

基于云模型和 AHP 的网络信息系统可生存性评估

刘延华^{1,2}, 陈国龙^{1,2}, 吴瑞芬^{1,2}

(1. 福州大学 数学与计算机科学学院, 福建 福州 350116; 2. 福建省网络计算与智能信息处理重点实验室, 福建 福州 350116)

摘要: 针对当前网络信息系统可生存性评估指标的复杂性和定性概念评估问题, 将云模型理论和 AHP 方法相结合, 提出了一种基于云模型的多层次可生存性模糊评估方法。用 AHP 方法构建了多层次评估指标体系, 并对各级指标权重进行有效计算。采用多维云模型与 AHP 方法结合, 设计了定性指标和定性数据的量化模糊评估方法, 得到了定性评估结果。实验结果表明, 所提出评估方法能够实现复杂评估指标体系下的模糊量化评估, 在计算的准确性和模糊性方面具有较好性能。

关键词: 可生存性评估; 多维云模型; 层次分析法; 模糊计算; 权重

中图分类号: TP309.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)08-0107-09

Survivability evaluation of network information system based on the cloud model and analytic hierarchy process

LIU Yan-hua^{1,2}, CHEN Guo-long^{1,2}, WU Rui-fen^{1,2}

(1. College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Network Computing and Intelligent Information Processing, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Considering the problem of quantitative evaluation for qualitative survivability data and indexes of network information systems, the proposed method gives a multi-level survivability evaluation framework based on cloud model theory and AHP method. The algorithm builds a multi-level evaluation indexes system and compute the weight of each index using AHP method. Moreover, a quantitative method for qualitative data and a fuzzy evaluation method are designed via multidimensional cloud model. Finally, the experimental results show that the proposed method achieves a satisfactory result in quantitative evaluation of complex qualitative indexes, and has certain advantages in terms of accuracy and fuzzy computing.

Key words: survivability evaluation; multidimensional cloud model; analytic hierarchy process; fuzzy computing; weight

1 引言

随着网络应用的迅速发展, 网络信息系统所面临的安全问题也越来越严峻。网络信息系统在受到攻击或系统出现异常情况下, 如何保证系统的正常工作成为亟待解决的重要问题。作为系统安全性的重要度量指标, 可生存性及其评估研究近年来受到了网络安全领域的积极关注^[1-4]。

网络信息系统可生存性^[5]是指网络系统在遭受攻击、故障或意外事故时, 能正常完成关键任务的能力。可生存性评估是根据设定的可生存性指标, 对系统状态数据进行计算, 判断系统的可生存能力。通过可生存性评估, 安全管理员能够及时发现网络系统中存在的安全问题, 进一步采取对应的安全增强措施, 保障网络信息系统的高质量安全运行。

收稿日期: 2013-05-04; 修回日期: 2013-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61103175, 61300103); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01265); 福建省科技创新平台计划基金资助项目(2009J1007); 福州市科技计划基金资助项目(2013-G-94)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61103175, 61300103); The Natural Science Foundation of Fujian Province (2012J01265); The Technology Innovation Platform Project of Fujian Province(2009J1007); The Science and Technology Project of Fuzhou(2013-G-94)

2 相关研究工作

针对可生存性评估中存在的评估指标和评估模型等关键问题,近年来,国内外研究者着重围绕评估体系建设、评估建模、评估方法、可生存性增强技术等方面,开展了相关研究工作。

Robert 等^[6]对可生存性分析方法作了研究,提出了一种定性的分析方法 SNA(survivable network analysis),对系统的 3R(resistant、recognize、recover)特性进行层次分析,对可生存性评估具有很好的参考价值,不少研究者借鉴了该方法。刘密霞等在文献[7]中,通过形式化方法对系统进行描述,用模糊 Petri 网构建了攻击失效模型,推理系统遭受到攻击后到达不同状态的概率,进而计算出系统在受到攻击后的可生存性,但该方案没有给出详细的评估指标体系。伍文等^[8-10]针对网络可生存性评估及其仿真提出了多种网络可生存性表示方法、指标体系及其计算方法,提出了基于连续时间 Markov、故障分析、博弈论和 PSO 等方法相关算法,研究了多种情形下的可生存性评估方法。其中文献[10]所提出的评估指标体系较为全面,且评估方法也有具有一定的可参考性,但未深入研究定性评估指标和评估数据的量化计算问题。林雪纲等^[11,12]则利用有限状态机和状态转化图来描述系统可生存性,提出了可行的生存性量化分析方法,对 3R 评估指标进行量化处理,但并未给出有效的可生存性评估过程及其实验验证。WANG C L 等^[13,14]从智能计算的角度,提出了基于进化计算思想的评估方法,采用免疫进化算法计算指标的权重,并设计了基于多规则决策和网络威胁演化模型的可生存性评估方法,但评估指标设计较简单,缺乏实际可用性。还有一些研究者针对网络系统某种应用开展了相关研究^[15-18],给出了一些有较强针对性的评估策略。

