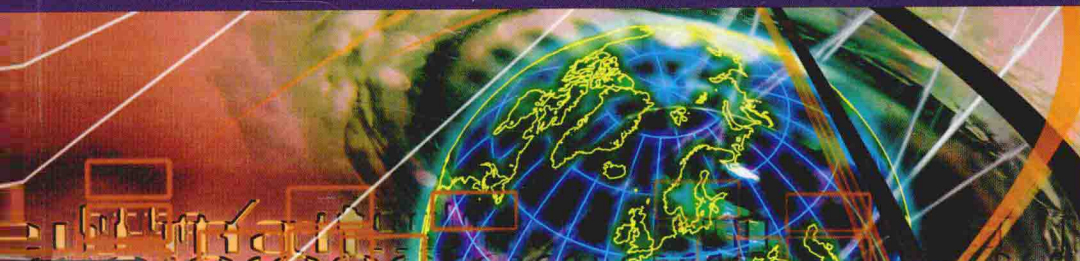


普通高等教育“十二五”规划教材

高等院校安全工程专业教材

第 2 版

安全系统工程



主编 张景林



煤炭工业出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

安全系统工程

(第 2 版)

主编 张景林

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

安全系统工程/张景林主编. -- 2 版. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2014

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5020-4317-9

I. ①安… II. ①张… III. ①安全系统工程—高等学校—教材 IV. ①X913.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 218305 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 $787\text{mm} \times 1092\text{mm}^{1/16}$ 印张 $12^{3/4}$
字数 292 千字 印数 1—3 000
2014 年 1 月第 2 版 2014 年 1 月第 1 次印刷
社内编号 7145 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材（高等院校安全工程专业）之一。

本次修订在大的章节内容上保留了原教材的格局，但在具体内容上作了若干修改，在第四章和第六章中增加了近几年的安全评价与安全系统建模案例。本书全面地介绍了安全系统的概念、事故隐患和危险性分析方法、事故树分析方法、系统安全评价、安全决策和灰色理论在安全系统工程中的应用。

本书主要作为高等院校安全工程专业学生教材，也可供安全工作者参考。

修 订 说 明

《安全系统工程》在2002年完成了初版的编审工作，并在高等院校安全工程专业教学指导委员会的直接领导下，从教材大纲的编制、审定及其相关教材内容的划定，均由教学指导委员会教材编审专家组反复讨论完成。作者严格遵照大纲的规定与要求，结合多年的教学实践和研究工作，编写完成，并在煤炭工业出版社的大力支持下出版。《安全系统工程》初版共分6章，由张景林、崔国璋、王福成、赵燕萍、赵云胜负责编写，张景林和崔国璋负责统编和策划，北京理工大学汪佩兰负责总审。

本书初版付梓以来，为推广安全学科、培养安全工程专业学生作出了重要贡献，尤其是在研究生入学考试中，很多学校将其列为专业课参考书，深受广大读者喜爱。10余年来，安全学科得到了快速发展。2011年，国务院学位委员会和教育部联合发布了“关于印发《学位授予和人才培养学科目录（2011年）》的通知”（学位〔2011〕11号），将安全学科列为一级学科，名称：安全科学与工程。

随着时代的发展，安全系统工程理论、方法和技术得到了快速发展，该教材在使用中也收到了许多中肯的修改意见。为了使《安全系统工程》更适应社会和专业发展的需要，更好地为广大从事安全学习与工作的读者服务，我们对初版内容进行了修订。这次修订的重点有两个方面：一是更新一些弃用的标准规范，补充一些新方法和新案例；二是对原有的理论、释义、案例进行了全面审视，使之更加完善并适应时代的发展。

本次修订在内容选材和文字叙述上仍然力求做到概念清晰、原理明确、深入浅出和通俗易懂，以便于学生学习和掌握。中北大学张景林负责全书修订、统稿。

这次修订工作得到了中北大学和北京理工大学相关领导和老师的关心与

帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。由于编者水平有限，这次修订工作可能还存在疏漏和错误，希望读者批评指正。

