

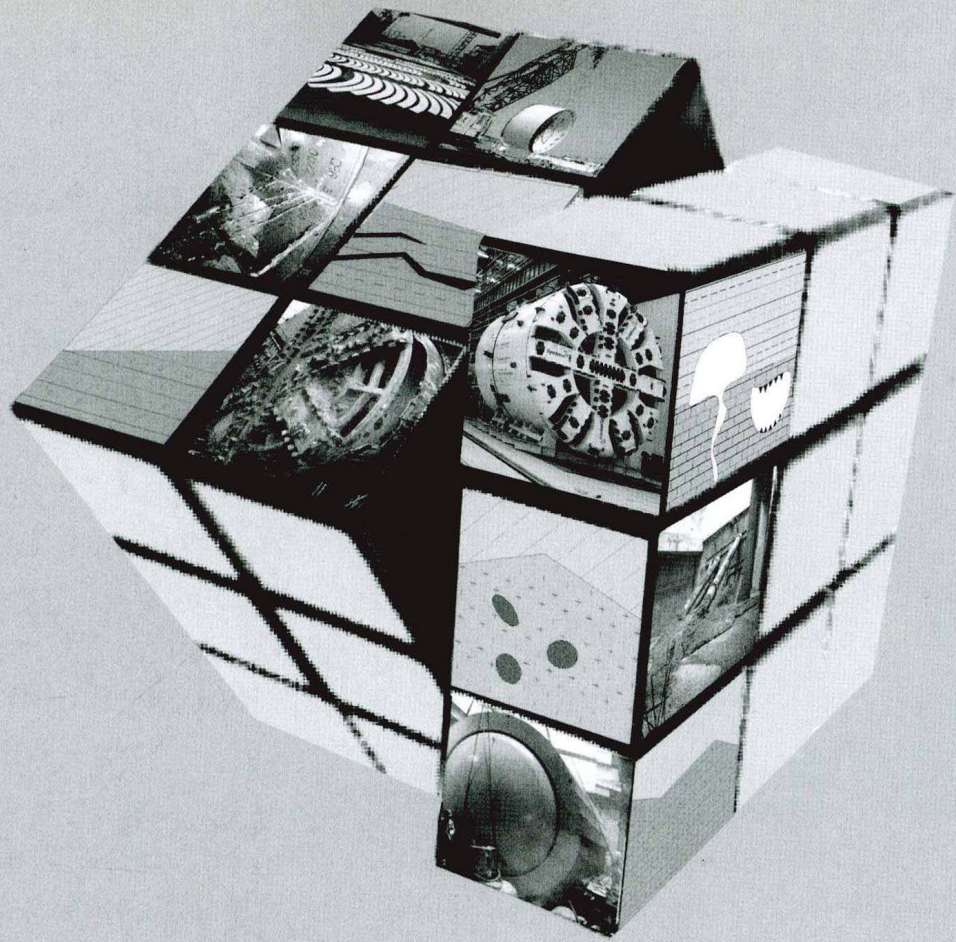
# 地铁盾构施工风险源 及典型事故的研究

竺维彬 鞠世健 著



 暨南大学出版社  
JINAN UNIVERSITY PRESS

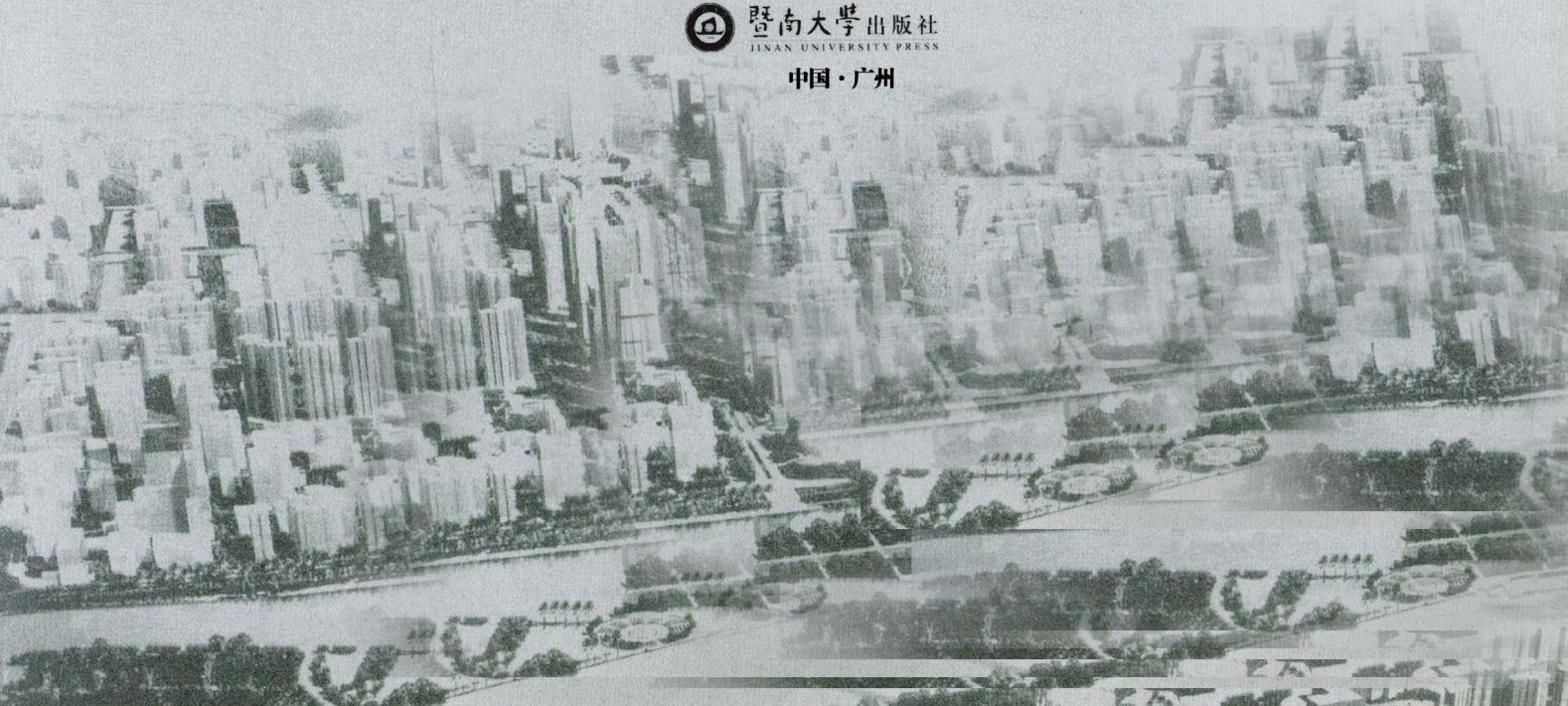




# 地铁盾构施工风险源 及典型事故的研究

竺维彬 鞠世健 著

 暨南大学出版社  
JINAN UNIVERSITY PRESS  
中国·广州



## 图书在版编目(CIP)数据

地铁盾构施工风险源及典型事故的研究 / 竺维彬, 鞠世健著. — 广州: 暨南大学出版社, 2009.8  
ISBN 978-7-81135-369-3

I. 地… II. ①竺… ②鞠… III. 地下铁道—铁路工程: 隧道工程—盾构(隧道)—工程施工—风险管理—研究 IV. U231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 138571 号

