# 网络通信系统的信息脆性结构的研究

薛 萍[1,2] 武俊峰[1,2] 刘 洋[2]

(哈尔滨理工大学电气工程博士后流动站 哈尔滨 150080)[1](哈尔滨理工大学自动化学院 哈尔滨 150080)[2]

**摘 要** 从研究系统脆性的角度出发,把系统的环境中所有作用于系统上的并有可能激发系统的脆性,造成系统突然崩溃的因素和事件称之为系统的脆性环境。基于系统的脆性环境建立了网络通信系统脆性结构模型,结合信息脆性熵对网络通信系统进行信息脆性风险过程分析。分析结果表明此方法是可行的;论证了系统信息脆性结构分析方法的有效性和稳定性,最后将这套分析方法应用到一个具体网络通信系统,对其主脆性因子建立了分析模型,并取得了比较满意的结果。

**关键词** 网络通信系统,信息脆性风险,脆性环境,信息剩余度,极限熵

**中图法分类号** N941.4 **文献标识码** A

## Research on Information Brittleness Structure in Network Communication System

XUE Ping[1,2] WU Jun-feng[1,2] LIU Yang[2]

(China Postdoctoral Research Station of Electric Engineering, Harbin Science and Technology University, Harbin 150080, China)[1]

(Automation College, Harbin Science and Technology University, Harbin 150080, China)[2]

**Abstract** From system brittleness research point of view, this paper defined all the factors and incidents in a system, which can influence the system and arouse the system brittleness, as brittleness environment. These factors and incidents can cause sudden collapse of the system. Based on the brittleness of the system environment, the paper established the network communication system brittleness structure model. Combined with brittleness entropy, process of information brittleness risk in a network information system was analyzed. The result of the analysis shows the practicable of the method. The effectiveness and stability of the system information brittleness structure analysis method were proved in the paper. In the end, through building analysis model of main brittleness factor, the paper applied the analysis method to a specific network information system, and obtained satisfactory results.

**Keywords** Network communication system, Information brittleness risk, Brittleness environment, Information surplus degree, Limit entropy

在互联网络环境下的现代通信网络系统是一个复杂的巨系统。近年来,随着通信系统规模的不断扩大,系统环境的不确定性的增加,网络通信系统的脆性问题越来越引起相关专家学者的关注[1]。以系统作为研究对象,贝塔朗菲认为,系统是具有某种相互作用的若干要素的复合体。系统的各要素之间存在复杂的耦合关系[2],从而使系统在整体上具有涌现性。对于网络通信系统来说,潜在的危险是普遍存在的。信息系统组件本身固有的脆弱性和缺陷都是系统不安全的直接来源,同时在信息系统运行过程中,威胁与攻击也是普遍存在的,内部的操作不当、管理不严造成系统安全管理失控以及来自外部的威胁和犯罪等等都是导致攻击和威胁的原因[3]。

从研究系统脆性的角度出发,把系统的环境中所有作用于系统上的并有可能激发系统的脆性,造成系统突然崩溃的因素和事件称之为系统的脆性环境[4]。同样地,按照系统与脆性环境之间的关系,可以把系统分为开放的脆性系统和封闭的脆性系统。在开放的脆性系统中,系统和脆性环境存在较多的物质、能量、信息等的交流,因而这类系统的脆性环境对系统的不确定影响较大,系统的脆性因子较多,脆性风险也相应较大;在封闭的脆性系统中,系统与脆性环境中存在较少的交流关系,脆性环境对系统的影响较小,系统的脆性因子较少,脆性风险也相应较低[5]。这并不是说系统对环境开放越低越好,因为系统的发展进化需要从外部环境中引入物质、信息和能量。本文针对网络通信系统的脆性环境,建立了网络通信系统的脆性结构行为分析模型,期望从定性和定量相结合的角度研究网络通信系统的脆性风险,为系统运行人员分析决策提供依据和支持。

## 1 网络通信系统的脆性结构模型

系统的脆性被激发,即系统崩溃一定存在内部或外部的某种诱因,称这种诱因为系统的脆性因素。脆性事件是由一

到稿日期:2010-03-22 返修日期:2010-06-20 本文受黑龙江省自然资金项目(F2007-10),黑龙江省博士后研究基金项目(LBH-Z08103),黑龙江省教育厅项目(11551105)资助。

薛 萍(1969—),女,博士,教授,主要研究方向为复杂系统的脆性、系统工程、信息控制,E-mail:xueping@hrbust.edu.cn;武俊峰(1959—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为鲁棒控制、智能控制、最优控制;刘 洋(1984—),男,硕士生,主要研究方向为复杂系统脆性。

