

王阳,施式亮,周荣义,等.基于突变理论的危化品道路运输系统安全评价[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4):29-34.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.005

Wang Y, Shi S L, Zhou R Y, et al. Safety Evaluation of Road Transportation System for Dangerous Chemicals Based on Catastrophe Theory [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology ( Natural Science Edition ), 2019, 34(4): 29-34.doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.005

# 基于突变理论的危化品道路运输系统 安全评价

王阳,施式亮\*,周荣义,刘勇,曹建

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**为了提高危险化学品道路运输系统(Dangerous Chemical Road Transport System, DCRTS)风险性评价结果的准确性,避免主观权重的影响,本文基于突变理论,研究并建立了道路“人-物”的尖点突变模型;结合危化品运输的特殊性,构建DCRTS突变安全评价指标体系;采用模糊突变级数评价法获取系统不同时刻的突变值,并进行逐级计算,得到系统总突变隶属函数值.研究表明,基于突变理论的危险化学品道路运输系统评价能科学客观地反映实际情况.

**关键词:**道路运输;突变机理;突变级数法;危化品;安全评价

中图分类号:X951 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2019)04-0029-06

## Safety Evaluation of Road Transportation System for Dangerous Chemicals Based on Catastrophe Theory

Wang Yang, Shi Shiliang, Zhou Rongyi, Liu yong, Cao Jian

(School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of Dangerous Chemical Road Transport System (DCRTS) risk assessment results and avoid the influence of subjective weights, based on the catastrophe theory, the cusp catastrophe model of road “human-object” was studied and established, combined with the speciality of transportation of hazardous chemicals, the DCRTS catastrophe safety evaluation index system was constructed. The fuzzy catastrophe progression evaluation method was used to obtain the sudden change values of the system at different times, and the system was calculated step by step to obtain the total catastrophe membership function value. The studies showed that the evaluation of DCRTS based on catastrophe theory can reflect the actual situation scientifically and objectively.

**Keywords:** road transportation; catastrophe mechanism; catastrophe progression method; hazardous chemicals; safety evaluation

近年来,伴随着我国化工生产量的逐年提升,物流行业中的危化品运输行业也得到了充足的发展,综

收稿日期:2019-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774135);湖南省2017年安全生产专项资金资助项目(湘财企指[2017]20号);湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2089);湖南省自然科学基金青年基金资助项目(2019JJ50152)

\*通信作者,E-mail:hnustssl@qq.com

合几种物流运输手段,发现危化品使用公路运输仍然是化工行业的较优选择.危化品因具有剧毒性、易燃易爆等较为特殊的性质使得与普通的公路运输事故存在较大差异,发生事故时往往伴随着燃烧、爆炸和泄漏并且还有可能产生次生灾害的后果,促使危险化学品道路运输风险因素变得更加复杂<sup>[1]</sup>.由于运送危化品的货车是移动的风险源,事故比正常车辆更容易发生,事故是突然的、复杂的、更有害的<sup>[2]</sup>.如2010年8月3日,江西赣州信丰县一辆装载20 t的浓盐酸槽罐车发生泄露事故;2017年5月23日,河北省保定市张石高速保定段浮图峪五号隧道内发生一起重大危险化学品运输燃爆事故,造成15人死亡,3人重伤,16人受伤;2019年7月7日,俄罗斯斯维德洛夫斯克地区1辆油罐车因刹车失灵而偏离道路,坠入沟里起火并爆炸,造成至少4人死亡,11人受伤,这些事故不仅对人民的生命财产安全有极大的威胁,还对周边自然环境造成极大的损害.

目前针对危险化学品道路运输系统(Dangerous Chemical Road Transport System, DCRTS)的安全评价方法主要有安全检查表法、事故树法、层次分析法和模糊数学法等.如刘廷亮利用安全检查表法浅谈危险化学品道路运输单位的安全评价<sup>[3]</sup>;王云鹏等基于鱼骨图和事故树法的危险品运输流程优化管理<sup>[4]</sup>;郭培杰等的模糊综合评价法在危险化学品道路运输风险评价中的应用<sup>[5]</sup>.上述这些方法虽然能够解决实际问题,但是不能正确处理权重问题,也不能实现动态的安全评价.而突变理论这一数学方法不但能够识别和预测复杂的危险状态,还能降低指标权重的影响<sup>[6]</sup>.由于很少有人将突变理论运用到DCRTS中,所以使用突变理论分析DCRTS中的危险状态过程及评价整个系统的安全程度具有较强的探索意义,因此,本文基于突变理论,运用尖点突变、燕尾突变、蝴蝶突变3种模型进行系统分析,在结合模糊数学的基础上,建立突变模型模糊动态评价法,对DCRTS进行风险分析及安全评价.

