机械产品的多源适应性更改影响力零部件识别

程贤福[1,2] 钟龙飞[1,2] 肖人彬[3*] 袁 甜[1,2]
1.华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室,南昌,330013
2.华东交通大学机电与车辆工程学院,南昌,330013
3.华中科技大学人工智能与自动化学院,武汉,430074

摘要:针对机械产品的适应性更改,提出多源适应性更改影响力零部件识别方法。根据零部件间的更改传播影响关系,构建产品适应性更改传播网络,识别多源更改的耦合节点和耦合路径。基于向量余弦分析耦合节点受不同更改源影响时属性变化的相关性,计算多源更改时耦合路径的上游节点对下游节点的直接传播影响强度。考虑多源更改传播路径的耦合作用,调整传播强度以量化节点的影响力。以某型号汽车尾板装置为例验证了所提方法的可行性和合理性。

关键词:多源适应性更改;影响力节点;更改传播;传播路径耦合;产品设计
中图分类号:TH122
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.024 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Identification of Influential Parts in Mechanical Products with Multi-source Adaptive Changes

CHENG Xianfu[1,2] ZHONG Longfei[1,2] XIAO Renbin[3*] YUAN Tian[1,2]
1.State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013
2.School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, 330013
3.School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

Abstract: To address the adaptive modification of mechanical products, this paper proposes a method for identifying influential parts under multi-source adaptive changes. Based on change propagation relationships among parts, a product change propagation network is constructed to identify coupled nodes and paths in multi-source change propagation. Vector cosine analysis is applied to calculate the relevance of attribute changes in parts affected by different change sources, and the direct propagation strength of coupled paths from front-end to back-end nodes is computed. Considering the coupling effects among propagation paths, the influence of nodes is quantified by change propagation intensity. The feasibility and validity of the proposed method are demonstrated through a case study on a truck hydraulic tailgate device.

Key words: multi-source adaptive change; influential nodes; change propagation; propagation path coupling; product design

0 引言

随着市场竞争的日益激烈、制造业的发展以及用户消费理念的不断变化,用户对产品功能的要求日趋个性化和多样化[1-3]。用户需求是产品个性化设计的驱动力。适应性更改是为响应用户个性化需求而对产品进行可适应设计的过程,目的在于通过产品结构的调整满足用户需求[4-5]。可适应设计方法在产品设计与开发过程中为处理用户的个性化需求变更提供理论支撑框架[6]。机械产品由许多零部件装配而成,它们存在功能和结构的关联,一个零部件的更改可能会导致其他零部件变更,多个零部件同时作为更改发起者时,引发的变更传播过程更加复杂,给更改风险的管理带来更大挑战[7-8]。识别更改传播路径上的影响力零部件是有效控制适应性更改的前提,设计者在产品设计过程中通过减少影响力零部件的变更来降低适应性更改的成本和影响是非常重要的[9-10]。

目前,研究者对设计变更传播强度的量化评

收稿日期:2025-11-18
基金项目:国家自然科学基金(52265031,52275249);江西省自然科学基金(20242BAB26068);山区土木工程安全与韧性全国重点实验室自主课题(SQQZ2025217)

估研究做了较多的工作。甘屹等[11]通过构建基于产品特性关联和设计变更传播的向量空间重构模型，以节点的度、传播概率和设计余量来评估节点间的变更传播强度。詹敏等[12]基于可拓基元理论构建产品参数基元网络模型，采用敏度、设计裕度和成本系数来评估节点变更代价。王佳伟等[13]综合考虑更改传播概率、组件重要性和时间成本，分析了组件间的变更传播强度。GUO[14]为控制设计变更的传播，提出了一种基于介数、节点集重要性和网络聚类系数的节点重要性评估方法。CHENG等[15]以所有可能的变更传播路径的关联度之和来评判模块之间的变更影响程度。REN等[16]提出一种由零部件网络、生产网络和供应网络映射的多域网络模型，并利用变更传播概率、节点关键度、变更成本和变更时间等指标来量化多域网络协同设计中的变更传播强度。多源设计变更传播过程更加复杂，会出现路径耦合，影响产品适应性设计过程。为优化多源设计变更传播路径，李玉鹏等[7]基于加权网络模型节点的出度和入度，结合设计任务执行时间、零部件连接重要度与变更传播概率等指标来评估节点间的变更传播强度。MA等[17]构建了基于设计属性网络的设计变更分析模型，采用传播概率、节点度、长链链接和设计余量来量化变更传播强度。REN等[18]针对多源设计变更，构建了多视图复杂网络模型，以节点出入度、介数、聚合系数和变更传播概率来评估节点间的变更传播强度。

当前的产品设计变更传播强度评估指标大多基于复杂网络模型的统计特征，忽略了参数本身的重要性[12]，且多源更改传播路径的耦合影响较少涉及。此外，节点或零部件之间的变更传播强度主要表征产品网络节点对传播强度的局部属性，难以体现节点或零部件在整个产品中的全局属性。因此，本文针对多源适应性更改传播问题，考虑传播路径耦合与零部件设计变更的复杂性，提出影响力零部件的识别方法。通过量化评估零部件的影响力，企业能优化开发资源配置，在提升设计效率的同时有效降低适应性更改成本。

1　多源适应性更改传播耦合路径分析

实际的产品适应性更改过程中，几个零部件同时发起的更改称为多源适应性更改（简称多源更改）。与单源更改相比，多源更改的传播路径和传播范围会发生变化，容易出现传播路径耦合，影响产品设计的周期和成本。耦合路径是指源自不同初始更改源的多条独立传播路径在同一耦合节点交汇耦合后形成的重叠子路径。耦合路径不但对适应性更改传播网络具有显著影响，而且对节点影响力的评估产生额外作用，还增大了网络的复杂性和更改风险，以及更改冲突的发生概率。多源更改中，不同初始更改源的传播影响通过耦合路径同时作用于某节点时，该节点接收的更改信息会变得复杂。通过分析耦合路径，可更好地评估适应性更改的风险、预测更改的影响范围，从而有针对性地进行设计优化和改进，提高产品设计的适应性。

