

# 施工现场安全危险源实时监控与安全风险预测方法研究

吴伟巍<sup>1</sup>, Patrick T I LAM, 李启明<sup>1</sup>,  
Michael C H YAM, David A S CHEW<sup>3</sup>

(1. 东南大学建设与房地产研究所, 南京 210096 2 香港理工大学建设与房地产学系,  
香港九龙 999077 3. 新加坡南洋理工大学土木与环境工程学院, 新加坡 639798)

[摘要] 对国内外建筑业施工现场安全风险的研究进行了文献综述, 针对目前研究的不足之处, 提出了施工现场安全危险源实时监控和安全风险实时预测的示意性模型, 并详细解释了该模型的含义和方法。研究将提供一种基于前馈信号的施工现场安全危险源实时监控和安全风险实时预测的方法; 并通过将现有研究的视角引入到施工现场关键安全危险源的前馈信号上, 为进一步的研究打下良好的理论基础。

[关键词] 施工现场; 安全风险; 实时预测; 前馈信号; 信号检测理论

[中图分类号] TU714 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)03-0068-05

## 1 研究背景

建筑业作为高风险行业, 施工现场安全事故的发生对社会经济、人民生活和自然环境都将产生重大的影响。研究者和实践者一直都在研究如何降低施工现场的安全风险, 减少施工现场安全事故的发生, 但似乎一直没有找到解决这个问题的根本方法, 建筑业施工现场安全事故总是不断地困扰着建筑业<sup>[1~4]</sup>。如果可以在施工现场安全事故发生之前就预测到事故可能发生, 并向当事人发出警告, 从而通过采取及时的措施以避免安全事故的发生, 将是从根本上解决建筑业施工现场安全事故频发问题的可能途径之一。但随之而来的问题是, 做出这样一种实时预测是否存在可能性。目前关于施工现场安全风险的研究主要集中在以下几个方面。

1) 关于施工现场安全风险产生的根本原因及影响因素的研究。如 Sawacha 等学者分析了影响施工现场安全问题的因素, 包括历史因素、经济因素、

心理因素、技术因素、程序因素、组织因素和环境因素<sup>[2]</sup>。Fang 等学者指出, 施工现场安全管理绩效与组织因素、经济因素、管理者和施工人员之间的关系因素相关度很高<sup>[3]</sup>。Hinze 和 Gambatese 确定了影响专业承包商安全绩效的关键因素<sup>[4]</sup>。Tee 等学者发现当存在公司政策不足、实践行为不安全、个人态度不重视、安全责任不清楚和施工人员安全知识培训不足的时候, 施工现场安全事故更加有可能发生<sup>[5]</sup>。Y 和 Langford 介绍了导致安全事故不同风险因素组合效果的概念<sup>[6]</sup>。Carter 和 Smith 指出目前安全危险源的识别水平远远达不到理想的要求, 并指出安全危险源的识别对于现场安全管理是至关重要的<sup>[7]</sup>。Blackmon 和 Gramopadhye 注意到现场施工人员似乎常常会把现场的警告当成一般的噪声来对待, 这个问题被认为是人的一种固有缺陷, 即在没有正面反馈的时候无法保持持续的注意力<sup>[7]</sup>。

2) 关于安全危险源的分类和事故调查过程的研究。如 Hinze 等学者指出美国 OSHA 对事故原因

[收稿日期] 2008-03-25

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50878049); 东南大学人才引进科研启动项目资助(4005001065)

[作者简介] 吴伟巍(1981-), 男, 江苏连云港市人, 东南大学讲师, 博士, 研究方向为工程项目风险管理; E-mail: wuweiw@seu.edu.cn

的 4 种分类不能提高分析事故根本原因的信息, 提出了可能的 20 种分类方法以提供更多的关于安全事故的信息<sup>[8]</sup>。Chu 和 Goh 发展了一个事件原因模型作为一个有效的反馈机制, 这个机制包括事故调查的编号信息, 有利于在安全规划中充分利用信息<sup>[9]</sup>。

3) 关于安全风险预测方面的研究。针对缺乏相关数据和有效模型来预测施工现场事故的困难, Bentil 发展了一种能够让建筑业预测事故的模型<sup>[10]</sup>。Janical 的研究表明, 可以通过利用施工人员因素和安全程序因素的组合来有效地预测事故<sup>[11]</sup>。Giller 的研究结果显示, 一些独立变量如摔落的高度、站立的表面情况、安全气候测量值和安全协会的地位对受伤严重性有着显著贡献<sup>[12]</sup>。Schmid 研究了一种工具以用来预测建筑事故造成的损失<sup>[13]</sup>。Quintana 等学者发展了一种事故的预测模型来提高安全绩效, 这种模型需要实时地确定和评价潜在的安全危险源<sup>[14]</sup>。