## 1 突变理论原理

突变理论可用于识别和预测复杂的系统行为.事实上,许多研究对象没有表现出某种连续状态,但突然在某个节点展现出某种状态,而后在结合综合拓扑动力学与奇点理论后,突变理论通过构建势函数分析系统的状态变化,使用势函数判别系统产生变化的节点,从而研究在节点附近的间断性变化,进而得出初等突变模型<sup>[7]</sup>.选取3种初等突变模型对危险化学品道路运输系统进行分析研究,通过分歧集推导出来的归一化公式进行综合分析评判并进行量化递归计算.表1为本文运用的3种初等突变模型的势函数与归一化公式,其分别是尖点突变模型,燕尾突变模型和蝴蝶突变模型.

表1 3种常用的初等突变模型

突变模型	控制变量维数	势函数	归一化公式
尖点突变	2	$V_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}\alpha x^2 + \beta x$	$x_a = \alpha^{\frac{1}{2}}, x_b = \beta^{\frac{1}{3}}$
燕尾型突变	3	$V_{abc}(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}\alpha x^3 + \frac{1}{2}\beta x^2 + \omega x$	$x_a = \alpha^{\frac{1}{2}}, x_b = \beta^{\frac{1}{3}}, x_c = \omega^{\frac{1}{4}}$
蝴蝶型突变	4	$V_{abcd}(x) = \frac{1}{6}x^5 + \frac{1}{4}\alpha x^4 + \frac{1}{3}\beta x^3 + \frac{1}{2}\omega x^2 + \mu x$	$x_a = \alpha^{\frac{1}{2}}, x_b = \beta^{\frac{1}{3}}, x_c = \omega^{\frac{1}{4}}, x_d = \mu^{\frac{1}{5}}$

## 2 DCRTS的突变特点

为研究DCRTS的突变特点,应结合危险化学品本身的特点,从系统本身的性质出发,选择适合DCRTS状态的研究模型<sup>[8-9]</sup>.在文献[8-9]中,使用尖点突变模型进行分析时,均采用两方面因素分析其特点,最终得到了比较准确的安全评价结果,所以,对DCRTS的突变特点从“人(司机和管理)”和“物(运输车、危化品和环境)”这两方面进行分析是可行的.

### 2.1 人的突变性

人的突变性包括驾驶员心理生理的变化和管理过程中的缺陷,这些都会导致系统状态的突然变化.复杂的环境因素和危化品本身特有的性质加大了司机的心理压力,增加管理的潜在缺陷和系统潜在风险,使

得系统发生突变的概率增加.当人的不安全行为积聚时,也许会导致系统状态发生突变.

## 2.2 物的突变性

物的突变性主要包括运输车的性能、危化品的理化性质以及环境的不确定性.

### 2.2.1 运输车的性能不稳定性

因为运输危化品的车辆是流动的重大危险源,相比普通运输车辆更易发生具有突发性、复杂性和更大危害性的事故和次生灾害.而运输车辆性能的不稳定性与车辆的年龄密切相关,随着运输车辆的车龄增长,车辆设备的磨损程度加剧,故障率增加,使得运输车的整体安全性下降.

### 2.2.2 危化品的理化性质的不稳定性

常见的危险化学品具有易燃易爆、有毒有害、腐蚀性、吸附性和放射性等危险特性.最容易产生突变特性的是腐蚀性和吸附性,若危化品与周边杂质与水分发生反应,就会产生有损车辆罐体或箱体的物质,最终造成车辆损坏进而导致事故的发生.

### 2.2.3 运输环境的不确定性

在道路运输过程中,危险品所处的环境会对系统产生较大影响,包括道路的气象因素和道路本身特点.道路本身的影响因素包含道路破损程度、道路宽窄情况、道路湿滑程度、道路崎岖程度等特点;道路气象因素包含能见度、风的大小、是否有雨雪天气和温湿度等特点.当这些因素往不利于运输环境发展并积聚时,就会导致系统状态发生突变,即事故发生.

## 2.3 DCRTS 突变模型分析

在分析整个系统的运输过程中发现,事故的发生可以总结为人的不安全行为和物的不安全状态,存在如突跳、滞后、发散等属于尖点突变的几个特征,因此可以运用尖点突变模型分析 DCRTS 的突变现象.