分析已有研究,目前相关研究工作还存在以下问题。

1) 可生存性评估指标体系的细化及其不同指标的权重计算问题。网络的复杂化需要设计更加具体的评估指标体系,同时也需要改进传统人工界定各项指标权重的方法。

2) 可生存性评估指标和评估数据中存在大量定性数据,如某种威胁的风险程度常用{轻,较轻,一般,较严重,严重}等定性数据来表示。因此需要研究新方法,既要解决定性数据的定量计算,又要

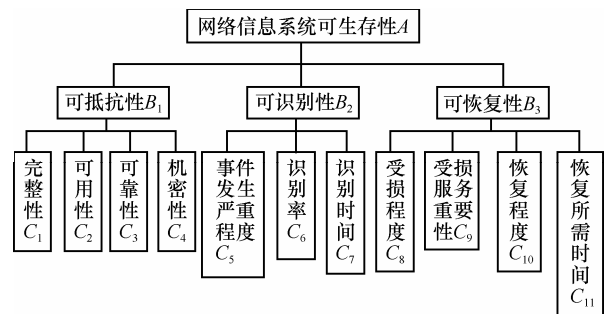
能给出定性评估结果,增加评估结果的可理解性。

针对上述问题,本文将研究多层次的细化可生存性评估指标体系,引入 AHP^[19]计算方法,对多层次评估指标的权重进行计算。同时,利用多层云模型(cloud model)理论^[20],研究可生存性评估中定性数据的量化计算与定性表示方法,来提高可生存性评估的模糊性和准确性。

3 基于 AHP 的多层次评估指标体系设计

3.1 多层次可生存性评估指标体系

本文以 SNA 方法中的 3R 特性为基础,根据评估实际需求,对评估指标进行具体细化,形成了适合于 AHP 方法的多层次可生存性评估指标体系,如图 1 所示。



1) 可抵抗性指标 B_1

可抵抗性指标 B_1 反映了网络系统作为一个整体对攻击、故障或意外事故等各种发生事件的抵抗能力,它强调的是网络信息系统整体的抵抗能力而不是单个组件的抵抗性能。指标 B_1 由完整性 C_1 、可用性 C_2 、可靠性 C_3 和机密性 C_4 4 个子指标组成。

① 完整性 C_1 : 表示系统能够保持其各项信息完整无缺的能力;

② 可用性 C_2 : 表示系统能够保持其各项服务可用的能力;

③ 可靠性 C_3 : 表示系统能够保持其各项服务连续正常运行的能力;

④ 机密性 C_4 : 表示系统能够保持其数据信息机密性的能力。

2) 可识别性指标 B_2

可识别性指标 B_2 指系统判断整体受损程度的能力,是对网络系统整体状态的监控和识别。指标 B_2 由事件发生的严重程度 C_5 、对发生事件的识别率 C_6 和识别时间 C_7 3 个子指标组成。

① 严重程度 C_5 ：表示系统受到安全事件影响的严重性；

② 识别率 C_6 ：表示系统可以正确识别各种安全事件的概率；

③ 识别时间 C_7 ：表示系统识别安全事件所要花费的时间。

3) 可恢复性指标 B_3

可恢复性指标 B_3 指系统遭受破坏后恢复系统基本服务的能力，即描述了系统的自我修复能力。指标 B_3 由系统受损程度 C_8 、受损服务重要性 C_9 、恢复程度 C_{10} 和恢复所需时间 C_{11} 4 个子指标组成。

① 受损程度 C_8 ：表示系统服务能力的受损程度；

② 受损服务重要性 C_9 ：表示受损服务相对于系统完成其关键服务的重要程度；

③ 恢复程度 C_{10} ：表示系统在一定时间内恢复受损服务的程度；

④ 恢复所需时间 C_{11} ：表示系统恢复正常运行所需的时间。

与 3R 属性相比，多层次可生存性评估指标体系能更加准确地表示不同评估安全因素，提高了指标体系的可用性。

3.2 基于 AHP 的多层次评估指标权重计算

AHP 方法是一种有效的多指标权重计算方法。本文将利用 AHP 方法，计算图 1 中各评估指标相对于上层指标的权重值，同时也计算出各层指标相对于最高决策层指标的权重值。

指标权重计算步骤如下。

步骤 1 根据图 1 评估指标体系，参考相关国家安全评估指南，构造第 2 层和 3 层对应的判断矩阵。

由评估专家给出图 1 中同层评估指标的重要性比较关系，并按照表 1 的标度方法，将评估指标的比较关系转换成数值，即得到对应层次判断矩阵。

标度 a_{ij}	定义
1	表示 2 个因素相比，具有同样重要性
3	表示 2 个因素相比，一个比另一个稍重要
5	表示 2 个因素相比，一个比另一个明显重要
7	表示 2 个因素相比，一个比另一个非常重要
9	表示 2 个因素相比，一个比另一个绝对重要
2、4、6、8 倒数	表示 2 个因素的比较值介于上述 2 个相邻等级之间
	因素 i 与 j 比较的判断值 a_{ij} ，则因素 j 与 i 比较的判断值 $a_{ji}=1/a_{ij}$ ， $a_{ii}=1$

