

基于多米诺效应 的危险货物运输风险分析

魏 群 牟瑞芳

西南交通大学 交通运输学院, 成都 610031

摘 要: 根据危险货物运输事故易发生次生事故的特点, 提出了针对危险货物运输事故运用多米诺效应理论进行定量风险分析的方法。首先分析导致货物运输事故的初始事件和可能出现的次生事故, 计算它们间的耦合度, 确定是否构成多米诺效应场景。然后, 运用概率函数的方法确定触发概率, 用人体脆弱性模型对事件链场景后果进行量化分析。最后, 针对危险货物运输的个人风险和环境风险进行定量分析, 表明此法在危险货物风险分析中的可行性, 有利于加强危险货物运输的安全管理。

关键词: 危险货物运输; 多米诺效应场景; 耦合度; 脆弱性模型; 风险定量分析

中图分类号: U16

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2011)02-0066-06

Risk Analysis of Dangerous Goods Transportation Based on Domino Effect

WEI Qun MOU Rui-fang

College of Traffic & Transportation,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: A quantitative risk analysis method based on domino effect, coping with the secondary accident in dangerous goods transportation, was proposed. First, the initial event that could cause accident in dangerous goods transportation and the possible secondary accident were analyzed. Then, the couplings among events were calculated to determine whether they constituted a domino effect scene. Second, the trigger possibility was calculated with the probability function, and the human body vulnerability model was used to quantitatively analyze the consequence of a domino effect scene. Finally, the risk of dangerous goods transportation, which could be classified into individual risk and environment risk was

收稿日期: 2010-05-05.

作者简介: 魏 群 (1986-), 女, 汉族, 江西萍乡人, 西南交通大学交通运输学院硕士研究生, 研究方向: 安全管理。

analyzed quantitatively. The sample analysis indicated that feasibility of this methods as well as its benefit enhanced the management of dangerous goods transportation

Key words: Dangerous goods transportation, domino effect scene, efferent coupling, vulnerability model, risk quantitative analysis

0 引 言

危险货物运输过程中，由于撞击、挤压等原因，盛装危险货物的容器有可能被击穿或破裂，泄漏出大量的易燃、易爆、有毒危险货物，甚至发生火灾、爆炸和人员中毒事故，导致重大人员伤亡和财产损失。据估计，我国 95% 以上的危险化学品涉及异地运输问题，每天危险化学品的运输量超过 100 万 t，每年总的运输量将超过 4 亿 t^[1]，危险运输成为一个社会公共安全问题。

通过危险货物运输的定量风险分析，辨识危险货物运输过程的危险因素，掌握危险货物运输事故发生规律，预测危险货物运输事故发生的频率和后果，是预防和控制重大事故发生的关键。我国对于危险货物运输风险分析研究起步较晚，成果较少，普遍采用定性分析方法进行风险分析^[2]。本文采用定量的多米诺效应风险分析方法，研究危险货物运输多米诺效应场景中事件之间相互联系、相互依赖的规律，以及由各事件所造成的相互影响、相互作用的后果，对危险货物运输的风险管理水平有重大意义。

1 多米诺效应理论

1.1 多米诺效应的概念

Cozzani 等^[3]给出了一个多米诺效应相对完整的定义：一个由初始事件引发的，波及邻近的 1 个或多个设备，引发了二次事故的场景，它导致总体结果比只有初始事件时的后果更加严重。只有当结果的总体严重性高于或至少相当于初始事故后果的场景事故才被认为是多米诺事件。其中，初始事件指最开始发生的事故或事件，即所谓的触发事件。二次事件为由初始事件通过能量、脆片引发的现场和邻近设备发生

的事故或事件。多米诺场景即二次事件发生的可能情况。根据 Cozzani 等^[5]的研究归纳出多米诺事件的四要素：① 一个能引发多米诺效应的初始事故场景；② 由初始事件对二次目标引发的扩大因素而导致了后果的增殖效应；③ 由于初始事件的传播使得在相同和不同的单元中产生 1 个或多个多米诺事故场景；④ 由于二次事件的发生而导致总体后果扩大。