个或多个脆性因素构成的，在某一时刻作用于系统上导致系统可能发生崩溃的事件，在某一时刻全部脆性事件构成该时刻系统的脆性事件空间，即系统的脆性环境。脆性事件作用在系统上，将导致脆性结果，即系统以一定的概率发生崩溃。系统脆性结构模型是建立在以可变性和不确定性作为主要特性的基础上的。根据网络通信系统的风险点或区域，确定网络通信系统的脆性结构模型见图 1。

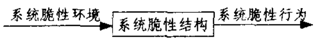


图 1　系统脆性的输入输出结构

系统脆性结构行为分析实际上就是分析系统的脆性环境。具体包括两个方面：一是系统的脆性事件；二是系统的脆性因子。脆性事件直接构成了系统的脆性环境，具有重复性、多变性、难以预测性等特性[6]；脆性因子包含在具体脆性事件中，它相对于脆性事件具有隐藏性、稳定性、可预测性等。本文主要从脆性因子来分析系统的脆性环境。

从系统的脆性结构分析中可以看出，脆性环境是由系统的脆性事件集和脆性因子共同构成的。系统的脆性事件是某一时间段内外部环境中所有可能导致系统崩溃的事件集。假设在样本空间上系统 $G$ 有 $n$ 个脆性事件 $I=\{I_1,I_2,\cdots,I_n\}$，脆性事件 $I_i$ 发生的概率为 $P_i$，$P_i\geqslant 0$，在脆性事件 $I_i$ 作用下系统崩溃的概率为 $p_i$，$0\leqslant p_i\leqslant 1$。系统在脆性事件 $I_i$ 作用下崩溃的期望为 $E[RI_i]=P_ip_i$，$(i=1,2,\cdots,n)$，则系统的脆性风险为

$$E[\sum RI_i]=E[RI_1]+\cdots+E[RI_n] \tag{1}$$

线性叠加的成立由各个脆性事件的无关性来保证。但在实践中，脆性事件总是存在各种各样的联系，而且其作用形式千变万化，因而要对具体脆性事件进行分析和预测几乎是不可能的。而且脆性事件间的耦合关系常常复杂多变，难以定量地进行定量解耦分析处理[7]。所以在实践中，一般可以先对系统脆性事件进行分析，把其中的基本脆性因子辨识出来，根据不同因子的危害性，得出影响网络通信系统崩溃的作用程度，结合信息脆性熵，得到网络通信系统脆性风险分析结果。

## 2　网络通信系统的信息脆性熵函数

网络通信系统的脆性风险由脆性因素、脆性事件和脆性结果三要素组成，指在一定的时间内相应的脆性因素为必要条件、以相应的脆性事件为充分条件、相关脆性域承受相应的脆性结果(系统崩溃)的可能性。通信系统的脆性风险具有不确定性、普遍性、客观性、可变性等特征，其中不确定性和可变性是脆性风险的主要属性[8]。

脆性风险表示了系统脆性被激发而突然崩溃的风险，它是由外部环境的风险事件的不确定性引起的。因此，认为系统的脆性风险的根本来源是系统的脆性事件的不确定性。根据 Shannon 的理论[9]，假设在样本空间上系统 $G$ 有 $n$ 个脆性事件 $I=\{I_1,I_2,\cdots,I_n\}$，脆性事件 $I_j$ 发生的概率为 $p_j(j=1,2,\cdots,n)$，存在基本关系 $0\leqslant p_j\leqslant 1,\sum_{i=1}^{n}p_j=1$，则事件 $I_j$ 存在不确定性，其不确定程度由函数

$$G(p_j)=-p_j\log p_j \tag{2}$$

度量。其总体不确定程度由测度函数

$$G(p_1,\cdots,p_n|S_i)=-\sum_{j=1}^{n}p_j\log p_j$$

$$(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n) \tag{3}$$

度量，作为度量脆性事件集 $I=\{I_1,I_2,\cdots,I_n\}$ 的概率分布空间 $p=\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$ 的总体平均的测度函数。从总体意义上来说，脆性事件空间的每一个脆性事件都有一定的概率风险。因为熵 $G(p_1,\cdots,p_n|S_i)$ 的度量值由脆性事件集的概率分布空间 $p=\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$ 的总体结构唯一决定，所以把熵 $G(p_1,\cdots,p_n|S_i)$ 度量的平均风险称为子系统 $S_i(i=1,2,\cdots,m)$ 的平均概率风险。

