

# 工程变更雪崩传播的预测方法<sup>\*</sup>

## Forecast of Avalanche Propagation in Engineering Change

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 宫中伟 杨海成 莫蓉

**[摘要]** 为了避免高风险、高花费的工程变更雪崩传播,本文提出了两种预测雪崩传播的方法。首先,分析了雪崩传播的原因及其主要特性:约束冲突和被影响零件数目超过一定范围;然后,提出了分别利用有向图方法面向约束冲突和利用复杂网络相关知识对这两个特性进行检测的雪崩传播预测方法;第三,利用一个单级变速器实例说明了本文所提方法的实现过程,验证了该方法合理性;最后,提出了本文方法的缺陷以及改进方向。

**关键词:** 工程变更 变更传播 雪崩传播 有向图 复杂网络

**[ABSTRACT]** In order to avoid avalanche propagation in engineering change that is high-risk and high-cost, two methods for the detection of avalanche propagation are proposed. Firstly, the reasons for the avalanche propagation and its main features are analyzed: constraint conflict and/or a great many affected elements. Then, the methods for the detection of those two features based on directed graph and complex networks respectively are proposed. Finally, the experiment of managing a type of transmission is employed to validate our method and it shows the correctness of the proposed method.

**Keywords:** Engineering change Change propagation Avalanche propagation Directed graph Complex network

工程变更(Engineering Change, EC)是制造企业生产经营活动中的一项重要业务。它是产品创新的源动力,是改正产品缺陷、满足客户新需求的主要方法<sup>[1]</sup>。有效处理工程变更并加快响应速度,提高企业产品开发过程中的敏捷度,是提高企业竞争力的主要途径。

Claudia Eckert等<sup>[2]</sup>研究了企业EC传播过程中影响元素的数目随时间的变化趋势,并在此基础上将EC传播分为:①水波式传播(Ripple):初始变更引起的传播只会引起少量的其他变更,然后变更数量迅速减少;②开花式传播(Blossom):起初变更传播引起其他变更大量增加,如同在“开花期”,但之后变更数量逐渐

减少,变更传播进入“凋谢期”,一段时间后,传播引起的变更数量可以保持在一个合理的数量上;③雪崩式传播(Avalanche):变更传播引起变更数量不断增加,如同雪崩效应或滚雪球效应,最后导致变更影响的数量难以控制。雪崩式传播难以预测,降低生产效率,增加开发成本,对企业造成了不利影响,因此预测雪崩传播具有重要意义,可惜的是,Eckert等并没有在文献[2]中给出有意义的分析。何睿等<sup>[3]</sup>提出了利用图论的方法分析3种传播方式的内在本质,但其结论过于笼统,很难直接应用于实际企业。M.Z.Ouertani<sup>[4]</sup>研究了冲突发生的类型、本质,分析了并行设计环境下EC过程中的冲突管理方法,具有重要的实际应用价值,对本文研究EC雪崩传播具有重要意义。

本文将在以上研究的基础上,分析雪崩传播产生的原因、特征及其预测方法,为企业管理EC以及防止发生高风险、高成本的雪崩传播提供实际支持。

## 1 雪崩传播简介

### 1.1 雪崩传播产生的原因

工程变更有可能涉及参与人员、产品数据以及形状参数等各个方面,其中任一方面都有可能发生雪崩传播,其原因主要是:(1)数据超出取值范围,更改后方案与实际产品数据存在对立关系,导致无法满足特定的功能目标、可制造性目标或可装配性目标;(2)由于参数取值的原因,无法满足所有约束;(3)数据无法达成一致,主要是指在EC过程中,相互依赖的各种信息是动态变化的,有时是互相矛盾的,不同领域的规则也难以同时相互满足,导致不同人员设计结果不一致,或设计结果与总的设计目标不一致;(4)由于参与人员、工作流等的调整,导致工作量超出工作人员负荷,无法进行工作内容的调整,以致无法在交货期内完成。