步骤 2 计算每个判断矩阵的最大特征根 λ_{\max}

$$\text{及对应的特征向量 } W = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}.$$

步骤 3 对每个判断矩阵进行一致性检验，确定判断矩阵是否存在严重的不一致性。

文中采用的判断矩阵为 n 维正互反矩阵，定义 n 维正互反矩阵 A 的一致性检验指标 CI 为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

由式(1)，当 $CI = 0$ ，表示 A 有完全一致性，即 $\lambda_{\max} = n$ ；当 CI 的值接近于 0，表示 A 有较好的一致性。在实际应用中，矩阵 A 的维数越大，其一致性越难控制，此时应当降低矩阵的一致性要求。因此，引入平均随机一致性指标 RI 来修正 CI ，表 2 给出了不同维数判断矩阵对应的 RI 值。

维数	RI 值
1	0
2	0
3	0.58
4	0.96
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45

修正后的一致性检验指标为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

在本文评估中，设定一致性指标应该满足 $CR < 0.05$ ，否则返回步骤 1，重新比较评估指标的权重关系，构造新的判断矩阵。

步骤 4 当判断矩阵满足一致性指标要求，则

将最大特征根 λ_{\max} 对应的特征向量 $W = \begin{pmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$ 进行

归一化处理，即作为判断矩阵对应的指标权重向量（即单层权重向量）。

得到的第 2 层和 3 层判断矩阵及其对应的权重值如表 3~表 6 所示。

表 3 判断矩阵 (A-B)

A	B ₁	B ₂	B ₃	权重值	CR
B ₁	1	3	1	0.428 6	
B ₂	1/3	1	1/3	0.142 8	0.000 1
B ₃	1	3	1	0.428 6	

表 4 判断矩阵 (B₁-C)

B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	权重值	CR
C ₁	1	1/3	1/2	1	0.141 1	
C ₂	3	1	2	3	0.454 7	0.003 8
C ₃	2	1/2	1	2	0.263 1	
C ₄	1	1/3	1/2	1	0.141 1	

表 5 判断矩阵 (B₂-C)

B ₃	C ₅	C ₆	C ₇	权重值	CR
C ₅	1	1/2	2	0.297 3	
C ₆	2	1	3	0.539 0	0.007 9
C ₇	1/2	1/3	1	0.163 8	

表 6 判断矩阵 (B₃-C)

B ₃	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	权重值	CR
C ₈	1	1	1/2	3	0.239 1	
C ₉	1	1	1/2	3	0.239 1	0.007 6
C ₁₀	2	2	1	4	0.432 8	
C ₁₁	1/3	1/3	1/4	1	0.089 0	

步骤 5 计算组合权重向量, 即各层次对于系统的总排序权重, 并做组合一致性检验。

假设上层 A 有 m 个元素, A₁, A₂, ..., A_m, 且其层次总排序权向量为 a₁, a₂, ..., a_m, 下层 B 有 n 个元素 B₁, B₂, ..., B_n, 则按 B_j 对 A_i 个元素的单排序权重向量的列向量为 b_{ji}, 此时 B 层的总排序权向量 W=(w₁, w₂, ..., w_n)^T。

其中, w_i 的计算公式为

$$w_i = \sum_{j=1}^m a_j b_{ji} \quad (3)$$

第 3 层指标对最高层指标 A 的权重计算结果如表 7 所示。

通过分析表 3~表 7 结果, 既可得到同一层次各评估指标对上层指标的权重, 也能够获知最底层每个具体指标对最高层决策指标的影响权重, 有助于安全管理员的具体评估决策。

表 7 判断矩阵 (A-C)

指标	B ₁	B ₂	B ₃	A	CR
C ₁	0.141 1	0.000 0	0.000 0	0.060 5	
C ₂	0.454 7	0.000 0	0.000 0	0.194 9	
C ₃	0.263 1	0.000 0	0.000 0	0.112 7	
C ₄	0.141 1	0.000 0	0.000 0	0.060 5	
C ₅	0.000 0	0.297 3	0.000 0	0.042 5	
C ₆	0.000 0	0.539 0	0.000 0	0.077 0	0.005 9
C ₇	0.000 0	0.163 8	0.000 0	0.023 4	
C ₈	0.000 0	0.000 0	0.239 1	0.102 5	
C ₉	0.000 0	0.000 0	0.239 1	0.102 5	
C ₁₀	0.000 0	0.000 0	0.432 8	0.185 5	
C ₁₁	0.000 0	0.000 0	0.089 0	0.038 1	

