

多用户视频流分布式最小失真调度算法

姜颖¹ 李艳萍¹ 郭淑霞¹ 李卫平²

(河北工业大学 廊坊 065000)¹ (武汉理工大学信息工程学院 武汉 430070)²

摘要 为了提高视频流数据的传输质量,减小视频流数据的失真率,从而提高网络中视频流数据的利用效率,提出了一种多用户视频流分布式最小失真调度方案。该方案采用相加模型来捕捉总的视频失真,建立起视频流失真模型,并通过 M/G/1 排队模型来进一步建模,得到视频流失真与视频流传输的延迟分布相关性函数,通过优化网络拥塞来进行系统的延迟约束,从而减小视频流失真率;通过同时考虑路由和速率分配问题来得到路由拥塞的最小化最优解,最大限度地减少网络的传输延迟。实验数据结果及对比分析表明,该方案在减小视频流失真比率、缩短视频流传输的延迟时间和控制网络丢包率上均取得了较好的效果。

关键词 多信道无线网络,视频流,最小失真调度,相加模型,延迟约束

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.6.029

Multi-user Video Stream Distributed Scheme with Minimal Distortion Scheduling

JIANG Ying¹ LI Yan-ping¹ GUO Shu-xia¹ LI Wei-ping²

(Hebei University of Technology, Langfang 065000, China)¹

(School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)²

Abstract In order to improve the transmission quality of the video data stream, reduce the distortion rate of the video data stream, and then improve network utilization efficiency of video data stream, this paper presented a multi-user video stream distributed scheme with minimum distortion scheduling. The program uses the model to capture the sum total of the video distortion, and establishes video stream distortion model. By further modelling with M/G/1 queuing model, the delay distribution correlation function about video distortion and transmission is gotten. By optimizing the network congestion, the delay for the system can be constrained, thereby reducing the loss of straightforward video. The minimized optimal solution of routing congestion is gotten by considering routing and rate allocation of common questions, minimizing network transmission delays. Comparative analysis and experimental results show that the scheme achieves good results in reducing distortion ratio of the video, shortening latency of video stream transmission and controlling packet loss rate.

Keywords Multi-channel radio network, Video streaming, Minimal distortion scheduling, Additive model, Delay constraint

1 引言

在过去的几年中,许多学者致力于研究多无线接口的多信道网络,这种网络相比单信道单接口的无线网络,在带宽和容量上更具有优势,可以带来广阔的应用前景,例如应用于数据量巨大的视频通信行业^[1,2]。但多信道多接口的网络中不同类型的不同用户视频流会互相影响,因此为了实现合适的视频指标和高效的网络利用率,必须设计一个分布式的调度策略来对网络进行规划^[3]。因此本文提出了一种多用户视频流分布式最小失真调度方案。

多信道多无线网络视频流的调度问题较为复杂,相比于传统的数据通信,在无线多跳网络中对于本文所提出的方

案需要关注的问题有^[4,5]:如何分配信道才能使链路在不受受到干扰的情况下实现正常的数据传输;对于给定的信道和链路,如何分配适当的数据传输速率;在所选择的信道和链路上,如果最大限度地减少视频数据的失真;如何采用一个公平性的原则,使得多用户视频流能够并发进行。这几个问题对于方案的性能来说非常重要,涉及到了网络的 MAC 层以及应用层,也是一个具有挑战性的跨层控制问题。

王勇等^[6]提出一种高效率的零延迟 VBR 编码视频流调度算法,该算法分析了多种现有视频流调度方法的优劣,采用 ZDB-VBR 算法来解决用户等待延迟问题,并最大限度地降低了服务器带宽消耗,提高了整个系统的效率。李懿雯等^[7]提出无线网络视频感知机会网络编码协议及其仿真研究方案,

到稿日期:2014-07-15 返修日期:2014-10-03 本文受河北省科学技术研究与发展计划项目(14K50123D)资助。

姜颖(1971—),女,硕士,讲师,主要研究方向为网络技术与信息安全、图像处理, E-mail: ying_jiang_q@163.com; 李艳萍(1976—),女,硕士,讲师,主要研究方向为计算机应用、人工智能; 郭淑霞(1968—),女,硕士,副教授,主要研究方向为网络技术与信息安全、数据挖掘; 李卫平(1974—),男,博士生,副教授,主要研究方向为计算机软件与理论、数据挖掘。