还有相当一部分的研究集中在安全态度、安全文化和安全气候方面<sup>[15]</sup>; 以及从工程项目全生命周期的角度出发, 强调了在设计阶段考虑安全问题的重要性<sup>[16]</sup>。

## 2 现有研究的不足之处

### 2.1 借鉴地震预报和天气预报的研究思路

如图 1 所示, 其总结了地震预报和天气预报的一般研究思路和发展过程。从总体上看, 地震预报和天气预报的研究可以划分为 3 个阶段, 在图中分别记为 A、B 和 C。A 阶段表示的是人类对自然想象的一种不理性认识, 通过主观猜测去解释自然现象。在 B 阶段, 随着社会的发展和科学技术的进步, 人们越来越多地开始寻找自然现象产生的可观机理, 他们提出各种假设, 并在实践中通过各种历史记录验证这些假设。最终, 人们对自然现象有了客观和科学的解释, 并在此基础上, 开始尝试基于历史记录和产生机理对自然现象进行初步的预测。但是, 这种程度的预测仍然不能确定准确的地点、日期、甚至下次灾害发生的强度。从而, 在 C 阶段, 人们开始强调和重视对灾害发生前的前馈信号和基于前馈信号预测方法的研究, 在此基础上实现了实时预测和预报。

将目前关于施工现场安全危险源的研究和地震预报及天气预报的一般研究路线进行比较, 可以发

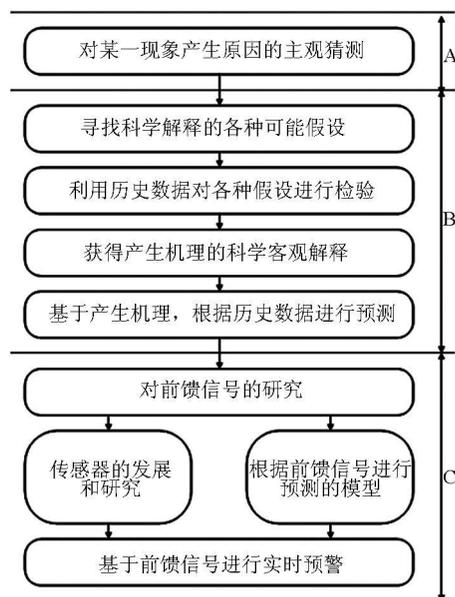


图 1 地震预报和天气预报的一般研究路线  
Fig 1 Common research route of earthquake prediction and weather forecast

现目前对施工现场安全危险源的研究还主要停留在 B 阶段, 与地震预报和天气预报领域对于 C 阶段的大量集中的研究比起来, 关于施工现场安全危险源前馈信号的关注程度明显不足。某一类安全危险源的前馈信号可以理解为这样一种信号, 它在每次发生此类施工现场安全事故之前似乎都会产生。对于前馈信号的研究是对安全危险源进行实时监控和对安全风险进行实时预测的基础, 但是目前的研究非常缺乏对前馈信号的研究。

### 2.2 从预测精度指标进行的分析

从预测精度来看, 安全风险的实时预测应该是在对安全危险源实时监控的基础上, 根据对前馈信号的采集, 计算出相应的安全风险从而进行实时预测。如果预测不是在安全危险源监控的基础上做出的就不是实时预测阶段的研究; 即便某个预测是在对安全危险源监控的基础上, 但如果不是根据安全危险源的前馈信号做出的预测, 也不是实时预测阶段的研究。从预测精度来看, 目前很多的研究并没有注重对关键安全危险源的实时监控。很多研究都是早于安全危险源监控阶段的研究。Schmid 的研究虽然是在安全危险源实时监控的基础上做出的预测, 但其使用的预测指标并不具有前馈性, 因此也不能作为实时预警阶段的研究<sup>[13]</sup>。显然, 目前关于安全风险预测的精度远远达不到令人满意的程度。