## 内 容 简 介

随着盾构技术在我国迅猛发展, 盾构事故也相应增多, 造成的损失和影响也很大。

风险管理是贯穿盾构施工始终的一项极为重要的工作。大部分风险可预测, 可预防; 部分风险可预测, 难预防; 还有部分风险无法预测。

尽管盾构施工中的事故难以百分之百地避免, 但这绝不是人们在问题面前无所作为的借口, 正相反, 因为有难度, 才要去研究。本书无意给出切实可行的具体办法, 但提供了一些思路。

本书主要供从事盾构施工的工程技术人员参考, 其中的资料和数据可供教学和科研之用。

出版发行: 暨南大学出版社

---

地 址: 中国广州暨南大学

电 话: 总编室 (8620) 85221601

营销部 (8620) 85225284 85228291 85220693 (邮购)

传 真: (8620) 85221583 (办公室) 85223774 (营销部)

邮 编: 510630

网 址: <http://www.jnupress.com> <http://press.jnu.edu.cn>

---

排 版: 广州市天河星辰文化发展部照排中心

印 刷: 佛山市浩文彩色印刷有限公司

---

开 本: 850mm × 1168mm 1/16

印 张: 9.25

字 数: 302 千

版 次: 2009 年 8 月第 1 版

印 次: 2009 年 8 月第 1 次

---

定 价: 138.00 元

---

(暨大版图书如有印装质量问题, 请与出版社总编室联系调换)

# 序

就世界建筑业的发展趋势而言，19、20 世纪是以占有大量地面土地资源为代价，修筑公路、铁路、桥梁、机场和争先恐后向空中延伸、建筑高楼的世纪。自“二战”至今，世界人口迅速增加，城镇化进程加快，科学技术突飞猛进，城市的建筑有必要（地面土地资源的局限）也有可能（非开挖技术水平的提高）从地上转向地下开拓空间，因此，21 世纪被称为地下空间开发的世纪。

作为最大的发展中国家且人口超过 13 亿的中国更是如此。自 2000 年以来，随着地铁、铁路、公路、水力、电力等地下工程的大规模建设，盾构法隧道技术从广州（1995 年）在复合地层中大胆尝试并成功应用之后，迅速推广到全国各个地下空间开发领域。进入 21 世纪后仅 10 年时间，最大直径的盾构机（直径 15.30 米）在中国上海成功应用，盾构机台数由 10 余台迅速增加到 300 余台；施工队伍从不足 10 家发展到超过 50 家，世界上著名的盾构机厂家，例如海瑞克、威尔特、小松、三菱、罗瓦特、罗宾斯等纷纷落户中国，独资、合资或合作办厂，使得中国成为世界上盾构机生产、加工和应用最多的国家，盾构法隧道建设规模占世界 1/4 强。盾构法之所以如此快速地发展，是因为与传统的暗挖法相比，盾构法在施工安全、工程进度、质量保障、环境保护和施工人性化等方面的优越性非常明显，并且其投资的优势也逐渐显现。因此，能用盾构法的隧道工程基本上都采用了盾构法施工，盾构事业的蓬勃发展令国人深感自豪。

近年来，随着工程项目、规模和数量的急剧扩大，盾构施工过程中安全事故和质量事故总量也呈现明显上升的趋势。例如，仅在盾构开仓检查更换刀具过程发生的 5 起意外事故中，就有 10 名盾构工作者不幸遇难，这些事故极大地影响了盾构事业的健康发展，令人深感不安和忧虑。

面对“急风暴雨式”的大规模的盾构法隧道建设，面对盾构事业人力资源的紧缺和系统技术积累的不足，要使盾构事业可持续地良性发展，当务之急是：系统地总结 10 余年来全国盾构工程的经验（尤其是教训），研究提出风险控制理论；培训大批盾构专业人才，制定风险控制规范或规程，以指导盾构工程安全生产。

令人感到欣慰和难能可贵的是，早在 15 年前，我在广州地铁做总顾问时的同事，也就是本书作者等同人，一直坚定不移地朝着这个方向努力。作者在亲自主管或监理了广州地铁 100 多台次盾构机在复合地层艰苦实践的基础上，认真地考察、学习并收集了深圳、北京、上海、天津、沈阳、成都、西安、南京、杭州等城市的铁路、水力、电力领域的盾构施工经验，通过多年的系统研究和分析，首次提出并创立了许多盾构工程风险管理的新观点和新方法，例如，“盾构工程管理以风险管理为核心的理念”，并且将盾构施工风险源概括为三大类，即地质、盾构机适应性和“人”。按人们的认知能力来分，一是可预测的，二是不可预测的。作者建立了可预测盾构风险三维识别模式，即通过对地质环境、盾构机适应性和设计、施工及相关人员所做的方案设计、施工组织等的正确分析，进一步确定风险源，并制定有针对性的预控或控



施仲衡  
中国工程院院士



制措施。绝大部分的风险是可以规避、转移和预控的，而个别“人”的不规范行为则是当下事故概率最高的风险源。此外，正如作者在本书中指出的那样，必须承认还有一些是目前人的认知水平和技术水平事先不可预测的风险，这一类风险，要求从业人员“动态预测，精细管理”。只有这样，才能控制事先可预测的风险，降低事先不可预测的风险。地下工程要想做到绝对的“万无一失”是不实际的，也是不科学的，就像人类不希望发生地震、海啸一样。

