



SFEP文本因果关系提取及其与SFN转化研究

崔铁军, 李莎莎

引用本文:

崔铁军, 李莎莎. SFEP文本因果关系提取及其与SFN转化研究[J]. 智能系统学报, 2020, 15(5): 998–1005.

CUI Tiejun, LI Shasha. Causality extraction of SFEP text and its conversion to SFN[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(5): 998–1005.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201907021>

您可能感兴趣的其他文章

安全科学中的故障信息转换定律

Conversion law of fault information in safety science

智能系统学报. 2020, 15(2): 360–366 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201811004>

基于位置-文本关系的空间对象top-k查询与排序方法

A location-text correlation-based top-k query and ranking approach for spatial objects

智能系统学报. 2020, 15(2): 235–242 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201808011>

少故障数据条件下SFEP最终事件发生概率分布确定方法

Determination method of target event occurrence probability in SFEP under the condition of less fault data

智能系统学报. 2020, 15(1): 136–143 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201911002>

空间故障树与因素空间融合的智能可靠性分析方法

Intelligent reliability analysis method based on space fault tree and factor space

智能系统学报. 2019, 14(5): 853–864 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201807022>

引入外部词向量的文本信息网络表示学习

Representation learning using network embedding based on external word vectors

智能系统学报. 2019, 14(5): 1056–1063 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201809037>

基于分类词典的文本相似性度量方法

Text similarity measure method based on classified dictionary

智能系统学报. 2017, 12(4): 556–562 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201608010>

微信公众平台



关注微信公众号，获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.201907021

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20200804.0848.002.html>

SFEP 文本因果关系提取及其与 SFN 转化研究

崔铁军^{1,2}, 李莎莎²

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 为将系统故障演化过程 (system fault evolution process, SFEP) 的文本描述转化为空间故障网络 (space fault network, SFN) 结构, 用于故障分析, 本文提出 SFEP 文本因果关系提取方法, 及其与 SFN 基本结构的转化方法。首先给出 SFEP 中事件的几种典型因果关系。随后提出因果关系与 SFN 基本结构的转化流程。本文方法围绕着关键字和因果关系组模式展开, 通过模型的不断学习补充和丰富关键字和组模式。最终使方法具备将 SFEP 文本转化为 SFN 结构的能力。以飞机起落架故障发生过程文本为例进行了应用, 实验结果表明该方法可用于 SFEP 文本中的因果关系分析, 并得到了理想的 SFN。完善的关键字和组模式有利于使用计算机智能处理 SFEP 的 SFN。

关键词: 安全系统工程; 智能科学; 知识提取; 系统故障; 演化过程; 文本因果关系; 空间故障网络; 转化研究
中图分类号: X913; C931.1; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)05-0998-08

中文引用格式: 崔铁军, 李莎莎. SFEP 文本因果关系提取及其与 SFN 转化研究 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(5): 998-1005.

英文引用格式: CUI Tiejun, LI Shasha. Causality extraction of SFEP text and its conversion to SFN[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(5): 998-1005.

Causality extraction of SFEP text and its conversion to SFN

CUI Tiejun^{1,2}, LI Shasha²

(1. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: To transform the text description of the system fault evolution process (SFEP) into a space fault network (SFN) for fault analyses, we propose a method for extracting the text causality of SFEP and its transformation with the basic structure of SFN. First, several typical causal relationships of events in SFEP are given. Then, the transformation process of causality and SFN basic structure is proposed. The method focuses on the key words and causal group models; the keywords and group models are enriched and supplemented through continuous model learning. Finally, the method transforms SFEP text into an SFN structure. The method is applied to the text processing of aircraft landing gear failure. The findings show that the method can be used to analyze causality in SFEP text and obtain an ideal SFN. Perfect keywords and group models are beneficial to the intelligent processing of SFEP text to SFN using computers.

Keywords: safety system engineering; intelligence science; knowledge extraction; system fault; evolution process; text causality; space fault network; transformation research

系统故障演化过程 SFEP^[1-5] 表示了故障产生过程中, 从原因开始到结果之间各事件及其逻辑关系。通常无论是自然系统还是人工系统发生灾害或故障都不是一蹴而就的。宏观上是众多事件

按照一定顺序依次发生形成的; 微观上则是事件之间逻辑关系导致的。这里的逻辑关系主要是因果逻辑关系。

作者 2018 年首次提出 SFN 理论^[1-5] 用于描述和研究 SFEP。SFN 理论是空间故障树 (space fault tree, SFT) 理论的第 3 阶段。SFT 的 4 个研究阶段分别为 SFT 理论基础^[6-11]、智能化 SFT^[12-20]、SFN^[1-5]

收稿日期: 2017-07-12. 网络出版日期: 2020-08-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52004120, 51704141); 国家重点研发计划项目 (2017YFC1503102).

通信作者: 崔铁军. E-mail: ctj.159@163.com.