在以上的分析中，把系统 $t$ 时刻的脆性事件等同地看作通信中的信息源，但在实际情况中，对系统脆性风险的把握除了与脆性事件的分布信息有关外，还与脆性事件的结果分布有关。例如，对于子系统 $S_i$ 条件下两个具有同样分布的脆性事件，可能对子系统 $S_i$ 产生的脆性影响会有所不同。这表明，虽然系统的脆性风险来源于脆性事件的不确定性，但又不完全取决于脆性事件的分布，它还和脆性事件所带来的结果价值有关。

把脆性事件空间中脆性事件的风险函数在效用系数空间的平均值定义为系统的信息脆性熵：

$$H(S)=H(P,p)=-\sum_{j=1}^{n}q_j\log p_j=-\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{P_jp_j}{\sum P_jp_j}\right)\log p_j$$

$$j=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

式(4)构造的信息脆性熵 $H(q_1,q_2,\cdots,q_n;p_1,p_2,\cdots,p_n)$ 是一个统计平均值，是由脆性事件集的概率样本空间 $\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$ 和相应的系数崩溃的概率空间 $\{q_1,q_2,\cdots,q_n\}$ 共同构造的，是系统脆性的概率风险的总体测度函数，表示系统某一时刻系统崩溃的概率风险，既体现了脆性事件的不确定性，又反映了事件的危害结果的影响。

信息脆性熵作为通信系统脆性风险的总测度函数，是研究网络通信系统脆性风险的重要工具。通过分析，知道它具有如下一些基本数学特征：

(1) 非负性：$H(S)=H(q_1,\cdots,q_n;p_1,\cdots,p_n)\geqslant 0$ 信息脆性熵的非负性表明，只要环境的脆性因子存在作用，系统就有一定的脆性风险。

(2) 确定性：当系统的脆性事件空间为确定事件空间时，系统的脆性熵为零，即系统的脆性风险具有确定性。

(3) 均值最大性：在任意一组给定的系统崩溃系数 $q=\{q_1,q_2,\cdots,q_n\}$ 条件下，系统信息脆性熵将在脆性事件空间最均匀分布，即 $p=\left\{p_1=p_2=\cdots p_n=\frac{1}{n}\right\}$ 时达到最大值 $H_{\max}$。

(4) 稳定性：可以证明对于脆性事件发生的概率小扰动，系统的脆性熵是有条件稳定的。

## 3　脆性熵原理在网络系统脆性结构分析中的应用

1957 年，Jaynes 在统计力学中提出最大熵原理[10]，即“最少为偏见的概率分布是这样一种分布，它使熵在已知信息的附加约束条件下达到最大化”。可以表述为在所有满足给定的约束条件的许多概率密度函数中，使信息熵最大的概率密度函数就是最佳(即偏差最小)的概率密度函数。这种分布最随机、最少主观成分，反映系统满足约束条件下，趋向达到最稳定状态，即普里高津根据李雅普诺夫稳定性理论找到的平衡态。

已知离散平稳有记忆信源 $X:\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}$ 在时间域上连续不断地发出符号(脆性因子)，形成时间域延伸到无穷

的随机变量序列

$$X=\cdots X_1X_2\cdots X_mX_{m+1}X_{m=2}\cdots \tag{5}$$

而且,随机变量之间的统计依赖关系同样延伸到无穷。倘若随机变量序列 $X$ 中的任一时刻 $(m+1)$ 的随机变量 $X_{m+1}$ 只依赖于前面已发生的 $m$ 个随机变量 $X_1X_2\cdots X_m$,与更前面的随机变量无关,则称这种信源为 $m$ 阶马尔柯夫(Markov)信源(简写为 $m$ 阶 $M$ 信源)。

对于 $m$ 阶 $M$ 信源来说,因为随机变量序列 $X$ 中每一时刻的随机变量均取自且遍于离散平稳有记忆信源 $X$ 的脆性因子集 $X:\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}$,所以时刻 1 到 $m$ 的随机变量序列 $(X_1X_2\cdots X_m)$ 的某一具体脆性事件:

$$\begin{aligned}&S_i=(a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km})\\&a_{k1},a_{k2},\cdots,a_{km}\in\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}\\&k1,k2,\cdots,km=1,2,\cdots,r\\&i=1,2,\cdots,r^m\end{aligned} \tag{6}$$