据我所知，本书是世界上第一本专门论述盾构工程风险管理的专著。书中资料翔实，大量的案例均来自作者的亲身实践。

我相信，本书的出版和发行，将对盾构工程风险的控制起到重要的指导作用。

愿作者继续努力，为中国盾构事业的健康发展作出更大的贡献。

施仲衡

2009年6月25日

# 前 言

地铁隧道采用盾构法施工在最近几年里呈现出一种爆炸式的发展，人们言必称盾构，能用盾构法的隧道工程全用盾构法施工。

盾构法施工优越性已是不言自明的事实了，但是，和这种形势相伴而生的，除了盾构技术的快速发展外，还有另外一种趋势，即盾构施工事故增多，有些事故造成的损失还是非常惊人的。

10余年来，作者一直在盾构施工一线上做着技术和管理工作，虽然每天如履薄冰、如临深渊地关注着工程的进展，还是没能协助有关方面杜绝所有事故的发生，这种精神压力难以言表。

盾构施工中的事故造成的损失是盾构技术在发展过程中的一种代价，这是因为，从根本上来说，人们的知识都是来自实践，每次对失败的正确总结，都会使人们的认知产生一次飞跃。但是，作为一个技术和管理人员，这绝不是让失败或事故任其泛滥的借口。基于这个想法，作者于2007年底完成了《广州地铁三号线盾构隧道工程施工技术研究》一书之后着手这项研究工作，试图寻找解决办法。

避免事故的核心是对可能风险源的预测，而风险源的识别自然就是问题的关键。在施工实践中，作者认识到，有些风险源是可以预测和识别的，可将其定义为一般风险源；有些风险源是不可以预测和识别的，可将其定义为特殊风险源。对于前者，作者在本书中提出了三维风险源识别程式，希望能提供一条思路；对于后者，作者认为要通过精细化管理来实现对风险的控制。

本书第二章在对资料进行反复筛选的过程中，特别慎重地对他人提供给作者的素材进行了研究。为了保证资料的可靠性，防止以讹传讹，最后纳入本书的案例都必须至少满足如下两个条件之一：

第一，作者本人参加过案例事故的处理，或与当事人讨论过案例的处理意见。

第二，作者本人对现场进行过考察，对地质环境和盾构机的特点相当清楚。

本书分为以下四部分。

绪言：盾构施工理论体系是由地质、盾构机和人三部分组成的，在盾构施工事故的研究和盾构施工风险源的识别中亦应从这三方面着手。

第一章《盾构施工风险源识别概论》：提出了三维识别程式的概念，以及地质、盾构机和人三个维度的主要风险因素。

第二章《盾构施工典型事故》：通过大量的案例，介绍了作者处理过或研究过的典型事故及应用三维程式对事故原因的分析。

第三章《避免盾构施工事故的讨论》：一般风险源通过三维程式进行识别；特殊风险源是无法预测的，要通过精细化管理来规避施工风险。

书中的照片和图纸大部分由作者和作者在广州市地铁设计研究院有限公司盾构技术研究所、广州轨道交通建设监理有限公司的同事拍摄或绘制而成，米晋生、钟长平、王晖、罗伟雄、杨木桂、王虹、黄威然、陈跃进、魏康林、廖鸿雁、罗淑仪等协助完成资料的搜集和总结工作，王晖提供了南京地铁盾构施工的素材。广州市地下铁道总公司总工室袁敏正主任审阅了全书，给作者提出了许多中肯的修改意见。

部分照片和图纸来源于广州市地下铁道总公司建设事业总部及有关施工单位、设计单位、监理单位，



它们主要是：上海隧道工程股份有限公司、上海机械施工公司、北京城建盾构基础工程公司、天津城建隧道股份有限公司、广州盾建工程公司、广东省源天公司、广东省水电二局、广东省基础公司、中铁隧道局、中铁一局、中铁二局、中铁三局、中铁五局、中铁十一局、中铁十二局、中铁十三局、中铁十四局、中铁十五局、中铁十六局等在广州、深圳、北京、南京、成都、沈阳、西安等地的项目部。衷心地感谢这些单位的领导和技术人员的支持和帮助。

谨以本书献给共同奋斗过的广州市地下铁道总公司原盾构处和广州市轨道交通监理公司的朋友们！

竺维彬 鞠世健

2009年6月

# 绪 言

就事故发生的原因而言，可以划分为人为的和自然的、责任的和非责任的、主观的和客观的、直接的和间接的、内部的和外部的，等等。本书研究盾构施工风险源和事故的目的是为了追究每一个个案发生的具体原因，而是根据盾构施工的特点及其固有的内部规律来寻求发生在这些工程事故背后可能存在的一些共性原因，以便找到正确的应对措施。

作者在《复合地层中的盾构施工技术》一书中提出，盾构施工体系是由三大部分组成的，即施工环境（主要是地质环境）、盾构机和人（主要指施工管理）。这三部分的关系可总结为：地质是基础，盾构机是关键，人是根本。从人与物的角度来看，地质环境是盾构隧道的载体，其特征是要人去认识的；盾构机是隧道施工过程中唯一的工具，它是要由人设计、制造并操作和控制的。从这个意义上来讲，工程的成功与失败都取决于人，因此，人在盾构施工体系中起着决定性的作用。

基于这种思路，在分析工程事故或工程风险源时，都要从上述三方面来考虑，而且最终都要落实到人身上。根据人们以往的实践，如果对地质环境的认识是正确的，选择的盾构机的适应性是强的，人们采取的施工措施是对的，那么工程就会成功；反之，人们对地质环境的认识及盾构机的适应性与实际存在着一定的差距，且人们在工程中采取的措施又不尽合理，则会出现某种施工故障甚至造成工程事故。

事实上，地质环境的复杂性几乎无法让人们随时随地地了解盾构机前面的实际特点和状态，而盾构机又是根据地质特点“量身定做”的，因此也就无法保证盾构机具备百分之百的适应性，这还不包括人们对地质环境的认识深度和盾构机控制手段的局限性，以及盾构机设计和制造中可能存在的工艺或材料等方面的缺陷或问题。在这个意义上来讲，风险是必然的，事故是肯定要发生的，想要在地下工程施工中做到万无一失只是人们的愿望。重要的问题是，如何把风险降到最低，如何尽可能防止重大事故的发生。



