

模糊信元丢弃：一种公平有效机制的研究

程东年* 刘增基

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

【摘要】 提出了一种基于模糊逻辑的信元丢弃机制，该新机制不仅是丢弃具有低级信元丢弃优先权的信元，而且能较公平地丢弃网络资源消耗量最小的信元。定义了对称模糊集，并给出了两个性质；建立了通过模糊推理计算网络资源有效性及信元丢弃公平性对信元丢弃的模糊定量关系，并以此确定了相应的信元选择规则。模拟分析表明，该机制可在公平性基础上较明显地减小因丢弃信元而导致的网络资源损失。

关键词 异步转移模式；服务质量；选择性信元丢弃；模糊逻辑

中图分类号 TN913.24

网络对信元丢失率(CLR)的确保是整个用户 QoS 保证体系的一个重要组成部分。丢弃信元虽可缓解或消除网络结点的拥塞^[1, 2]，但又直接降低用户业务的 QoS。对信元丢弃机制的设计已做了许多研究，如 A.Y.Lin 等人提出了基于后入先丢信元选择策略的模型^[3]；D.W.Petr 等人提出了针对不同队列阈值的嵌套阈值型信元丢弃机制^[4]；L.Tassiulas 等人分析并比较了单一和多个信元丢弃的优化模型等^[5]。这些建立在 CLP 基础上的信元丢弃机制选择低级 CLP 信元的准则通常都只是这些信元的某些局部特征，如其到达次序及在队列中与其他信元的某些相对关系等。近年来，具有无需模型、基于知识和软计算等优点的模糊逻辑被越来越多地用于宽带综合业务数字网的设计^[6-9]。由于对用户业务 QoS 和网络性能有显著影响，有必要设计能够低代价、高效率及公平实现信元丢弃的有效机制。本文提出了一种基于模糊推理的信元丢弃机制(CDSFE)，通过模糊集合、模糊规则和模糊推理构造了信元转发强度、信元丢弃公平因子对信元丢弃强度之间的一种模糊定量关系。

1 对称模糊集合

如果定义在一维论域 X 上的一个模糊集合 $F = \{ \langle x, \mu_F(x) \rangle \mid x \in X, \mu_F(x) \in [0, 1] \}$ 的任一 λ -截集 $F_\lambda = \{ w \mid \mu_F(w) \geq \lambda, w \in X, \lambda \in [0, 1] \}$ 均为一闭区间，则可用 $[x_{F_\lambda}^l, x_{F_\lambda}^r]$ 表示 F_λ ，其中 $x_{F_\lambda}^l, x_{F_\lambda}^r \in X, \lambda \in [0, 1]$ 。令第 j 条模糊规则 R_j 的形式为：如果 x^1 为 P_j^1 ，且 x^2 为 P_j^2 ， x^n 为 P_j^n ，则 y 为 C_j ($j=1, 2, \dots, N$)，其中 $x = (x^1 \ x^2 \ \dots \ x^n)^T$ ， $P_j = (P_j^1 \ P_j^2 \ \dots \ P_j^n)^T$ 分别为 R_j 的输入语言变量和前提向量， y 和 C_j 分别为 R_j 的输出语言变量及结论，又设给定输入 x_0 对应的前提和结论分别是 x_0^i 为 P_j^i ，且 x_0^j 为 P_j^j ， x_0^n 为 P_j^n (记作 P_{0j}) 和 y_0 为 C_j ， R_j 的隶属函数可定义为 $\mu_{R_j}(y_0) = \sup_{x_0} \{ \mu_{P_j^1 \times P_j^2 \times \dots \times P_j^n \rightarrow C_j}(x_0, y_0) \mu_A(x_0) \}$ ^[6]。特别地，当分别使用模糊单值和最小化算子对所有输入语言变量模糊化和进行模糊蕴涵操作时， P_{0j} 与 R_j 的前提之间的兼容度 p_j 可定义为 $p_j = \min \{ \mu_{P_j^i}(x_0^i) \} (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, N)$ 。这样，可得到基于 WAI 的最终推理结论 $C_0 = \sum_{j=1}^N p_j C_j / \sum_{j=1}^N p_j$ ^[7]。如果所有模糊规则的结论均为正则的凸模糊集，则推理结论 C_0 仍为一个凸模糊集^[7]，也就是说对于 $\forall \lambda \in [0, 1]$ ，如果 $C_{j\lambda} = [x_{C_{j\lambda}}^l, x_{C_{j\lambda}}^r]$ ，那么有 $x_{C_0\lambda}^l = \sum_{j=1}^N p_j x_{C_{j\lambda}}^l / \sum_{j=1}^N p_j$ ， $x_{C_0\lambda}^r = \sum_{j=1}^N p_j x_{C_{j\lambda}}^r / \sum_{j=1}^N p_j$ 且 $C_{0\lambda} = [x_{C_0\lambda}^l, x_{C_0\lambda}^r]$ 。

