

中文引用格式:宋张君. 发电企业风险管控4M屏障理论模型构建及其机制研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(增1):1-7.

英文引用格式:SONG Zhangjun. Research on 4M barrier theory model construction and mechanism for risk management and control of power generation enterprises[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1):1-7.

发电企业风险管控4M屏障理论模型 构建及其机制研究*

宋张君 高级工程师

(国家能源集团国能浙江北仑第一发电有限公司, 浙江 宁波 315800)

中图分类号:X913

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.S1.0006

【摘要】 为有效遏制事故发生,切实加强安全理论对电力安全生产指导和支撑作用,克服洋理论“水土不服”及现有的安全理论模型不能满足当前复杂电力安全生产实际需要的现状,构建本土特色电力安全生产管理理论及模型,基于国内外各类先进因果连锁、能量意外释放的事故致因及核电防护屏障、物、人、环、管(4M)屏障理论,结合国家能源集团发电企业安全生产现场客观实际及多年风险管控实践经验,把事故逆向思维(事故致因)和风险预控的正向思维(屏障控制)相结合,提出发电企业安全管理的物、人、环、管“4M屏障”理论,并通过动力学建模解析其内在事故演变根源和防范控制规律,梳理各要素内部逻辑关系。研究表明:该理论模型通过明确风险及其屏障控制对象、事故发展过程及其原因分析,能够为发电企业建立健全安全生产风险管理体系提供较为系统和全新的风险预控理念与方法论。

【关键词】 发电企业; 风险管控; 物、人、环、管(4M)屏障理论; 物、人、环、管; 动力学建模

Research on 4M barrier theory model construction and mechanism for risk management and control of power generation enterprises

SONG Zhangjun

(Zhejiang Beilun NO.1 Power Generation Co., Ltd., CHN Energy Group, Ningbo Zhejiang 315800, China)

Abstract: In order to effectively curb accidents, strengthen the guidance and support role of safety theory in power safety production, and overcome the mismatch between foreign theories and existing safety theory models that cannot meet the actual needs of complex power safety production, local characteristic power safety production management theories and models were constructed. Based on various advanced causal chains, causes of accidental energy release accidents, nuclear power protection barriers, and 4M barrier theories in China and abroad, combined with the objective reality of the safety production site of the power generation enterprise of CHN Energy Group and years of risk control experience, the reverse thinking of accidents (accident causes) and the positive thinking of risk pre-control (barrier control) were combined to propose the 4M barrier theory of machine & material, man, medium, and management in safety management of power generation enterprises. Through dynamic modeling, the internal accident evolution roots and prevention and control laws were analyzed, and the internal logical relationships of each element were sorted out. The results show that this theoretical model can provide a relatively systematic and

new risk pre-control concept and methodology for power generation enterprises to establish a sound safety production risk management system by clarifying the risk and its barrier control objects and analyzing the accident development process and its causes.

Keywords: power generation enterprises; risk control; machine & material, man, medium, management (4M) barrier theory; machine, man, medium, and management; dynamic modeling

0 引言

企业风险预控管理是当前行之有效的、先进的安全生产管控模式,在电力行业已逐步推行多年,但总体上仍处于发展阶段。虽然在风险预控管理模式的构建方面,已有多种探索和实践,但在基础理论层面针对我国电力生产国情的风险管控研究仍相对较为匮乏。随着“电力产业安全生产专项整治三年行动计划”及风险预控机制建设向纵深推进,电力风险管控基础理论对风险预控管理支撑不足的矛盾也越来越突出,在一定程度上制约了电力风险预控水平与能力的进一步提升和深化。

近年来,电力行业不断吸收和引进各种国内外事故致因及其风险管控理论,但还存在国外理论“本土化不足”、“水土不服”或与电力生产实际脱节等现象。同时,由于风险系统本身具有复杂性和多样性,且随着风险预控管理模式不断演变和发展,新的复杂系统和新问题不断涌现,现有的理论模型也远远不能满足实际需求。

因此,笔者拟基于国内外各类先进因果连锁、能量意外释放的事故致因及核电防护屏障、4M 安全管理等理论,结合国内企业风险管控实践经验,提出发电企业安全管理物、人、环、管 (Machine and Material, Man, Medium, Management, 4M) 屏障理论^[1],并通过动力学建模解析其内在事故演变根源和防范控制规律,以期探索建立适合发电企业自身实际的风险预控基础理论。