该研究方案根据视频流数据包的重要程度以及无线网络的链路状况,采用多优先级的调度机制接入信道,以提高网络视频传输质量和高优先级数据包成功传输概率。朱子辰等^[8]提出基于 EPA 的块数据流通信调度与控制算法,通过定义“块数据流”,给出数学模型和网络约束条件,并将块数据流视为周期数据,规划宏周期调度,可保证 EPA 网络稳定性和控制实时性,且满足块数据流的流畅性需求。Jiasi Chen 等^[9]提出蜂窝网络的自适应视频传输调度方案,该方案设计了一个网络资源管理框架 AVIS,用于调度蜂窝网络中基于 HTTP 的自适应视频流,AVIS 可以有效地管理蜂窝基地的自适应视频流资源,以实现最佳的资源分配和用户体验质量之间的理想平衡。Randeep 等^[10]提出一种改善移动视频流与链路感知的调度和客户端缓存方案,其工作原理是当会话区有更好的链路质量时,系统会选择性地发送更多的内容到会话区,同时提供足够的保证率,以保持视频流到达缓冲区的速率。Kai-Lung Hua 等^[11]提出 P2P 网络中可伸缩视频流的一种高效的调度算法,其根据每一个节点与视频流的关系来定义一个优先级函数,使视频流的调度问题转化为一个优化问题,再通过设计的集中式和分布式调度算法来提高网络的带宽利用率和视频流的传输质量。

本文提出了一种多用户视频流分布式最小失真调度方案。该方案采用相加模型来捕捉总的视频失真,建立视频流失真模型,并通过 M/G/1 排队模型来进一步建模,得到视频流失真与视频流传输的延迟分布的相关性函数,通过优化网络拥塞来进行系统的延迟约束,从而减小视频流失真率。

2 视频流失真模型

对于无线视频传输的失真,采用相加模型来捕捉总的视频失真,用 S_{lack} 来表示总的视频失真:

$$S_{lack} = S_c + S_{loss} \quad (1)$$

其中, S_c 表示由信源压缩引起的失真, S_{loss} 表示由丢包引起的附加失真。根据文献^[12], S_c 可近似表示为:

$$S_c = \frac{\lambda}{v - v_1} + \frac{\theta_1}{v} \quad (2)$$

其中, v 表示视频流的传输速率, v_1 、 λ 、 θ_1 表示编码视频序列以及在编码结构上失真模型的参数。可以用线性模型进行建模来关联得出丢包引起的附加失真 S_{loss} 为^[13]:

$$S_{loss} = \chi \pi P_{loss} \quad (3)$$

其中, χ 是取决于相关的压缩视频序列的参数, P_{loss} 表示分组丢失率。

在一个带宽有限的网络中,视频流的损失率可以通过 M/G/1 排队模型来进一步建模,视频流的损失率与视频流传输的延迟分布有关,假设数据包在多跳网络中传输的延迟分布是指数性的,则可以得到:

$$P(\text{delay} > T_h) = \frac{\pi e^{-\eta T_h}}{2} \quad (4)$$

其中, T_h 表示一个延迟约束, η 表示通过平均延迟所确定的到达率, $P(\cdot)$ 表示一个延迟分布的概率性函数。

3 最小化视频流失真函数

假设多信道多无线网络具有 $N = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 个节点,以及 $L = (l_1, l_2, \dots, l_s)$ 条链路, f 表示非重叠信道。假设每个节点具有 m 个网络接口。为了顾及到信道的多样化,假设 u_i

为在信道 f_i 上的链路 l_i 的数据传输速率。若在网络中有 $U = (u_1, u_2, \dots, u_k)$ 个用户,每一个用户都能通过路由与源节点和目的节点连通,并且来自每个用户的流量可以被路由到多个备用路径,则采用 H_u^l 来表示路由矩阵,当用户 u 采用了链路 l ,则 $H_u^l = 1$,否则 $H_u^l = 0$ 。若 $M(u)$ 表示用户 u 的可选路由路径数量, $Q_k(u)$ 表示用户 u 被路由到链路 k 的部分视频流, L_c 表示在信道 f_i 中被选择去传输数据的链路的集合,则对于链路 l ,可以得到链路平衡率 $\xi(l)$ 为:

$$\xi(l) = \kappa \frac{Y_{in}(l)}{Y_{out}(l)} \quad (5)$$

其中, $Y_{in}(l)$ 表示链路的输入函数, $Y_{out}(l)$ 表示链路的输出函数, κ 表示一个常数。

输入函数 $Y_{in}(l)$ 的计算公式为:

$$Y_{in}(l) = \sum_{i=1}^{L_c} H_u^l \sum_{u=1}^U v(u) Q_k(u) \quad (6)$$

其中, $v(u)$ 表示用户 u 的视频流传输速率。

输出函数 $Y_{out}(l)$ 的计算公式为:

$$Y_{out}(l) = \sum_{l \in f} \log_2(Y_{in}(l)) \quad (7)$$

假设每个无线电只能调谐到一个信道,对于链路 l 在信道 f_i 中成功通信,则发送节点和接收节点都必须调谐一个无线电到信道 f_i 。对于遍历该链路的所有数据包,其平均延迟是由无线链路的阻塞所决定的,采用经典的 M/G/1 排队模型进行分析,其传输能力 $E(l)$ 与平均延迟有关:

$$E(l) = \frac{Y_{out}(l)}{(\xi(l) - \theta)} \quad (8)$$

其中, θ 表示由于过度配置所引起的浮动值。

对于用户 u 来说,可以得到链路 l 的平均延迟为:

$$D_l = \sum_{i=1}^{L_c} \frac{\epsilon((\xi(l) - \theta))}{\pi Y_{out}(l)} H_u^l \quad (9)$$

其中, ϵ 表示平均数据包大小。

链路 l 的延迟时间大于系统的延迟约束的概率表示为:

$$P(\text{delay} > T_h) = \frac{\pi e^{-\eta T_h}}{2} = \exp\left(-\frac{T_h}{\sum_{i=1}^{L_c} \frac{\epsilon((\xi(l) - \theta))}{\pi Y_{out}(l)} H_u^l}\right) \quad (10)$$

对于用户 u 来说,可以得到链路 l 总的丢包率为:

$$P_{loss} = \frac{P_{loss}}{T_h} + \frac{(1 - P_{loss})P(\text{delay} > T_h)}{D_l} \quad (11)$$

则由丢包引起的总的附加失真 S_{loss} 为:

$$S_{loss} = \chi \pi P_{loss} = \chi \pi \frac{P_{loss}}{T_h} + \chi \pi \frac{(1 - P_{loss})P(\text{delay} > T_h)}{D_l} \quad (12)$$

得出最小化总的视频失真的公式为:

$$\min\{S_{lack}\} = \sum_{u=1}^U \sum_{l \in M(u)} \left(\frac{\lambda}{v - v_1} + \frac{\theta_1}{v} + S_{loss} \right) \quad (13)$$

分布式最小失真调度方案描述如下。

采用多路径路由来寻找多个潜在路径,以减少每个用户包含的总的系统拥塞。受文献^[14]的启发,考虑到每个用户的视频流增量 W_u 进入到信道 f_i 中,该信道包含了 k 条路径,假设路径的容量是已知的,其中路径 l_u^k 可以使得拥塞达到最小。由于每一个链路上的平均延迟与 $E(l)$ 是成反比的,则视频流增量 W_u 采用路径 l_u^k 时的拥塞为:

$$\psi = \sum_{i \in L} \frac{Y_{out}(l) + W_u}{E(l) - W_u} \quad (14)$$

考虑到整个网络的拥塞优化,公式可以变换为:

$$\psi' = \sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L (\frac{Y_{out}(l) + W_u}{E(l) - W_u} - \frac{Y_{out}(l)}{E(l)}) = \min\{\sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L \frac{W_u}{E(l)}\} \quad (15)$$