4 可生存性模糊评估模型

为解决评估数据和评估指标的定性数据计算转换问题, 本文将利用云模型理论在处理不确定性数据转换的优势, 与 AHP 相结合, 提出一种系统可生存性模糊评估新方法。

本文提出的可生存性模糊评估模型, 如图 2 所示。

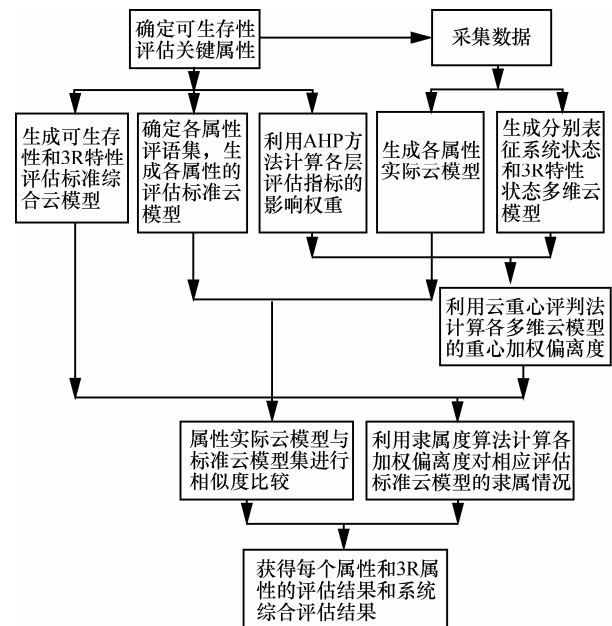


图 2 基于云模型和 AHP 的可生存性评估模型

可生存性评估的主要步骤如下。

步骤 1 设定可生存性评估指标体系, 如图 1 所示, 即 U={C₁, C₂, ..., C₁₁}。

步骤 2 确定每个评估指标的评语集, 生成每个指标的评估标准云模型。

评估指标的评语集由专家给出。第 3 层的完整性评语集为{不完整, 一般, 完整, 很完整}, 识别率评语集为{很低, 低, 中等, 高, 很高}等。第 2 层指标和顶层指标都采用评语集{非常差, 很差, 差, 较差, 一般, 较好, 好, 很好, 非常好}。将每个评语集用一个云模型实现, 生成评估指标的评估标准云模型和评估标准综合云模型。

步骤 3 利用 AHP 方法计算评估指标的权重值, 具体见 3.2 节。

步骤 4 采集评估数据, 生成对应数据的实际云模型和 n 维实际综合云模型。

① 对采集到的评估数据进行预处理, 作为云滴数据;

② 用逆向云发生器计算出每个属性的云模型数字特征(Ex_i, En_i, He_i);

③ 用正向云发生器计算得到每个属性数据的实际云模型。然后, 组合多个指标的云模型数字特征, 即得到多维云模型($Ex_i, En_i, He_i, \dots, Ex_{11}, En_{11}, He_{11}$)。

步骤 5 计算每个指标的实际云模型与对应标准云模型的相似性, 得到每个指标的评估结果。

步骤 6 计算实际多维云模型的加权偏离度 θ , 并利用与云模型隶属度^[21]算法, 计算加权偏离度 θ 对综合标准云模型的隶属情况, 即得到 3R 特性和顶层可生存性的评估结果。

计算多维云模型加权偏离度 θ 时, 对文献[22]给出的云重心评价法进行了改进。将系统理想状态分为正理想状态(各指标值都为最优)和负理想状态(各指标值都为最差)。正理想状态下, 重心位置向量为 $a^+=(Ex_1^+, Ex_2^+, \dots, Ex_n^+)$, 重心高度向量为 $b=(w_1, w_2, \dots, w_n)$, 云重心向量为 $T^+=(T_1^+, T_2^+, \dots, T_n^+)$, 其中 $T_i^+=E_{x_i}^+ \cdot w_i$ 。同理, 负理想状态下, 重心向量为 $T^-=(T_1^-, T_2^-, \dots, T_n^-)$ 。归一化公式为

$$T_i^p = \frac{T_i - T_i^+}{T_i^- - T_i^+} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

