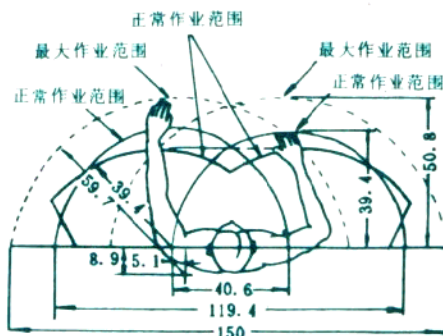
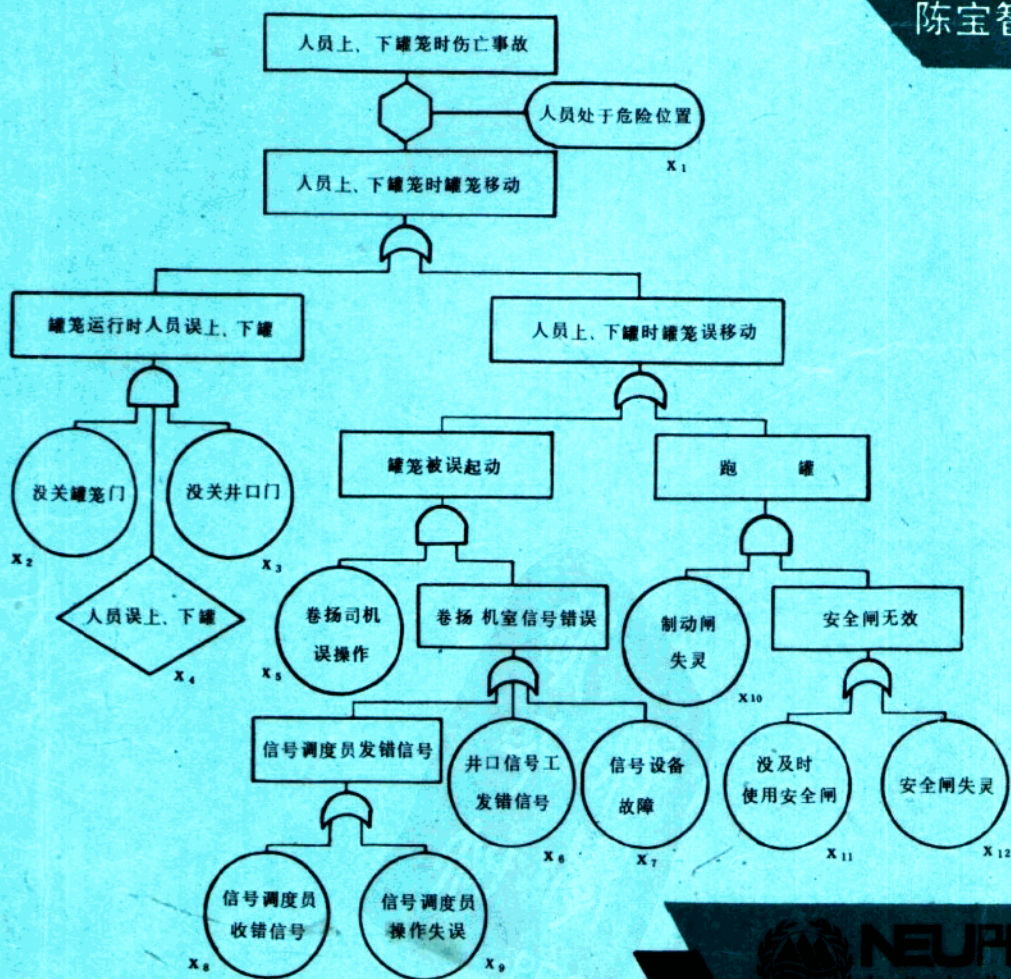


高等学校教学用书



# 矿山安全工程

陈宝智 主编



NEUPRESS  
东北大学出版社

# 前 言

本书是根据冶金工业部教材编辑室的教材出版计划，按照《矿山安全工程》课程教学大纲的要求，为冶金、有色、黄金类院校采矿专业的学生编写的教材。它以矿山伤亡事故发生和预防原理为基本理论，应用系统安全的观点和方法，系统地介绍矿山生产中主要危险源的识别、评价和控制技术，以及矿山安全管理的基本知识。书中内容以井下安全问题为主要对象，同时兼顾了矿山企业内的其它安全问题；在阐明矿山安全工程理论、技术知识的同时，还注意介绍矿山安全法规的有关条款，有助于学生全面了解矿山安全问题。

本书的第1, 3, 5, 6, 7章由东北大学陈宝智编写，第2, 4, 8, 9, 10章由武汉钢铁学院叶义华编写，最后由陈宝智全面审核定稿。

在本书的编写过程中，得到了东北大学王金波老师的热心指导；北京科技大学韦冠俊老师和南方冶金学院陈旺星老师对本书提出许多宝贵的意见，谨致衷心感谢。

本书是冶金、有色、黄金院校第一本系统地介绍矿山安全工程基本理论、技术和方法的专门教材。由于编写时间仓促，编者水平有限，书中的缺点在所难免，敬请批评指正。

编 者

1992年3月



# 目 录

## 前 言

### 1 绪 论

- 1.1 矿山安全工程概述 ..... (1)
- 1.2 安全生产方针政策 ..... (3)

### 2 伤亡事故统计分析

- 2.1 伤亡事故分类及统计指标 ..... (5)
- 2.2 伤亡事故统计的数学原理 ..... (7)
- 2.3 伤亡事故综合分析 ..... (14)
- 2.4 伤亡事故发生趋势预测 ..... (17)