作 者

2013 年 8 月

序

安全是人类生存、生产、生活和发展过程中永恒的主题。随着科技与经济的迅猛发展，安全科学的日臻完善，安全工程专业已经成为高校重点专业之一。为此，高等院校安全工程专业教学指导委员会在全体委员对课程设置、教学大纲等进行充分论证的基础上，组织编写了《安全学原理》、《安全系统工程》、《安全人机工程学》和《安全管理学》四门安全工程专业的专业基础课教材。经各编写组认真编写，主审人审查，高等院校安全工程专业教学指导委员会审定，现组织出版并作为高等院校安全工程专业本科推荐教材。

高等院校安全工程专业教学指导委员会

2002年4月

前 言

本教材是安全工程专业必修专业基础课，其先修课程为概率统计、线性代数、安全学、系统工程学和计算机应用技术等。

本教材在选材上力求新颖，尽量吸取近年来的教学实践和国内外最新科研成果；体系上注意完整性、条理性，并从安全科学学科发展的高度，充实和完善其内容；对难点，将通过由感性到理性，从现象到本质的方法，用通俗形象的语言来阐述，并且注意给出尽量多的例题，以便于学生理解和自学，有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。本教材教学时数为48学时，每章后均有思考题，供学生思考和练习。

本书编写工作是在高等院校安全工程专业教学指导委员会的直接领导下进行的，从教材大纲的编制、审定及其与相关教材内容的划定，均由安全工程专业教学指导委员会反复讨论完成。作者严格遵照大纲的规定与要求，结合近年来的教学实践与研究工作，编写了这本《安全系统工程》教材。全书共分六章，包括：概论、系统安全分析、事故树分析、系统安全评价、安全决策和灰色理论与安全系统。其中，第一章由崔国璋、张景林教授编写，第二章由王福成教授编写，第三章由赵艳萍编写，第四、五章由张景林教授编写，第六章由赵云胜编写。全书由张景林、崔国璋教授统稿，北京理工大学汪佩兰教授担任主审。汪佩兰教授对本教材进行了全面、认真、严格、细致的审查，提出了许多宝贵的修改意见。王建华、柴涛、吕春玲老师对书稿的校正、打印、完善作了许多具体工作，在此向她们表示诚挚的谢意。本书还引用了大量的文献资料，涉及许多中外学者，在此一并向他们表示感谢。

编 者

2001年12月

目 次

第一章 绪论	1
第一节 基本概念	1
第二节 安全系统工程的研究对象、研究内容及方法	8
第三节 安全系统工程的产生与发展	11
第四节 安全系统工程的应用特点	13
复习思考题	14
第二章 事故隐患和危险性分析	15
第一节 概述	15
第二节 安全检查及安全检查表	17
第三节 预先危险性分析	21
第四节 故障类型和影响分析	24
第五节 危险性和可操作性研究	29
第六节 事件树分析	33
复习思考题	35
第三章 事故树分析	37
第一节 事故树分析概述	37
第二节 事故树的编制	41
第三节 事故树定性分析	46
第四节 事故树定量分析	58
第五节 基本事件的重要度分析	69
第六节 事故树的模块分割和早期不变化	74
第七节 事故树分析的应用实例	76
复习思考题	83
第四章 系统安全评价	86
第一节 安全评价概述	86
第二节 概率评价法	91
第三节 指数评价法	96
第四节 单元危险性快速排序法	111
第五节 生产设备安全评价方法	115

第六节 安全管理评价.....	118
第七节 系统安全综合评价法.....	122
第八节 安全评价方法应用实例.....	124
复习思考题.....	134
第五章 安全决策.....	135
第一节 概述.....	135
第二节 安全决策过程与决策要素.....	136
第三节 定性属性的量化.....	140
第四节 安全决策方法.....	144
第五节 模糊决策（评价）.....	153
复习思考题.....	156
第六章 安全系统建模.....	158
第一节 灰色动态模型.....	158
第二节 BP 神经网络模型.....	170
复习思考题.....	181
附录.....	182
参考文献.....	192

第一章 绪 论

安全系统工程是以安全学和系统科学为理论基础,运用系统工程和可靠性工程的方法识别、排查、分析、评价系统中存在的危险因素,从而达到消除事故隐患、预防事故发生的一门科学技术。

人类社会发展至今,安全问题仍然是自身生存、延续、发展的主题。对于生产领域的安全问题,人们一般只考虑管理问题和技术问题,但是人类生产、生活、生存领域的安全问题越来越密不可分。一方面,人类的生产、生活、生存领域是一个复杂的巨系统;另一方面,其安全问题在各个领域有着共同规律和诸多联系。

