

# 航天测控系统容灾能力评估方法研究

韩伟杰, 阎 慧, 王 宇

(装备指挥技术学院 信息装备系, 北京 101416)

**摘 要:** 航天测控系统容灾能力评估是建设航天测控容灾系统的关键环节。通过对航天测控系统容灾能力评估因素进行深入分析, 建立评价指标体系, 利用层次分析法(AHP)确定各指标的组合权重; 利用模糊评判方法建立模糊评判模型, 计算容灾能力的综合评判值并做出决策。按照以上方法评估, 航天测控系统的总体容灾能力等级是“较强”, 但在灾难恢复管理、灾难恢复规划及灾难恢复技术措施等方面还需提高。结果表明, 通过将层次分析法和模糊评判方法相结合对容灾能力进行评估, 可以为容灾建设提供合理参考依据。

**关键词:** 层次分析法; 模糊评判; 航天测控系统; 容灾能力评估

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2011)08-0223-05

## Research about Disaster Recovery Capability Evaluation of Space TT&C System

HAN Wei-jie, YAN Hui, WANG Yu

(Department of Information Equipment, Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Disaster recovery capability evaluation plays an important role in building the space TT&C disaster recovery system. By analyzing the main factors which influence the disaster recovery capability of the space TT&C system, the set of evaluated indexes was founded, whose weights were calculated by analytic hierarchy process (AHP). The model for assessment was founded by fuzzy comprehensive evaluation, based on which the comprehensive assessment value of the disaster recovery capability was computed and the decision to make up for the space CC&T disaster recovery system was made furthermore. The actual calculated results show that the general disaster recovery capability of the space TT&C is relatively strong. But the capability of disaster recovery management, disaster recovery plan and disaster recovery technologies and measures still needs to be strengthened. The application result shows that the approach could evaluate the disaster recovery capability efficiently and provide reasonable consults for building the space TT&C disaster recovery system by combining AHP with fuzzy assessment.

**Key words:** AHP; fuzzy assessment; space TT&C system; disaster recovery capability evaluation

## 0 引 言

如果把飞船以及发射到空间的各种卫星及飞行器比作风筝, 那么航天测控系统就像是牵引风筝的线, 它是航天通信、测控和指挥的纽带, 它的安全性和可靠性关系到整个航天事业<sup>[1]</sup>。因灾难造成数据丢失或业务中断, 严重的甚至会影响航天任务, 造成不可估量的损失。建设航天测控容灾系统, 其目的就是要防止测控系统在遭受灾难时造成系统服务停止和数据丢失, 为任务过程中的关键数据和业务提供安全保障<sup>[2,3]</sup>。为

了建设合理完善的容灾系统, 必须对航天测控系统的容灾能力进行科学评估, 为设计容灾建设的实施规划提供参考<sup>[4]</sup>。

文中综合采用层次分析法与模糊评判方法对航天测控系统的容灾能力进行评估。首先, 分析影响航天测控系统容灾能力的因素并建立评价指标体系; 然后, 采用层次分析法确定各指标的权重; 最后, 建立容灾能力模糊评估模型, 实现对航天测控系统容灾能力的综合评估。

## 1 基于 AHP 方法的航天测控系统容灾能力评价因素分析

层次分析法(AHP, Analytic Hierarchy Process)<sup>[5,6]</sup>是美国运筹学家萨蒂教授于20世纪70年代提出的一

收稿日期: 2010-12-28; 修回日期: 2011-03-19

基金项目: 总装备部基金项目(2008SY4108004)

作者简介: 韩伟杰(1980-), 男, 河南周口人, 讲师, 硕士, CCF 会员, 研究方向为网络安全可视化; 阎 慧, 副教授, 博士, 研究方向为软件装备; 王 宇, 副教授, 博士, 研究方向为信息安全。