### 3 伤亡事故发生与预防原理

- 3.1 事故因果连锁论 ..... (20)
- 3.2 能量意外释放论 ..... (23)
- 3.3 不安全行为的心理原因 ..... (25)
- 3.4 矿山事故中的人失误 ..... (28)
- 3.5 可靠性与安全 ..... (32)
- 3.6 人、机、环境匹配 ..... (35)

### 4 系统安全分析与评价

- 4.1 系统安全分析 ..... (41)
- 4.2 系统危险性评价 ..... (44)
- 4.3 故障树 ..... (48)
- 4.4 故障树的数学表达 ..... (50)
- 4.5 故障树定性与定量分析 ..... (52)
- 4.6 故障树分析实例 ..... (58)

### 5 矿山危险源控制

- 5.1 矿山危险源 ..... (63)
- 5.2 矿山安全技术原则 ..... (65)
- 5.3 坠落事故预防 ..... (69)
- 5.4 矿山机械、车辆伤害事故预防 ..... (72)

5.5	矿山电气伤害事故预防	(76)
<b>6</b>	<b>矿山防火与防爆</b>	
6.1	矿山火灾与爆炸事故	(83)
6.2	燃烧与爆炸机理	(84)
6.3	矿山地面建筑物火灾	(90)
6.4	矿山外因火灾及其预防	(94)
6.5	矿山内因火灾及其预防	(97)
6.6	矿山灭火	(102)
6.7	火灾时期矿内风流控制	(105)
<b>7</b>	<b>压力容器安全</b>	
7.1	压力容器概述	(108)
7.2	压力容器的设计	(110)
7.3	安全泄压装置	(113)
7.4	压力容器的破坏	(118)
7.5	压力容器的使用与管理	(122)
<b>8</b>	<b>矿山防水</b>	
8.1	矿山防水概述	(124)
8.2	矿山水表水综合治理	(124)
8.3	矿山地下水综合治理	(127)
8.4	透水事故处理	(136)
<b>9</b>	<b>矿山救护</b>	
9.1	矿工自救	(140)
9.2	矿山救护组织和装备	(144)
9.3	现场急救	(146)
9.4	矿井灾害预防和处理计划	(148)
<b>10</b>	<b>矿山安全管理</b>	
10.1	矿山安全管理概述	(150)
10.2	安全生产管理制度	(151)
10.3	安全教育	(154)
10.4	安全检查	(155)
10.5	现代安全管理	(156)

#### 参考文献

# 1 绪 论

## 1.1 矿山安全工程概述

《矿山安全工程》是以矿山生产过程中发生的人身伤害事故为主要研究对象,在总结、分析已经发生的矿山事故经验的基础上,综合运用自然科学、技术科学和管理科学等方面的有关知识,识别和预测矿山生产过程中存在的不安全因素,并采取有效的控制措施防止矿山伤害事故发生的科学技术知识体系。

矿山生产与其他生产活动一样,是人类改造自然、征服自然,创造物质文明的过程。在这一过程中,人类会遇到而且必须克服许多来自自然界的不安全因素。人类一旦忽略了对不安全因素的控制,或者控制不力,则自然力的反作用不仅妨碍矿山生产的正常进行,而且可能伤害人类自身。因此,矿山安全是顺利进行矿山生产的前提和保证。

矿山安全技术是实现矿山安全的技术措施,是矿山生产技术的重要组成部分。它包括矿山安全检测技术和矿山安全控制技术两个方面。前者是发现、识别各种不安全因素及其危险性的技术;后者是消除或控制不安全因素,防止矿山事故发生及避免人员受到伤害的技术。

人类在与各种矿山事故的长期斗争中,不断积累经验,创造了许多安全技术措施。自古以来,矿山水害、火灾、冒顶片帮、沼气爆炸等就是矿山生产中威胁人员生命安全的重大灾害。我们的祖先曾创造了很多抵御矿山灾害的方法,在历史书籍中屡有记载。例如,隋代巢方著的《病源诸候论》中,有“凡进古井深洞,必须先放入羽毛,如观其旋转,则说明有毒气上浮,便不得入内”的记载。在宋应星的闻名世界的《天工开物》中,记载有采煤时,“其上支板,以防压崩耳。凡煤炭取空,而后以土填实其中”的防冒顶措施,以及“初见煤端时,毒气灼人,有将巨竹去中节,尖锐其末,插入炭中,其毒烟从竹中透上”的防治沼气措施等。

矿山安全技术是伴随着矿山生产的出现而出现的,又随着矿山生产技术的发展而不断发展。工业革命以后,矿山生产中广泛使用机械、电力及烈性炸药等新技术、新设备、新能源,使矿山生产效率大幅度提高。另一方面,采用新技术、新设备、新能源也带来了新的不安全因素,导致矿山事故频繁发生,事故伤害和职业病人数急剧增加。矿山伤亡事故严重的局面迫使人们努力开发新的矿山安全技术,近代物理、化学、力学等方面的研究成果被应用到了矿山安全技术领域。例如,H.戴维发明了被誉为“科学的地狱旅行”的安全灯,对防止煤矿沼气爆炸事故起了重要作用;著名科学家诺贝尔发明了安全炸药,有效地减少了炸药意外爆炸事故的发生。