1 4M 屏障模型概述

4M 屏障理论是指基于国内外各类先进因果连锁和能量意外释放的事故致因理论、核电防护屏障理论、4M 安全管理、安全系统工程论^[2]及安全管理工程原理^[3]和安全管理学^[4]等,结合国家能源集团发电企业生产现场客观实际及多年实践研究,把事故逆向思维(事故致因)和风险预控的正向思维(屏障控制)相结合,提出基于安全管理 4M 要素的新的风险预控管理系统理论,结构模型如图 1 所示。

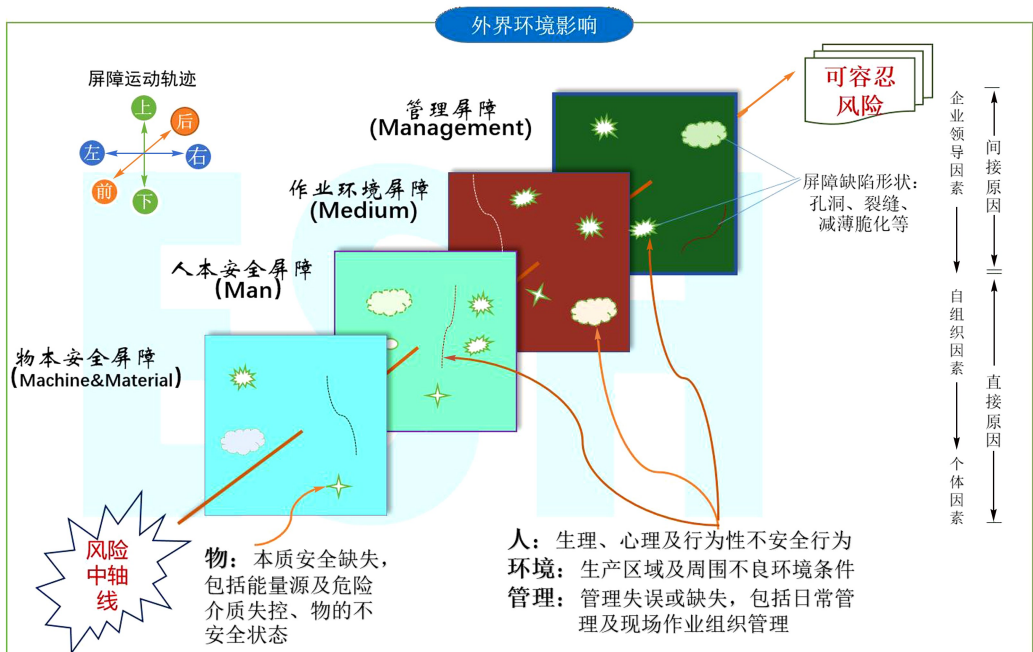


图 1 4M 屏障系统理论典型结构模型

Fig.1 Typical structure model of 4M barrier system theory

在 4M 屏障理论中,物、人、环、管 4 大因素分别构成事故致因与风险屏障,互为一体、互为依存、互为转化。当企业治理、控制事故致因时,不利转为有利,系统主要表现为风险屏障作用;反之有利转为不利,系统主要表现为事故致因、屏障的破坏。

4M 屏障理论的核心理念是指在安全生产过程中,风险无处不在,但只要减少或消除 4M 屏障的漏洞、缺失或减弱等缺陷;同时,通过各道屏障有机结合、系统防范,就可有效阻断风险穿透路径或降低风险,消除事故隐患,从而避免事故的发生。

1) 物(Machine & Material)的屏障。即设备设施本质安全屏障,对应物的不安全状态及其风险控制。事故预防的首要任务即是控制这些物的不安全状态建立物的安全屏障,包括通过技改、维护^[5]等手段直接消除、替代,限制那些具有高度危险能量或危险介质的设备、设施,确保这些设备或设施处于本质安全状态。