### 2.3 小结

从文献综述和以上的比较分析可以看出,目前关于安全风险的预测只能“预测”到哪些区域和哪些时候是施工现场安全风险比较大的时候,而无法确切地在施工现场安全事故发生之前做出及时和准确的判断。目前关于安全风险实时预警方面的研究不足主要有以下两个方面: a) 现有的对施工现场安全危险源前馈信号的研究没有足够的重视; b) 目前对安全风险的预测精度远远没有达到令人满意的程度,离实时预测的要求还有很大差距。对施工现场安全危险源前馈信号的研究和对安全风险实时预警方法的研究已经势在必行。

### 3 研究方法及示意模型

Cooper指出,对安全危险源的监控是预测安全风险的关键所在,但是目前主要的研究都没有注意到这一点<sup>[17]</sup>。Carter和Smith也表达了类似的意思,指出对危险源的管理是施工现场安全问题的关键<sup>[11]</sup>。尽管Quintana等学者提出的模型重视了对安全危险源的监控,但是其预测不是在对前馈信号采集和分析的基础上做出的,因此预测精度仍然达不到让人满意的程度<sup>[14]</sup>。成功进行安全风险的实时预测需要集成以上涉及的所有工作。安全危险源实时监控和安全风险实时预测的示意模型见图2。从根本上看,这个示意模型是个至底往上的示意图,包括两个主要阶段,一是施工现场安全危险源识别阶段,二是关键安全危险源实时监控和安全风险实时预测阶段。下面将对示意模型的研究路线、使用方法和主要结果进行详细的解释和讨论。

#### 3.1 安全危险源识别阶段

Darbush和Casa指出,对安全事故的历史分析可以提供关于频发事故及其原因的非常有价值的信息<sup>[18]</sup>。因此,模型从施工现场安全事故的历史数据库开始,这些数据将被用来分析施工现场的安全危险源、探索不同种类安全危险源的前馈信号、以及被用来假设、检验前馈信号的分布形式及估计其主要参数。这项研究使用的数据来自于美国职业安全健康协会(OSHA),使用Microsoft Access创建的数据库。数据库包括了美国建筑业从1990年至2000年10年间的6735个施工现场安全事故案例,总共涉及大概8505个受伤及死亡人员。之所以采用这个数据库,更为重要的原因在于每个案例都包括一个描述事故发生时候周围的环境及情况,并详细描述

了安全事故发生过程的摘要,这些摘要有提供分析关于施工现场每类安全事故发生前似乎都会出现的前馈信号重要信息的潜力。

基于前面关于安全危险源的研究,将探索各种安全危险源的前馈信号。方法将主要采用理论分析和文献综述的方法,以获得可能的前馈信号。同时,将根据概率论假设前馈信号的分布形式、估计前馈信号的主要参数并进行检验。在图2中,A、B和C代表施工现场可能的安全危险源。A类危险源的前馈信号可能有几种,分别用 $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ 表示,B和C也类似。

信号检测理论是一种基于统计概率的理论,可以被用来定量分析一个诊断系统的绩效。这个理论最早是在电子工程专业建立的,并且在其他领域取得了广泛的应用。Ramsay和Tubb研究了如何在会计诊断系统中应用信号检测理论<sup>[19]</sup>。Deshmukh和Rajagopalan总结了信号检测的发展以及在其他领域的应用情况,包括心理学及医药领域、人的感知和决策领域、内存检测领域、测谎领域、个人选择及审判决策等<sup>[20]</sup>。信号检测理论的广泛应用证明了这个模型能够帮助决策者有效地区别“信号”和“噪声”,具有降低安全风险预测中类似问题的潜力。

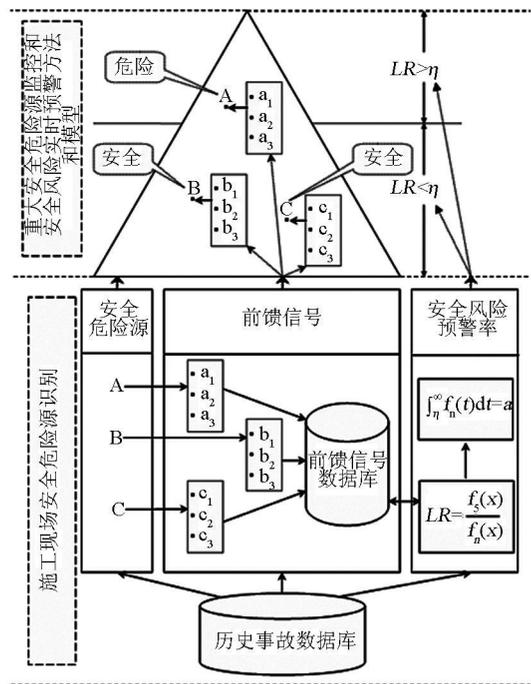


图2 研究内容框架结构图

Fig 2 Schematic model of tracking of safety hazards and real-time prediction of safety risks