总结过去发生的自然灾害和诸多生产、交通、矿山事故,人们吸取事故发生后的教训,提出预防事故的措施和方法,这种方法称之为“问题出发型的方法”。这种方法是被动的,其代价是惨痛的、高昂的。所以,人们一直期望找到一种能够预测事故的方法,比如在地震发生前,准确预报地震在何时何地以怎样的级别发生。如果能找到正确方法,人们虽然不能制止地震发生,但是可以采取措​​施大大减轻地震可能造成的伤亡和损失。因此,就必须用安全系统工程方法解决人类社会存在的安全问题。

第一节 基 本 概 念

一、系统、系统工程

系统工程的研究对象是系统。系统就是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体。系统有自然系统与人造系统、封闭系统与开放系统、静态系统与动态系统、实体系统与概念系统、宏观系统与微观系统、软件系统与硬件系统之分。不管系统如何划分,凡是能称其为系统的,都具有如下特性:

(1) 整体性。系统是由两个或两个以上相互区别的要素(元件或子系统)组成的整体。构成系统的各要素虽然具有不同的性能,但它们通过综合、统一(而不是简单拼凑)形成的整体就具备了新的特定功能,就是说,系统作为一个整体才能发挥其应有功能。所以,系统的观点是一种整体的观点,一种综合的思想方法。

(2) 相关性。构成系统的各要素之间、要素与子系统之间、系统与环境之间都存在着相互联系、相互依赖、相互作用的特殊关系,通过这些关系,使系统有机地联系在一起,发挥其特定功能。

(3) 目的性。任何系统都是为了完成某种任务或实现某种目的而发挥其特定功能的。要达到系统的既定目的,就必须赋予系统规定的功能,这就需要在系统的整个生命周期,即系统的规划、设计、试验、制造和使用等阶段,对系统采取最优规划、最优设计、最优控制、最优管理等优化措施。

(4) 有序性。系统有序性主要表现在系统空间结构的层次性和系统发展的时间顺序

性。系统可分成若干子系统和更小的子系统，而该系统又是其所属系统的子系统。这种系统的分割形式表现为系统空间结构的层次性。另外，系统的生命过程也是有序的，它总是要经历孕育、诞生、发展、成熟、衰老、消亡的过程，这一过程表现为系统发展的有序性。系统的分析、评价、管理都应考虑系统的有序性。

(5) 环境适应性。系统是由许多特定部分组成的有机集合体，而这个有机集合体以外的部分就是系统的环境。一方面，系统从环境中获取必要的物质、能量和信息，经过系统的加工、处理和转化，产生新的物质、能量和信息，然后再提供给环境；另一方面，环境也会对系统产生干扰或限制，即约束条件。环境特性的变化往往能够引起系统特性的变化，系统要实现预定的目标或功能，必须能够适应外部环境的变化。研究系统时，必须重视环境对系统的影响。

系统工程是组织管理系统的规划、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法。这个定义表示：①系统工程属于工程技术范畴，主要是组织管理各类工程的方法论，即组织管理工程；②系统工程是解决系统整体及其全过程优化问题的工程技术；③系统工程对所有系统都具有普遍适用性。

系统工程是 20 世纪 50 年代发展起来的一门新兴科学，它是以系统为研究对象，以现代科学技术为研究手段，以系统最佳化为研究目标的科学技术。它是发展很快、应用很广的一门管理科学，它的广泛应用为管理学的发展，为各行各业、各个领域实现管理现代化提供了基本理论和方法。

关于系统工程所属各子学科的命名问题，钱学森教授指出：“正如工程技术各有关专业一样，系统工程也还是一个总类名称，因体系性质不同，还可以再分门类，如工程体系的系统工程叫工程系统工程，生产企业或企业体系的系统工程叫经济系统工程……”。这种命名原则为系统工程在各专门领域的发展提供了条件，从而免去一些关于名词术语叫法的不必要的争论。

二、可靠性、可靠度、可靠性工程

可靠性是指系统在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。这里，规定的条件都是设计规定的，规定的功能也是设计赋予的。

可靠度是衡量系统可靠性的标准，它是指系统在规定的时间内完成规定功能的概率。相反，系统在规定的条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率就是系统的不可靠度。