2) 人(Man)的行为屏障。即防人因失误屏障,对应人的不安全行为及其风险控制。事故的发生 80%以上由人的不安全行为造成。因此,在屏障控制物的同时,必须把防人因失误作为主要日常风险预控工作对象,建立人的行为屏障^[6]。行为屏障主要通过意识树立、技术技能提升、开展工作安全分析、实行标准化作业、团队配合、吸取他人经验与教训、总结个人事务等系列活动,不断改善人员的安全能力与安全意识^[7]。

3) 作业环境(Medium)屏障。即人与物的媒介空间条件,简称作业环境条件屏障,对应企业生产现场作业环境与企业人文环境的不良条件风险控制。各类人与活动的媒介空间及其外部客观环境是影响和导致事故发生的外在因素之一,在确保物的安全及自身行为安全基础上,企业应积极提供良好的安全、环保、健康作业环境,建立良好活动媒介空间及其内外部人文组织文化环境屏障^[8],促进和防范各类事故发生。

4) 管理(Management)屏障。即组织与管理机制屏障,对应管理失误或缺失风险控制。在所有事故因素中,最不易觉察到的、危险最大的是潜在的系统性组织或机制错误,即企业的管理失误或缺失。管理的问题往往会系统性导致人、物、环境屏障孤立的、局部的或整体失控,从而触发事故的发生,这往往是事故发生的深层次根源和内在“动力”,故正确组织和实施各项生产活动,建立标准化机制及其管理屏障显得尤为重要,也是各项屏障的基础与前提

条件。管理屏障又可分为具体的现场作业组织管理屏障与日常管理屏障 2 个部分。

4M 屏障理论的重要应用法则是“4-1 法则”,即事故的防范需要 4 个屏障有机结合、系统防范,但事故的发生只要有其中 1 个屏障发生问题即可。

基于不同屏障的缺失或损坏等状况,典型的屏障失效导致事故模式有以下 3 种:

1) 奶酪模式。在正常情况下,物、人、环、管 4 个屏障防御体系对缺陷或漏洞互相拦截,如系统不会因为单一的不安全行为出现问题。但当每个屏障中存在潜在或显性缺陷,如人员的违章行为、机械设备防护缺失、环境中存在高温高压能量源、危险介质或组织管理不到位等,这些缺陷与奶酪空洞相似,在屏障中形成易导致风险穿透的孔洞(符合瑞士奶酪理论)。在某个时间、空间,当这些孔洞构成风险穿透通道时,风险就会穿过各个屏障,导致事故发生。

2) 扰动模式。当管理屏障自身存在问题时,会引起相关管理对象屏障的缺陷或缺失,最终使该屏障失去对风险屏蔽和过滤作用,引起系统总体风险失控程度陡增,具体表现为:当管理存在系统性问题时,往往导致物、人、环屏障三者各自或同时发生问题,引起系统的较大扰动,如引起人本屏障缺失、物本屏障减弱甚至破坏、环境屏障漏洞陡增等,此时一些微小风险即可轻易贯穿屏障,导致事故发生。

3) 穿越模式。人在整个系统中最具有主观能动性,同时对屏障系统也最具有破坏性。当人实施其不安全行为而造成人本屏障缺失时,人往往会对其他屏障产生轻视或无睹的状态,有时甚至是存在蓄意破坏的潜意识或行为。此时,风险就会突发,破坏自身人本屏障同时,破坏或跳(越)过其他屏障,从而导致其他屏障的失效,系统处于完全失控状态,从而造成事故,如人为解除或破坏电气“五防闭锁”设施、翻越安全护围栏、强令冒险作业等,导致人身事故。

2 屏障系统特征及动力学模型建构

2.1 系统特征分析

整个 4M 屏障系统组织构成的运作组成形态极其复杂,其纵向、横向因素之间存在众多交互交叉影响。与安全系统具有非线性类似,整个 4M 屏障系统也具有非线性。从数学和物理学理论来看,屏障系统普遍存在对各屏障运动状态初始值极为敏感、貌似随机的不可预测的运动状态,即混沌运动。

4M 屏障系统由于具有混沌属性,因此,具有非线性、有界性、标度性、分维性等特征,同时,又具有复杂性、自组织特性、确定的随机性、突变性等特征。参考文献[9],4M 屏障系统的基本特征主要体现在以下 3 个方面:

1) 协同作用。4M 屏障系统虽是人员、设备、环境和管理协同作用下的复杂高维系统,但在局部,系统也可通过有限的致因因素协同作用导致事故发生,如人的恶性违章行为可以直接跨越规章或物的防护屏障等直接导致事故的发生。另外,尽管有时物、人、环、管屏障从单个来看,管控水平不十分突出,但通过互相协同,在整体上可以维持在一定的风险管控水平,从而遏制各类事故的发生。

2) 耗散结构特征。从物理力学和热学角度来讲,4M 屏障系统是以耗散结构形式存在的动态开放系统(内部个体、自组织与企业领导因素与外部环境影响因素结合体)。系统与外界发生物质、能量、信息交换,可从外界因素引入负熵流来抵消屏障自身内部熵流的增加。当外界负熵流到达一定程度,系统熵流减少,形成一定有序化,如上级公司的安全督察可以促进基层企业安全生产管理的有序化;又如企业或部门内部通过检查、监督,可以促进企业部门或班组内部作业风险等管控有序化。

3) 渐变-突变规律。4M 屏障系统是非线性系统,其自组织现象是渐变-突变的矛盾运动过程。原始平衡状态系统中存在涨落,这些涨落按人的价值观可以分为有益的涨落(安全与环保的)和有害的涨落(危险与非环保的)。随机的涨落在系统远离平衡时(如屏障远离本该控制的风险中轴线或存在漏洞),通过内外能量流的输入导致平衡态系统处于不稳定的临界状态,此时某种涨落如被放大为巨涨落,可使不稳定的原始系统渐变状态突变跃为新的稳定状态,即发生事故状态。

2.2 动力学模型构建

在 4M 屏障系统中,发生事故通常必须经历 2 个阶段,即渐变与突变。而耗散结构理论易于解释渐变过程,突变过程则需要突变理论来分析。结合上述基本数学特征,将协同论、耗散结构、突变论与其他安全学原理有机整合,可以进一步在数学原理上建构 4M 屏障系统混沌数学模型。该模型的构建,可以更有利于在科学原理上对企业内部 4M 屏障各因素的关系和作用做进一步解析。具体如下:

1) 虽然 4M 屏障系统是复杂的高维系统,决定系统状态的变量也是多维的,但可以将多维的内部

变量统一为假设以安全熵 S 这一系统状态特征量为标准的一维变量参照系统,即安全生产状态函数:

$$P = F(S) \quad (1)$$

式中: P 为安全生产状态; S 为安全熵。

2) S 由 4 个控制参数决定,即:

$$S = f(\mu, v, \omega, \kappa) \quad (2)$$

式中: μ 为物的因素突变隶属函数值; v 为人的因素突变隶属函数值; ω 为环境因素突变函数值; κ 为管理因素突变隶属函数值。

3) 根据以上 2 点,系统的状态变量为 1 个,控制参数为 4 个,且系统不可逆,系统中突变现象导致的事故也是不可逆的,故可以选择数学突变理论中的蝴蝶突变模型对屏障系统分析,则此时屏障系统突变模型为:

势函数:

$$V_s = s^6 + \mu s^4 + v s^3 + \omega s^2 + \kappa s \quad (3)$$

突变流形:

$$dV_s = 6s^5 + 4\mu s^3 + 3v s^2 + 2\omega s + \kappa = 0 \quad (4)$$

分叉集由方程:

$$\begin{cases} dV_s = 6s^5 + 4\mu s^3 + 3v s^2 + 2\omega s + \kappa = 0 \\ d^2V_s = 30s^4 + 12\mu s^2 + 6v s + 2\omega = 0 \end{cases} \quad (5)$$

消去 S ,通过蝴蝶突变模型进行归一化:

$$S_\mu = \sqrt{\mu}, S_v = \sqrt[3]{v}, S_\omega = \sqrt[4]{\omega}, S_\kappa = \sqrt[5]{\kappa} \quad (6)$$

即可得到屏障系统突变隶属函数值 S_i :

$$S_i = \begin{cases} \frac{1}{4}(\mu^{\frac{1}{i}} + v^{\frac{1}{j}} + w^{\frac{1}{m}} + \kappa^{\frac{1}{n}}), \text{互补原则} \\ \min(\mu^{\frac{1}{i}} + v^{\frac{1}{j}} + w^{\frac{1}{m}} + \kappa^{\frac{1}{n}}), \text{非互补原则} \end{cases} \quad (7)$$

