

基于产品多域信息关联约束网络模型的设计变更方案决策方法

张元戎¹, 郭伟¹, 王磊¹, 孙江²

(1.天津大学, 天津 300192; 2.天津仁爱学院, 天津 301636)

摘要: **目的** 随着客户需求向个性化、多样化转变, 市场对企业设计需求响应能力提出了更高的要求。**方法** 为实现快速精准的产品变更, 提出了一种基于产品多域关联约束网络模型的变更设计方案决策方法。构建了基于产品功能域-参数域-结构域多域关联约束的网络模型, 提出了基于该模型的变更影响传播模式, 提出了以网络节点代价与连边代价指标为基础的产品变更方案决策方法, 以土压平衡盾构机螺旋输送机的变更为例验证了该方法的有效性。**结果** 结果表明, 该决策方法可以快速获得产品多域设计信息变更方案, 同时有效减小变更影响的传播范围。**结论** 对企业提高需求响应速度、提高变更设计效率、降低产品变更成本来说具有重要意义。

关键词: 变更设计; 多层网络模型; 变更传播代价计算; 变更方案决策

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)08-0061-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.08.006

A Design Change Scheme Decision-making Method Based on Product Multi Domain Association Constraint Network Model

ZHANG Yuan-rong¹, GUO Wei¹, WANG Lei¹, SUN Jiang²

(1.Tianjin University, Tianjin 300192, China; 2.Tianjin Ren'ai College, Tianjin 301636, China)

ABSTRACT: With the change in customer demand toward individuation and diversification, the market has higher requirements for the response ability of enterprise design requirements. To realize rapid and accurate product change, a change design scheme decision-making method based on the product multi-domain association constraint network model was proposed. Firstly, a network model based on multi-domain association constraints of product function domain, parameter domain, and structure domain was constructed. The spread mode of change effects based on this model was proposed. A product change scheme decision-making method based on network node cost and edge cost index was proposed. And the effectiveness of the method was verified with the change of screw conveyor with earth pressure balance shield machine as an example. The results showed that the decision-making method could quickly obtain the change scheme of product multi-domain design information, and effectively reduce the spread range of change effects. It is of great significance for enterprises to improve demand response speed, change design efficiency and reduce the cost of product change.

KEY WORDS: change design; multi-layer network model; change spread cost calculation; change scheme decision-making

为适应复杂工况及个性化的用户需求, 以产品平台为基础的变更设计能力尤为重要^[1]。影响产品设计

变更质量、成本、效率的因素复杂多样, 局部变更可能会引起产品其他关联部分的巨变。若采用的变更方

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2022KJ041)

作者简介: 张元戎(1997—), 男, 博士, 主要研究方向为数据驱动产品设计、产品设计理论与方法。

通信作者: 孙江(1975—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大型水电设备优化, 产品参数化设计。

案不当,则会造成变更的“雪崩”^[2]传播,进而导致产品失效。因此,研究设计变更的传播模式,有效地评估变更影响,控制变更影响传播的区域,形成以代价最小为目标的产品变更方案是产品变更快速、精准实施的保障^[3]。

为了更好地研究变更对产品带来的影响,学者们将复杂产品设计要素组织为各种形式的变更分析模型。在公理化设计理论中,设计“域”是区分不同设计活动、设计要素的界限,同时域间存在“之”字映射关系。随着该理论的发展,多域映射成为设计要素关联建模的重要手段。在当前的研究中,变更设计建模方法可分为:单域建模和多域建模。域的类型主要包括需求、功能、行为、结构、特征参数、设计任务、设计资源等。单域建模主要指将域内要素及其关联关系,通过 DSM^[4]、单层网络模型^[5]等方法表达出来。多域建模则采用跨域映射矩阵^[6]、多层网络模型^[7]等方法表达多域内及多域间的关联关系。

基于构建的变更分析模型,学者们纷纷展开传播模式分析^[8]、传播风险分析^[9-10]、最优变更路径搜索^[11]等方面的研究。相关的研究包括:米晶晶等^[12]提出了一种产品功能变更模式,为专利驱动的产品功能创新再设计提供了一种可行的方法。Clarkson 等^[13]运用设计结构矩阵对零部件之间的装配关系进行建模,通过打分量化零部件之间的变更传播概率和传播影响概率,进而得到零部件之间的变更传播风险,该方法称为 CPM (Change Prediction Method),对后续产品变更分析领域的研究产生了深远影响。郭于明等^[14]综合复杂网络知识、CPM 方法,提出了一种基于蚁群算法的高风险节点路径预测方法。Hamraz 等^[15]提出了基于 FBS 的链接模型与 CPM 结合的变更动态传播机理模型,用以表示产品设计开发过程中的变更风险传播过程。刘晓健等^[16]以功能元作为基本的传播单元,建立了产品的弱连接关系图 (WtRG),其认为功能元内部的约束满足是功能元间变更影响的传播前提。Li 等^[17]提出了基于任务-产品级联失效模型的复杂产品开发模型 (CPD),并通过多种策略的数值仿真,提出最优的变更影响传播缓解策略组合。褚学宁等^[18]通过构建监测参数、性能参数及设计参数关联关系矩阵模型,实现基于产品性能监测参数变更波动的关键设计参数的识别分析。李玉鹏等^[19]提出功能-结构同质化简约模型,基于产品结构对功能的贡献度,分析功能变更对产品系统的影响。Yang 等^[20]通过构建组件化的特性关联网络模型 (PLN),分析变更影响在特征参数中的传播模式,提出不同优选策略下的最优设计方案。Ma 等^[21]构建了产品的特征参数关联网络模型,并运用改进的蚁群算法,搜索最优的变更影响传播路径。

在现有的产品设计变更研究中,以零部件的变更风险计算和传播分析为主,并未融合产品多域的设计

信息,同时在众多变更方案的决策方法中,以最低风险路径形式存在的变更方案对设计变更执行的指导效果有限。针对以上问题,本文提出了产品功能域-参数域-结构域多域关联约束网络模型构建方法,并定义了模型中的变更影响传播模式以及变更代价综合计算方法;最后结合产品的实际设计过程,提出了一种最低代价驱动的变更方案决策方法,获得全面的产品设计变更要素集。

1 产品功能-参数-结构关联约束网络模型

1.1 网络模型结构定义

提出了以特征参数域为模型的中间层,结构、功能域为两端被影响层的改进多层网络模型结构,如图 1 所示。该网络模型结构可以直观、深刻地表达产品特征参数层面的详细修改过程,以及参数修改后对功能、结构模块的影响过程,同时也是管理和分析产品变更设计的数据驱动方法。

功能元是功能域中的基本要素,设计师通过功能设计将产品总功能拆分为功能元,并将功能元组织为功能链或功能树的形式,进行产品功能信息的管理,建模数据通过功能设计说明书获取;产品结构是由相关零部件装配而成的,结构域中的节点为零部件,相关数据在 BOM 表和 CAD 系统中获取;参数域中的节点为产品的设计参数,参数之间通过函数或条件约束建立关联,数据从产品的参数化设计说明书中获取数据。模型中的跨域关联关系分为两类,功能-参数的跨域关联关系,以及结构-参数跨域关联关系。产品结构与参数之间的关联是指与产品结构设计相关的尺寸、材料、公差参数等,可在企业的 CAD 制图系统中获取。产品功能单元与参数之间的关联构建需基于功能实现原理,在具体进行建模时,设计师可将功能单元与客户与企业关注的性能与运行参数等建立联系。构建模型的所需数据及数据获取方法如表 1 所示。

