自然科学基金(52675653);山东省泰山学者青年专家计划(tsqn202408007)

cision conflicts.

Key words: life cycle design; function-structure-material-process (FSMP) model; design conflicts; conflict quantification; conflict resolution

0 引言

产品全生命周期设计(product life cycle design,PLCD)作为从设计源头控制产品环境影响、实现资源高效利用的重要手段,是落实绿色制造战略和推动制造业可持续转型升级的关键路径。然而,全生命周期设计的实施必然引入多目标、多阶段的约束和需求,导致设计冲突频发。现有设计方法论主要以定性为主,难以应对全生命周期设计带来的设计信息异构、目标耦合复杂、决策空间高维等问题,严重阻碍了全生命周期设计的工程应用,因此,建立一套能够对产品全生命周期复杂冲突进行定量评估,并支持自动化、系统化消解的理论与方法,已成为当前研究的重点。

设计方案表达模型是实现设计方案评估决策与冲突消解的前提。现有研究提出了功能-行为-结构[1](function-behavior-structure,FBS)及其改进模型、绿色特征模型及基于图结构的模型等。LI等[2]提出了基于FBS的能耗建模方法,实现了设计过程中产品设计特征和能耗的关联。WANG等[3]将设计特征细化为宏、微特征,实现了基于特征技术的产品低碳设计信息系统化表达。HE等[4]提出了基于有向图的生命周期设计属性模型,实现了产品生命周期评估。上述模型可有效支持产品全生命周期设计方案表达,但考虑全生命周期信息的研究相对较少。

设计冲突的识别与检测旨在尽早发现设计冲突。在冲突识别方面,陶璟等[5]提出了基于"可持续价值-需求"-"技术要求"-"技术方案"域映射的产品生命周期设计方法框架,解决了面向可持续跨组织协同中的设计冲突辨识、绿色设计实现等问题。在冲突检测方面,周兴等[6]提出了基于复杂网络的产品多冲突问题识别与创新设计方法,实现了关键设计问题中多冲突识别及设计方案优化。然而,当前研究多停留在定性识别阶段,对冲突严重程度的定量化度量模型研究较少,针对全生命周期设计中特有的目标冲突与决策冲突缺乏细化的量化手段。

产品全生命周期设计的评估与决策本质上是一个复杂的多目标求解过程,主要涵盖评价指标体系构建、权重配置及多属性决策三个方面。在指标体系构建方面,现有研究多聚焦于产品功能、质量与成本等基本属性,缺乏对资源消耗、环境排放等绿色属性的考量,忽视了产品维修及回收等生命周期末端指标[7-8]。在权重配置与决策方法方面,层次分析法(AHP)及其与模糊理论、质量功能展开(QFD)等的集成应用[9-11]最为广泛,结合逼近理想解排序法(TOPSIS)、灰色关联分析(GRA)等方法[12-14]有效实现了对设计方案的排序与优选。现有研究多集中于对已生成的完整设计方案进行后置评估,缺乏面向设计过程节点的实时评估机制。在面对复杂机电产品时,这种模式难以实现对局部冲突的精准识别与及时消解,设计方案的动态评估与决策效率低。

冲突消解是设计过程中化解矛盾、推动方案决策的关键环节。主流的消解方法包括基于发明问题解决理论(TRIZ)、博弈论、智能优化算法等。鲍宏等[15]提出了一种应用TRIZ的主动再制造绿色创新设计方法,提高了绿色设计改进的效率和成功率。LI等[16]基于冲突解决倾向网络,引入蚁群优化算法搜索冲突解决倾向路径,提高了设计方案生成效率。面对当前全生命周期设计中海量复杂的跨域冲突,现有研究缺乏与全生命周期特性的深度结合,难以实现冲突消解与设计方案自动生成的有效融合。

针对全生命周期设计中设计信息多源异构、设计冲突复杂且难以定量评估和消解的问题,本文提出了一种基于功能-结构-材料-工艺(function-structure-material-process,FSMP)模型的产品全生命周期设计冲突量化与消解方法。

1 基于FSMP模型的产品全生命周期设计信息表达

全生命周期设计的核心在于将原本离散分布于设计、制造、材料及回收等不同阶段的异构信息进行关联与集成[17],这是实现设计冲突识别与定量分析的数据基础。传统设计表达模型如广泛应用的FBS模型[1],侧重于描述产品物理实体的生成过程,而在表达材料属性选择、制造工艺约束以及生命周期末端回收特性等关键环境要素方面存在明显的维度缺失,难以支撑跨阶段冲突的深层解析。针对这一问题,本文在前期的研究基础上,沿用FSMP设计信息模型[18-19],如图1所示,以此作为全生命周期设计信息的统一载体。

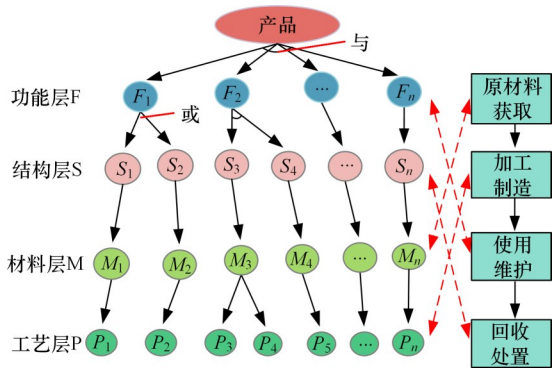

图1　产品全生命周期多层级模型

Fig.1　Multi-layer model of PLCD

该模型将全生命周期信息抽象为功能层(F)、结构层(S)、材料层(M)和工艺层(P)4个层级。其中,功能层作为设计的顶层驱动,定义了产品的核心效用与设计需求;结构层是功能实现的载体,描述产品的几何拓扑与零部件组成;材料层描述构成结构的原材料信息;工艺层表示结构成形的工艺过程信息。这4个层之间存在严格的纵向映射与约束传递关系:功能需求的分解决定了结构方案的构型,结构的实现依赖于特定的材料属性,而材料的选择又进一步限定了可行的制造与加工工艺,这种层级递进关系关联了产品设计意图与具体的生命周期环境行为。