1.2 突发事件的耦合度

从系统论的角度，多米诺效应场景中的每个子事件可以看作一个系统，该系统是由输入、状态、输出三种要素组成的。突发事件之间耦合的本质即初始事件的输出要素与次生事件的输入要素之间存在着因果关系，耦合度则是对这种关系的一个定量描述参数，可以根据耦合度判断突发事件间是否存在多米诺效应关系。

耦合度的计算过程如下^[4]：先发事件的输出要素与后发事件的输入要素构成了该系统的序参量，先发事件设为 U_1 ，后发事件设为 U_2 。 U_1 、 U_2 包括多个评价指标，需要构建突发事件耦合度指标体，对输出要素与输入要素进行分解，即可构建突发事件耦合度指标体系。突发事件各个序参量对有序程度的总贡献可通过集成方法来实现：

$$U_A(U_i) = \sum_{j=1}^n \lambda_j u_{ij} \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad \lambda_j > 0 \quad (1)$$

式中， U_A 为突发事件各序参量对有序程度的总贡献； λ_j 为各评价指标的权重； u_{ij} 为各指标达到目标的满意程度； u_{ij} 趋近 0 表示最不满意，趋近 1 为最满意，所以 u_{ij} 的取值范围为 $0 \leq u_{ij} \leq 1$ 。

两个突发事件相互作用的耦合度可以表示为：

$$C = \left[\frac{U_A(U_1) \cdot U_A(U_2)}{(U_A(U_1) + U_A(U_2))^2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

C 值越大, 说明突发事件之间的耦合程度越大。对于突发事件而言, 存在一个耦合度的临界值 a , 若 $C > a$, 说明初始事件能够触发次生事件, 否则两种事件之间不存在多米诺效应关系。

2 危险货物运输多米诺效应风险分析

2.1 危险货物运输多米诺效应风险分析流程

危险货物运输多米诺效应场景常常是串联或并联的连环事故, 危险货物运输过程中发生事故主要表现为燃烧、爆炸、泄漏, 事故可能有不同的物理现象: 冲击波、超压、热辐射和抛射物等, 每种物理现象都会产生一个危险区域。当危险区域内的某种特别效应值超过一定限值后, 就产生多米诺效应场景, 发生次生事故, 如有害气体扩散、碎片打击伤害、火灾等。危险货物运输事故中, 多米诺效应受多种因素影响, 主要有: 运输的危险物质类别、危险货物储运容器类别、路况、车辆行驶速度、天气、减危措施等。多米诺效应引起的破坏等级则取决于危险货物运输量、距离、传播条件及运输线路的易受影响点等。各种物理现象对人、环境的影响根据具体情况而不同。危险货物运输应在充分考虑其可能的多米诺效应场景的条件下进行定量的风险分析, 其分析流程见图 1。

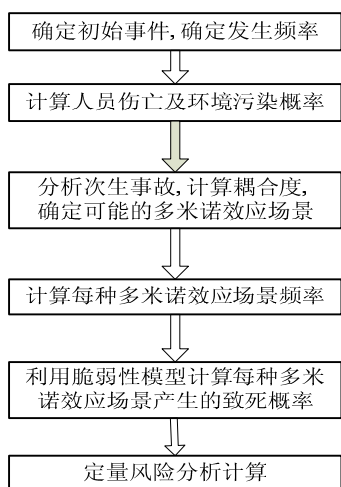


图 1 危险货物运输多米诺效应分析流程

Fig.1 Procedure for domino effect in dangerous goods transportation

2.2 多米诺效应场景发生频率

危险货物运输初始事件一般为爆炸事故、烧燃事故、泄漏事故, 其引发的多米诺效应场景由下式^[7]进行计算:

$$f_d^{(k,m)} = f_0 P_d^{(k,m)} \quad (3)$$

$$P_d^{(k,m)} = \prod_{i=1}^n [1 - P_i + C(i, J_m^k)(2P_i)] \quad (4)$$

式中, $f_d^{(k,m)}$ 为含 k 个可能发生的次生事件同时发生的第 m 种多米诺效应场景的期望频率; $P_d^{(k,m)}$ 为含 k 个事件同时发生的第 m 种多米诺效应场景的概率; P_i 为第 i 个次生事件发生的概率; J_m^k 为包含 k 个事件同时发生的第 m 种多米诺效应场景, $C(i, J_m^k)$ 为耦合度, 当事件 i 属于这个场景组合时, $C(i, J_m^k)$ 取 1, 否则取 0。