种多层次权重分析决策方法。该方法可有效结合结果数据、专家意见及分析者的客观判断,将复杂问题分解成若干组合因素,并将这些因素按其系统支配关系形成层次结构,通过两两判断比较确定各因素重要性。根据综合权重按最大权重原则确定最优方案,进而得到方案或目标相对重要性的定量化描述,具有系统性、灵活性和实用性等优点,目前已被广泛应用于解决各种决策分析问题<sup>[7,8]</sup>。

### 1.1 建立航天测控系统容灾能力影响因素递阶层次结构

参考专家意见,建立影响航天测控系统容灾能力影响因素的递阶层次模型。模型第1层为目标层A,即航天测控系统容灾能力;目标层划分为由灾难恢复管理、灾难恢复规划和灾难恢复技术措施3个指标组成的准则层B,表示实现目标层所涉及的中间环节;准则层再分解形成指标层C,从而构建出航天测控系统容灾能力评估体系层次模型,如图1所示。其中,准则层指标相对于目标层、指标层指标相对于准则层的权重采用AHP法确定。

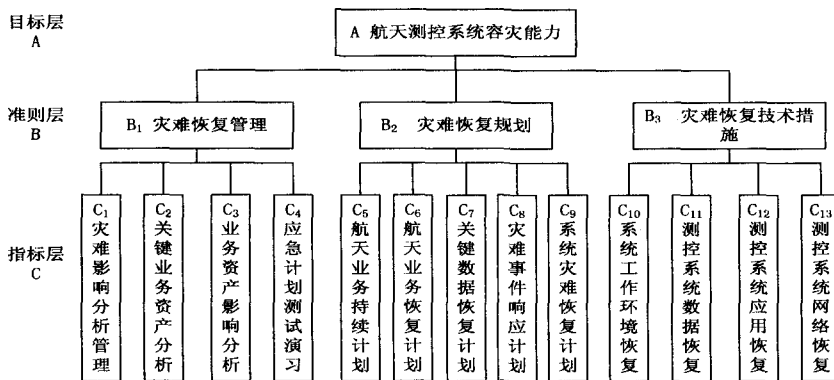


图1 航天测控系统容灾能力递阶层次模型

### 1.2 建立影响因素两两比较判断矩阵

在建立影响因素递阶层次模型的基础上,采用AHP方法对某一层次因素相对上一层次因素的相对重要性进行两两比较,并按表1所示的标度值建立

表1 要素比值标度表

相对重要程度	含义
1	要素A和B同样重要
3	要素A比B略重要
5	要素A比B重要
7	要素A比B明显重要
9	要素A比B绝对重要
2,4,6,8	介于两相邻重要程度之间

判断矩阵。其中,准则层B相对于目标层A的判断矩阵为: $A = (a_{ij})_{n \times n}$  ( $a_{ij}$ 表示准则层B中第*i*个因素与第*j*个因素相比于目标层A的相对重要性比值标度);指标层C相对于准则层B的判断矩阵为: $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 。

由判断矩阵A的构建过程可知,A具有如下性质:

1)  $a_{ij} > 0$ ; 2)  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ ; 3)  $a_{ii} = 1$ 。

### 1.3 单一准则下每层中各因素相对权重的计算

根据前面得出的判断矩阵,接下来计算各层指标对目标层的相对权重。其具体步骤如下:

(1)将矩阵  $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$  的每一列向量归一化得:

$$\tilde{w}_{ij} = a_{ij} / \left( \sum_{i=1}^n a_{ij} \right);$$

(2)对  $\tilde{w}_{ij}$  按行求和得:  $\tilde{w}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{w}_{ij}$ ;

(3)将  $\tilde{w}_i$  归一化,即有:  $w_i = \tilde{w}_i / \left( \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \right)$ , 则有

特征向量:  $\tilde{W} = \begin{Bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{Bmatrix}$  ( $\tilde{w}_i$  则被近似看作权向量);

(4)计算与特征向量  $\tilde{W} = \begin{Bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{Bmatrix}$  对应的最大特征