及系统运动空间和系统映射论。SFN 可描述 SFEP 中各事件及其之间的逻辑关系, 但研究的困难在于将 SFEP 转化为 SFN。通常情况下, SFEP 是通过事故调查、现场人员叙述或者专家推断得到的。这些 SFEP 数据是一种非结构的、文本形式的信息。如何将 SFEP 的文本描述转化为规则化的, 具有符号表示特征的模式, 以便进一步处理成为了关键问题。这涉及到信息收集、知识提取、知识表示、知识规则化, 更涉及到安全科学和 SFN 理论等。

对类似问题, 文本知识的提取和表示已有较多研究。涌现了如基于数据挖掘和数据驱动的因果关系提取^[21-22]、知识地图文本分类^[23-24]、结构因果关系故障诊断^[25]、学习行为数据因果关系挖掘^[26]、条件随机域突发事件因果关系提取^[27]、因果关系脑电特征提取^[28]、因果关系验证信息提取^[29]、医疗知识文本内容提取^[30]、网站信息资源多维语义知识融合^[31]、特征项权重与句子相似度的知识元智能提取^[32]等方法。但一般情况下, 这些文本知识提取方法都具有专业领域特征, 难以应用于安全及系统故障分析领域, 难以在 SFEP 文本中有效提取因果知识, 更难以形成 SFN 所需要的知识规则化形式。

针对上述问题, 作者借鉴文本知识提取的一般方法^[21-33], 专门研究了适合 SFN 的因果关系提取方法用于研究 SFEP 描述文本的表示和分析。方法可将 SFEP 文本语言描述转化为完整的 SFN 结构, 从而为 SFN 的有效构建提供支持, 同时该方法也适合计算机对符号序列的智能处理。这里首先解释文中出现的前期概念, 其余相关概念见参考文献 [1-5]。

边缘事件 (edge event): 导致故障的基本事件, 用 ee 表示。

过程事件 (process event): 由边缘事件或其他过程事件导致的事件, 同时也导致其他过程事件或最终事件, 用 pe 表示。

最终事件 (target event): 边缘事件或过程事件导致的事件, 但不导致任何其他事件发生, 用 te 表示。

传递概率 (transfer probability): 原因事件可导致结果事件的概率, 用 tp 表示。

原因事件 (cause event): 导致其他事件发生的事件, 包括边缘事件和过程事件, 用 ce 表示。

结果事件 (result event): 被导致发生的事件, 包括过程事件和最终事件, 用 re 表示。

连接 (connection): 表示事件之间的相互关系, 连接具有方向, 从原因事件指向结果事件, 并蕴含传递概率。

1 SFEP 的典型因果关系

在 SFEP 中主要蕴含了事件间的因果关系, 分为如下 6 种。

1) 单层传递结构: $A \rightarrow B$, A 事件导致 B 事件。A 代表原因事件, B 代表结果事件, 下同。

2) 多层传递结构: $A \rightarrow B \rightarrow C$, A 事件导致 B 事件, B 导致 C 事件。

3) 归一与结构: $A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \rightarrow B$, 多个原因事件 A 同时导致结果事件 B。

