

基于云模型和改进灰色关联分析模型的网络服务质量综合评估

孙明玮 齐玉东

(海军航空大学 山东 烟台 264001)

摘要 随着多媒体技术以及高速网络技术的飞速发展,各种对质量要求更高的新型网络不断出现。针对当前的传统计算机网络只能提供“尽力而为”的服务,无法保证提供较高的服务质量以及对突发的新型业务进行快速有效评估的问题,文中通过测量网络服务质量的性能参数,构建基于云-改进的灰色关联分析模型的网络服务质量综合评估模型,以实现测量数据的实时快速归类。实验表明,该方法能够得到准确的评估结果,对开发综合评估方法有很好的指导意义。

关键词 网络服务质量,改进灰色关联模型,云模型

中图分类号 TP393.0 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.05.049

Comprehensive Evaluation of Network Service Quality Based on Cloud Model and Improved Grey Relational Analysis Model

SUN Ming-wei QI Yu-dong

(Naval Aeronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract With the rapid development of multimedia technology and high-speed network technology, various new network applications with higher quality requirements are constantly emerging. In view of the problem that current traditional computer network can only provide the “best” of services, and can not guarantee high quality of service and fast and effective evaluation of sudden new business, through measuring the performance parameters of network service quality, this paper proposed a comprehensive evaluation model of network service quality based on cloud-improved grey relational analysis model, so as to realize real-time and rapid classification of measurement data. The experiment shows that this method can get accurate evaluation results and has good guiding significance for exploring the comprehensive evaluation method.

Keywords Network service quality, Improved grey relational model, Cloud model

1 引言

随着 Web 服务技术的飞速发展和广泛应用,Web 服务的服务质量(Quality of Service, QoS)与功能属性扮演着相同的角色^[1],但是仅仅基于用户功能需求的 Web 服务无法满足预期服务效果。为用户提供满足预期要求的网络服务是当前亟待解决的问题。

目前,关于网络服务质量综合评估的研究已经取得一定成果:赵立军^[2]设计出一种以模糊层次理论为基础的 QoS 性能评估模型,根据最大隶属度原则确定综合评价等级;胡晓艳等^[3]提出基于应用区分的精细化网络服务质量评估模型,通过确定 QoS 达成度、QoS 满意度及 QoS 等级来细致地刻画用户得到的 QoS;罗智慧^[4]从基础性能测量和以 Web 业务为代表的典型网络业务服务质量测量出发,搭建了 IP 网络服务质量监测系统,通过捕捉相关数据来实现对网络服务质量的综合分析。以上研究方法虽然能够很好地解决问题,但均存在

不足之处:关于评价指标重要程度的确定,通常采用的是主观权重确定方法,而该方法的主观性较强,容易造成分配指标权重意见不统一的错误;此外,在不同的领域存在不同的评价标准,要针对所研究的内容确定针对性强的评价标准。

针对以上研究的不足,本文拟建立一种基于云-改进的灰色关联分析模型的网络服务质量综合评估模型。该方法应用最小二乘法求出最优组合权重,使得最终得到的权重更客观、更可信。最后通过将云模型与改进灰色关联模型相结合得出网络服务质量综合评价等级,可为多层次、多准则综合评价系统提供一种新的思路。

2 主观权重法与客观权重法

评价指标的权重计算方法可以分为主观权重法和客观权重法。本文采用层次分析法确定评价指标的主观权重,具体计算过程参考文献[5]。

本文采用熵值法确定评价指标的客观权重^[6-7]。在信息

到稿日期:2018-03-27 返修日期:2018-07-02

孙明玮(1993—),男,硕士生,主要研究方向为网络作战与辅助决策,E-mail:476726618@qq.com;齐玉东(1973—),博士,副教授,主要研究方向为指挥信息系统,E-mail:476726618@qq.com(通信作者)。

论中,熵(entropy)是对不确定性的一种度量。信息量越大,不确定性就越小,熵值也越小;反之,信息量越小,不确定性越大,熵值也越大。因此可根据各项指标的变异程度,利用信息熵计算各个指标的权重。熵值法的主要计算步骤如下:

1)计算第 j 项指标第 i 条数据占该指标的比重:

$$P_{ij} = x_{ij}' / \sum_{i=1}^m x_{ij}' \quad (1)$$

2)计算第 j 项指标的熵值:

$$E_j = (\sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}) / \ln m \quad (2)$$

3)计算各指标的权重:

利用上述方法在计算差异系数时不具有自适应性,为了弥补其存在的缺点,使用式(3)进行计算:

$$\omega_j = (\max\{E_j\} / E_j) / \sum_{j=1}^n (\max\{E_j\} / E_j) \quad (3)$$

3 基于最小二乘法的组合权重优化模型

采用主观权重法确定的指标权重反映了决策者的偏好,但是评价结果受主观因素的影响较大;采用客观加权法得到的指标权重具有数学理论基础,但是它忽略了决策者的偏好。为了使决策过程和结果更加科学,合理的方法是根据特定的优化算法将不同权重方法得到的权重组合在一起。这样得到的结果不仅能够反映主观和客观的信息,而且更具有说服力^[8]。因此本文采用基于最小二乘法的组合赋权优化模型获取最优的权重值。

设主观法确定的权重为 $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$,客观法确定的权重为 $v = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$,定义组合权重为 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$,原始测量数据经过标准化处理后得到的矩阵为 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ (其中 m 表示数据条数, n 表示指标个数),根据最小二乘模型构造如下函数:

$$\begin{aligned} \min g(\omega) &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega \{ [(u_j - \omega_j) z_{ij}]^2 + [(v_j - \omega_j) z_{ij}]^2 \} \\ \text{s. t. } & \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

最小二乘法的优化问题可以通过构造拉格朗日函数求解:

$$\begin{aligned} L(\omega, \lambda) &= g(\omega) + \lambda (\sum_{j=1}^n \omega_j - 1) \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{ [(u_j - \omega_j) z_{ij}]^2 + [(v_j - \omega_j) z_{ij}]^2 \} + \\ & \quad 4\lambda (\sum_{j=1}^n \omega_j - 1) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, λ 表示拉格朗日参数,通过计算 $\frac{\partial L}{\partial \omega_j} = 0$ 和 $\frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0$ 得到最优的组合权重值:

$$\begin{cases} A\omega + \lambda DE = B \\ \omega^T E = E^T \omega = 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \text{diag}[\sum_{i=1}^m z_{i1}^2, \sum_{i=1}^m z_{i2}^2, \dots, \sum_{i=1}^m z_{in}^2] \\ E = [1, 1, \dots, 1]^T \\ B = [\sum_{i=1}^m \frac{(u_1 + v_1) z_{i1}^2}{2}, \sum_{i=1}^m \frac{(u_2 + v_2) z_{i2}^2}{2}, \dots, \sum_{i=1}^m \frac{(u_n + v_n) z_{in}^2}{2}]^T \\ \omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n] \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)做如下整理:

$$\begin{bmatrix} E^T \omega = E^T A^{-1} A \omega = 1 \\ A \omega = B - E \lambda \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} E^T A^{-1} A \omega = 1 = E^T A^{-1} (B - E \lambda) \\ \lambda = \frac{E^T A^{-1} B - 1}{E^T A^{-1} E} \end{bmatrix} \quad (8)$$

最后得到最优组合权重:

$$\omega = A^{-1} [B + \frac{1 - E^T A^{-1} B}{E^T A^{-1} E} E] \quad (9)$$

4 灰色关联分析模型及其改进

灰色关联分析理论^[9-10]是灰色系统理论中最成熟、应用最广泛的一种分支理论,其实质上是对系统动态发展态势做出定量描述和比较的分析方法。该方法通过计算反映系统行为为特征的比较序列与参考序列之间的关联系数和关联度来对关联度进行排序、分析,最终得到相应的结果。具体的计算步骤如下。