### 1.2 雪崩传播的特征

经过大量观察发现,在实际的工程变更过程中,雪崩传播具有两个主要特征:传播过程中的约束冲突;被影响元素数目超过一定范围。当雪崩传播发生时,以上两个特征至少有一个存在。其中前者又包括:(1)主客体的冲突,主要指参与人员与工作量、时间和材料等资源的冲突;(2)变更过程中参数与值域的冲突、不同约束的冲突等。后者的关键是确定一个范围,当变更影响

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目“复杂服务型制造网络的建模、分析和优化方法研究”(20805122)资助。

元素(可以是数据、人员或零部件甚至是分段的工作流)超过该范围时则有可能发生雪崩传播,设计人员需要重新评估,重新制定变更路径。下文将分别讨论识别雪崩传播 2 个特征的方法,并通过实例对所述方法进行验证。

## 2 面向约束冲突的雪崩传播分析

变更传播从一定程度上可以说是约束的传播,而约束冲突是雪崩传播发生的重要原因,其原理如图 1 所示。其中数据指的是被约束的多方在相同或不同领域内的文件、参数、人员数值等。本文将采用有向图的方式表达这些数据间的约束关系,如图 2 所示。

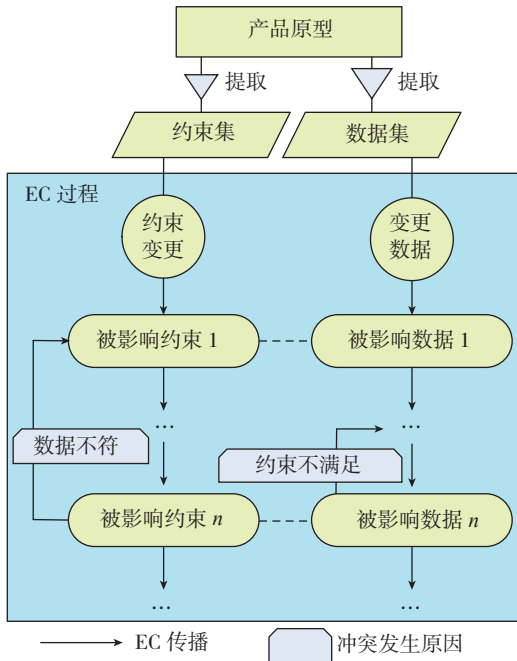


图1 EC过程约束冲突产生示意图  
Fig.1 Emergency of EC constraint conflict

文献 [4] 将参与人员与资源之间的约束关系(称之为主体关系)利用有向无环图进行表示,这不符合 EC 中雪崩传播的特点,因为在有环图环境下,冲突解决过程中其逐渐升级时才会发生雪崩传播,反之,若解决冲突过程中其逐渐减弱,将会发生开花式传播,而不会发生雪崩式传播,基于以上思想,将主客体关系以及产品其他参数之间的约束关系映射为有向图,该有向图可以有环,从图 2 中可以看出,该有向图包含了若干个环。当 EC 中源变更发生后,利用广度优先搜索原则确定可能的变更影响范围  $C$ , 然后根据图 3 所示策略进行雪崩传播的检测。当被研究产品为复杂产品,且其约束错综复杂,约束求解便有一定的难度,此时,可以利用牛顿算

