

基于文献计量的模糊数学在安全系统工程中的应用研究^{*}

谭智仁^{**} 陈沅江

(中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘要:为探究模糊数学在安全系统工程领域的应用现状,以进一步丰富安全系统工程的内涵和方法体系,首先运用文献计量法和内容分析法,从时间视角出发分析模糊数学应用于安全领域的相关文献数量的宏观分布特征,然后在此基础上从研究内容、方法类别和应用行业 3 方面分析其微观分布特征,最后针对模糊数学的具体方法及其在安全领域的应用现状进行归纳分析和展望。结果表明,模糊数学在安全系统工程领域的研究热点集中于多维度因素、人因关联、因素可变等条件下的安全问题评估等方面,但由于模糊数学方法的不完备性、应用混乱等不足,模糊数学在安全系统工程中的应用逐渐进入瓶颈期,需从模糊数学方法体系、评价指标体系建设等方面进行改进。

关键词:模糊数学;安全系统工程;文献分布特征;研究热点;瓶颈期

中图分类号:X913.4 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2017.03.020

Application Research of Fuzzy Mathematics in Safety System Engineering Based on Bibliometrics^{*}

TAN Zhiren^{**} CHEN Yuanjiang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract:To explore the application status of fuzzy mathematics in the field of safety systems engineering and to further enrich the connotation and method system of safety system engineering, firstly, the bibliometric method and content analysis method were used to analyze the literature number of fuzzy mathematics that applied in safety field through the time angle. Then the micro-distribution characteristics were analyzed in three aspects: research content, method category and application industry. Finally, prospect of the fuzzy mathematics' concrete method and application in security field were summarized. The results showed that the research of fuzzy mathematics in safety system engineering was focused on the security problems under the multi-dimensional factors, human association and variable factors etc. However, due to the incompleteness and confusion of fuzzy mathematics, the application of mathematics in safety system engineering had gradually entered the bottleneck period, so some improvement should be done through the aspects of fuzzy mathematics method system and evaluation index system construction.

Key words: fuzzy mathematics; safety system engineering; document distribution characteristic; research hot spot; bottleneck period

1 引言

安全系统工程是运用系统工程的方法使系统安全性达到最佳状态的综合性技术科学^[1]。由于系统构成及其部分间的相互关系具有模糊性,且安全和危险是一对相对概念,也具有模糊性。因此,对系统进行危险因素识别及安全评价时,利用经典精确数学方法获得的定量分析及评价结果与实际情况存在较大误差。为解决这种模糊现象问题,需要将模

糊数学引入到安全系统工程中。

自 1965 年美国控制论专家 L. A 扎德提出模糊集理论以来,模糊数学已广泛应用于信息、农业、生物、工程、环境、安全等领域。当前,安全问题研究更加显现出非线性、动态、分形、混沌、开放和不确定性等特征^[1],基于模糊数学的安全系统工程研究方法将发挥越来越重要的作用。但目前还缺少相关文献对模糊数学在安全系统工程中的应用情况进行系统性的梳理和阶段性总结。

综上,本文结合文献计量法和内容分析法,基于模糊数学在安全领域应用的相关文献,尝试分析模糊数学方法在安全系统工程中的应用现状及不足之处,并对其未来的研究方向进行展望。

2016-09-13 收稿,2016-11-24 接受,2017-03-22 网络发表

^{*} 国家自然科学基金(51274251)资助

^{**} 通讯作者, E-mail: 102775395@qq.com; Tel: 15173157273

2 文献统计与分析

为了解模糊数学在安全系统工程中的应用状况,本文以在安全系统工程领域内所发表的与模糊数学方法相关的文献为研究对象,从文献数量这一宏观角度进行分析。

以“模糊”为主题,对 CNKI 数据库近年收录的文献进行检索,并将学科领域限定为“安全科学与工程防治”。经检索发现,2001 年以前的文献数量偏少,因此将检索的发表时间限定在 2001 ~ 2015 年。同时,以“fuzzy”和“safety or risk”为主题,地区精炼为“China”,对 Web of science 收录的 2001 ~ 2015 年文献进行检索。两次检索时间都为 2016 年 9 月 13 日,并将两次检索结果汇总,剔除其中内容不符或重复的,最后统计得到文献共 3929 篇。文献数量按收录年份统计,如图 1 所示。