不同更改源的传播路径是不同的，影响的节点也不尽相同，不同更改源的传播路径与受影响节点构成的更改传播网络与不同更改源下的单源更改传播网络也不一样。适应性更改传播路径图（图1）中，○代表节点，○中的数字为节点序号，节点间的箭线表示零部件的依赖关系，○→○表示前一个节点的更改会向后一个节点传播，箭线上的数值为变更传播概率。图1中的节点v_1、v_6同时为更改源时，路径上的总节点数为7，v_3、v_4、v_5和v_7受v_1、v_6的交叉影响。v_1作为单独更改源时，直接影响v_2和v_4，间接影响v_3、v_5和v_7，变更传播路径上共有6个节点。v_6作为单独更改源时，直接影响v_5和v_7，间接影响v_3和v_4，变更传播路径上共有5个节点。

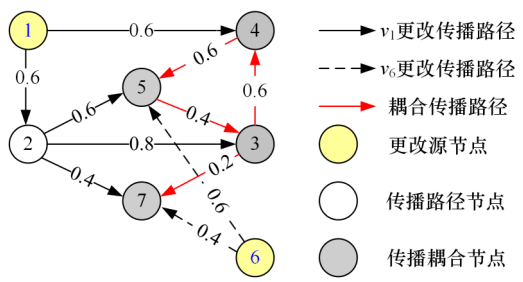


图1　多源适应性更改传播路径图

Fig.1　Multi-source adaptive modification of the propagation path diagram

分析多源适应性更改传播的耦合路径时，首先，根据产品零部件间的依赖关系，确定每个更改源传播影响的节点，其中，同时受不同更改源传播影响的节点称为耦合节点。假设节点A、B同时为更改源，则耦合节点集合$V_{A\times B}=V_A\cap V_B$，其中，$V_A$、$V_B$分别为节点A和B为单独更改源时传播影响的节点集合。耦合节点之间的直接传播路径称为耦合路径。路径耦合现象是指承载不同初始变更影响的多个独立传播路径在传播过程中汇于同一耦合节点并发生合并的现象。若耦合节点v_i的变更传播影响直接传播到耦合节点v_j（v_i，$v_j\in V_{A\times B}$），则耦合路径可表示为$\mathrm{Path}(A\oplus B)_{vi\to vj}$。

然后，根据更改源的变更和传播属性确定多源适应性更改传播路径上各节点对应零部件的更改属性，判断耦合节点对应零部件更改属性变化的相关性。节点A与节点B分别为更改源时，若$\mathrm{Path(A\oplus B)}_{vi\to vj}$上节点$v_j$的属性变化没有关联性，则认为耦合路径$\mathrm{Path(A\oplus B)}_{vi\to vj}$中的两条直接传播路径$\mathrm{Path(A)}_{vi\to vj}$和$\mathrm{Path(B)}_{vi\to vj}$不相关，记为$R(\mathrm{A\oplus B})_{i,j}=0$。节点A、B同时为更改源时，若$\mathrm{Path(A\oplus B)}_{vi\to vj}$的节点$v_j$对不同更改源传播影响引发的设计更改属于同一属性且变化方向相同，则认为耦合路径$\mathrm{Path(A\oplus B)}_{vi\to vj}$中的$\mathrm{Path(A)}_{vi\to vj}$和$\mathrm{Path(B)}_{vi\to vj}$完全正相关，记$R(\mathrm{A\oplus B})_{i,j}=1$。节点A、B同时为更改源时，若$\mathrm{Path(A\oplus B)}_{vi\to vj}$上节点$v_j$所受的传播影响是属性相同但变化趋势相反，则认为耦合路径$\mathrm{Path(A\oplus B)}_{vi\to vj}$中的$\mathrm{Path(A)}_{vi\to vj}$和$\mathrm{Path(B)}_{vi\to vj}$完全负相关，记$R(\mathrm{A\oplus B})_{i,j}=-1$。

不同更改源传播影响下，耦合节点对应零部件的属性变化不是完全负相关、不相关或完全正相关时，需计算始于不同初始更改源的耦合传播路径相关性。零部件更改属性的变化主要考虑“属性”。由向量空间理论可知，两向量在空间中的方向关系仅由其夹角决定，因此可将节点对应零部件的属性变化视为向量，利用向量余弦衡量两个向量的相关性。该计算结果仅受“属性”向量夹角的影响，如图2所示，节点A、B分别为更改源时，耦合路径$\mathrm{Path(A\oplus B)}_{vi\to vj}$上节点$v_j$所受传播影响的更改属性变化（向量）分别为$\boldsymbol{X}$和$\boldsymbol{Y}$，则节点$v_j$的属性变化相关性为

$$R(\mathrm{A\oplus B})_{i,j}=\cos\theta=\frac{\boldsymbol{X}\cdot\boldsymbol{Y}}{|\boldsymbol{X}||\boldsymbol{Y}|} \tag{1}$$

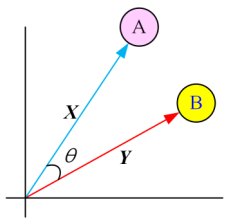


图2 属性变化相关性向量余弦

Fig.2 Vector cosine of attribute change correlation

采用余弦衡量两个不同更改源引起的耦合节点对应零部件属性变化相关性时，相关性计算结果在[−1,1]内。余弦为1表示两个向量共线且方向相同，即更改属性相同且变化趋势一致；余弦为0表示两个向量正交，即更改属性变化没有相关性；余弦为−1表示两个向量共线且方向相反，即更改属性相同且变化趋势相反。图3所示为多源更改节点属性变化不相关、完全正相关性和完全负相关性的向量余弦。