根  $\lambda_{\max}$  的近似值:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i} =$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \right) / w_i \right)。$$

### 1.4 矩阵一致性检验

为判断权向量是否能够真实反映各因素的客观权重,还需要检验判断矩阵的一致性。步骤如下:

(1)计算一致性指标:  $CI =$

$$\frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1};$$

(2)按照表2查找相应的平均随机一致性指标RI;

表2 平均随机一致性指标分布RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

(3)计算一致性比率  $CR = \frac{CI}{RI}$ ;

若  $CR < 0.1$ ,则认为判断矩阵的不一致程度在容许范围之内,可用其特征向量作为权向量,否则需要重新构造判断矩阵。

### 1.5 基于AHP方法计算航天测控系统容灾能力各层指标的权重

基于专家咨询和问卷调查的结果,并按表1所示的标度值对各层指标重要程度进行比较分别得到判断矩阵。采用AHP法计算可得图1中准则层B相对目

标层 A 的权向量,如表 3 所示。

表 3 准则层 B 相对目标层 A 的权向量

A	判断矩阵			权向量	一致性检验
	$B_1$	$B_2$	$B_3$		
$B_1$	1	2	1/2	0.297	$\lambda_{\max} = 3.0092$ $CR = 0.0079 < 0.1$
$B_2$	1/2	1	1/3	0.163	
$B_3$	2	3	1	0.540	

同理,指标层 C 相对准则层 B 的权向量分别如表 4、表 5 和表 6 所示。

表 4 指标层相对准则层  $B_1$  的权向量

$B_1$	判断矩阵				权向量	一致性检验
	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$		
$C_1$	1	1/2	1/3	1/4	0.096	$\lambda_{\max} = 4.031$ $CR = 0.0115 < 0.1$
$C_2$	2	1	1/2	1/3	0.160	
$C_3$	3	2	1	1/2	0.277	
$C_4$	4	3	2	1	0.467	

表 5 指标层相对准则层  $B_2$  的权向量

$B_2$	判断矩阵					权向量	一致性检验
	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$		
$C_5$	1	2	3	5	2	0.387	$\lambda_{\max} = 5.0173$ $CR = 0.039 < 0.1$
$C_6$	1/2	1	2	3	1	0.212	
$C_7$	1/3	1/2	1	2	1/2	0.120	
$C_8$	1/5	1/3	1/2	1	1/3	0.069	
$C_9$	1/2	1	2	3	1	0.212	

表 6 指标层相对准则层  $B_3$  的权向量

$B_3$	判断矩阵				权向量	一致性检验
	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$		
$C_{10}$	1	1/2	1/4	1/3	0.096	$\lambda_{\max} = 4.031$ $CR = 0.0115 < 0.1$
$C_{11}$	2	1	1/3	1/2	0.160	
$C_{12}$	4	3	1	2	0.467	
$C_{13}$	3	2	1/2	1	0.277	

2 基于模糊评判的航天测控系统容灾能力综合评估

因 AHP 方法具有模糊性,难以形成定量化评估结果,故还需其他方法弥补 AHP 方法带来的不足<sup>[9]</sup>。模糊综合评判法<sup>[10]</sup>是一种运用模糊数学理论并综合考虑多方面因素影响,从而对某一系统进行综合评估的综合方法,与 AHP 法结合可实现对航天测控系统容灾能力的综合评估。

2.1 确定评语集

针对指标层存在大量定性因素的问题,模糊评判法建立起 5 级或 9 级的评语集,并为评语赋予相应的分数。然后,依据定性指标的相对影响程度对其打分,

由此获得评价指标的相对性模糊评分。文中把容灾能力评价集  $V$  划分为 5 个等级,即  $\tilde{V} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{强}, \text{较强}, \text{一般}, \text{弱}, \text{很弱}\}$ 。设定相应评语集的百分制量值为  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\} = \{90, 70, 50, 30, 10\}$ ,用于对指标层的定性指标进行定量评价。