# 目 录

|   |            |
|---|------------|
| 序 .....   | 001        |
| 前言 .....  | 001        |
| 绪言 .....  | 001        |
| <b>第一章 盾构施工风险源识别概论 .....</b>                      | <b>001</b> |
| <b>第一节 风险源识别的理论合理性与实际可操作性 .....</b>               | <b>001</b> |
| 一、盾构隧道建设风险管理的历史和应用理论 .....                        | 001        |
| 二、风险识别理论应用案例 .....                                | 003        |
| 【案例 1-1】广深港铁路客运专线狮子洋隧道 SD II 和 SD III 标风险评估 ..... | 003        |
| 三、盾构隧道施工风险分类及其特点 .....                            | 004        |
| 四、盾构隧道施工风险源识别的三维程式 .....                          | 005        |
| 五、风险源三维程式的应用 .....                                | 007        |
| 六、应用中的四个主要问题 .....                                | 008        |
| <b>第二节 地质风险源的识别 .....</b>                         | <b>008</b> |
| 一、岩土形成的地史 .....                                   | 009        |
| 二、地层的组合 .....                                     | 010        |
| 三、岩石地层的岩性和地质构造 .....                              | 014        |
| 四、风化作用 .....                                      | 018        |
| 五、盾构施工的不良地质层 .....                                | 018        |
| 【案例 1-2】杭州地铁一号线滨江站——富春路站盾构区间通过含沼气砂层 .....         | 027        |
| 【案例 1-3】广州地铁三号线汉溪长隆站——番禺市桥站区间盾构施工 CO 突出 .....     | 027        |
| 【案例 1-4】广州地铁二号线北延段和三号线机场线将在煤矿的采空区附近通过 .....       | 028        |
| <b>第三节 盾构机适应性风险源识别 .....</b>                      | <b>028</b> |
| 一、盾构机的分类 .....                                    | 028        |
| 二、盾构机应用风险 .....                                   | 030        |
| 【案例 1-5】广佛线南桂路站——桂城站区间盾构机选型 .....                 | 031        |
| 【案例 1-6】广州地铁六号线大坦沙站——黄沙站区间盾构机刀具的选择 .....          | 034        |
| 【案例 1-7】广州地铁三号线沥滘站——大石站区间刀盘在隧道内破裂解体 .....         | 038        |
| 【案例 1-8】广州地铁四号线大学城北站——大学城南站区间螺旋输送机扭矩不足 .....      | 041        |
| 【案例 1-9】泡沫注入管难以疏通 .....                           | 041        |
| 【案例 1-10】滚刀数量配置不足 .....                           | 041        |



|  |            |
|--|------------|
| 【案例 1-11】加工工艺不能满足钢结构刚度要求 .....                   | 042        |
| <b>第四节 人为风险源 .....</b>                           | <b>044</b> |
| 一、心智模型风险 .....                                   | 045        |
| 【案例 1-12】开舱事故 .....                              | 045        |
| 二、人的能力、素质 .....                                  | 045        |
| 【案例 1-13】盾尾出现明火 .....                            | 046        |
| 三、施工管理风险 .....                                   | 046        |
| 【案例 1-14】盾构机进入工作井不安装密封止水橡胶帘布造成涌水涌砂 .....         | 047        |
| <b>第二章 盾构施工典型事故 .....</b>                        | <b>049</b> |
| <b>第一节 盾构机机械事故 .....</b>                         | <b>049</b> |
| 一、旧盾构机再使用风险 .....                                | 049        |
| 【案例 2-1】广州地铁一号线烈士陵园站——公园前站区间大齿圈破损 .....          | 049        |
| 【案例 2-2】广州地铁三号线珠江新城站——客村站区间旧刀盘牛腿开裂的维修 .....      | 050        |
| 【案例 2-3】广州地铁三号线珠江新城站——客村站区间三连体刀箱损坏 .....         | 051        |
| 【案例 2-4】旧盾构机再使用的评估和程序 .....                      | 052        |
| 二、异常磨损造成的设备和刀盘刀具损坏 .....                         | 053        |
| 【案例 2-5】北京地铁某区间刀盘刀具磨损 .....                      | 053        |
| 【案例 2-6】深圳地铁一号线某区间刀盘前结泥饼，致使大轴承密封圈失效 .....        | 054        |
| 【案例 2-7】广州地铁四号线大学城北站——大学城南站区间左线刀盘刀具异常磨损 .....    | 057        |
| 【案例 2-8】刀盘刀具在沙砾岩中的异常磨损 .....                     | 059        |
| 【案例 2-9】成都地铁一号线某区间盾构机刀盘刀具在砾石地层中磨损 .....          | 060        |
| 三、施工操作或材料原因造成的设备损坏或故障 .....                      | 063        |
| 【案例 2-10】广州地铁三号线沥滘站——大石站区间盾构机千斤顶断裂 .....         | 063        |
| 【案例 2-11】管片安装器吊装头断裂 .....                        | 064        |
| 【案例 2-12】溜车事故造成设备损坏 .....                        | 065        |
| 四、电路、油路、管路故障和事故 .....                            | 065        |
| 【案例 2-13】广州地铁一号线管片安装器油管爆裂事故 .....                | 065        |
| 【案例 2-14】广州地铁五号线鱼珠站——大沙地站区间主轴承油管连接错误事故 .....     | 065        |
| 【案例 2-15】泡沫管堵塞故障 .....                           | 066        |
| 【案例 2-16】泥水盾构机排浆管堵塞及对应措施 .....                   | 067        |
| 【案例 2-17】泥浆泵被击破 .....                            | 067        |
| 五、盾尾尾刷失效 .....                                   | 067        |
| 【案例 2-18】广州地铁三号线大石站——汉溪长隆站区间尾刷失效 .....           | 067        |
| 六、不明原因造成的设备损坏 .....                              | 070        |
| 【案例 2-19】广州地铁三号线珠江新城站——客村站区间旧盾构机大齿圈内发现异物 .....   | 070        |
| <b>第二节 盾构施工引发的地面沉降和建筑物损坏事故 .....</b>             | <b>071</b> |
| 一、盾构施工方法对地面沉降控制的局限性 .....                        | 072        |
| 【案例 2-20】广州市轨道交通二/八号线延长线盾构 1 标(东晓南路站——江泰路站区间)房屋倾 |            |