现代科学技术的进步,彻底改变了矿山生产面貌,矿山安全技术也不断发展、更新,大大增强了人类控制自然的能力。如今,已经形成了包括矿山防火、矿山防水、地压控制、爆破安全、防止沼气、粉尘爆炸等一系列专门安全技术在内的矿山安全技术体系。特别是在矿山安全检测技术方面,先进的科学技术手段逐渐取代人的感官和经验,可以灵敏、可靠地发现不安全因素,从而使人们可以及早采取控制措施,把事故消灭在萌芽状态之中。例如,我

国已经研制和应用声发射技术、红外探测技术等手段进行岩体压力监测及浮石探测；应用电子计算机监控的矿内火灾集中、连续、自动报警系统及及时预报矿内火灾等。

现代矿山生产系统是个非常复杂的系统。矿山生产是由众多相互依存、相互制约的不同种类的生产作业综合组成的整体；每种生产作业又包含许多设备、物质、人员和作业环境等要素。一起矿山伤亡事故的发生，往往是许多要素相互复杂作用的结果。尽管每一种专门矿山安全技术为解决相应领域的安全问题方面十分有效，在保证整个矿山生产系统安全方面都非常困难，必须综合运用各种矿山安全技术和相关领域的安全技术。矿山安全的一个重要内容，就是根据对伤亡事故发生机理的认识，应用系统工程的原理和方法，在矿山规划、设计、建设、生产、直到结束的整个过程中，都要预测、分析、评价其中存在的各种不安全因素，综合运用各种安全技术措施，消除和控制危险因素，创造一种安全的生产作业条件。

在矿山伤亡事故的发生和预防方面，作为系统要素的人占有特殊的位置。人是矿山事故中的受伤害者，保护人是矿山安全的主要目的。另一方面，人往往是矿山事故的肇事者，也是预防事故、搞好矿山安全生产的生力军。于是，矿山安全工程的一个重要内容，是关于人的行为的研究。根据与矿山安全相关密切的人的生理、心理特征及行为规律，设计适合于人员操作的工艺、设备、工具、创造适合人的特点的生产环境。在利用工程技术措施消除、控制不安全因素的同时，运用安全管理手段来规范、控制人的行为，激发矿山广大职工搞好安全生产的积极性，提高矿山企业抵御矿山事故及灾害的能力。

图 1.1 是《矿山安全工程》课程的知识结构示意图。伤亡事故发生与预防原理部分，根

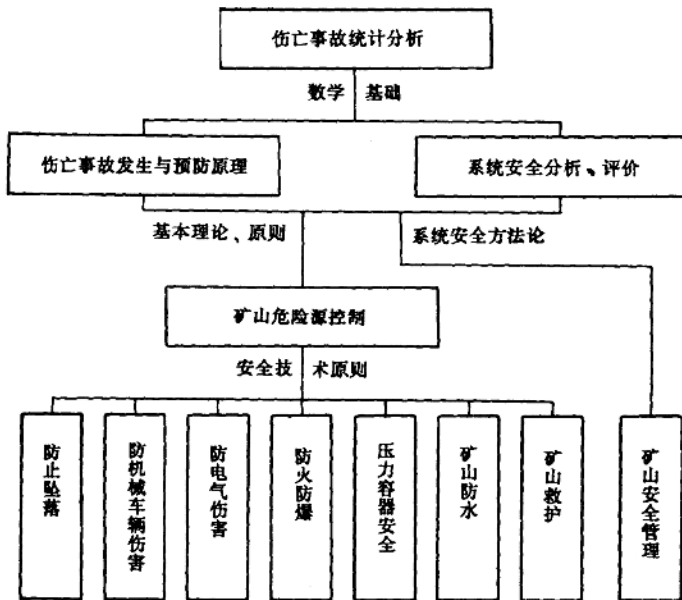


图 1.1 本课程的知识结构

据矿山生产中的人、机、环境、能量、管理等因素在伤亡事故与预防中的作用，阐述了指导矿山安全工作的基础理论和原则。在故障树分析部分中，介绍了故障树分析等系统安全分析

方法、危险性评价及危险源识别与控制等系统安全的方法、观点，为研究、解决矿山安全问题提供了系统论的思想方法和工作方法。

在安全技术方面，以危险源控制的安全技术原则为指导，介绍了几种矿山主要危险源的控制技术。由于地压控制、爆破安全等内容已经在有关课程中讲授，所以这里仅讲述了防止坠落伤害、机械车辆伤害、电气伤害事故，以及矿山防火防爆、防水、压力容器安全、矿山救护方面的基本知识。在矿山安全管理方面，将介绍现行的安全管理制度，以及现代安全管理的基本知识。伤亡事故统计分析是矿山安全管理的一项内容，考虑到数理统计是研究伤亡事故这种随机现象的重要数学工具，因此把它单列一章，放在前面。

## 1.2 安全生产方针政策

安全生产方针是安全工作的总的指导方针。根据党和政府关于安全生产的一贯指示，我国的安全生产方针可以概括为“安全第一，预防为主”。

早在1952年，毛泽东同志在对劳动部工作报告的批示中就指出，“在实施增产节约的同时，必须注意职工的安全健康和必不可少的福利事业。如果只注意前一方面，忘记或稍加忽视后一方面，那是错误的”。之后，党中央在认真做好劳动保护工作的通知中指出，“加强劳动保护工作，搞好安全生产、保护职工的安全和健康，是我们党的一贯方针，是社会主义企业管理的一项基本原则，”“听任职工死亡，听任职工身体健康受到摧残，而不认真解决，就是严重失职，是党纪国法不能允许的”。