2.2 确定因素集及其权重

航天测控系统容灾能力的因素集如图 1 所示,其对应的权重分别如表 2、表 3、表 4 和表 5 所示。

2.3 确定隶属函数

构造因素集中各因素  $u_i (i = 1, 2, \dots, n)$  到各评语  $\tilde{V} = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{强}, \text{较强}, \text{一般}, \text{弱}, \text{很弱}\}$  的隶属函数,也就是确定每个评估指标对每个评语的隶属(程)度。假设指标  $u_i$  归一化后的指标值为  $x_i$ ,并且确定了每个评语的量值  $e_i$ ,则  $x_i$  距离  $e_i$  越近,  $u_i$  对  $v_i$  的隶属度越高,隶属度变化随着距离量值越远变化越缓慢。据此,建立各因素  $u_i$  对  $v_i$  的隶属度函数为抛物线型分布<sup>[11,12]</sup>,即:

①  $v_1$  级的隶属函数选取偏大型分布为:

$$A_1(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < 70 \\ (\frac{x_i - 70}{20})^{1.2} & 70 \leq x_i \leq 90 \\ 1 & x_i > 90 \end{cases}$$

②  $v_2, v_3, v_4$  级的隶属函数选取中间型分布,其隶属函数分别为:

$$A_2(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < 50 \\ (\frac{x_i - 50}{17.5})^{1.2} & 50 \leq x_i \leq 67.5 \\ 1 & 67.5 < x_i < 72.5 \\ (\frac{90 - x_i}{17.5})^{1.2} & 72.5 \leq x_i < 90 \\ 0 & x_i \geq 90 \end{cases}$$
$$A_3(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < 30 \\ (\frac{x_i - 30}{17.5})^{1.2} & 30 \leq x_i \leq 47.5 \\ 1 & 47.5 < x_i < 52.5 \\ (\frac{70 - x_i}{17.5})^{1.2} & 52.5 \leq x_i < 70 \\ 0 & x_i \geq 70 \end{cases}$$
$$A_4(x_i) = \begin{cases} 0 & x_i < 10 \\ (\frac{x_i - 10}{17.5})^{1.2} & 10 \leq x_i \leq 27.5 \\ 1 & 27.5 < x_i < 32.5 \\ (\frac{50 - x_i}{17.5})^{1.2} & 32.5 \leq x_i < 50 \\ 0 & x_i \geq 50 \end{cases}$$

③ $v_5$  级的隶属函数选取偏小型分布为:

$$A_5(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i < 10 \\ (\frac{30-x_i}{20})^{1.2} & 10 \leq x_i \leq 30 \\ 0 & x_i > 30 \end{cases}$$

## 2.4 航天测控系统容灾能力模糊综合评判

设因素集  $u_i (i=1, 2, \dots, n)$  和评语集  $\tilde{V}$  之间的模糊关系为  $\tilde{R} = (r_{ij})_{n \times m}$ ,  $r_{ij}$  是  $u_i$  和  $V_j$  之间的隶属关系。若因素集  $u_i (i=1, 2, \dots, n)$  对应的权重集为  $\tilde{\omega} = \{\omega_i\} (i=1, 2, \dots)$ , 则模糊综合评判记为:

$$\tilde{P} = \tilde{\omega} \circ \tilde{R} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} =$$

$$(b_1, b_2, \dots, b_m),$$

其中:  $b_j = (\omega_1 * r_{1j}) * (\omega_2 * r_{2j}) * \dots * (\omega_n * r_{nj})$ ;  $j=1, 2, \dots, m$ 。

文中采用  $M(\bullet, +)$  模型作为模糊运算符  $M(*, *)$  的运算规则。该运算采用了实数加乘运算, 充分考虑了指标权重和各指标的隶属度在综合计算中的作用, 被称作加权平均模型, 该模型适于主次因素并不明显的评估情形, 综合程度比较强。