在模型的实例化表达上,FSMP模型采用树形拓扑结构来构建产品的设计空间,以总功能为根节点,自上而下逐层展开,各层级节点之间通过“与”或“或”逻辑连接,将设计空间结构化为包含所有潜在设计方案的多维网络。该模型的树形拓扑结构为后续将冲突消解转化为设计空间内的路径搜索与寻优问题提供了数学模型与数据结构支撑。

2　产品全生命周期设计冲突量化评估

2.1　冲突定义

全生命周期设计具有环境友好属性、多生命周期阶段视角、设计信息关联复杂以及相关利益主体众多等特点,其设计冲突比传统设计更为复杂。TRIZ理论将冲突分为管理、物理和技术冲突[20],难以准确且全面地描述全生命周期设计冲突。本文结合全生命周期设计的特点,将设计冲突细分为合规性、利益和技术冲突。

1)合规性冲突。全生命周期设计与各类规范(包括国家法规、行业规范、技术标准等)的强制性要求存在矛盾。例如,欧盟2023年出台的电池法案强制要求可再生材料达到一定的使用比例,这与设计人员为追求极致能量密度而选用低回收比例的可再生材料产生合规性冲突。

2)利益冲突。全生命周期设计涉及阶段多,构成要素复杂,参与利益主体增加导致利益分配冲突。例如,在绿色产品研发过程中,原材料供应商承担绿色材料的研发成本投入,而整机制造商获得市场收益和品牌溢价,构成了利益冲突。

3)技术冲突。技术冲突分为目标冲突和决策冲突:①目标冲突,全生命周期设计过程中产品绿色相关要求对产品功能、材料、结构、工艺等产生的影响,如采用碳纤维复合材料虽能实现轻量化,但会显著增加成本;②决策冲突,全生命周期设计过程的参与主体对产品的设计需求有不同的偏好,导致对同一设计变量产生不同的决策导向,如回收部门倾向于使用单一材料以便于回收,而制造部门可能倾向于复合材料以提高良品率。

2.2　冲突量化

2.2.1　产品全生命周期设计评价指标体系构建

为了量化目标冲突,需要构建面向全生命周期设计方案的综合评估体系。首先,依据科学性、系统性及可操作性原则,建立一套包含原材料获取及制造、使用维护、回收处置的评价指标体系,如表1所示,该体系不仅涵盖材料易加工性、可靠性、成本等传统技术与经济指标,还重点纳入了制造能源消耗、使用环境排放、回收率等绿色指标。同时,根据图1中FSMP模型各层与生命周期阶段的映射,将各指标与各层关联,便于后续开展评估。

表1　产品全生命周期设计评价指标体系

Tab.1　Assessment index system of PLCD

指标体系	生命周期阶段	指标类型	指标名称	指标代号	对应层级
	原材料获取及制造阶段	技术	材料易加工性	B_1	M
			制造工艺复杂性	B_2	P
			原材料获取技术水平	B_3	M
		经济	材料成本	B_4	M
			制造成本	B_5	P
		环境	制造能源消耗	B_6	P
			制造资源消耗	B_7	P
			制造环境排放	B_8	P
	使用维护阶段	技术	可靠性	B_9	F
			使用寿命	B_{10}	F
			性能表现	B_{11}	F
			可维修替换性	B_{12}	F
		经济	使用成本	B_{13}	F
			检修维护成本	B_{14}	F
		环境	使用能源消耗	B_{15}	F
			使用资源消耗	B_{16}	F
			使用环境排放	B_{17}	F
	回收处置阶段	技术	回收技术水平	B_{18}	S
		经济	回收成本	B_{19}	S
		环境	回收率	B_{20}	S
			退役处置能源消耗	B_{21}	S
			退役处置资源消耗	B_{22}	S
			退役处置环境排放	B_{23}	S

2.2.2　基于AHP-FCE的全生命周期设计评估

为实现对FSMP设计空间内各节点的独立评估,基于表1所示的评价指标体系,采用AHP

与模糊综合评价(FCE)相结合的方法进行量化评估。

首先,基于AHP确定各层级指标的权重向量$\boldsymbol{W}$。通过构建判断矩阵,计算最大特征根λ_{max},并进行一致性检验($CR<0.1$),确保权重的科学性。经由此步骤,求解出的经过归一化处理的特征向量$\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$即为各节点权重。

然后,引入FCE处理设计过程中的信息模糊性和不确定性,实现评价指标的定量化。构建评价因素集U与评语集V,其中评语集采用很好、较好、一般、较差、很差5个等级:

$$V=\{V_1,V_2,V_3,V_4,V_5\}=\{\text{很好},\text{较好},\text{一般},\text{较差},\text{很差}\}=\{100,70,50,30,0\} \tag{1}$$

基于评价专家的意见和评估规则,确定各评价指标的隶属度,构建模糊评价矩阵$\boldsymbol{R}$。

最终,设计节点的模糊综合评估向量B通过模糊变换计算得到,进一步计算综合得分E,计算式为

$$B=\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{R}=(b_1,b_2,\cdots,b_n) \tag{2}$$

$$E=B\cdot V^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

其中,V^{T}为评语集的数值化得分向量。综合评估结果E直接反映了设计方案在多维目标下的性能优劣,E越高,表明设计方案目标间的协调性越好,目标冲突程度越低。对于全生命周期设计方案,其整体评估值由各阶段评估结果累加得到。

2.2.3 基于ENV的冲突量化模型构建

针对全生命周期设计过程中的决策冲突,构建基于元素-参数-量值(element-name-value,ENV)模型[21]和空间几何理论的量化模型。ENV模型是一种将设计冲突结构化表达的有效工具,元素E代表设计方案中的功能系统参数对应不同生命周期阶段的评估指标(即制造阶段评分E_m、使用阶段评分E_u、回收阶段评分E_r),元素特性参数表示为控制参数c_p和评价参数e_p,量值V是当前参数变化所导致的量值范围或影响。ENV模型将设计过程中可调节的参数c_p(与物理冲突相对应)和评价指标e_p(与技术冲突相对应)组合表达,支持描述更复杂的设计矛盾。