安全生产方针体现了党和国家对劳动者安全健康的无比关怀，也反映了社会主义生产的客观规律。在我们社会主义国家，生产的主要目的是为了满足不同人民群众日益增长的物质文化需要。生产过程中若不注意改善劳动条件，忽视劳动者的安全健康，就违背了社会主义生产目的。人是生产力诸因素中最活跃的因素，保护和发展生产力必须把保护人放在首位。因此，贯彻执行安全生产方针既是一项严肃的政治任务，也是发展国民经济的重要保证。

“安全第一”，就是在进行矿山生产时，时刻把安全工作放在重要位置，当做头等大事来做好。首先，必须正确处理安全与生产的辩证统一关系，明确“生产必须安全，安全促进生产”的道理。任何生产活动中都存在着不安全因素，存在着发生伤亡事故的危险性。要进行生产，就必须首先解决其中的各种不安全问题。“安全寓于生产之中”，安全与生产密切不可分。无数事实证明，矿山伤亡事故不仅给受害者本人及其家属带来巨大的不幸，也干扰矿山生产的顺利进行，给矿山企业带来严重的经济损失。搞好矿山安全工作，创造安全、卫生的生产劳动条件，不仅可以避免或减少各种矿山事故，而且还能更好地发挥职工的积极性和创造性，促进矿山生产迅速发展。

“预防为主”，就要掌握矿山伤亡事故发生和预防规律，针对生产过程中可能出现的不安全因素，预先采取防范措施，消除和控制它们，做到防微杜渐，防患于未然。

在“安全第一，预防为主”方针指导下，我国制定了一系列安全生产政策、法规、制度，具体指导各项安全工作。为了使这些安全生产政策、法规、制度得到认真贯彻，我国实行国家监察、行业管理、群众监督的安全监察体制。1982年，我国颁布了《矿山安全条例》和《矿山安全监察条例》，使矿山安全工作走上了法治的轨道。

安全法规是安全监察的依据，是矿山企业进行安全工作的规范，主要的安全法规有“三

大规程”和“五项规定”，以及上述关于矿山安全的“两个条例”等。

(1) “三大规程”。1956年，国务院颁布了周恩来同志亲自主持制定的《工厂安全卫生规程》、《建筑安装工程安全技术规程》和《工人职员伤亡事故报告规程》，简称“三大规程”。前两个规程分别对工厂和建筑安装工程的安全技术和安全卫生设施规定了明确的要求。后一规程对伤亡事故的统计、报告、调查、处理做了详细规定。

随着时代的进步，生产技术的进步，“三大规程”的内容已不能完全适应现实安全工作要求，可以结合《工业企业安全卫生设计标准》和国标GB6442—86《企业职工伤亡事故调查分析规则》执行。

(2) “五项规定”。1963年，国务院颁发了《关于加强企业生产中安全工作的几项规定》。它要求从安全生产责任制、安全技术措施计划、安全生产教育、安全生产检查和伤亡事故处理五个方面来加强企业的安全生产组织管理，故习惯称为“五项规定”。这五项规定确立了我国安全生产管理的基本制度。

(3) “两个条例”。1982年，国务院颁布了《矿山安全条例》和《矿山安全监察条例》。《矿山安全条例》主要规定了矿山安全的技术管理标准和相应的责任制度。针对我国的实际情况，条例规定凡是国家已作过统一规定或颁发过国家标准的，按国家规定或标准执行；国家虽没做过统一规定，但各类矿山能按同一标准执行的，条例做了统一规定；部分矿山的特殊问题，或各类矿山不能按同一标准执行的，条例提出了原则要求，由各矿山企业主管工业部门另作补充规定。《矿山安全监察条例》主要规定了矿山安全监察机构的设置及其职责权限。

(4) 冶金矿山安全规程。冶金矿山安全规程包括适用于地下开采矿山的《冶金地下矿山安全规程》，和适用于露天开采矿山的《冶金矿山安全规程（露天部分）》。前者由冶金部、中国有色金属总公司、劳动部于1990年颁发，同时废止了原来的《冶金矿山安全规程（井下部分）》。冶金矿山安全规程体现了《矿山安全条例》的基本原则，充分考虑了冶金、有色矿山的特点，是更加具体、详细的安全技术规程，是冶金、有色矿山必须遵循的安全技术与管理指南。

由于矿山生产过程涉及许多与其它行业共通的生产工艺、设备等，所以除了矿山安全条例和规程外，还要遵从许多有关的安全条例和规程。

《矿山安全工程》是采矿专业的一门重要专业课。通过该课程的学习，同学们除了掌握矿山伤亡事故预防理论和原则，学会防止矿山事故发生的各种安全技术之外，最重要的是牢固地树立起“安全第一”的思想，增强遵守各项矿山安全法规的自觉性，在将来的实际工作中运用所学的技术知识搞好矿山安全工作，为保障广大矿山职工安全健康做出贡献。

## 习 题 1

1. 怎样正确理解安全与生产的辩证统一关系？
2. 在采矿工作中怎样贯彻执行安全生产方针？
3. 何谓“三大规程”“五项规定”？“五项规定”包括哪些主要内容？



## 2 伤亡事故统计分析

### 2.1 伤亡事故分类及统计指标

#### 2.1.1 伤亡事故的基本概念

一般地,事故是指个人或集体在为实现某一目的而进行活动的过程中,突然发生的与人的意志相反的情况,迫使原来的行动暂时或永久停止的事件。作为事故的结果,可能发生人员伤亡或物质损失。以人为中心考察事故结果时,可以把事故分为伤亡事故和一般事故。