1.2 产品多层网络模型的关联约束构建方法

精准的产品设计要素关联约束建模是保持产品信息完整性和信息更改的一致性的基础。基于多层网络模型结构,本文提出了域内关联约束(以参数域为例)以及跨域关联约束的构建方法。

1.2.1 域内关联约束构建方法

在参数域内,参数可划分为性能参数、结构参数、材料参数、工艺参数等,设计阶段主要关注产品的性能参数、结构参数^[22]。参数间的关联约束主要分为两类,函数关联和条件关联。其中函数关联用 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示,其中 y 为父节点, x_1, x_2, \dots, x_i 为子节点,在网络模型中可以表示为函数关联与各节点之间的双向箭头,设计目标不同,函数关联中的父节点和子节点的相对关系会发生变化,但是它们仍隶

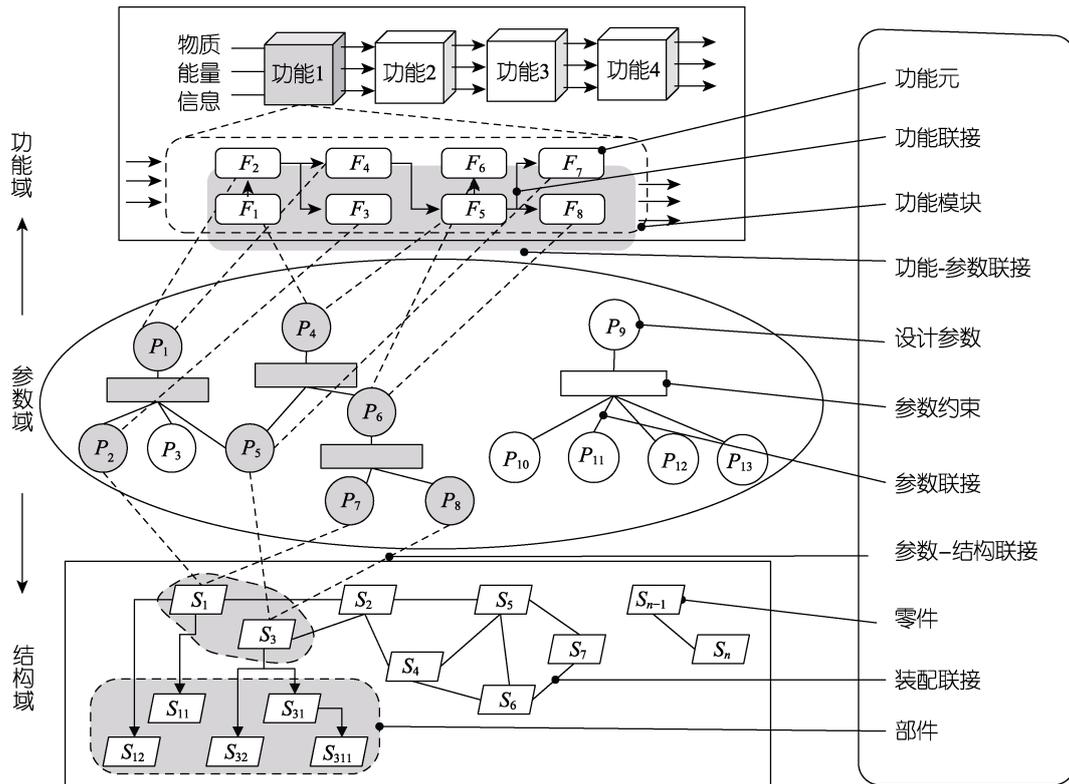


图 1 产品功能-参数-结构关联约束网络模型

Fig.1 Function-parameter-structure association constraint network model of product

表 1 产品功能-参数-结构关联约束网络模型的数据需求

Tab.1 Data requirements of product function-parameter- structure association constraint network model

| 模型元素 | 设计域 | 所需数据 | 数据源 |
|-----------|--------|---------------|---------|
| 节点 | 功能域 | 功能元 | 功能设计说明书 |
| | 结构域 | 零部件 | BOM 表 |
| | 参数域 | 设计参数 | 参数设计说明书 |
| 边 (域内) | 功能域 | 功能元间关联 | 功能设计说明书 |
| | 结构域 | 零部件间关联 | CAD 系统 |
| | 参数域 | 设计参数间关联 | 参数设计说明书 |
| 边 (跨域) | 功能-参数域 | 功能元与设计参数的匹配关系 | 设计师 |
| | 参数-结构域 | 设计参数与零部件的匹配关系 | CAD 系统 |

属于同一关联约束。条件关联为非等式, 用公式 $f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ 表示, 在网络模型中可以表示为条件关联指向对应参数的单向箭头。通过提取产品设计参数间的关联约束数据, 可构建如图 2 所示的参数网络模型。

1.2.2 跨域关联约束构建方法

跨域关联约束可分为包含、从属和并列三类, 根据关联的强弱程度可分为紧密关联、一般关联、微弱关联等。将功能分解后的功能元, 以及结构分解后的零部件, 与设计参数之间建立匹配关系。这种关系可以是定性或定量的, 显性或隐性的, 如何建立联系取决于设计者的经验和设计知识库中的知识。在网络模