通过专家咨询和问卷调查方式, 得到航天测控系统容灾能力评价体系指标层指标的评分, 并由此计算  $E_i$  和  $V_j$  之间的隶属关系如表 7 所示。

### ①一级评判计算。

$B_1$  的模糊评判向量为:

$$\tilde{P}_1 \approx \tilde{\omega}_{B_1} \bullet \tilde{R}_1 = [0.096, 0.160, 0.277, 0.467] \bullet$$

$$\begin{bmatrix} 0.708 & 0.222 & 0 & 0 & 0 \\ 0.435 & 0.511 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.222 & 0.831 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= [0.415 \ 0.207 \ 0.388 \ 0 \ 0]$$

$B_1$  的加权平均判决值为:

$$V_{B_1} = \tilde{P}_1 \bullet E^T = [0.415 \ 0.207 \ 0.388 \ 0 \ 0] \bullet$$

$$\begin{bmatrix} 90 \\ 70 \\ 50 \\ 30 \\ 10 \end{bmatrix} = 71.2$$

同理,  $B_2$  和  $B_3$  的模糊评判向量和加权平均判决值分别为:

$$\tilde{P}_2 = \tilde{\omega}_{B_2} \bullet \tilde{R}_2 = [0.251 \ 0.534 \ 0.198 \ 0 \ 0]$$

$$\tilde{P}_3 = \tilde{\omega}_{B_3} \bullet \tilde{R}_3 = [0.16 \ 0.612 \ 0.239 \ 0 \ 0]$$

$B_2$  的加权平均判决值为  $V_{B_2} = 69.9$ ;

$B_3$  的加权平均判决值为  $V_{B_3} = 69.1$ 。

从准则层的综合评判结果来看, 航天测控系统在灾难恢复管理方面等级“较强”, 但缺乏应急计划测试演习方面的操作实践; 在灾难恢复规划方面等级“较强”, 但业务持续性规划还有待改进; 在灾难恢复技术措施方面等级“较强”, 但系统应用恢复措施还需进一步加强。

### ②二级评判计算。

目标层 A 的模糊评判向量为:

$$\tilde{P} = W_A \bullet \tilde{R} = [0.297 \ 0.164 \ 0.539] \bullet$$

表 7 航天测控系统容灾能力指标评分表

准则层	权重	指标层	权重	指标评分	隶属度				
					$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$
$B_1$	0.297	$C_1$	0.096	85	0.708	0.222	0	0	0
		$C_2$	0.160	80	0.435	0.511	0	0	0
		$C_3$	0.277	90	1	0	0	0	0
		$C_4$	0.467	55	0	0.222	0.831	0	0
$B_2$	0.163	$C_5$	0.387	60	0	0.511	0.511	0	0
		$C_6$	0.212	70	0	1	0	0	0
		$C_7$	0.120	80	0.435	0.511	0	0	0
		$C_8$	0.069	85	0.708	0.222	0	0	0
		$C_9$	0.212	85	0.708	0.222	0	0	0
$B_3$	0.540	$C_{10}$	0.096	70	0	1	0	0	0
		$C_{11}$	0.160	90	1	0	0	0	0
		$C_{12}$	0.467	60	0	0.511	0.511	0	0
		$C_{13}$	0.277	70	0	1	0	0	0

$$\begin{bmatrix} 0.034 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0.0101 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

目标层 A 的加权平均判决值为:

$$V_A = [0.0101 \quad 1.0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 90 \\ 70 \\ 50 \\ 30 \\ 10 \end{bmatrix} = 70.9$$

从模糊综合评判结果判断,航天测控系统的总体容灾能力等级“较强”,但是结合准则层的综合评判结果分析,航天测控系统在灾难恢复管理、灾难恢复规划及灾难恢复技术措施三方面都还有需要提高之处。特别是,航天测控系统担负保障航天任务安全可靠的重任,其容灾能力要求更为严格,应该从各方面着手加强,争取将其容灾能力提高至“强”等级水平。