伤亡事故是指造成人身伤害或急性中毒的事故。其中,在生产区域中发生的和生产有关的伤亡事故叫做工伤事故。除了死亡以外,按人员遭受伤害的严重程度,把伤害划分为3类:

- (1) 暂时性失能伤害。受伤害者或中毒者暂时不能从事原岗位工作;
- (2) 永久性部分失能伤害。受伤害者或中毒者的肢体或某些器官的功能不可逆丧失的伤害;
- (3) 永久性全失能伤害。使受伤害者完全残废的伤害。

一般事故是指人身没有受到伤害,或受伤轻微,或没有造成人员生理功能障碍的事故。通常,把没有造成人员伤害的事故称为无伤害事故或未遂事故。如后面的章节所述,由于事故发生后人员伤害的有无及伤害严重程度如何具有随机性,所以对于没有造成严重后果的事故也不能掉以轻心。

#### 2.1.2 伤亡事故分类

为了研究事故发生原因及规律,便于对伤亡事故进行统计分析,国标 GB6441—6442—86 按致伤原因把伤亡事故划分为20类(见表2.1)

表 2.1 伤亡事故致伤原因分类

序号	事故类别名称	注
1	物体打击	指落物、滚石、撞击、碎裂、崩块、砸伤,但不包括爆炸引起的物体打击
2	车辆伤害	包括挤、压、撞、颠覆等
3	机械伤害	包括绞、碾、割、戳
4	起重伤害	
5	触电	包括雷击
6	淹溺	
7	灼伤	
8	火灾	

续表 2.1

序号	事故类别名称	注
9	高处坠落	包括由高处落地和由平地落入地坑
10	坍塌	
11	冒顶片帮	
12	透水	
13	放炮	
14	火药爆炸	指生产、运输和储藏过程中的意外爆炸
15	瓦斯爆炸	包括煤尘爆炸
16	锅炉爆炸	
17	受压容器爆炸	现称为压力容器爆炸
18	其他爆炸	
19	中毒和窒息	
20	其它	

该标准把受害者的伤害分为 3 类：

- (1) 轻伤。是指损失工作日低于 105 日的失能伤害；
- (2) 重伤。是指损失工作日等于和大于 105 日的失能伤害；
- (3) 死亡。

相应地，按伤害严重程度把伤亡事故分为 3 类：

- (1) 轻伤事故。是指只发生轻伤的事故；
- (2) 重伤事故。是指有重伤但无死亡的事故；
- (3) 死亡事故。其中，一次事故中死亡 1~2 人的事故为重大伤亡事故；一次事故中死亡 3 人及超过 3 人的事故为特大伤亡事故。

### 2.1.3 伤亡事故统计指标

为便于分析、评价企业或部门的伤亡事故发生情况，需要规定一些通用的、统一的统计指标。在 1948 年 8 月召开的国际劳联会议上，通过了以伤亡事故频率和伤害严重率为伤亡事故统计指标。

#### 1. 伤亡事故频率

生产过程中发生的伤亡事故次数与参加生产的职工人数、经历的时间及企业的安全状况等因素有关。在一定的时间内参加生产的职工人数不变时，伤亡事故发生次数主要取决于企业的安全状况。于是，可以用伤亡事故频率作为表征企业安全状况的指标：

$$\alpha = \frac{A}{N \cdot T} \quad (2.1)$$

式中， $\alpha$ ——伤亡事故频率；

$A$ ——伤亡事故次数；

$N$ ——参加生产的职工人数；

$T$ ——统计期间。

国标 GB6441—86 规定，按千人死亡率、千人重伤率、伤害频率计算事故频率。

(1) 千人死亡率——某时期内平均每千名职工中因工伤事故造成死亡的人数。

$$\text{千人死亡率} = \frac{\text{死亡人数}}{\text{平均职工数}} \times 10^3$$

(2) 千人重伤率——某时期内平均每千名职工中因工伤事故造成重伤的人数。

$$\text{千人重伤率} = \frac{\text{重伤人数}}{\text{平均职工数}} \times 10^3$$

(3) 伤害频率——某时期内平均每百万工时由于工伤事故造成的伤害人数。

$$\text{百万工时伤害率} = \frac{\text{伤害人数}}{\text{实际总工时数}} \times 10^6$$

目前，我国仍沿用劳动部门规定的工伤事故频率作为统计指标。

$$\text{工伤事故频率} = \frac{\text{本时期内工伤事故人次}}{\text{本时期内在册职工人数}} \times 10^3$$

习惯上把它称做千人负伤率。

## 2. 事故严重率

国标 GB6441—86 还规定，按伤害严重率，伤害平均严重率及按产品产量计算死亡率等指标计算事故严重率。

(1) 伤害严重率——某时期内平均每百万工时由于事故造成的损失工作日数。

$$\text{伤害严重率} = \frac{\text{总损失工作日}}{\text{实际总工时}} \times 10^6$$

国家标准中规定了工伤事故损失工作日数算法，其中规定永久性全失能伤害或死亡的损失工作日为 6000 个工作日。

(2) 伤害平均严重率——受伤害的每人平均损失工作日。

$$\text{伤害平均严重率} = \frac{\text{总损失工作日}}{\text{伤害人数}}$$

(3) 按产品产量计算的死亡率。这种统计指标适用于以吨、立方米为产量计算单位的企业、部门。例如：

$$\text{百万吨死亡率} = \frac{\text{死亡人数}}{\text{实际产量}(t)} \times 10^6$$

$$\text{万立方米木材死亡率} = \frac{\text{死亡人数}}{\text{木材产量}(m^3)} \times 10^4$$

## 2.2 伤亡事故统计的数学原理

### 2.2.1 事故发生的随机性质

矿山事故的发生往往出乎人们的意料之外，是一种随机现象。随机现象是在一定条件下可能发生也可能不发生，在个别试验观测中呈现出不确定性，但是在大量重复试验观测中又具有统计规律性的现象。研究随机现象需要借助概率论和数理统计方面的知识。