4) 归一或结构: $A_1 \vee A_2 \vee \dots \rightarrow B$, 多个原因事件 A, 至少有一个发生导致结果事件 B。

5) 分支与结构: $A \rightarrow B_1 \wedge B_2 \wedge \dots$, 原因事件 A 发生, 同时产生多个结果事件。

6) 分支或结构: $A \rightarrow B_1 \vee B_2 \vee \dots$, 原因事件 A 发生, 产生多个结果事件中的一个或多个。

上述关系在 SFN 中的表示如图 1 所示。

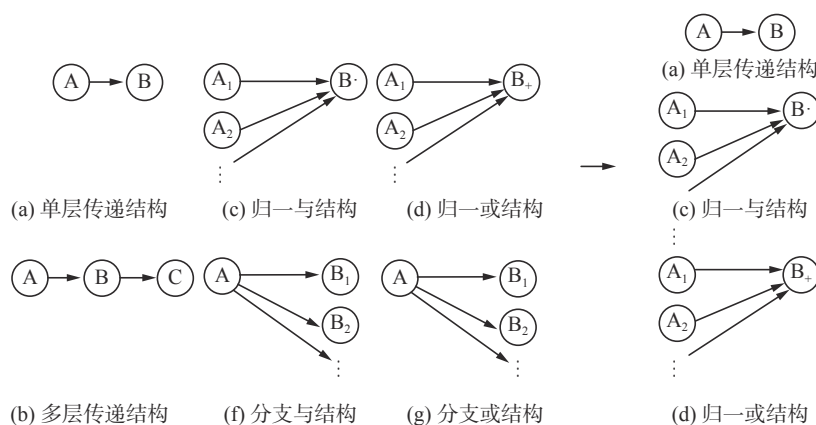


图 1 6 种逻辑关系的 SFN 转化结构

Fig. 1 SFN transformation structures of 6 logic relations

从图 1 左侧可了解 6 种因果关系与 SFN 基本结构的转化情况。

定义 1 SFN 基本结构。指由一个或多个原因事件,一次连接和一个或多个结果事件组成的基本单元,即原因事件到结果事件经过一次连接的结构。

SFN 用于描述 SFEP,对于最终事件的分析是按照 SFEP 的逆序关系^[1-5]描述的,即从最终事件开始,按照连接的反方向找到各过程事件,最终找到边缘事件。从该角度出发,图 1(a)、(b) 2 种形式的因果关系对于 SFN 的分析是等效的,可归结为图 1(a)形式。图 1(c)、(d) 2 种形式对 SFN 分析很重要。由于分析过程是结果事件到原因事件的逆序分析,B 事件与其原因事件 A 之间的因果关系很重要,因此在 B 事件后标注了 A 事件通过何种逻辑关系导致 B。图 1(e)、(f) 2 种形式对 SFN 分析没有实际意义。因为从 B 事件寻找 A 事件时,对 B 而言 A 总是确定的,不存在多个 A 事件导致 B 事件的情况。综上将 SFEP 表示为 SFN 时,这 6 种因果关系形式都有可能出现,重要度相同。但分析时只有图 1(a)、(c) 和 (d) 因果结构发挥作用。图 1(b)、(e) 和 (f) 3 种因果结构都可归结为图 1(a)因果结构进行研究。因此 SFN 表示 SFEP 时使用图 1 左侧 6 种结构,而分析 SFN 时只需图 1 右侧 3 种结构。当然这里不考虑单向环结构,单向环的处理方法见文献[1-3, 5]。

2 SFEP 因果关系与 SFN 基本结构转化流程

一般情况下 SFEP 通过语言描述形成文本,如何将这些文本转化成可用于 SFEP 分析的 SFN 是关键问题。SFN 中包括事件和连接及其逻辑关系。事件主要包括原因事件和结果事件;或可分为边缘事件、过程事件和最终事件。所涉及的原因事件和结果事件的逻辑关系主要是与或关系,实际上存在 20 种这样的关系^[34-35]。在 SFEP 中提取这些信息,首先要对 SFEP 语言论述进行因果关系组划分;其次确定关键词;最后确定常用的因果关系组模式。

定义 2 因果关系组。划分 SFEP 的描述文本后,每一个因果关系划分表达一个完整的因果关系描述,称为因果关系组(文本以“。”号分解最为简单),因果关系组也是因果关系分析的最基本单元。

定义 3 因果关系组模式。利用关键字将一个因果关系组中的词汇符号化,形成可表示原因因果关系组因果关系的符号序列。因果关系组模式是一类因果关系的抽象,是因果关系组表示为符号序列的模板。来源于实际 SFEP 的多个因果关系组可能对应一个因果关系组模式。

使用知识提取方法,将 SFEP 的描述文本转化为 SFN 基本结构可分为 3 个阶段,如图 2 所示,包括模型研究、模型学习和实例分析。

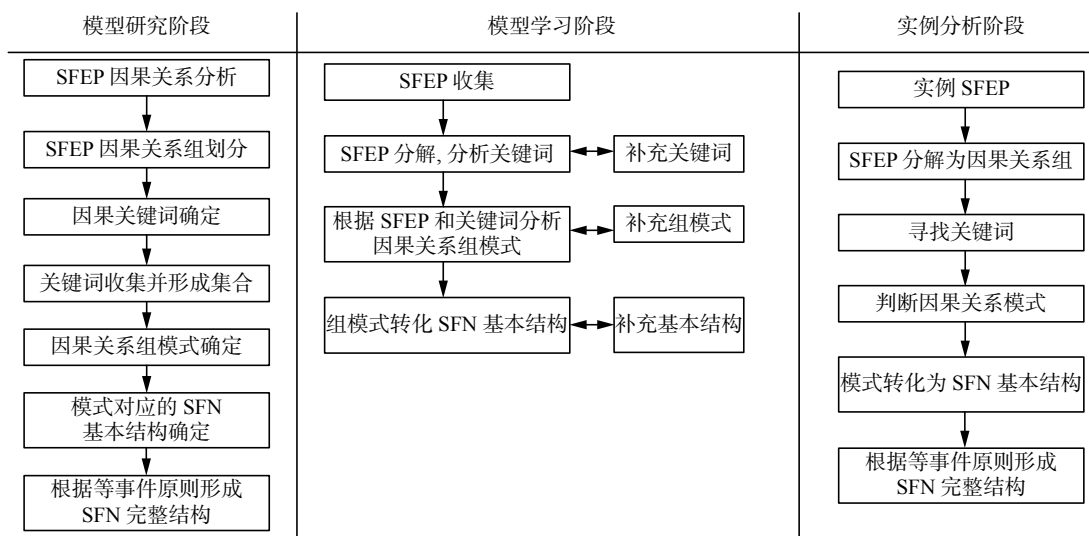


图 2 因果关系与 SFN 基本结构转化流程

Fig. 2 Transform processes of causality and SFN basic structure

模型研究阶段主要是模型建立,通过 SFEP 因果关系分析,将 SFEP 的描述文本进行因果关系分解,从而对文本进行划分。每一个因果关系

的划分都表达一个完整的因果关系描述,称为因果关系组(以“。”号分解最为简单),因果关系组也是因果关系分析的最基本单元。在各个因果关

系组转化为SFN基本结构后,可根据因果关系组之间的相同事件叠加形成完整的SFN网络,最终完成SFEP到SFN转化。

确定因果关系组后,对组内各部分进行分析,主要包括原因事件、结果事件及逻辑关系。可将文本抽象为连接词、原因词、结果词、原因部分、结果部分、标点符号、其他类型短语等,称为关键词。在SFEP描述中这些词都有具体的词汇,可在模型学习过程中累计。逐渐形成这些关键词对应的词汇集合,以便丰富文本因果关系分析能力。