限于篇幅,基本的信号检测理论在此不做详细

讨论,从信号检测理论的角度来看,施工现场安全风险实时预测的目标就是在复杂的环境中,在安全危险源实时监控的基础上,检测安全危险源的前馈信号是否来自于安全事件的分布函数。这样的决策就有4种可能,如表1所示。

表1 施工现场安全风险实时预测决策模型  
Table 1 Decision matrix for real-time prediction of safety risks on construction sites

|          |    | 实时预测                            |                                 |
|----------|----|---------------------------------|---------------------------------|
|          |    | 危险的                             | 安全的                             |
| 实际<br>情况 | 事故 | $P(\text{危险的} \text{事故}) = P_H$ | $P(\text{危险的} \text{事故}) = P_M$ |
|          | 安全 | $P(\text{危险的} \text{安全}) = P_F$ | $P(\text{安全的} \text{安全}) = P_C$ |

在实践中很难准确计算某个施工现场发生安全事故的概率。同时,我们更关心的是  $P_H$  的概率,  $P_H$  表示的是施工现场安全风险预测的精度,这对预防安全事故的发生是至关重要的。从另外一个方面说,  $P_H$  的增加会导致  $P_F$  同时增加,也就是导致恒虚警率增加,继而导致采取及时措施的成本增加。在 SDT 框架中, Neyman-Pearson (N-P) 标准提供了一种在恒虚警率的约束下 ( $P_F = \alpha$ ), 使预警率  $P_H$  最大的方法。这种方法使用预警率和恒虚警率来计算似然比 (LR), 公式如下:

$$LR = \frac{f(x)}{f(\bar{x})}$$

LR 的值再与固定的标准值 “ $\eta$ ” 进行比较, 如果  $LR \geq \eta$ , 确定预测结果为 “危险的”; 如果  $LR < \eta$ , 确定预测结果为 “安全的”。标准值  $\eta$  的计算依赖于恒虚警率的确定 ( $P_F = \alpha$ )。式 (1) 表明了标准值  $\eta$  的计算。

$$P_F = \int_0^{\eta} f(x) dx = \int_{\eta}^{\infty} f(t) dt = \alpha \quad (1)$$

具体推导过程在此省略, 总而言之, N-P 标准可以在  $P_F = \alpha$  的约束下, 使  $P_H$  最大。

### 3.2 关键安全危险源实时监控和安全风险实时预测阶段

基于 OSHA 的安全事故数据库, 每类安全危险源都有个明确的实时监控的起始时间, 换句话说, 在这样一段时间中某一类安全风险造成安全事故可能性非常大。这段时间可以作为安全危险源实时监控和安全风险实时预测阶段。当到这段时间的时候, 安全危险源从三角形的底部进入三角形的内部, 标志着这类安全危险源实时监控的开始。三角形的底部代表所有可能的安全危险源, 基于安全危险源实

时监控, 关于前馈信号的观察值可以通过各种方法被搜集, 相关的采集方法也是进一步研究的重点。LR 和  $\eta$  的值将根据前馈信号的数据计算出来, 如果  $LR \geq \eta$ , 确定预测结果为 “危险的”;  $LR < \eta$  确定预测结果为 “安全的”。

## 4 结语

笔者等研究了施工现场安全危险源实时监控的方法, 探索了施工现场安全风险实时预测的方法。首先, 对国内外建筑业施工现场安全风险的研究进行了文献综述。其次, 总结了地震预报和天气预报的一般研究思路, 并将建筑业施工现场安全风险的研究与此一般研究思路进行了比较, 从两个不同的角度分析和总结了现有研究的不足之处, 主要表现在两个方面: 现有的研究对施工现场安全危险源前馈信号的研究没有足够的重视; 目前对安全风险的预测精度远远没有达到令人满意的程度, 离实时预测的要求还有很大差距。进而, 针对目前研究的不足之处, 文章提出了施工现场安全危险源实时监控和安全风险实时预测的示意性模型, 并详细解释了该模型的含义和方法。最后, 笔者等探索了基于信号检测理论, 利用前馈信号进行施工现场安全危险源实时监控和安全风险实时预测的方法。

这项研究将提供一种基于前馈信号的施工现场安全危险源实时监控和安全风险实时预测的方法; 并且通过将现有研究的视角引入到施工现场关键安全危险源的前馈信号上, 为进一步的研究打下良好的理论基础。