面向图2所示的全生命周期设计场景,ENV模型被进一步实例化以适应决策冲突的表达:E代表构成系统的功能系统或部件(如传动系统、偏航系统),e_p(下标m、u、r分别表示制造、使用、回收阶段)对应产品或元素在不同生命周期阶段的综合评估结果,而c_p则对应设计空间内各节点上的具体决策。当某一控制参数的量值确定导致不同生命周期阶段的综合评估结果产生显著偏离时,即产生了决策冲突。

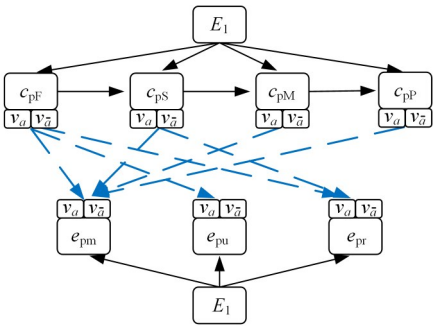

图2 产品全生命周期决策冲突ENV模型

Fig.2 ENV model of decision conflict in PLCD

为量化这一偏离程度,结合空间几何理论,将制造、使用、回收三个阶段的评估值作为坐标轴,构建图3所示的理论设计空间。任意设计方案均可映射为该空间中的一个方案映射点$M(E_m,E_u,E_r)$。在理想状态下,各阶段性能应与其理想权重保持均衡,为此定义过原点且方向向量为$s=(I_m,I_u,I_r)$的直线为冲突消解线。决策冲突的量化值d被定义为方案映射点M到冲突消解线的欧氏距离。该距离直观反映了方案各阶段性能分布与理想均衡状态的偏离程度:距离d越大,决策冲突越严重。基于空间几何原理,决策冲突量化函数可表示为

$$d=\sqrt{\frac{(E_uI_r-E_rI_u)^2+(E_rI_m-E_mI_r)^2+(E_mI_u-E_uI_m)^2}{I_m^2+I_u^2+I_r^2}} \tag{4}$$

其中,E_m、E_u、E_r为设计方案的实际评估值;I_m、I_u、I_r为理想评估值。该模型将决策冲突转化为可计算的几何距离,为后续的冲突消解寻优提供了明确的约束边界。

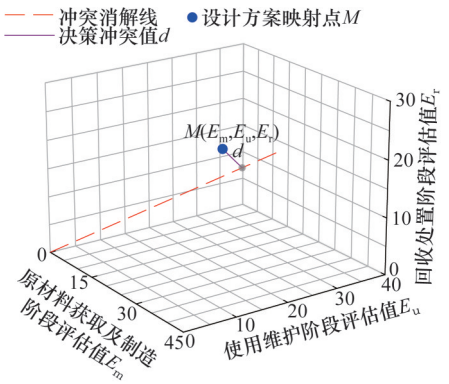

图3 冲突量化空间几何模型

Fig.3 Spatial geometry model of conflict quantification

3 产品全生命周期设计冲突消解策略

在构建全生命周期设计信息模型并实现冲突的定量评估后,设计冲突的消解本质上转化为在FSMP设计空间中寻找满足特定约束且性能最优的设计路径。本节结合约束理论,将模糊的冲突消解要求转化为明确的数学约束,并提出一种融

合剪枝策略的广度优先搜索(BFS-Pruning)算法,以实现设计方案寻优。

3.1　基于约束理论的冲突消解域构建

3.1.1　冲突属性的约束映射

在线性规划中,约束是定义可行解空间的关键条件。针对全生命周期设计中的不同类型冲突,本文引入约束理论中的硬约束与软约束概念进行分类处理。

硬约束指必须严格遵守的限制条件,如法律法规、物理极限等。在本文定义的冲突体系中,合规性冲突属于硬约束。若设计方案违反此类约束,将直接导致方案不可行。

软约束指设计中带有偏好性、可协商或可调整的限制。决策冲突本质上反映了不同生命周期阶段评价结果的不均衡,属于软约束。当系统存在过约束时,可通过对软约束进行适当松弛来获取可行解。

3.1.2　冲突消解域的定义

鉴于决策冲突的软约束特性,完全消除冲突(即$d=0$)在工程实际中往往难以实现,因此,本文引入松弛因子ε,将决策冲突的消解转化为一个约束满足问题。定义满足以下条件的区域为决策冲突消解域:

$$d\leqslant\varepsilon \tag{5}$$

松弛因子ε代表对决策冲突的最大容忍度,其值由产品原始设计方案的冲突值d_y决定,其计算关系为

$$\varepsilon=\gamma d_y \qquad \gamma\in(0,1) \tag{6}$$

对应图4所示的空间几何模型,该消解域表现为以冲突消解线为中心轴、半径为ε的圆柱形区域,落入该区域的设计方案被认为实现了决策冲突的有效消解。

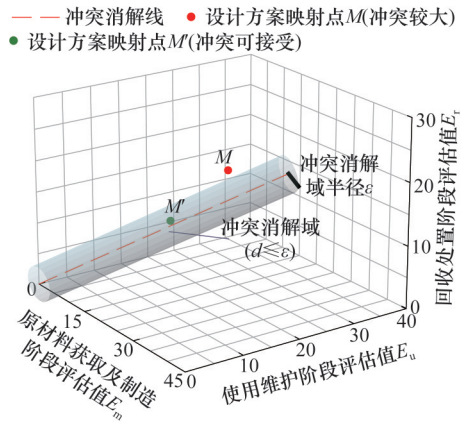

图4　冲突消解域

Fig.4　Conflict resolution domain

3.2　基于BFS-Pruning的冲突消解

3.2.1　冲突消解流程

面向不同类型的冲突,冲突消解方法存在显著差异。合规性冲突属于硬约束,可通过建立企业内部设计规范数据库、强化合规化管理制度等方式进行源头管控。对于利益冲突,主要涉及成本与收益的分配矛盾,则可通过建立多主体博弈模型或冲突协商机制来寻求冲突消解。全生命周期设计的核心挑战在于解决技术冲突,即目标冲突与决策冲突。