根据因果关系组和得到的关键词集合,研究因果关系组的基本模式。由于已事先获得关键字,将因果关系组中的文本描述进行替换,可得到为数不多的因果关系组模式。每种模式都代表了一类因果关系描述类型的语句。该过程在模型学习阶段得到补充和丰富。

将组模式转化为SFN的基本结构。在第1节已提到SFN表示SFEP使用6种结构,而分析过程只需其中3种结构。根据组模式转化为SFN的对应结构。

因此,关键词中的原因词和结果词引导的原因部分和结果部分将成为SFN的节点对应事件。连接词代表了原因部分或结果部分之间的逻辑与或关系,将成为SFN的连接和逻辑关系。其他类型短语一般成为原因和结果事件的一部分。最后得到的所有SFN基本结构都只传递了一次,那么之中必定有事件即作为原因又作为结果,因此根据等事件规则将所有SFN基本结构叠加,形成SFEP文本描述转化的完整SFN结构。

模型学习阶段主要是关键词和因果关系模式的补充和丰富。在已分析的SFEP文本中,可获得一些关键词对应的词汇,也可确定因果关系模式。但关键词在语言中千变万化,一个关键词可以有词汇表示,需要实践中学习丰富。同理因果关系模式代表了一句完整的因果关系描述,这些描述的结构千变万化,也需不断补充。

对于一个实例SFEP分析,如果它的关键词和关系模式都是已知的,那么将会顺利完成SFEP到SFN的转化。如果关键词或因果关系模式不在集合中,非已知,那么对模型而言是个学习过程,以丰富关键词和关系模式。在经过大量实例的学习后方法将达到成熟。

3 关键词提取及规则确定

为说明方便形成形式化表示结构,结合文

献[21-33]和SFEP的特点,制定如下定义。

定义4 关键词(key words, KW)。用于代表SFEP文本描述中,可进行形式化抽取和同类词汇表示,关键词是由表示相同含义的词汇组成的集合,由关键词组成的集合称为关键词组(key words set, KWS)。

KW是一类文本词汇的统一标识。用于在SFEP中因果关系组的抽象和形式化。将因果关系组代表的文本转化为因果关系组模式的符号序列。KW包括多种类型,连接词1、连接词2、原因词、结果词、原因部分、结果部分、其他关于符号部分。这些KW组成了KWS。

定义5 连接词1(link word 1, LW1)。用于表示SFEP中,归一和分支结构的与关系,即多个原因事件同时发生导致结果事件,一个原因事件同时导致多个结果事件。 $LW1=\{\text{并且, 且, 而且, 切, 以及, 加之, } \dots\}$, 这些词汇表示两事件并列及同时的与关系。

定义6 连接词2(link word 2, LW2)。用于表示SFEP中,归一和分支结构的或关系,即多个原因事件之一发生导致结果事件,一个原因事件导致其一或多个结果事件。 $LW2=\{\text{或者, 或, 要不, 之一, 都, } \dots\}$, 这些词汇表示两事件之一发生导致结果发生的关系,或导致可能的两个结果事件之一。

定义7 原因词(cause words, CW)。用于表示SFEP中引导原因事件的词汇。 $CW=\{\text{由于, 因为, 当, } \dots\}$, 这些词汇用于引导原因事件,是原因事件的标志。

定义8 结果词(result words, RW)。用于表示SFEP中引导结果事件的词汇。 $RW=\{\text{所以, 因此, 因而, 于是, } \dots\}$, 这些词汇用于引导结果事件,是结果事件的标志。

定义9 原因部分(cause part, CP)。用于表示SFEP中原因事件的描述。CP用于表示原因事件,可以是复杂的句式或短语等。

定义10 结果部分(result part, RP)。用于表示SFEP中结果事件的描述。RP用于表示结果事件,可以是复杂的句式或短语等。

其他关键词(other KW)包括动词性短语(verb phrase, VP)、名词性偏正短语(nominal partial phrases, NPP)、主语词(subject word, SW)。也可能存在其他类型的关键词,但这些关键词在因果关系组模式分析时不是必要的,或者出现几率很

小,因此均归于其他关键词。这些词即可作为CP也可作为RP。

定义 11 标点符号 (punctuation, Pun)。表示在 SFEP 中文本间的标点符号。标点符号可以判断事件间的因果关系,也用于因果关系组的划分, $Pun=\{, ; , \cdot , \dots\}$ 。

那么 $KWS=\{LW1, LW2, CW, RW, CP, RP, other\ KW, Pun\}$ 。当然这些词汇是在模型学习和实例分析过程中不断补充和丰富的。根据文献 [21-33] 给出的因果知识提取规则,结合 SFEP 特点,给出 6 种常见的因果关系组模式的表达形式。由于组模式是一系列符号表示的符号序列,为澄清关键词之间关系,引入 3 种符号:“\$”分割符号,表示关键词的分割;“|”并列符号,表示并列的 2 种形式,可选择之一;“{ }”跟随符号,表示之前关键词的补充或形式说明,多用于 CP 和 RP,是可选项。这 3 种符号之一即可进行划分。这 6 种符号序列形式为