2.3 事件发生概率

在危险货物运输过程中, 多米诺效应初始事件是以具体的事件为研究对象。确定初始事件的概率通常需要结合具体的事故类型采用统计分析、物理模型计算等方法获得, 危险货物事故类型的物理模型计算在很多参考文献中都有提及, 在此不作赘述。

初始事件(爆炸事故、烧燃事故、泄漏事故)产生的物理效应和运输工具所在路段周围人员的集聚程度、环境等影响着次生事故发生概率 P_i 。通常采用基于经验数据的概率函数法对 P_i 进行计算^[5]:

$$Y = k_1 + k_2 \ln V \quad (5)$$

$$P(W) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y5} e^{-u^2/2} du \quad (6)$$

式中: W 为触发次生事故的致灾因子, 在不同的触发事件中表示不同的物理含义; Y 为概率单位; k_1 、 k_2 为经验系数; $P(W)$ 为次生事件发生概率。

冲击波、超压、碎片打击等对人和环境的破坏概率都可以运用概率模型进行简化计算。

2.4 危险货物运输后果分析

危险货物运输事故可能产生的主要后果是人员

伤亡和环境污染等。在确定危险物质扩散浓度范围及其大小之后, 环境污染一般采用对人体损害作为衡量受到污染的危害程度, 所以人员伤亡和环境污染均可以采用脆弱模型来分析。人员伤亡和环境污染概率可以由下式计算得出:

$$Y = A_i + B_i \ln(D^n t_e) \quad (7)$$

式中, Y 为人员伤亡和环境污染概率; A_i 、 B_i 和 n 是与毒物性质有关的系数; D 为接触的浓度 (kg/m^3); t_e 为接触时间(s)。

脆弱性模型是概率单位模型, 用于评价人类对有毒物质、热辐射和超压的剂量的反应关系, 其由正态概率分布函数的累积表达推导而来^[5]:

$$V = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y_5} e^{-u^2/2} du \quad (8)$$

$$u = \frac{D - \mu}{\sigma} \quad (9)$$

式中: V 为人体脆弱性或死亡概率, $0 \leq V \leq 1$; Y 为概率单位变量; μ 和 σ 分别为正态分布的中间值和方差。

忽略同时暴露在不同的物理效应(超压、热辐射等)下而引起的协同效应, 总体脆弱性为多米诺效应场景中初始事件和次生事件所引发死亡概率的总和, 计算如下^[8]:

$$V_i = \min \left[\left(V_0 + \sum_{i=1}^k C(i, J_m^k) V_{i,d} \right), 1 \right] \quad (10)$$

式中: V_i 为包含 k 个事件的第 m 种场景的总体死亡概率; $C(i, J_m^k)$ 为耦合度, 当事件 i 属于 J_m^k 这个场景时, 则 $C(i, J_m^k)$ 取 1, 否则取 0; $V_{i,d}$ 表示事件 i 造成的死亡概率。

2.5 危险货物运输风险评价

危险货物运输初始事件一般为爆炸事故、烧燃事故、泄漏事故, 它们往往会引发多米诺效应场景, 对这种多米诺效应场景可以计算其期望频率。对危险货物运输定量风险评估还需要选择合适的风险指标来衡量风险量化的结果。由后果分析可知, 在计算了人员伤亡及环境污染概率后, 个人风险和环境风险可以

通过人体脆弱性模型结合起来。同时考虑多米诺效应的期望频率和人体脆弱性模型, 可以定量评价危险货物运输风险, 它由综合风险值来表示。

危险货物运输多米诺效应的综合风险可表示为:

$$R = \int_d^{(k,m)} V_i \quad (11)$$

式中: R 为危险货物运输多米诺效应综合风险系数; k 为事件个数; m 为场景个数; V_i 为包含 k 个事件的第 m 种场景的总体死亡概率。

3 实例分析

假设某货物列车有四节罐车装有危险货物, 其中 A_1 , A_2 装有石油, 可能发生爆炸事故; B_1 , B_2 装有液态乙烷, 可能发生火灾事故。选取 A_1 爆炸作为初始事件, 事故的爆炸超压 (TNT 当量法计算) 造成邻近罐车发生次生事故产生事件链场景, 定量分析过程如下:

(1) 计算耦合度。将爆炸(A_1)—火灾 (B_1 , B_2) 视为一个突发事件耦合系统, 爆炸事件的输出要素与火灾事件的输入要素是该耦合系统的序参量, 对各要素进行分解构成爆炸、火灾事件的序参量评价指标体系。运用层次分析法求出各个序参量及其评价指标的权重, 具体如表 1 所示。

表 1 爆炸-火灾序参量与评价指标

Tab. 1 Order parameters for explosion-fire and the

evaluation Index

突发事件	序参量	指标	指标权重
爆炸	输出	人员伤亡	0.04
		环境污染	0.19
火灾	输入	碎片打击	0.25
		热辐射、明火	0.25

根据式 (1), (2) 计算爆炸输出序参量 $U_1=0.162$, 火灾输入序参量 $U_2=0.20$, 爆炸事故与火灾事故的耦合度 $C=0.473$, 假设各类突发事件间耦合度的临界值 $a=0.2$, $0.473 > 0.2$, $c > a$, 由此可知爆炸事故能够触发火灾事故的发生, 爆炸(A_1)—火灾 (B_1 , B_2) 存在多

米诺效应关系。同理可得爆炸(A₁)—爆炸(A₂)存在多米诺效应关系。

(2) 定量风险分析。综合风险参照式(7),(8),(10)进行计算。当不考虑多米诺效应场景时,初始事故A₁爆炸的死亡半径为80m,死亡人数为10,根据表2和3计算出发生二次事故后的影响范围和距离,同时根据式(4)和(5)计算出多米诺效应场景的频率和死亡概率以及多米诺效应场景下的致死半径,从而得到综合风险,具体计算结果见表4、5。

表2 实例中的罐车情况

Tab.2 Characteristics of the tank cars in the case-study

事件编号	罐车类型	运输物质	事故类型	事故频率/a ⁻¹	总量/t
A ₁	常压罐车	石油	爆炸	1.5×10 ⁻⁵	50
A ₂	常压罐车	石油	爆炸	1.5×10 ⁻⁵	50
B ₁	高压罐车	液态乙烷	火灾	1.0×10 ⁻⁷	40
B ₂	高压罐车	液态乙烷	火灾	1.0×10 ⁻⁷	40

表3 次生事故发生概率计算

Tab.3 Probability of the secondary accident

事件编号	与A ₁ 距离(参考车体车钩长度)/m	次生事故	超压值/kPa	人员伤亡、环境污染概率模型	发生概率
A ₂	1	爆炸	250	$Y=-18.56+2.64\ln p_s$	$P_1=1$
B ₁	42.9	火灾	45	$Y=-50.22+3.96\ln p_s$	$P_2=0.36$
B ₂	57.2	火灾	15		$P_3=0$

表4 综合风险值对应距离

Tab.4 Relative distances of the calculated comprehensive risks for the case-study

综合风险	P(初始事件)/m	D ₁ (多米诺效应 1)/m	D ₂ (多米诺效应 2)/m
1.0×10 ⁻⁶	80	120	290
1.0×10 ⁻⁷	100	137	365

参考文献

[1] 吴宗之, 孙 猛. 200起危险化学品公路运输事故的统计分析及对策研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 2(2): 3-8.

表5 多米诺效应场景下的事故概率与死亡人数

Tab.5 Calculated accident probabilities and the number of fatalities in an emergency event chain

多米诺效应场景编号	概率	多米诺效应场景频率	死亡半径(超过50%的死亡概率)	死亡人数
D ₁	0.76	8.63×10 ⁻⁶	90	10
D ₂	0.24	3.87×10 ⁻⁶	276	30
...