目标冲突源于产品绿色属性与传统属性的对立,需通过构建科学合理的综合评价指标体系,利用AHP-FCE综合评估理论,将冲突消解转化为寻求设计空间内综合评估结果最优的设计方案。决策冲突源于不同生命周期阶段评价结果的不均衡性,鉴于其在设计空间内可能无法彻底消除,应以冲突量化模型为基础,引入约束理论,将消解转化为约束满足问题,即在决策冲突量化模型中构建冲突消解域,将落入该消解域的设计方案视为满足决策冲突约束。基于上述分析,本文提出图5所示的冲突消解流程,将全生命周期设计方案的生成、目标冲突的优化以及决策冲突的约束校验进行有效集成,最终通过搜索算法实现设计方案生成。

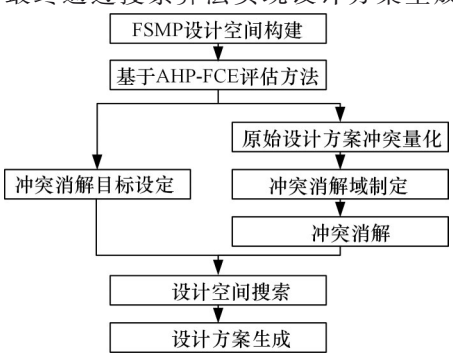

图5　冲突解决流程

Fig.5　Conflict resolution flow

3.2.2　融合剪枝策略的广度优先搜索算法

为了在设计空间中找到满足约束的最优设计方案,将冲突消解转化为路径规划问题,提出BFS-Pruning算法。

1)优化模型构建。本文以产品全生命周期设计方案综合评估结果E的最大化为目标,即

$$\max E=\max(E_F+E_S+E_M+E_P) \tag{7}$$

式中:E_F、E_S、E_M、E_P分别为设计方案在使用维护、回收处置、原材料获取、加工制造阶段的综合评估得分。

设定双重约束条件:一是节点可行性约束(硬约束),要求各节点评估值需高于最低阈值l_i;二是冲突消解域约束(软约束),要求方案整体决策冲突值d需落入松弛因子ε划定的消解域内,即

$$e_i\geqslant l_i \tag{8}$$

$$d\leqslant\varepsilon \tag{9}$$

其中,e_i为设计空间各节点的评估值。违反式(8)约束将导致节点被立即剪枝。

2)剪枝优化策略。BFS算法属于盲目搜索，执行过程中会遍历所有节点，效率低下。为提高算法执行效率，本文引入剪枝策略。①硬约束剪枝。在算法执行过程中，当扩展到设计空间中具有“或”关系的决策节点时，算法立即对该节点的评估值进行硬约束校验，一旦发现节点评估值e_i小于可行性阈值l_i时系统立即剪除以该节点为根的整个子树分支，避免对不可行方案进行无效遍历，从而显著提高搜索效率；②软约束校验与寻优。只有当搜索路径到达叶节点，形成一个完整的全生命周期设计方案后，才计算其决策冲突值d，若该方案满足软约束$d\leqslant\varepsilon$，则视为一个决策均衡的可行解，随后，将该可行解的综合得分E与当前最优解进行比较，若优于现有最优解，则更新其为最优方案。通过这种“硬约束前置剪枝，软约束后置校验”的协同策略，BFS-Pruning算法能够在设计空间内有效地排除不可行、不均衡的设计路径，最终输出满足决策均衡约束且目标冲突最小化的最优设计方案。

3)算法流程。算法的具体执行逻辑伪代码如图6所示。①初始化。设置起始与终止层级，初始化OPEN表、CLOSED表、栈*path*、最优路径表*best_path*及最优目标函数值*best_E*。将起始节点R放入OPEN表中。②节点取出。若OPEN为空，则搜索停止并输出结果；否则从OPEN中弹出节点N，压入栈并移入CLOSED表。③终止判断。若N位于终止层级，跳转至步骤⑥；否则执行步骤④进行节点扩展。④“与”关系处理。若节点N为“与”关系，则将其所有子节点直接压入栈并移入CLOSED表，返回步骤②。⑤“或”关系与剪枝。若为“或”关系，遍历子节点：若$value(C)\geqslant T_{FD}$，则将C加入OPEN表并跳出当前遍历；否则执行剪枝，之后跳转至步骤⑧。⑥冲突校验。计算当前路径冲突值d。若$d\leqslant\varepsilon$，则计算方案评估值$E=\sum value(u)$，否则跳转至步骤⑧。⑦最优更新。若$E>best_E$，则更新$best_E$与$best_path$。⑧回溯与循环。执行栈顶弹出完成回溯，返回步骤②继续搜索。

伪代码 1: 融合剪枝策略的广度优先搜索算法

Input: 起始节点 R，设计可行域阈值 T_{FD}，冲突容忍系数 λ，原始冲突值 d_0

Output: 最优设计方案路径 *best_path*

```
初始化 OPEN ← {R}, CLOSED ← ∅, path ← ∅, best_E ← 0, best_path ← ∅;
while OPEN ≠ ∅ do
    N ← pop(OPEN);                                  // 取出待检查节点
    push(path, N);
    CLOSED ← CLOSED ∪ {N};
    if N 位于终止层级 then
        d ← computeConflict(path);                  // 按式 (4) 计算冲突值
        if d ≤ ε then
            E ← Σ_{u∈path} value(u);
            if E > best_E then
                best_E ← E;
                best_path ← copy(path);             // 更新最优路径
    else
        children ← expand(N);
        if relation(N) = "AND" then
            foreach C ∈ children do
                push(path, C);
                CLOSED ← CLOSED ∪ {C};
        else
            foreach C ∈ children do
                if value(C) ≥ T_FD then
                    push(OPEN, C); // 满足约束，放入 OPEN 待检查
                    break;                          // 满足即可进入下一层级
                else
                    prune(C);                       // 执行剪枝
    if 当前分支已遍历或已剪枝 then
        pop(path);                                  // 路径回溯
return best_path;
```