式中: V 为势函数; s 为状态变量; S_μ 为物的因素的安全熵; S_v 为人的因素的安全熵; S_ω 为环境因素的安全熵; S_κ 为管理因素的安全熵; S_i 为系统安全熵的即时评价价值; i, j, m, n 为常数,其值分别为 2、3、4、5。

从上述动力学模型可以看出,4M 屏障系统相空间是五维空间的复杂超曲面,这意味着并不能完整或简单地画出其突变流形图。根据以上推理,屏障系统的动力学方程可写为:

$$\frac{dS}{dt} = f(\{s\}, \{u, v, \omega, \kappa\}) \quad (8)$$

方程的右边部分可以表示为 V 的梯度:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial V} \quad (9)$$

它的定态解由下式解得:

$$\frac{\partial S}{\partial V} = 6s^5 + 4\mu s^3 + 3vs^2 + 2\omega s + \kappa = 0 \quad (10)$$

求出的定态解 $\{S_0\}$ 在屏障系统突变的相空间中表现为奇点。

因此,4M 屏障系统模型可利用 V 研究屏障系统突变的相空间中的奇点(风险可控程度或屏障安全性)如何随控制参数 μ, v, ω, κ 变化,以及其系统势函数 V 与状态变量 $\{s\}$ 和控制参数 $\{\mu, v, \omega, \kappa\}$ 的拓扑不变关系。

在一定区间 $[0, 1]$ 内将 4M 屏障系统进行安全分级,分别对应重大风险、较大风险、一般风险、低风险 4 个等级,根据矢量 Q 在区间内的变化,可评定

某个企业整体安全生产风险屏障系统的可靠性或安全性。

2.3 屏障失效干预及其事故发展规律解析

在 4M 屏障系统各风险与屏障变量之间的相互关系与作用此影响下,4M 屏障系统的总熵变化既有渐进性,也有突变性,从而屏障失效及事故的发展也是渐进的、突变的,是相对较为复杂多曲线进程^[10]。其主要进程历经“三区五期”,即稳定区、失稳区、事故区,始稳态期、潜伏渐变期、一次突变期、二次突变期、终止期 5 个历程,具体如图 2 所示。图 2 中, α^+ 事故爆发前期的突变阶段, β^+ 为事故的二次突变期, α^- 、 β^- 为屏障恢复干预后衰减变化。

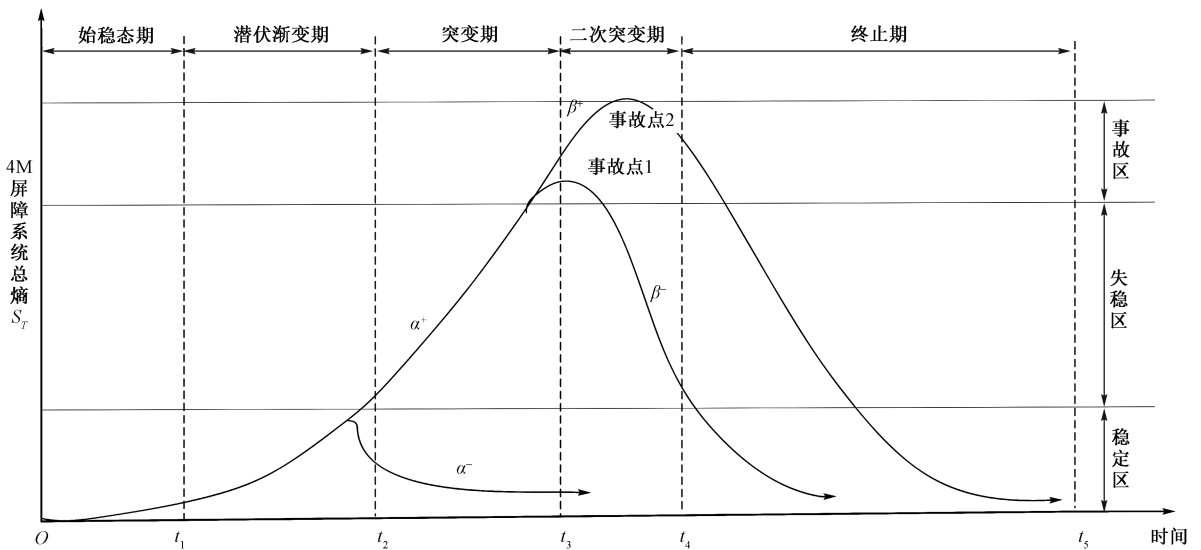


图 2 4M 屏障失效干预及其事故发展阶段性变化规律和熵变

Fig.2 4M barrier failure intervention, its phased changes in accident development, and entropy change