可靠性工程就是研究系统可靠性的工程技术。可靠性工程要解决的是如何提高系统可靠度，使系统在其寿命周期内正常运行，圆满完成其规定功能的问题。

在某些产品的经典设计中，例如一些机械和结构承压件，其安全系数被定义为强度均值与应力均值之比；此时，产品的可靠度又可称为安全系数大于 1 的概率。同样，对于一个系统而言，系统的可靠性与系统的安全性是两个既有区别又紧密联系的功能。当一个系统的功能运行可靠度不好时，其系统的安全性必然会受到质疑，很难想象，一个安全性不好的系统会可靠运行。

三、安全系统与安全系统工程

(一) 对安全的理解和认识

安全一词是人们经过抽象思维确定的一个概念或理念。目前所见到的文献对安全这个

概念的诠释普遍存在两个问题：一是缺乏科学的严密性；二是安全一词太大众化，以致不管人们如何下定义，都很难包容一般意义上的安全理念的内涵。

安全描述的是一种客观存在的状态吗？回答并非是肯定的。因为描述安全状态的主要特征量是什么，在安全科学界尚难统一。有人说无事故、无隐患的状态就是安全状态；从动力学原理出发，也有人提出用系统从无序到有序，渐变与突变的统一，非畸变来描述安全动态。这样的表述虽是有一定的科学性，但由于安全因素的高度复杂性和极强的时间依赖性，上述方法所表述的安全状态必然有很大的局限性，可能与实际相差甚远，也可能带有很大的理想化色彩。但又与人们想象中的“平安无事”可能根本不是一回事，因为人们有时说的安全、平安不过是代表一种企盼，因此安全仅仅是一种理想化的抽象的概念。

如果承认安全一词描述的是一种状态，这种状态也绝非一种事故为零的所谓“绝对安全”的概念。从科学的角度讲，“绝对安全”的状态在客观上是不存在的。平安也好，安全也好，其本身就带有很大的模糊性、不确定性和相对性，所以“安全状态”具有动态特征，就是说安全所描述的状态具有动态特征，它是随时间而变化的。

安全的动态特征还体现在安全描述的不只是一个相对稳定的状态特征，安全一词还可作为对事故—安全过程的一种表征。过程表征和状态表征最本质的区别就在于前者描述的是事物的发展趋势，后者描述的是一种目标。从这个角度讲，安全一词表述的又可认为是动态过程。正如有的文章所表述的：渐变对应于灾害过程的孕育、维持，突变对应于灾害过程的启动和剧烈地扩展。但是灾变不仅是灾害发生，也是系统由不稳定向新的稳定（安全）跃迁的触发器。

当然从技术的角度讲，已经提出并应用的安全失效率、安全度、安全系数等定量化的计算方法、标准及其表征的安全技术状态和安全与否的结论是科学和严谨的。但是这和通常讲的安全的概念相比显然要狭义得多。

状态、过程、理念、技术安全都是定义安全这个概念应该考虑的内涵。可见，人们试图通过一个简单的定义就想把安全如此丰富、复杂的内涵表述清楚是一件非常困难的事情。

从科学原理出发，定义事物多采用如下办法，一种是从事物的组成考虑，另一种是从事物的功能考虑，或两者兼顾。

因此，安全表述的是一个复杂物质系统的动态过程或状态，过程或状态的目标是人（物）将不会受到伤害或损失；安全也可表述的是人们的一种理念，即人（物）将不会受到伤害或损失的理想状态；安全也可表述的是一种特定的技术状态，即满足一定安全技术指标要求的物态。