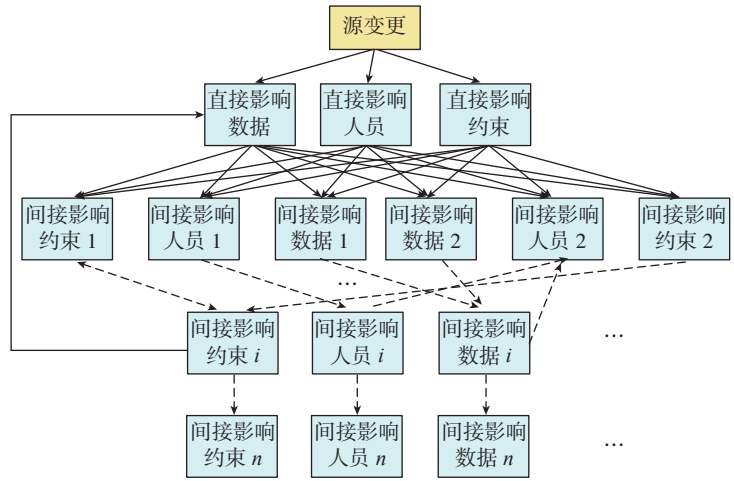


图2 约束传播关系有向图  
Fig.2 Constraint propagation diagram

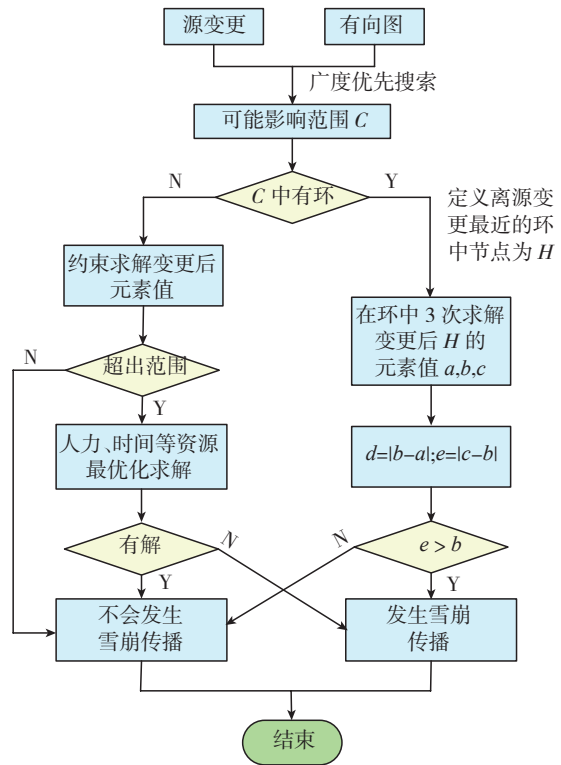


图3 约束冲突检测示意图  
Fig.3 Detection of constraint conflict

子的方法避免求解被影响约束,而达到检测约束冲突和雪崩传播的目的,基于牛顿算子的算法比较成熟,本文将不再赘述。

## 3 面向被影响数目的雪崩传播分析

在复杂网络中,病毒从一个节点可以传递到另一个节点。病毒在网络中进行的传播,可能造成大范围的病

毒传播甚至阻塞和瘫痪,必须对病毒传播进行有效控制,提高网络的稳定性<sup>[5]</sup>。复杂产品的变更传播在产品开发(Product Development, PD)网络中的传递类似于网络中的病毒传播,在此,我们利用复杂网络的病毒传播特性对变更传播的稳定性进行分析。

文献[6]指出,复杂产品的产品开发网络符合复杂网络的小世界特性,同时,复杂网络中病毒传播的SIS模型表示了被治愈节点能够反复地被传染和被治愈,与产品开发网络中变更传播过程中能够反复影响同一节点类似,基于以上理论,本文采用复杂网络中病毒传播的小世界SIS模型来描述和分析变更传播,其数学模型为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{di_k(t)}{dt} = -i_k(t) + ki_k(t)[1 - i_k(t)]\Theta_k(t) \\ i_k(t) = \frac{I_k(t)}{N} \\ \Theta_k(t) = \sum_{k'} P(k'|k)i_{k'}(t) \end{cases}, \quad (1)$$

其中,任何一项工程变更都可以追溯到一个变更源作为起始点,时间 $t$ 表示了变更传播进程; $i_k(t)$ 为入度为 $k$ 的节点的平均变更强度,即 $i_k(t) = \frac{I_k(t)}{N}$ , $I_k(t)$ 为 $t$ 时刻网络

中被影响到的入度为 $k$ 的节点数, $N$ 为产品开发网络节点总数; $P(k'|k)$ 表示入度为 $k$ 的节点连接到出度的 $k'$ 的节点的概率。

很显然, $i_k = 0$ 是方程(1)的一个解,它表示所有的节点都没有被影响。一般地,我们可以通过分析这一零点的稳定性来获得变更传播的阈值 $u_c$ ,即若PD网络中有超过 $N \cdot u_c$ 个节点被变更传播影响到,则会出现大规模传播,并在一定时间内持续存在,并有可能产生雪崩式传播;反之,工程变更会在一定时间内消亡,形成水波式和开花式传播<sup>[4]</sup>。