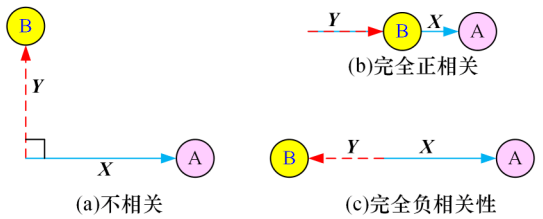


图3 多源更改节点属性变化的相关性

Fig.3 The correlation of attribute changes in multi-source change nodes

2 多源适应性更改影响力节点的识别

产品设计过程中，影响力零部件的设计变更或失效所引发的级联效应会将变更影响并沿设计依赖关系扩散至其他关联零部件，极易造成更改范围的失控扩张，甚至产生“雪崩效应”，导致产品设计难度大幅增加[19]。影响力节点是在复杂网络中占有重要地位、更改传播范围影响更大的节点[20]。目前的研究主要从网络的全局影响属性来分析定义影响力节点。产品设计活动构建的网络除考虑节点的全局影响属性，还需考虑节点的局部影响属性，且后者更具实际意义。产品设计过程中，更改源的差异导致更改传播方式与传播路径相同，进而使节点的局部影响力存在区别。节点影响力一般可由节点的变更传播强度（change propagation intensity，CPI）量化[7,18]，进而实现对节点适应性更改传播影响力的综合评估。影响力节点即变更传播网络中影响力较大的节点，其属性更改会导致网络的拓扑结构、传播范围和稳健性发生显著变化。

变更发起节点后，下游节点都可能会受到影响。如图4所示，发起节点v_a变更后，下游节点v_b是直接影响节点，下游节点v_c、v_d、v_e、v_f是间接影响节点。对于某个更改源，以度数、传播指数、连通指数、K核值来评估节点的变更传播强度是不合理的，因为这些评估指标主要着眼于复杂网络的全局属性，与具体的更改源关联不紧密。图4中，

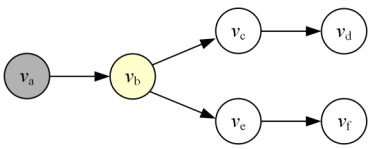


图4 单源适应性更改传播影响

Fig.4 The propagation impact of single-source adaptive changes

v_c、v_d、v_e、v_f受v_b影响，若v_a的变更传播影响能被v_b完全吸收，则v_c、v_d、v_e、v_f与v_a无关。因此，在其他条件（传播概率、结构重要性等）相同情况下，可认为v_b是具有更大影响力的节点，比其他节点的变

更传播影响力更大。

为分析多源适应性更改传播节点/零部件的影响力，以适应性更改传播影响强度（变更传播强度）来衡量节点变更传播的影响程度。变更传播强度与节点的扩散度、更改传播概率、路径耦合相关性和零部件结构设计复杂度指数有关。单源更改的节点变更传播强度计算方法已有研究，本文在文献[11，21-23]方法的基础上，按层计算任意一个节点的变更传播强度：更改传播网络第一层计算初始节点的直接传播影响强度，第二层的计算初始节点通过一个中间节点的间接传播影响强度，以此类推计算。其中，最长传播路径的节点数不大于传播网络的总节点数N，即传播影响的层次计算最多进行$N-1$层。传播路径越长，传播到路径末端节点的强度越弱。传播路径上相邻节点之间的传播概率满足$0<p<1$，多级传播后的累积概率迅速减小，因此，节点v_i对末端节点的变更传播影响很小，根据上述讨论，在分析适应性更改传播时取前3层即可，则单源更改时节点的变更传播强度I_{vi}为

$$I_{vi}=\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}}p_{ij}S_j+\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}}\sum_{k=1,k\neq i,k\neq j}^{N_{2vj}}p_{ij}p_{jk}S_k+\sum_{j=1,j\neq k}^{N_{1vi}}\sum_{k=1,k\neq i,k\neq j}^{N_{2vj}}\sum_{l=1,l\neq i,l\neq j,l\neq k}^{N_{3vk}}p_{ij}p_{jk}p_{kl}S_l \tag{2}$$

$$S_j=\frac{S_{Cj}}{S_{C\max}} \tag{3}$$

$$S_{Cj}=\ln\frac{C_{vj}}{C_{\mathrm{P}}-C_{vj}}+\ln\frac{t_{vj}}{t_{\mathrm{P}}-t_{vj}} \tag{4}$$

式中：N_{1vi}、N_{2vj}、N_{3vk}分别为节点v_i、v_j、v_k的扩散度，即v_i、v_j、v_k的直接影响节点数；$p_{i,j}$为节点v_i对v_j的变更传播概率；S_j为节点v_j对应零部件的适应性更改复杂度指数；$S_{C\max}$为所有零部件的适应性更改复杂度的最大值；C_{vj}为某个节点为单独更改源时节点v_j对应零部件的更改成本；C_{P}为产品的更改成本之和；t_{vj}为节点v_j对应零部件的更改时间；t_{P}为产品的更改时间之和。

耦合节点对应零部件的更改属性变化相关性确定后，即可在单源变更的节点变更传播强度的基础上计算该节点的多源适应性变更传播影响强度。首先，计算节点A和节点B作为更改源的直接传播影响强度$I(\mathrm{A})_{vi,j}$和$I(\mathrm{B})_{vi,j}$，然后计算更改源不同时耦合路径$\mathrm{Path}(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi\to vj}$的上游节点$v_i$对下游节点$v_j$的直接传播影响强度。单源更改时的直接传播影响强度为

$$I(U)_{vi,j}=p_{i,j}S(U)_{Sj} \tag{5}$$

式中：$S(U)_{Sj}$为节点U作为更改源时节点v_j对应零部件的适应性更改复杂度指数，$U=\mathrm{A},\mathrm{B}$。

节点A和B同时作为更改源的直接传播影响强度为

$$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi,j}=\begin{cases}I(\mathrm{A})_{vi,j}+I(\mathrm{B})_{vi,j} & R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j}=0\\ \max\{I(\mathrm{A})_{vi,j},I(\mathrm{B})_{vi,j}\} & R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j}=1\\ |I(\mathrm{A})_{vi,j}-I(\mathrm{B})_{vi,j}| & R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j}=-1\end{cases} \tag{6}$$