（二）安全的属性

安全一词所涉及的纷繁复杂因素与它的自然属性和社会属性有着密切的关系。

1. 安全的自然属性

安全的自然属性可以从主动和被动两方面来阐述：

（1）安全是人的生理与心理需要，或者说由生命及生的欲望决定了的自我保护意识，这是天生的，是安全存在的主动因素。

（2）人类对天灾的无奈以及新陈代谢、生老病死的规律不可抗拒，使人们不得不把生命安全经常提到议事日程，这虽然是被动因素，但它与前一个主动因素相结合，就决定

安全是自古以来人类生活、生存、进步永恒的主题。

2. 安全的社会属性

安全的社会属性也可以从主动和被动两方面来阐述：

(1) 自从人类有组织活动以来，社会安定、有序、进步始终是各社会阶段追求的目标，而这一目标实现的重要标志之一就是安全，因此这是安全立足社会的主动因素。

(2) 人类的社会活动如政治、军事、文化、社交，有的对安全直接起破坏作用，有的间接影响着安全；人类的经济活动，如生产（职业）、高技术灾害（化学品致灾、核事故隐患、电磁环境公害、航天事故、航空事故）、交通灾害，则是自人类开展经济活动以来就存在的突出的安全问题；如今更加突出的一个安全问题是环境问题，环境（包括自然环境和人为环境）恶化严重威胁人类生活、生存安全。例如，在 15 届世界职业安全卫生大会上，与会专家指出：向 21 世纪人们提出的挑战性问题是“环境、安全、健康问题”，即 Q. E. & OSH 是一个严重影响国民经济可持续发展的大问题。人类的社会活动、经济活动、交通和环境一方面本身在不断制造事故，另一方面也通过技术和管理措施不断消除隐患，减少事故。但由于受政治利益和经济利益的驱使，安全技术管理措施多数是被动的。

此外，关于安全的社会属性也有人提出人伦智的观点。人伦是在一个人群（社会性的结合）中发生的。夫妇、父子、兄弟、朋友、同事构成人际关系，人际以诚相待，共谋生命的延续、生活的充实，并以此抵制唯利是图就称为人伦智。在资本主义社会，各个人际关系上的人伦智相当低微、暗弱。然而人伦智却是“职业灾害困局”中唯一的脱困希望之所寄，它的潜在能量是可以信赖的。人伦智也应属安全社会属性中的主动因素。

如果把安全的自然属性和社会属性合起来考虑，安全代表的可能既是理念的，又是物质的；既是抽象的，又是客观的、有形的；既是当前的实实在在的事物，又可能是将来的一个可望而不可即的目标。

还可看出：安全的自然属性与社会属性中都存在着很强的促动安全的主动因素，这是安全科学发展的基础。

安全问题纷繁复杂的关系正是由于安全问题的自然属性与社会属性的交融，正像人是社会的一样，而社会的复杂性正是安全问题复杂的根本原因之一。

（三）安全系统及其特点

安全问题是一个复杂的系统工程问题，或者说解决安全问题要用系统工程的理论和方法，这种认识目前已广泛达成共识。但是说到“安全系统”则存在着歧义。其实“安全系统”这个定义能否成立，关键在于它的特殊性和客观性。所谓特殊性就是指它与一般系统的区别。如前所述，其客观性的问题是不容置疑的，而其特殊性或个性可以归纳为如下若干方面。

(1) 系统性。与安全有关的影响因素构成了安全系统。因为与安全有关的因素纷繁交错，所以安全系统是一个复杂的巨系统。很难找到一个在因素数及其相关性复杂程度能与之相比的系统。由于安全系统中各因素之间，以及因素与目标之间的关系多数有一定灰度，所以安全系统是灰色系统。

与一般系统不同，安全系统总是把环境因素看成是其系统的组成，其典型的因素及其关系如图 1-1 所示。

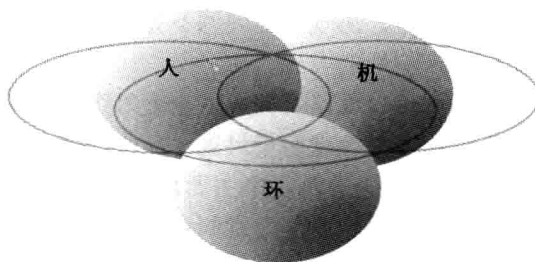


图 1-1 安全系统典型的组成因素及其关系图

依据安全问题所涉及范围大小不同，安全系统大小之差可能很悬殊。一般地讲，纯属技术领域的安全系统比如一台设备、器具，可能只涉及机和物；而对于一个车间甚至一个工厂，要考虑安全问题的系统范围，则不只是机和物，肯定要把人一机—环境都扯进来。实际上，人一机—环境的提法是考虑了安全问题的空间跨度和时间跨度两个方面。如此说来，即便是一台设备，如果把它的制造安全与使用安全考虑进来，也仍然是人一机—环境的复杂系统。

安全系统的目标不是寻求最优解。这是因为安全系统目标的多元化，以及安全目标的极强相对性、时间依赖性及与其理想化理念很难协调，所以安全系统的目标解是具有一定灰度的满意解或可接受解。