为了计算某一状态下云重心与正理想云重心的差异, 定义一个加权偏离度 θ 。 θ 值越小表示此状态偏离正理想状态越小, θ 值越大则偏离正理想状态越大。

把各评估指标归一化后的重心向量乘以相应权重值, 再相加即可得加权偏离度 θ 值

$$\theta = \sum_{i=1}^n (T_i^p \times w_i) \quad (5)$$

其中, T_i^p 为第 i 评估指标归一化后的重心向量值, w_i 为第 i 个评估指标的权重值。

5 仿真实验分析

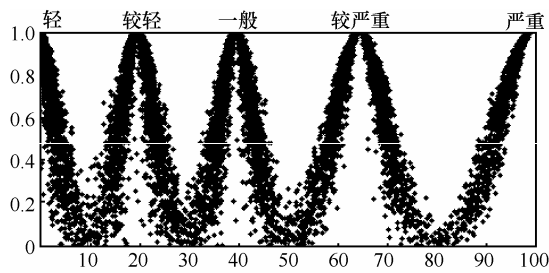
为验证新模型的有效性, 以可恢复性 B_3 评估为例, 进行实验结果分析。

5.1 评估标准云模型的生成

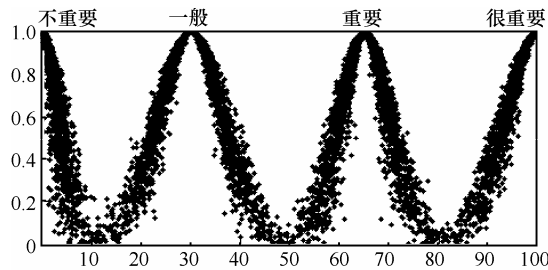
实验中, 每个评估指标用 0~100 间的分值区间来表示, 并根据需要将该分值区间划分为若干个子区间, 来代表评估指标可能出现的不同评语级别。如受损程度评语集为{轻, 较轻, 一般, 较严重, 严重}, 对应的分值为“轻” [0,10]、“较轻” [10, 30]、“一般” [30, 50]、“较严重” [50, 80]、“严重” [80, 100]; 受损服务重要性评语集为{不重要, 一般, 重要, 很重要}, 对应的分值为“不完整” [0, 10]、“一般” [10, 50]、“较完整” [50, 80]、“完整” [80, 100]; 恢复程度评语集为{低, 一般, 高, 很高}, 对应的分值为“低” [0, 20]、“一般” [20, 60]、“高” [60, 90]、“很高” [90, 100]; 恢复所需时间评语集为{很长, 长, 中等, 短, 很短}, 对应的分值为“很长” [0, 20]、“长” [20, 40]、“中等” [40, 70]、“短” [70, 90]、“很短” [90, 100]。然后, 生成每个评估指标对应的云模型。可恢复性 B_3 的评估指标的下层各指标的评估标准云模型数字特征如表 8 所示。对应评估指标的评估标准云模型如图 3 所示。

表 8 可恢复性 B_3 各指标的云数字特征值

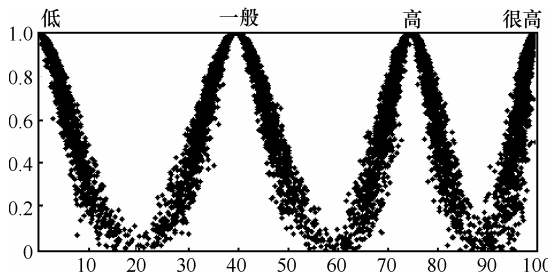
指标	评估标准云数字特征				
C_8	轻(0,3,3,1)	较轻(20,3,3,1)	一般(40,3,3,1)	较严重(65,5,1)	严重(100,6,6,1)
C_9	不重要(0,3,3,1)	一般(30,6,6,1)	重要(65,5,1)	很重要(100,6,6,1)	—
C_{10}	低(0,6,6,1)	一般(40,6,6,1)	高(75,5,1)	很高(100,3,3,1)	—
C_{11}	很长(0,6,6,1)	长(30,3,3,1)	中等(55,5,1)	短(80,3,3,1)	很短(100,3,3,1)



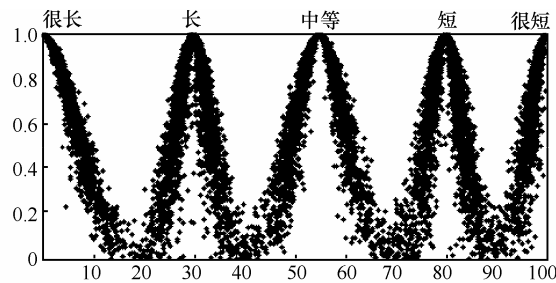
(a) C_8 受损程度评语集标准云模型



(b) C_9 受损服务重要性评语集标准云模型



(c) C_{10} 恢复程度评语集标准云模型



(d) C_{11} 恢复所需时间评语集标准云模型

图 3 可恢复性各指标的评估标准云模型

可恢复性 B_3 评估指标的综合评语集设为{非常差, 很差, 差, 较差, 一般, 较好, 好, 很好, 非常好}, 其对应的归一化后的数值区间为“非常差” $[0, 0.125]$ 、“很差” $[0, 0.25]$ 、“差” $[0.125, 0.375]$ 、“较差” $[0.25, 0.5]$ 、“一般” $[0.375, 0.625]$ 、“较好” $[0.5, 0.75]$ 、“好” $[0.625, 0.875]$ 、“很好” $[0.75, 1.0]$ 、“非常好” $[0.875, 1.0]$ 。

计算每个评语对应云模型的数字特征值, 如表 9 所示。

表 9 可恢复性 B_3 的云数字特征值

指标	评估标准云数字特征
B_3	非常差(0,0.042,0.01)
	很差(0.125,0.042,0.01)
	差(0.25,0.042,0.01)
	较差(0.375,0.042,0.01)
	一般(0.5,0.042,0.0)
	较好(0.625,0.042,0.01)
	好(0.75,0.042,0.01)
	很好(0.875,0.042,0.01)
	非常好(1.0,0.042,0.01)