1) $CW\$CP\{Pun|Pun\$LW1|Pun\$LW2\$CW\$CP\}Pnn\$RW\$RP\{Pun\$RP\}$

2) $CW\$VP\{Pun|Pun\$LW1|Pun\$LW2\$CW\$VP|NPP\}Pnn\$SW\$RP\{Pun\$RP\}$

3) $CW\$NPP\{Pun|Pun\$LW1|Pun\$LW2\$CW\$NPP\}Pnn\$RP\{Pun\$RP\}$

4) $CW\$CP\{Pun\$LW1|Pun\$LW2\$CW\$CP\}Pnn\$RP\{Pun\$RP\}$

5) $CW\$CP\{Pun\$CP\}Pun\$RP$

6) $CP\{Pun\$CP\$Pun|Pun\$NPP\}Pun\$LW1\$LW2\RP

这些符号序列可用于计算机对 SFEP 文本描述的智能处理,但过程需要借助关键词。当然 SFEP 中因果关系组模式并不限于这些形式,与关键字补充相同,也需要在模型学习过程中不断增加组模式。

4 因果关系组模式与 SFN 基本结构转换

上述过程完成了因果关系组模式的获取。得到的 6 种组模式具有一定代表性,是大部分因果关系组的基本模式,可表示 SFEP 中的大部分因果关系。完成转化的最后一步确定这 6 种模式与 SFN 基本结构的对应关系。根据第 1 节给出的 SFN 基本结构,结合 6 种组模式,得到它们对应的 SFN 基本结构如图 3 所示。

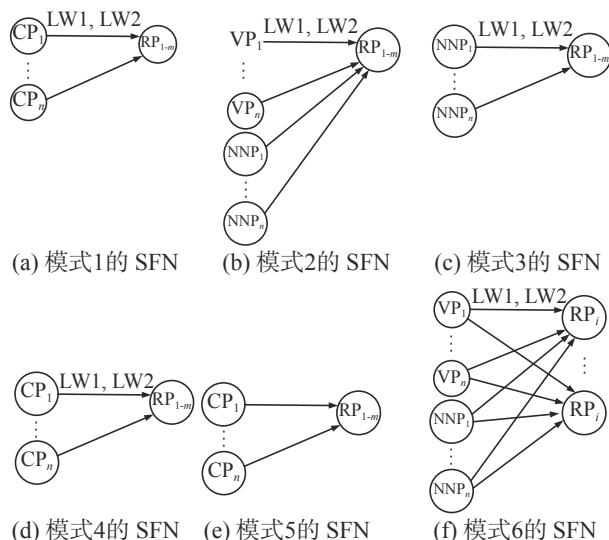


图 3 6 种组模式转化得到的 SFN 基本结构
Fig. 3 Basic structures of SFN transformed from the 6 group models

这种转化是在 SFN 建立过程中使用的,而不用用于 SFN 分析,进一步处理 SFN 并不涉及这些转化。处理方法:一是将 SFN 转化为 SFT 进行研究^[1-5],以便利用已有研究成果;二是 SFN 独立研究方法,即 SFN 结构化表示和分析方法。请参考相关文献,这里不做论述。

5 实例分析

完成了 SFEP 文本因果关系提取,及因果关系组模式与 SFN 基本结构的转化。本节针对经典飞机起落架故障发生过程的文本应用上述方法进行分析。

实例:由于机场地面温度过高,载荷过大且输入油有问题,作动筒自发收起。当锁键压簧力过大、电信号故障,这 2 个事件都能导致下位锁自动打开。由于下位锁自动打开和作动筒自发收起的同时发生导致机构本身失效。最终因为电信号故障、液压系统自发收起、机构本身失效引起了前起落架的自发收起。

首先,对该描述进行分解,以句号进行划分。得到如下 4 个因果关系组:

1) 由于机场地面温度过高,载荷过大且输入油有问题,作动筒自发收起。

2) 当锁键压簧力过大、电信号故障,这 2 个事件都能导致下位锁自动打开。

3) 由于下位锁自动打开和作动筒自发收起的同时发生导致机构本身失效。

4) 最终因为电信号故障、液压系统自发收起、机构本身失效都引起了前起落架自发收起。

对 1) 进行分析,由于 $\in CW$, 且 $\in LW1$; 机场

地面温度过高 (CP_1)、载荷过大 (CP_2)、输入油有问题 (CP_3) $\in CP$; 作动筒自发收起 (RP_1) $\in RP$ 。表示为组模式字符序列为 $CW\$CP_1PunPunCP_2LW1LW1CP_3\$Pun\$RP_1$ 。相当于 3 个原因事件 CP_1 、 CP_2 和 CP_3 同时发生时导致 RP_1 发生, 与图 3(a) 和图 1(c) 相同, 转化为 SFN 基本结构如图 4(a) 所示。

对 2) 进行分析, 当 $\in CW$; 都 $\in LW2$; 锁键压簧力过大 (CP_4) $\in CP$; 电信号故障 (VP_1) $\in VP$; 作下位锁自动打开 (RP_2) $\in RP$ 。表示为组模式字符序列为 $CW\$CP_4\$Pun|VP_1\$Pun\$LW1\$RP_2$ 。原因事件 CP_4 和 VP_1 同时发生时导致 RP_2 发生, SFN 基本结构如图 4(b) 所示。