### 3 结束语

通过层次分析和模糊评判相结合的方法对航天测控系统容灾能力进行评估,综合考虑了定量计算和定性评价两个方面,能够为建设航天测控容灾系统提供合理、有效的参考依据。在以后的工作中,将进一步对评价指标体系进行优化,并根据评估结果针对容灾建设中存在的不足之处进行改进,建设完善的航天测控容灾系统。

(上接第 222 页)

义的分析机制构建了用于度量一致性的模型和推理引擎算法。结果表明,利用该方法可以有效地实现网络中策略到措施转换一致性的验证,为分析网络安全系统转换效率提供了一种有效方法。需要指出的是,语义的一致性比较具有较强的主观性,策略转换后措施的可行性仍需在网络中实际运行予以验证,如何将运行结果引入到一致性的语义分析中有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Stern D F. On the Buzzword “Security Policy” [C]//Proceedings of the Symposium on Security and Privacy. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991: 219-230.
- [2] Damianou N, Bandara K A, Sloman M, et al. A Survey of Policy Specification Approaches [D]. London, UK: Imperial College, 2002.
- [3] Verma D. Simplifying Network Administration Using Policy Based, Management [J]. IEEE Network, 2002, 16(2): 20-26.
- [4] 魏凯斌,冉延平,余牛. 语义相似度的计算方法研究与分析[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(7): 102-105.

#### 参考文献:

- [1] 夏南银. 航天测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 张卫民. 航天飞控软件的二维容错体系结构设计[J]. 计算机工程, 2008, 34(5): 265-267.
- [3] 厉剑, 廉国斌, 黄栋. 数据容灾系统与 CDP 技术[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(1): 168-171.
- [4] Lyu M R. Handbook of Software Reliability Engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [5] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. New York: Hill, 1980.
- [6] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1989.
- [7] Bard J F, Sousk S F. A Tradeoff Analysis for Rough Cargo Handlers Using the AHP: an Example of Group Decision Making [C]//Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. [s. l.]: [s. n.], 2005.
- [8] 刘宁, 高飞燕. 基于 AHP-FCE 的供应商选择问题研究与应用[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(11): 11-15.
- [9] 黄松, 夏洪亚, 谈利群. 基于模糊综合的信息安全风险评估[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(1): 189-192.
- [10] 胡宝清. 模糊理论基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [11] 陈敏刚, 董军, 张丽亮. AHP 和模糊综合评判在灾难恢复能力评估中的应用[J]. 计算机工程, 2006, 32(18): 135-137.
- [12] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究[J]. 兵工学报, 2010, 31(1): 68-73.
- [5] Cilibrasi R L. The Google Similarity Distance [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2007, 19(3): 370-383.
- [6] 董振东. 语义关系的表达和知识系统的建造[J]. 语言文字应用, 1998(3): 79-85.
- [7] 李峰, 李芳. 中文词语语义相似度计算-基于知网 2000 [J]. 中文信息学报, 2007(3): 99-105.
- [8] 杨哲. 基于启发式规则的本体概念语义相似度匹配[J]. 计算机应用, 2007, 27(12): 2919-2921.
- [9] 张明宝, 马静. 一种基于知网的中文词义消歧算法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(2): 9-11.
- [10] Hao Senshen, Jiao Jian, Xia Chunhe, et al. Semantic similarity analysis model for CND policy and measure [C]//Proceedings of 2010 International Conference on Educational and Information Technology (ICEIT'10). Chongqing, China: [s. n.], 2010, 340-343.
- [11] 夏春和, 魏玉娣, 李肖坚, 等. 计算机网络防御策略描述语言研究[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(1): 89-99.
- [12] 陆汝钊. 计算机语言的形式语义[M]. 北京: 科学出版社, 1972: 186-187.