可以把 $S_i=(i=1,2,\cdots,r^m)$ 看作为某一脆性状态。同样可把时刻 2 到 $(m+1)$ 的 $m$ 个随机变量 $(X_2X_3\cdots X_{m+1})$ 的某一具体脆性事件:

$$\begin{aligned}&S_j=(a_{k2}a_{k3}\cdots a_{km}a_{km+1})\\&a_{k2},a_{k3},\cdots,a_{km},a_{km+1}\in\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}\\&k2,k3,\cdots,km,km+1=1,2,\cdots,r\\&j=1,2,\cdots,r^m\end{aligned} \tag{7}$$

看作为另一个脆性状态,从脆性状态 $S_i=(a_{k1},a_{k2},\cdots,a_{km})$ 发生脆性因子 $a_{km+1}$ 后,$(a_{k2},a_{k3},\cdots,a_{km},a_{km+1})$ 这 $m$ 个脆性因子便组成脆性状态 $S_j=(a_{k2},a_{k3},\cdots,a_{km},a_{km+1})$ 即从脆性状态 $S_i$ 转移到脆性状态 $S_j$。由于 $X_{m+1}$ 只依赖于它前面 $m$ 个随机变量 $X_1X_2\cdots X_m$,因此脆性状态 $S_j$ 只依赖于脆性状态 $S_i$,而且脆性状态 $S_i$ 是脆性状态 $S_j$ 的前一时刻的脆性状态。这就是说,对于由 $m$ 个脆性因子组成的脆性状态来说,某时刻的脆性状态只与前一时刻的脆性状态有关,与它更前面的脆性状态无关,而且这种脆性状态之间的依赖关系一直延伸到无穷。所以,从数学上来说,$m$ 个脆性因子组成的脆性状态就构成了一个有限平稳的马尔柯夫(Markov)链。

设离散平稳有记忆信源 $X$ 的起始时刻的信源空间为

$$[X\cdot P]:\begin{cases}X: & a_1 \quad a_2 \quad \cdots \quad a_r\\ P(X): & p(a_1)\quad p(a_2)\quad\cdots\quad p(a_r)\end{cases} \tag{8}$$

式中 $0\leqslant p(a_i)\leqslant 1;\sum_{i=1}^{r}p(a_i)=1$。令 $N$ 维离散平稳有记忆信源 $X=X_1X_2\cdots X_N$ 的 $N$ 维联合概率为

$$p(a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km}a_{km+1}a_{km+2}\cdots a_{kN}) \tag{9}$$

从 1 到 $(N-1)$ 维条件概率为

$$\begin{aligned}&p(a_{k2}/a_{k1})\\&p(a_{k3}/a_{k1}a_{k2})\\&\cdots\\&p(a_{km}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km-1})\\&p(a_{km+1}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km})\\&\cdots\\&p(a_{kN}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km}a_{km+1}\cdots a_{kN-1})\end{aligned} \tag{10}$$

且有

$$\begin{aligned}&\sum_{k1=1}^{r}p(a_{k1})=1\\&\sum_{k2=1}^{r}p(a_{k2}/a_{k1})=1\quad(k1=1,2,\cdots,r)\\&\sum p(a_{k3}/a_{k1}a_{k2})=1\quad(k1,k2=1,2,\cdots,r)\\&\cdots\\&\sum p(a_{km+1}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km})=1\quad(k1,k2,\cdots,km=1,2,\cdots,r)\\&\cdots\\&\sum_{kN=1}^{r}p(a_{kn}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km}a_{km+1}\cdots a_{kN-1})=1\\&k1,k2,\cdots,km,km+1,\cdots,kN-1=1,2,\cdots,r)\end{aligned} \tag{11}$$

根据 $m$ 阶 $M$ 信源的定义,并考虑到平稳性,有

$$\begin{aligned}&p(a_{kN}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km}a_{km+1}\cdots a_{kN-1})\\&=p(a_{kN}/a_{kN-m}a_{kN-m+1}\cdots a_{kN-1})\\&=p(a_{km+1}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km})\\&a_{k1},a_{k2},\cdots,a_{km},a_{km+1},\cdots,a_{kN}\in\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}\\&k1,k2,\cdots,km,km+1,\cdots,kN=1,2,\cdots,r\end{aligned} \tag{12}$$