通过从源到目的地之间找到一条路径 l_u^s 来实现最大限度地减少网络中的拥塞,则该优化问题变为:

$$\min_{l_u^s} \{\sum_{u=1}^U \sum_{l=1}^L \frac{W_u}{E(l)}\} \quad (16)$$

若共同考虑路由和速率的分配问题,拥塞最小化的最优解的充分必要条件是网络为用户视频流分配的路由和速率比率满足视频流的传输要求,使得信源压缩引起的失真 S_c 与丢包引起的附加失真 S_{loss} 分别与视频流增量 W_u 的比率达到最高,即:

$$\frac{dS_c}{dW_u} = -\frac{\sqrt{\pi\theta_1}}{(W_u - W_u')^2} \quad (17)$$

$$\frac{dS_{loss}}{dW_u} = \chi(1 - \overline{P_{loss}}) \sum_{l \in L} \frac{(\xi(l) - \theta)}{Y_{out}(l)} = \chi(1 - \overline{P_{loss}}) \sum_{l \in L} \frac{1}{E(l)} \quad (18)$$

则最终所产生的分组丢失失真增量 ΔS_{lack} 可以近似表示为:

$$\Delta S_{lack} = \chi(1 - \overline{P_{loss}}) \sum_{l \in L} \frac{W_u}{E(l)} \quad (19)$$

4 实验仿真及分析

本文所使用的实验工具及相关参数设置如下:采用的视频编解码器具有 Mbps 比特率,用长度为 200 帧的标准视频序列来作为编码文件^[15],图像组长度为 4 帧,帧速率设置为 35fps,定义宏周期为 25ms,网络带宽为 120M,延迟抖动为 5ms,图像帧的最大延迟为 20ms,最小为 10ms。其中视频数据流的源设备为某厂家生产的全帧率 25fbps 的网络摄像头,该设备所采用的帧内编码模式可以提供视频流数据。实验中所采用的仿真工具为 QualNet,用 QualNet 进行视频解码以及传输协议的仿真,所采用的运算平台为 Intel 酷睿 i5-2400、4G 内存、处理器主频为 3.1GHz 的 PC。

所采用的实验方法为仿真分析及对比分析,对比分析是通过与同类算法进行比较,从而突出本文算法的优势,所采用的同类对比算法为文献[9,11]中提出的算法。

为了验证本文的分布式最小失真调度方案在减小视频流数据的失真上的有效性,考虑在视频数据流逐渐增多的情况下通过实验得到失真的视频流数据占总数据的比值,最终得到了如图 1 所示的数据结果。从图 1 的数据分布情况可以看出,本文算法的视频流失真比率最小,在视频流数量达到 800 时也仅为 23.4%;而 Jiasi chen 和 Kai-lung Hua 提出的方案的视频流失真比率都超过了 30%。很显然,本文方案在控制视频流失真上达到了更好的效果,因为本文的方案针对视频流失真的因素采用了 M/G/1 排队模型进行分析并采用了分布式最小失真调度方案加以解决。

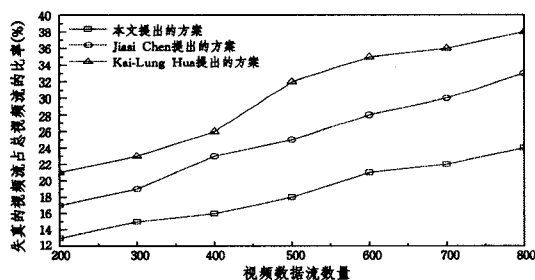


图 1 视频流失真比率

网络的延迟是造成视频流失真的重要原因,当一组有序的视频流数据由于传输延迟而没有在有效的时间间隔内发送完成,就会造成视频失真,因此对网络的延迟的控制显得非常重要。为了验证本文方案在控制网络延迟上的效果,考虑在视频流数据增多的情况下通过实验仿真来得到网络的视频流传输的延迟时间,并得到了如图 2 所示的数据结果。从图 2 的数据分布情况来看,随着视频流数据的增多,网络的延迟时间都逐渐增大,但网络延迟时间增多的速率开始逐渐减慢。本文所提方案在视频流数据为 800 个时,延迟时间为 13.5ms, Jiasi Chen 和 Kai-lung Hua 提出的方案的延迟时间均超过了 17ms,因此本文的方案在控制视频流传输的延迟时间上达到了更好的效果,这是因为本方案考虑了网络延迟对视频流失真的影响。因此本文通过选择最优的路由路径来最大限度地减少网络中的拥塞,减少网络延迟。

