

复杂信息度量的安全系统结构复杂性评价^①

宋华岭, 温国锋, 刘丽娟, 李金克, 张漪, 王传鹏, 李春蕾
(山东工商学院管理科学与工程学院, 烟台 264005)

摘要: 作为复杂性研究和安全研究理论与方法的进一步扩展, 建立复杂格空间, 搭建了复杂性参量的立体化刻画的框架, 确定熵的信息度量为复杂格空间的大小(维度)的测度的尺度, 构造出复杂性测度的全方位的测度体系; 将此理论与方法应用与工程系统的复杂性研究中, 以煤矿工程系统的安全系统复杂性研究为例, 从矿井开拓巷道系统联结关系、节点、环节、矿井安全子系统复合性、矿井安全监测系统网络、安全设施设置、监测系统、井下人员定位系统测定点分布等结构复杂性要素, 进行复杂性评价与实证研究。

关键词: 复杂格空间; 熵尺度; 结构复杂性; 矿井系统; 矿井安全系统

中图分类号: N941.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2012)02-0083-14

0 引言

管理复杂性研究是在复杂性科学的基础之上产生的新学科, J. N. Warfield、G. Vickers、C. S. Pierce、J. Piaget 等形成的结构基础学派, 提出了用于解决组织管理中复杂性问题的理论, 复杂性的20个定律(law)、分类(taxonomy)、指标(index)构成其核心理论^[1]。文献[2]应用结构学派的复杂性理论进行了复杂性工作程序的研究。Richard 和 Lewin 把复杂性看作组织内的活动和次系统的数量, 指出它能用3维来度量, 垂直维复杂性是组织中层次水平的数目, 水平维是由组织必须同时处理的工作项目或横跨组织的部门, 空间维为地域位置的数目^[3]。Sue hignett^[4]用人因工程学的观点, 研究医疗组织尺度与复杂性的关系, 3个层次的管理层、职员层和患者集聚的门诊层的组织结构复杂性。刘洪^[5-7]对企业的复杂性进行了深入的研究, 提出了组织结构变革的复杂适应系统观, 并对成长性企业的复杂适应性分析, 确定了组织复杂性: 动因、控制与利用的方法。

宋华岭等^[8-16]曾应用结构基础学派的研究方法, 研究了企业系统与工程系统复杂性, 对该研究方法有所扩展。本文进一步扩展复杂性研究和安全研究的理论与方法, 提出了复杂格空间的基本研究思想与方法, 构造出复杂性测度的全方位测度体系, 解决了工程系统中的结构复杂性测度问题, 并应用此复杂性理论与方法, 研究矿井安全系统的结构固有复杂性, 探讨安全技术硬件系统的安全结构问题, 系统优化安全系统的巷道系统布置、通风网络的安全设施设置、监测系统测定点分布等, 结合矿井布置对安全系统结构复杂性进行分级, 提供安全决策与策略。

许多学者对矿井安全问题进行了研究, 宋学锋等深入研究了复杂性和煤矿本质安全理论。文献[17]讨论了事故成因理论的发展进程, 分别从技术致因主导的单因素论到系统不和谐的整体论, 将事故成因认识过程划分为4个阶段, 并系统阐述了事故成因理论在事故预防中的重要意义。文献[18-19]针对煤矿安全存在的问题, 建立了适合我国煤矿安全管理的本质安全管理体系。安

① 收稿日期: 2009-05-16; 修订日期: 2011-10-17。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70771060); 山东省自然科学基金资助项目(Y2006H10); 教育部人文社会科学研究资助项目

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 宋华岭(1957—), 男, 吉林桦甸人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: songhl@sdipt.edu.cn

全复杂系统理论方面:文献[20]认为安全系统是复杂的社会技术系统,借鉴传统木桶理论,利用耗散结构理论中安全熵的有关概念,探索性地建立安全木桶模型,并针对本质安全型煤矿建设给出了相应建议;文献[21]应用复杂性理论对煤矿安全问题进行研究;傅贵等^[22]提出行为科学方法和系统化安全管理理论体系;文献[23]提出了利用遗传算法理论进行安全评价的可行性和优越性,给出同时确定神经网络结构和权值的遗传优化方法和矿井安全管理评价模型;文献[24]对神经网络、文献[25]对矿井安全生产仿真系统、文献[26]对网络技术在煤矿安全监测系统中的应用进行了研究。

矿井安全系统复杂性研究交叉与综合性强,难度大,复杂信息的获取和处理使矿井安全系统结构复杂性的测定十分困难。在研究方法论与研究方法上的创新和突破,对推动煤炭企业安全管理复杂性科学研究,丰富管理理论与复杂性科学理论,都具有重要的理论意义。

1 矿井安全系统的结构复杂性分析与熵函数模型建立

1.1 矿井安全系统的结构复杂性分析

矿井安全系统是与矿井安全有关的各种系统的总称,包括通风、瓦斯监测、温度监测、防灭火等各种系统,它是矿井系统重要的子系统。矿井安全系统包含着多个相互关联的子系统,主系统与子系统的联结关系有复合、串联、并联、混联关系等;

节点与环节、各生产子系统的复合状态与相互关系、层次等等影响安全系统的结构复杂性。本文将子系统串联、并联、混合分解为其系统与环节复合关系,按其所具有的对安全系统整体结构复杂性信息贡献进行评价。

在矿井开拓巷道的布置上已经考虑了地质构造和煤层分布等。煤层的瓦斯等级、赋水情况、发火期等对结构复杂性有很大影响,具体体现在矿井安全监测系统布置与设施设置上,如瓦斯量监测测点、风速监测点、发火点温度测点、矿压监测测点及防水监测测点及措施等。如果是采用皮带输送机平巷与大巷运输方式,则皮带输送机的安全监测系统如过热发火监测系统也在这个监测系统范围内。

因此,矿井安全系统结构复杂性评价因素空间 = { 矿井各子系统的复合性,矿井开拓系统联结关系,矿井安全监测系统网络 } = { 矿井各子系统的终端,节点,环节,复合状态,连接方式,相互关系,阶段,层次;各种风路的设施(风门、风帘、风墙等)、监测点(瓦斯、风速、温度、矿压、监测、防水)设置等}。依此建立起矿井安全系统结构复杂性评价维度模型图1。这是不同维次尺度评价问题,需要建立多维的尺度空间模型进行评价。

宋华岭等^[11-13]曾经建立了3维次的复杂信息量评价模型。本文建立多维度的复杂信息评价模型来解决这类问题。矿井安全系统结构复杂性在系统结构复杂性评价上具有代表性、一致性和普适性,依据尺度推绎的理论^[27],可以得出具有普遍意义的结论。

