

基于突变理论的建筑工程安全事故过程模型研究

张 凡

天津工业大学经济与管理学院, 天津
Email: 19557491@qq.com

收稿日期: 2021年1月11日; 录用日期: 2021年4月22日; 发布日期: 2021年4月29日

摘 要

目前施工现场隐患排查主要以安全检查人员依据法律、法规、规范及标准进行排查, 缺少能够量化预测安全事故的方法。本文基于突变理论, 分析并建立了建筑工程安全事故模型, 用实际案例测试其效果, 并与安全专家意见相对比。为建筑工程安全管理提供了新的方法和管理手段。

关键词

突变, 评估, 建设工程, 安全生产

Study on the Process Model of Safety Accident in Construction Engineering Based on Catastrophe Theory

Fan Zhang

School of Economics and Management, Tiangong University, Tianjin
Email: 19557491@qq.com

Received: Jan. 11th, 2021; accepted: Apr. 22nd, 2021; published: Apr. 29th, 2021

Abstract

At present, the hidden danger investigation of construction site is mainly carried out by safety inspectors according to laws, regulations, specifications and standards, and there is a lack of methods to quantitatively predict safety accidents. Based on catastrophe theory, this paper analyzes

and establishes the safety accident model of construction engineering, tests its effect with actual cases, and compares with the opinions of safety experts. It provides a new method and management means for the safety management of construction engineering.

Keywords

Catastrophe, Assessment, Construction Project, Safety Production

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前施工现场隐患排查主要以安全检查人员依据法律、法规、规范及标准进行排查,缺少一个能够具体量化施工现场安全管理状态的方法。本文基于突变理论,分析并建立了建筑工程安全事故模型,用实际案例测试其效果,将规范检查表格的评分作为参数建模并得出结论,且其结论与安全专家意见相一致。为建筑工程安全管理提供了新的方法和管理手段。

安全事故是指生产经营单位在生产经营活动(包括与生产经营有关的活动)中突然发生的,伤害人身安全和健康,或者损坏设备设施,或者造成经济损失的,导致原生产经营活动(包括与生产经营活动有关的活动)暂时中止或永远终止的意外事件。事故是人们进行某种活动过程中突然发生的,违背人们意愿的随机事件。其系统状态变化过程是一个连续变化过程,事故是系统状态连续变化过程中出现的突变,运用突变理论建立系统危险源发生变化的动态模型,能够阐明事故发生前系统某些参数的连续变化是如何导致系统状态突变的。

本文重点内容是对建设工程实施过程中的安全绩效进行评估。评估基于突变理论分析安全生产事故,并建立建设工程安全生产状态突变模型,利用势函数量化指标,以现行检查规范作为评价标准,最终应用于实际施工现场安全隐患排查评估当中。

2. 研究方法

本文基于突变理论分析安全生产事故,并建立建设工程安全生产状态突变模型,利用势函数量化指标,以现行检查规范作为评价标准,应用到实际施工现场安全隐患分析当中,并结合安全专业专家的结论辅助现场安全管理。

3. 安全生产事故状态突变模型

3.1. 安全事故原理的突变分析

从本质上看,安全事故就是一种“随即事件”,其位于“人”与“物”轨迹意外交叉的“时空”,安全事故的起因可划分为“人的不安全行为”和“物的不安全状态”。

轨迹交叉理论是一种研究伤亡事故致因的理论。轨迹交叉理论可以概括为:设备故障(或物的不安全状态)与人失误,两事件链的轨迹交叉就会构成事故。在多数情况下,由于企业管理不善,工人缺乏教育和训练,或者机械设备缺乏维护、检修以及安全装置不完备,导致人的不安全行为或物的不安全状态。人的行为和物的状态又是受多种因素影响的,但大多数情况下,造成事故的本质原因是安全管理上的缺

陷。

安全管理中人的不安全行为和物的不安全状态可以通过安全管理手段来控制，从而减少甚至消除事故隐患。将人的不安全行为和物的不安全状态转化为控制参量，并以函数的形式连接与安全事故的关系，而两者交叉的“时空”正是尖点突变的流形(图 1)。