(2) 开放性。安全系统是客观存在的。这是因为安全系统是建立在安全功能构件的物质基础之上，但同时安全系统总是寄生在客体（另一个系统）中。在处理方法上，如果把客体看成一个黑匣子，安全系统是通过客体的能量流、物流和信息流的流入—流出的非线性变化趋势，确认安全和事故发生的可能性，因此安全系统具有开放性特点。

开放性不仅是安全系统在动态中保持稳定存在的前提，也是安全系统复杂性及安全—事故转换发生的重要机制。

(3) 确定性与非确定性。确定性是指制约系统演化的规则是确定性的，不含任何随机性因素。确定性的特征是演化方向及演化结果是确定的，可精确预测。非确定性具有演化方向和演化结果不确定的特征，或者具有刻画事物运动特征的特征量不能客观精确地确定的特征。非确定性包括随机性和模糊性。

随机性可能有两个方面的来源：一是在不含任何外在的随机影响因素作用下，完全由确定性系统演化而产生的随机性（如产生混沌），这种随机性称为本质随机性；二是系统还可能因其外在影响因素的随机作用而产生随机性行为，从而使系统在一定条件下表现出随机性的特征，这种随机性称为外在随机性。由于安全系统把环境看成是它的组分，所以对安全系统而言，本质随机性和外在随机性的区别不是绝对的。

模糊性是指事物的本身不清楚或衡量事物的尺度不清楚。对于安全系统，就是指系统的构成及其相互关系，以及组成与目标的关系不清楚。造成这些不清楚的可能来源于主观和客观两个方面，即具有主观模糊性和客观模糊性。首先，刻画安全运行轨迹的以模糊数学方法建立的数学模型具有主观模糊性。因为数学模型常常不可能“严格地”确定安全系统各要素之间及其与目标之间完整的客观关系。当然，对于自然的技术因素之间的关系尚好一些。而对于社会的因素及其与技术因素的耦合关系将难以量化，因而也将难以建

立准确的数学关系。应该强调的是,出现上述问题不完全是由于安全系统本身不清楚,它可能只是人们对安全系统主观模糊性的表现。

另外对安全系统安全度的评价尺度以及构成安全度等级的评价指标体系也具有客观模糊性,即从事物的本质上无法给出其客观衡量尺度。

(4) 安全系统是有序与无序的统一体。序主要反映事物的组成规律和时域。依据序的性质,可分为有序、无序和混沌序。有序通常同稳定性、规则性相关联,主要表现为空间有序、时间有序和结构有序。无序通常与不稳定、无规则相关联。而混沌序则是不具备严格周期和对称性的有序态。现代复杂系统演化理论认为,复杂系统的演化中,不同性质的序之间可以相互转化。安全系统序的转化结果是否引发灾害或使灾害扩大,取决于序结构的类型及系统对特定序结构下运动的(灾害意义上的)承受能力。

有序和无序,确定性和非确定性都会在系统演化过程中通过其空间结构、时间结构、功能结构和信息结构的改变体现出来。

(5) 突变性或畸变性。安全系统过程的突变或畸变,或过程由连续到非连续变化在本质上还是服从于量变引起质变的哲理。

量变到质变的转化形式可以用畸变、突变或飞跃来描述,但也可通过渐变实现。所以安全系统的渐变也可能孕育着事故,而突变、畸变则肯定对应于灾害事故的启动,是致灾物质,或能量的突然释放。

综上所述,安全系统虽然与一般系统、非线性系统等有若干共同点,但安全系统的个性还是非常明显的,这是决定它客观存在并区别于其他系统的根本原因。

(四) 安全的动力学特征

安全系统是物质系统。安全过程既可能是自组织的,也可能是被组织的,也可能是两者兼而有之。

所谓自组织,是指系统在获得空间、时间或功能的结构过程中,没有外界的特定干预(所谓外界的特定干预,对安全来说主要是指社会属性中的被动因素)。它可能有两种发展形式:一种是非组织的向有组织的有序发展过程,其本质是组织程度从相对较低到相对较高演化;另一种则是维持相同组织层次,但复杂性相对增长。前一种形式反映了安全系统组织层次跃升过程,而后一种形式则标志着安全系统组织结构与功能从简单到复杂的组织水平的提高。