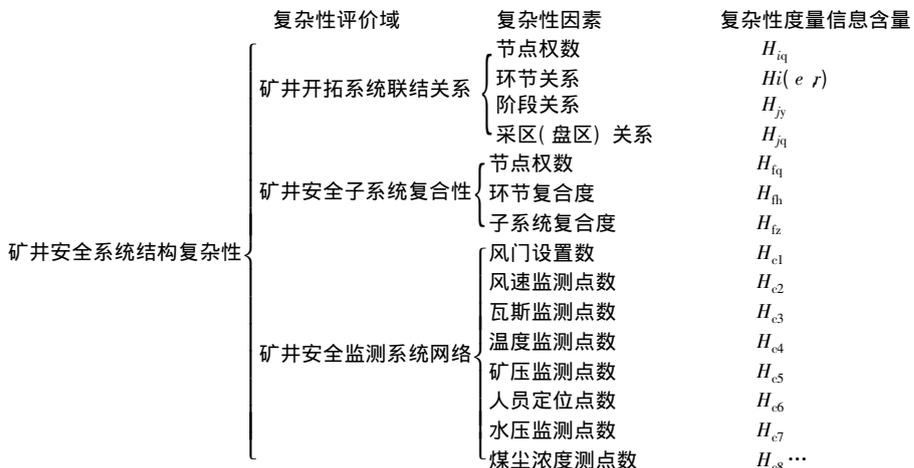


图1 安全系统结构复杂性评价图

1.2 矿井安全系统的结构复杂性信息量评价熵函数模型的建立

本研究方法的实质是依据信息熵的基本意义, 求出每个基本评价要素平均信息量对总体复杂性的平均信息量贡献, 它是一种分布, 即信息量几率, 建立几率与熵的相互关系, 物理学家劳厄说过: 熵与几率之间的联系是物理学最深刻的思想之一^[28].

定义 若几率为 $f_i = n_i/n$, 依几率、概率与仙农^[29] 熵函数的关系, 则系统的复杂性信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{n} \log \frac{n_i}{n} = - \sum_{i=1}^l f_i \log f_i = - \sum_{i=1}^l p_i \log p_i \quad (1)$$

1.3 矿井系统节点、环节及子系统的复合结构复杂性信息熵模型的建立

受井工巷道的限制, 矿井安全系统的子系统和相应的矿井子系统都布置在同一巷道系统中, 如瓦斯监测系统、通风系统、温度监测系统、煤尘监测系统等.

系统复合 在同一巷道系统中布置多种子系统. 矿井子系统部分或全部复合是矿井安全系统的重要结构特征. 矿井安全系统复合性特征成为评价结构复杂性的重要因素.

节点 设系统在点 $V(i)$ 处发生功能的转换, 即不同功能的系统环节输入点 $v(i)$ 、输出点 $v(j)$ 称为节的点, 如图 1 中所示的各点, 最末节点为系统的终端.

环节 两节点 $v(i)$ 、 $v(j)$ 的连接结构单元叫环节, 可视为因果链上的一节. 对于矿井系统来说, 在一段巷道内在两个端点发生功能转化, 如井筒在地面车场与井底车场两个节点间, 称为 1 个环节, 以此类推矿井安全子系统也划分为井筒、大巷、采区或盘区上下山煤仓、运输平巷、工作面、回风巷、回风巷道、风井等环节, 且安全系统测点的布置在不同的环节上密度不同.

系统的结构因素空间的基本元素 = { 节点, 环节, 系统}. 依据复杂性研究局部到整体、微观到宏观的研究方法, 从节点 \rightarrow 环节 \rightarrow 系统的关系来综合评价复杂性.

节点的权数 进入和输出节点的环节数. 设

节点 i 的权数为 n_{mi} , 节点 i 的权数复杂性信息量为

$$h_{iq} = n_{mi} \left[- \frac{1}{n_{mi}} \log \frac{1}{n_{mi}} \right] = - \log \frac{1}{n_{mi}} \quad (2)$$

则系统节点权数的总复杂性信息量为

$$H_q = \sum_{i=1}^{n_m} h_{iq} = - \sum_{i=1}^{n_m} \log \frac{1}{n_{mi}}, \quad i = 1, 2, \dots, n_m \quad (3)$$

式中 n_m 为节点总数.

复合环节 承担两种或两种以上的子系统功能的系统环节称为复合环节, 其相互关系称为复合关系.

复合矩阵 由矿井系统环节与安全系统各个子系统环节复合构成的矩阵 $[A_{ij}]$ 称为复合矩阵.

$$A_{ij} = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_1 & S_2 & \dots & S_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$
$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{子系统发生复合关系} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

式中: S_i 为安全子系统; T_i 为安全子系统发生复合关系的矿井系统环节; m 为子系统的总数; n 为矿井系统环节总数.

环节复合度 f_{hi} 同一环节上安全子系统 i 复合的次数与该子系统的总数之比定义为环节复合度, 是描述系统环节的信息量对系统总体信息量贡献的指标, 它是评价系统结构复杂程度的重要指标之一. 于是, 环节复合度

$$f_{hi} = \sum_{j=1}^m \frac{A_{ij}}{m}, \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

其复杂性信息总量为

$$H_{hi} = - \sum_{i=1}^n f_{hi} \log f_{hi} = - \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij}}{m} \log \frac{A_{ij}}{m} \quad (6)$$

子系统复合度 f_z 子系统的环节数与系统的环节总数之比定义为子系统复合度, 它是度量子系统的信息量与系统总体信息量贡献的指标, 也是评价系统结构复杂程度的重要指标之一.

若 n_r 为子系统 r 环节数, m 为不同子系统数, 则环节数 n 为

$$n = \sum_{r=1}^m n_r \quad (7)$$

有 $f_{ri} = n_r/n$, 则系统的子系统复合度复杂性信息量为

$$H_{iz} = - \sum_{r=1}^m \frac{n_r}{n} \log \frac{n_r}{n} = - \sum_{i=1}^m f_{ri} \log f_{ri} \quad (8)$$

虽然信息化技术使安全监测系统的信息集成性、共享度大增,但受系统开发使用的先后顺序、功能和矿井系统结构的约束,不管是集散型结构还是总线型结构,各安全子系统不能全复合,即一条主线传输所有安全子系统的监测信息是不可能的。

定义 若在 i 环节内 $h(i, j)$ 是安全子系统 Y_j 上的一个节点,则此安全子系统上的节点集合为 $h = [(1, j), (2, j), \dots, (i, j), \dots, (n, j)]$, n 为环节的总数,若其全部的终态为 $h \in (n, j)$,则称子系统 Y_j 为全复合发生状态,该子系统复合矩阵 j 列的元素 A_{ij} 皆为 1; 否则,称该子系统处于非全复合发生状态。

同理,若某个环节 T_i 由同环节上的所有子系统复合运行,则称该环节为全复合发生状态,该环节在复合矩阵 i 行的元素 A_{ij} 皆为 1。

若设 Y_q 为处于复合发生状态环节数, Y_f 为处于非复合发生状态环节数, Y 为该环节内的全部子系统总数, $Y = Y_q + Y_f$, 决定该环节内子系统轨迹上熵信息含量为

$$H_{jy} = - \frac{Y_q}{Y} \log \frac{Y_q}{Y} \quad (9)$$

$$H_{fy} = - \frac{Y_f}{Y} \log \frac{Y_f}{Y} \quad (10)$$

用每个环节的全部子系统都到达终点的子系统数来计算其信息含量,给出如下定义与数学表达式。

定义环节内全复合状态的子系统数与非全复合状态的子系统熵信息之比为复合效率 R , 即

$$R = \frac{H_{jy}}{H_{fy}} = \frac{\frac{Y_q}{Y} \log \frac{Y_q}{Y}}{\frac{Y_f}{Y} \log \frac{Y_f}{Y}} \quad (11)$$