图6 融合剪枝策略的广度优先搜索算法

Fig.6 Breadth-first search algorithm with pruning strategy

4 案例分析

风力发电机组作为典型的复杂机电产品，其结构划分清晰、材料用量大、生命周期长，在全生命周期设计过程中涉及性能、成本、环境影响等多重目标，易产生显著的设计冲突。为验证方法的可行性与有效性，以中车山东风电有限公司的CWT2500-D143型风力发电机组为例进行验证。该型风力发电机组额定功率2.5 MW，额定转速10 m/s，使用寿命20年，风轮直径143 m。

4.1 风力发电机组设计空间构建

为支撑该型风力发电机组全生命周期设计方案决策求解，基于前述设计空间构建方法，结合企业提供的2.5 MW风力发电机组原始设计方案和相关调研分析结果，形成了图7所示的2.5 MW风力发电机组设计空间(部分)。

构建的设计空间完整覆盖了影响整机全生命周期设计性能的全部关键决策，为后续冲突量化与消解提供基础数据结构。

4.2 风力发电机组全生命周期冲突量化评估

为生成冲突消解方案，需开展基于AHP-FCE方法的设计空间节点评估，并基于ENV冲突量化模型，量化原始设计方案的冲突。

4.2.1 基于AHP-FCE的设计空间节点评估

采用AHP-FCE方法开展2.5 MW风力发电机组设计空间全节点综合评估。首先，采用AHP方法对指标进行权重分配计算，在通过专家咨询和一致性检验后，得到各级评估指标的权重向量；然后，基于FCE得到各节点的评价结果；最后，通

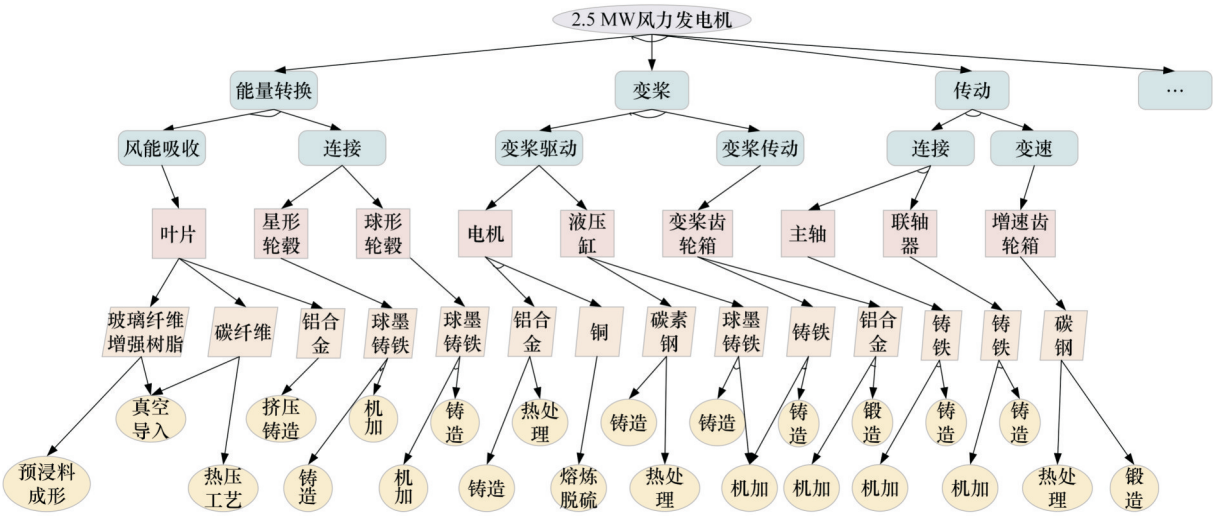

图7　2.5 MW风力发电机组设计空间(部分)

Fig.7　Design space of the 2.5 MW wind turbine (part)

过模糊变换计算得到设计节点的模糊综合评估结果,进而得到综合得分。

1)设计空间节点权重计算。针对已建立的设计空间,采用自上而下的逐层计算策略计算各节点权重。在功能层中,2.5 MW风力发电机组的一级功能主要包括能量转换F_1、变桨F_2、传动F_3、制动F_4、偏航F_5、发输电F_6、支撑F_7。二级功能包括风能吸收f_1、连接f_2、变桨驱动f_3、变桨传动f_4、连接f_5、变速f_6、制动f_7、偏航制动f_8、偏航驱动f_9、偏航传动f_{10}、发电f_{11}、变压f_{12}、机舱保护f_{13}、轮毂支撑f_{14}、机舱支撑f_{15}、整体支撑f_{16}。基于功能划分构建表2所示的判断矩阵。基于AHP的执行步骤,求解得到判断矩阵最大特征值$\lambda_{max}=7.6584$,继而得到

$$RI=1.32 \qquad CR=0.0865<0.1$$

满足一致性要求。因此,功能层一级功能节点的权重如下:

$$\boldsymbol{W}_F=(w_{F_1},w_{F_2},\cdots,w_{F_7})=(0.1805,0.0665,0.2183,0.0928,0.0894,0.2647,0.0878)$$

接下来,计算功能层二级功能的节点指标权重。有相同的父节点F_1的二级功能中f_1和f_2是“与”的关系,需要对F_1进行权重配置,将F_1的权重分配给f_1和f_2。求解得到f_1和f_2相对F_1的权重分别为0.75和0.25,因此f_1和f_2的组合权重分别为0.1354和0.0451,以此类推得到功能层二级功能节点的权重如下:

$$\boldsymbol{W}_f=(w_{f_1},w_{f_2},\cdots,w_{f_{16}})=(0.1354,0.0451,0.0333,0.0333,0.0793,0.1391,0.0928,0.0298,0.0298,0.0298,0.1973,0.0662,0.0148,0.0148,0.0296,0.0296)$$