$R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j}\neq-1,0,1$意味着$\mathrm{Path}(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi\to vj}$具有部分相关性，此时节点$v_i$对$v_j$的直接传播影响强度应该分段计算。

$0<R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j}<1$时，

$$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi,j}=\begin{cases}I(\mathrm{A})_{vi,j}+(1-R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j})I(\mathrm{B})_{vi,j} & I(\mathrm{A})_{vi,j}>I(\mathrm{B})_{vi,j}\\ (1-R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j})I(\mathrm{A})_{vi,j}+I(\mathrm{B})_{vi,j} & I(\mathrm{A})_{vi,j}\leqslant I(\mathrm{B})_{vi,j}\end{cases} \tag{7}$$

$-1<R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j}<0$时，

$$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi,j}=-R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j}|I(\mathrm{A})_{vi,j}-I(\mathrm{B})_{vi,j}|+(1+R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{i,j})(I(\mathrm{A})_{vi,j}+I(\mathrm{B})_{vi,j}) \tag{8}$$

多源适应性更改中，源自不同初始更改源的多条独立变更传播路径交汇会产生耦合效应，因此节点传播强度计算需综合考虑变更传播概率与耦合路径的叠加效应。基于传播路径耦合的多源适应性更改节点传播强度计算步骤如下。

（1）假定节点A和B为更改源，若二者的传播路径完全独立即不存在耦合路径，则按单源更改方式计算两个节点的变更传播强度。

（2）遍历节点A和B的所有传播路径，并记录由连续的边序列构成的完全重叠子路径（耦合路径）。

（3）分析每条耦合路径的传播过程，确定起始节点和终止节点。传播过程包括从起始节点v_k直接传播到终止节点v_m的$v_k\to v_m$，以及包含至少一个中间节点v_l的$v_k\to v_l\to\cdots\to v_m$。

（4）计算节点A和B同时为更改源时各节点对应零部件的属性变化相关性。

（5）计算节点A和B为单源更改时节点间的直接传播影响强度，以及节点A和B同时为更改单源时节点间的直接传播影响强度。

（6）分析各零部件的适应性更改复杂度，计算零部件适应性更改复杂度指数。

（7）计算节点的多源适应性变更传播强度，确定零部件影响力。

节点A和B同时为更改源时，如果v_i为非耦合节点，则v_i的变更传播强度可参照式（2）计算，即

$$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi}=\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}}p_{ij}S_{Sj}+\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}}\sum_{k=1,k\neq i,k\neq j}^{N_{2vj}}p_{ij}p_{jk}S_{Sk}+\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}}\sum_{k=1,k\neq i,k\neq j}^{N_{2vj}}\sum_{l=1,l\neq i,l\neq j,l\neq k}^{N_{3vk}}p_{ij}p_{jk}p_{kl}S_{Sl} \tag{9}$$

需要注意的是，式（9）中的N_{1vi}、N_{2vj}、N_{3vk}均是

节点A和B同时为更改源时节点v_i、v_j、v_k的扩散度。由式(9)计算节点的最大变更传播强度过程中，当节点之间存在多条传播路径时，需先计算所有路径的传播强度，再选取最大值作为该节点的最终变更传播强度。

节点A和B同时为更改源时，如果v_i为耦合节点，则v_i的变更传播强度为

$$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi}=\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}} I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi,j}+\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}}\sum_{k=1,k\neq i,k\neq j}^{N_{2vj}} p_{ij}I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vj,k}+\sum_{j=1,j\neq i}^{N_{1vi}}\sum_{k=1,k\neq i,k\neq j}^{N_{2vj}}\sum_{l=1,l\neq i,l\neq j,l\neq k}^{N_{3vk}} p_{ij}p_{jk}I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vk,l} \quad (10)$$

$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vj,k}$和$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vk,l}$的计算参考式(6)、式(7)。

三个及以上节点同时为更改源时，耦合节点间的直接传播影响强度$I_{vi,j}$应考虑这些初始更改源的独立变更传播路径交汇产生的耦合影响，耦合节点的更改属性变化相关性需按多个节点更改源进行分析。节点A、B、C同时为更改源时，首先考虑更改源A和B的耦合路径，计算节点A和B同时为更改源时的直接传播影响强度$I(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})_{vi,j}$；然后，将更改源A和B的耦合路径与更改源C的传播路径进行耦合计算，最后计算得出三个节点同时为更改源时的直接传播影响强度$I((\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})\oplus\mathrm{C})_{vi,j}$。

为验证多源更改影响力节点识别方法的有效性，将其与不同算法进行对比分析。

首先，计算单源更改下各节点的变更传播强度。为计算方便，假设图1中各零部件的适应性更改复杂度指数均为1，根据式(2)～式(4)可得v_1、v_6分别为更改源时各节点的变更传播强度计算结果，如表1、表2所示。v_1作为单独更改源时，v_1、v_2的变更传播强度最大，其次是v_3、v_4和v_5。v_6作为单独更改源时，其自身的影响力最大，其次是v_3、v_4和v_5。

表1 v_1为更改源时各节点的变更传播强度

Tab.1 The change propagation strength of each node for change source v_1

节点	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_7
I_v	2.28	2.28	1.16	0.88	0.72	0

表2 v_6为更改源时各节点的变更传播强度

Tab.2 The change propagation strength of each node for change source v_6

节点	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
I_v	1.16	0.88	0.72	1.38	0