生成指标可恢复性 B_3 对应的评估标准综合云模型, 如图 4 所示。

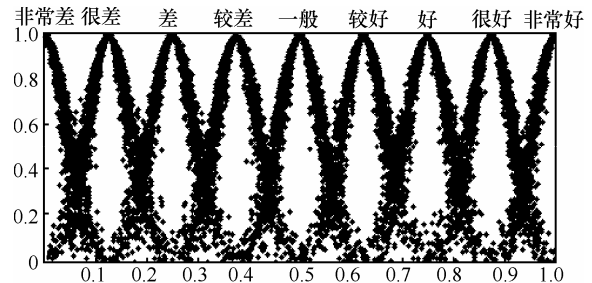


图 4 可恢复性评估标准综合云模型

5.2 可生存性评估结果

为模拟实际评估数据, 实验中通过正态分布随机函数生成测试数据 20 000 组, 产生的数据样本并不严格落在服从正态分布的概率密度曲线上, 如表 10 所示。

表 10 产生的属性序列数据

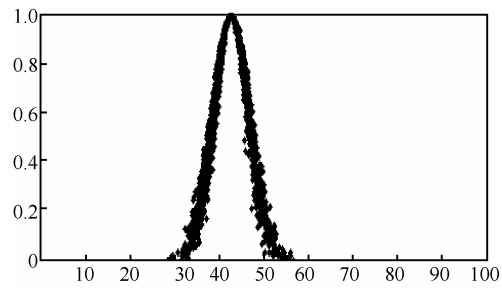
序号	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}
1	40	70	90	65
2	35	65	85	55
3	50	70	85	50
...
20 000	45	65	90	70

1) 由逆向云发生器, 计算出每个指标云模型的数字特征, 结果分别为 $C_8(43, 4, 0.4)$ 、 $C_9(70, 5.1, 2)$ 、 $C_{10}(85, 4.9, 2)$ 和 $C_{11}(57, 5.6, 1)$ 。