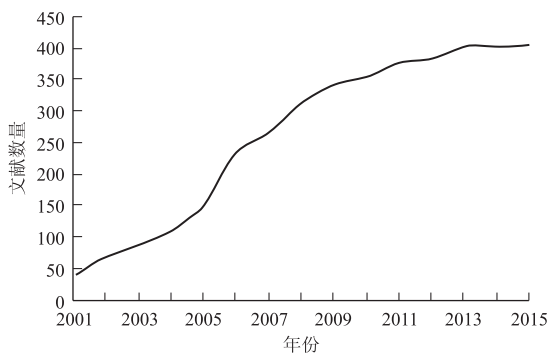


图 1 安全领域的模糊数学相关文献在时间上的分布

由图 1 可知,2001 ~ 2015 年间安全系统工程领域中运用模糊数学方法的文献数量迅速增长,其中 2015 年的文献量已超过了 400 篇,是 2001 年的 10 倍左右。这反映出模糊数学方法在安全系统工程中的应用已得到人们的重视,研究热度越来越高。从增长趋势上看,模糊数学的相关文献经历了三个增长过程:2001 ~ 2005 年间,文献数量稳步增加;2005 ~ 2009 年间,文献数量迅速攀升;2009 ~ 2015 年间,文献数量增长迅速变缓,甚至在 2014 年还略有减少。这说明模糊数学在安全系统工程中的应用在 2001 ~ 2005 年属于初步阶段。到了 2005 ~ 2009 年期间,模糊数学的应用进入快速推广阶段,已成为处理安全系统中复杂模糊信息的重要方法。但是由于模糊数学方法本身的不完备性、模糊算子的缺陷及方法体系的不完善等问题^[2],导致模糊数学应用的混乱及结果的不科学。因此,2009 ~ 2015 年间,模糊数学应用增长速度变缓。综上,尽管当前模糊数

学应用在安全系统工程中的研究热度还比较高,但若这些问题不被及时解决,模糊数学的应用将逐渐进入“瓶颈期”。

接着基于文献数量,从研究内容、方法类别和应用行业 3 方面进一步深入分析。

1)从研究内容上分析

检索得到的 3929 篇文献在“系统安全分析”、“系统安全评价”、“事故风险预测”和“安全决策与控制”4 个主要研究内容上的分布情况如图 2 所示。由图 2 可知,系统安全分析与系统安全评价是安全领域中运用模糊数学的主要研究内容,而事故风险预测和安全决策与控制方面的研究较少。这符合安全系统工程中“系统安全评价以系统安全分析为基础,而安全评价为决策或预测提供依据”^[1]的特征。另外事故风险预测和安全决策与控制相关文献数量过少,反映出人们对“预先分析系统危险”的重视程度还不够:受企业规模、资金、教育水平、社会环境等因素所限,当前还有很多企业不够重视安全管理工作,忽视系统危险隐患“早发现,早预警”的积极应对机制的建设,通常表现出“出事故再补救”、“评价应付检查”的被动态度。

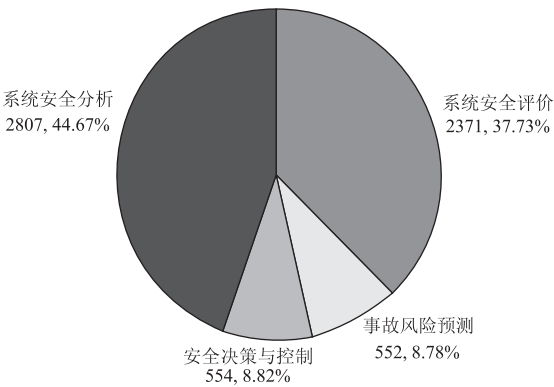


图 2 安全领域的模糊数学相关文献在研究内容上的分布

2)从方法类别上分析

将检索得到的 3929 篇文献按方法类别进行统计,分布情况见表 1。模糊综合评价法、模糊逻辑与控制 and 模糊聚类与模式识别是模糊数学方法的主要内容,由表 1 可见,这 3 种方法的相关文献数量共占了 64.7%,是应用到安全系统工程中的主要模糊数学方法。其中,运用模糊综合评价法的相关文献最多,占到 51.4%。模糊综合评价法是基于模糊集合映射和变换的能进行综合决策的有效数学工具,能真实反映出各因素在整体中的地位,特别适用于评价多因素对象。安全系统评价要综合分析和评价系