然后，计算多源更改下各节点的变更传播强度。多源更改中，每个节点的扩散度、更改传播概率和间接传播到其他节点的数量与单源更改相同，但更改传播网络中节点的总数可能变化，也可能存在路径耦合，耦合效应可能导致节点在多源变更下的变更传播强度异于单源变更情形。此处对比分析所提算法、文献[15]算法、PageRank算法[24]和HybridRank算法[25]的节点变更传播强度。因不知各节点的具体变更数值，所以无法确定耦合路径的相关性。当v_1、v_6同时为更改源时，假定v_6对耦合节点的变更传播强度仅为v_1对该耦合节点的变更传播强度的1/2，同时在图1所示的多源更改传播中，将各耦合节点受不同更改源引起的属性变化设定为不相关、完全正相关和完全负相关。表3给出了三种算法的法节点影响力计算结果(括号内数值)及排序。v_1、v_6同为更改源时，本文方法所得结果如下：v_1、v_2的影响力最大，v_6在多源更改中的影响力不如v_1、v_2，路径耦合影响节点v_3、v_4、v_5的变更传播强度。本文方法与文献[15]的方法在$R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})=1,-1$的影响力计算结果基本相同，仅$v_1$和$v_2$的影响力排序有所不同。文献[15]方法在计算节点变更传播强度时考虑所有可能的传播路径，导致部分间接传播路径重复计算。节点v_1的传播范围大，间接传播路径重复多，故其变更传播强度计算结果($I_{v1}=3.64$)大于节点v_2的变更传播强度计算结果($I_{v2}=3.16$)。$R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})=0$时，本文方法与PageRank算法的各节点影响力计算结果几乎一致，仅v_1和v_2的影响力排序不同，这是因为耦合节点的变更传播强度受属性相关性即$R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})$影响。PageRank算法以PageRank值(主要考虑节点间的直接影响，即强调网络的出入度属性)表示节点的重要性，每个节点在计算初始被赋予基础PageRank值。每轮迭代中，依据节点间的更改传播影响关系，将节点的PageRank值分配给受影响的节点。

表3 v_1和v_6同时为更改源时不同方法的节点影响力

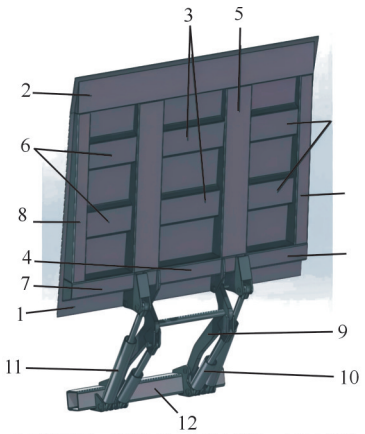
Tab.3 Node influence of each node for change source v_1 and change source v_6

节点	本文方法			文献[15]方法	PageRank算法
	$R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})=-1$	$R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})=0$	$R(\mathrm{A}\oplus\mathrm{B})=1$		
v_1	1(2.28)	1(2.28)	1(2.28)	1(3.64)	2(0.18)
v_2	1(2.28)	1(2.28)	1(2.28)	2(3.16)	1(0.21)
v_3	4(0.58)	3(1.74)	4(1.16)	4(1.16)	3(0.12)
v_4	5(0.44)	5(1.33)	5(0.88)	5(0.88)	5(0.10)
v_5	6(0.36)	6(1.08)	6(0.72)	6(0.72)	6(0.07)
v_6	3(1.38)	4(1.38)	3(1.38)	3(1.43)	4(0.11)
v_7	7(0)	7(0)	7(0)	7(0)	7(0.02)

本文提出的方法在多源更改传播分析中既考虑节点的传播特性，又考虑网络全局属性，还融合了路径耦合效应，能根据更改源的不同，灵活、准确地识别影响力节点。

3　实例分析

以某型号汽车装卸尾板的适应性更改为例，分析多源适应性更改传播及零部件的影响力。如图5所示，汽车装卸尾板主要由12个零部件构成，忽略连接件、油管及各种控制阀。



1.尾板面板　2.前叶板　3.中小横梁　4.中大横梁
5.斜纵梁　6.边横梁　7.边斜横梁　8.直纵梁　9.举升臂
10.举升液压缸　11.关门液压缸　12.安全护栏(选配)

图5　汽车装卸尾板结构示意图

Fig.5　Schematic diagram of the structure for loading and unloading the tailboard of a vehicle

根据汽车装卸尾板的设计流程与规范，分析各零部件间的依赖关系，由专业人士的设计生产经验及历史数据可得各零部件之间的变更传播概率与结构设计复杂度。以零部件为节点、零部件间的依赖关系为连接边、变更传播概率为边的权重，构建汽车装卸尾板适应性更改传播网络。尾板因需求变化或技术更新而更改适应性时，可根据前述的分析计算方法确定不同更改源下各零部件的变更传播强度。

尾板为适配不同大小的汽车货箱而进行适应性更改时，节点v_1可视为单独更改源，相应的适应性更改传播网络如图6所示。从图6中可以看出，节点v_1的更改不会传播给节点v_9、v_{10}、v_{11}，此时的更改传播网络总节点数为9，各组件的变更传播强度计算结果如表4所示。由表4可知，节点v_1作为单独更改源时，v_1的变更传播强度即影响力最大，其次是v_5、v_2、v_8、v_3和v_4；v_5虽然是v_2的下游节点，但其传播扩散能力较强；节点v_6、v_7、v_{12}为适应性更改终止节点，其变更传播强度为0。

尾板为适配不同的最大装卸质量而进行适应性更改时，节点v_{11}可视为单独更改源，相应的适

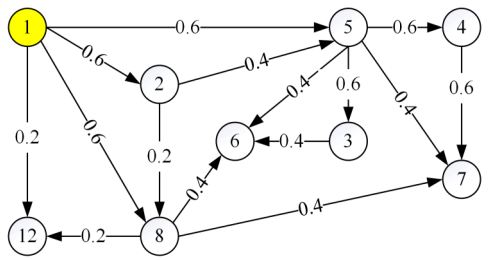


图6　v_1为单独更改源时的适应性更改传播网络

Fig.6　Adaptive change propagation network of change source v_1

表4　v_1为更改源时各组件的变更传播强度

Tab.4　The change propagation strength of each component for change source v_1

零件序号	复杂度	复杂度指数	传播强度		变更传播强度
			第一层	第二层	
1	0.78125	1.0000	0.4717	0.2103	0.6820
2	0.17413	0.2229	0.1820	0.1705	0.3525
3	0.19518	0.2498	0.1026	0	0.1026
4	0.11529	0.1476	0.0655	0	0.0655
5	0.25525	0.3267	0.4065	0	0.4065
6	0.20044	0.2566	0	0	0
7	0.12786	0.1637	0	0	0
8	0.20044	0.2566	0.2074	0	0.2704
12	0.15351	0.1965	0	0	0