将司机与管理看作为人要素  $u$ ,运输车、危化品和环境看作为物要素  $v$ ,图 1 为 DCRTS 尖点突变模型.曲线  $cbb''n$  上,随着时间的变化  $v$  开始累积,系统的状态沿路径  $cb$  演化.当达到  $b$  点时,即满足分歧方程,此时由于  $u$  的作用会致使  $b$  点跃迁至  $b''$  点,系统由安全状态突变到危险状态.

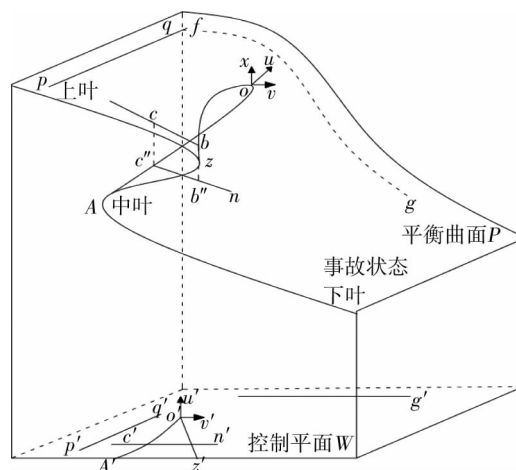


图 1 DCRTS 状态尖点突变模型

从安全能量的角度上看,这种突变是能量积累后的无序释放的过程<sup>[10]</sup>.在一定状况下,系统的结构、状态、特征和行为将随着时间的发展而根据某种特性发展.当系统的能量积累到临界点时, $u$  和  $v$  在系统奇点集的附近某点处交叉耦合,在被系统非线性作用放大后,就会促使系统的稳定性发生变化,导致系统动力特性复杂化,就会引发事故.

## 3 基于尖点突变的 DCRTS 安全评价

### 3.1 DCRTS 安全评价体系

依据系统突变特点和系统的要素之间的关系并从便于量化的方面考虑,在结合有关研究成果<sup>[11]</sup>,构

建基于突变理论的安全评价指标体系(见图2).图2中的指标分为定量指标(车辆车龄和车辆吨位等)和定性指标(司机心理情况和专业技术情况等).

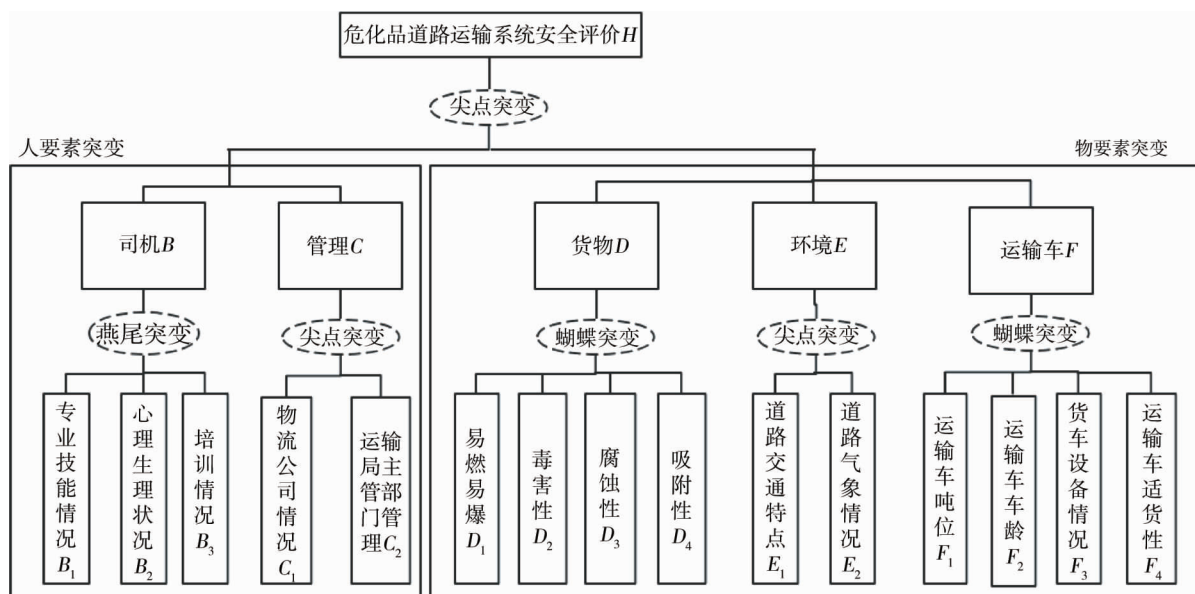


图2 基于突变理论的DCRTS安全评价指标体系

### 3.2 系统总突变隶属函数值的计算

#### 3.2.1 底层指标数据的获取及其规格化

结合相关研究经验和危化品道路运输事故数据,定性指标数据应用 Delphi 得到,在结合模糊综合评判法对定性指标数据进行处理获取底层原始数据,再由相应的危化品运输公司提供定量指标数据.