统的工艺、设备、设施、环境、人员、文化、管理和资金等各方面的状况。当系统结构复杂时,需要先将系统划分为若干评价单元,通过评价单元再逐步推算得到安全系统的危险水平。定性或定量评价方法在单独使用时都存在明显的缺陷,只有将两者相结合的综合评价法才能准确反映出系统的安全状态,模糊综合评价方法无疑是此类方法中的典型。模糊综合评价法相关文献所占比例过半,反映出人们比较认可安全系统工程中的“从系统整体出发研究问题”这一方法论,即系统性思维已成为安全工作者的共识。

表 1 各模糊数学方法类别的应用情况

模糊数学方法	文献数量	所占比例	模糊数学方法	文献数量	所占比例
模糊综合评价法	2019	51.4%	可变模糊理论	71	1.8%
模糊集合理论	609	15.5%	模糊决策	63	1.6%
模糊逻辑与控制	279	7.1%	模糊数据融合	39	1.0%
模糊聚类与模式识别	244	6.2%	直觉模糊数	28	0.7%
模糊事故树	138	3.5%	其他	439	11.2%

另外,模糊集合理论相关文献占到 15.5%。这一方面反映出模糊数学强大的包容性,能将经典数学方法“融入进来”,不冲突。另一方面也指明了将模糊数学与其他数学方法结合,发挥各方法优势这一重要应用方向。事故树分析是应用非常广泛的安全分析方法,但模糊事故树相关文献数量只占 3.5%,说明该方法目前存在某些未解决问题,在方法应用推广方面还需进一步研究。此外,可变模糊理论、直觉模糊数和模糊数据融合等方法也有较多应用,其中可变模糊理论和直觉模糊数都是基于模糊数学改进得到的方法,这反映出人们一直在对模糊数学方法进行完善。将改进后的模糊数学应用到安全系统工程中已是重要的研究方向。

3)从应用行业上分析

按照行业类别,对检索得到的 3929 篇文献进行统计,得表 2。由表 2 可见,模糊数学在安全领域的应用情况与各行业对安全的重视程度基本相符。矿山、交通、消防、石化等行业都是安全事故发生率非常高的行业,所面临的安全问题更加复杂模糊,这些行业已经在广泛应用模糊数学分析问题,模糊性思维已基本形成。而核安全领域的文献数量较少,且集中在对稳压器及反应堆等装置的模糊控制中的应用。这说明矿山、石化等“粗犷型”行业对评价结果精确度要求不高,因此模糊数学应用程度较高,而如航空工业、核工业等“精细型”行业对评价结果精确度要求高,因此模糊数学应用率较低。另外值得提

出的是,随着模糊数学方法的应用,有关人的可靠性、安全素质等模糊性问题得到了进一步的研究,人们开始增强对人的不安全行为及状态的量化描述,这是未来人因安全问题研究的重要发展方向。

表 2 安全领域的模糊数学相关文献数量在行业类别上的分布

类别名称	文献数量	具体研究问题
矿山安全	1258	瓦斯爆炸或突出风险、透水事故、通风系统安全评价、煤自燃风险、矿井火灾风险、矿山企业安全评估、应急救援路径求解、矿井监测等
交通安全 (包括危险品运输)	645	公路、铁路及水运企业安全评估、危险货物运输及办理站风险、船舶或车辆安全、路况或港口安全、民机超限事件诊断、船舶航运及撞桥风险等
消防安全	272	火灾事故分析、火灾探测及报警系统、灭火系统可靠性、火灾风险分析及识别等
石油化工安全	267	油气管道风险、化工作业安全、化工企业或园区安全、石油库或储罐安全、化工过程本质安全、反应路径优选、安全应急演练等
城市公共安全	259	应急预案评价、应急救援和资源调度、人员安全疏散及模拟仿真、城市火灾风险、大型活动和突发事件应急预案、河道洪水预报等
一般生产 工业安全	237	生产车间安全、生产作业安全、企业安全评估等
建筑安全	250	建设项目安全、施工安全、建筑安全管理等
航空安全	215	飞行安全、机场安全、航空企业安全评估、空管系统安全等
特种作业及 设备安全	193	重大危险源、起重机、升降机、压力容器、水工作业等
自然灾害	175	洪水、气象、地质等灾害
人的可靠性 及安全状态	92	舒适度、可靠性、安全素质、失误风险评价、疲劳状态识别等
核安全	66	反应堆控制及监控、稳压器控制及监测等