|  |            |
|--|------------|
| 斜事故 .....  | 072        |
| 二、在砂层和粉细砂层中施工引发的涌砂、喷涌、地面塌陷、隧道变形事故 .....            | 075        |
| 【案例 2-21】广州地铁一号线泥水盾构过砂层塌房事故 .....                  | 075        |
| 三、刀盘结泥饼造成的地面沉降事故 .....                             | 076        |
| 【案例 2-22】广州地铁三号线番禺市桥站——番禺广场站区间康乐园 9# 楼开裂 .....     | 076        |
| 【案例 2-23】广州地铁四号线万胜围站——官洲站区间刀盘前方结泥饼造成地面沉降 .....     | 077        |
| 【案例 2-24】广州地铁四号线大学城南站——新造站区间地面沉降 .....             | 079        |
| 【案例 2-25】广州地铁一号线烈士陵园站——公园前站区间路面隆起 .....            | 080        |
| 四、螺旋输送机喷涌造成的地面沉降 .....                             | 080        |
| 【案例 2-26】广州地铁三号线天河客运站——华师站区间盾构工程左线隧道喷涌造成地面沉陷 ..... | 080        |
| 【案例 2-27】广州地铁三号线大塘站——沥滘站区间盾构喷涌造成地面沉陷 .....         | 082        |
| <b>第三节 盾构机进出工作井及横通道施工事故 .....</b>                  | <b>082</b> |
| 【案例 2-28】南京地铁某盾构区间盾构始发事故 .....                     | 082        |
| 【案例 2-29】某区间盾构进站塌方事故 .....                         | 086        |
| 【案例 2-30】广州地铁珠江新城旅客自动输送系统土建 3 标始发端头涌水涌砂事故 .....    | 090        |
| 【案例 2-31】广州地铁五号线大坦沙站——中山八路站区间 2# 联络通道塌方事故 .....    | 091        |
| <b>第四节 盾构施工操作不当造成的事故 .....</b>                     | <b>092</b> |
| 一、始发措施不当造成的事故 .....                                | 092        |
| 【案例 2-32】广州地铁四号线大学城南站——新造站区间左线盾构掘进偏差超限 .....       | 092        |
| 【案例 2-33】广州地铁四号线大学城北站——大学城南站区间右线盾构机始发栽头事故 .....    | 093        |
| 【案例 2-34】广佛线施工 1 标左线（魁奇路站——祖庙站）区间盾构机始发栽头事故 .....   | 094        |
| 二、超压注浆致使管片破碎 .....                                 | 095        |
| 【案例 2-35】广州地铁三号线大塘站——沥滘站盾构区间超压力注浆造成管片破碎 .....      | 095        |
| 三、盾构机姿态控制不当造成隧道轴线超限 .....                          | 096        |
| 【案例 2-36】广州地铁三号线沥滘站——大石站区间隧道轴线超限 .....             | 096        |
| 【案例 2-37】广州地铁四号线大学城北站——大学城南站区间左线管环严重超限事件 .....     | 097        |
| 四、施工措施不充分造成隧道上浮 .....                              | 097        |
| 【案例 2-38】广州地铁三号线客村站——大塘站区间盾构隧道上浮 .....             | 097        |
| 五、操作不当致使盾构机翻转 .....                                | 098        |
| 【案例 2-39】广州地铁四号线大学城北站——大学城南站区间盾构机翻转 29° .....      | 098        |
| 【案例 2-40】广佛线施工 11 标（菊树站——龙溪站）盾构区间盾构机近 90° 旋转 ..... | 099        |
| 六、卡盾壳事故 .....                                      | 101        |
| 【案例 2-41】广州地铁五号线西村站——草暖公园站区间盾构机被卡事故 .....          | 101        |
| 【案例 2-42】广州地铁四号线大学城南站——新造站盾构区间新造海底小松盾构机被“卡死” ..... | 101        |
| 【案例 2-43】在花岗岩中掘进边刀过量磨损造成的卡壳 .....                  | 104        |
| 七、施工参数选择不当造成隧道整体旋转 .....                           | 104        |
| 【案例 2-44】广州地铁二号线赤岗站——鹭江站区间盾构隧道整体旋转 .....           | 104        |



|  |            |
|--|------------|
| 八、添加剂使用不当造成喷涌和结泥饼 .....  | 105        |
| 【案例 2-45】在富水环境中盾构施工的喷涌 .....                                   | 105        |
| 九、关于换刀和气压作业问题的讨论 .....   | 106        |
| <b>第五节 地下障碍物的处理</b> .....                                      | <b>108</b> |
| 一、特殊地质体障碍物 .....   | 109        |
| 【案例 2-46】深圳地铁一号线某盾构区间过花岗岩球状风化体造成刀盘变形 .....                     | 109        |
| 【案例 2-47】广州凤凰城楼盘桩基础处理花岗岩球状风化体 .....                            | 111        |
| 二、地下人工障碍物 .....  | 111        |
| 【案例 2-48】天津津滨轻轨中山门西段 SZm 标盾构区间盾构切基础桩 .....                     | 112        |
| 【案例 2-49】广州地铁三号线天河客运站——华师站区间盾构隧道工程需穿越在建的华南理工大学科技园 1# 楼工程 ..... | 114        |
| <b>第六节 过江（河、湖、海）</b> .....                                     | <b>115</b> |
| 【案例 2-50】广州地铁四号线大学城南站——新造站区间江底塌方事故 .....                       | 115        |
| <b>第七节 隧道永久结构质量问题</b> .....                                    | <b>116</b> |
| 一、管片开裂 .....   | 116        |
| 【案例 2-51】生产质量不合格导致的管片开裂 .....                                  | 117        |
| 二、管片的破损与错台 .....   | 119        |
| 【案例 2-52】广州地铁四号线大学城北站——大学城南站区间错台 .....                         | 120        |
| <b>第八节 安全事故</b> .....  | <b>122</b> |
| 【案例 2-53】广州地铁三号线珠江新城站——客村站区间凿洞门事故 .....                        | 122        |
| 【案例 2-54】溜车事故 .....  | 123        |
| 【案例 2-55】水泥罐倒塌事故 .....   | 123        |
| <b>第三章 避免盾构施工事故的讨论</b> .....                                   | <b>124</b> |
| <b>第一节 特殊风险是不可预测的</b> .....                                    | <b>124</b> |
| 【案例 3-1】盾构密封舱中的可燃气体爆炸事件 .....                                  | 125        |
| 【案例 3-2】广州地铁二/八号线盾构 5 标隧道中线超限 1 793 mm 事故 .....                | 127        |
| <b>第二节 对风险和事故的应对策略</b> .....                                   | <b>128</b> |
| 一、可预测也可预防的风险 .....   | 128        |
| 二、可预测难以预防的风险 .....   | 128        |
| 三、不可预测难以预防的风险 .....  | 129        |
| 【案例 3-3】开舱事故 .....   | 129        |
| 【案例 3-4】超常发生的“黑天鹅”事故 .....                                     | 129        |
| <b>参考文献</b> .....  | <b>132</b> |