1) 始稳态期(0— t_1)。在时间 0— t_1 期间,4M 屏障系统总熵 $S_T=0$,系统处于有序和无序的稳定平衡状态,即此时屏障处于对风险穿透的阻断或良好过滤状态,组织整体剩余风险为可容忍状态,这是最理想的事故预防和风险防控状态,企业安全生产处于理论上绝对稳定区。但随着风险与屏障二者之间的相互作用与转化,以及物、人、环、管因素的改变或外界环境的变化,这种临界状态将发生改变。

2) 潜伏渐变期($t_1—t_2$)。由于设备设施及区域环境缺陷、人员的不安全行为及管理失误或缺失等危险因素一直潜在,事故的各种风险不断累积,4M 屏障系统的无序效应逐渐大于有序效应,总熵 S_T 不断上升,系统发生渐变逐渐走向失稳,但企业安全生产总体仍然处于相对安全,系统仍在稳定区。这时存在 2 种情况:①及时发现风险的递增及各类不安

全因素累积,并采取管理措施或技术措施消除或控制物、人、环、管屏障中的缺陷或缺失,使系统恢复正常状态,则此时总熵 S_T 将恢复平衡状态,再次进入稳定区,如企业日常不断对违章、隐患等控制、治理,即及时管控风险,消除事故萌芽的状态(图 2 中 α^- 曲线)。安全管理相对水平较高的企业大都处于该阶段)。②没有及时发现事故演变的趋势,或发现但未采取措施以及措施不当或失效,则屏障继续失效,此时系统向着突变状态演变,系统总熵继续递增并增大,安全生产处于动荡不稳定状态,逐渐进入失稳区,也即事故爆发前期的突变阶段,如异常、障碍、轻微伤等事件不断发生(图 2 中 α^+ 曲线),安全管理相对薄弱企业大都处于此阶段。

3) 突变期($t_2—t_3$)。由于 4M 屏障系统继续失效,穿透风险越来越多,此时,违章、未遂、异常、障

碍、轻微伤等事故前期的不安全事件不断出现,系统总熵 S_T 迅速增大,事故由可能转变为发生,企业安全生产处于失稳状态,终将导致事故的发生。此时也会有 2 种情况存在:①由于正确采取事故应急措施,系统的有序效应大于无序效应,事故得到控制,系统总熵将重新趋于 0,屏障系统恢复平衡状态,安全生产回归失稳区或稳定区(图 2 中 β^- 曲线)。②如果没有采取事故应急措施或采取措施不当,屏障系统继续失效,则系统总熵将继续扩大,将进入二次突变期(图 2 中 β^+ 曲线)。

4) 二次突变期(t_3-t_4)。系统进入二次突变期,其总熵 S_T 继续扩大,屏障系统彻底破坏。此时,次生、衍生事故相继发生,事故损失和危害逐渐扩大,系统进入事故区。二次突变期的时间长短、程度轻重取决于发生事故本身的严重程度和事故处理的有效性。若事故得到有效控制和应急救援,屏障系统将逐步重建,二次突变期将很快结束;反之则会不断蔓延。

5) 终止期(t_4-t_5)。由于事故应急得力使得各屏障系统重建,其总熵 S_T 重新趋于 0;也可能因为物质、能量的释放耗尽而总熵 S_T 自行趋于 0,事故链终止。事故的终止期长短同样取决于事故本身的严重或复杂程度及人为对恢复屏障的干预力度。

2.4 事故致因链及其原因解析

在 4M 屏障系统中,物和人 是屏障的 2 大主要主体,也是事故发生的直接原因。但同时也应看到,环境条件不良和管理的导向及控制不力对事故及事故原因产生的影响,有时甚至是根本影响。故在事故调查和原因分析时,不仅应找准事故直接、间接原因,更应寻找事故预防的最佳“窗口”,分清事故原因的层次和主次,即理清事故根本原因,而不仅仅局限于直接、间接原因。