通过对底层原始数据的获取并通过归一化公式得到相应的初始模糊隶属函数值,但由于定性指标与定量指标存在差异性,所用的归一化方法不一致,不同指标的归一化方法如下:

##### 1) 定性指标

$$Y = \begin{cases} 1, & s \geq s_{\max}; \\ \frac{s - s_{\min}}{s_{\max} - s_{\min}}, & s_{\min} < s < s_{\max}; \\ 0, & s_{\min} \leq s. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $s$  为问卷中对应指标百分制的平均值;  $s_{\max}$  和  $s_{\min}$  根据德尔菲法确定.

##### 2) 定量指标

$$Y = \frac{e - j}{f - j}(l - k) + k. \quad (2)$$

式中:  $e$  为运输系统指标的实际数值;  $j, f$  为各指标对应等级区间下的最小值和最大值;  $k, l$  为对应等级区间中的最小值和最大值.

依据公安部“道路交通事故等级划分标准”和相关研究成果<sup>[12-13]</sup>,统一了安全评价标准,构建了基于突变理论的DCRTS安全等级区间.将安全等级划分为5级,分别为安全区(0.95, 1.00]、较安全区(0.85, 0.95)、较危险区(0.70, 0.85)、危险区(0.6, 0.7]和极度危险区(0.0, 0.6].

#### 3.2.2 系统总突变隶属函数值的计算

依照初始突变隶属函数值,运用“互补”和“非互补”的原则进行逐级计算,最终得到总突变隶属函数值<sup>[14]</sup>.

##### 1) 互补原则

$$x = (\eta_1^{\frac{1}{2}} + \eta_2^{\frac{1}{3}} + \cdots + \eta_n^{\frac{1}{n}}) / r. \quad (3)$$

## 2)非互补原则

$$x = \min(\eta_1^{\frac{1}{r}}, \eta_2^{\frac{1}{r}}, \dots, \eta_n^{\frac{1}{r}}). \quad (4)$$

式中: $\eta$ 为突变隶属函数值; $r$ 为控制变量的个数.

## 4 实例验证

对某危化品物流公司进行安全状况的动态评价.先根据图2构建相应的评价指标体系,将定性指标部分制成问卷,并有针对性地向资深的化学品专家、物流公司、司机发放问卷100份,收回问卷95份,有效问卷89份.将模糊综合评价法与德尔菲法相结合,对定性指标进行模糊化处理,获得底层指标的原始数据;定量指标原始数据可通过物流数据库和车辆资料等获得.其中2014年度的评分结果如表2,其中定性指标数据带入式(1),定量指标数据带入式(2),得到系统初始模糊隶属函数值 $Y$ .

设 $w_i$ 为指标 $i$ 的初始突变隶属函数值,逐层说明系统总突变值的计算过程. $B_1, B_2$ 和 $B_3$ 构成燕尾突变模型, $C_1, C_2$ 构成尖点突变模型, $B, C$ 构成尖点突变模型. $B_1, B_2$ 和 $B_3$ 计算时满足非互补原则, $C_1, C_2$ 计算时满足互补原则, $B, C$ 计算时满足非互补原则.人要素突变的突变值计算过程为

$$x_B = \min\{x_{B_1}^{\frac{1}{2}}, x_{B_2}^{\frac{1}{3}}, x_{B_3}^{\frac{1}{4}}\} = 0.8367;$$

$$x_C = (x_{C_1}^{\frac{1}{2}} + x_{C_2}^{\frac{1}{3}})/2 = 0.8416;$$

$$x_u = \min\{x_{B_1}^{\frac{1}{2}}, x_{C_2}^{\frac{1}{3}}\} = 0.9147.$$

这就计算出了人要素突变的突变值,然后求出物要素的突变值,进而求得当年的危险化学品运输系统的总突变值,如表2.