重复执行上述步骤,对FSMP模型各节点进行逐层权重计算,得到各节点权重值。

2)设计空间底层指标权重配置。构建如表3所示的各二级指标判断矩阵。基于AHP的执行步骤,求解得到判断矩阵最大特征值$\lambda_{max}=3.0536$,继而得到

$$RI=0.58 \qquad CR=0.0462<0.1$$

满足一致性要求。因此,三个阶段的指标权重如下:

$$\boldsymbol{W}_F=(w_m,w_u,w_r)=(0.4128,0.3275,0.2597)$$

同理,计算得到制造阶段的指标权重、服役阶段的指标权重和回收阶段的指标权重如下:

$$\boldsymbol{W}_m=(w_{m_1},w_{m_2},\cdots,w_{m_8})=(0.1089,0.1089,0.0579,0.1410,0.1410,0.1748,0.0927,0.1748)$$

$$\boldsymbol{W}_u=(w_{u_1},w_{u_2},\cdots,w_{u_9})=(0.0967,0.0982,0.1658,0.0387,0.0498,0.1496,0.1189,0.0647,0.2176)$$

$$\boldsymbol{W}_r=(w_{r_1},w_{r_2},\cdots,w_{r_6})=(0.1358,0.2591,0.2591,0.1358,0.0749,0.1353)$$

表2　设计空间一级功能判断矩阵

Tab.2　Judgment matrix for primary functions of design space

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
F_1	1	3	1/2	3	3	1/3	3
F_2	1/3	1	1/3	1/2	1	1/3	1
F_3	2	3	1	3	3	1	1
F_4	1/3	2	1/3	1	2	1/3	1
F_5	1/3	1	1/3	1/2	1	1/3	3
F_6	3	3	1	3	3	1	3
F_7	1/3	1	1/3	1	1/3	1	1

表3　设计空间二级指标判断矩阵

Tab.3　Judgment matrix for secondary index of design space

	B_m	B_u	B_r
B_m	1	1	2
B_u	1	1	1
B_r	1/2	1	1

进而得到指标的组合权重：

$$\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_{23})=(0.0447,0.0447,0.0238,0.0578,0.0578,0.0718,0.0373,0.0718,0.0320,0.0323,0.0548,0.0129,0.0165,0.0495,0.0393,0.0214,0.0713,0.0354,0.0673,0.0673,0.0354,0.0195,0.0354)$$

3)设计空间节点模糊综合评价。以功能层风能转换节点为例，其模糊综合评价矩阵见表4。

表4 风能转换的模糊综合评价矩阵

Tab.4 Fuzzy comprehensive evaluation matrix of wind energy conversion

	很好	较好	一般	较差	很差
B_9	0.3	0.7			
B_{10}	0.4	0.6			
B_{11}	0.3	0.7			
B_{12}				0.5	0.5
B_{13}		1			
B_{14}			0.4	0.5	0.1
B_{15}		1			
B_{16}		1			
B_{17}		1			

基于式(2)和式(3)可得该节点的E=1.7348。重复执行上述步骤，求解得到设计空间各节点的模糊综合评价结果。

4.2.2 原始设计方案冲突量化

基于计算所得I_m=41，I_u=33，I_r=26，构建冲突量化模型。将原始设计方案各生命周期阶段的综合评估结果映射到模型中。其中，原始设计方案坐标(E_m，E_u，E_r)=(25.1566，24.2762，16.7094)。由式(4)求解得到原始设计方案冲突量化结果d_{P_0}=3.1688。

原始设计方案采用双馈发电机实现发电功能。结合行业现状，双馈发电机在使用维护阶段表现良好，但体积大、结构复杂，在原材料获取及加工制造阶段表现不佳，同时在回收阶段可拆卸性能较差，故而产生决策冲突。

4.3 2.5 MW风力发电机组冲突消解方案生成

应用所提BFS-Pruning算法，结合前述分析结果，对2.5 MW风力发电机组设计空间开展冲突消解方案寻优，生成冲突消解最终方案。

4.3.1 冲突属性的约束映射

以设计方案综合评价结果最大为目标，以决策冲突为约束条件，基于所提BFS-Pruning算法，在已构建的2.5 MW风力发电机组设计空间(图7)内遍历搜索，实现了冲突消解设计方案求解，并确保该方案为全局最优解。冲突消解设计方案的多层级设计模型如图8所示。