型中可以用设计参数与功能元、零部件间的虚线来表示这种跨域关联关系, 如图 3 所示。

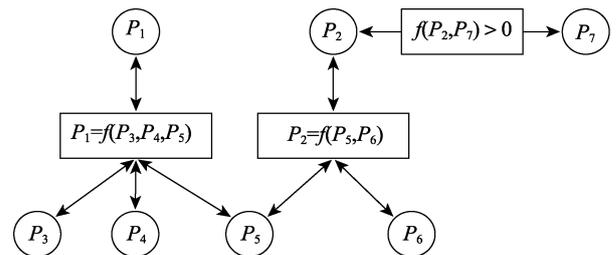


图 2 参数域内关联约束网络模型

Fig.2 Association constraint network model in parameter domain

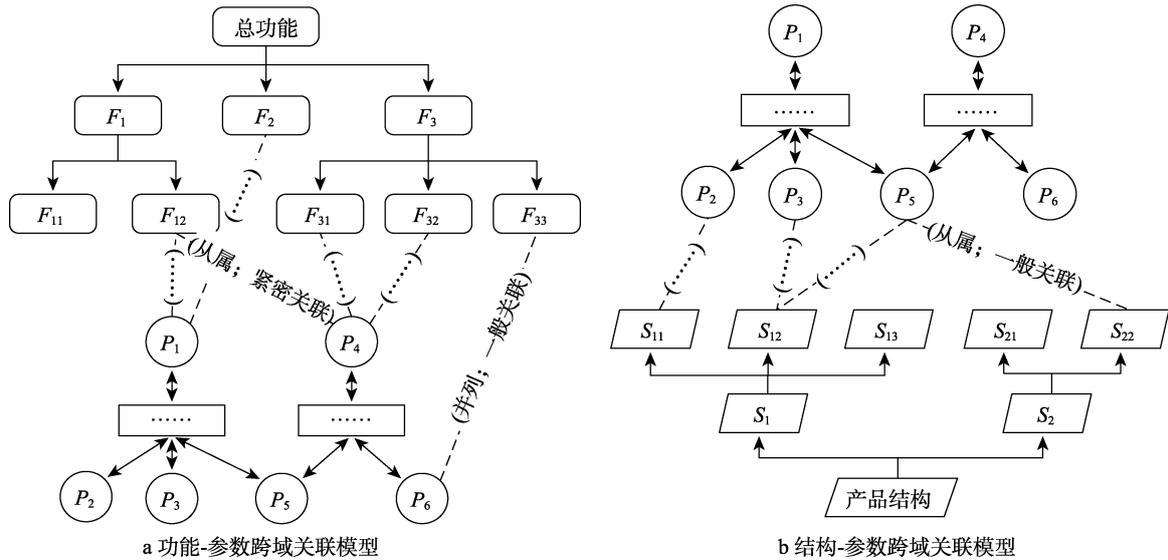


图3 跨域关联约束网络模型
Fig.3 Cross-domain association constraint network model

2 产品多域信息关联约束网络内的变更影响传播模式

2.1 参数网络内部的变更影响传播模式

变更影响首先是在参数网络内传播的,确定被影响的特征参数集后,影响进而扩散至功能域、结构域。在变更发生后,首先定位需要修改的设计参数,并判断参数的变化量是否超出了其设计裕量,若没有超出,则该变更影响被参数吸收,一旦超出参数的设计裕量,关联约束中的等式或不等式关系不再满足,关联约束被激活,需要间接调整其他参数,可将这些需要调整的参数定义为被影响参数。为了判断被影响的参数是否会发生进一步的变更影响扩散,要基于函数和条件关联逐个计算被影响参数的值,并判断其变化量是否超出其设计裕量,若超出设计裕量则会继续影响其下游的设计参数。循环该过程,直到没有关联约束被激活,影响传播结束,并确定变更影响的参数范围。

如图4所示,当参数 P_1 发生变化时,若其变化量超过其设计裕量,函数关联 $P_1=f(P_4,P_5)$ 中的等式关系不再满足,关联约束被激活,参数变量 P_4 、 P_5 被划入被影响参数集(P_3 为常值参数)。为满足该关联约束,需在 P_4 、 P_5 两个子参数中选择某一参数进行修改。经计算,被影响参数 P_4 、 P_5 中仅 P_4 的变化量超出了其设计裕量,对应函数关联 $P_4=f(P_7,P_8)$ 和 $P_6=f(P_4,P_9,P_{10},P_{11})$ 被激活,变更影响进一步扩散,下游参数变量 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 、 P_{10} 加入被影响参数集,由于 P_6 、 P_7 、 P_8 、 P_9 、 P_{10} 处于参数网络的末端,无其他可激活的关联约束,变更影响传播结束,被影响的参数集为 $\{P_1, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}\}$ 。

2.2 跨域变更影响传播模式

参数网络中的被影响参数集确定后,通过跨域变更影响传播,会对产品的相应功能、结构产生影响。如图4所示,参数 P_1 与功能元 F_1 、 F_2 存在跨域映射关联,若 P_1 为被影响参数集中的参数,则 F_1 、 F_2 列为被影响功能元;同理,参数 P_8 的变化会影响结构 S_2 、 S_3 ,并将其列为被影响产品结构。

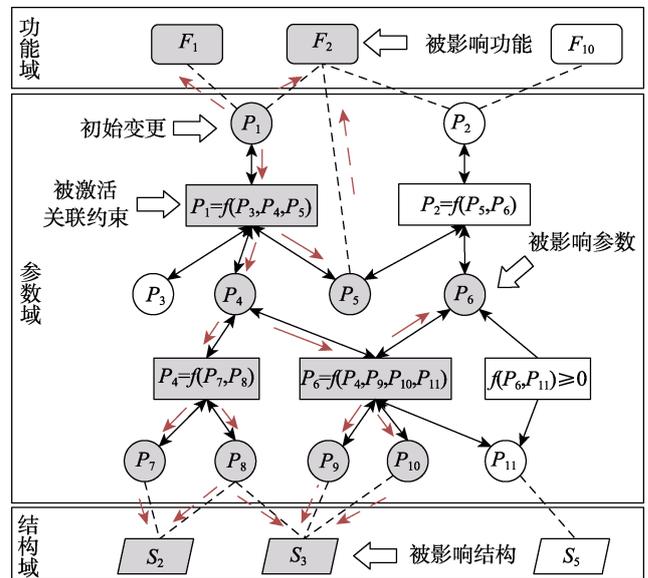


图4 关联约束网络的变更影响传播过程
Fig.4 Process for effect of change of association constraint network on spread

3 最低代价驱动的变更方案决策

3.1 变更代价计算

在产品参数关联约束网络模型中,代价是由变更

节点数量及节点间关联约束的复杂性决定的。为了将变更节点数量控制在尽可能小的范围内,需将某些容易造成影响传播扩散的节点定义为高代价参数。此外,公理化设计中的独立性公理决定了产品模块功能需求的独立性与结构的可配置性,当变更影响由一个模块传播至其他模块时,往往会造成产品的额外修改代价。为此,本文提出了基于节点传播重要度指标和变更跨模块传播代价指标的变更代价综合计算方法。

3.1.1 节点变更代价计算

3.1.1.1 变更影响扩散特性量化指标:介数

在复杂网络研究领域,介数是衡量节点在网络中重要度的全局几何量。在参数网络中,介数大的节点是链接网络参数节点的重要“桥梁”,该节点发生变更,越容易发生变更影响的扩散,进而造成更多的参数修改,因此介数高的节点变更代价也高。在介数计算时,常值参数不予考虑。式中 N_{ij} 表示参数节点 v_j 和 v_i 之间的最短路径条数, $N_{ij}(i)$ 表示参数节点 v_j 和 v_i 之间的最短路径经过节点 v_i 的条数。参数节点 v_i 的介数 b_i 定义为:

$$b_i = \sum_{j \neq i} \left[\frac{N_{ij}(i)}{N_{ij}} \right] \quad (1)$$

3.1.1.2 变更影响吸收特性量化指标:设计裕量系数

参数的设计裕量是变更影响吸收能力的重要特性,参数的设计裕量越大,参数可调节的范围越广。提出设计裕量系数 t_i 来评估变更影响传播过程中参数吸收影响的能力,设计裕量系数越高表明参数吸收变更影响的能力越强,参数的变更代价也就越低。式中 $P_value_{max} - P_value_{min}$ 表示参数设计裕量(如尺寸公差、性能裕量等), $P_value_{routine}$ 则为常规参数值,则参数的设计裕量系数 t_i 定义为:

$$t_i = \frac{P_value_{max} - P_value_{min}}{P_value_{routine}} \quad (2)$$

3.1.1.3 节点综合代价计算方法

参数节点的介数越大说明参数在变更影响传播中越关键,节点变更影响传播扩散能力越强,节点变更的代价更高;反之,节点的设计裕量系数越大说明轻微的变更影响不会影响参数,节点变更影响吸收能力越强,节点变更的代价更低。由于 t_i 的计算可能会出现大于1的值,同时为了消除介数以及裕量系数的量纲差异,均对其进行归一化处理:

$$B_i = \frac{b_i - \min}{\max - \min} \quad (3)$$

$$T_i = \frac{t_i - \min}{\max - \min} \quad (4)$$

节点综合代价 I_i 的计算方法如下,其中 $\omega_1 + \omega_2 = 1$, 参数节点的变更影响扩散特性和吸收特性均是计算参数节点代价的重要特性,施加重权时无明显的倾向性,可取 $\omega_1 = 0.5$, $\omega_2 = 0.5$:

$$I_i = \omega_1 B_i + \omega_2 (1 - T_i) \quad (5)$$

3.1.2 连边变更代价计算

参数网络中的边代价主要用于量化参数节点间的跨模块传播特性。变更影响的跨模块传播可分为跨结构模块传播与跨功能模块传播。影响一旦传播至其他功能模块,可能会影响产品其他功能的正常使用,需要设计团队进行功能再设计;影响传播至其他结构模块时,则会花费额外的零部件加工制造成本。可用跨模块惩罚系数 M_{ij} 量化这种跨模块影响传播产生的代价,由跨结构模块惩罚系数 M_{ij}^S 和跨功能模块惩罚系数 M_{ij}^F 相加进行计算:

$$M_{ij} = M_{ij}^S + M_{ij}^F \quad (6)$$

当变更产品具有功能模块化程度高、零部件自制率低等特点时,变更跨域传播的代价高;当产品复杂性低、零部件自制率高时,跨模块传播的代价则相对低。可由相关行业专家依据变更产品特性来确定跨模块惩罚系数 M_{ij} 的值。

若参数变更方案中变更参数节点数量为 n ,以指标介数 B_i 、裕量系数 T_i 和跨模块惩罚系数 M_{ij} 为基础,引入参数变更方案代价 $C_{总}$ 的计算方法:

$$C_{总} = \sum_{i \in [1, n]} I_i + \sum_{i, j \in [1, n]; i \neq j} M_{ij} = \sum_{i \in [1, n]} [\omega_1 B_i + \omega_2 (1 - T_i)] + \sum_{i, j \in [1, n]; i \neq j} (M_{ij}^S + M_{ij}^F) \quad (7)$$

3.2 变更方案的决策方法

方案决策的首要目标是筛选出满足变更要求的最小代价的变更要素集。在产品参数网络模型中,该要素集是一个含多分支的子网络模型结构。为生成多分支的网络结构模型,提出参数网络的分层树状模型生成方法。该方法包含的步骤如下:

- 1) 根据变更影响范围确定方法,确定被影响的参数集,以及被激活的关联约束集。
- 2) 确定初始变更参数为 P_0 , 并存入 $\{DP_0\}$ 。
- 3) 搜索与初始变更参数 P_0 相关的被激活的关联约束节点 R_j 存入 $\{DR_1\}$ 。
- 4) 搜索 $\{DR_1\}$ 中与关联约束节点 R_j 相关的设计参数节点 P_i 存入 $\{DP_1\}$ 。
- 5) 根据 $\{DP_0\}$ 、 $\{DR_1\}$ 、 $\{DP_1\}$ 中的参数节点以及关联约束节点构建分支。
- 6) 若某一分支中出现相同的参数则删除该分支。
- 7) 搜索与 $\{DP_1\}$ 中参数 P_i 相关的被激活的关联约束节点 R_j 存入 $\{DR_2\}$ 。
- 8) 搜索 $\{DR_2\}$ 中与关联约束节点 R_j 相关的设计参数节点 P_i 存入 $\{DP_2\}$ 。
- 9) 根据 $\{DP_0\}$ 、 $\{DR_1\}$ 、 $\{DP_1\}$ 、 $\{DR_2\}$ 、 $\{DP_2\}$ 中的参数节点以及关联约束节点构建分支结构。
- 10) 重复上述步骤,直至末层 $\{DP\}$ 中的参数无相关的被激活关联约束。

通过上述步骤生成如图5所示的分层树状结构,其中 DP_0 是初始变更参数层, DR_x 是第 x 层变更关联关系, DP_x 是第 x 层变更参数。

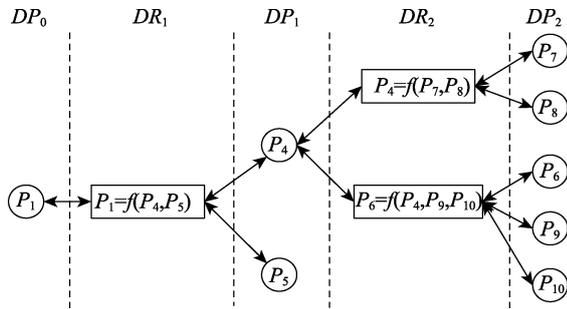


图5 变更方案的可行分支
Fig.5 Possible branches of the change scheme

以图5的层次树状模型为例,总结参数变更方案的决策基本流程:

- 1) 对最外层参数集 $\{DP_2\}$ 中的参数进行分组,将属于同一关联的参数 $P_7、P_8$ 分为一组, $P_6、P_9、P_{10}$ 分为一组。
- 2) 搜索 $\{DP_1\}$ 与 $\{DP_2\}$ 中相关的参数 P_4 ,确定 P_4 与其他参数间的跨域惩罚系数值: $M_{4,7}、M_{4,8}、M_{4,6}、M_{4,9}、M_{4,10}$ 。
- 3) 计算 $M_{4,7}+I_7$ 与 $M_{4,8}+I_8$ 的值,并比较大小;计算 $M_{4,6}+I_6$ 与 $M_{4,9}+I_9$ 与 $M_{4,10}+I_{10}$ 的值,并比较大小,选出同一组内代价最小的参数 P_7 和 P_9 作为变更参数。
- 4) 累加 $M_{4,7}+I_7、M_{4,9}+I_9$,将 P_4 的自身参数节点代价 I_4 赋值 C_{P4} 。
- 5) 对 $\{DP_1\}$ 中的参数进行分组,将属于同一关联的参数 $P_4、P_5$ 分为一组。
- 6) 搜索 $\{DP_0\}$ 与 $\{DP_1\}$ 中相关的参数,确定 $M_{1,4}$ 、