对 3) 进行分析, 由于 $\in CW$; 和、同时 $\in LW1$; 下位锁自动打开 (VP_2), 作动筒自发收起 (VP_3) \in

VP ; 机构本身失效 (RP_3) $\in RP$ 。表示为组模式字符序列为 $CW\$VP_2LW1LW1VP_3LW1LW1RP_3$ 。原因事件 VP_2 、 VP_3 同时发生时导致 RP_3 发生, SFN 基本结构如图 4(c) 所示。

对 4) 进行分析, 因为 $\in CW$; 都 $\in LW2$; 电信号故障 (VP_1)、液压系统自发收起 (VP_4)、机构本身失效 (VP_5) $\in VP$; 前起落架自发收起 (RP_4) $\in RP$ 。表示为组模式字符序列为 $CW\$VP_1\$Pun|VP_4\$Pun|VP_5\$LW2\$RP_4$ 。SFN 基本结构如图 4(d) 所示。

图 4(a)~(d) 给出了转化的 SFN 基本结构, 又由于 $RP_3=VP_5$, $RP_2=VP_2$, $RP_1=VP_3$, 将 SFN 基本结构进行叠加, 得到图 4(e) 的 SFEP 完整 SFN 结构。可见该方法能将上述前起落架自发收起的 SFEP 文本描述转化成为完整的 SFN 结构。

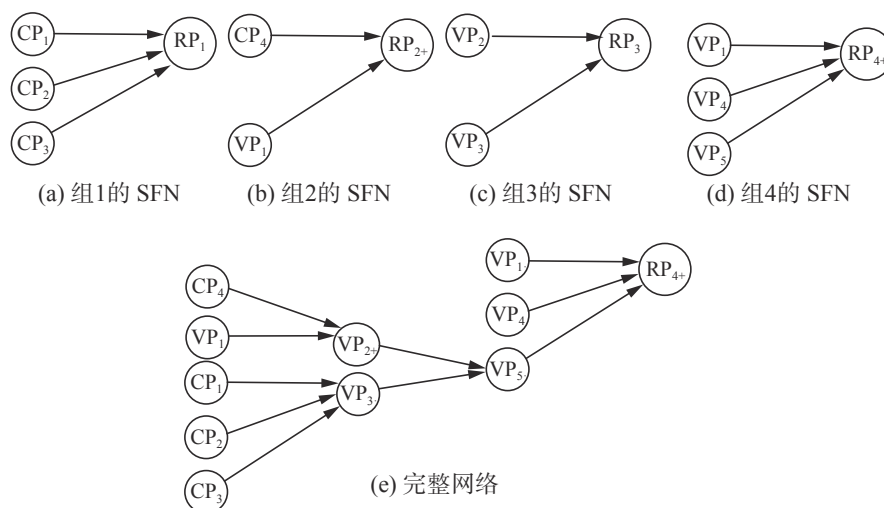


图 4 转化的 SFN 基本结构及完整网络

Fig. 4 Transformed SFN basic structure and complete network

本文主要解决 SFEP 描述文本转化为 SFN 的问题, 但只建立了方法的基本框架。由于该方法是依靠关键词和因果关系组模式进行文本到组模式字符序列的转化, 以及字符序列到 SFN 基本结构的转化。因此先期的关键字和组模式积累和学习是非常重要的。只有当关键字和组模式达到一定完备程度时方法才能用于计算机对 SFEP 的智能分析处理及 SFN 的完整结构建立; 且其学习过程需要人的协助。

6 结束语

论文主要研究了 SFEP 的文本描述转化为 SFN 结构的方法。主要结论如下:

1) 研究了 SFEP 中因果关系的 6 种基本形式, 包括单层传递、多层传递、归一与、归一或、分支与和分支或结构。这 6 种关系均可转化为 SFN 的对应结构用以表示 SFEP。但只有单层传递、归

一与和归一或结构在 SFN 分析中使用。

2) 研究了 SFEP 文本描述中的因果关系转化为对应 SFN 基本结构的流程。分为模型研究、模型学习和实例分析阶段。模型研究阶段主要是因果关系组划分, 确定关键词种类, 确定因果关系组模式, 模式与 SFN 基本结构的转化。模型学习阶段用于补充和丰富关键词种类和组模式种类。

3) 确定了主要关键词种类和组模式种类。关键词包括连接词、原因词、结果词、原因部分、结果部分、其他关键词和标点符号。关键词是对应词汇的集合, 可随着模型学习不断变化增加。给出了 6 种因果关系组模式的符号序列, 同样随着模型学习不断变化增加。将 SFEP 的因果关系组模式用符号序列表示有利于计算机智能处理。完成了因果关系组模式与 SFN 基本结构转换, 6 种组模式对应着 6 种 SFN 基本结构, 但这些转化只用于 SFN 表示 SFEP, 不用于 SFN 分析。

4) 以飞机起落架故障发生过程文本描述为例进行了应用。表明该方法可以有效地分析 SFEP, 划分因果关系组。按照关键词和组模式对划分的因果关系组进行转化。得到 4 个因果关系组模式的符号序列, 并转化为 SFN 基本结构, 最终叠加形成表示 SFEP 的完整 SFN。

参考文献:

- [1] 崔铁军, 李莎莎, 朱宝艳. 含有单向环的多向环网络结构及其故障概率计算 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7): 19–24.
CUI Tiejun, LI Shasha, ZHU Baoyan. Multidirectional ring network structure with one-way ring and its fault probability calculation[J]. China safety science journal, 2018, 28(7): 19–24.
- [2] CUI Tiejun, LI Shasha. Research on basic theory of space fault network and system fault evolution process[J]. *Neural computing and applications*, 2020, 32(6): 1725–1744.
- [3] 崔铁军, 李莎莎. 空间故障树与空间故障网络理论综述 [J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 399–405.
CUI Tiejun, LI Shasha. Revision of the space fault tree and the space fault network system[J]. Journal of safety and environment, 2019, 19(2): 399–405.
- [4] 崔铁军, 李莎莎, 朱宝艳. 空间故障网络及其与空间故障树的转换 [J]. 计算机应用研究, 2019, 36(8): 2000–2003.
CUI Tiejun, LI Shasha, ZHU Baoyan. Construction space fault network and recognition network structure characteristic[J]. Application research of computers, 2019, 36(8): 2000–2003.
- [5] CUI Tiejun, LI Shasha. Deep learning of system reliability under multi-factor influence based on space fault tree[J]. *Neural computing and applications*, 2019, 31(9): 4761–4776.
- [6] 崔铁军, 马云东. DSFT 的建立及故障概率空间分布的确定 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(4): 1081–1088.
CUI Tiejun, MA Yundong. Discrete space fault tree construction and failure probability space distribution determination[J]. *Systems engineering-theory and practice*, 2016, 36(4): 1081–1088.
- [7] 崔铁军, 马云东. 离散型空间故障树构建及其性质研究 [J]. 系统科学与数学, 2016, 36(10): 1753–1761.
CUI Tiejun, MA Yundong. Discrete space fault tree construction and application research[J]. Journal of systems science and mathematical sciences, 2016, 36(10): 1753–1761.
- [8] 崔铁军, 马云东. DSFT 中因素投影拟合法的不精确原因分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(5): 1340–1345.
CUI Tiejun, MA Yundong. Inaccurate reason analysis of the factors projection fitting method in DSFT[J]. *Systems engineering-theory & practice*, 2016, 36(5): 1340–1345.
- [9] CUI Tiejun, LI Shasha. Study on the construction and application of discrete space fault tree modified by fuzzy structured element[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(3): 6563–6577.
- [10] 崔铁军, 马云东. DSFT 下模糊结构元特征函数构建及结构元化的意义 [J]. 模糊系统与数学, 2016, 30(2): 144–151.
CUI Tiejun, MA Yundong. The construction of fuzzy structured element characteristic function and the significance of structure elemented in DSFT[J]. Fuzzy systems and mathematics, 2016, 30(2): 144–151.
- [11] 崔铁军, 马云东. 多维空间故障树构建及应用研究 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(4): 32–37, 62.
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on multi-dimensional space fault tree construction and application[J]. China safety science journal, 2013, 23(4): 32–37, 62.
- [12] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. 基于 ANN 求导的 DSFT 中故障概率变化趋势研究 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34(2): 449–452.
CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Research on method for trend of failure probability in DSFT based on ANN derivation[J]. *Application research of computers*, 2017, 34(2): 449–452.
- [13] 崔铁军, 汪培庄, 马云东. 01SFT 中的系统因素结构反分析方法研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(8): 2152–2160.
CUI Tiejun, WANG Peizhuang, MA Yundong. Inward analysis of system factor structure in 01 space fault tree[J]. *Systems engineering-theory and practice*, 2016, 36(8): 2152–2160.
- [14] 崔铁军, 马云东. 基于因素空间中属性圆对象分类的相似度研究及应用 [J]. 模糊系统与数学, 2015, 29(6): 56–63.
CUI Tiejun, MA Yundong. Research on the similarity of object classification of attribute circular and application based on factors space[J]. Fuzzy systems and mathematics, 2015, 29(6): 56–63.
- [15] LI Shasha, CUI Tiejun, LIU Jian. Study on the construction and application of cloudization space fault tree[J]. *Cluster computing*, 2019, 22(3): 5613–5633.
- [16] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. SFT 下云化因素重要度和因素联合重要度的实现与认识 [J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2109–2113.
CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Identification and realization of the cloud factor significance and the factor integration significance of the space fault tree[J]. Journal of safety and environment, 2017, 17(6): 2109–2113.
- [17] CUI Tiejun, WANG Peizhuang, LI Shasha. The function structure analysis theory based on the factor space and space fault tree[J]. *Cluster computing*, 2017, 20(2): 1387–1399.
- [18] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 完备与不完备背景关系中蕴含的系统功能结构分析 [J]. 计算机科学, 2017, 44(3): 268–273, 306.
CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. System function structure analysis in complete and incomplete background relationship[J]. *Computer science*, 2017, 44(3): 268–273, 306.
- [19] 崔铁军, 李莎莎, 王来贵. 基于属性圆的多属性决策云