图9展示了映射到空间几何模型的原始方案和优化方案，冲突值降为d_{P^*}=1.5963。

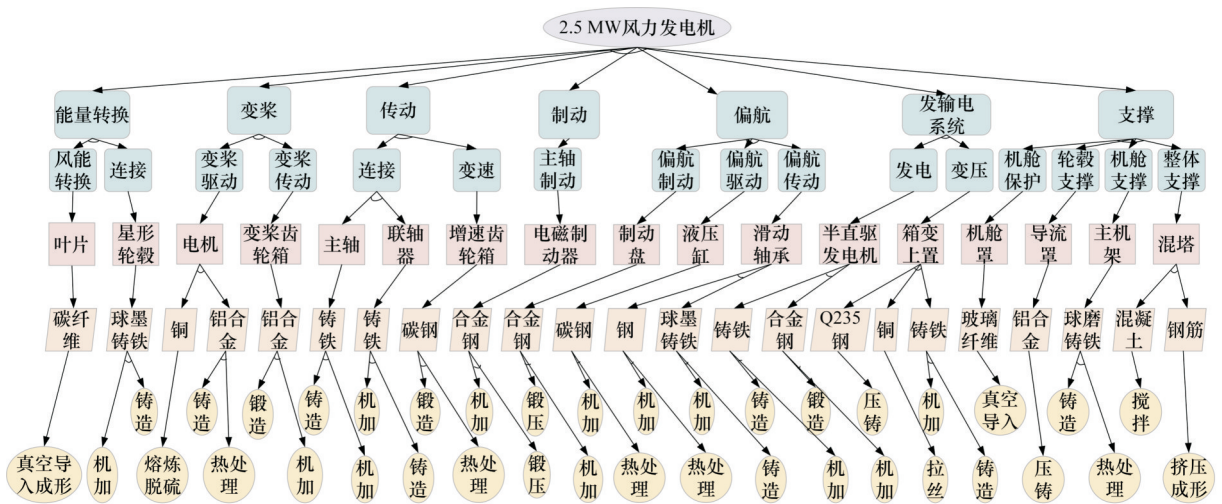

图8 设计方案冲突消解模型

Fig.8 Conflict resolution model for design schemes

4.3.2 结果分析

为验证本文所提基于FSMP模型的产品全生命周期设计冲突量化与消解方法的有效性，本文从目标冲突与决策冲突两个维度，对冲突消解方案与原始方案进行了对比及归因分析。

1)目标与决策冲突消解效果分析。如图10所示，冲突消解方案在生命周期各阶段的综合评估结果均有提高。其中，制造阶段提高28.88%，这主要源于以下三项设计改进实施：叶片材料由玻璃纤维换为碳纤维，降低了真空导入成形能耗；发输电系统由“双馈+箱变下置”调整为“半直驱+箱变上置”，简化了齿轮箱结构并减少了加工工序；偏航系统由滚动轴承更换为滑动轴承，减少了材料消耗与加工复杂度。同时，基于碳纤维的叶片轻量化设计提高了风能捕获效率，使得产品使用阶段提高6.76%，而电磁制动技术的采用也降低了系统的维护需求。此外，半直驱发电机因其结构紧凑、易于拆解的特点，使得回收阶段提高22.60%。

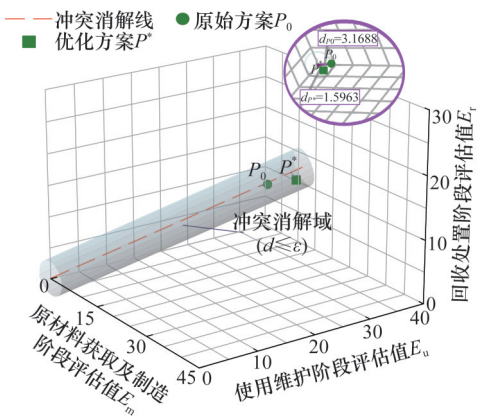

图 9　原始和优化方案的空间几何模型

Fig.9　Spatial geometric models of the original and optimized schemes

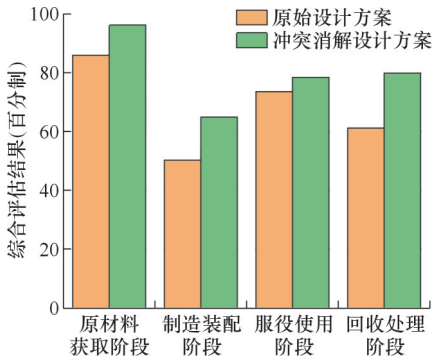

图 10　设计方案综合评价结果对比分析

Fig.10　Comparative analysis of comprehensive evaluation results for design solutions

2)决策冲突消解效果分析。不同功能系统的设计方案决策冲突对比如图 11 所示。发输电系统采用了“半直驱＋箱变上置”方案,决策冲突降低 79.37%。传动系统因技术成熟、设计方案单一,导致决策冲突改善有限。制动系统采用了电磁制动等设计优化,有效降低了决策冲突。偏航与支撑系统采用了滑动轴承等局部优化,决策冲突下降。

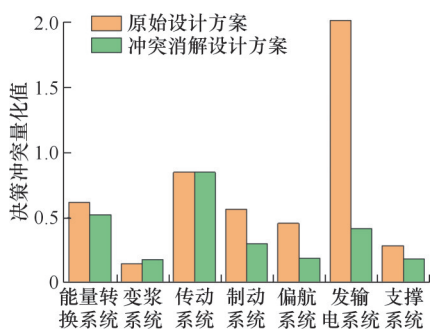

图 11　不同功能系统的设计方案决策冲突对比

Fig.11　Comparison of design schemes and decision-making conflicts for different functional systems

3)冲突消解的归因分析。为了明确冲突消解的具体途径,进一步将原始方案与优化方案在 FSMP 各层的关键设计变更进行对比,分析其对目标冲突和决策冲突的影响。主要变更集中在发输电、制动和偏航三个功能系统。①发输电系统:将“双馈发电机＋箱变下置”变为“半直驱发电机＋箱变上置”。原始方案采用双馈发电机,虽在使用维护阶段表现良好,但体积大、结构复杂,导致原材料获取阶段材料用量大、制造阶段能耗高、回收阶段拆解难;优化方案采用半直驱发电机,结构紧凑,减少了齿轮箱级数,同时将箱变由下置调整为上置。②制动系统:将液压盘式制动改为电磁制动。原方案需定期更换刹车片,维护成本高;新方案摩擦元件减少,检修成本降低且利于回收。③偏航系统:将滚动轴承改为滑动轴承。原方案制造精度和成本高;新方案降低材料消耗和加工复杂度,制造和回收阶段评分均有提高。

综上所述,本文提出的冲突消解方法能够有效地弱化目标冲突与决策冲突,为复杂产品在全生命周期视角下的可持续设计提供可靠的量化决策支持。

5　结论

本文针对产品全生命周期设计中的复杂冲突问题,提出了一套基于功能-结构-材料-工艺(FSMP)模型的信息建模、冲突量化与消解方法。基于 FSMP 的多层级模型实现了跨生命周期设计信息的结构化集成;将设计冲突解耦为目标冲突与决策冲突,分别建立了基于 AHP-FCE 的综合性能优化模型与基于 ENV 模型及空间几何的均衡性量化模型,进而提出了融合剪枝策略的广度优先搜索算法,将冲突消解转化为路径寻优问题。以 2.5 MW 风力发电机组全生命周期设计为例进行了冲突消解,生成的优化方案综合性能评估提高了 13.35%,决策冲突降低了 50.48%。

本文所提方法能够为复杂机电产品的可持续设计提供一套可操作的理论框架与工具体系,同时也为面向全生命周期的数字化设计决策支持系统开发提供指导。未来研究可融合智能算法与创新生成机制,实现全生命周期设计早期潜在冲突的主动检测与定位,并在此基础上引入创新生成机制,驱动设计方案自动生成,形成从冲突预警到创新生成的一体化决策。

参考文献:

[1] GERO J S, KANNENGIESSER U. The Situated Function-behaviour-structure Framework[J]. Design Studies, 2004, 25(4): 373-391.