基于行业内目前还尚未明确给出各类事故原因的具体定义,文中根据 4M 屏障系统模型中物、人、环、管各因素的事故致因逻辑关系及与事故发生的紧密性与主次差异性,给出事故发生的致因链及各事故原因定义,见表 1,4M 屏障理论事故致因链构成如图 3 所示。

表 1 各类事故原因的定义及在模型中定位

Table 1 Definition and positioning of various accident causes in model

原因分类	原因的定义	模型中的定位
直接原因	与事故的发生有直接关系,不经过任何中间环节和因素,直接导致事故发生的事事故致因因素。目前,学术界普遍认为的是人的不安全行为或物的不安全状态	在事故发生时,位于事故致因主链最末端的失效屏障因素
间接原因	通过第二者及以上因素或环节引发事故的事事故致因因素。一般而言,包括非直接的各个内部屏障因素及外部环境的管控缺陷	在事故发生时,位于事故致因主链中间部分,对事故的发生起关键衔接作用的失效屏障因素
根本原因	在所有直接和间接事故致因原因中,起最终决定作用并影响事故致因主链形成的关键失效屏障节点,且带有一定必然性的事故致因因素	在事故发生时,位于事故致因链中最首端的共性失效屏障因素

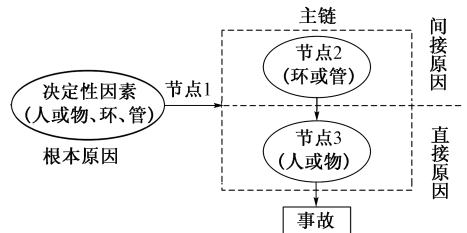


图 3 4M 屏障理论事故致因链构成

Fig.3 Composition of causal chain of accidents in 4M barrier theory

3 结论

1) 文中提出物、人、环、管 4 大风险因素缺失或失控引发的事故致因机制,构建了 4M 风险屏障理论。

2) 结合 4M 屏障的动力学建模及内涵延伸,将 4M 屏障系统安全级别分为重大风险、较大风险、一般风险、低风险 4 个等级。

3) 该模型可用于电力行业事故致因分析、行为安全管理、系统安全设计和防控,通过明确风险及其屏障控制对象、事故发展过程及其原因分析,能够为发电企业建立健全安全生产风险管理体系提供较为系统和全新的风险预控理念与方法论。

参考文献

[1] 冯树臣. 4M 风险屏障与安全环保风险数据库建设[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021: 36-38.
[2] 刘辉, 孙世梅, 马池香. 安全系统工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 8-11.

- [3] 王志荣, 田宏, 刑志洋, 等. 安全工程学原理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2018: 53-57.
- [4] 邵辉, 葛秀坤. 安全管理学[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014: 151-162.
- [5] 金龙哲, 汪树. 安全工程理论与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 133-138.
- [6] 张书莉, 吴超, 安全行为管理“五位一体”模型构建及应用[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 143-148.
ZHANG Shuli, WU Chao. Construction and application of “five-in-one” model for safety behavior management[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(1): 143-148.
- [7] 伍培, 刘义军, 吴珊珊. 安全心理与行为培养[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016: 105-122.
- [8] 王秉, 吴超, 杨冕, 等. 安全文化的基础性问题研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(8): 7-12.
WANG Bing, WU Chao, YANG Mian, et al. Research on basic issues of safety culturology[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(8): 7-12.
- [9] 吴超, 黄浪, 王秉. 新创理论安全模型[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 60-61.
WU Chao, HUANG Lang, WANG Bing. Newly invented theoretical models applied to safety and security[M]. Beijing: China Machine Press, 2018: 60-61.
- [10] 黄浪, 吴超, 王秉. 基于熵理论的重大事故复杂链式演化机理及其建模[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(5): 10-15.
HUANG Lang, WU Chao, WANG Bing. Complex chain evolution mechanism and its modeling of major accident based on entropy theory[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(5): 10-15.



作者简介: 宋张君 (1969—),男,浙江宁波人,高级工程师,主要从事电厂现场安全、健康、环境方面的管理工作。E-mail:12002677@chnenergy.com.cn。