1)无量纲处理。由于测量数据的数量级和量纲不同,导致各个指标数据之间不存在可比性,因此需要对测量数据进行无量纲处理来消除量纲。本文使用极差法进行无量纲处理。

2)计算比较序列与参考序列之间的关联系数。设参考序列为 $X_{0j} = (x_{01}', x_{02}', \dots, x_{0m}')$,一般情况下选择各个指标的最优值;比较序列为 $X_{ij} = (x_{i1}', x_{i2}', \dots, x_{im}')$, $i = 1, 2, \dots, N$ 。则关联系数的计算公式如下:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x_{0j}' - x_{ij}'| + \rho \max_i \max_j |x_{0j}' - x_{ij}'|}{|x_{0j}' - x_{ij}'| + \rho \max_i \max_j |x_{0j}' - x_{ij}'|} \quad (10)$$

其中, $\rho \in (0, 1]$ 表示分辨系数,通常取 0.5。由式(10)可知,分辨系数 ρ 与 $\max_i \max_j |x_{0j}' - x_{ij}'|$ 的乘积对整个公式的值有较大的影响, ρ 的取值间接影响 $\max_i \max_j |x_{0j}' - x_{ij}'|$ 对关联度的贡献。为了使分辨系数具有更好的分辨能力,应该根据具体的实验数据动态调整 ρ 的取值,使其满足如下条件^[11-12]:

①在数据平稳的情况下取较大值;

②当数据出现异常值时,应将 ρ 的取值尽量减小,从而削弱 $\max_i \max_j |x_{0j}' - x_{ij}'|$ 的异常状态对关联系数的影响。

ρ 的具体取值方法分为如下 3 种情况:令

$$\begin{cases} \max_i \max_j |y_j^+ - y_{ij}^-| = M \\ \theta_j = \sum_{i=1}^N |y_j^+ - y_{ij}^-| / N * \max_i \max_j |y_j^+ - y_{ij}^-| \end{cases} \quad (11)$$

①当 $M > \frac{3}{N} \sum_{i=1}^N |y_j^+ - y_{ij}^-|$ 时,说明测量数据出现异常值,

应通过 ρ 来削弱 $\max_i \max_j |x_{0j}' - x_{ij}'|$ 对关联系数的影响,此时, $\rho \in [\theta_j, 1.5\theta_j]$,通常情况取 $\rho = 1.5\theta_j$ 。

②当 $\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N |y_j^+ - y_{ij}^-| < M < \frac{3}{N} \sum_{i=1}^N |y_j^+ - y_{ij}^-|$ 时,说明测量数据比较稳定,应通过 ρ 来加大 $\max_i \max_j |x_{0j}' - x_{ij}'|$ 对关联系数的影响,此时, $\rho \in [1.5\theta_j, 2\theta_j]$,通常情况取 $\rho = 2\theta_j$ 。

③当 $0 < M < \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N |y_j^+ - y_{ij}^-|$ 时, ρ 可以取(0.8, 1)中的任意值。

3)计算关联度。传统关联度计算公式是求关联系数的平

均值,该方法没有考虑各个指标在整个指标评价体系结构中的重要程度,最终得到的结果可能不够精确。因此,本文采用加权的方法,将各个指标得到的关联系数与权重相乘并求和作为最终的关联度。

$$r_k = \sum_{i=1}^m \xi_{ik} \omega_k \quad (12)$$

5 云模型

由表 1 可知,不同类型的业务对服务质量的要求不同,因此需要针对研究对象构建具有针对性的网络服务质量评价标准。本文使用云模型^[13-15]将定性概念转换成相对应的定量数据,以此来构建评价标准^[16]。

表 1 典型的网络服务对 QoS 的要求

Table 1 Typical network service requirements for QoS

网络应用	带宽	分组延迟	延迟抖动	分组丢失率
FTP	较高	≤几分钟	无要求	0
Email	一般	≤几分钟	无要求	0
Telnet	较低	≤几十秒	无要求	0
IP 电话	>16 Kbps	≤150 ms	≤1 ms	≤10 ⁻²
MPEG-1	≥1.86 Mbps	≤250 ms	≤1 ms	≤10 ⁻² (未压缩) ≤10 ⁻¹¹ (压缩)
视频传输	≥20 Mbps (有损压缩)	≤250 ms	≤1 ms	≤10 ⁻² (未压缩) ≤10 ⁻¹¹ (压缩)