3 几种典型模糊数学方法的应用

根据表 1,选出相关文献数量最多的 5 种模糊数学方法,即模糊综合评价法、模糊集合理论、模糊逻辑与控制、模糊聚类与模式识别及模糊事故树,深入分析其在安全领域的应用情况。

3.1 模糊综合评价法

模糊综合评价法通过建立一套能反映评价对象本质的指标体系,然后将所有指标信息逐层向上融合成一个能评价系统整体状态的综合性指标^[3],过程简单,可操作性强,能减少评价的主观性,在解决多层次多因素评价问题上有巨大的优势,是目前使用最多的安全评价方法。模糊综合评价法的研究热点主要集中在 3 个方面:如何建立更全面合理的多层次评价因素体系,怎样确定好各因素的权重,怎么更好地处理指标隶属度的转化问题等。

1)越全面合理的评价指标体系,越能反映出评价目标的内在性质,评价结果越符合实际。有的安

全评价对象非常复杂,且掌握的资料有限,导致其评价指标体系不完整,系统性较差,结构混乱^[4],甚至某些评价因素的归属层次难以确定,各层次间的逻辑关系难以描述,从而评价结果难以满足安全生产的要求。目前评价指标体系的建立通常是基于评审专家的工作经验,这对评审专家的专业要求非常高,且评价结果的主观性误差较大,因此有人尝试用非参数检验等定量化方法来减少误差^[5],但对评价对象资料的完整性要求较高。因此,如何确保评价指标体系的完整性、合理性、科学性依然会是重要的研究方向。

2)确定权重的方法众多,其中定性的方法有德尔菲法^[6]、专家排序法^[1]等,定量的方法有主成分分析法^[7]、因子分析法^[8]、G1 法^[9]、神经网络^[10]、遗传算法^[11]、熵权法^[12]等,还有定性定量相结合的层次分析法^[13]。其中,层次分析法能结合专家判断,对指标进行定量化赋权,是目前使用最多的权重确定方法。确定权重的方法研究可以从权重可变、降低误差、非线性描述等方面进行。

3)隶属度函数的转换是将所有评价因素的隶属度从下往上逐步融合,从而得到评价目标隶属度的关键过程。当前应用较多的隶属度转换方法有: $M(V, \wedge)$ 、和 $M(\cdot, V)$ 、 $M(\wedge, \oplus)$ 和 $M(\cdot, +)$,其中 $M(\cdot, +)$ 获得更多的认可^[14]。但信息融合的过程还存在信息缺失、结果分布过均匀^[15]、去模糊化时会产生误差等问题,这都需要进一步去研究。

4)将模糊综合评价法与神经网络等计算机技术相结合,能提高评价方法解决问题的能力和效率^[4]。建立数据库储存有关设备、设施、环境、人等的相关数据,利用模糊逻辑理论构建人工智能专家

系统,实现安全评价中推理、判断和决策过程的自动化,既能减少评价专家的主观误差,也能提高评价的效率^[16]。这些都可能是未来重要的研究方向。

3.2 模糊集合理论

传统数学分析方法在安全系统工程中的应用已经比较成熟,具有不可替代性的优势,但由于这些方法都是建立在经典精确数学基础上的,无法处理模糊性和不确定性问题,因此需要将这些传统方法与模糊数学相结合。这类分析方法主要有模糊证据理论^[17]、模糊神经网络理论^[18]、模糊物元分析法^[19]、模糊灰色理论^[20]、模糊支持向量机^[21]、模糊马尔科夫链^[22]等,归纳这些方法在用模糊数学改进前后的变化情况,如表 3 所示。

综上,将传统数学分析方法与模糊集合理论相结合,不但能继续发挥其方法优势,而且能处理模糊性问题,使结果更加合理。这种形式的综合性数学分析方法依然是模糊数学在安全领域应用的重要形式。

3.3 模糊逻辑与控制

模糊逻辑与控制理论是一种近似于人的思维方式的推理方法,主要由模糊规则库、模糊推理机、模糊化和去模糊化四部分组成^[3]。其中,模糊规则库是模糊逻辑推理系统的核心,通常以 If - Then 的语法形式构建可能性与风险语言值间的逻辑关系。与矩阵方法相比较,模糊逻辑与控制方法更加灵活,更适合特殊性、非线性、模糊性及人因相关性等问题的研究。为进一步分析,将表 1 中统计得到的 279 篇模糊逻辑与控制相关文献按行业类别分类,结果如表 4 所示。