定义 1(对称模糊集) 一维论域 X 上的模糊集合 F 是一个对称模糊集，当且仅当 $\exists \bar{x}_F \in X$ ，对

1999年5月10日收稿

*男 41岁 博士生 副教授

$\forall \lambda \in \Lambda$ 有

$$\bar{x}_F = \frac{x_{F\lambda}^u - x_{F\lambda}^l}{2} \quad (1)$$

式中 $\Lambda = \{\mu_F(x) | x \in X\}$, $x_{F\lambda}^l$ 和 $x_{F\lambda}^u$ 分别是 F 的 λ -截集(即 F_λ)的上界和下界, 并称 \bar{x}_F 为 F 的中心。

定义 2(半对称模糊集) 称一维论域 X 上的模糊集合 F 分别为一个右半对称模糊集或左半对称模糊集, 如果 $\exists x'_F \in X$, 有

$$\mu_F(x) \begin{cases} = 0 & x < x'_F \\ > 0 & x \geq x'_F \end{cases} \quad \text{或 } \exists x''_F \in X$$

有

$$\mu_F(x) \begin{cases} > 0 & x \leq x''_F \\ = 0 & x > x''_F \end{cases} \quad (2)$$

并称 x'_F 和 x''_F 分别为右半对称模糊集和左半对称模糊集的中心。

性质 1 若各模糊规则的结论均为对称模糊集, 则基于对称模糊集的 WAI 的结论必为一对称模糊集。

性质 2 若模糊规则结论 $C_j (j=2,3,\dots,N-1)$ 均为对称模糊集, C_1 和 C_N 分别为右半对称和左半对称模糊集, 则当 $p_1(x_{C_1,\lambda}^u - x_{C_1}^l) = p_N(x_{C_N}^u - x_{C_N,\lambda}^l)$ 时, 基于对称模糊集的 WAI 的结论必为一对称模糊集。

相对于非对称模糊集, 对称模糊集的优点是能简化去模糊化运算, 由于对称模糊集的中心点就是去模糊化运算的质心(COG)或最大值平均(MOM)法的横坐标, 所以该中心点可直接作为去模糊化运算的结果, 从而降低去模糊化运算的复杂度。模糊规则结论通常具有性质 2 中给出的形式, 此时, 对于给定的输入, 可以根据 $p_1(x_{C_1,\lambda}^u - x_{C_1}^l)$ 是否等于 $p_N(x_{C_N}^u - x_{C_N,\lambda}^l)$ 而直接判断推理出结果; 另外, 当 $p_1(x_{C_1,\lambda}^u - x_{C_1}^l)$ 与 $p_N(x_{C_N}^u - x_{C_N,\lambda}^l)$ 的差别很小时, 仍可用 $\mu_{C_0}(\lambda_m)$ 作为去模糊化的近似计算结果。

2 信元丢弃的模糊模型

构造一种基于 WAI 的信元丢弃机制, 其设计目标是确保各 VCC 内高级 CLP 信元的 CLR-QoS, 使因丢弃信元导致的平均网络资源损失量最小并实现各 VCC 间合理的丢弃公平性。