得到 $m$ 阶 $M$ 信源的极限熵为

$$\begin{aligned}H_\infty&=\lim_{n\to\infty}H(X_N/X_1X_2\cdots X_{N-1})\\&=\lim_{N\to\infty}\{-\sum_{k1=1}^{r}\cdots\sum_{kn=1}^{r}p(a_{k1}a_{k2}\cdots a_{kN})\log p(a_{kN}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{kN-1})\}\\&=-\sum_{k1=1}^{r}\cdots\sum_{km=1}^{r}\sum_{km+1=1}^{r}p(a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km+1})\log p(a_{km+1}/a_{k1}a_{k2}\cdots a_{km})\\&=-\sum_{k1=1}^{r}\cdots\sum_{km+1=1}^{r}p(a_{k1}\cdots a_{km})p(a_{km+1}/a_{k1}\cdots a_{km})\log p(a_{km+1}/a_{k1}\cdots a_{km})\end{aligned} \tag{13}$$

由式(6)和式(7)又有

$$H_\infty=-\sum_{i=1}^{r^m}\sum_{j}p(S_i)p(S_j/S_i)\log p(S_j/S_i) \tag{14}$$

式(14)表明,$m$ 阶 $M$ 信源的极限熵取决于 $r^m$ 个状态概率 $p(S_i)(i=1,2,\cdots,r^m)$ 以及 $r^m\cdot r^m$ 状态一步转移概率 $p(S_j/S_i)(i=1,2,\cdots,r^m;j=1,2,\cdots,r^m)$。这就是说,给定(或测定)了 $r^{2m}$ 个状态一步转移概率 $p(a_{km+1}/s_i)(i=1,2,\cdots,r^m;km+1=1,2,\cdots,r)$ 即 $p(S_j/S_i)(i=1,2,\cdots,r^m;j=1,2,\cdots,r^m)$,也就给定了 $m$ 阶 $M$ 信源有依赖地发出由 $m$ 个脆性因子组成的脆性事件(状态)的统计特性。

由于式(13)是当 $N\to\infty$ 时的极限值,因此其中的状态概率 $p(S_i)(i=1,2,\cdots,r^m)$ 应是 $m$ 阶 $M$ 信源到达稳定时出现状态 $S_i(i=1,2,\cdots,r^m)$ 的概率。把这种状态概率称为状态极限概率。$m$ 阶 $M$ 信源在具有各态历经性并满足一定约束条件时才存在状态极限概率,否则不是任何 $m$ 阶 $M$ 信源都存在状态极限概率。

若对于有限平稳的 $m$ 阶 $M$ 信源,由 $X:\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}$ 的 $m$ 个脆性因子组成的脆性事件(状态) $S_i=(a_{i1}a_{i2}\cdots a_{im})(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{im}\in\{a_1,a_2,\cdots,a_r\};i1,i2,\cdots im=1,2,\cdots,r;i=1,2,\cdots,r^m)$ 和 $S_j=(a_{j1}a_{j2}\cdots a_{jm})(a_{j1},a_{j2},\cdots,a_{jm}\in\{a_1,a_2,\cdots,a_r\};j1,j2,\cdots,jm=1,2,\cdots,r;j=1,2,\cdots,r^m)$,存在一个正整数 $n_0\geqslant 1$,且经过 $n_0$ 步,从脆性状态 $S_i$ 转移到脆性状态 $S_j$ 的 $n_0$ 步转移概率 $p_{ij}(n_0)>0$,则称这种 $m$ 阶 $M$ 信源具有各态历经性。

根据各态历经性定理,对于各态历经的 $m$ 阶 $M$ 信源来说,对每个 $j=1,2,\cdots,r^m$ 都存在不依赖于起始脆性状态 $S_i(i=1,2,\cdots,r^m)$ 的状态极限概率:

$$\lim_{n\to\infty}p_{ij}(n)=p(S_j)=p_j\quad(j=1,2,\cdots,r^m)$$

而且,状态极限概率 $p(S_j)=p_j(j=1,2,\cdots,r^m)$ 是在约束条件

$$p(S_j)=p_j>0\quad(j=1,2,\cdots,r^m)$$

$$\sum_{i=1}^{r^m}p(S_j)=\sum_{j=1}^{r^m}p_j=1$$

的约束下，方程组

$$p(S_j)=\sum_{i=1}^{r^m}p(S_i)p_{ij}\text{或}p_j=\sum_{i=1}^{r^m}p_ip_{ij}$$

的唯一解。这种概率分布最随机、最少主观成分，反映系统满足约束条件下，趋向达到系统最稳定状态。这是符合信息脆性熵的稳定性的特点。

## 4 网络通信系统脆性结构行为有效性分析

### 4.1 有效性分析

结合系统脆性风险结构模型，根据信息脆性熵原理，在一个风险域上进一步分析网络通信系统的信息脆性风险的有效性。为此，引入一个信息剩余度 $\xi$，它与极限熵 $H_\infty$、最大熵 $H_0$ 之间满足下列关系：