根据 \log 函数的性质,几率与熵值成正比,可得结论:若 $R > 1$ 表示环节内处于全复合状态的子系统多于非全复合状态的子系统, R 越大,复合效率

越高。

1.4 矿井安全系统子系统联结关系复杂性信息熵模型的建立

文献[30]曾对结构的熵评价问题进行过探讨。本文进一步建立结构复杂信息量度量与评价模型。

系统构成环节要素的集合 $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$, 为构成系统某环节的集合。设环节要素间二元系统的种类为 $r = (r_1, r_2, \dots, r_k)$, 该系统结构有如下关系: $r = \{r_1, r_2, r_3, r_4, \dots, r_n\} = \{\text{系统环节间相关联, 直接从属关系, 间接从属关系, 在同一层次上并列关系, } \dots\}$ 。这些关系实质上是系统子系统间串或并联关系的分解描述。

于是,系统间的构成环节要素可以形成一个关联矩阵,这个矩阵的元素为 $r_i(e_j)$ 。这样一些序对 $(e_j, e_{k1}), (e_j, e_{k2}), \dots, (e_j, e_{ki})$, 其中每个序对的关系都属于 r_i , 而 $e_{k1}, e_{k2}, \dots, e_{ki}$ 是 e 的其它元素,用 L_{ij} 表示这些序对的个数,并称为元素 e_j 上的关系 r_i 的外延长度。依仙农的信息公式,在元素 e_j 上的关系 r_i 的信息量定义为

$$h(e_j, r_i) = - p[r_i(e_j)] \log [p r_i(e_j)] \quad (12)$$

其中 $p[r_i(e_j)] = L_{ij}/(n-1)$, $n-1$ 表示元素 e_j 的最大可能外延长度,则有

$$h(e_j, r_i) = - L_{ij}/(n-1) \cdot \log L_{ij}/(n-1) \quad (13)$$

系统的环节关系复杂性信息总量为

$$H(e, r) = - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^4 \frac{L_{ij}}{n-1} \log \frac{L_{ij}}{n-1} \quad (14)$$

1.5 矿井安全系统阶段与层次的复杂性信息量度量

水平(阶段)是矿井系统的重要特征,反映了矿井系统的多水平(阶段)结构。这些都影响矿井安全系统的结构复杂性,阶段越多,系统复杂性则越大。

若设 n_{jk} 是系统 j 内水平(阶段)数目, n_i 为水平(阶段)总数,水平(阶段) j 对水平(阶段)结构复杂性的复杂信息贡献为

$$H_{jy} = - \sum_{j=1}^{n_i} \frac{n_{jk}}{n_i} \log \frac{n_{jk}}{n_i} \quad (15)$$

层次是该矿井系统的重要特征,也反映了矿井安全系统的多层次结构。矿井的层次结构越多,

其安全系统结构复杂性则越大. 若设 n_{jc} 是系统 j 内层次数目 n_c 为层次总数, 层次 j 对层次结构复杂性的复杂信息贡献为

$$H_{jc} = - \sum_{j=1}^{n_c} \frac{n_{jc}}{n_c} \log \frac{n_{jc}}{n_c} \quad (16)$$

在开拓系统中, 采区或盘区布置, 如同时开采数目, 两阶段同时开采、两水平或多水平同时开采, 都对矿井系统和安全系统结构复杂性有很大影响. 若设 n_{jq} 是系统层次 j 内开采采区数目, n_q 为同时开采采区总数, 层次 j 内采区数对采区结构复杂性的复杂信息贡献为

$$H_{jq} = - \sum_{j=1}^{n_q} \frac{n_{jq}}{n_q} \log \frac{n_{jq}}{n_q} \quad (17)$$

1.6 矿井安全监测系统测点网络布置结构复杂性信息熵函数建立

矿井安全系统是该复杂系统的关键子系统. 各系统环节上监测系统, 包括瓦斯、风速、温度(防火)、矿压、防水监测系统测点(包括通风机路上风门、风帘、风墙等的设施和设在不同矿井子系统环节上各种监测点, 如瓦斯、风速、温度、矿压、监测、防水监测点等) 较为复杂, 测点布点的方式、密度、数目(主要有风门设置数、风速监测点数、瓦斯监测点数、温度监测点数、矿压监测点数、人员定位点数、水压监测点数、煤尘浓度测点数等) 等对监测的质量、安全可靠性等影响较大.

设 $T_i (T_1, T_2, \dots, T_n)$ 为矿井安全子系统的各个环节, $S_j (S_1, S_2, \dots, S_{m_c})$ 为各种安全监测子系统, B_{ij} 为测点, 则有

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= [(T_i, S_j)]_{n \times m_c} = [B_{ij}]_{n \times m_c}, \\ i &= 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m_c \end{aligned}$$

即

$$\mathcal{E} = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & \cdots & S_{m_c} \\ \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{matrix} & \left| \begin{matrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1m_c} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2m_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nm_c} \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

式中 m_c 为安全系统的子系统数, n 为矿井安全系统的最长环节数; 若 j 子系统在该环节 i 处不设测点, 该元素 $B_{ij} = 0$.

测点复合度 C_{ij} i 环节上 j 子系统测点的个

数 B_{ij} 与该安全监测 j 子系统的测点总数 B_j 之比定义为测点复合度, 是描述该系统测点的信息量对系统总体测点信息量贡献的指标, 它是评价系统

结构复杂程度的重要指标之一. 有 $B_j = \sum_{i=1}^n B_{ij}$ 测点复合度为

$$C_{hi} = \frac{B_{ij}}{B_j}, i = 1, \dots, n \quad (18)$$

则 j 安全子系统复杂性信息总量为

$$H_{ch} = - \sum_{i=1}^n C_{ij} \log C_{ij} = - \sum_{i=1}^n \frac{B_{ij}}{B_j} \log \frac{B_{ij}}{B_j} \quad (19)$$

2 多维空间复杂性信息评价模型

依据上述过程求得信息量的熵值, 因为这是不同维次的评价问题, 需建立多维信息熵尺度空间评价模型来度量统一信息量值, 构建熵信息空间场来进行评价系统的复杂性信息综合值.

2.1 基于复杂性格空间的复杂性评价模型

2.1.1 复杂性格空间的尺度定义

定义熵函数对于域属性 i 的尺度, 以获得复杂性域格空间 w_i , 设其维度是 n_i , 且 $n_i \leq n_i$. w_i 中的元素定义为复杂性基格空间 $w_{ij} = (x_{ij}^1, x_{ij}^2, \dots, x_{ij}^{n_{ij}})$. 这里 w_{ij} 描述评价系统 B_i 的基本单元 j 遵循信息控制流的顺序运行. 矢量 $w_{ij} \in H^{n_i}$, 这里 H^{n_i} 是 H 上的 n_i 维空间, H 是信息熵值的集合.