表2 该公司2014年系统突变隶属函数值

指标			初始模糊隶属函数值 $Y$	初始突变隶属函数值 $w_i$	3级指标函数值	2级指标函数值	总突变隶属函数值
危险 化学 品道 路运 输系 统安 全评 价	人要素突变 $u$	专业技术情况 $B_1$	0.70	0.8367			
		心理生理状况 $B_2$	0.65	0.8662	0.8367		
		培训情况 $B_3$	0.60	0.8801		0.9147	
	物要素突变 $v$	物流公司管理 $C_1$	0.60	0.7746	0.8416		
		运输局主管部门管理 $C_2$	0.75	0.9086			
	货物 $D$	易燃易爆 $D_1$	0.80	0.8944			
		毒害性 $D_2$	0.85	0.9473	0.8944		
		腐蚀性 $D_3$	0.76	0.9337			0.9718
		吸附性 $D_4$	0.73	0.9390			
	环境 $E$	道路交通特点 $E_1$	0.85	0.9220	0.9365		0.9617
		道路气象情况 $E_2$	0.86	0.9510			
	货车 $F$	运输车总吨 $F_1$	0.77	0.8775			
运输车车龄 $F_2$		0.81	0.9322	0.8775			
运输车设备情况 $F_3$		0.78	0.9398				
适货性 $F_4$		0.70	0.9311				

同理,计算其在接下来5年的系统总突变隶属函数值,分别是0.9718,0.9688,0.9720,0.9810和0.9757,在2014~2018年这段时间内,该运输系统的总突变函数值均较大,且都处于安全等级.通过查阅文献资料发现,本文的评价结果与文献[15-16]中的同类研究评价结果基本一致,且结合该物流公司近年来的运输安全状况,该物流公司2014~2018年未发生较大安全事故,运输系统未出现较大安全隐患,因此用该方法分析危化品公路运输系统风险因素是合理的.

## 5 结论

1)从“人-物”2个方面构建危化品公路运输系统尖点突变模型,人的突变性包括驾驶员心理生理的

变化和管理过程中的缺陷,物的突变性主要包括运输车的性能、环境的不确定性以及危化品的理化性质.当整个系统的能量积累到某一临界点时,“人-物”在某点发生轨迹交叉,系统由安全状态突变到危险状态,就会引发事故.

2)在研究危化品道路运输系统突变机理的基础上,结合模糊突变级数法构建 DCRTS 风险评价模型,应用实例表明,该风险评价模型能很好地分析危化品公路运输系统中的风险因素,客观反映危化品道路运输系统的可靠性.

#### 参考文献:

- [1] 卜全民,童星.我国危险化学品道路运输的现状与对策研究[J].工业安全与环保,2012,38(4):90-93.
- [2] 任常兴,吴宗之.危险品道路安全运输路径优化方法探讨[J].中国安全科学学报,2006(6):129-134.
- [3] 刘廷亮.浅谈危险化学品道路运输单位的安全评价[C]//中国职业安全健康协会2008年学术年会论文集.南通:中国职业安全健康协会,2008:432-436.
- [4] Liu X, Zhang L, Guo S, et al. A simplified method to evaluate the fire risk of liquid dangerous chemical transport vehicles passing a highway bridge[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 48:111-117.
- [5] 郭培杰,蒋军成.模糊综合评价法在危险化学品道路运输风险评价中的应用[J].南京工业大学学报(自然科学版),2006,28(5):57-62.
- [6] 罗通元.基于突变理论的加油站火灾爆炸事故分析与安全评价[J].安全与环境工程,2016,23(4):104-108.
- [7] 凌复华.突变理论及其应用[M].上海:上海交通大学出版社,1987:237.
- [8] 李建民.海上危化品运输系统突变机理[J].中国航海,2015,38(4):53-58.
- [9] 周荣义,黎忠文,牛会永.基于突变理论的油库火灾爆炸分析与模糊动态评价[J].中国安全科学学报,2006,16(6):97-101.
- [10] Seker T, Ramaswamy S N, Nampoothiri N. Accidents and disaster management in fireworks industries[J]. IEEE Technology & Society Magazine, 2012, 30(4):55-64.
- [11] 董丹慧.危化品道路运输风险评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- [12] 吴金中,范文姬.危险货物道路运输风险评价体系研究[J].公路交通科技,2015,32(12):6-11.
- [13] 陈晓伟.基于模糊层次综合分析法的在役道路运输危险化学品罐式车辆安全分级评价[J].中国特种设备安全,2018,34(3):34-38.
- [14] Bo D, Li Y F, Chen Z Q, et al. Study on modeling and optimization for safe layout of stacking in dangerous chemical warehouse[J]. Journal of Safety Science & Technology, 2018,14(4):147-154.
- [15] 邓红军,王千良,关守安.模糊神经网络在危险化学品道路运输风险评价中的应用[J].安全,2012,33(9):34-36.
- [16] 郭培杰,蒋军成.模糊综合评价法在危险化学品道路运输风险评价中的应用[J].南京工业大学学报(自然科学版),2006,28(5):57-62.