$M_{1,5}$ 的值。

7) 计算 $M_{1,4}+C_{P4}$ 与 $M_{1,5}+I_5$ 的值,并比较大小;选出组内代价最小的参数 P_4 。

8) 确定变更参数集 $\{P_4、P_7、P_9\}$ 。

基于上述步骤可生成图6的参数变更方案决策结果。

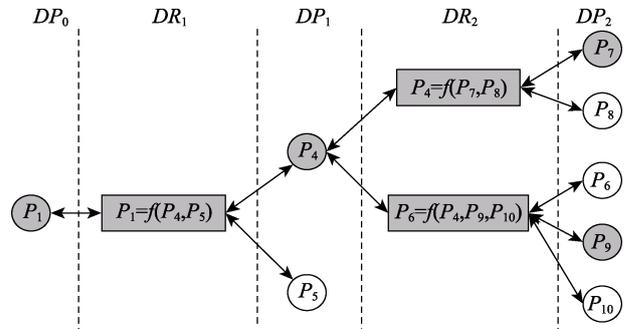


图6 变更方案决策结果
Fig.6 Decision-making results of change scheme

4 实例验证

土压平衡盾构机螺旋输送机是典型的复杂机械产品,在工作过程中往往因工作环境改变,需要对产品进行变更设计。例如,由于地质条件的改变,螺旋输送机的物料最大颗粒粒径、最大推进速度等设计参数会随之改变。设计师根据变更需求要对电机输出功率、螺旋轴转速等设计参数进行优化调整,对筒体、螺旋轴等零部件进行重构,此外某些设计参数的改变还可能会对产品排渣等功能产生一定的影响。以螺旋输送机产品的设计变更为例,验证本文提出的变更设计方案推荐方法,工程方案框架如图7所示。

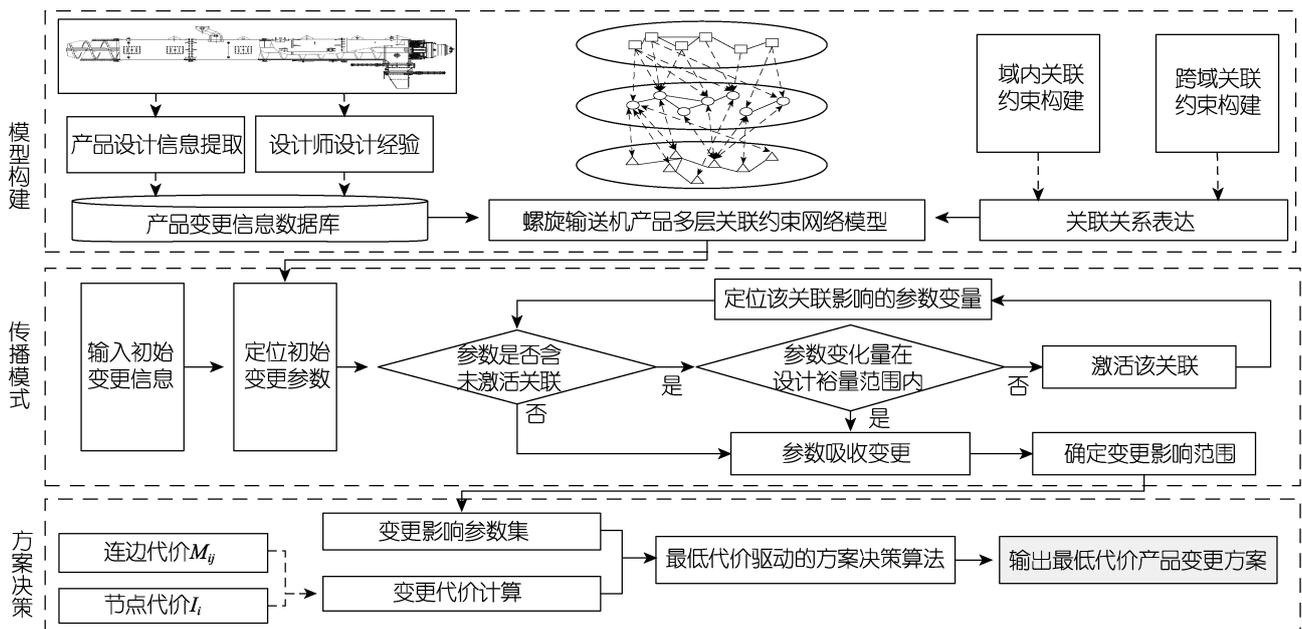


图7 螺旋输送机产品变更方案决策方法框架
Fig.7 Framework of decision-making method for product change scheme of screw conveyor

4.1 螺旋输送机多层关联约束网络模型构建

依据网络模型的数据获取方法, 通过对螺旋输送机功能设计说明书、参数设计说明书、BOM 表等数据资料中的数据进行提取, 共整理得到 38 个设计参

数, 22 个参数关联约束, 33 个跨域关联约束。设计相关的子功能、功能元 14 个, 产品零部件 20 个。根据前文提出的模型构建方法, 建立螺旋输送机产品多域设计信息关联约束网络模型, 如图 8 所示。模型中参数节点代表的参数见表 2。