由复杂性域格空间 w_i 的基格空间 w_{ij} 定义 $\|w_{ij}\| : w_i \rightarrow H$ 表示基格空间 w_{ij} 的长度或单位 j 的信息内容. 集合 $(w_i, \|w_{ij}\|)$ 为带有内积的复杂性域格空间. 那么, 可以推论出 $\|w_{ij}\|, \|w_{ij} - w_{i(j+1)}\|$ 的形式, 分别称为 w_{ij} 的尺度或 w_{ij} 到 $w_{i(j+1)}$ 的距离. 位置由它的长度和前趋单位中由顺序的位置关系所给出. 则有 $\|w_{ij}\| = [\sum_{k=1}^{n_{ij}} (x_{ij}^k)^2]^{1/2}$ 和 $\|w_{ij} - w_{i(j+1)}\| = [\sum_{k=1}^{m_i} (x_{ij}^k - x_{i(j+1)}^k)^2]^{1/2}$ 其中 $m_i = \max\{n_{ij} | j = 1, 2, \dots, n_i\}$.

基于格空间的尺度, 引用功的原理来建立评价模型, 度量广义信息力的力与能量值, 即

$$w = \|\vec{F}\| \cdot \|\vec{D}\| \cdot \cos \theta \quad (20)$$

可推演出各分信息量的公式为

$$\begin{aligned} \|w_i\|_k &= \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^k \sqrt{\|w_{ij}\|^2 - (x_{ij}^k)^2} \\ &= \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^k \sqrt{\sum_{s=1}^{k-1} (x_{ij}^s)^2 + \sum_{s=k+1}^{n_i} (x_{ij}^s)^2} \\ k &= 1, 2, \dots, n_i \end{aligned} \quad (21)$$

2.1.2 评价基本模型

一般地,由多维矢量空间的欧几里德关系可得

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{\|\vec{F}\|^2 - x_n^2}}{\|\vec{F}\|} \quad (22)$$

对于分量 w_i ,由上述公式得其在特定矢量格空间

中的能量方程式

$$\begin{aligned} w_i &= x_{in} \sqrt{\|\vec{F}\|^2 - x_{in}^2} \\ &= x_{in} \sqrt{x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + \dots + x_{i(n-1)}^2} \end{aligned} \quad (23)$$

那么,全部复杂信息 F 的能量信息为

$$W = \sum_{i=1}^n w_i = \sum_{i=1}^n x_{in} \sqrt{\|\vec{F}\|^2 - x_{in}^2} \quad (24)$$

2.2 统一尺度模型的建立

如图2所示的模型,为得到全部复杂信息力能尺度,需要建立一个统一的尺度空间.这里给出 n 维度量的统一尺度的数学模型.

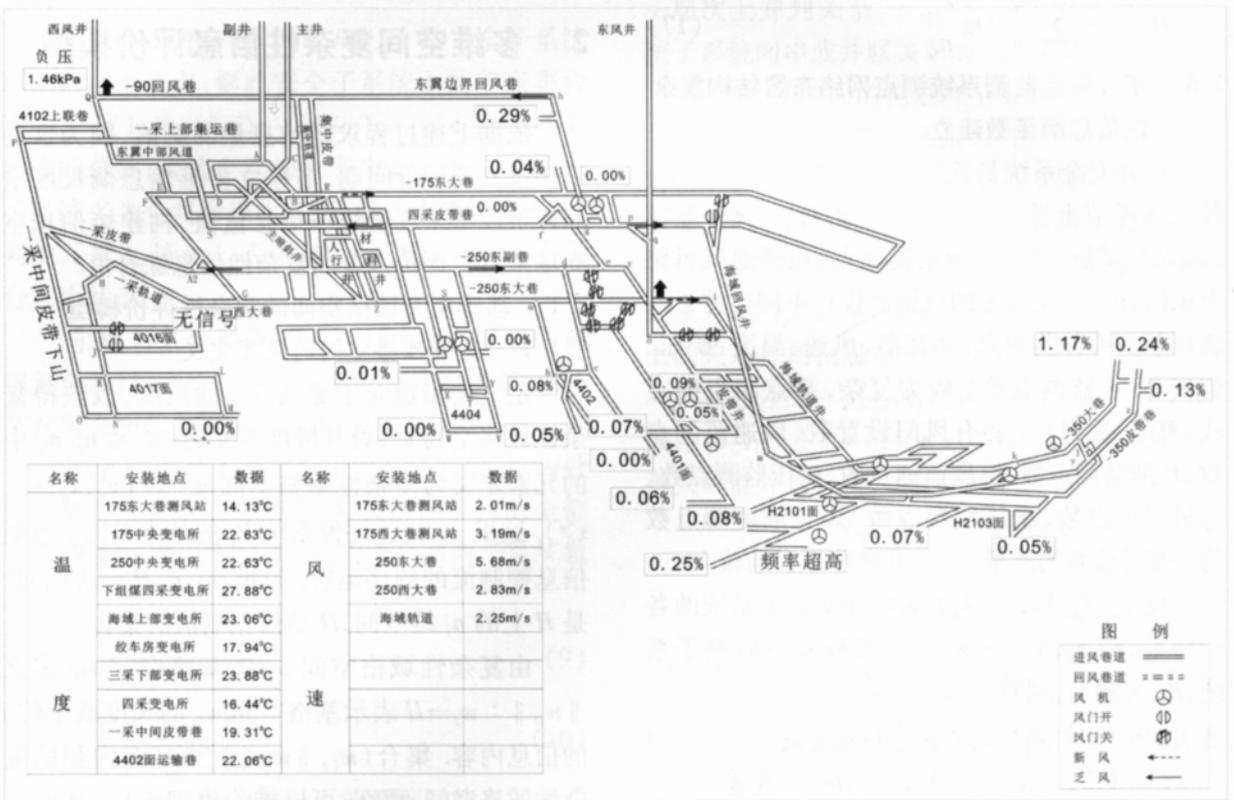


图2 北皂煤矿安全监测系统图

Fig.2 Safety inspecting system of Beizao mine

定义一个 n 维复杂信息力能尺度空间 $W_1 \times W_2 \times W_3 \times \dots \times W_i \times W_n$ 为 n 维熵空间 n 为 W 的第1次划分 W_i 的维度 n_i 为分量 W_i 的维数.若设 Φ 是一个影像,定义 Φ 为 $W_1 \times W_2 \times W_3 \times \dots \times W_i \times W_n \rightarrow H^n$ 是 H^n 上的 n 维张量.

定义此张量为 $Tn(H)$,也是 H 上的一个矢量空间.如果定义一个 $n \times m$ 矩阵 $B_i (m = \max\{m_1, m_2, \dots, m_n\}; i = 1, 2, \dots, m)$,由 $W_1, W_2, \dots, W_3,$

\dots, W_i, \dots, W_n 上的分量 $W_{ki} (b_{ij}^k) (i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, m_i; k = 1, 2, \dots, n)$ 的矢量对应行构成,如果某行的列数小于 m ,可用0元素补齐,那么 $\|\Phi_i\| = \|\Phi_i(W_{ki})\| = \|B_i\|$ 是张量的形式,表示各信息力能分量 W_i 的统一熵复杂信息力能值.