2.1 信元转发强度

记 D_j 为 VCC^j 所包含的 VCC 中间结点数(也称 D_j 为 VCC^j 或其内信元的 VCC 距离), 定义 r/D_j 为中间结点 $N_r (r=1,2,\dots,D_j)$ 对 VCC^j 的信元转发强度(或 VCC^j 内任一信元在 N_r 处的转发强度), 并记作 δ_j 。信元转发强度表征了一个信元已走过的相对网络行程或已消耗的网络资源量, 是信元的一种全局性特征, 本文提出的模糊信元丢弃机制正是将信元转发强度作为确定网络资源消耗量最小信元的准则, 而 r 则表征一个信元已消耗的绝对网络资源量。

2.2 信元丢弃公平因子

对网络结点 N_r , 设 δ_j 和 l_j 分别为 N_r 中 VCC^j 的信元转发强度和 N_r 对 VCC^j 已丢弃的低级 CLP 的信元数($j=1,2,\dots,m$), 且 N_r 中的 m 个 VCC 都有近似相同的低级 CLP 信元的比例, 则当

$$\frac{\delta_j}{\sum_{k=1}^m \delta_k} = \frac{1/(l_j + 1)}{\sum_{k=1}^m 1/(l_k + 1)} \quad (3)$$

成立时, 称 N_r 对 VCC^j 低级 CPL 信元的丢弃是公平的。记 Δ_j 和 L_j 分别为

$$\Delta_j = \frac{\delta_j}{\sum_{k=1}^m \delta_k} \quad L_j = \frac{1/(l_j + 1)}{\sum_{k=1}^m 1/(l_k + 1)} \quad (4)$$

则称 σ_j 为 N_r 对 VCC^j 低级 CLP 信元的丢弃公平因子: $\sigma_j = L_j/\Delta_j$ 。

显然, $\sigma_j = 1$ 表示对 VCC^j 中低级 CLP 信元的丢弃是公平的, 而 $\sigma_j \neq 1$ 则表示不公平, 具体地说,

$0 < \sigma_j < 1$ 和 $\sigma_j > 1$ 分别表示 N_j 对 VCC_j 低级 CPL 信元的过丢弃和欠丢弃。

2.3 模糊信元丢弃机制

为使因丢弃信元导致的网络资源损失量达到最小并实现各 VCC 间的低级 CLP 信元丢弃公平性, 可以为结点内的每个 VCC 构造一个称为“信元丢弃强度”的目标函数 $\varphi_j = f(\delta_j, \sigma_j) (j=1, 2, \dots, m)$, 其中 δ_j 和 σ_j 与 φ_j 间的定性关系应为: 1) 当 δ_j 较小或 σ_j 较大时, 对应的 φ_j 应较大; 2) 当 σ_j 等于或接近 1 时, δ_j 越小则 φ_j 越大。由于难以解析出 δ_j 和 σ_j 与 φ_j 间的定量关系, 故我们采用 WAI 的模糊推理构造了 δ 和 σ 对 φ 间的一种模糊定量关系, 基于这种模糊定量关系实现对 φ 的软计算, 进而构成了一个 CDSFE 的模糊信元丢弃机制, 以便计算该队列中所有低级 CLP 信元的 φ_k 值, 并且选择 $\max_k \{\varphi_k\}$ 对应的信元予以丢弃。

CDSFE 中的模糊推理机 FE 是一个五元组: $FE = \langle S, F, R, I, D \rangle$, 其中 S 、 F 、 R 、 I 和 D 分别为模糊子集集合、模糊化模块、模糊规则库、模糊推理和去模糊化模块。信元转发强度 δ 、信元丢弃公平因子 σ 和信元丢弃强度 φ 分别是 FE 的输入和输出语言变量, 设 δ 和 σ 均取小、中、大三个语言值, 记 δ 的三个语言值和对应的隶属函数分别为 S_δ 、 M_δ 、 L_δ 和 $\delta_S(x)$ 、 $\delta_M(x)$ 、 $\delta_L(x) (x \in X = (0, 1])$, 对 σ 则分别记作 S_σ 、 M_σ 、 L_σ 和 $\sigma_S(y)$ 、 $\sigma_M(y)$ 、 $\sigma_L(y) (y \in Y = (0, \sigma_{\max}])$; 令 φ 取很小、小、中、大、很大 5 个语言值, 并记其语言值和对应的隶属函数分别为 VS_φ 、 S_φ 、 M_φ 、 L_φ 、 VL_φ 和 $\varphi_{VS}(z)$ 、 $\varphi_S(z)$ 、 $\varphi_M(z)$ 、 $\varphi_L(z)$ 、 $\varphi_{VL}(z) (z \in Z = [0, 1])$, 最后选高斯分布作为所有隶属函数的定义, 如图 1 所示。