表 3 用模糊数学改进后的传统数学方法与原方法的对比情况

方法名称	原方法特点	用模糊数学改进后的特点	主要应用领域
模糊证据理论	能处理不确定性信息,且不需要精确的概率函数,能实现多数据源的信息融合。	能处理元素与论域间模糊的隶属关系,且基本概率赋值函数、模糊焦元等的确定更加合理。	煤层底板突水量预测等
模糊神经网络理论	有较强的自学习和非线性映射能力,人工干预少,但其求解过程不具有可解释性。	专家经验知识利用率提高,在输入输出关系映射层中采用模糊规则推理,提高可解释性和容错性。	瓦斯突出预测、火警预测、底板透水判别等
模糊物元分析法	主要用于解决不相容问题,物元关联函数的逻辑值扩展到了 $(-\infty, +\infty)$,保证了信息的完整性。	物元中的量值具有模糊性,引入贴近度概念增加了关联函数的优选效果。	方案优选、风险评价、瓦斯突出预测等
模糊灰色理论	研究部分信息不清楚的不确定现象。	可以研究不确定性和模糊性现象,且引入灰色理论信息差异原理可放大信息差异性,提高评价效果的准确性。	火灾风险评价、通风方案优选等
模糊支持向量机	利用非线性映射将输入信息映射到高维特征空间,实现模式识别。	提高了对含有模糊信息样本的的分类的精度。	瓦斯突出预测、底板透水预测等
模糊马尔科夫链	研究事物的状态及其转移,具有无后效性。	实现对具有状态模糊与过程模糊的对象的预测。	煤矿预警、涌水量预测等

表 4 模糊逻辑与控制方法在各行业中的应用情况		
应用领域	文献数量	具体应用
矿山安全	102	通风系统安全评价、应急救援路径求解、瓦斯爆炸或突出风险、矿井监测等
消防安全	47	火灾探测及报警系统、火灾风险分析及识别等
交通安全 (包括危险品运输)	43	公路安全评估、船舶航运及撞桥风险、民机超限事件诊断等
核安全	40	反应堆功率控制、稳压器控制等
石油化工安全	22	反应路径优选、本质安全评价、安全应急演练等
城市公共安全	14	应急救援和资源调度、人员疏散模拟仿真、河道洪水预报等
人的可靠性及安全状态	11	失误风险评价、疲劳状态识别等

如表 4 所示,由于模糊逻辑与控制方法在处理涉及到人的行为和认知等模糊性复杂问题时具有灵活性和有效性等优势,因此当前已经被广泛应用到交通安全评价、矿山瓦斯监控、火灾预测等领域。危险源的监控及风险评估是个大量信息融合的过程,在对火灾发生、瓦斯突出等进行预测时,模糊逻辑与控制方法能合理融合众多传感器的信息,提高探测预警的可靠性,但模糊推理规则的制定无法避免主观因素的影响,需尽量减少其间产生的主观误差。综上,多种传感器的信息融合是智慧矿山、智慧城市、复杂工业系统及桥梁、隧道、铁路等重要基础设施实现智能监测和数据处理的重要技术基础,因此基于模糊逻辑推理的安全监测技术将是重要的研究方向。

3.4 模糊聚类与模式识别

模糊划分的概念最早是由 Ruspini 提出的,基于此概念,后人又提出了多种模糊聚类方法。其中基于目标函数的聚类方法具有数据处理量大、可操作性强、能将复杂问题转换成函数优化问题、便于计算机实现等优点,已被广泛应用于安全系统工程中,如模糊 C 均值聚类法、模糊 K 均值聚类法等。目前模糊聚类与模式识别的研究热点集中在模糊 C 均值聚类方法的应用与改进上,归纳其中部分代表性成果,如表 5 所示。

模糊聚类分析能将复杂信息按照数学准则进行分类,研究的目的是梳理“混乱无章”的数据,建立可供参考的分类或分级标准。而模糊模式识别更侧重在已有分级标准的基础上,将特定的数据进行归类,是个将模糊集清晰化的过程,并能使得待分类对象对于分级标准的隶属度更加离散化^[15]。因此这两种方法具有互补性,将模糊模式识别与模糊聚类分析相结合,能进行风险评级、预测和安全评估,已广