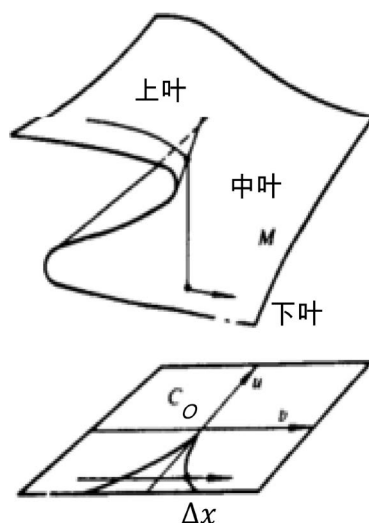


Figure 1. General form of cusp mutation [1]

图 1. 尖点突变的一般形态[1]

系统安全分析中，突变理论流形常见的形式为： $p(t-t_0)^3 + q(u-u_0)(t-t_0) + (v-v_0) = 0$ ， t ——系统的安全状态值； u, v ——系统安全状态的控制量； p, q ——系数； u_0, v_0, t_0 ——系统固有的特征量。流形在 u, v 平面上的投影为： $a(u-u_0)^3 + b(v-v_0)^3 = 0$ ， a, b ——常数[2]。

尖点突变的一般形态中，流形的上叶和下叶表示系统处于安全状态，中叶表示系统处于不安全状态(濒临发生事故或已发生事故)。中叶的水平投影为系统不安全状态的分叉集，若系统运行不经过分叉集，则控制参数的变化不能引起系统状态的恶化；若系统控制参数的变化使系统状态处于分叉集中时，则所描述系统(建设工程)必然会发生事故。当控制参量 u, v 值使分叉集面积越大时， Δx 越大，故 Δx 表示系统安全状态。

3.2. 安全事故致因分析模型

由 Heinrich 提出的安全第一定理：事故是由人的不安全的行为和物的不安全状态所造成的。人的不安全行为的出现除去人本身的因素(疲劳、生理状态差)外，更多的是由于安全管理上的不合理。故将人的不安全行为设为因素 u ，物的不安全状态设为因素 v ， x 作为系统功能状态参数，则可建立安全事故致因的尖点突变模型[4]。

尖点突变的势函数为 $V(x) = x^4 + ux^2 + vx$ ，由状态参量 x 及控制参量 u 和 v 构成的三维空间，经计算可得到分叉集： $8u^3 + 27v^2 = 0$ [6]。尖点突变的突变流形和分叉集形态如图 2 所示，上部为突变流形，其在下部平面上的投影为分叉集，分叉集表示系统安全功能丧失，生产中断，人员受到伤害，机械设备材料等物质受损，模型中从上叶到下叶或从下叶到上叶功能的突变流形表示事故的发生。

根据上述模型中所示的曲线 $abcd$ ，其中，中叶处状态 b 到 c 是系统功能的突跳，函数 $\Delta x = x(u_b - v_b) + x(u_c - v_c)$ 表示在 b 到 c 的过程中会发生安全事故。曲线 $a_1b_1c_1d_1$ 和 $a_2b_2c_2d_2$ ， b_1 到 c_1 的函

数 $\Delta x_1 = x(u_{b_1}, v_{b_1}) - x(u_{c_1}, v_{c_1})$ ， b_2 到 c_2 的函数 $\Delta x_2 = x(u_{b_2}, v_{b_2}) - x(u_{c_2}, v_{c_2})$ [2]。 $\Delta x_2 > \Delta x_1$ ，后者系统的安全状况比前者更为恶劣，即后者所描述的建设工程状态比前者更容易出现安全事故。若突变流形的曲线由上叶向下叶或下叶向上叶发展时不经折叠线，则不会有安全事故发生，如图 2 中的曲线 a_3d_3 所示。