### 参考文献

- [1] Carter G, Smith S D. Safety hazard identification on construction projects [J]. Journal of Construction Engineering and Management 2006 132: 197-205
- [2] Sawacha E, Naoum S, Fong D. Factors affecting safety performance on construction sites [J]. International Journal of Project Management 1999 5: 309-315
- [3] Fang D P, Huang X Y, Hünze J. Benchmarking studies on construction safety management in China [J]. Journal of Construction Engineering and Management 2004 130: 424-431
- [4] Hünze J, Gambatese J. Factors that influence safety performance of specialty contractors [J]. Journal of Construction Engineering and Management 2003 129: 159-164
- [5] Teo E A L, Ling F Y Y, Chong A F W. Framework for project managers to manage construction safety [J]. International Journal of Project Management 2005 23: 329-341
- [6] Yi K J, Langford D. Scheduling-based risk estimation and safety

- Planning for construction projects [ J ]. Journal of Construction Engineering and Management 2006 132 626—635
- [ 7 ] Blackmon R B Gramopadhye A K Improving construction safety by providing positive feedback on backup alarms [ J ]. Journal of Construction Engineering and Management 1995 121 166—171
- [ 8 ] Hinz J Pedersen C Fredley J Identifying root causes of construction injuries [ J ]. Journal of Construction Engineering and Management 1998 124 67—71
- [ 9 ] Chua D K H Goh Y M Incident causation model for improving feedback of safety knowledge [ J ]. Journal of Construction Engineering and Management 2004 130 542—551
- [ 10 ] Bentil K K A model approach for predicting commercial construction site accidents [ D ]. Florida University of Florida 1990
- [ 11 ] Janicak C A The three factor accident prediction inventory [ D ]. Chicago Loyola University, 1993
- [ 12 ] Gillen M E Nonfatal falls in construction workers: Predictors of injury severity [ D ]. San Francisco University of California 1996
- [ 13 ] Schmidt J R Quantifying the impact of construction accidents using predictive models [ D ]. Buffalo State University of New York 1997
- [ 14 ] Quintana R Camet M Delivala B Application of a predictive safety model in a combustion testing environment [ J ]. Safety Science 2001 38 183—209
- [ 15 ] Mohamed S Safety climate in construction site environments [ J ]. Journal of Construction Engineering and Management 2002 128 375—384
- [ 16 ] Gibb A G F Design for safety and health [ A ]. Proceedings of EC/CIB/HSE Int Conf C. U K, 2000 268—279
- [ 17 ] Cooper J Portuy information about sources of data in probabilistic analyses [ A ]. Proceedings of the 1998 ASME/JSME Joint Pressure Vessels and Piping Conference C. 1998 378 26—30
- [ 18 ] Darbra R M Casal J Historical analysis of accidents in seaports [ J ]. Safety Science 2004 42 85—98
- [ 19 ] Ramsay R J Tubbs R M Analysis of diagnostic tasks in accounting research using signals detection theory [ J ]. Behavior Research in Accounting 2001 17 149—173
- [ 20 ] Deshmukh A Rajagopalan B Performance analysis of filtering software using signal detection theory [ J ]. Decision Support Systems 2006 42 1015—1028

## Tracking of safety hazards and real time prediction model of safety risks on construction sites

Wu Weiwei<sup>1</sup>, Patrick T. I. LAM<sup>2</sup>, Li Qiming<sup>1</sup>,  
Michael C. H. YAM<sup>3</sup>, David A. S. CHEW<sup>3</sup>

(1. Department of Construction Management and Real Estate Southeast University Nanjing 210096 China; 2. Department of Building and Real Estate The Hong Kong Polytechnic University Hung Hom Kowloon Hong Kong 999077 China; 3. School of Civil and Environmental Engineering NanYang Technological University 639798 Singapore)

[ Abstract ] This paper aims to explore the tracking approach of safety hazards and real time prediction methods of safety risks on construction sites. A literature review of safety issues on construction sites is first conducted. Consequently a schematic model of tracking safety hazards and real time prediction of safety risks is formulated and the corresponding methodologies are summarized. This study would provide a possible research approach on method for tracking safety hazards and real time prediction of safety risks while serving as a foundation for further study by drawing researchers attention to the precursor signals of safety hazards on construction sites.

[ Key words ] construction sites; safety risks; real time prediction; precursor signals; signal detection theory