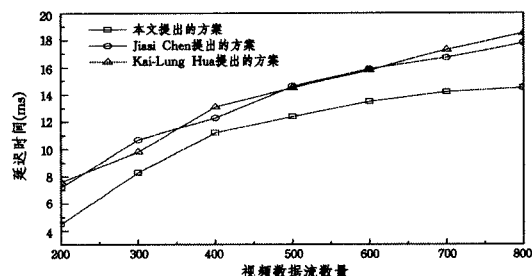


图 2 视频流传输的延迟时间

图 3 显示了在提升视频数据包长度的情况下网络的丢包率情况。网络的丢包率越高,说明视频流数据丢失的情况更加严重。本文的方案考虑了整个网络的拥塞优化以及系统的延迟约束,并考虑了路由和数据传输速率的分配问题,因此视频数据的丢失情况得到了控制,在整个仿真实验过程中,丢包率都不超过 14%,平均丢包率为 9.4%,而 Jiasi Chen 和 Kai-lung Hua 提出的方案的平均丢包率分别达到 19.8% 和 17.1%。从得到的实验数据来看,本文所提方案的丢包率更小。

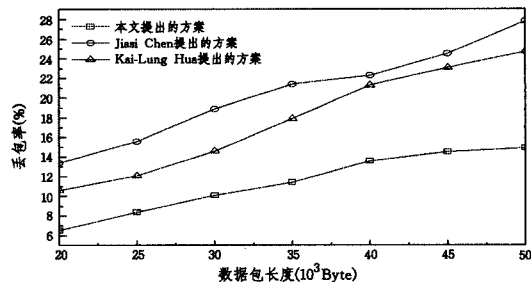


图 3 网络的丢包率

结束语 在数据量巨大的视频通信行业中,为了使得终端所接收到的视频数据具有更高的质量,并提升网络的利用率,视频流的失真调度问题也成为了无线网络领域的一个研究重点。本文提出多信道无线网络中一种多用户视频流分布式最小失真调度方案,该方案在视频流失真模型下得出最小化视频流失真函数,通过考虑链路平衡率和链路延迟约束,以及在多路径路由选择上进行优化,使得视频流数据的失真率和数据传输的延迟时间得到了控制。通过实验仿真数据及对比分析可以得出,提出的方案在减少视频流失真、控制数据传输延迟以及减少网络丢包率上均取得了较好的效果。

参考文献

- [1] Chen W, Cao J, Wan Y. QoS-aware virtual machine scheduling

- for video streaming services in multi-cloud[J]. Tsinghua Science and Technology, 2013, 18(3): 308-317
- [2] Ashraf A, Jokhio F, Deneke T, et al. Stream-based admission control and scheduling for video transcoding in cloud computing [C]// 2013 13th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid). IEEE, 2013: 482-489
 - [3] 吴冀衍, 乔秀全, 程瀚, 等. 延迟敏感的移动多媒体会议端到端服务质量保障[J]. 计算机学报, 2013, 36(7): 1399-1412
Wu Ji-yan, Qiao Xiu-quan, Cheng Bo, et al. End-to-end QoS guarantee for delay-sensitive mobile multimedia conferencing [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(7): 1399-1412
 - [4] Chu S L, Lo M J. Novel memory access scheduling algorithms for a surveillance system[J]. Appl. Math, 2013, 7(2): 801-808
 - [5] 熊李艳, 张胜辉. WRR 算法在多类别实时数据流调度中的优化[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(7): 35-38
Xiong Li-yan, Zhang Sheng-hui. The optimization of the WRR algorithm in multi-class real-time data scheduling[J]. Computer Engineering & Science, 2012, 34(7): 35-38
 - [6] 王勇, 张应刚, 袁集燕. 一种高效率的零延迟 VBR 编码视频流调度算法[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(8): 130-134
Wang Yong, Zhang Ying-gang, Yuan Cao-yan. A high efficient scheduling algorithm for VBR-encoded video stream with zero delay[J]. Computer Engineering & Science, 2013, 35(8): 130-134
 - [7] 李懿雯, 白光伟, 沈航, 等. 无线网络视频感知机会网络编码协议及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(2): 345-352
Li Yi-wen, Bai Guang-wei, Shen Hang, et al. Simulation study of video-aware opportunistic network coding protocol over wireless networks[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(2): 345-352
 - [8] 朱予辰, 冯冬芹, 褚健. 基于 EPA 的块数据流通信调度与控制[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(11): 2097-2115
Zhu Yu-chen, Feng Dong-qin, Chu Jian. EPA based communication scheduling algorithm and control scheme for block stream [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(11): 2097-2115
 - [9] Chen J, Mahindra R, Khojastepour M A, et al. A scheduling framework for adaptive video delivery over cellular networks [C]// Proceedings of the 19th Annual International Conference on Mobile Computing & Networking. ACM, 2013: 389-400
 - [10] Bhatia R, Lakshman T V, Netravali A, et al. Improving mobile video streaming with link aware scheduling and client caches [C]// 2014 Proceedings INFOCOM. IEEE, 2014: 100-108
 - [11] Hua K L, Chiu G M, Pao H K, et al. An efficient scheduling algorithm for scalable video streaming over P2P networks[J]. Computer Networks, 2013, 57(14): 2856-2868
 - [12] Sheikh A M, Fiandrotti A, Magli E. Distributed scheduling for scalable P2P video streaming with network coding [C]// 2013 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2013: 11-12
 - [13] Molazem Tabrizi F, Peters J, Hefeeda M. Dynamic control of receiver buffers in mobile video streaming systems [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2013, 12(5): 995-1008
 - [14] Zhou L, Hu R Q, Qian Y, et al. Energy-spectrum efficiency tradeoff for video streaming over mobile ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(5): 981-991
 - [15] Zhou L, Hu R Q, Qian Y, et al. Energy-spectrum efficiency tradeoff for video streaming over mobile ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(5): 981-991
 - [16] 姚杰, 谭建明, 唐超, 等. 基于运动估计的视频质量评价[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2012, 26(5): 74-78
Yao Jie, Tan Jian-ming, Tang Chao, et al. Video Quality Assessment Based on Motion Estimation[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2012, 26(5): 74-78