$$\xi=1-\frac{H_\infty}{H_0}\tag{15}$$

根据脆性风险熵的性质——非负性和均值最大性可知

$$0\leqslant\frac{H_\infty}{H_0}\leqslant1\tag{16}$$

把式(15)代入式(16)中，则有 $0\leqslant\xi\leqslant1$。当 $\xi=0$ 时，网络通信系统的信息极限熵 $H_\infty$ 达到最大值 $H_0$，即系统信息脆性风险熵将在脆性事件空间中最均匀分布，且脆性事件之间没有相互作用；当 $\xi=1$ 时，网络通信系统的信息极限熵 $H_\infty$ 为零。这表明，当系统的脆性事件空间为确定事件空间时，系统脆性风险熵为零，即系统的脆性风险具有确定性，这意味着系统脆性事件之间也没有相互作用。以上两种情况不满足网络通信系统信息脆性的特征，所以信息剩余度 $\xi$ 满足以下关系式：

$$0<\xi<1\tag{17}$$

当 $\frac{d\xi}{dt}>0$ 时，表示极限熵 $H_\infty$ 越大，输入脆性因子间的记忆长度越小，脆性因子间的脆性联系程度越小，从而可以提高信息传输或存储的效率，提高通信的有效性。但是要使网络通信系统脆性风险减小，就意味着信息剩余度的增加，即 $\frac{d\xi}{dt}<0$，表示极限熵 $H_\infty$ 越小，脆性因子之间的记忆长度越大，脆性因子间的脆性联系程度越紧密。

由于网络通信系统极限熵 $H_\infty$、最大熵 $H_0$ 都是该系统脆性因子的状态概率 $p$ 函数，而状态概率 $p$ 又是时间 $t$ 的函数，因此 $H_\infty$ 和 $H_0$ 也都是时间 $t$ 的函数，联立式 $0<\xi<1$ 和式 $\frac{d\xi}{dt}>0$ 得到

$$H_\infty*\frac{dH_0}{dt}>H_0*\frac{dH_\infty}{dt}\tag{18}$$

下面就式(18)几种情况展开讨论：

(1) 根据熵增加原理，$H_\infty$ 和 $H_0$ 都大于零。当 $\frac{dH_0}{dt}>0$ 与 $\frac{dH_\infty}{dt}<0$ 时，式(18)成立。其中 $\frac{dH_0}{dt}>0$ 表示网络通信系统不断增加脆性事件或脆性因子个数，相当于系统从外界环境中获取物质、能量或信息资源而规模不断壮大，系统信息脆性风险也随之增加；当 $\frac{dH_\infty}{dt}<0$ 时，则表示该系统通过相互作用(如从外界吸取负熵)，自发地形成有序结构，即降低了该系统信息脆性结构风险。

(2) 当 $\frac{dH_0}{dt}>0$ 和 $\frac{dH_\infty}{dt}=0$ 时，式(18)也成立。$\frac{dH_\infty}{dt}=0$ 说明 $H_\infty$ 与时间 $t$ 没有关系，即构成网络通信系统的脆性事件始终处于一个状态，脆性因子与脆性因子之间没有相互作用，这不符合网络系统的特征。

(3) 当 $\frac{dH_0}{dt}=0$ 与 $\frac{dH_\infty}{dt}<0$ 时，$\frac{dH_0}{dt}=0$ 说明该系统是孤立的，与网络通信系统的特征相矛盾。

(4) 当 $\frac{dH_0}{dt}>0$ 和 $\frac{dH_\infty}{dt}>0$ 时，此时的网络通信系统变成了一个开放的无序内部结构组织，使该系统处于高脆性风险状态。

### 4.2 稳定性分析

网络通信系统在外界环境对该系统进行不可避免的扰动下偏离稳定状态后是否能自动返回稳定状态，是衡量网络通信系统脆性的一项重要指标。普里戈京等人证明，在一个非线性系统远离平衡态的区域，相对于稳定解的二次偏差总是负的，即

$$\delta^2H<0\tag{19}$$

如果取 $\delta^2H$ 作为 Lyapunov 函数，并根据 Lyapunov 定理得出系统稳定的条件为

$$\frac{d}{dt}(\delta^2H)\geqslant0\tag{20}$$

式(20)中 $H_\infty$ 的取值为网络通信系统的脆性熵时，就可以用它来作为稳定性分析的判别式。如果式(20)成立，则该系统模型是稳定的；否则，该系统模型不稳定。