若设集合 $(Tn(H), \|\Phi_i\|)$ 为复杂信息力能 n 维空间,则 H 上的尺度或从 W_i 到 W_{i-1} 的距离定

义为下式

$$\begin{aligned} \|\Phi_i(W_{ki}) - \Phi_i(W_{ki-1})\| &= \|\Phi_i(W_{ki} - W_{ki-1})\| \\ &= \|B_i - B_{i-1}\| \end{aligned} \quad (25)$$

这是在能分量 W_{i-1} 之后分量 W_i 需要产生的全部复杂信息力能信息量, 则

$$\begin{aligned} \|w\|_{iT} &= \sum_{i=1}^n \|\Phi_i\| = \sum_{i=1}^n \|\Phi(W_{ki})\| \\ &= \sum_{i=1}^n \|B_i\| \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \|w\|_E &= \sum_{i=1}^n \|\Phi(W_{ki+1} - W_{ki})\| \\ &= \sum_{i=1}^n \|B_{i+1} - B_i\| \end{aligned} \quad (27)$$

是全部张量的熵值, 为全部需要产生的复杂信息能信息量。

3 实证分析——龙口矿业集团的北皂煤矿安全系统结构复杂性评价

根据上述的分析与建模, 对龙口矿业集团的北皂煤矿安全系统进行结构复杂性评价。

3.1 北皂煤矿概述

龙口矿集团北皂煤矿位于胶东半岛龙口市境内, 依煤层赋存状态, 矿井系统的布置为主副竖井, 分 -175、-250 和 -350 开采水平, 如图 2 所示。在开采水平内布置下山采区, 开采本水平内的工作面。开采巷道布置比较集中, 各水平内同时开采, 矿井巷道系统, 各安全子系统布置, 各系统环节上的瓦斯、风速、温度(防火)、矿压、防水监测系统及其测点较为复杂。

3.2 北皂煤矿安全系统复杂性评价

3.2.1 矿井开拓系统联结关系复杂信息计算

矿井安全系统布置在矿井系统巷道中, 矿井

$$\begin{aligned} w_3 &= x_{3n} \sqrt{x_{31}^2 + x_{32}^2 + \cdots + x_{3n-1}^2} = H_{e8} \sqrt{H_{e1}^2 + H_{e2}^2 + \cdots + H_{e7}^2} \\ &= 1.5692 \sqrt{1.5198^2 + 1.0736^2 + 1.5806^2 + 1.7331^2 + 0.5159^2 + 1.4096^2 + 0.4198^2} \\ &= 5.2698 \end{aligned}$$

开拓系统的巷道布置决定了安全各子系统的基本结构。对北皂矿开拓系统布置, 进行矿井系统结构复杂性评价。结合图 1、图 2, 应用上述各数学模型计算各个复杂参数的信息量值, 得评价参数值如表 1。井筒环节为初始环节, 表中所示节点是本环节的末端点, 依次确定 $v(j)$ 。巷道的平行布置与并联是不同的关系意义, 如同水平运输大巷与轨道大巷, 因不属于同一系统, 功能不同, 并不是并联关系。

3.2.2 安全系统复合关系复杂性信息量计算

依图 2 矿井系统图, 建安全系统的子系统与矿井系统的环节复合关系如表 2 所示。

3.2.3 矿井安全子系统的布点复杂性评价

矿井安全子系统的布点是其结构复杂性评价的重要参量。风门设置数、风速监测点数、瓦斯监测点数、温度监测点数、矿压监测点数、人员定位点数、水压监测点数、煤尘浓度测点数, 按式(18)、(19)有表 3 所示矿井安全子系统的布点复杂信息计算。

3.3 多维度统一复杂性信息量的计算

以上进行了还原性研究, 得到各子系统的复杂性信息量值, 需要进行整体性研究取得统一的该工作面生产系统的总体复杂信息量值。

3.3.1 各复杂性分量的信息量计算

用表 1、2、3 中所得的各 H 值, 分别替换式(23)中的 x_{1i} 、 x_{2i} 各相应值, 求得各复杂性分量 w_i ; 各个还原分量的复杂性信息量为

$$\begin{aligned} w_1 &= x_{1n} \sqrt{x_{11}^2 + x_{12}^2 + \cdots + x_{1n-1}^2} \\ &= H_{1z} \sqrt{H_{1q}^2 + H_{1(e,r)}^2 + H_{1j}^2} \\ &= 0.4515 \sqrt{11.8540^2 + 4.6396^2 + 0.4770^2} \\ &= 5.7515 \\ w_2 &= x_{2n} \sqrt{x_{21}^2 + x_{22}^2 + \cdots + x_{2n-1}^2} \\ &= H_{2z} \sqrt{H_{2q(e,r)}^2 + H_{2h}^2} \\ &= 0.8698 \sqrt{11.5303^2 + 2.4377^2} \\ &= 10.2507 \end{aligned}$$

(c) - 350 水平巷道系统
(c) - 350 level tunnel system

关系 环节(e)	环节关系 r = 1, 2, 3, 4*										节点 v(j)	节点 权重	H _{eq}	I _{eq} / (n-1)	Hi(e,r)	水平 关系 H _{js}	采区 关系 H _{js}
	-250 大巷	海域 轨道井	-350 大巷	运输 平巷	海域 回风井	四采区 皮带巷	东风井	-250 副巷	东翼中 部风道	西风井							
-250 大巷	1	2	1	2	2	2	2	1	3		G,Z,S	3 × 1/3	0.477 1	1/3	0.159 0	0.159 0	0.150 5
海域轨道井	1	1	2	2	2	2	2	2	2		j,k	2 × 1/3	0.318 1	4/9	0.156 5		
-350 大巷	2	1	1	4	4	4	4				k,l	2 × 1/3	0.318 1	5/9	0.141 8		
运输平巷	2	1	1	1	1	2	2	2	2		y,z	2 × 1/2	0.301 0	5/9	0.141 8		
海域回风井		4	1	1	2	2	2	2	2		m,n	2 × 1/3	0.318 1	7/9	0.084 9		
四采区皮带巷	2	4	1	2	2	2	2	2	2		s,f,p	2 × 1/3 + 1/2	0.468 6	5/9	0.141 8		
东风井		2	2	2	2	2	2	1	3		o	1/2	0.150 5	5/9	0.141 8		
-250 副巷	3		2	2	2	2	1	2	2		A2,u,d,e,r	4 × 1/3 + 1/2	0.786 7	5/9	0.141 8		
东翼中部风道			2	2	2	2	2	1	1		t,v	2 × 1/2	0.301 0	1/3	0.159 0		
西风井			2	2	2	2	3	2	1		Q	1/3	0.159 0	4/9	0.156 5		
合计	1/3	4/9	5/9	5/9	7/9	5/9	5/9	5/9	4/9				3.598 2		1.425 1	0.159 0	0.150 5
													11.856 9		4.639 6	0.477 0	0.451 5

注: * 为支护系统评价的相应数据值。

r = {r₁, r₂, r₃} = | 直接连接关系, 串联关系, 并联关系 |, 表示巷道的关系, 表中的数字表示关系的种类, 统计表中的数字是个数, 而不是数字值。