- 模型构建与可靠性分析应用[J]. *计算机科学*, 2017, 44(5): 111–115.
- CUI Tiejun, LI Shasha, WANG Laigui. Multi-attribute decision making model based on attribute circle and application of reliability analysis[J]. *Computer science*, 2017, 44(5): 111–115.
- [20] 崔铁军, 李莎莎, 马云东, 等. 不同元件构成系统中元件维修率分布确定[J]. *系统科学与数学*, 2017, 37(5): 1309–1318.
- CUI Tiejun, LI Shasha, MA Yundong, et al. Determine component maintenance rate distribution in the system with different components[J]. *Journal of systems science and mathematical sciences*, 2017, 37(5): 1309–1318.
- [21] 张文辉, 赵文光. 基于数据挖掘的药物不良反应因果关系研究[J]. *中国数字医学*, 2019, 14(5): 43–45.
- ZHANG Wenhui, ZHAO Wenguang. Research on the causal relationship of adverse drug reactions based on data mining[J]. *China digital medicine*, 2019, 14(5): 43–45.
- [22] 舒晓灵, 陈晶晶. 重新认识“数据驱动”及因果关系——知识发现图谱中的数据挖掘研究[J]. *中国社会科学评价*, 2017(3): 28–38.
- SHU Xiaoling, CHEN Jingjing. Reconsidering ‘data driven’ and causal relationship: data mining in the spectrum of knowledge discovery in database[J]. *Social sciences in China review*, 2017(3): 28–38.
- [23] 李冰, 陈昊, 张永伟. 基于知识地图的文本分类方法[J]. *指挥信息系统与技术*, 2018, 9(1): 92–95.
- LI Bing, CHEN Ao, ZHANG Yongwei. Text classification method based on knowledge map[J]. *Command information system and technology*, 2018, 9(1): 92–95.
- [24] 潘洋彬. 基于知识图谱的文本分类算法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- PAN Yangbin. Research on text classification algorithm based on knowledge graph[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [25] 方欢, 张源, 吴其林. 一种基于结构因果关系和日志变化挖掘的 BPMSs 故障诊断方法[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(8): 1167–1176.
- FANG Huan, ZHANG Yuan, WU Qilin. A log induced change mining method for fault diagnosis using structure causality in BPMSs[J]. *Control theory and applications*, 2018, 35(8): 1167–1176.
- [26] 何绯娟, 石磊, 缪相林. MOOC 学习行为数据中因果关系的挖掘方法[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2018(21): 129–131.
- HE Feijuan, SHI Lei, MIAO Xianglin. Mining causality from learning behavior in MOOC[J]. *China computer and communication*, 2018(21): 129–131.
- [27] QIU Jiangnan, XU Liwei, ZHAI Jie, et al. Extracting causal relations from emergency cases based on conditional random fields[J]. *Procedia computer science*, 2017, 112: 1623–1632.
- [28] 余青山, 陈希豪, 高发荣, 等. 基于感兴趣脑区 LASSO-Granger 因果关系的脑电特征提取算法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(5): 1266–1270.
- SHE Qingshan, CHEN Xihao, GAO Farong, et al. Feature extraction of electroencephalography based on LASSO-Granger causality between brain region of interest[J]. *Journal of electronics and information technology*, 2016, 38(5): 1266–1270.
- [29] HUNG Yingchao, TSENG N. Extracting informative variables in the validation of two-group causal relationship[J]. *Computational statistics*, 2013, 28(3): 1151–1167.
- [30] 刘现营. 面向医疗知识的 PDF 文本内容提取系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- LIU Xianying. Design and implementation of PDF text content extraction system for medical knowledge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [31] 黄新平. 政府网站信息资源多维语义知识融合研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- HUANG Xinping. Study on multi-dimensional semantic knowledge fusion of government website information resources[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [32] 唐静华. 基于特征项权重与句子相似度的知识元智能提取技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- TANG Jinghua. Research on intelligent extraction of knowledge element based on feature item weight and sentence similarity[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [33] 李悦群, 毛文吉, 王飞跃. 面向领域开源文本的因果知识提取[J]. *计算机工程与科学*, 2010, 32(5): 100–104.
- LI Yuequn, MAO Wenji, WANG Feiyue. Causal knowledge extraction based on open source domain texts[J]. *Computer engineering and science*, 2010, 32(5): 100–104.
- [34] 何华灿. 重新找回人工智能的可解释性[J]. *智能系统学报*, 2019, 14(3): 393–412.
- HE Huacan. Refining the interpretability of artificial intelligence[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2019, 14(3): 393–412.
- [35] 何华灿. 泛逻辑学理论——机制主义人工智能理论的逻辑基础[J]. *智能系统学报*, 2018, 13(1): 19–36.
- HE Huacan. Universal logic theory: logical foundation of mechanism-based artificial intelligence theory[J]. *CAAI transactions on intelligent systems*, 2018, 13(1): 19–36.

作者简介:



崔铁军, 副教授, 主要研究方向为系统可靠性及力学系统稳定性。提出和建立了空间故障树理论及空间故障网络理论, 获得多个期刊优秀论文奖。授权发明专利 20 项。发表学术论文 100 余篇, 出版学术专著 5 部。



李莎莎, 讲师, 主要研究方向为系统可靠性及安全管理。授权发明专利多项, 获得多项省级期刊优秀论文奖。发表学术论文 10 余篇, 出版学术专著 3 部。