## 5 实例分析

现在结合实际情况，在已建立的脆性风险模型中，确定离散平稳有记忆信源 $X$ 的脆性因子集为 $X:\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}$，用各态历经的 $m$ 阶 $M$ 信源近似地表示一般的离散平稳有记忆信源，用各态历经的 $m$ 阶 $M$ 信源的极限熵 $H_\infty$ 近似地代表一般离散平稳有记忆信源每发出一个脆性因子提供的平均信息量。由式(13)和式(14)可知，各态历经的 $m$ 阶 $M$ 信源的极限熵

$$\begin{aligned}H_\infty&=-\sum_{k1=1}^{r}\cdots\sum_{km+1=1}^{r}p(a_{k1}\cdots a_{km})p(a_{km+1}/a_{k1}\cdots a_{km})\log p\\&\quad(a_{km+1}/a_{k1}\cdots a_{km})\\&=H(X_{m+1}/X_1X_2\cdots X_m)=H_m\end{aligned}$$

若离散平稳有记忆信源 $X$ 的脆性因子集 $X:\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}$ 在起始时刻的最大熵值 $H_0=\log r$，则其信息剩余度为

$$\xi=\frac{\log r-H_\infty}{\log r}$$

根据已建立的网络通信系统的脆性风险模型，已知在某一个风险域中，影响系统脆性风险的有 12 个脆性因子。把这些脆性因子看作通信系统的信源输入，且把它当作离散平稳有记忆信源，则定义离散平稳有记忆信源 $X$ 的脆性因子集为 $X:\{a_1,a_2,\cdots,a_r\}$。在这个系统脆性风险模型中 $r=12$，其中 $a_1$ 为通信资源的破坏；$a_2$ 为窃取内容通信连接；$a_3$ 为中断内容通信连接；$a_4$ 为窜改的数据信息量；$a_5$ 为删除的数据信息量；$a_6$ 为衔接数量；$a_7$ 为阻塞的带宽；$a_8$ 为拒绝访问信息；$a_9$

(下转第 49 页)

TURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE 3796. 2005:428-441
[4] Anton E R, Duarte O C M B. Group key establishment in wireless ad hoc networks [C]//Proc. Workshop en Qualidade de Servicoe Mobilidade. 2002:1-8
[5] Delerablée C. Identity-Based Broadcast Encryption with Constant Size Ciphertexts and Private Keys [C]//Advances in Cryptology-ASIA CRYPT. Lecture Notes in Computer Science 4833. 2007:200-215
[6] Asokan N, Ginzboorg P. Key-agreement in ad hoc networks [J]. Compute Communication, 2000, 23(17):1627-1637
[7] Ching Y N, Mu Y, Susilo W. An identity-based broadcast encryption scheme for mobile ad hoc networks [J]. Communications and Information Technology, 2006, 1(01):24-29
[8] Boneh D, Franklin M. Identity Based Encryption from the Weil Pairing [C]//CRYPTO, LNCS 2139. 2001:213-229
[9] Zhang L Y, Hu Y P, Mu N B. Identity-based Broadcast Encryption Protocol for Ad Hoc Networks [J]. IEEE Computer Society, 2009:1619-1623
[10] Boneh D, Franklin M. Identity-based encryption form the weil pairing[C]//Advances in Cryptology-CRYPTO 2001, LNCS 2139. Berlin: Springer-Verlag, 2001:213-229
[11] Delerablée C, Paillier P, David P. Fully Collusion Secure Dynamic Broadcast Encryption with Constant-size Ciphertexts or Decryption Keys [C]//Lecture Notes in Computer Science 4575. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007:39-59
[12] Boneh D, Gentry C, Waters B. Collusion resistant broadcast encryption with short ciphertexts and private keys [C]//CRYPTO 2005. Lecture Notes in Computer Science 3621. Heidelberg: Springer, 2005:258-275
[13] Naor D, Naor M, Lotspiech J. Revocation and tracing schemes for stateless receivers[C]//Kilian J, ed. CRYPTO 2001. LNCS, vol. 2139. Heidelberg: Springer, 2001:41-62