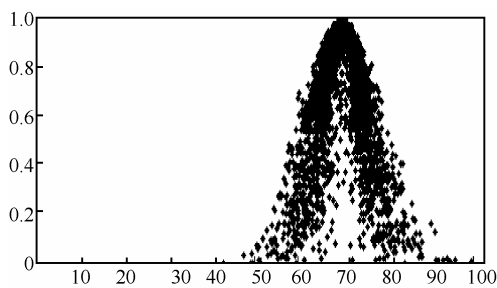
2) 进行云模型组合计算, 得到实际多维云模型

$C(43, 4, 0.4, 70, 5.1, 2, 85, 4.9, 2, 57, 5.6, 1)$ 。

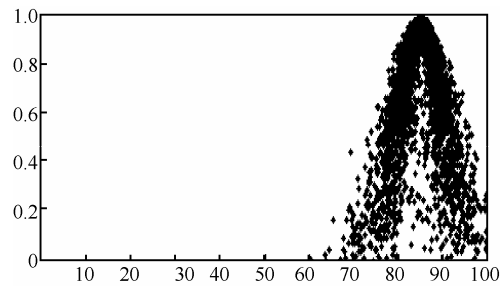
3) 利用正向云发生器，生成上述云模型，如图 5 所示。



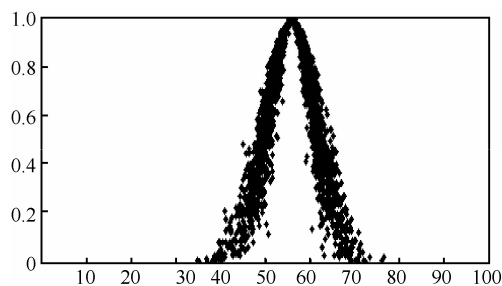
(a) 受损程度



(b) 受损服务重要性



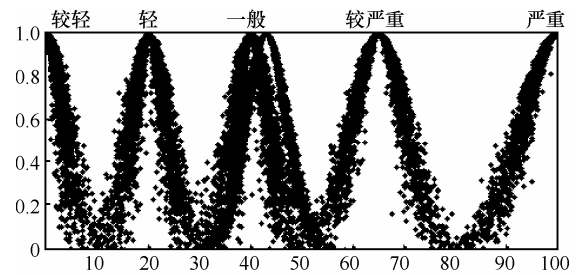
(c) 恢复程度



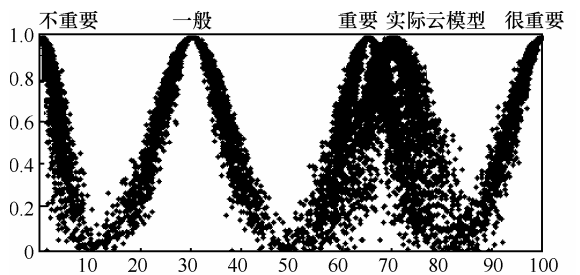
(d) 恢复所需时间

图 5 可恢复性各属性的实际云模型

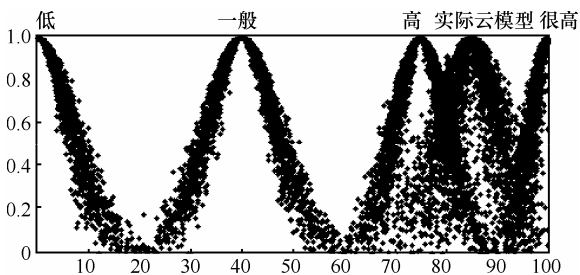
4) 根据相似度计算方法，把图 5 中每个指标的实际云模型与图 4 中评估标准云模型进行比较，如图 6 所示。其中最相似的评估标准云模型，即为该属性对应的评估结果，如表 11 所示。



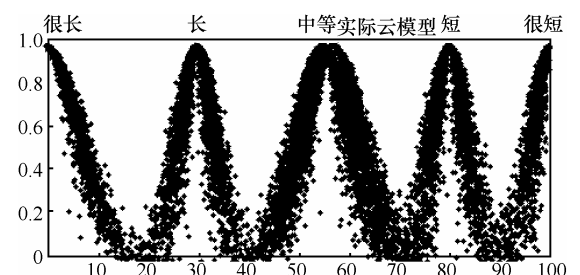
(a) 受损程度相似性比较



(b) 受损服务重要性相似性比较



(c) 恢复程度相似性比较



(d) 恢复所需时间相似性比较

图 6 实际云模型和评估标准云模型集相似性比较

5) 利用云重心评判法，计算得到实际的多维云模型 C 加权偏离度 $\theta=0.688 793$ 。

6) 计算加权偏离度 θ 对综合评估标准云模型的隶属度，结果与“好”的隶属度值最大。

因此，测试数据对于评估指标可恢复性 B_3 的评估结果如表 12 所示。

通过多组实验数据，验证了不同评估指标的权重大小对评估结果具有较大影响，因此指标权重的计算对可生存性评估很重要。

表 11 实际云模型与标准云模型相似性比较

指标	评语数据结果					最相似云模型
C ₈	轻	较轻	一般	较严重	严重	一般
	2.380 56	6.841 15	21.657 1	8.013 92	3.543 35	
C ₉	不重要	一般	重要	很重要	—	重要
	1.795 99	4.179 71	17.573 9	5.470 48	—	
C ₁₀	低	一般	高	很高	—	高
	1.611 76	3.755 16	11.915 7	10.117 2	—	
C ₁₁	很长	长	中等	短	很短	中等
	2.137 79	6.47551	75.648 2	7.429 63	4.104 12	

表 12 可恢复性 B₃ 评估结果

指标	各指标评语	整体评估结果	
B ₃	C ₈	一般	可恢复性好
	C ₉	重要	
	C ₁₀	高	
	C ₁₁	中等	

6 结束语

本文充分考虑了可生存性评估中定性数据的模糊计算和复杂评估指标的权重计算等问题，提出了基于云模型和 AHP 方法的网络信息系统可生存性评估新方法。与其他评估方法相比，本文提出的方法具有以下特点：1) 结合 AHP 方法构建了细化的可生存性评估指标体系，该体系具备更好的细致性、可用性和可扩展性特点；2) 建立了基于 AHP 的复杂评估指标体系的权重决策方法，既克服了同层次评估指标地位不均衡问题，也实现了多层次评估指标的权重决策计算；3) 在可生存性评估中，将 AHP 方法与云模型理论结合，实现了复杂多层次评估指标下定性数据的有效模糊评估和评估结果的定性描述，使得整个评估工作具备更好的随机性和模糊性特点，评估结果更贴近实际，也增加了评估结果的实用性和可读性。仿真实验结果表明，新评估模型能够有效计算各评估指标及决策层指标的权重，多维云模型评估方法实现了多层次评估指标下的可生存性综合模糊评估，具有较好的可用性。下一步研究工作中，拟研究基于云模型的评估指标选取方法，优化复杂指标体系的合理约简，提高海量数据和复杂评估指标下的可生存性评估效率。

参考文献:

- [1] AL-KUWAITI M, KYRIAKOPOULOS N, HUS-SEIN S. A comparative analysis of network depend-ability, fault-tolerance, reliability, security, and survivability[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2009, 11(2): 106-124.
- [2] MA Z S, KRINGS W. Dynamic hybrid fault modeling and extended evolutionary game theory for reliability, survivability and fault tolerance analyses[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(1): 180-196.
- [3] 张乐君, 周渊, 国林等. 基于自主配置的系统生存性增强算法研究[J]. 通信学报, 2007, 28(12): 102-107.
ZHANG L J, ZHOU Y, GUO L, et al. Research of survivability enhancement algorithm based on autonomous configuration[J]. Journal on Communications, 2007, 28(12): 102-107.
- [4] 李黎, 管晓宏, 赵千川等. 网络生存适应性的多目标评估[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 1-7.
LI L, GUAN X H, ZHAO Q C, et al. Multi-objective evaluation of network survival fitness[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(10): 1-7.
- [5] 袁丹, 张玉清. 网络可生存性定义研究[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(1): 525-529.
YUAN D, ZHANG Y Q. Research on definition of network survivability[J]. Journal of Computer Research and Development, 2006, 43(1): 525-529.
- [6] ROBERT J, ELLISO N, RICHARD C, et al. Survivable network system analysis: a case study[J]. IEEE Software, 1999, 16(4): 70-77.
- [7] 刘密霞, 张玉清, 洪毅. 基于模糊推理的网络可生存性的建模与分析[J]. 通信学报, 2009, 30(1): 31-37.
LIU M X, ZHANG Y Q, HONG Y. Modeling and analysis of network survivability based on fuzzy inference[J]. Journal on Communications, 2009, 30(1): 31-37.
- [8] 伍文, 孟相如, 马志强等. 模块化动态博弈的网络可生存性态势跟踪方法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(12): 18-23.
WU W, MENG X R, MA Z Q, et al. Tracking network survivability situation based on modularized dynamic game[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(12): 18-23.
- [9] 伍文, 孟相如, 刘芸江等. 基于连续时间 Markov 的网络可生存性建模与量化[J]. 吉林大学学报, 2013, 43(5): 1395-1400.
WU W, MENG X R, LIU Y J, et al. Modeling and quantification of

- network survivability based on continuous time Markov[J]. Journal of Jilin University, 2013,43(5):1395-1400.
- [10] 伍文, 孟相如, 马志强等. 基于组合赋权的网络可生存性模糊综合评估[J]. 系统工程与电子技术, 2013,35(4):786-790.
WU W, MENG X R, MA Z Q, *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation of network survivability based on combinational weight[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013,35(4):786-790.
- [11] 林雪纲, 许榕生, 熊华等. 一种信息系统生存性的量化分析框架[J]. 电子与信息学报, 2006,28(9):1721-1726.
LIN X G, XU R S, XIONG H, *et al.* A framework of quantitative analysis for information system survivability[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006,28(9):1721-1726.
- [12] 林雪纲, 许榕生. 信息系统生存性分析模型研究[J]. 通信学报, 2006,27(2):153-159.
LIN X G, XU R S. Research on analysis model of information systems survivability[J]. Journal on Communications, 2006,27(2):153-159.
- [13] WANG C, MING L, ZHAO J, *et al.* A general framework for network survivability testing and evaluation[J]. Journal of Networks, 2011, 6(6): 831-841.
- [14] WANG C L, FANG L, DAI Y Q. Network survivability evaluation model based on immune evolution and multiple criteria decision making[A]. 2012 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discover[C]. Sanya, China, 2012, 178-184.
- [15] JOSE Y, ARIEL O. Tunable QoS-aware network survivability[A]. INFOCOM[C]. Turin, Italy, 2013.944-952.
- [16] PARK J S, CHANDRAMOHAN P, *et al.* Component survivability at runtime for mission-critical distributed systems[J]. The Journal of Supercomputing, 2013, 66(3):1390-1417.
- [17] 熊琦, 彭勇, 戴忠华. 基于排队网的入侵响应系统可生存性[J]. 清华大学学报, 2012,52(10): 1507-1512.
XIONG Q, PENG Y, DAI Z H. Survivability analysis of intrusion response system based on queuing nets[J]. Journal of Tsinghua University, 2012,52(10): 1507-1512.
- [18] YANG Y, ZHANG Y L, *et al.* Quantitative survivability evaluation of three virtual machine-based server architectures[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013(36):781-790.
- [19] SAATY T. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.9.
- [20] 李德毅, 刘常昱, 杜鹞等. 不确定性人工智能[J]. 软件学报, 2004, 15(11): 1583-1594.
LI D Y, LIU C Y, DU Y, *et al.* Artificial intelligence with uncertainty[J]. Journal of Software, 2004, 15(11): 1583-1594.
- [21] 李德毅, 史雪梅, 孟海军. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995,32(6):15-20.
LI D Y, SHI X M, MENG H J. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995,32(6):15-20.
- [22] 焦跃, 李德毅, 杨朝晖. 一种评价 C³I 系统效能的新方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(12): 68-73.
JIAO Y, LI DEYI, YANG Z. A new method to evaluate the effectiveness of C³I system[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998, 18(12):68-73.

作者简介:



刘延华 (1972-), 男, 山东济宁人, 福州大学副教授, 主要研究方向为网络信息安全、人工智能及其应用。



陈国龙 [通信作者] (1965-), 男, 福建莆田人, 福州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为人工智能、网络安全。E-mail: cgl@fzu.edu.cn。



吴瑞芬 (1987-), 女, 福建漳州人, 福州大学硕士生, 主要研究方向为网络信息安全、数据处理技术。