表 5 模糊 C 均值聚类法应用的部分代表性成果		
方法缺陷	解决办法	主要应用领域
过分依赖初始聚类中心的选择,容易陷入局部循环	采用减法聚类法,利用数据密度确定初始聚类中心 ^[23] 。	煤与瓦斯突出预测等
	利用模拟退火算法 ^[24] 、蚁群算法 ^[25] 和遗传算法 ^[26] 的全局搜索能力,优化初始聚类中心。	煤矿火灾早期识别、煤与瓦斯突出预测等
不适合非线性类型数据的分类	利用核函数替代欧式距离来建立目标函数,将非线性数据映射到高维特征空间,增加数据线性分类概率 ^[27] 。	变电站设备故障自动监测等
需考虑不同指标对聚类结果的影响	将指标权重向量引入广义距离公式,构建可变模糊聚类循环迭代模型,求得最优聚类中心 ^[28] 。	城市生命线系统节点重要性评价等

泛应用于灾害分类^[29]、灾情等级识别^[30]、火灾探测系统^[31]、操作员疲劳状态识别^[32]、突水源判别^[33]、煤与瓦斯突出预测^[34]等领域。但在对瓦斯突出、涌水等事故进行预测时,模糊聚类分析与模式识别方法对历史数据的完整性和准确性要求较高,任何异常数据都可能影响模糊相似矩阵的可靠性,从而可能聚类得到错误的模式库结构,影响预测结果的正确性。虽然运用模糊神经网络能很好地识别出异常数据^[35],但受历史数据的完整性影响也较大,还需要进一步深入研究。

3.5 模糊事故树

自 D. Singer 将模糊数引入事故树后,模糊事故树已经广泛应用于安全系统工程中,能有效描述系统中存在的局部正常、局部故障、人失误概率等模糊信息,当前主要应用于火灾爆炸^[36]、特种设备^[37]、瓦斯爆炸^[38]、施工现场^[39]、重大危险源^[40]等的风险概率分析。目前模糊事故树的研究热点集中在模糊数、模糊算子、模糊重要度等方面,归纳其中具有代表性的研究成果,如表 6 所示。

表 6 模糊事故树部分代表性成果		
研究内容	代表人物	研究成果的创新点
模糊数	高明等 ^[41]	提出新的交并模糊算子,较好的解决底事件为不同类型隶属函数时的交叉耦合计算问题。
	谢正文等 ^[42]	提出一种基于积分值法的模糊数清晰化处理的方法。
模糊算子	蒋卫东等 ^[43]	将逻辑关系模糊化。
	黄洪钟等 ^[44]	将模糊逻辑方法应用于事故树分析。
	宋华等 ^[45]	提出了基于 T-S 模型模糊推理的故障分析方法。
模糊重要度	袁龙洲等 ^[46]	提出了一种快速数值算法,快速高精度计算顶事件失效概率模糊数,较好解决了由扩张原理计算带来的计算量膨胀问题。
	王大庆等 ^[47]	考虑了基本事件的相关性。

由表 6 可知,当前模糊事故树的研究在事件间联系的不确定性、基本事件相关性、计算量膨胀化、

模糊数规范化处理等问题上取得初步进展。但模糊事故树的计算过程比较繁琐,需要具备良好的数学基础,可操作性降低。另外某些模糊算子,如交并运算不满足互补律,无法描述事故树中的“非”门。综上,模糊事故树在简化计算量、自动编制、完善模糊算子及数据库的建立等方面尚待进一步研究。

4 结论与展望

模糊数学方法在安全系统工程中的应用效果主要表现为两方面:1)模糊数学能实现数据信息和语言信息的有效融合,促进了定性分析及评价方法的定量化改进,而且解决了因统计数据不完善而难以进行分析评估的难题,从而提高了安全系统工程在各行业的应用效果和适用性。2)从方法论角度讲,模糊数学提供了描述模糊现象的工具,促使人们正确认识和处理模糊现象,且普及了模糊性安全思维,从而提高了人们对安全系统工程理论的认识水平。