应性更改传播网络如图7所示，可以看出，节点v_{11}的更改不会传播给节点v_1、v_2、v_8和v_{12}，更改传播网络的总节点数为8。根据式(2)～式(5)可得节点v_{11}作为单独更改源时各组件的变更传播强度计算结果。如表5所示，节点v_{11}作为单独更改源时，v_{11}的变更传播强度即影响力最大，其次是v_5、v_{10}、v_9、v_3和v_4；节点v_6和v_7为适应性更改终止节点，其变更传播强度为0。

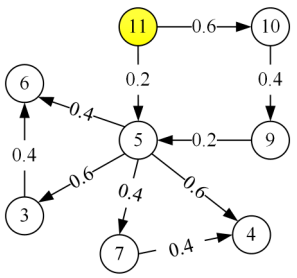


图7　v_{11}为单独更改源时的适应性更改传播网络

Fig.7　Adaptive change propagation network for change source v_{11}

当尾板为适配不同大小的汽车货箱，以及最大装卸质量进行适应性更改时，节点v_1、v_{11}同时为更改源，相应的适应性更改传播网络如图8所示。由图8可以看出，点v_1、v_{11}同时影响节点v_3、v_4、v_5、v_6和v_7，节点v_3、v_4、v_5、v_6和v_7为耦合节点，更改传播网络总节点数为12。进一步分析可知，

表5 v_{11}为更改源时各组件的变更传播强度

Tab.5 The change propagation strength of each component for change source v_{11}

零件序号	复杂度	复杂度指数	传播强度			变更传播强度
			第一层	第二层	第三层	
3	0.19518	0.4026	0.1654	0	0	0.1654
4	0.11529	0.2378	0.1055	0	0	0.1055
5	0.25525	0.5265	0.6551	0	0	0.6551
6	0.20044	0.4135	0	0	0	0
7	0.12786	0.2637	0	0	0	0
9	0.31448	0.6487	0.1053	0.1310	0	0.2363
10	0.48480	1.000	0.2595	0.0421	0.0524	0.3540
11	0.48480	1.000	0.7053	0.2867	0	0.9920

$Path_{v5\to v3}$、$Path_{v5\to v4}$、$Path_{v5\to v6}$、$Path_{v5\to v7}$、$Path_{v3\to v6}$和$Path_{v4\to v7}$均为耦合路径。

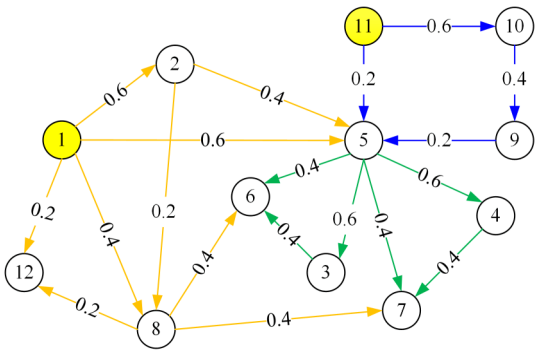


图8 v_1和v_{11}同时为更改源时的适应性更改传播网络

Fig. 8 Adaptive change propagation network for change source v_1 and change source v_{11}

假设汽车货箱尾门尺寸由初始的2.1 m×1.8 m改为2.3 m×1.8 m，尾板最大装卸质量由1500 kg改为2000 kg，则尾板面板(v_1)、翻转缸(v_{11})可视为更改源。根据尾板装置设计要求和规范，货箱尾门尺寸更改后，斜纵梁(v_5)的横向尺寸由200 mm变为220 mm，中小横梁(v_3)和中大横梁(v_4)的横向尺寸由850 mm变为950 mm，边横梁(v_6)和边斜横梁(v_7)的横向尺寸由360 mm变为380 mm。最大装卸质量更改后，相应的零件也会产生变更，耦合节点v_3、v_4、v_5、v_6和v_7的变更值如表6所示。

然后，根据式(1)计算耦合路径的相关性。以$Path_{v5\to v3}$为例，v_1为更改源时，v_3的厚度不变，但长度改变；v_{11}为更改源时，v_3的长度和厚度改变；v_1和v_{11}同时为更改源时，$Path_{v5\to v3}$的属性变化相关性向量余弦如图9所示，可计算出其相关性$R(v_1\oplus v_{11})_{5,3}=-0.1738$。同理，可计算出其他耦合路径的相关性，结果如表7所示。

v_1和v_{11}同时作为更改源时，各组件的变更传播强度可根据式(5)～式(10)计算。以节点v_5来

表6 耦合节点v_3、v_4、v_5、v_6和v_7的变更值

Tab.6 The change values of coupling nodes v_3, v_4, v_5, v_6 and v_7 mm

零件序号		3	4	5	6	7
初始值	横向尺寸	850	850	200	360	360
	厚度	3	3	3.25	3	3
v_1更改	横向尺寸	950	950	200	380	380
	厚度	3	3	3.25	3	3
v_{11}更改	横向尺寸	840	840	210	355	355
	厚度	3.2	3.2	3.5	3.2	3.2
v_1和v_9同时更改	横向尺寸	850	850	200	360	360
	厚度	3.2	3.2	3.5	3.2	3.2