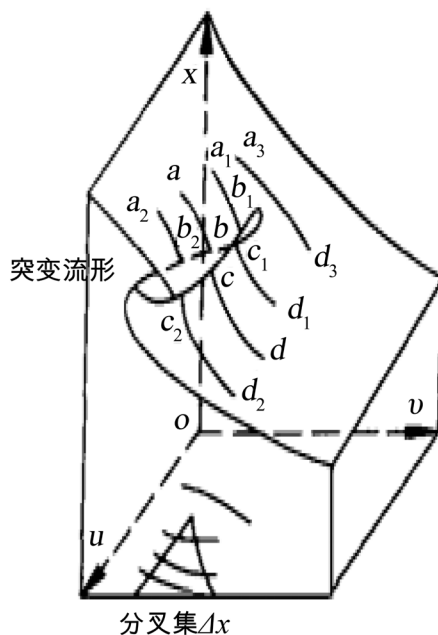


Figure 2. Accident cause mutation model [3]
图 2. 事故致因突变模型[3]

分叉集方程中的控制参量可对应人的因素和物的因素，其最终结果可反映所描述的建设工程在某个时段下事故发生概率值，值的大小可反映其危险程度。

4. 分叉集方程参数

4.1. 人的不安全行为

表示人的不安全行为的控制参量 v 由人的因素 S_1 决定，按公式(4-1)计算。

$$v = 38 - 0.5S_1 (-12 < v < 38) \quad [4] \quad \text{公式(4-1)}$$

式中， S_1 为人为影响因素，参照《建筑施工安全检查标准》JGJ59-2011，结合《建设工程施工现场消防安全技术规范》GB 50720-2011 及《天津市建设工程施工安全资料管理规程》DBT29-222-2014 相关内容，从现场安全文明、大型机械设备、临时用电、消防安全等几方面的内业资料及管理行为量化工程建设安全生产状态突变控制参量 v ，其具体内容如表 1 所示。

Table 1. List of human factors S_1 [5]

表 1. 人因 S_1 [5]

子项目	检查的具体项目及得分
保证项目(60分)	安全生产责任制、施工组织设计、安全技术交底、安全检查、安全教育、应急预案各 10 分
一般项目(40分)	分包单位安全管理、特种作业持证上岗、生产安全事故处理、安全标志各 10 分
合计	$S_1 = \sum S_{1i}$

4.2. 物的不安全状态

表示物的不安全状态的控制参量 u 由物的状态 S_2 决定, 按公式(4-2)计算。

$$u = 0.4S_2 - 30 \quad (-30 < u < 10) \quad [4] \quad \text{公式(4-2)}$$

式中, S_2 参照《建筑施工安全检查标准》JGJ59-2011, 结合《建设工程施工现场消防安全技术规范》GB 50720-2011 内容, 将建设工程现场临边围护, 大型机械设备, 脚手架, 基坑, 施工机具, 消防设施, 临时用电及作业人员安全劳保用品等物的状态作为量化工程建设安全生产状态突变控制参量 u , 各个子项的检查内容及评分方法应严格按照《建筑施工安全检查标准》JGJ59-2011 相关条款执行。具体内容如表 2 所示。

Table 2. The factor of substance S_2 [5]

表 2. 物的因素 S_2 [5]

子项	文明施工	脚手架 (内、外)	基坑支护、 土方作业	“三宝” “四口” 临边防护	施工 用电	物料 提升机	施工 升降机	塔式 起重机	起重 吊装	施工 机具	高处作业 吊篮
得分											
合计	$S_2 = \sum \text{该项权重} \times \text{该项检查得分}$										

另, 建设工程施工现场实为动态管理, 随着施工进度不同其所涉及的机械设备及现场状态也有所不同, 如基础开挖阶段只涉及《建筑施工安全检查标准》JGJ59-2011 检查表中的文明施工、“三宝”“四口”、基坑支护及施工用电的内容, 检查者应按照现场实际情况, 采用检查子项目加权平均的计算方法得出检查得分。依据历年住房和城乡建设部办公厅对房屋市政工程生产安全事故情况的通报分析, 以不同安全事故类型占比来划分各个检查表中子项所占权重比例, 建议权重比例如下: 文明施工占 0.16、脚手架(内、外)占 0.16、基坑支护、土方作业占 0.12、“三宝”“四口”临边防护占 0.12、施工用电占 0.12、物料提升机占 0.08、施工升降机占 0.08、塔式起重机占 0.12、起重吊装占 0.12、施工机具占 0.08、高处作业吊篮占 0.12。