[2] LI L, YU S, TAO J, et al. A FBS-based Energy Model-

ling Method for Energy Efficiency-oriented Design[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1-13.
[3] WANG G, LI F, ZHAO F, et al. A Product Carbon Footprint Model for Embodiment Design Based on Macro-micro Design Features[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(11): 3839-3857.
[4] HE B, LUO T, HUANG S. Product Sustainability Assessment for Product Life Cycle[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 238-250.
[5] 陶璟，邬如靖，鲍宏，等. 面向可持续价值共创的跨组织协同产品全生命周期设计方法[J]. 机械工程学报，2023，59(13)：216-227.
TAO Jing, WU Rujing, BAO Hong, et al. Cross-organizational Collaborative Life Cycle Design Oriented to Sustainable Value Creation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(13): 216-227.
[6] 周兴，李文强，向海，等. 基于复杂网络的产品多冲突问题识别与创新设计方法[J]. 计算机集成制造系统，2024，30(11)：3786-3798.
ZHOU Xing, LI Wenqiang, XIANG Hai, et al. Identification and Innovative Design Method for Multi-contradiction Problem of Product Based on Complex Network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(11): 3786-3798.
[7] KAMALAKKANNAN S, KULATUNGA A K. Optimization of Eco-design Decisions Using a Parametric Life Cycle Assessment[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 27: 1297-1316.
[8] SCHILLER S, LANDWEHR M, VINOGRADOV G, et al. Towards Ontology-based Lifecycle Management in Blisk Manufacturing[J]. Procedia CIRP, 2022, 112: 280-285.
[9] 武春龙，朱天明，张鹏，等. 基于功能模型和层次分析法的智能产品服务系统概念方案构建[J]. 中国机械工程，2020，31(7)：853-864.
WU Chunlong, ZHU Tianming, ZHANG Peng, et al. Conceptual Scheme Construction of Smart PSS Based on Functional Model and AHP[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 853-864.
[10] GUO X, LI Y, SHI H, et al. Carbon Reduction in Cement Industry-an Indigenized Questionnaire on Environmental Impacts and Key Parameters of Life Cycle Assessment (LCA) in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139022.
[11] 杨世香，李文强，邵哲辉. 复杂机电系统总体设计方法研究与应用[J]. 中国机械工程，2023，34(1)：47-54.
YANG Shixiang, LI Wenqiang, SHAO Zhehui. Investigation and Application on Overall Design Method of Complex Electromechanical Systems[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(1): 47-54.
[12] 孔琳，王黎明，吕晓腾，等. 基于多层级约束满足问题的产品全生命周期设计方案决策研究[J]. 机械工程学报，2023，59(11)：276-289.
KONG Lin, WANG Liming, LYU Xiaoteng, et al. Decision-making for Product Life Cycle Design Solution Based on Multi-layer Constraints Satisfaction Problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(11): 276-289.
[13] 胡珊，刘晶. 模糊综合评价法在产品设计方案决策中的应用[J]. 机械设计，2020，37(1)：135-139.
HU Shan, LIU Jing. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Product Design Scheme Decision[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 135-139.
[14] 李方义，彭鑫，王黎明，等. 基于预期目标的高效能电机方案绿色度评价[J]. 中国机械工程，2018，29(21)：2527-2532.
LI Fangyi, PENG Xin, WANG Liming, et al. Green Degree Evaluation of High Efficiency Motor Schemes Based on Expected Goal[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(21): 2527-2532.
[15] 鲍宏，刘志峰，胡迪，等. 应用TRIZ的主动再制造绿色创新设计研究[J]. 机械工程学报，2016，52(5)：33-39.
BAO Hong, LIU Zhifeng, HU Di, et al. Research on Green Innovation Design Method of Active Manufacturing Using TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 33-39.
[16] LI X, ZHANG J, PENG Q, et al. Agile Solution Search Strategy for Solving Multi-conflicts in Product Development[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 57: 102012.
[17] 顾新建，顾复. 产品生命周期设计——中国制造绿色发展的必由之路[M]. 北京：机械工业出版社，2017.
GU Xinjian, GU Fu. Product Life Cycle Design—the Only Way for the Green Development of China Manufacturing[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
[18] 付岩，王黎明，李方义，等. 基于FSMP模型的机电产品绿色设计方案生成方法[J]. 计算机集成制造系统，2023，29(4)：1301-1312.
FU Yan, WANG Liming, LI Fangyi, et al. Generation Method of Green Design Scheme for Mechatronic Products Based on FSMP Model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(4): 1301-1312.
[19] KONG L, WANG L, LI F, et al. A Life-cycle Integrated Model for Product Eco-design in the Conceptual Design Phase[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132516.
[20] ALTSHULLER G. And Suddenly the Inventor Appeared: TRIZ, the Theory of Inventive Problem Solving[M]. Worcester, Mass.: Technical Innovation Center, Inc., 1996.
[21] KHOMENKO N, de GUIO R. OTSM Network of Problems for Representing and Analysing Problem Situations with Computer Support[C]//Trends in Computer Aided Innovation. Boston, MA, 2007: 77-88.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：王忆同，男，1996年生，博士研究生。研究方向为绿色设计、生命周期评价。E-mail：tezwyt@mail.sdu.edu.cn。**王黎明***（通信作者），男，1986年生，教授、博士研究生导师。研究方向为绿色设计与制造、生命周期评价和智能优化算法。E-mail：liming_wang@sdu.edu.cn。

本文引用格式：

王忆同，蔡泽康，王黎明，等. 基于功能-结构-材料-工艺模型的产品全生命周期设计冲突量化与消解[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2383-2392.

WANG Yitong, CAI Zekang, WANG Liming, et al. Quantification and Resolution of Design Conflicts in Product Life Cycle Based on FSMP Model[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2383-2392.