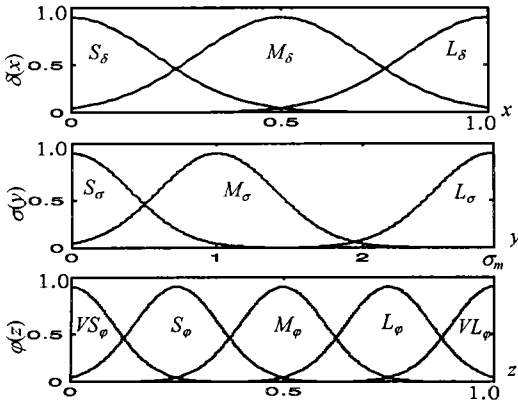


图 1 CDSFE 中的隶属函数

表 1 CDSFE 的模糊规则库

δ	σ	φ
S_δ	S_σ	S_φ
S_δ	M_σ	VL_φ
S_δ	L_σ	L_φ
M_δ	S_σ	S_φ
M_δ	M_σ	L_φ
M_δ	L_σ	M_φ
L_δ	S_σ	VS_φ
L_δ	M_σ	M_φ
L_δ	L_σ	S_φ

在去模糊化模块中, 用模糊单值函数实现对 δ 和 σ 数值输入的模糊化。模糊规则库是模糊推理机的核心, 决定着 δ 、 σ 对 φ 的模糊定量关系, 也决定着 CDSFE 在网络资源利用率和信元丢弃公平性两方面的性能, 模糊定量关系定义如下:

- 1) 在对各 VCC 的信元丢弃基本公平情况下优先选择转发强度最小的低级 CLP 信元予以丢弃;
- 2) 在各 VCC 的信元转发强度水平基本相同时, 丢弃因子等于或接近 1 的低级 CLP 信元优先被丢弃;

3) 两个 VCC 中若其中一个的转发强度和丢弃因子均较小时, 应为转发强度和丢弃因子各分配一个对丢弃强度的贡献权值并由此决定两者丢弃强度的大小, 文中 δ 和 σ 对 φ 的贡献作用近似相同。

CDSFE 采用基于凸模糊集的 WAI 作为其模糊推理算法, 用质心法(COG)完成对推理结论的去模糊化操作。网络结点需为每个活跃的 VCC 均设置一个 CDSFE, 但在实现上可仅用一个具有并行结构特征(如流水线化结构)的高速 CDSFE 依次为各 VCC 轮流服务。

3 模拟模型及分析

为分析 CDSFE 在网络资源损失和信元丢弃公平性两方面的性能, 构造一个 Geom/Geom /1/K 排队系统的模拟环境, 模拟 CDSFE, 使用后入先丢策略的信元丢弃机制工作。该排队系统的几何信元到达过程和服务过程的参数 p_a 和 p_s 为分别取 $0.056 \leq p_a \leq 0.110$, $p_s = 0.110$ (即系统的业务负荷 $\rho = p_a/p_s = 0.5 \sim 1.0$); 信元缓冲器容量 $K=15$ 。该系统作为各 VCC 信元的当前结点号在 $\{1, 2, \dots, D_{\max}\}$ 上服从离散均匀分布 ($D_{\max}=8$); 设 $\sigma_{\max}=4$, 每一 VCC 内低级 CLP 信元的比例均约为 40%。在 $0.5 \leq \rho \leq 1.0$ 范围内设 55 个采样点, 在低级 CLP 信元的 CLR 相同条件下, 每个采样点对 CDSFE 和使用后入先出策略的丢弃机制(LIFD) 分别求出 30 个被丢弃信元的平均网络资源损失量 W_Loss 和平均信元丢弃公平因子 F_Factor 。图 2a、2b 分别绘出了两种机制的 $W_Loss \sim \rho$ 和 $F_Factor \sim \rho$ 曲线, 图 2c 为 W_Loss 及 F_Factor 的差值, 图 2d 为 F_Factor 对 1 的偏离度, 由该模拟结果可得到以下结论:

1) CDSFE 的平均网络资源损失量较明显地小于 LIFD。当 $0.5 \leq \rho \leq 1.0$ 时, CDSFE 与 LIFD W_Loss 的平均值分别为 3.332 8 和 4.448 5, 即 CDSFE 的 W_Loss 仅为 LIFD 的 75%; 当 ρ 较小时, W_Loss 的波动均较大, 反之则较小; 在绝大多数情况下, CDSFE 的 W_Loss 均小于 LIFD。

2) CDSFE 的平均信元丢弃公平因子指标也较明显地优于 LIFD。 F_Factor 平均值分别为 1.042 5 和 0.755 0, 而 F_Factor 平均值对 1 的偏离度分别为 +4.25% 和 -24.5% 时, 说明 LIFD 容易导致对某些 VCC 中低级 CLP 信元的过丢弃, 而 CDSFE 则仅有轻微的欠丢弃; 当 ρ 较小时, F_Factor 的波动都较大, 而当 ρ 较大时, 波动性均减小, 此时, CDSFE 的 F_Factor 可稳定在理想值 1 附近, 而 LIFD 的 F_Factor 则可稳定在小于 1 的某常数上, 如图 2d 所示。

3) 当系统的业务负荷较大时, CDSFE 在平均网络资源损失量和平均信元丢弃公平性能相对与 LIFD 的优势趋于稳定。由图 2c 知, W_Loss 和 F_Factor 差值的波动性均随 ρ 的增大而减弱, 而这种差值的稳定效应说明了在 ρ 较大时, CDSFE 必然在 W_Loss 和 F_Factor 上, 且均优于 LIFD。