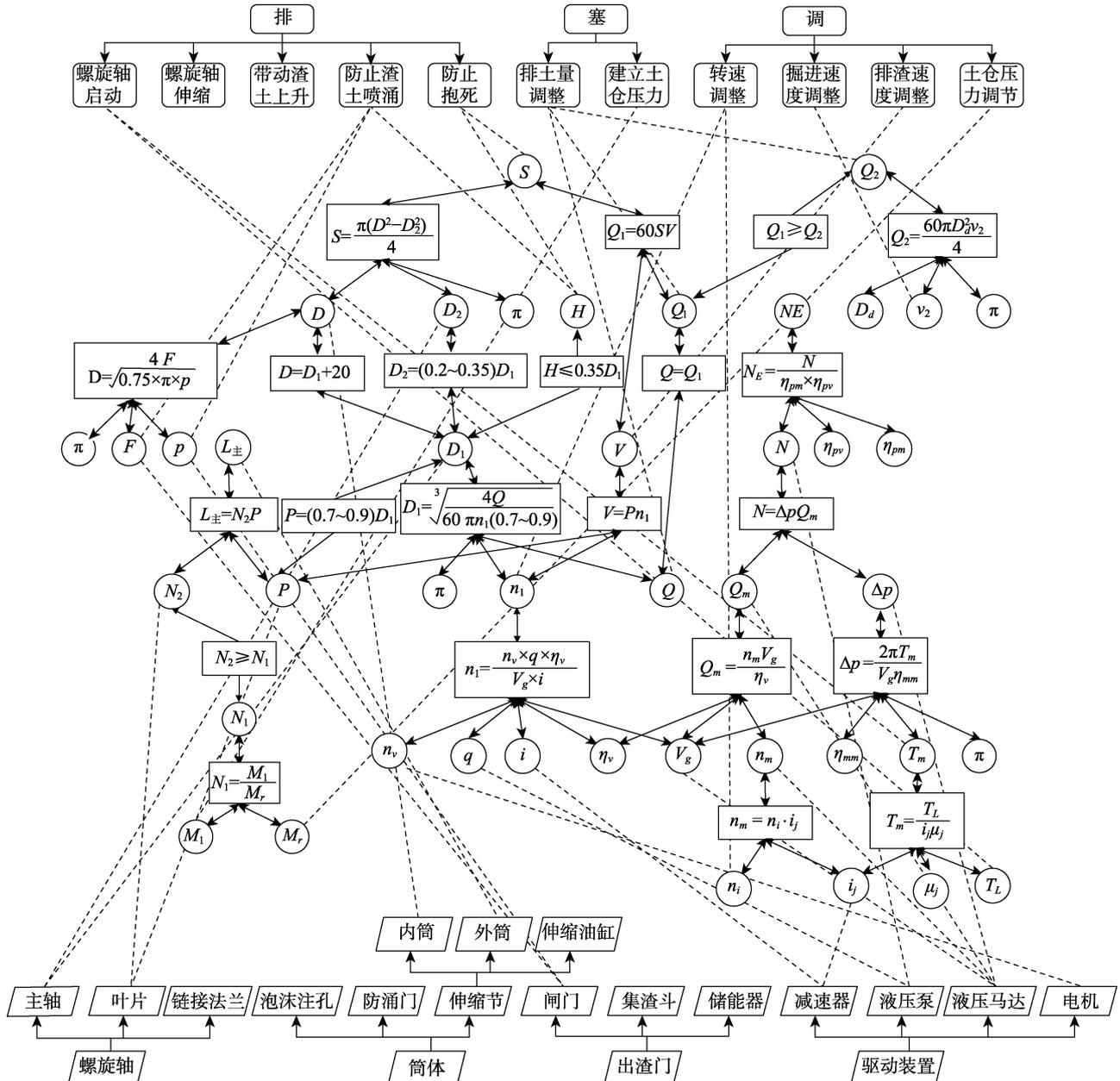


图 8 螺旋输送机多层关联约束网络模型
Fig.8 Multi-layer association constraint network model of screw conveyor

4.2 变更方案的决策

4.2.1 变更代价的计算

依据 4.1 节提出的方案变更代价计算方法计算螺旋输送机各参数节点的介数以及参数间的跨模块惩罚系数。通过对 3 位螺旋输送机产品设计专家的采访, 搜集专家对变更影响的跨结构模块与跨功能模

块传播代价的评估打分结果。由于企业的螺旋输送机产品部件大部分为采购件, 专家均认为产品变更应尽可能减少对结构模块的修改与替换。对专家的打分结果取均值, 最终将跨功能模块的惩罚系数设为 0.120, 跨结构模块惩罚系数设为 0.347。设计参数的介数值和参数间的跨域惩罚系数, 如表 3 和表 4 所示。

表2 参数节点
Tab.2 Parameter node

| 编号 | 参数名 | 节点 | 编号 | 参数名 | 节点 | 编号 | 参数名 | 节点 |
|----|------------|------------|----|--------------|-------------|----|-----------|-------------|
| 1 | 驱动轴直径 | D_1 | 14 | 螺旋输送机理论最大输送量 | Q_1 | 27 | 马达转速 | n_m |
| 2 | 最小节距个数 | N_1 | 15 | 筒体内径 | D | 28 | 马达容积效率 | η_v |
| 3 | 螺旋输送机主体长度 | L_{\pm} | 16 | 螺杆直径 | D_2 | 29 | 泵的机械效率 | η_{pm} |
| 4 | 马达进出口压差 | Δp | 17 | 螺旋节距 | P | 30 | 电机转速 | n_v |
| 5 | 马达实际所需最大流量 | Q_m | 18 | 开挖面压力 | M_1 | 31 | 液压泵排量 | q |
| 6 | 泵的实际输出功率 | N | 19 | 沿节距方向压力降 | M_r | 32 | 减速机减速比 | i |
| 7 | 电机输出功率 | N_E | 20 | 螺旋机转速 | n_i | 33 | 刀盘开挖直径 | D_d |
| 8 | 驱动轴转速 | n_1 | 21 | 螺旋机齿圈减速比 | i_j | 34 | 最大推进速度 | v_2 |
| 9 | 刀盘理论最大开挖量 | Q_2 | 22 | 螺旋机扭矩 | T_L | 35 | 闸门液压缸关闭力 | F |
| 10 | 物料截面积 | S | 23 | 齿轮的机械效率 | μ_j | 36 | 闸门液压缸工作压力 | p |
| 11 | 物料移动速度 | V | 24 | 马达最大输出转矩 | T_m | 37 | 盾体最大出渣能力 | Q |
| 12 | 最大颗粒粒径 | H | 25 | 马达的排量 | V_g | 38 | 泵的容积效率 | η_{pv} |
| 13 | 节距个数 | N_2 | 26 | 马达的机械效率 | η_{mm} | | | |

表3 参数节点代价
Tab.3 Parameter node cost

| 编号 | 节点 i | B_i | T_i | I_i | 编号 | 节点 i | B_i | T_i | I_i |
|----|------------|--------|-------|-------|----|-------------|-------|-------|-------|
| 1 | D_1 | 0.412 | 0.369 | 0.521 | 20 | n_i | 0 | 0.092 | 0.454 |
| 2 | N_1 | 0.202 | 0.124 | 0.539 | 21 | i_j | 0.023 | 0.147 | 0.438 |
| 3 | L_{\pm} | 0 | 0.452 | 0.274 | 22 | T_L | 0 | 1 | 0 |
| 4 | Δp | 0.151 | 0.282 | 0.435 | 23 | μ_j | 0 | 0.020 | 0.490 |
| 5 | Q_m | 0.227 | 0.021 | 0.603 | 24 | T_m | 0.217 | 1 | 0.109 |
| 6 | N | 0.294 | 0.387 | 0.453 | 25 | V_g | 0.676 | 0.282 | 0.697 |
| 7 | N_E | 0 | 0.932 | 0.034 | 26 | η_{mm} | 0 | 0.020 | 0.490 |
| 8 | n_1 | 1 | 0 | 1 | 27 | n_m | 0.152 | 0.092 | 0.530 |
| 9 | Q_2 | 0.202 | 0.968 | 0.117 | 28 | η_v | 0.210 | 0.021 | 0.595 |
| 10 | S | 0.0583 | 0.695 | 0.181 | 29 | η_{pm} | 0 | 0.020 | 0.490 |
| 11 | V | 0.251 | 0.092 | 0.579 | 30 | n_v | 0 | 0 | 0.5 |
| 12 | H | 0 | 0.695 | 0.152 | 31 | q | 0 | 0.977 | 0.011 |
| 13 | N_2 | 0.294 | 0.425 | 0.434 | 32 | i | 0 | 0.147 | 0.427 |
| 14 | Q_1 | 0.299 | 0.627 | 0.336 | 33 | D_d | 0 | 0.025 | 0.488 |
| 15 | D | 0.205 | 0.114 | 0.546 | 34 | v_2 | 0 | 0.124 | 0.438 |
| 16 | D_2 | 0.003 | 0.106 | 0.448 | 35 | F | 0 | 0.690 | 0.155 |
| 17 | P | 0.465 | 0.253 | 0.606 | 36 | p | 0 | 0.677 | 0.162 |
| 18 | M_1 | 0 | 0.147 | 0.427 | 37 | Q | 0.133 | 0.626 | 0.253 |
| 19 | M_r | 0 | 0.106 | 0.447 | 38 | η_{pv} | 0 | 0.021 | 0.490 |