云模型表示某个定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型,它主要反映客观世界中事物的或人类知识中概念的模糊性和随机性,并将二者完全集成在一起,构成定性与定量相互之间的映射。

利用云的整体数字特征(Ex, En, He)来表征定性概念的整体特征^[17]。其中, Ex (Expected value)是数域空间中代表定性概念的值,反映云滴群的云中心; En (Entropy)用来综合度量定性概念的模糊度和概率,揭示模糊性和随机性的关联性; He (Hyper Entropy)为 En 的不确定性度量,称为超熵,反映了数域空间代表该语言值的所有点的不确定度的凝聚性,即云滴的凝聚度,它的大小间接表示云的离散程度和厚度,数值越大,云滴的离散程度越大,云的厚度也越大。

由于云模型具有较强的模糊性和随机性,因此在应用上使用论域中的所有元素对定性概念 T 的总贡献 C 来衡量。

$$C = \frac{1}{\sqrt{2\pi}En} \int_{Ex-3En}^{Ex+3En} C_T(x) dx = 99.74\% \quad (13)$$

对论域中的定性概念 T 有贡献的定量值主要落在 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$,因此可以忽略 $[Ex - 3En, Ex + 3En]$ 区间之外的定量值对定性概念 T 的贡献。

在云模型中,将定性概念转换成定量数据的云发生器称为正向云发生器,其具体算法如算法 1 所示。

算法 1

输入:(Ex, En, He)和所要生成的云滴总数 N

输出: N 个云滴 x_i 及其确定度 $\mu_i, i=1, 2, \dots, N$

1. 生成期望值为 En 、方差为 He^2 的一个正态随机数 $En_i = NORM(En, He^2)$;
2. 生成期望值为 Ex 、方差为 En_i^2 的一个正态随机数 $x_i = NORM(Ex, En_i^2)$;
3. 通过式(14)计算的确定度:

$$\mu_i = e^{-\frac{(x_i - Ex)^2}{2En_i^2}} \quad (14)$$

将定量数据转换成定性概念的云发生器称为逆向云发生器,其具体算法如算法 2 所示。

算法 2

输入: N 个云滴 $x_i, i=1, 2, \dots, N$

输出: N 个云滴的定性概念(Ex, En, He)

1. 计算云滴 x_i 的样本均值 \bar{X} 和样本方差 S^2 ,并将样本均值作为期望值 Ex 。

2. 计算熵 En :

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - Ex|} \quad (15)$$

3. 计算超熵 He :

$$He = \sqrt{S^2 - En^2} \quad (16)$$

6 实例分析

6.1 网络服务质量指标评语集

通过对网络服务质量参数指标的综合分析,本文选用文献^[2]提供的数据,构建 3 个一级评价指标,即 IP 传输时延、IP 网络带宽、IP 丢包率,同时细分出每个一级评价指标所对应的二级评价指标,最终形成图 1 所示的网络服务质量指标评语集。

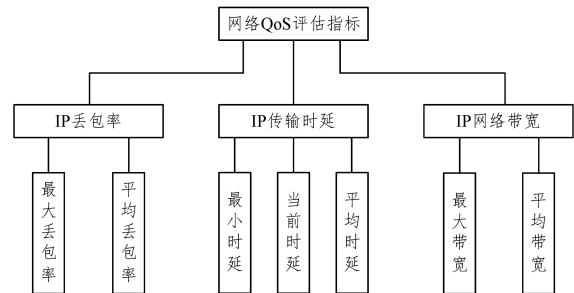


图 1 网络服务质量指标评语集

Fig. 1 Comment set of network QoS indicators

6.2 网络服务质量评价等级的云模型

根据各个评价指标等级标准对应表,按照表 2 提供的云模型生成方法确定 5 个评价等级分别对应的数字特征,结果如表 3 所列。

表 2 云模型的数字特征与值域关系对照表

Table 2 Numerical comparison of cloud features and value range

论域划分	$U_1 \in [a_1, b_1]$ (半降云)	$U_i \in [a_i, b_i]$ (正态云)	$U_m \in [a_m, b_m]$ (半升云)
Ex	a_1	$(b_i + a_i)/2$	b_m
En	$(b_1 - a_1)/3$	$(b_i - a_i)/6$	$(b_m - a_m)/3$
He	常数	常数	常数