为了进行相关求解,将式(1)进行线性化,得到:

$$\frac{di_k(t)}{dt} \approx \sum_{k'} L_{kk'} i_{k'}(t), \quad (2)$$

其中,矩阵 $L = \{L_{kk'}\}$ , $L_{kk'} = \delta_{kk'} + kP(k'|k)$ ( $\delta_{kk'}$ 是Kronecker-delta函数)。若矩阵 $L$ 不存在正的特征值,式(2)的解 $i_k = 0$ 是稳定的,因此可以得出工程变更的传播阈值:

$$u_c = \frac{1}{\Lambda_m}, \quad (3)$$

其中, $\Lambda_m$ 为矩阵 $C = \{kP(k'|k)\}$ 的最大特征值。

在工程变更过程中,任何一个节点的度跟与它相连的节点的度之间没有必然的联系,则矩阵 $C$ 具有唯一的特征值,即 $\Lambda_m = \langle k^+k^- \rangle / \langle k^- \rangle$ ,其中, $\langle k^- \rangle$ 为PD网络中所有节点入度的平均值, $\langle k^+k^- \rangle$ 为所有节点出度和入度乘积的平均值。由式(3)可以得出:

$$u_c = \frac{\langle k^- \rangle}{\langle k^+k^- \rangle}. \quad (4)$$

由式(4)可以看出 $u_c < 1$ ,当 $\langle k^+k^- \rangle \rightarrow \infty$ 时, $u_c \rightarrow 0$ 。

## 4 应用实例

本文采用某型号单级变速器对提到的方法进行验证。设源变更为:由于某设备配套,现有的减速器输入转速600r/min、中心高160mm和轴距160mm满足要求,但需要调整小齿轮结构,将传动比加大至4.15,输入功率减小至3kW。对于此次变更雪崩传播的预测方法如下。

(1)根据已有的单级变速器模型,得到此次变更约束传播有向图,如图4所示。

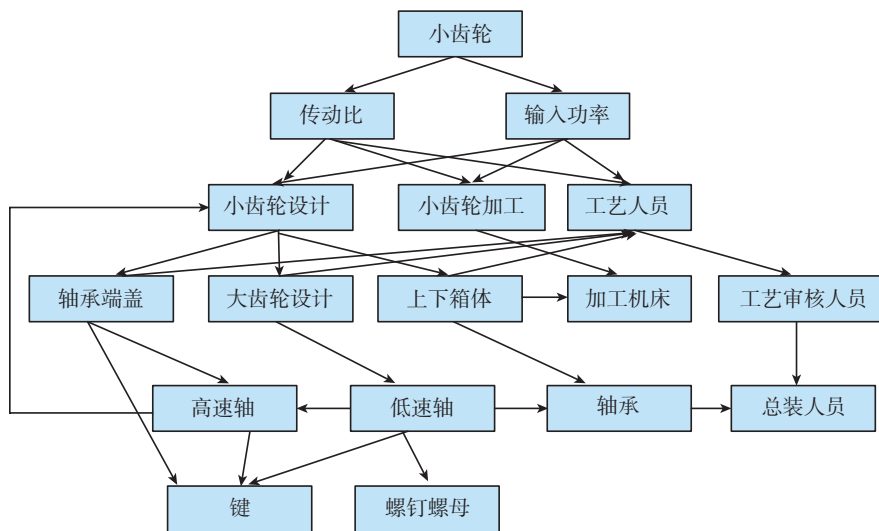


图4 变更传播约束有向图

Fig.4 Change propagation constraint

根据基于有向图的分析方法,对图4所示约束传播图进行雪崩传播预测:初选小齿轮齿数 $Z_1=24$ ,初选螺旋角 $\beta=10^\circ$ ,选择载荷系数 $K=1.2$ ,按齿面接触强度校核公式 $d_{v1} \geq \sqrt{\frac{2KT_1}{\phi_d \varepsilon_a} \frac{i \pm 1}{i} \left[ \frac{Z_H Z_E}{[\sigma_H]} \right]}$ ,代入已有设计数据,得小齿轮符合强度要求。由图4知,约束传播网络中有环的存在,其中一个环为:小齿轮-大齿轮-低速轴-高速轴-小齿轮。对该环进行有向图的约束求解,