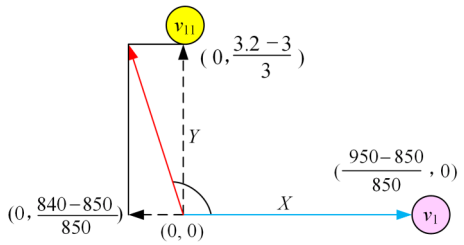


图9 $Path_{v5\to v3}$的属性变化相关性向量余弦

Fig.9 The vector cosine of the attribute change correlation for $Path_{v5\to v3}$

表7 v_1和v_{11}同时为更改源时耦合路径相关性

Tab.7 The correlation of the coupling path for change source v_1 and change source v_{11}

耦合路径	$Path_{v3\to v6}$	$Path_{v4\to v7}$	$Path_{v5\to v3}$	$Path_{v5\to v4}$	$Path_{v5\to v6}$	$Path_{v5\to v7}$
相关性	−0.2040	−0.2040	−0.1738	−0.1738	0	0

说明耦合路径的变更传播强度计算过程。假设A表示节点v_1，B表示节点v_{11}。因为$R(A\oplus B)_{5,6}$和$R(A\oplus B)_{5,7}$均为0，则

$$I(A\oplus B)_{5,6}=I(A)_{5,6}+I(B)_{5,6}=p_{5,6}S(A)_{S6}+p_{5,6}S(B)_{S6}=0.4\times(0.2566+0.4135)=0.2680$$

$$I(A\oplus B)_{5,7}=I(A)_{5,7}+I(B)_{5,7}=p_{5,7}S(A)_{S7}+p_{5,7}S(B)_{S7}=0.4\times(0.1637+0.2637)=0.1710$$

$R(A\oplus B)_{5,3}=R(A\oplus B)_{5,4}=-0.2040\in(-1,0)$说明耦合路径存在部分相关性，则根据式(5)、式(8)可得

$$I(A\oplus B)_{5,3}=(1+R(A\oplus B)_{5,3})(I(A)_{5,3}+I(B)_{5,3})-R(A\oplus B)_{5,3}|I(A)_{5,3}-I(B)_{5,3}|=(1-0.1738)\times[0.6\times(0.2498+0.4026)+0.1738\times 0.6\times(0.4026-0.2498)=0.3393$$

同理可得$I(A\oplus B)_{5,4}=0.2005$。则$v_1$和$v_{11}$同时作为更改源时，$v_5$的变更传播强度为

$$I(A\oplus B)_{v5}=I(A\oplus B)_{5,3}+I(A\oplus B)_{5,4}+I(A\oplus B)_{5,6}+I(A\oplus B)_{5,7}=0.9788。$$

其余各组件的变更传播强度计算结果如表8

所示。由表8可知，v_1和v_{11}同时作为更改源时，v_5的变更传播强度最大，v_1的变更传播强度次之，然后依次是v_{11}、v_2、v_{10}、v_3、v_8、v_9和v_4。节点v_6、v_7、v_{10}、v_{12}为适应性更改终止节点，其变更传播强度为0。通过分析适应性更改传播网络与变更传播强度计算结果可知，节点v_5传播扩散能力较强，且与下游节点之间存在路径耦合，因此其传播强度增强。由此可知，汽车装卸尾板不同组件作为更改源时，其传播路径和范围不同，节点的适应性更改传播影响强度也不同。

表8　v_1和v_{11}同时为更改源时各组件的变更传播强度

Tab.8　The change propagation strength of each component for change source v_1 and change source v_{11}

		零件序号											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
复杂度		0.457 65	0.109 08	0.122 15	0.072 83	0.157 47	0.124 95	0.080 55	0.124 95	0.194 42	0.293 01	0.293 01	0.097 16
复杂度指数		1.0000	0.2383	0.2669	0.1591	0.3441	0.2730	0.1760	0.2730	0.4248	0.6403	0.6403	0.2101
传播强度	第一层	0.5007	0.1922	0.2261	0.1443	0.9788	0	0	0.2216	0.0688	0.1699	0.4530	0
	第二层	0.2252	0.1825	0	0	0	0	0	0	0.0870	0.0275	0.1890	0
	第三层	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0348	0	0
变更传播强度		0.7259	0.3747	0.2261	0.1443	0.9788	0	0	0.2216	0.1559	0.2323	0.6402	0

4　结论

1)分析了多源适应性更改传播过程中的耦合节点和耦合路径，根据更改源的更改属性，确定了传播路径上各节点对应零部件的更改属性，并利用向量余弦计算耦合节点对应零部件更改属性变化的相关性。

2)分别计算各更改源下耦合路径的上游节点对下游节点的直接传播影响强度。基于节点的扩散度、更改传播概率、传播可达指数、路径耦合相关性和零部件结构设计复杂度指数，提出了多源适应性更改传播影响强度来衡量节点的影响力。

3)某型号汽车装卸尾板的适应性更改案例验证了所提方法的可行性。

参考文献：

[1] OGUNSAKIN R, MARIN C A, MEHANDJIEV N. Towards Engineering Manufacturing Systems for Mass Personalisation: a Stigmergic Approach[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2021, 34(4): 341-369.

[2] 肖人彬. 大规模个性化定制：大规模个性化的新发展[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(12): 4215-4226.
XIAO Renbin. Massive Personalized Customization: New Development of Mass Personalization[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(12): 4215-4226.

[3] 胡炳涛，冯毅雄，刘继红，等. 面向"互联网＋"定制产品的智能适应性设计研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(12): 109-125.
HU Bingtao, FENG Yixiong, LIU Jihong, et al. Research on Intelligent Adaptive Design for "Internet＋" Customized Products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(12): 109-125.

[4] 谢智伟，赵燕伟，任设东，等. 面向功能需求的产品适应性修改单元识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(2): 426-436.
XIE Zhiwei, ZHAO Yanwei, REN Shedong, et al. Functional-requirement Oriented Recognition Method of Product Adaptive Modification Unit[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(2): 426-436.