# 第一章 盾构施工风险源识别概论

## 第一节 风险源识别的理论合理性与实际可操作性

### 一、盾构隧道建设风险管理的历史和应用理论

风险管理是一门新兴的管理学科，最早起源于美国。1929—1933年，由于受到世界性经济危机的影响，美国约有40%左右的银行和企业破产，经济倒退了约20年。美国企业为应对经营上的危机，许多大中型企业都在内部设立了保险管理部门，负责安排企业的各种保险项目。当时的风险管理主要依赖保险手段。

1938年以后，美国企业开始对风险管理采用科学的方法，并逐步积累了丰富的经验。20世纪50年代，风险管理发展成为一门学科，风险管理一词才形成。

20世纪70年代以后逐渐掀起了全球性的风险管理运动。随着企业面临的风险的复杂多样和风险费用的增加，法国从美国引进了风险管理并在法国国内传播开来。与法国同时，日本也开始了风险管理研究。

近20年来，美国、英国、法国、德国、日本等国家先后建立起全国性和地区性的风险管理协会。1983年在美国召开的风险和保险管理协会年会上，世界各国专家学者云集纽约，共同讨论并通过了“101条风险管理准则”，它标志着风险管理的发展已进入了一个新的发展阶段。

1986年，由欧洲11个国家共同成立的“欧洲风险研究会”将风险研究扩大到国际交流范围。1986年10月，风险管理国际学术讨论会在新加坡召开，风险管理已经由环大西洋地区向亚洲太平洋地区发展。【01】

与盾构施工技术密切相关的风险管理文件是2002年10月21日国际隧道协会刊印的《隧道工程风险管理指南》（以下简称《指南》）【02】，该《指南》从理论上具体指出了风险源识别的方法和如何进行计算。

该《指南》将风险发生的概率由非常可能至非常不可能分为五级，见表1-1：

表 1-1 风险发生概率分级表

| Frequency of occurrence |              |               |                             |
|-------------------------|--------------|---------------|-----------------------------|
| Frequency class         | Interval     | Central value | Descriptive frequency class |
| 5                       | > 0.3        | 1             | Very likely                 |
| 4                       | 0.03~0.3     | 0.1           | likely                      |
| 3                       | 0.003~0.03   | 0.01          | Occasional                  |
| 2                       | 0.0003~0.003 | 0.001         | Unlikely                    |
| 1                       | < 0.0003     | 0.0001        | Very unlikely               |

Table 1 Frequency of occurrence (in the construction period). The central value represents the logarithmic mean value of the given interval.

该《指南》将风险可能造成的损失根据灾难性由强至弱分为五级，见表1-2：

表 1-2 风险造成的损失分级表

| Consequence class (Economic loss to owner) |            |        |         |              |               |
|--|------------|--------|---------|--------------|---------------|
|  | Disastrous | Severe | Serious | Considerable | Insignificant |
| Loss in Mio. Euro                          | > 30       | 3 ~ 30 | 0.3 ~ 3 | 0.03 ~ 0.3   | < 0.03        |

Table 2 Economic loss to owner



根据每一个具体的风险源发生的概论和风险等级，建立风险评估矩阵，计算出从不可接受至可忽略的四个风险级别，见表 1-3：

表 1-3 风险分级表

| Frequency     | Consequence  |              |              |              |               |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|               | Disastrous   | Severe       | Serious      | Considerable | Insignificant |
| Very likely   | Unacceptable | Unacceptable | Unacceptable | Unwanted     | Unwanted      |
| Likely        | Unacceptable | Unacceptable | Unwanted     | Unwanted     | Acceptable    |
| Occasional    | Unacceptable | Unwanted     | Unwanted     | Acceptable   | Acceptable    |
| Unlikely      | Unwanted     | Unwanted     | Acceptable   | Acceptable   | Negligible    |
| Very unlikely | Unwanted     | Acceptable*  | Acceptable   | Negligible   | Negligible    |

Table 8 Risk matrix (example)

\* Depending on the wording of the risk objectives it may be argued that risk reduction shall be considered for all risks with a consequence assessed to be “serious”, and thus be classified as “unwanted” risks even for a very low assessed frequency.

国际隧道协会的这个指南，为隧道工程的风险管理提供了一个具有指导性的范本。

中国对于风险管理的研究始于 20 世纪 80 年代。当时一些学者将风险管理和安全系统工程理论引入中国，在少数企业试用后感觉比较满意。中国大部分企业缺乏对风险管理的认识，也没有建立专门的风险管理机构。作为一门学科，风险管理学在中国仍旧处于起步阶段。【03】

2007 年 11 月，我国建设部发出了“关于印发《地铁及地下工程建设风险管理指南》（试行）[以下简称《指南》（试行）]的通知”，其中涉及了盾构工程的风险管理问题。

在该《指南》（试行）的通知中，分别按风险的来源或损失产生原因、项目建设阶段、项目建设目标和承险体、风险管理层次关系与技术影响因素将风险分为若干类型。该《指南》（试行）根据工程建设期的五个阶段，对风险源和风险管理的内容作了规定。

该《指南》（试行）也将风险发生的概率分为五级，见表 1-4：

表 1-4 风险发生概率分级表

| 等 级  | A            | B                       | C                    | D                   | E             |
|------|--------------|-------------------------|----------------------|---------------------|---------------|
|      | 不可能          | 很少发生                    | 偶尔发生                 | 可能发生                | 频繁            |
| 区间概率 | $P < 0.01\%$ | $0.01\% \leq P < 0.1\%$ | $0.1\% \leq P < 1\%$ | $1\% \leq P < 10\%$ | $P \geq 10\%$ |

将风险发生的损失分为五级，见表 1-5：

表 1-5 风险造成的损失分级表

| 等 级 | 1    | 2    | 3   | 4     | 5    |
|-----|------|------|-----|-------|------|
|     | 可忽略的 | 需考虑的 | 严重的 | 非常严重的 | 灾难性的 |