但模糊数学在安全系统工程中的应用率正在下滑,逐渐进入了“瓶颈期”,其中的原因可归纳为 3 方面:1)利用模糊数学对安全检查表、HAZOP 分析法、FEMA 等安全定性方法进行改进时,没有取得明显的改善效果。改进后的分析方法原理没有变,只是将定性的描述换成数学形式的描述,属于“换汤不换药”,即虽然分析的结果更加贴近实际,但一般不会影响结论。最重要的是,引入模糊数学会带来繁琐的计算量,可操作性不强,不利于方法的推广应用。2)由于隶属度函数及模糊算子的种类太多,且缺少评价算法优劣的标准和方法使用条件的说明,造成隶属度函数和模糊算子应用混乱的状况。3)模糊数学方法存在不完备性问题,在排中律、补集等方面还存在争议。

综上,模糊数学方法在安全系统工程中的应用需要扬长补短,应从 3 个方面进行改进:

1)发挥模糊数学对语言、判断等模糊变量的数学描述能力,充分利用评审专家的经验和知识,提高模糊数学评价方法的灵活性并扩大其适用范围。这需要做好前期准备工作,如对安全评价指标体系进行梳理和完善;对模糊逻辑推理中的规则库进行完善和校对;建立安全系统工程资料库,储备各行业认可度高的评价判断标准等。

2)完善模糊数学方法体系,对隶属度函数转换、权重确定、模糊算子选取等方法的使用条件进行梳理,并对各方法的优劣性进行评价,改善模糊数学

应用的混乱状况。另一方面,进一步改进模糊数学理论,如直觉模糊数、可变模糊理论等,或结合清晰数、云理论等其他数学方法来弥补模糊数学方法的缺陷。

3)利用模糊推理的信息映射能力强和方法灵活等优势,完善专家知识库建设,结合神经网络、支持向量机、Petri 网等计算机技术,建立安全评价、风险监测和预测专家系统,提高在大数据背景下安全系统工程中的数据挖掘和应用水平。

参考文献

- [1]徐志胜.安全系统工程[M].1版.北京:机械工业出版社,2007.
- [2]高庆狮.Zadeh 模糊集合理论存在问题证明及其改进——一个满足全部经典集合公式的 C-模糊集合系统[J].大连理工大学学报,2005,45(5):772-780.
- [3]杨纶标,高英仪.模糊数学原理及应用[M].4版.广州:华南理工大学出版社,2011.
- [4]吴丽萍.模糊综合评价方法及其应用研究[D].太原:太原理工大学,2006.
- [5]CHEN F,WANG J,DENG Y. Road safety risk evaluation by means of improved entropy TOPSIS-RSR[J]. Safety Science,2015,79:39-54.
- [6]张光权,崔波.基于模糊层次法的炮采工作面安全性评价研究[J].中国安全生产科学技术,2012,8(5):87-90.
- [7]范文,刘雪梅,高德彬,等.主成分分析法在地质灾害危险性综合评价中的应用[J].地球科学与环境学报,2001,23(4):53-57.
- [8]唐红梅,廖学海,陈洪凯.基于因子分析法的公路洪灾模糊概率综合评价模型[J].中国安全科学学报,2015,25(2):141-146.
- [9]刘建,郑双忠,邓云峰,等.基于 G1 法的应急能力评估指标权重的确定[J].中国安全科学学报,2006,16(1):30-33.
- [10]王志军,郭忠平,李勇.基于神经网络的安全评价指标重要度判定方法及应用[J].中国安全科学学报,2005,15(12):21-24,137.
- [11]董四辉,宿博.层次分析法的改进方法在煤矿安全评价中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,31(5):690-694.
- [12]杨玉中,吴立云,丛建春.基于熵权的煤矿运输安全性模糊综合评价[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(4):257-259.
- [13]张江华,郑小平,彭建文.基于模糊层次分析法的应急能力指标权重确定[J].安全与环境工程,2007,14(3):80-82.
- [14]魏效玲,薛冰军,曹庆奎.矿山安全性模糊综合评价的新算法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(2):212-215.
- [15]刘爱华,施式亮,吴超.基于模糊模式识别的系统安全模糊综合评价[J].工业安全与环保,2006,32(5):34-36.
- [16]王中亚.金属非金属地下矿山安全评价专家系统的研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [17]肖建于,童敏明,姜春露.基于模糊证据理论的煤层底板突水量预测[J].煤炭学报,2012,37(S1):131-137.
- [18]孙明,张文泉,郭启忠,等.基于模糊神经理论的深井煤层底板