[5] 程贤福，章志宏，王承辉，等. 基于可适应设计和工程更改同步演化的产品设计方法[J]. 机械设计, 2023, 40(11): 147-154.
CHENG Xianfu, ZHANG Zhihong, WANG Chenghui, et al. Product Design Method Based on Synchronous Evolution of Adaptable Design and Engineering Change[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(11): 147-154.

[6] CHEN Yongliang, PENG Qingjin, GU Peihua. Methods and Tools for the Optimal Adaptable Design of Open-architecture Products[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(1): 991-1008.

[7] 李玉鹏，李孟泽，王召同. 基于有向加权网络模型的复杂产品多源设计变更传播路径优化[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 213-222.
LI Yupeng, LI Mengze, WANG Zhaotong. Multi-source Design Change Propagation Path Optimization for Complex Product Based on Weighted and Directed Network Model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 213-222.

[8] 李芮萌，杨乃定，刘慧，等. 考虑组织失效与协调的复杂产品研发项目设计变更风险传播模型[J]. 中国管理科学, 2022, 30(10): 265-276.
LI Ruimeng, YANG Naiding, LIU Hui, et al. Design Change Risk Propagation for Complex Product Development Projects Considering Organizational Failure and Cooperation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(10): 265-276.

[9] WANG Shijie, ZHOU Xueliang, LIANG Jingya, et al. Adaptive Design Change Considering Making Small Impact on the Original Manufacturing Process[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 59: 102303.

[10] SHIVANKAR S D, RAMACHANDRAN D. Product Design Change Propagation Analysis in a Manufacturing Environment with Machine Learning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, 136(1): 433-446.

[11] 甘屹，何怡琪，高丽，等. 基于产品特性关联和设计变更传播的向量空间重构模型[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 179-189.
GAN Yi, HE Yiqi, GAO Li, et al. Vector Space Recon-

struction Model Based on Product Characteristic Linkage and Design Change Propagation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 179-189.

[12] 詹敏，王铮，赵燕伟，等. 基于产品参数基元网络的变更传播路径优化[J]. 计算机集成制造系统，2022，28(8)：2545-2556.
ZHAN Min, WANG Zheng, ZHAO Yanwei, et al. Optimization of Change Propagation Path Based on Product Parameter Basic-element Network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(8): 2545-2556.

[13] 王佳伟，李文强，向海，等. 基于商空间理论的设计变更模型构建与优化研究[J]. 机械工程学报，2024，60(13)：21-32.
WANG Jiawei, LI Wenqiang, XIANG Hai, et al. Design Change Model Construction Based on Quotient Space Theory and Path Optimization Research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(13): 21-32.

[14] GUO Yuming. Towards the Efficient Generation of Variant Design in Product Development Networks: Network Nodes Importance Based Product Configuration Evaluation Approach[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2023, 34(2): 615-631.

[15] CHENG Xianfu, GUO Zhihu, MA Xiaotian, et al. Identification of Influential Modules Considering Design Change Impacts Based on Parallel Breadth-first Search and Bat Algorithm[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 9: 791566.

[16] REN Haibing, WANG Ying, ZHANG Jingna, et al. Research on Propagation Routing Optimisation of Product Design Change Considering Multi-domain Network Collaboration[J]. Journal of Engineering Design, 2024, 35(4): 430-459.

[17] MA Songhua, JIANG Zhaoliang, LIU Wenping. Evaluation of a Design Property Network-based Change Propagation Routing Approach for Mechanical Product Development[J]. Advanced Engineering Informatics, 2016, 30(4): 633-642.

[18] REN Haibing, LI Ting, LI Yupeng, et al. Multi -source Design Change Propagation Path Optimisation Based on the Multi-view Complex Network Model[J]. Journal of Engineering Design, 2021, 32(1): 28-60.

[19] 单炳冉，陶凤鸣. 基于重要节点的复杂产品设计变更控制[J]. 计算机工程与应用，2018，54(6)：222-227.
SHAN Bingran, TAO Fengming. Design Change Control of Complex Products Based on Important Nodes[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(6): 222-227.

[20] LI Yupeng, WANG Zhaotong, ZHONG Xiaoyu, et al. Identification of Influential Function Modules within Complex Products and Systems Based on Weighted and Directed Complex Networks[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(6): 2375-2390.

[21] 王秋月，李玉鹏，张娜，等. 面向需求变更的复杂产品配置更新路径优选[J]. 计算机集成制造系统，2022，28(12)：3830-3844.
WANG Qiuyue, LI Yupeng, ZHANG Na, et al. Optimization of Product Configuration Updating Path for Complex Product Oriented by Customer Requirements Change[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(12): 3830-3844.

[22] CHENG Xianfu, XIAO Renbin, WANG Haolun. A Method for Coupling Analysis of Association Modules in Product Family Design[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 29(6): 327-352.

[23] CHENG Xianfu, YANG Jing, WANG Zhihong, et al. An Approach to Coupling Analysis for Open Architecture Product[J]. Journal of Engineering Design, 2024, 35(7): 849-873.

[24] BRIN S, PAGE L. The Anatomy of a Large-scale Hypertextual Web Search Engine[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1/7): 107-117.

[25] AHAJJAM S, BADIR H. Identification of Influential Spreaders in Complex Networks Using HybridRank Algorithm[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 11932.

（编辑　张洋）

作者简介：程贤福，男，1975年生，教授、博士研究生导师。研究方向为大规模个性化定制、可适应设计、设计变更。发表论文140余篇。E-mail：chxf_xn@sina.com。**肖人彬***（通信作者），男，1965年生，教授、博士研究生导师。研究方向为大规模个性化定制、复杂产品创新设计、群体智能。发表论文近300篇。E-mail：rbxiao@hust.edu.cn

本文引用格式：

程贤福，钟龙飞，肖人彬，等. 机械产品的多源适应性更改影响力零部件识别[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1746-1754.

CHENG Xianfu, ZHONG Longfei, XIAO Renbin, et al. Identification of Influential Parts in Mechanical Products with Multi-source Adaptive Changes [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1746-1754.