在概率论及数理统计中，通过随机变量来描述随机现象。按定义，随机变量是“当对某一量重复观测时，仅由于机会而产生变化的量”。它与人们通常接触的变量概念不同，随机变量不能适当地用一个数值来描述，必须用实际数字系统的分布来描述。由于实际分布系统不同，随机

变量分为离散型随机变量和连续型随机变量。在研究矿山伤亡事故统计规律时,需要恰当地确定随机变量的类型。例如,一定时期内矿山企业伤亡事故发生次数只能是非负的整数,相应的数字分布系统是离散型的;两次矿山事故之间的时间间隔则应该属于连续型随机变量,因为与时间相对应的数字分布系统是连续型的。

为了描述随机变量分布情况,利用数学期望(平均值)来描述其数值大小。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2.2)$$

利用方差来描述其随机波动情况:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2.3)$$

上述公式中,  $x_i$  为观测值。

某一随机现象在统计范围内出现的次数称为频数。如果与某种随机现象对应的随机变量是连续型随机变量,则往往把它的观测值划分为若干个等级区段,然后考虑某一等级区段对应的随机现象出现的次数。在某规定值以下所有随机现象出现频数之和为累计频数。某种随机现象出现频数与被观测的所有随机现象出现总次数之比称为频率。表 2.2 为某矿两年内每月事故发生次数及频率分布情况。

表 2.2 一个月內事故发生次数及频率分布

事故次数	频数	累计频数	频率	累计频率
0	1	1	0.04167	0.04167
1	2	3	0.08333	0.12500
2	3	6	0.12500	0.25000
3	4	10	0.16667	0.41667
4	4	14	0.16667	0.53333
5	3	17	0.12500	0.70833
6	2	19	0.08333	0.79167
7	2	21	0.08333	0.87500
8	1	22	0.04167	0.91666
9	1	23	0.04167	0.95833
10 以上	1	24	0.04167	1.00000

频率在一定程度上反映了某种随机现象出现的可能性。但是,当观测次数少时则表现出强烈的随机波动性。随着观测次数的增加频率逐渐稳定于某常数,此常数称为概率,它是随机现象发生可能性的度量。

### 2.2.2 事故统计分布

在矿山事故统计分析中,经常会遇到如下一些统计分布。

#### 1. 均匀分布

对于连续型随机变量,当其概率密度函数具有下述形式时,则称为均匀分布:

$$\begin{cases} f(x) = A, & \text{当 } x_1 \leq x \leq x_2 \text{ 时} \\ f(x) = 0, & \text{当 } x < x_1 \text{ 或 } x > x_2 \text{ 时} \end{cases} \quad (2.4)$$

例如,统计事故损失工时数为 0~100h 的区段内的事故时,假设此时间区段内任一时间起单位时间间隔内对应的事故发生概率相等,均为 0.01(见图 2.1),则事故发生的概率密度函数可写为

$$\begin{cases} f(x) = 0.01, & \text{当 } 0 \leq x \leq 100 \text{ 时} \\ f(x) = 0, & \text{当 } x > 100 \text{ 时} \end{cases}$$

于是,损失工时在  $t_1 \leq x \leq t_2$  区段内的事故发生概率为

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx \\ &= 0.01(t_2 - t_1) \end{aligned}$$

如果给定  $t_1$  和  $t_2$  值,则可计算出相应的概率。

## 2. 指数分布

指数分布属于连续型随机变量的概率分布,它主要用来描述事故发生时间间隔的分布情况。设单位时间内事故发生次数,即事故发生率为  $\lambda$ ,则自某时刻起  $t$  时间内发生事故的率为

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

此式称为事故发生的时间分布,其概率密度函数为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.6)$$

指数分布的数学期望为

$$\theta = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2.7)$$

此为平均事故间隔时间,在安全管理中有时称为平均无事故时间,它是事故发生率的倒数。指数分布的方差

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 \cdot f(t) dt = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.8)$$

## 3. 二项式分布

二项式分布属于离散型随机变量的概率分布,可用于描述一个企业或部门在一定时期内事故发生次数的概率分布。

设某矿有  $n$  名职工,且每人每月发生事故的率相同,均为  $p$ ,则该矿每月发生  $x$  次事故的概率为

$$f(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1-p)^{n-x} \quad (2.9)$$

每月发生事故次数不超过  $C$  的概率,即发生  $C$  次及  $C$  次以下事故的累计概率分布为

$$F(C) = \sum_{x=0}^C \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1-p)^{n-x} \quad (2.10)$$