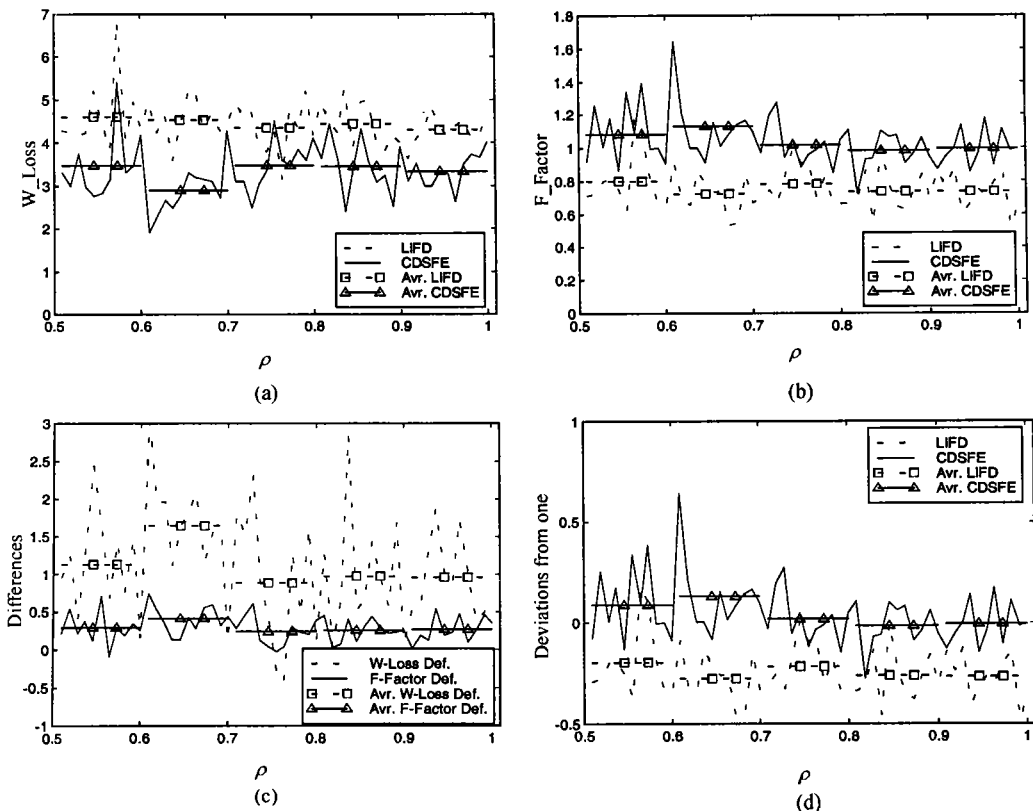


图 2 CDSFE 与 LIFD 的性能指标 W_Loss 及 F_Factor

4 结束语

本文提出了一种基于模糊逻辑的新型信元丢弃机制 CDSFE, 在 Geom/Geom/1/K 模拟环境中对 CDSFE 和 LIFD 的模拟分析表明, 当业务强度在[0.5, 1.0]范围内时, CDSFE 的平均网络资源损失量及平均信元丢弃公平因子均较明显地优于 LIFD, 而且当业务强度较大时, 该优势呈现出稳定的特征, 即相对于 LIFD, CDSFE 能够在满足拥塞控制、网络性能和信元丢弃公平性之间取得更好的折衷。因此, CDSFE 实现了低代价、高效率及公平进行信元丢弃的设计目标。

参 考 文 献

- 1 Rec I_371. Traffic control and congestion control in B-ISDN. Helsinki: ITU-T, 1993
- 2 Rec I_356. B-ISDN ATM layer cell transfer performance. Geneva: ITU-T, 1993
- 3 Lin A Y, Silvestre J A. Priority queueing strategies and buffer allocation protocols for traffic control at an ATM integrated broadband switching systems. IEEE JSAC, 1991, 9(9): 1 524~1 536
- 4 Petr D W, Forst V S. Nested threshold cell discard for ATM overload control: optimization under loss constrains. IEEE INFOCOM'91, USA, 1991: 1 403~1 412
- 5 Tassiulas L, Hung Y, Pauwar S S. Optimal buffer control during congestion in an ATM network node. IEEE INFOCOM'93, USA, 1993: 1 059~1 066
- 6 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析. 北京: 国防工业出版社, 1995
- 7 Uehara K, Hirota K. Fuzzy connection admission control for ATM networks based on possibility distribution of cell loss ratio. IEEE JSAC, 1997, 15(2): 179~190
- 8 Bensaou B, Lam S T C, Chu H W, *et al.* Estimation of the cell loss ratio in ATM networks with a fuzzy system and application to measurement-based call admission control. IEEE/ACM Trans on Networking, 1997, 5(4): 572~584
- 9 Catania V, Filici G, Palazzo S, *et al.* A comparative analysis of fuzzy versus conventional policing mechanisms for ATM networks. IEEE/ACM Trans on Networking, 1996, 4(3): 449~459

Fuzzy-logic-based Cell Discarding: Study on A New Scheme with Cost-effectiveness and Fairness in ATM Networks

Cheng Dongnian Liu Zengji

(National Key Laboratory on Theory and Chief Technology of Integrated Services Networks, Xidian University Xi'an 710071)

Abstract This paper proposes a fuzzy-logic-based cell discarding scheme employing a new cell choice discipline. The proposed scheme serves the purpose of not only dropping cells fairly but minimizing the network resource volume consumed by lost cells. Two useful properties are derived of the weighted average fuzzy inference on the basis of "symmetric fuzzy sets". A new cell choice discipline, determined by a fuzzy quantitative relation featuring cost-effectiveness and fairness, is presented. The results obtained from simulation show that the proposed scheme can make a marked improvement on the average volume of lost network resources and the cell discarding fairness.

Key words asynchronous transfer mode; quality of service; selective cell discarding; fuzzy logic