根据不同的风险发生的概率和风险损失等级，建立风险分级评估矩阵，见表 1-6：

表 1-6 风险分级表

| 等 级                        | 后 果    |        |       |         |        |
|----------------------------|--------|--------|-------|---------|--------|
|                            | 1. 可忽略 | 2. 需考虑 | 3. 严重 | 4. 非常严重 | 5. 灾难性 |
| A: $P < 0.01\%$            | 一级     | 一级     | 二级    | 三级      | 四级     |
| B: $0.01\% \leq P < 0.1\%$ | 一级     | 二级     | 三级    | 三级      | 四级     |
| C: $0.1\% \leq P < 1\%$    | 一级     | 二级     | 三级    | 四级      | 五级     |
| D: $1\% \leq P < 10\%$     | 二级     | 三级     | 四级    | 四级      | 五级     |
| E: $P \geq 10\%$           | 二级     | 三级     | 四级    | 五级      | 五级     |



《指南》(试行)将工程施工环境影响评估的主要内容规定如下:①施工对周边建筑物的影响;②施工对周边道路及交通的影响;③施工对周边管线的影响;④施工对其他地上、地下建(构)筑物的影响;⑤噪声污染;⑥水污染;⑦空气污染;⑧施工渣土污染;⑨生态环境影响。

《指南》(试行)将采用盾构法施工风险评估的主要内容规定如下:①盾构机选型与地层适应性风险分析;②盾构机制作、运输、组装调试和交货期风险分析;③主要施工设备(盾构机和盾尾注浆设备等)风险分析;④盾构进出洞施工风险分析(包括地基加固风险分析);⑤盾构推进阶段的施工风险分析;⑥管片生产、运输和拼装风险分析;⑦联络通道施工风险分析。

《指南》(试行)对盾构施工风险进行了高度概括。

## 二、风险识别理论应用案例

### 【案例 1-1】广深港铁路客运专线狮子洋隧道 SD II 和 SD III 标风险评估

广深港铁路客运专线狮子洋隧道是目前国内隧道最长、标准最高的海底铁路盾构隧道,是广深港铁路客运专线的控制性工程。

该工程全长 10 800 m,水下部分采用同一制造商的四台泥水盾构机施工。南北两端为 SD III 和 SD II 标的始发井,分别由两家施工单位施工,隧道在海底对接。

盾构隧道穿越的是复合地层,上部为第四系的淤泥层,下部为白垩系碎屑沉积岩,两个标段的地层组合大体上一致,基本上有三种情况:①全断面的淤泥层或砂层;②上软下硬的复合地层;③全断面白垩系碎屑沉积岩。

广深港铁路客运专线隧道 SD II 标由北而南施工,施工过程中共找出了 12 种风险源并对其进行了分析。见表 1-7【04】:

表 1-7 SD II 风险源

| 序号 | 施工风险     | 风险概率  |    | 风险后果        |    | 风险等级    | 降低风险措施    |
|----|----------|-------|----|-------------|----|---------|-----------|
|    |          | 概率(%) | 等级 | 后果          | 等级 |         |           |
| 1  | 盾构始发风险   | 2     | 3  | 成本增加 300 万元 | 3  | 合理可靠降低区 | 对间隙进行二次注浆 |
| 2  | 浅覆土地段风险  | 3     | 3  | 成本增加 40 万元  | 2  | 可接受     | —         |
| 3  | 盾构过江堤风险  | 5     | 4  | 工期延误 1 个月   | 3  | 合理可靠降低区 | 建议增加措施    |
| 4  | 小虎沥江底穿越  | 1     | 3  | 工期延误 1 个月   | 3  | 合理可靠降低区 | 建议采取措施    |
| 5  | 上软下硬地层   | 1     | 3  | 工期延误 15 天   | 2  | 可接受     | —         |
| 6  | 联络通道风险   | 3     | 3  | 工期延误 4 个月   | 4  | 合理可靠降低区 | 建议进一步加强措施 |
| 7  | 盾构换刀风险   | 5     | 4  | 1 人以上死亡     | 4  | 可接受     | 需增加措施     |
| 8  | 盾尾密封失效   | 0.3   | 2  | 成本增加 100 万元 | 3  | 可接受     | —         |
| 9  | 盾构过建筑物   | 0.3   | 2  | 成本增加 200 万元 | 3  | 可接受     | 可能需增加措施   |
| 10 | 地中对接风险   | 3     | 3  | 工期延误 3 个月   | 3  | 合理可靠降低区 | 可能需增加措施   |
| 11 | 微膨胀岩盾构卡壳 | 2     | 3  | 成本增加 50 万元  | 2  | 可接受     | —         |
| 12 | 其他施工风险   | 0.1   | 2  |             | 3  | 可接受     | 加强动态管理    |

广深港铁路客运专线隧道 SD III 标由南而北施工,与 SD II 标隧道在海底对接,最终找出了 8 种风险源并对其进行了分析。见表 1-8【05】:

表 1-8

SDⅢ风险源

| 序号 | 风险因素      | 风险出现的可能性 | 风险评价 | 风险级别 |
|----|-----------|----------|------|------|
| 1  | 盾构适应性和可靠性 | 难得地      | 3b   | 三级   |
| 2  | 盾构始发      | 偶尔地      | 3c   | 三级   |
| 3  | 开挖面失稳     | 偶尔地      | 3b   | 三级   |
| 4  | 盾构江中换刀    | 难得地      | 3b   | 三级   |
| 5  | 盾尾密封失效    | 难得地      | 3b   | 三级   |
| 6  | 江底对接      | 难得地      | 3b   | 三级   |
| 7  | 联络通道施工塌方  | 偶尔地      | 3c   | 三级   |
| 8  | 微膨胀岩土卡壳   | 难得地      | 3b   | 三级   |

上述案例对风险的评估，是在施工地质环境大体一样、使用的盾构机完全相同的情况下进行的，计算结果至少有两点引人注意：一是为什么不同的承包商分析出来的风险源数量和项目不完全一样？二是为什么对同一个风险源（比如江中换刀）计算出来的风险级别不完全一样？

当然，要想把风险源百分之百地找出来，特别是在施工之前百分之百地找出来，并找到完全可靠的对应措施是困难的，尽管如此，仍有理由提出这样的要求，即对同一个项目，不同的人、不同的承包商应能识别出大体上一样的风险源，并得出较为一致的风险评估结果。只有做到了这一点，才能说明人们对某一具体工程项目风险源的识别是客观的、科学的。