(上接第 110 页)

- [6] 刘国华. 试析影响数学课堂教学质量的内部因素[J]. 安顺师专学报, 1997, 15(2): 40-46
Liu G H. Analysis of the internal factors affecting the quality of mathematics class teaching[J]. Journal of Anshun Normal University, 1997, 15(2): 40-46
- [7] Pawlak Z. Rough sets [J]. Journal of Computer and Information Science, 1982, 11(5): 341-356
- [8] Pawlak Z. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [9] Skowron A, Rauszer C. The discernibility matrices and functions in information systems [C]// Intelligent Decision Support, Handbook of Applications and Advances of the Rough Set Theory, Kluwer Academic Publisher. Slowinski R. ed., Dordrecht, 1991: 331-362
- [10] Slezak D. Approximate reducts in decision tables [C]// Proc. 6th Conf. Int. on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU 1996). Granada, Spain, 1996: 1159-1164
- [11] Stefanowski J. On rough set based approaches to induction of decision rules [C]// Polkowski L, Skowron A. eds., Rough Sets in Knowledge Discovery. Heidelberg, Physica-Verlag, 1998: 500-529
- [12] Mi J S, Wu W Z, Zhang W X. Approaches to knowledge reduction based on variable precision rough set model [J]. Information Sciences, 2004, 159: 255-272
- [13] Kryszkiewicz M. Comparative study of alternative type of knowledge reduction in inconsistent systems [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2001, 16: 105-120
- [14] Zhang W X, Mi J S, Wu W Z. Approaches to knowledge reductions in inconsistent systems [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2003, 21: 989-1000
- [15] 张文修, 梁怡, 吴伟志. 信息系统与知识发现 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
Zhang W X, Liang Y, Wu W Z. Information System and Knowledge Discovery [M]. Beijing: Science Press, 2003
- [16] Mi J S, Wu W Z, Zhang W X. Approaches to approximation reducts in inconsistent decision tables [C]// Proc. 9th Int. Conf. on Rough Sets, Fuzzy Sets, Data Mining and Granular Computing (RSFDGrC 2003). Wang G Y, Liu Q, Yao Y Y, et al. eds., Chongqing, China, 2003: 283-286
- [17] 张文修, 米据生, 吴伟志. 不协调目标信息系统的知识约简 [J]. 计算机学报, 2003, 26(1): 12-18
Zhang W X, Mi J S, Wu W Z. Knowledge reduction of inconsistent decision information systems [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(1): 12-18