表 2 安全系统复合复杂性信息计算

Table 2 The compound complexity informational calculation for the safety system

子系统 环节	安全子系统										节点 v(j)	节点权重 1/n _m	节点数信息量 h _q = -1/n _m × log(1/n _m)	系统环节复合度 H _h = -A _y /m × log(A _y /m)			
	风门	风速	瓦斯	温度	湿度	矿压	人员	水压	煤尘								
Σ = 175 水平	12	11	12	13	3	12	3	12	3	12							
付井	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	A	1/3	0.159 0		0.093 7		
主井	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	C	1/2	0.150 5		0.093 7		
中央变电所	1			1	1	1	1	1	1	1	A	1/3	0.159 0		0.159 7		
井底煤仓			1	1	1	1	1	1	1	1	B,E,D,F,R	1/3 + 1/4 + 1/3 + 1/3 + 1/2	0.619 1		0.093 7		
-175 大巷	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	C	1/2	0.150 5		0.159 7		
石臼	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	A,B	2 × 1/3	0.318 1		0.093 7		
采区轨道巷	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	H	1/3	0.159 0		0.093 7		
运输平巷	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	K,L	1/3 + 1/2	0.309 6		0.000 0		
4167 工作面	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	L,M	2 × 1/2	0.301 0		0.000 0		
回风平巷	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	N,M	1/3 + 1/2	0.309 6		0.000 0		
采中皮带下山	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	I,O,P	2 × 1/3 + 1/2	0.468 6		0.093 7		

(续)

系统要素	安全子系统						节点 $v(j)$	节点权数 $1/n_m$	节点权数信息量 $h_q = -1/n_m \times \log(1/n_m)$	系统环节复合度 $H_{fh} = -A_{ij}/m \times \log(A_{ij}/m)$
	风门	风速	瓦斯	温度	矿压	人员				
回风巷	1	1	1	1	1	1	1	0.159 0	0.093 7	
西二井	1	1	1	1	1	1	1	0.159 0	0.093 7	
Σ 250 水平	13	13	14	13	6	13	6	3.263 1	0.975 4	
行人斜井	1	1	1	1	1	1	1	0.318 1	0.093 7	
-250 大巷	1	1	1	1	1	1	1	0.477 1	0.093 7	
下田	1	1	1	1	1	1	1	0.309 6	0.093 7	
煤仓			1					0.309 6	0.150 5	
运输平巷	1	1	1	1	1	1	1	0.318 1	0.000 0	
4402 工作面	1	1	1	1	1	1	1	0.301 0	0.000 0	
回风下山	1	1	1	1	1	1	1	0.468 6	0.000 0	
下田	1	1	1	1	1	1	1	0.309 6	0.093 7	
运输平巷	1	1	1	1	1	1	1	0.318 1	0.000 0	
4402 工作面	1	1	1	1	1	1	1	0.301 0	0.000 0	
回风下山	1	1	1	1	1	1	1	0.468 6	0.000 0	
-250 副巷	1	1	1	1	1	1	1	0.786 7	0.093 7	
东翼中部风道	1	1	1	1	1	1	1	0.301 0	0.093 7	
西二井	1	1	1	1	1	1	1	0.159 0	0.093 7	
Σ 250 水平	9	9	9	9	2	9	2	5.146 1	0.806 4	
海城轨道井	1	1	1	1	1	1	1	0.318 1	0.093 7	
-250 大巷	1	1	1	1	1	1	1	0.318 1	0.093 7	
运输平巷	1	1	1	1	1	1	1	0.301 0	0.000 0	
海城回风井	1	1	1	1	1	1	1	0.318 1	0.000 0	
四采区皮带巷	1	1	1	1	1	1	1	0.468 6	0.093 7	
东二井	1	1	1	1	1	1	1	0.150 5	0.093 7	
-250 副巷	1	1	1	1	1	1	1	0.786 7	0.093 7	
东翼中部风道 1	1	1	1	1	1	1	1	0.301 0	0.093 7	
西二井	1	1	1	1	1	1	1	0.159 0	0.093 7	
合计 228	34	33	35	35	11	34	11	3.121 1	0.655 9	
0.121 5	0.124 9	0.124 9	0.063 5	0.123 2	0.063 5	0.124 9	0.124 9			
系统复合度 $H_{fs} = 0.869 8$								11.530 3	2.437 7	

本矿井系统中子系统是沿矿井系统布置,总体变化不大,视为相同处理,取表 1 中的节点与对应权重值评价其复杂信息含量。

表 3 矿井安全子系统的布点复杂性信息计算

Table 3 Complexity information calculation of suspecting point distribution of mine safety system

安全子系统 环节	子系统点数										子系统点数信息量							
	风门	风速	瓦斯	温度	矿压	人员	水压	煤尘	H_{e1}	H_{e2}	H_{e3}	H_{e4}	H_{e5}	H_{e6}	H_{e7}	H_{e8}		
120	1	1	2	2	2	1	1	2	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.053 7		
主井	1	1	2	2	2	1	1	2	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.053 7		
-375 水平	14	8	14	17	6	11	6	14	0.410 0	0.260 3	0.459 5	0.484 9	0.161 1	0.346 5	0.161 1	0.410 0		
-375 大巷	2	1	3	2	2	2	2	2	0.053 7	0.032 5	0.070 6	0.053 7	0.000 0	0.053 7	0.000 0	0.053 7		
井底煤仓	1	1	1	1	1	1	1	2	0.000 0	0.000 0	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0		
硐门	1	1	1	1	1	1	1	2	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.053 7		
一区轨道巷	1	1	1	1	2	1	2	2	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
运输平巷	1	1	2	1	2	1	2	2	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7		
407 工作面	1	1	2	2	2	1	2	2	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7		
回风平巷	1	1	1	1	2	1	2	1	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
一区中间皮带下山	1	1	1	1	1	1	1	1	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
回风巷	2	1	1	2	2	1	1	1	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
西风井	2	1	1	2	2	1	1	1	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
-550 水平	23	14	24	29	10	23	9	26	0.646 0	0.455 5	0.678 6	0.784 4	0.268 5	0.641 7	0.193 7	0.720 9		
行人斜井	2	1	1	2	1	1	1	1	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
变电所	2	1	1	1	1	1	1	1	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
-350 大巷	2	1	2	2	2	2	2	2	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.053 7	0.000 0	0.053 7		
下山	2	1	1	2	2	1	1	1	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.053 7		
煤仓	1	1	2	2	2	2	2	2	0.000 0	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.053 7		
运输平巷	2	1	2	2	2	1	2	2	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7		
404 工作面	1	1	2	2	2	1	2	2	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7		
回风下山	1	1	1	1	2	1	1	1	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
下山	1	1	2	2	2	2	2	2	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.053 7		
运输平巷	2	1	2	2	2	2	2	2	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.053 7		
402 工作面	1	1	2	2	2	2	1	2	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.053 7		
回风下山	2	1	2	2	2	2	2	2	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.053 7	0.000 0	0.053 7		
-550 副巷	1	1	1	2	2	2	2	2	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.053 7	0.000 0	0.053 7		
东翼中部风道	2	1	1	2	3	3	2	2	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.000 0	0.070 6	0.000 0	0.053 7		
西风井	2	1	2	2	2	2	2	2	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.053 7	0.000 0	0.053 7		
-550 水平	14	9	11	12	3	12	2	12	0.398 7	0.292 8	0.335 1	0.356 3	0.086 2	0.356 3	0.065 1	0.352 0		
海城轨道井	1	1	2	2	2	2	2	1	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.000 0	0.053 7	0.000 0	0.032 5		
-350 大巷	1	1	1	1	1	1	1	1	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
运输平巷	2	1	2	2	2	2	1	2	0.053 7	0.032 5	0.053 7	0.053 7	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.053 7		
海城回风井	2	1	2	2	1	1	1	1	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5		
四采区皮带巷	2	1	1	1	1	2	3	3	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.053 7	0.000 0	0.070 6		
东翼井	2	1	1	1	1	1	1	1	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
-550 副巷	2	1	1	1	1	1	1	1	0.053 7	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
东翼中部风道	1	1	1	1	1	1	1	1	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
西风井	1	1	1	1	1	1	1	1	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.032 5	0.000 0	0.032 5	0.000 0	0.032 5		
合计	53	33	53	62	19	50	17	56	1.519 8	1.073 6	1.580 6	1.733 1	0.515 9	1.409 6	0.419 8	1.569 2		