怎么做到这一点呢？一是要统一风险源的大分类，使人们在同一个范畴内讨论风险管理问题；二是统一风险源的识别方法（三维程式）。

### 三、盾构隧道施工风险分类及其特点

#### （一）按事故的原因分类

按事故产生的原因来分，风险源可分为自然风险和人为风险两类。就盾构隧道施工工程而言，自然风险和人为风险应细分如下：

（1）狭义自然风险：是指不可抗拒的地质灾害和气象灾害造成的盾构施工风险，比如地震、火山喷发、泥石流、风暴、海啸、雪灾、洪涝等。

（2）狭义人为风险：是指战争、政变、恐怖袭击等。

狭义风险是自然和人对工程建设和施工进行主动干预的风险，是工程项目执行者无法预见也无法控制的风险。

本书将工程项目执行者最关心的具体自然风险和人为风险称为广义风险，是施工过程中研究的主要对象，分别定义为：

（1）广义自然风险。除了狭义自然风险之外，主要是指不良地质风险。在盾构施工的过程中，大部分不良地质可以探测或预测，如果措施得当，其中的部分或全部风险可以规避。

（2）广义人为风险。除了狭义人为风险之外，主要是指政治风险、决策风险、设计风险、施工风险、合同风险、财务风险、环境风险、技术风险等，如果措施得当，其中的部分或全部风险可以规避。

在研究盾构建设风险源的时候，不得不将盾构机单独提出来讨论，这是由盾构机在这种特殊施工方法中的地位决定的。盾构机是盾构施工过程中唯一的施工工具，而且是不可代替的一种工具，也就是说，在施工过程中，盾构机一旦发生严重损坏，往往会使工程不得不停顿下来。因此，正如作者在以前的著作中多次强调的，盾构施工体系是由三大系统组成的：地质、盾构机和人。所以，在研究盾构隧道建设风险源的自然风险和人为风险这两极之外，必须研究第三极，即盾构机适应性风险。

基于上述想法，作者将盾构隧道建设风险源分为三类，即广义自然风险、广义人为风险和盾构机适应性风险。





## (二) 按人们的预测能力分类

就人们的预测能力而言, 风险可分为两类: 一是可预测的一般风险; 二是不可预测的特殊风险。

(1) 可预测的一般风险。它是指人们的实践活动曾经经历过, 因而了解了施工行为可能造成的结果及其严重性的风险, 其中包括了一些明显的常识性风险。一般风险是可预测的。比如盾构施工过程中遇到上软下硬复合地层时, 盾构机的姿态将难以控制, 会造成隧道轴线产生较大的偏移, 会由于扰动了地层造成较大的地面沉降, 等等。又如盾构机在江河底下施工时, 会有涌水的风险, 等等。这类风险在以往的盾构施工中常常遇到, 在类似的环境中施工时会自然而然地将这类风险源识别出来。

所谓常识性风险, 是指大家都知道的风险, 比如开水会烫手; 土压平衡盾构机在砂层中掘进时常压开舱会造成砂和地下水的涌入, 等等。这类风险未必每个人都亲身经历过, 但每个人都会意识到。

当然, 一般风险可预测, 并不等于百分之百可预防, 这是由于人们处理风险的能力和手段不足而造成的。

本书在下面提出的风险源识别三维程式主要指的就是这类风险。

(2) 不可预测的特殊风险。这类风险一般都是发生在人们心智模型之外的风险, 没有规律, 没有先兆, 是人们事先“没有想到的”小概率事件。特殊风险不可预测。

比如某盾构施工工地, 操作人员将试验颚式破碎机的指令按钮错按成提升泥水盾构机密封隔板的按钮, 结果泥水立即涌入维修舱, 造成维修人员身亡的人身事故。

本书第三章讨论的小概率事件主要指的就是这类风险。

## 四、盾构隧道施工风险源识别的三维程式

马克·吐温曾经说过, 世界第一击剑手并不害怕第二击剑手, 他害怕的是那些从未拿过剑的未知的对手。在盾构施工过程中, 事实上人们的确并不特别担心那些已知的风险, 却害怕那些未被识别的风险。

在盾构施工过程中到底有多少风险? 用什么方法可将这些风险源准确地识别出来? 这些问题很难确切地回答, 因为不同地区情况是不同的。网上有消息称, 南京地铁二号线和一号线南延线地铁在建线路中有 323 个风险源。乍看起来, 这是一个挺吓人的数字, 好像地铁隧道建设四面楚歌、举步维艰, 处处都是陷阱。即便如此, 这个数字是否就涵盖了盾构施工过程中的所有风险呢? 答案是否定的, 因为更大量的风险是那些“从未拿过剑的未知的对手”, 即那些人们事先没有预测到的风险。

风险源数量的预测尽管难以穷尽, 但理论上它是有限的, 而且, 在特定的地质环境中真正起作用的风险源是有限的, 问题是采用怎样的方法或手段准确地识别出那些真正的风险源。

根据这样的思路, 作者提出三维程式识别法以期解决这个问题。

三维程式可以理解为如下图形 (见图 1-1): ①分别用  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三轴来表示自然风险源、盾构机适应性风险源和人为风险源; ②将每一风险源 ( $A$ 、 $B$ 、 $C$ ) 细分为若干风险源因素 ( $A_i$ 、 $B_j$ 、 $C_k$ ); ③最终发生事故的风险源并不是  $A_i$ 、 $B_j$ 、 $C_k$  的全部, 很可能是其中的某一个或某几个因素的组合。

人们希望通过建立某种公式, 把具体的风险因素发生的可能性计算出来:

$$T = f(A_i, B_j, C_k) \quad T = \{\text{引发事故的风险源}\}$$

目前, 做到这一点不难, 但是, 对于计算出来的结果不应抱有太大的期望。这里面存在着一个思路上的悖论, 即如果能将风险源计算出来, 那也就无风险可言了, 因为人们不会任由可计算出来的风险发展成事故。该问题的关键是还有无法将地质、盾构机和人的风险源进行准确、客观、科学地数量化, 况且, 地质环境在盾构推进的过程中一直是动态变化着的。

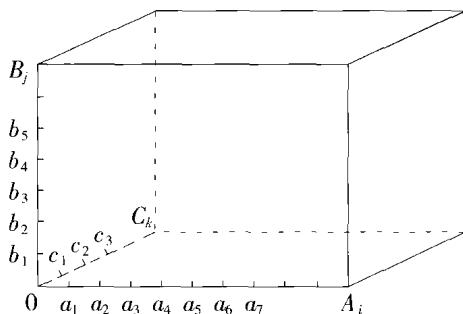


图 1-1 识别风险源的三维网程式模型