由传动比得大齿轮齿数为 100, 低速轴安装齿轮处轴颈为 84mm, 高速轴安装齿轮处轴颈为 56mm, 小齿轮齿数为 22。继续计算环中小齿轮齿数, 第 3 次计算得到的小齿轮齿数为 21。由基于有向图的分析策略可知, 此次变更未发生雪崩传播。为了进一步确定该次试验结果, 对小齿轮齿数进行第 4 次计算, 得小齿轮齿数为 21, 进一步验证了本文所提方法的合理性。

(2) 利用基于复杂网络的方法, 根据图 4 所示的有向图, 计算  $u_c = \frac{\langle k^- \rangle}{\langle k^+ k^- \rangle}$ , 得  $u_c = 0.73$ , 即当同一时刻节点变更数目达到 73% (12 个节点) 时, 很有可能会发生雪崩传播, 显然, 本次变更未发生雪崩传播, 与基于有向图的方法所得结果暗合。

## 5 结束语

许多研究人员指出了预测高风险、高花费的雪崩传播的必要性, 而在此方面的理论成果却比较稀少。在此基础上, 本文提出了分别基于有向图和复杂网络的两种预测雪崩传播的方法。试验结果表明, 本文所提方法具有一定的合理性, 然而本文的不足之处在于: (1) 复杂产品有向图模型过于复杂, 将有向图进行分层表示将会降低分析难度, 限于篇幅原因本文未对这方面做出详细

阐述, 这也是本文的后续工作之一; (2) 基于复杂网络的预测方法只是给设计者提出了一个建议, 尚不能提供准确的预测方法。

## 参考文献

- [1] Rouibah K, Caskey K R. Change management in concurrent engineering from a parameter perspective. *Computers in Industry*, 2003, 50(1):15-34.
- [2] Eckert C M, Clarkson P J, Zanker W. Change and customization in complex engineering domains. *Research in Engineering Design*, 2004, 15(1):1-21.
- [3] 何睿, 唐敦兵, 薛建彬. 基于设计结构矩阵的工程变更传播研究. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(4):656-660.
- [4] Ouertani M Z. Supporting conflict management in collaborative design: An approach to assess engineering change impacts. *Computers in Industry*, 2008, 59(9): 882-893.
- [5] 姚键, 茅兵, 谢立. 一种基于有向图模型的安全策略冲突检测方法. *计算机研究与发展*, 2005, 42(7): 1108-1114.
- [6] Braha D, Bar-Yam Y. Topology of large-scale engineering problem solving networks. *Physical Review E*, 2004, 69:1-17.
- [7] 李翔. 复杂动态网络传播动力学. *力学进展*, 2008, 38(6):723-732.

(责编 深蓝)

- WSUT-P 是五森研制新一代超声波专用探伤设备, 设计先进, 选材精良, 精工细作的制造工艺。
- 用于航空航天、核电电力、石油石化等重要产品的管、棒材超声波检测。
- 高精度的主机检测系统, 采用国际先进的电容耦合技术, 旋转头、三辊定心驱动装置集成在同一升降检测平台上, 保证探伤区域同心度及产品检测稳定可靠。
- WSUT-P 配置计算机控制系统, 提供人机交互界面、动画显示、数据存储、报表打印、通讯等功能。



**上海五森检测设备研制有限公司**

地址: 上海市宝山区大康路325号A-4

电话: 021-56484445 56484442

邮箱: wusenjiance@163.com

网站: www.sh-wusen.com

广告索引号 13-064