$w_1、w_2、w_3$ 即为矿井开拓系统联结关系、矿井安全子系统复合性、矿井安全监测系统网络等 3 个方面的复杂性分量的复杂信息量。

3.3.2 系统整体统一复杂信息量的计算

$$\|w\|_{1T} = \sum_{i=1}^n \|\Phi_1\| = \sum_{i=1}^3 \|\Phi(W_{k1})\| = \|B_1\| = \sqrt{11.8540^2 + 4.6396^2 + 0.4770^2 + 0.4515^2} = 12.7466$$

$$\|w\|_{2T} = \sum_{i=1}^n \|\Phi_2\| = \sum_{i=1}^3 \|\Phi(W_{k2})\| = \|B_2\| = \sqrt{11.5303^2 + 2.4377^2 + 0.8696^2} = 11.8172$$

$$\|w\|_{3T} = \sum_{i=1}^n \|\Phi_3\| = \sum_{i=1}^4 \|\Phi(W_{k3})\| = \|B_3\| = \sqrt{1.5198^2 + 1.0736^2 + 1.5806^2 + 1.7331^2 + 0.5159^2 + 1.4096^2 + 0.4198^2 + 1.5692^2} = 3.3755$$

由式(20)得

$$\|w\|_E = \sum_{i=1}^n \|\Phi(W_{ki+1} - W_{ki})\| = \sum_{i=1}^n \|B_{i+1} - B_i\| = \|B_2 - B_1\| + \|B_3 - B_2\| = \|11.8172 - 12.7466\| + \|3.3755 - 11.8172\| = 9.3709$$

这就是矿井安全系统结构的整体统一复杂性信息量。

4 结束语

对复杂信息量的计算结果进行分析得知, $w_1、w_2、w_3$ 为矿井开拓系统联结关系、矿井安全子系统复合性、矿井安全监测系统网络等 3 个方面的复杂性分量的复杂信息量,依据它们可评价局部系统复杂性信息量, $\|w\|_E$ 则为统一的系统结构复杂性总值,两者结合起来,可作为从系统的局部到系统的整体综合评价协同复杂性信息含量值的评价标准,其值越大,表示系统结构越复杂。

由本文的分析和论证表明, w_2 大于 w_1 和 w_3 , 对复杂性贡献大些。因矿井安全子系统复合性包括环节、子系统数、复合关系复杂,因而复杂性大。降低该系统的复杂性应从安全系统复合复杂性,即系统的个数、节点、环节、节点的权树复杂的关系等几方面

由式(25)、(26)和(27)得到多维度统一复杂性信息量值,因而得到系统的总结构复杂性信息量,此问题的多维整体统一的复杂性信息量值计算过程和结果如下

入手。

通过获取安全系统结构方面的知识信息,改进系统,优化系统的结构,以减少结构复杂性。安全生产系统结构复杂性评价研究作为复杂性评价的新内容,尚无成形的理论。这里给出的矿井安全系统结构基本形式和复杂性评价方法、评价模型,是一个新的复杂性评价模型、理论与方法,从离散性(节点与权数、测点度量)、交叉性、复合性到相互关系复杂性等系统结构复杂性评价的基本要素进行了度量,并在维度和广度上有所拓展。可依据此理论与方法对具体不同的系统进行结构复杂性评价,如评价企业生产车间、现代化工厂的生产线等结构与工艺系统的复杂性;同时结合矿井布置对安全系统结构复杂性进行分级,提供安全决策与策略,为减少复杂性、实行简约化设计与管理提供理论依据,提高矿井安全管理系统安全与可靠性,推动安全理论与方法研究。

参 考 文 献:

[1] Warfield J N. Social Systems: Planning, Policy and Complexity [M]. New York: Wiley Inter-science, 1976.

[2] 杨建梅, 万江平. 复杂性涵义、通用设计科学及复杂性工作程序初探 [J]. 系统辩证学报, 2002, (4): 41 - 44.
Yang Jianmei, Wan Jiangping. On the meanings of complexity, generic design science and work program of complexity [J]. Journal of Systemic Dialectics 2002, (4): 41 - 44. (in Chinese)

[3] Martinelli D P. Systems, hierarchies and management [J]. Systems Research and Behavioral Science (formerly Systems Research), 2001, 18(1): 69 - 81.