(上接第 45 页)
为信道利用率；$a_{10}$ 为硬件缺陷；$a_{11}$ 为软件漏洞；$a_{12}$ 为信息恢复。

在一个具体网络通信系统风险域中，由 12 个脆性因子组成的信源，在崩溃系数相等时，当这 12 个脆性因子相互统计独立、互不相关，而且等概分布时，达到脆性信源的最大熵值。

$H_0=\log 12=3.12$ 比特/脆性因子

但实际上，由脆性因子组成脆性事件时，脆性因子并非等概出现。设脆性因子之间不是统计独立的，相互之间是有一定的统计依赖关系的。把由这些脆性因子构成的脆性事件近似地看作 $m(m=1,2,3,\cdots)$ 阶 $M$ 信源来处理，分别求出 $m(m=1,2,3,\cdots)$ 阶 $M$ 信源的极限熵

$H_1=2.18$ 比特/脆性因子

$H_2=1.98$ 比特/脆性因子

…

$H_\infty=1.08$ 比特/脆性因子

由此可见：$H_0\geqslant H_1\geqslant H_2\cdots\geqslant H_m$。这表明，脆性信源的极限熵随着记忆长度 $m$ 的增大而减小。脆性事件中脆性因子的脆性联系程度越紧密，每一个脆性因子提供的平均信息量就越小。这就是说，由脆性因子组成的时间序列中，脆性因子之间的脆性联系程度越紧密，脆性信源每发出一个脆性因子提供的平均信息量就越小。此脆性信源的信息剩余度为

$\xi=65.4\%$。

这说明，用这 12 个脆性因子组成的系统脆性事件的脆性风险分析时，在满足概率跟随性的特性时，有 65.4%的脆性因子是由于必须遵循系统脆性结构而不得不有的，只有 34.6%的脆性因子是影响系统脆性风险需要加以选择的。由此可知，系统信息剩余度 $\xi$ 越大，脆性因子间的脆性联系程度越紧密，脆性事件就具有较强的抗扰能力。反之，信息剩余度 $\xi$ 越小，脆性因子间的脆性联系程度越小，脆性事件就越容易发生。

如果系统信息剩余度随时间变化不断增加，当干扰要使脆性事件发生时，则可以从系统脆性结构的关联中调整。否则，如果信息剩余度随时间变化不断减小，就可能造成系统脆性事件发生，增加网络通信系统的脆性风险。因此增加或保留必要的、有用的信息剩余度，可以降低网络通信系统的信息脆性风险，实现系统脆性风险的有效控制。

**结束语** 系统脆性模型结构实际上是关于脆性环境结构的，而系统的脆性环境结构主要由脆性事件和脆性因子构成，其中脆性因子又是脆性环境的本质因素。本文在建立的系统脆性结构模型的基础上，应用信息脆性熵给出了系统在整个连续时间域上的信息脆性风险过程，结合极限熵和信息剩余度的概念分析了该方法的可行性。最后将这套分析方法应用到一个具体网络通信系统，对其主脆性因子建立分析模型，分析该系统的脆性状态，并取得了比较满意的结果，从而为下一阶段系统信息脆性风险预测提供了理论依据。

## 参考文献

[1] 韦琦，金鸿章，郭健，等. 基于脆性的复杂系统研究[J]. 系统工程学报，2004，19(3)：326-328
[2] Wei Qi, Jin Hongzhang, Ji Ming. The Research on Brittle Catastrophe of Complex Giant System[C]//IEEE Region 10 Technical Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering(TENCON'02). Beijing, China, October 2002
[3] 张义荣，鲜明，王国玉. 一种基于网络熵的计算机网络攻击效果定量评估方法[J]. 通信学报，2004，25(11)：158-165
[4] 赵冬梅，赵玉清，马建峰. 熵权系数法应用于网络安全的模糊风险评估[J]. 计算机工程，2004，30(18)：21-23
[5] 金鸿章，郭健，韦琦. 基于尖点突变模型对复杂系统脆性问题的研究[J]. 船舶电子工程，2004，24(2)：3-8
[6] 李琦，金鸿章，林德明. 复杂系统的脆性模型及分析方法[J]. 系统工程，2005，23(1)：9-12
[7] 陈为化，江全元，曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报，2005，25(24)：20-25
[8] 周勇，刘三阳，杨曙光. 基于交叉熵的通讯网的优化算法[J]. 系统工程与电子技术，2004，26(10)：1471-1475
[9] 姜丹. 信息论与编码[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2004：89-117
[10] 张连明，陈志刚，邓晓衡. 一种基于信息熵的 Internet 宏观行为模型研究[J]. 计算机工程与应用，2004，19：33-37