表 3 QoS 综合评估等级的云模型数字特征

Table 3 Cloud model digital characteristics of network quality of service comprehensive evaluation

QoS 评价等级	论域划分	数字特征
优	0.85~1.0	(1.0, 0.15/3, 0.05)
良	0.7~0.85	(0.775, 0.15/6, 0.05)
中	0.5~0.7	(0.6, 0.2/6, 0.05)
较差	0.3~0.5	(0.4, 0.2/6, 0.05)
差	0~0.3	(0, 0.3/3, 0.05)

6.3 各指标综合权重及云模型数字特征

首先根据层次分析法和改进的熵值法计算各个二级指标的权重,然后利用最小二乘算法计算最优组合权重,结果如表 4 所列。接着利用综合云技术,由式(17)计算各个一级指标以及待确定评价等级的目标层云模型对应的数字特征,结果如表 5 所列。

Equation (17) defining Ex, En, and He based on weights and entropy values.

表 4 网络服务质量的评价指标权重

Table 4 Evaluation index weight of network service quality

Table with 4 columns: 指标, FAHP 法, 改进熵值法, 组合权重. Lists weights for various network service quality indicators.

表 5 各指标云模型数字特征

Table 5 Numerical characteristics of each indicator cloud model

Table with 3 columns: 指标层, IP 网络带宽, 最大带宽. Lists numerical characteristics for various indicators.

6.4 目标层与评价等级之间的关联系数和关联度

(1)将得到的目标层云模型数字特征通过正向云发生器生成 n 个云滴,同时确定每个云滴的确定度 μi = (μ1, μ2, ..., μn) 并将其作为参考序列。

(2)将步骤(1)得到的 n 个云滴运用正向云发生器生成相对于 5 个评价等级的确定度,并将其作为比较序列,记作:

Equation defining μki as a matrix of determination degrees for 5 evaluation levels.

(3)由式(10)、式(12)计算关联系数与关联度,最终结果如图 2 所示。

由最大关联度理论可知,关联度 rk 越大,说明待评价的网络服务质量评估等级与提供的 5 个等级中第 k 个等级越接近,因此选择最大的关联度作为最终网络服务质量评价等级。

由表 4 得到的目标层云模型数字特征可知:云模型的期望 Ex=0.7422(取 4 位有效数字),说明目标层评价等级的中心值为 0.7422,也就是说其可信度为 0.7422;云模型的熵值 En=0.2037,说明云滴分布较为集中;云模型的超熵值 He=0.0724,说明其可信度比较稳定,没有较大的数值波动。将目标层云模型的数字特征与表 3 进行分析可知,目标层云模型得到的数字特征与网络服务质量综合评估等级云模型数字特征中的等级“良好”较为接近,不足的是熵值较大,说明目标层云模型数值的分布精度有待提高,可以通过适当扩大实验数据量来提高最终结果的精度。

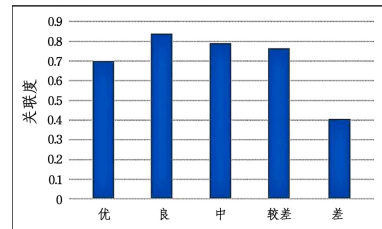


图 2 目标层与评价等级的关联度

Fig. 2 Correlation between target level and evaluation level

综合目标层云模型数字特征的分析结果和图 2 的目标层与评价等级的关联度可知,通过最大隶属度原则得到的网络服务质量等级的最终评价结果为“良好”。

结束语 本文对网络服务质量综合评估方法进行研究,提出一种基于云-改进灰色关联分析评估方法。该方法既能保证评价的多层次性以及处理较为复杂的问题,又可以利用现有的数据信息将实际方案与最优方案建立关联,以达到充分利用现有数据和专家经验做出决策的目的。