- 突水因素研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2011, 26(4): 5-10.
- [19] 王燕杰. 基于模糊物元分析的煤与瓦斯突出预测[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [20] 马跃, 臧亚丽, 余金龙. 模糊灰色关联评价法在企业安全文化建设中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(8): 9-13.
- [21] 杨力, 耿纪超, 汪克亮. 模糊支持向量机在煤与瓦斯突出预测中的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(4): 103-108.
- [22] 姜学鹏, 徐志胜, 冷彬. 火灾预测的模糊马尔柯夫模型[J]. 灾害学, 2006, 21(3): 27-32.
- [23] 赵芳, 孟凡荣. 基于 RBF 网络的煤与瓦斯突出预测研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(3): 29-30, 14.
- [24] 王涛波, 黄宝军. 改进模糊聚类算法在航迹分析中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(2): 23-27.
- [25] 贾志娟, 胡明生, 刘思. 基于蚁群聚类的历史灾害分级方法[J]. 计算机应用, 2012, 32(4): 1030-1032, 1049.
- [26] 张同婕, 曹妍, 牟向伟. 危险品运输风险监测和控制系统[J]. 计算机应用, 2015, 35(S1): 138-141.
- [27] 蔺丽华. 基于红外成像的变电站设备安全预警关键技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014.
- [28] 张明媛, 王妍, 袁永博. 基于可变模糊聚类模型的生命线网络节点重要性评价[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(6): 19-25.
- [29] 马咏真. 模糊聚类分析在中国火灾危害分类中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(4): 414-418.
- [30] 孙峥, 庄丽, 冯启民. 风暴潮灾情等级识别的模糊聚类分析方法研究[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(4): 49-54.
- [31] 张锡民. 基于模糊聚类的火灾信号探测研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2004.
- [32] ZHANG J H, PENG X D, LIU H, et al. Classifying human operator functional state based on electrophysiological and performance measures and fuzzy clustering method[J]. Cognitive Neurodynamics, 2013, 7(6): 477-494.
- [33] 赵宝峰. 复合含水层条件下矿井突水水源模糊聚类判别[J]. 煤矿安全, 2015, 46(7): 189-192.
- [34] LI S, ZHANG H W. Pattern Recognition and Forecast of Coal and Gas Outburst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 15(3): 251-254.
- [35] 梁晓珍, 宋存义, 王依. 唐山矿瓦斯涌出量动态预测模型[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(3): 260-263.
- [36] MORTAZAVI B, DANESHVAR S, ATR k R S. Fire risk assessment in Tehran metro line 1 (rectifier substation) with fault tree analysis[J]. Iran Occupational Health, 2014, 11(2): 57-62.
- [37] 张悦, 景国勋, 张凯. 聚合釜爆炸事故树模糊数学分析法研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(2): 171-174.
- [38] 张甫仁, 景国勋, 宋建尊. 瓦斯爆炸事故树模糊数学分析法研究[J]. 煤炭技术, 2001, 20(11): 36-38.
- [39] ZHANG L, SKIBNIEWKI M J, WU X, et al. A probabilistic approach for safety risk analysis in metro construction[J]. Safety Science, 2014, 63(3): 8-17.
- [40] KANG J, LIANG W, ZHANG L, et al. A new risk evaluation method for oil storage tank zones based on the theory of two types of hazards[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29(1): 267-276.
- [41] 高明, 陈文振, 刘峰. 基于离散化修正模糊算子的模糊故障树新析[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 783-787.
- [42] 谢正文, 吴超, 梁晓瑜, 等. 饮食业油烟道火灾的模糊事件树分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 18(1): 10-14.
- [43] 蒋卫东, 李夕兵, 李启月. 基于模糊逻辑关系的事故树分析[J]. 铜业工程, 2001(3): 15-17.
- [44] HE L P, HUANG H Z, ZUO M J. Fault Tree Analysis Based on Fuzzy Logic[C]. Reliability and Maintainability Symposium, [S. l.]: IEEE, 2007, : 77-82.
- [45] 宋华, 张洪钺, 王行仁. T-S 模糊故障树分析方法[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 854-859.
- [46] 袁龙洲, 赵江, 李猛, 等. 一种高精度快速模糊故障树分析方法[J]. 机械强度, 2013, 35(6): 755-759.
- [47] 王大庆, 张鹏. 油气输送管线失效后果模糊事件树分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 88-92.