注: D₁为A₁, A₂发生事故, B₁, B₂不发生事故的
多米诺效应场景; D₂为A₁, A₂, B₁, B₂均发生事故的
多米诺效应场景。

运用上述对多米诺效应场景D₁, D₂的风险分析方法, 可以依次计算不同多米诺效应场景的综合风险。由于计算复杂, 在此不一一列出了。

4 结 论

本文从耦合角度分析了危险货物运输突发事件之间的相互作用机理, 借鉴物理学中耦合的概念计算任意两个突发事件之间的相互关联程度, 判断突发事件是否能构成多米诺效应关系, 将危险货物运输初始事件及其触发的次生事件整合为多米诺效应场景进行研究。对于多米诺效应场景后果的计算主要从个人风险和
环境风险来考虑, 并从概率计算的角度, 将两者整合为综合风险进行定量分析进行计算。通过实例分析, 表明此方法在危险品运输风险定量分析中是可行的, 可以计算突发事件、次生事件发生的概率、各多米诺效应场景频率、综合风险等参数, 对于加强危险货物运输的安全管理, 提高危险货物运输安全性具有重要意义。由于多米诺效应自身的复杂性决定了对多米诺效应定量风险分析的困难, 对于风险指标的选取, 事件间触发的定量分析、多级事件多米诺效应概率分析等问题还需要进一步的深入研究。

[2] 张江华, 朱道立. 危险化学品运输风险分析研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(3): 136-141.
[3] Cozzani V., Gubinelli G., Antonioni G., et al. The

- assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 127(1/2/3): 14-30.
- [4] 董磊磊. 基于贝叶斯网络的突发事件建模[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [5] Moncrieff A. Review of recent literature on wood (January 1960-April 1968) [J]. *Studies in Conservation*, 1968, 13 (4): 186 - 212.
- [6] Cozzani V., Antonioni G., Spadoni G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5): 463-477.
- [7] 季学伟, 翁文国, 赵前胜. 突发事件链的定量风险分析方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(11): 1749-1756.
- [8] Marcotte M. Irradiation as a disinfection method-update on methyl bromide phase out [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 1998, 52: 185-90.
- [9] Antonioni G, Spadoni G, Cozzani V. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events [J]. *Journal Hazardous Materials*, 2007, 147: 48-59.

(中文编辑: 刘娉婷)

上接第 54 页

与常规公交网络的衔接, 全面促进公交网络布局一体化与高效化; 抓紧研究实施公交专用道系统规划建设, 确保公交优先路权, 提高公交运转效率; 推进公交交换乘枢纽及场站建设, 通过枢纽站点高效组织地铁、公交、小汽车、非机动车等多种交通方式。

(3) 加快智能交通建设, 提高交通设施的利用和交通运行效率。

由于城市土地的限制, 城市路网建设已基本完成, 未来的城市交通发展方向必将从“基础设施建设”向“综合管理”转变, 因此, 应当增加智能交通建设投入, 按照深圳智能交通的建设总体方案建设“一平台、六系统”, 即交通信息交换平台、交通综合监测系统、交通整体调控系统、交通运输管理系统和交通运行指挥系统、交通管理及应急仿真决策支持系统和公众出行信息服务系统。尽快形成一个在交通

信息获取、交通控制、交通行业管理、交通运行指挥以及交通信息服务等方面效用明显、使用范围广泛的智能交通系统, 提升城市整体交通运行效率、服务水平和指挥能力。

(4) 实施交通需求管理, 缓和小汽车的增长。

深圳市交通需求管理政策实施不足, 造成小汽车的无序增长和使用。在土地面积有限、人口与机动车密度较高的情况下, 深圳应借鉴国际城市经验, 研究推进车辆注册附加费、牌照费、拥车自备车位制度等措施提高小汽车的拥车成本, 研究道路拥挤收费、小汽车单双号限行政策等措施, 提高车辆使用成本, 引导小汽车的合理使用; 合理调控拥堵区域的停车设施供给及停车费用, 通过“以静制动”的措施缓解小汽车的压力同时, 利用深圳特区的立法权, 各种交通需求管理政策应以法律的形式予以明确。

参考文献

- [1] 深圳市综合交通设计研究院. 深圳市交通承载力研究[R]. 深圳市综合交通设计研究院, 2009.
- [2] The Government of the Hongkong Specoal Administrative Region. The annual traffic census 2008[R]. The Government of the Hongkong Specoal Administrative Region, 2009.
- [3] Land Transportation and Authority. 2008 Singapore land transport statistics in brief[R]. Land Transportation and authority, 2009.
- [4] 深圳市交通局. 跨海取经赴新加坡交通考察报告汇编[R]. 深圳市交通局, 2009.

(中文编辑: 吴继屏)