4.3. 事故判定

分叉集方程 $8u^3 + 27v^2$ 中, 当控制参量 $8 > u > 0$ 时, 不会产生安全事故。但若 u 的值持续增大, 危险性将增大, 当 $v > 8$ 时达到临界点, 应该采取相应控制措施。当控制参量 $u < 0$ 且同时满足控制参量 $v < 0$ 和分叉集方程 $8u^3 + 27v^2 > 0$, 则系统将处于安全状态; 若超出此控制范围, 则安全生产状态的值就会跨越折叠线发生突变, 一定概率会发生安全事故[4]。

5. 案例应用

以宝坻某垃圾填埋场项目的某次安全咨询服务为例, 情况如下: 2020 年 9 月 17 日, 我司检查人员对宝坻生活垃圾焚烧发电项目进行了安全检查, 检查内容包括施工机械、架体、临时用电、施工机具、现场消防及文明施工。

依据《建筑施工安全检查标准》JGJ59-2011 检查评分标准, 将各项检查结果填入表 3, 为减小对结果的影响, 未涉及的检查项目按 60 分计。

各项检查评分表如下, 详见表 3、表 4:

Table 3. List of human factors
表 3. 人因检查表

子项目	检查的具体项目	得分
保证项目(60分)	安全生产责任制、施工组织设计、安全技术交底、安全检查、安全教育、应急预案各10分	40
一般项目(40分)	分包单位安全管理、特种作业持证上岗、生产安全事故处理、安全标志各10分	31
合计	$S_1 = \sum S_{1i}$	71

$$v = 38 - 0.5S_1 \quad (-12 < v < 38)$$

$$v = 2.5$$

Table 4. The factor of substance
表 4. 物因检查表

子项	文明施工	脚手架(内、外)	基坑支护、土方作业	“三宝”“四口”临边防护	施工用电	物料提升机	施工升降机	塔式起重机	起重吊装	施工机具	高处作业吊篮
权重	0.16	0.16	无	0.12	0.12	无	无	0.12	0.12	0.08	0.12
检查得分	$93 \times 0.16 = 14.88$	0	无	$63 \times 0.12 = 7.56$	0	无	无	未检 7.2	$75 \times 0.06 = 4.5$	0	0

$$S_2 = \sum \text{该项权重} \times \text{该项检查得分}$$

$$S_2 = 55.74$$

$$u = 0.4S_2 - 30 \quad (-30 < u < 10)$$

$$u = -7.7$$

$$8u^3 + 27v^2 = -365 + 169 < 0$$

根据模型，现场有可能出现安全事故。此计算结果与安全专家的检查结论相一致。要求现场立即停工进行整改，整改验收合格后再行复工。

后期复查结果相比较与之前有较大改观，除上月检查出的安全隐患整改完成，新排查出的安全隐患数量降至12条，经计算建设工程安全管理状态可控。

6. 结论

利用突变数学模型模拟了建设工程安全生产状态，给出了控制参量的量化评价方法，但应结合安全专家的结论。经实际检验与专家判断一致，可用于施工现场的自我安全评测。

参考文献

- [1] 何广讷. 土工的若干新理论研究与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994: 250.
- [2] 徐茵. 突变理论在建筑工程安全中的应用[J]. 吉林建筑大学学报, 2009, 26(2): 6-10.
- [3] 蒋军成. 突变理论及其在安全工程中的应用[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 1999(1): 25-29.
- [4] 丁庆华. 突变理论及其应用[J]. 黑龙江科技信息, 2008(35): 11, 23.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部 JGJ 59-2011, 建筑施工安全检查标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 祁雨笛, 江华, 孙梦嘉, 等. 建设工程生产安全状态突变模型研究[J]. 工业安全与环保, 2012(11): 77-79.