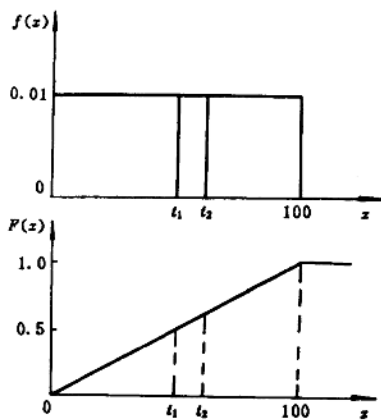


图 2.1 均匀分布

二项式分布的数学期望为

$$\lambda = np \quad (2.11)$$

其方差为

$$\sigma^2 = np(1 - p) \quad (2.12)$$

#### 4. 泊松分布

二项式分布中的  $n$  足够大,  $p$  相当小时(一般地,  $n \geq 10, p \leq 0.1$ ), 则可以按泊松分布进行近似计算。矿山企业或部门的人数很多, 伤亡事故发生概率很小, 所以按泊松分布计算有足够的精确度。

根据泊松分布, 一个矿山企业或部门在一定时间内伤亡事故发生  $x$  次的概率为

$$f(x) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^x}{x!} \quad (2.13)$$

式中,  $\lambda$  为该时期内伤亡事故平均次数。在一定时间内伤亡事故发生次数不超过  $C$  次的概率为

$$F(C) = \sum_{x=0}^C e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^x}{x!} \quad (2.14)$$

泊松分布的数学期望为  $\lambda$ , 其方差为  $\lambda^2$ 。图2.2为不同参数  $\lambda$  的泊松分布。

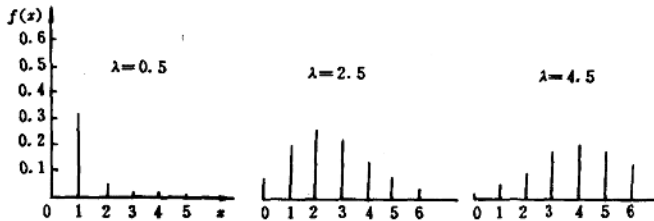


图 2.2 不同参数  $\lambda$  的泊松分布

**例2.1** 某矿前两年内共发生伤亡事故105次, 若安全状况不变, 来年每月不发生伤亡事故的概率多少? 每月内发生伤亡事故次数不超过3次的概率多少?

**解:** 每月平均伤亡事故次数  $\lambda$  为

$$\lambda = \frac{105}{24} = 4.375 \text{ (次/月)}$$

① 每月不发生伤亡事故的概率为

$$f(0) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^0}{0!} = e^{-\lambda} = e^{-4.375} \approx 0.0126$$

② 每月内发生伤亡事故次数不超过3次的概率为

$$F(3) = e^{-\lambda} \sum_{x=0}^3 \frac{\lambda^x}{x!} = e^{-\lambda} \left( 1 + \lambda + \frac{\lambda^2}{2!} + \frac{\lambda^3}{3!} \right) \approx 0.3638$$

#### 5. 正态分布

在自然现象和社会现象中, 许多现象是由相互独立的随机因素综合作用而形成的, 并且每种随机因素所起的作用都很微小, 与其相应的随机变量近似地服从正态分布。当观测次数非常大时, 二项式分布也趋近于正态分布。

正态分布是在平均值  $\mu$  附近对称的分布,其概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.15)$$

图2.3为不同参数  $\sigma$  的正态分布。当某随机变量服从正态分布时,观测值的68.27%可能落入  $(\mu+\sigma)$  的范围内;94.45%的观测值可能落入  $(\mu+2\sigma)$  的范围内;99.73%的观测值可能落入  $(\mu+3\sigma)$  的范围内(见图2.4)。

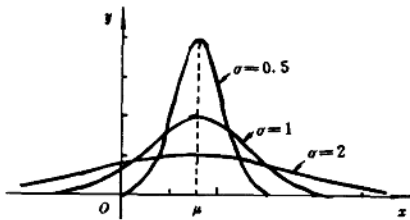


图 2.3 不同参数  $\sigma$  的正态分布

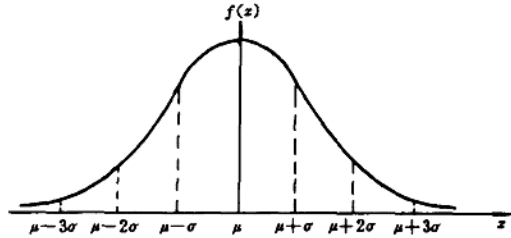


图 2.4 正态分布曲线

### 2.2.3 置信度与置信区间

我们通过试验观测来研究随机现象时,把被研究对象的全体叫做总体,把总体中的一部分叫做样本,把总体中的一个基本单位叫做个体,则样本中含有个体的数目叫做样本容量。我们希望掌握总体的规律,但是有时观测总体很困难,甚至不可能,因而只能观测一定容量的样本。当通过观测一定容量的样本来推断总体的分布参数,从而研究总体的规律性时,获得的是总体分布参数的近似值。由于该近似值并不一定是参数的真值,所以还要估计出一个以区间的形式给出的范围,并且希望知道该范围包含参数真值的可靠程度。这涉及置信区间与置信度的概念。

随机地从总体中抽取一个大样本。若关心的是总体的期望值,则可以根据样本观测值计算样本的期望值  $\theta$ 。根据总体的分布概率密度函数,可以求出  $\theta$  落入任意两个值  $t_1$  与  $t_2$  之间的概率。对于某一特定概率  $(1-\alpha)$ , 若有

$$P(t_1 \leq \theta \leq t_2) = (1 - \alpha)$$

则称  $t_1$  与  $t_2$  之间(包括  $t_1, t_2$  在内)的所有值的集合为参数  $\theta$  的置信区间,  $t_1$  和  $t_2$  分别为置信上限和置信下限。对应于置信区间的特定概率  $(1-\alpha)$  称为置信度,  $\alpha$  称为显著性水平。