对安全系统的自组织的演化过程主要是反映它的自然属性与社会属性共同作用的过程和结果。因为安全系统也是开放系统,它可以不断与外界交换物质、能量和信息,从而出现上述的两种发展形式,即从原有的混沌无序状态,转变为一种在时间、空间或功能上的有序状态。

一旦安全过程出现被组织的情况,如不可预见的天灾、人为诱发地震、战争、人为纵火、瞎指挥、违规操作等,则会发生灾难或事故。

当然安全系统也是非线性系统,因而也具有非线性系统的共同特征。非线性是系统产生自组织行为的内因,没有这个内因,所谓开放性将不起作用,无序一有序的过程也就不会发生。

不少学者提出并论证了安全系统是以耗散结构形式存在的,这种耗散结构通过自组织而形成并维持下去。而耗散结构最本质的特性就是消耗外界有序的物质、能量和信息,没

有消耗，耗散结构将不复存在。因此，要维持安全系统的耗散结构，必须保证安全系统的开放性，使得物质、能量和信息的流入与流出达到平衡。据此，我们引进“负熵流”和“正熵流”的概念以从定性角度来考虑安全系统与外界的物质能量和信息交换；引进“剩余熵”的概念以从定量角度来获得体系失稳与否的判据。虽然都有一定的局限性，但熵仍然是今后研究安全过程发展趋势的重要概念和方法。因为熵的大小是状态自发实现的可能性的量度，熵的变化量能反映出安全系统混乱度的变化情况，其具有以下数学关系：

$$\Delta \text{ 剩余熵} = \Delta \text{ 熵增} - \Delta \text{ 负熵流} - \Delta \text{ 正熵流}$$

如果 Δ 剩余熵为正数，则表示安全系统混乱度的增加；如果 Δ 剩余熵为负数，则表示安全系统的有序度的增加；如果 Δ 剩余熵为零，则表示安全系统处于稳定状态。所以，安全系统耗散结构的维持， Δ 剩余熵不能为正数。

那么，安全系统的熵如何表达呢？描述某一个零部件，在特定条件下，完成其特定功能的能力，一般用可靠性来表示。同样，对于一个安全因素 x_i ，可以用安全度 $P(x_i)$ 来表示在某一等级的耗散结构下，完成规定的安全功能的能力。而安全度的大小，又可以从熵的角度来分析，它必然有一个与安全度相对应的安全熵来表示该安全因素的不确定度、混乱度和无序度。当安全度越大时，本身的不确定度、混乱度和无序度就越小；反之，本身的混乱度也就越大。

从熵的本质含义出发，熵是一种系统的状态概率 w 的量度 S ，即 $S = k \ln w$ 。在参考信息熵的定义之后，提出安全熵的概念及其定义。安全熵是安全因素自身状态混乱度的一种量度，用安全度 $P(x_i)$ 来定义其安全熵为

$$S(x_i) = k \log \frac{1}{P(x_i)} = -k \log P(x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中， k 为待定系数，所谓的待定系数是为了与其他理论方面相结合而起到桥梁的作用。设 $k = 1$ ，安全熵的表达式简化为

$$S(x_i) = \log \frac{1}{P(x_i)} = -\log P(x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

上述的这一公式说明，当安全度 $P(x_i)$ 越大时，对应的安全熵 $S(x_i)$ 就越小，特别是当 $P(x_i) = 1$ 时，对应的安全熵达到最小， $S(x_i) = 0$ ，这时认为该安全因素混乱度为零，与我们实际情况相吻合。同理，当安全度 $P(x_i)$ 越小时，对应的安全熵 $S(x_i)$ 就越大，说明该安全因素混乱度越大，执行该安全功能的能力就越差。

在这里特别说明的是，安全熵是严格利用安全因素本身的安全度来进行定义的，即利用的是安全因素完成其安全功能的状态概率。

(五) 安全系统工程

安全系统工程是采用系统工程的基本原理和方法，预先识别、分析系统存在的危险因素，评价并控制系统风险，使系统安全性达到预期目标的工程技术。安全系统工程是从根本上和整体上来考虑安全问题的，它为安全工作者提供一个既能对系统发生事故的可能性进行预测，又可对安全性进行定性、定量评价的方法，从而为有关决策人员采取安全措施提供决策依据。

对这个定义，我们可以从以下几个方面理解：

(1) 安全系统工程的理论基础是安全科学和系统科学。它是工矿企业劳动安全卫生