表4 跨模块惩罚系数
Tab.4 Cross-module penalty coefficient

| 编号 | 边 | M_{ij} | 编号 | 边 | M_{ij} | 编号 | 边 | M_{ij} | 编号 | 边 | M_{ij} | 编号 | 边 | M_{ij} |
|----|--------|----------|----|--------|----------|----|---------|----------|----|---------|----------|----|---------|----------|
| 1 | (1,8) | 0.467 | 16 | (4,26) | 0 | 31 | (8,31) | 0.467 | 46 | (15,35) | 0.467 | 61 | (25,27) | 0 |
| 2 | (1,12) | 0.467 | 17 | (5,6) | 0 | 32 | (8,32) | 0.467 | 47 | (15,36) | 0.467 | 62 | (25,28) | 0 |
| 3 | (1,15) | 0.347 | 18 | (5,25) | 0 | 33 | (8,37) | 0.120 | 48 | (18,19) | 0.120 | 63 | (25,30) | 0 |
| 4 | (1,16) | 0 | 19 | (5,27) | 0 | 34 | (9,14) | 0 | 49 | (20,21) | 0.120 | 64 | (25,31) | 0 |
| 5 | (1,17) | 0 | 20 | (5,28) | 0 | 35 | (9,33) | 0.467 | 50 | (20,27) | 0 | 65 | (25,32) | 0 |
| 6 | (1,37) | 0.467 | 21 | (6,7) | 0 | 36 | (9,34) | 0.120 | 51 | (21,22) | 0.467 | 66 | (27,28) | 0 |
| 7 | (2,13) | 0 | 22 | (6,29) | 0 | 37 | (10,11) | 0.120 | 52 | (21,23) | 0 | 67 | (28,30) | 0 |
| 8 | (2,18) | 0.467 | 23 | (6,38) | 0 | 38 | (10,14) | 0.120 | 53 | (21,24) | 0.120 | 68 | (28,31) | 0 |
| 9 | (2,19) | 0.467 | 24 | (7,29) | 0 | 39 | (10,15) | 0.467 | 54 | (21,27) | 0.120 | 69 | (28,32) | 0 |
| 10 | (3,13) | 0.347 | 25 | (7,38) | 0 | 40 | (10,16) | 0.467 | 55 | (22,23) | 0 | 70 | (29,38) | 0 |
| 11 | (3,17) | 0.347 | 26 | (8,11) | 0.120 | 41 | (11,14) | 0.120 | 56 | (22,24) | 0.120 | 71 | (30,31) | 0 |
| 12 | (4,5) | 0 | 27 | (8,17) | 0.467 | 42 | (11,17) | 0.467 | 57 | (23,24) | 0 | 72 | (30,32) | 0 |
| 13 | (4,6) | 0 | 28 | (8,25) | 0.467 | 43 | (13,17) | 0 | 58 | (24,25) | 0.120 | 73 | (31,32) | 0 |
| 14 | (4,24) | 0 | 29 | (8,28) | 0 | 44 | (14,37) | 0 | 59 | (24,26) | 0 | 74 | (33,34) | 0.467 |
| 15 | (4,25) | 0 | 30 | (8,30) | 0.467 | 45 | (15,16) | 0.347 | 60 | (25,26) | 0 | 75 | (35,36) | 0 |

通过本文提出的最低代价决策方法,求得最优的修改方案,如图10所示。

由于物料最大颗粒粒径 H 的改变,设计方案要求设计师对驱动轴直径 D_1 、螺杆直径 D_2 、筒体内径 D 、螺旋节距 P 、螺旋输送机主体长度 L_{\pm} 、闸门液压缸关闭力 F , 6 个产品结构参数进行适应性调整。同

时,螺旋输送机理论最大输送量 Q_1 、刀盘理论最大开挖量 Q_2 、盾体最大出渣能力 Q 、最大推进速度 v_2 、物料截面积 S 、物料移动速度 V , 6 个性能参数受影响。该参数设计变更方案需要调整的结构包括主轴、叶片、内筒、外筒、闸门;同时该方案还会影响排土量调整、排渣速度调整、防止螺旋输送机抱死、掘进速度调整。

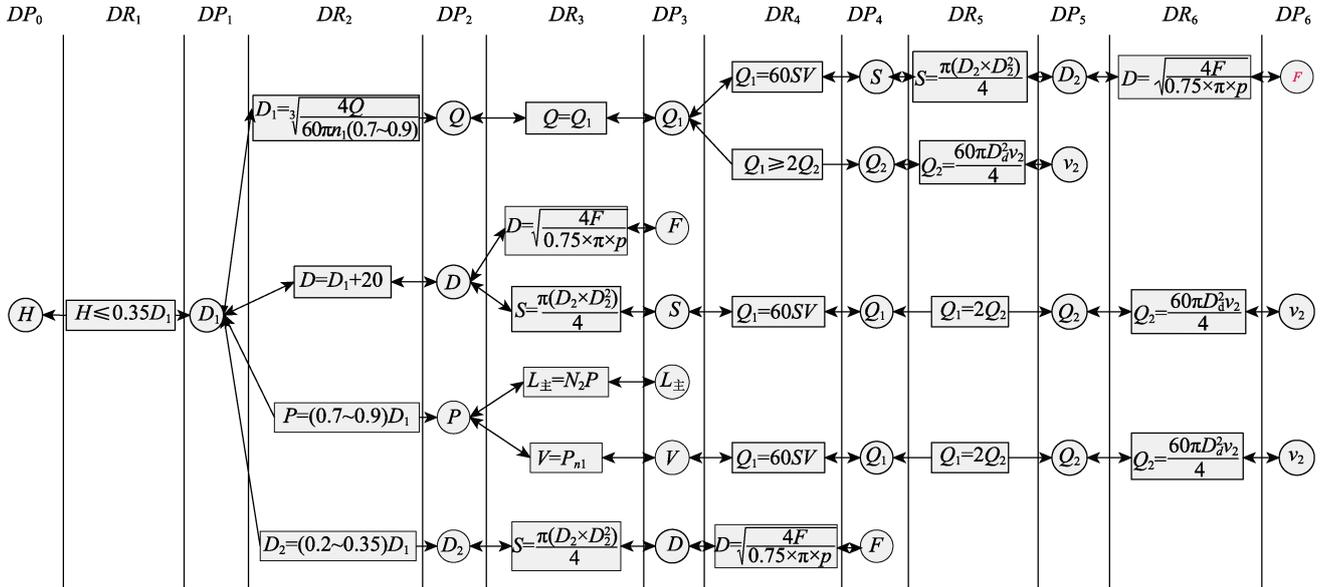


图10 方案决策结果

Fig.10 Decision-making results of scheme

通过实例验证可以发现,在参数无设计裕量和条件关联约束的情况下,变更一旦发生,变更方案中甚至包含 DP_6 ,即变更影响甚至会传播至第六层设计参数,违背了一般设计变更影响传播的五步原则,导致变更发生“雪崩”传播^[2],这也证明了设计师针对关键设计参数设置裕量,对有效阻止设计变更传播具有重要意义。在变更“雪崩”传播的情况下,该决策方法有效规避了马达容积效率 η_v 、螺旋节距 P 、驱动轴转速 n_1 、马达排量 V_g 等高代价、高风险的设计参数,同时,将影响的参数范围缩小至 12 个。经分析,若变更在参数网络内随机传播,最多会影响 29 个设计参数,该方法将影响的参数范围缩减了 58.6%。同时,被激活的关联约束有 12 个,相比于随机变更,被激活的关联约束也缩减了 45.5%,并有效避开了产品螺旋输送机驱动结构模块,排渣功能模块等关键功能模块,影响的功能模块和结构模块也仅有 9 个,对企业设计变更成本的降低具有重要意义。