例如,正态分布观测值的94.45%可能落入  $(\mu \pm 2\sigma)$  的范围内。这相当于置信度94.45%的置信区间为  $(\mu - 2\sigma) \sim (\mu + 2\sigma)$ , 即当从总体中反复多次抽样时,每组样本观测值确定一个区间  $(\mu \pm 2\sigma)$ , 在该区间里包含  $\mu$  的约占95%, 不包含  $\mu$  的约占5%。

置信度与置信区间在伤亡事故统计分析中具有重要意义,除了用于推断总体参数外,还被用来估计统计分析的可靠程度。例如,某单位连续三年死亡人数分别为20, 15和10,三年中死亡人数降低一半。但是,考虑到95%置信度的置信区间(见表2.3),可以认为该单位安全状况没有明显变化,死亡人数减少是偶然现象。

表 2.3

死亡人数统计的置信区间

死亡人数	第一年		第二年		第三年	
	人数	95%概率区间 (13~29)	人数	95%概率区间 (9~23)	人数	95%概率区间 (5~17)
死亡人数	20		15		10	
死亡数差值	第一年与第二年 5			第二年与第三年 5		

## 2.2.4 参数估计

随机变量的分布形式已知后,分布就完全由其参数所确定。因此,确定某总体的分布参数是非常重要的。一般地,总体分布参数只能利用与之对应的样本统计量来推断。由样本统计量推断总体分布参数叫做参数估计,它包括点估计和区间估计。

### 1. 点估计

设总体  $X$  的分布为  $f(x, \theta)$ , 其中  $\theta$  为未知参数。所谓参数的点估计, 就是由样本  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的一个函数  $\hat{\theta}$  来估计未知参数  $\theta$ , 即参数  $\theta$  的真值的估计值。常用的点估计方法有极大似然法和矩法等, 这里仅介绍前者。

极大似然法的基本思路是, 若某事件在一次观测中出现了, 则认为该事件出现的可能性很大。该方法首先建立  $\theta$  的似然函数, 它等于样本  $X_1, X_2, \dots, X_n$  的联合密度函数:

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i, \theta) \quad (2.16)$$

然后求出使似然函数值最大的参数  $\hat{\theta}$  为参数的点估计值。

例如, 伤亡事故发生时间间隔服从指数分布。若实际观测的事故发生时间间隔分别为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 则可应用极大似然法求出事故发生率或平均事故间隔时间的估计值。设似然函数为

$$\begin{aligned} L(t_1, t_2, \dots, t_n; \lambda) &= f(t_1; \lambda)f(t_2; \lambda)\cdots f(t_n; \lambda) \\ &= n \exp(-\lambda \sum_{i=1}^n t_i) \end{aligned} \quad (2.17)$$

把该式两端取对数, 得

$$\ln L(t_1, t_2, \dots, t_n; \lambda) = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n t_i$$

为求得最大值, 对  $\lambda$  求导数并令其为 0, 则

$$\frac{n}{\lambda} - \sum_{i=1}^n t_i = 0$$

于是, 得到参数  $\lambda$  的估计值  $\hat{\lambda}$  为

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.18)$$

以及平均事故间隔时间  $\theta$  的估计值  $\hat{\theta}$  为

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (2.19)$$



## 2. 区间估计

通过参数的点估计得到了参数的近似值之后, 通过参数的区间估计求出对应于给定置信度的置信区间, 可以了解近似值的精确程度。

当伤亡事故发生时间间隔服从指数分布时, 平均事故间隔时间的双侧置信区间为

$$\left( \frac{2\hat{\theta}}{\chi^2(2n; \frac{\alpha}{2})}, \frac{2\hat{\theta}}{\chi^2(2n; 1 - \frac{\alpha}{2})} \right) \quad (2.20)$$

式中,  $\hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ 。

从防止矿山伤亡事故的角度来看, 平均事故间隔时间越长越好, 因而人们更关心平均事故间隔时间的置信下限。这种情况下, 往往利用参数的单侧区间估计:

$$\left( \frac{2\hat{\theta}}{\chi^2(2n; \alpha)}, \infty \right) \quad (2.21)$$

在进行伤亡事故统计分析时, 一般取置信度  $(1-\alpha) = 90\%$ 。为了计算方便, 把式(2.20)和式(2.21)变换成如下形式:

$$(A\hat{\theta}, B\hat{\theta}) \quad (2.22)$$

$$(A\hat{\theta}, \infty) \quad (2.23)$$

其中,  $\hat{\theta}$  为平均事故间隔时间的点估计值;  $A, B$  为系数, 可由表 2.4 查出。

观测次数	双侧置信区间		单侧置信区间
	A	B	A
1	0.33	19.49	0.27
2	0.42	5.63	0.36
3	0.48	3.67	0.42
4	0.52	2.93	0.46
5	0.55	2.53	0.49
6	0.57	2.30	0.51
7	0.59	2.13	0.54
8	0.61	2.10	0.56
9	0.62	1.92	0.57
10	0.63	1.84	0.58
15	0.69	1.62	0.64
20	0.72	1.51	0.67
30	0.76	1.39	0.72
40	0.79	1.32	0.74
50	0.81	1.28	0.77
100	0.86	1.19	0.83

例 2.2 某矿山有职工 5000 人, 迄今发生的 4 起伤亡事故的时间间隔分别为 80 天, 42 天和