本文提出的研究方法结构简单、对数据的数量以及分布规律没有提出较为严格的要求,具有处理灰色系统的独特优势,但该方法仅适用于处理数据量较小的情况。如今我们已经处于大数据的环境下,每秒都会产生海量的网络数据,因此下一步的研究工作可以借鉴神经网络相关理论分析处理大量的测量数据,使神经网络去学习数据中隐含的规则,建立相应的非线性数学模型,并不断进行修正,能够更好地对网络服务质量进行分析处理,从而使得输出结果精度更高、更具有说服力。

参 考 文 献

List of references including XIAO X C, WANG X Q, FU K Y, et al. Grey Relational Analysis on Factors of the Quality of Web Service[J]. Physics Procedia, 2012, 33:1992-1998.

- 放军理工大学自然科学版,2011,12(1):37-41.
- [4] LUO Z H. Research and implementation of IP network QoS monitoring[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014. (in Chinese)
罗智慧. IP 网络服务质量监测研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2011.
- [5] JALLOH M M, ZHOU Y D, HUANG J, et al. Network-Cloud service selection algorithms: a comparative study [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2016, 28(4):575-584. (in Chinese)
JALLOH M M, 周易德, 黄俊, 等. 网络-云组合服务选择算法对比研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(4):575-584.
- [6] YUE C. Entropy-based weights on decision makers in group decision-making setting with hybrid preference representations [J]. Applied Soft Computing, 2017, 60.
- [7] SUN L Y, MIAO C L, YANG L. Ecological-economic efficiency evaluation of green technology innovation in strategic emerging industries based on entropy weighted TOPSIS method[J]. Ecological Indicators, 2017, 73:554-558.
- [8] LI G, LI J P, SUN X L, et al. Research on a Combined Method of Subjective-Objective Weighing and the Its Rationality[J]. Business Review, 2017, 29(12):17-26, 61. (in Chinese)
李刚, 李建平, 孙晓蕾, 等. 主客观权重的组合方式及其合理性研究[J]. 管理评论, 2017, 29(12):17-26, 61.
- [9] LIU S F, CAI H, YANG Y J, et al. Advance in grey incidence analysis modelling[J]. System Engineering Theory and Practice, 2013, 33(8):2041-2046. (in Chinese)
刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8):2041-2046.
- [10] SUN G, GUAN X, YI X, et al. Grey relational analysis between hesitant fuzzy sets with applications to pattern recognition[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 92:521-532.
- [11] JIA Z C, ZHAO Z G, SONG L L, et al. Research on Coal and Gas Outburst Prediction Based on Improved Gray Associated Analysis[J]. Coal Technology, 2016, 35(9):139-141. (in Chinese)
贾志闯, 赵志刚, 宋璐璐, 等. 基于改进灰色关联分析方法的煤与瓦斯突出预测研究[J]. 煤炭技术, 2016, 35(9):139-141.
- [12] LI Y J, FANG R M. Reliability assessment for wind turbine based on weighted degree of improved grey incidence[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14):63-69. (in Chinese)
李玉洁, 方瑞明. 基于改进加权灰关联分析法的风电机组可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14):63-69.
- [13] FU B, LI D G, WANG M K. Review and prospect on research of cloud model[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(2):420-426. (in Chinese)
付斌, 李道国, 王慕快. 云模型研究的回顾与展望[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2):420-426.
- [14] YE Q, LI S W, ZHANG Y H, et al. Cloud model and application overview[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(12):4198-4201. (in Chinese)
叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(12):4198-4201.
- [15] GAO H B, XIE G T, LIU H Z, et al. Lateral control of autonomous vehicles based on learning driver behavior via cloud model [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2017, 24(2):10-17.
- [16] LIU C, YIN J Q. Internet quality of service overview[J]. China Digital Cable TV, 2015(8):930-932. (in Chinese)
刘昶, 尹家强. 互联网服务质量概述[J]. 中国有线电视, 2015(8):930-932.
- [17] RAN Y H. A Research on Teacher's Teaching Quality Evaluation Based on Gray Relational Analysis [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2014. (in Chinese)
冉燕辉. 基于灰关联分析的教师教学质量评价研究[D]. 重庆:重庆师范大学, 2014.