5 结语

针对产品变更设计缺乏全面关联的变更分析模型,变更方案决策方法脱离产品实际变更影响传播和变更设计原则的问题,本文主要的贡献如下:

1) 本文总结了现有的变更设计建模方法,构建了产品功能域、参数域和结构域多域关联的多层关联

约束网络模型,该模型可以保证产品设计信息的完整性和信息更改的一致性,同时解决了因变更模型结构单一、信息模糊导致的变更影响分析不全面和变更方案指导性不足的问题。

2) 本文定义了基于多层关联约束网络模型的变更传播模式以及参数域变更代价计算方法,进而提出最低代价驱动的变更方案决策方法。该决策方法可以有效减小变更影响的参数范围,将变更影响控制在较少的功能模块、结构模块内,降低了变更设计成本。同时方案决策结果包含全面的修改要素集,可以有效提高设计效率,同时可以辅助设计人员评估产品的变更风险。

此外,本文构建的网络模型还是一种设计冲突的有效识别方法,当网络模型中的参数间出现闭环时,为满足关联约束,该类参数间往往存在变化量和变化趋势的冲突,在产品设计之初应尽可能避免。同时该决策方法可以解决产品多种变更需求下的方案推荐问题,改善了参数配置方法仅能面向部分客户需求的弊端。

本文在变更影响传播的相关研究中,仅能通过变更参数判断受影响的功能和结构单元,对功能和结构影响度的量化分析极度依赖设计师的经验。此外,参数变更的冲突消解原则问题,基于关联约束的参数值的自动化计算问题,以及面向不同产品的工程应用问题需要在未来的研究中加以补充。

参考文献:

- [1] 谢友柏. 设计科学与设计竞争力[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 9-15.
XIE You-bo. Design Science and Design Competitiveness[M]. Beijing: Science Press, 2017: 9-15.
- [2] ECKERT C, ZANKER W. Change and Customisation in Complex Engineering Domains[J]. Research in Engineering Design, 2004, 15(1): 1-21.
- [3] CLAUDIA M, Eckert, . Supporting Change Processes in Design: Complexity, Prediction and Reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2006, 91(12): 1521-1534.
- [4] 唐敦兵, 钱晓明, 王晓勇, 等. 基于公理化设计矩阵与设计结构矩阵同步演化的产品设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(4): 541-544.
TANG Dun-bing, QIAN Xiao-ming, WANG Xiao-yong, et al. Product Design Based on the Co-Evolution of Axiomatic Design Matrix and Design Structure Matrix[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(4): 541-544.
- [5] ZHANG Na, YANG Yu, ZHENG Yu-jie, et al. Module Partition of Complex Mechanical Products Based on Weighted Complex Networks[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(4): 1973-1998.
- [6] KOH E C Y, CALDWELL N H M. A Method to Assess the Effects of Engineering Change Propagation[J]. Research in Engineering Design, 2012, 23(4): 329-351.
- [7] PASQUAL M C, DE WECK O L. Multilayer Network Model for Analysis and Management of Change Propagation[J]. Research in Engineering Design, 2012, 23(4): 305-328.
- [8] XIE Ya-nan, MA Yong-sheng. Well-Controlled Engineering Change Propagation via a Dynamic Inter-Feature Association Map[J]. Research in Engineering Design, 2016, 27(4): 311-329.
- [9] 郭于明. 产品开发网络中的设计变更传播风险预测[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(10): 2547-2558.
GUO Yu-ming. Predication of Design Change Propagation Risk in Product Development Network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(10): 2547-2558.
- [10] CHENG Hui, CHU Xue-ning. A Network-Based Assessment Approach for Change Impacts on Complex Product[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(4): 1419-1431.
- [11] 郑玉洁, 杨育, 张娜, 等. 复杂产品工程变更传播路径动态优化[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(2): 474-483.
ZHENG Yu-jie, YANG Yu, ZHANG Na, et al. Dynamic Majorization Scheme for Engineering Change Propagation Paths in Complex Product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(2): 474-483.
- [12] 米晶晶, 成思源, 杨雪荣, 等. 基于功能变更的专利产品创新再设计[J]. 包装工程, 2016, 37(20): 146-150.
MI Jing-jing, CHENG Si-yuan, YANG Xue-rong, et al. Patent Product Innovation re-Design Based on Function Alteration[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(20): 146-150.
- [13] CLARKSON P J, SIMONS C, ECKERT C. Predicting Change Propagation in Complex Design[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(5): 788-797.
- [14] 郭于明, 王坚. 复杂产品开发网络中变型设计节点方案评价[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(2): 320-328.
GUO Yu-ming, WANG Jian. Variant Design Nodes Schemes Evaluation in Complex Product Development Network[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(2): 320-328.
- [15] HAMRAZ B, CALDWELL N H M, JOHN CLARKSON P. A Multidomain Engineering Change Propagation Model to Support Uncertainty Reduction and Risk Management in Design[J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(10): 1.
- [16] 刘晓健, 张树有, 张建新, 等. 产品设计更改在弱连接结构上的传播[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(6): 1041-1047.
LIU Xiao-jian, ZHANG Shu-you, ZHANG Jian-xin, et al. Product Design Change Propagation on Weak-Tie Structures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(6): 1041-1047.
- [17] LI R, YANG N, ZHANG Y, et al. Risk Propagation and Mitigation of Design Change for Complex Product Development (CPD) Projects Based on Multilayer Network Theory[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 142: 106370.
- [18] 褚学宁, 陈汉斯, 马红占. 性能数据驱动的机械产品关键设计参数识别方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 185-196.
CHU Xue-ning, CHEN Han-si, MA Hong-zhan. Identification of Critical Design Parameter for Mechanical Products Based on Performance Data[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 185-196.
- [19] 李玉鹏, 王潇纯, 李小林. 基于BBV网络模型的复杂产品设计变更影响评估[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(7): 1429-1438.
LI Yu-peng, WANG Xiao-chun, LI Xiao-lin. Design Change Impact Assessment for Complex Product Based on Complex Networks Propagation Dynamics[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(7): 1429-1438.
- [20] YANG Fan, DUAN Gui-jiang. Developing a Parameter Linkage-Based Method for Searching Change Propagation Paths[J]. Research in Engineering Design, 2012, 23(4): 353-372.
- [21] MA Song-hua, JIANG Zhao-liang, LIU Wen-ping, et al. Design Property Network-Based Change Propagation Prediction Approach for Mechanical Product Development[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 676-688.
- [22] 孙志礼, 姬广振, 闫玉涛. 机械产品参数化设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 35-39.
SUN Zhi-li, JI Guang-zhen, YAN Yu-tao. Parametric Design Technology of Mechanical Products[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 35-39.