- [4] Sue H. Hospital ergonomics: A qualitative study to explore the organizational and cultural factors [J]. *Ergonomics*, 2003, 46(9): 882 - 903.
- [5] 刘洪. 组织结构变革的复杂适应系统观 [J]. *南开管理评论*, 2004, (3): 51 - 56.
Liu Hong. Changing organizations as complex adaptive system [J]. *Nankai Business Review*, 2004 (3): 51 - 56. (in Chinese)
- [6] 刘洪, 周玲. 成长性企业的复杂适应性分析 [J]. *中国软科学*, 2007, (12): 130 - 140.
Liu Hong, Zhou Ling. Complex adaptive organization behaviors of growing companies [J]. *China Soft Science Magazine*, 2007, (12): 130 - 140. (in Chinese)
- [7] 刘洪. 组织复杂性: 动因、控制与利用 [J]. *经济管理*, 2007, (1): 32 - 35.
Liu Hong. Causality, control and using of organization complexity [J]. *Economic Management Journal*, 2007 (1): 32 - 35. (in Chinese)
- [8] 宋华岭, 杨景才, 刘丽娟等. 回采工作面生产系统运行失序复杂性评价 [J]. *煤炭学报*, 2003, 28(5): 459 - 464.
Song Hualing, Yang Jingcai, Liu Lijuan, et al. The operating disorder complexity assessment of production systems of working face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(5): 459 - 464. (in Chinese)
- [9] 宋华岭, 金智新, 白希军等. 矿井系统结构复杂性评价 [J]. *煤炭学报*, 2005, 30(3): 403 - 408.
Song Hualing, Jin Zhixin, Bai Xijun, et al. The complexity assessment of mine production systems [J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(3): 403 - 408. (in Chinese)
- [10] Song Hualing. Management Complexity Evaluating System Based on Entropy Information Content [M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2005.
- [11] 宋华岭, 金智新, 李金克等. 企业管理系统复杂性评价的三维尺度模型建模与实证研究 [J]. *管理工程学报*, 2006, 20(1): 103 - 108.
Song Hualing, Jin Zhixin, Li Jinke, et al. The three dimension metric model of management complexity for enterprise [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2006, 20(1): 103 - 108. (in Chinese)
- [12] 宋华岭, 李金克, 于红等. 薄煤层煤矿生产车间特殊开采生产技术的复杂性评价 [J]. *中国管理科学*, 2007, 15(1): 80 - 87.
Song Hualing, Li Jinke, Yu Hong, et al. Complexity assessment of mining technology for thin coal seam and particularly working face [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2007, 15(1): 80 - 87. (in Chinese)
- [13] 宋华岭, 刘全顺, 刘丽娟等. 管理熵理论—企业组织管理系统复杂性评价的新尺度 [J]. *管理科学学报*, 2003, 6(3): 19 - 27.
Song Hualing, Liu Quanshun, Liu Lijuan, et al. The management entropy theories: The new metric of management systems complexity assessment for enterprise organizations [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(3): 19 - 27. (in Chinese)
- [14] 宋华岭, 刘丽娟, 李金克等. 企业车间系统结构与工艺复杂性多维度评价 [J]. *管理科学学报*, 2007, 10(1): 54 - 63.
Song Hualing, Liu Lijuan, Li Jinke, et al. Multi-dimension metric assessments of structural and technological complexity for enterprise working shop systems [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2007, 10(1): 54 - 63. (in Chinese)
- [15] 宋华岭, 温国锋, 李金克等. 基于信息度量的企业组织系统协同性评价 [J]. *管理科学学报*, 2009, 12(3): 22 - 36.
Song Hualing, Wen Guofeng, Li Jinke, et al. Based on information measurement, assessing the synergy for a enterprise organizational system [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2009, 12(3): 22 - 36. (in Chinese)
- [16] Song Hualing, Yu Hong, Li Jinke, et al. On organizational structural complexity assessment—case of study: Mining enterprise [J]. *Journal of Social Complexity*, 2008, 3(2): 19 - 25.
- [17] 许正权, 宋学锋, 徐金标. 事故成因理论的4次跨越及其意义 [J]. *矿业安全与环保*, 2008, 35(1): 79 - 82.
Xu Zhengquan, Song Xuefeng, Xu Jinbiao. Four-times development of accident causation theory and its implication [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2008, 35(1): 79 - 82. (in Chinese)
- [18] 李新春, 宋学锋. 煤矿本质安全管理体系研究 [J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2008, 10(2): 65 - 69.
Li Xinchun, Song Xuefeng. Study of essence safety management system for coal mines [J]. *Journal of China University of Mining and Technology(Social Science)*, 2008, 10(2): 65 - 69. (in Chinese)
- [19] 许正权, 宋学锋, 吴志刚. 本质安全管理理论基础: 本质安全的诠释 [J]. *煤矿安全*, 2007, (09): 75 - 78.
Xu Zhengquan, Song Xuefeng, Wu Zhigang. Theoretical foundation of intrinsic safety management: Paraphrasing of intrinsic safety [J]. *Safety in Coal Mines*, 2007, (09): 75 - 78. (in Chinese)
- [20] 宁德春, 王建平. 基于复杂性认识的安全木桶模型探讨 [J]. *中国安全科学学报*, 2008, 18(6): 5 - 10.

- Ning Dechun , Wang Jianping. Discussion on safety cask model based on complexity cognition [J]. China Safety Science Journal , 2008 , 18(6) : 5 - 10. (in Chinese)
- [21]蔡天富,张景林. 对安全系统运行机制的探讨——安全度与安全熵[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(3) : 5 - 8. Cai Tianfu , Zhang Jinglin. Discussion on operational mechanism of safety system——Degree of safety and entropy of safety [J]. China Safety Science Journal , 2006 , 16(3) : 5 - 8. (in Chinese)
- [22]傅 贵,李宣东,李 军. 事故的共性原因及其行为科学预防策略[J]. 安全与环境学报, 2005 , 5(1) : 80 - 83. Fu Gui , Li Xuandong , Li Jun. Common factors leading to accidents and behavior type research based on prevention [J]. Journal of Safety and Enviroment , 2005 , 5(1) : 80 - 83. (in Chinese)
- [23]史明霞,樊文聪. 遗传算法在矿井安全管理评价中的应用[J]. 科技信息, 2008 , (29) : 658 - 661. Shi Mingxia , Fan Wencong. Application of genetic algorithm in evaluation of safety management [J]. Science Information , 2008 , (29) : 658 - 661. (in Chinese)
- [24]王三明,蒋军成,姜 慧. 基于人工神经网络理论的系统安全评价[J]. 工业安全与防尘, 2001 , (2) : 27 - 29. (in Chinese) Wang Sanming , Jiang Juncheng , Jiang Hui. Safety assessment of system based on artificial neural network [J]. Industrial Safety and Dust Control , 2001 , (2) : 27 - 29. (in Chinese)
- [25]邵艳梅. 矿井安全生产仿真系统的研究[J]. 工矿自动化, 2008 , (5) : 19 - 21. Shao Yanmei. Research of simulation system for mine safety production [J]. Industry and Mine Automation , 2008 , (5) : 19 - 21. (in Chinese)
- [26]纪 学. 网络技术在煤矿安全监测系统中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2008 , (8) : 22. Ji Xue. Application of network technology in coal mine safety monitoring system [J]. New Technologies & New Products of China , 2008 , (8) : 22. (in Chinese)
- [27]郭达志,方 涛,杜培军等. 论复杂系统研究的等级结构与尺度推绎[J]. 中国矿业大学学报, 2003 , 32(3) : 213 - 217. Guo Dazhi , Fang Tao , Du Peijun , et al. Hierarchical structure and scaling for complex system [J]. Journal of China University of Mining and Technology , 2003 , 32(3) : 213 - 217. (in Chinese)
- [28]王 彬. 熵与信息[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994. Wang Bin. Entropy and Information [M]. Xi' an: Northwestern Polytechnical University Press , 1994. (in Chinese)
- [29]Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technology Journal , 1948 , (27) : 379 - 423.
- [30]李伟钢. 系统结构有序度—负熵算法[J]. 系统工程理论与实践, 1988 , 8(4) : 17 - 24. Li Weigang. Negative entropy algorithm of system' s order degree [J]. System Engineering: Theories & Practice , 1988 , 8 (4) : 17 - 24. (in Chinese)

Structure complexity assessment for safety system based on complex information metric

SONG Hua-ling , WEN Guo-feng , LIU Li-juan , LI Jin-ke , ZHANG Yi , WANG Chuan-peng , LI Chun-lei

School of Management Science and Engineering , Shandong Institute of Business and Technology , Yantai 264005 , China

Abstract: Further enlarging the complicity and safety theory and methodology study , this article , employing the check space and the cubic frame used to describe complexity parameters , determines the information entropy as the metric to measure the dimensions for the complexity check space , and constructs a all-round measure system for complexity measurement. Applying these theories and methods , according to structural complexity factors , such as the link relations , nodes , links of mining tunnels , and system compound , supervisory network , safety equipment , worker positioning system , and their measure points distribution , the paper assesses the complexity of safety systems and verifies the results with a case study.

Key words: complexity check space; entropy metric; structure complexity; mining system; mining safety system