

支持多媒体传输的 QoS 自适应控制理论及评价模型

An Evaluation Model of QoS Adaptive Control Supporting for Multimedia Transport

陈晓梅 卢锡城 王怀民

(国防科技大学计算机学院 长沙410073)

Abstract QoS adaptive control is one of the critical technologies supporting the quality of service of multimedia transport. This paper puts forward an evaluation model of QoS adaptive control to support the multimedia transport. It holds out a QoS adaptive control model based on the theory of adaptive control, and gives the formal evaluation parameters system. Our contributions are the following: (1) We analyze the QoS adaptive control based on the control theory, and it can give the theoretically instruction for future development. (2) We bring forward an evaluation model of QoS adaptive control mechanisms for the first time. The model provides a tool for evaluating the performance of so many kinds of QoS adaptive algorithms and mechanisms.

Keywords Control theory, QoS adaptive, Evaluation model, Performance parameter

1 引言

随着计算机技术的发展,远程视频点播、远程网络教学、视频会议等新兴分布式多媒体应用日益普及。这类新兴应用具有软实时特征:与电子邮件、文件传输不同,它们要求媒体流实时传输;但是与生死攸关的实时应用(如导弹发射控制等)相比,它们又允许一定限度的服务质量变化。这种软实时特征,为 QoS 自适应控制的研究提供了基础。QoS 自适应控制的目标是:在多个应用竞争有限数量的资源时,应该根据系统可利用资源的变化,在一定限度内适时自动调整各媒体流的服务质量,以达到整个系统资源利用率最优化。

通常的 QoS 自适应多从控制机制的角度来研究,如过滤器机制^[1]、RLM 机制^[2]、市场竞争机制^[3~6]、基于 Agent 的 SCUBA 算法^[7]等。本文提出一种 QoS 自适应控制理论与评价模型,运用自适应控制论建立 QoS 自适应控制模型,提出形式化评价体系。本文贡献在于:(1)运用控制论,从理论角度对 QoS 自适应控制进行分析,为研究具体的 QoS 自适应控制机制提供理论指导和新的思路。(2)首次提出关于 QoS 自适应的评价模型,为众多自适应算法、机制进行比较评价提供了工具。

2 相关工作

QoS 自适应控制可以基于现代控制论和最优化理论描述建模。建立自适应控制评价模型,一方面便于我们利用控制论、最优化理论指导设计算法;另一方面也为我们评价算法的好坏提供依据,可以严格讨论算法的稳定性、收敛性、灵敏性、可扩展性等。我们认为开展这方面的工作很有意义。目前为止,此领域的工作开展较少。Baochun Li^[8~10]运用数字控制论,提出一种任务控制模型,模型化自适应系统的动态性。其任务控制模型的任务是:不考虑可利用资源的变化,尽力保持输出质量不变;在很短时间内适应 QoS 需求的变化;保持所有竞争任务的公平性。Baochun Li 方法的局限性在于:(1)性能参数体系不完善,传输性能和策略性能没有形成完整的体

系。(2)理论联系实际不够,没有与具体自适应实现算法相联系。本文提出的模型,具有较为完整的传输性能、策略性能参数体系;与具体自适应实现算法相联系。

3 QoS 自适应控制理论模型

3.1 自适应控制理论

任何一个实际系统都具有不同程度的不确定性。面对这些客观存在的各式各样的不确定性,如何确定适当的控制作用,使得某一指定的性能指标达到并保持最优或近似最优,这就是自适应控制^[11]要研究解决的问题。

本文对基于经典的参考模型自适应控制系统进行研究。参考模型自适应控制系统由参考模型、被控对象、常规反馈控制器和自适应控制回路四部分组成。系统结构如图1所示。其中输出响应 $y_d(t)$ 表示系统希望的动态响应。参考输入 $r(t)$ 同时加到系统和模型的入口,系统的输出响应 $y(t)$ 与模型的输出响应 $y_d(t)$ 产生偏差信号 $e(t)$ 。信号 $e(t)$ 进入自适应调整回路,经过自适应规则运算,产生适当的调整作用,直接改变控制器参数或产生等效的附加控制作用,直到 $y(t) = y_d(t)$ 。当偏差信号 $e(t) = 0$ 后,自适应调整过程就自动停止,控制器参数也就自动整定完毕。一旦外界给予扰动,系统输出偏离标准输出,则系统就会重新进入自适应调整过程。

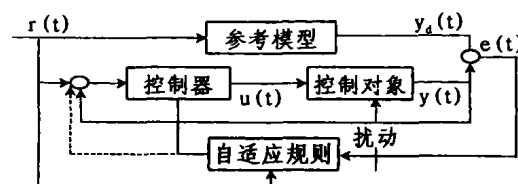


图1 参考模型自适应控制系统

3.2 QoS 自适应控制模型

分析连续媒体网络传输的自适应控制,我们很自然地把它映射到前节所描述的自适应控制模型上。如图2所示,系统输入为发送方的连续媒体质量,系统输出为接收方收到的媒

陈晓梅 博士研究生,主要从事计算机网络与通信、服务质量控制研究。卢锡城 中国工程院院士,博士生导师,主要从事计算机体系结构、计算机网络与通信研究。王怀民 博士生导师,主要研究网络与分布计算。

体质量;系统状态可用系统资源的使用情况表示。参考模型对应于用户 QoS 需求,即对于给定媒体流,用户希望得到某种服务质量的输出。对于软实时应用,这种质量需求是一个给定范围。被控对象是网络传输系统,系统状态对应为网络带宽、路由器缓冲的使用情况。控制器对被控对象进行控制,使系统输出朝要求的方向发展。自适应规则根据输出质量与期望质量的误差,调整控制器参数。

在单一应用的简单情况下,自适应控制的目的是动态调整控制参数,使系统服务质量满足用户预定的 QoS 需求,并且适应不可预测的扰动,适时地自动调整。在较复杂的情况下,多个应用有各自不同的需求,同时竞争共享资源。这里的参考输出是用户 QoS 需求的向量组,向量的每个元素对应于一个应用的用户 QoS 需求,同理,系统输入、系统输出也是向量组形式。这时的自适应控制要求在各个应用之间动态地调整资源分配,尽可能满足应用 QoS 需求,以达到资源利用率的最优化。

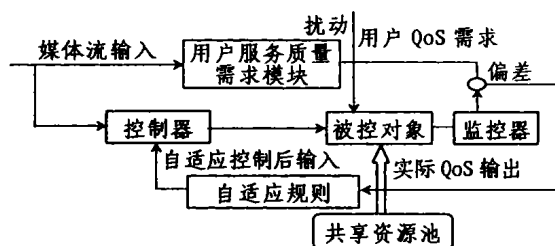


图2 QoS 自适应控制模型

4 QoS 自适应控制性能评价体系

基于上节提出的 QoS 自适应控制模型,本节提出其性能评价模型。

4.1 概述

关于 QoS 参数规范的研究很多^[12,13],但很少明确涉及控制算法的性能。我们认为性能参数体系应包括传输服务质量和控制算法性能两方面的内容。QoS 自适应控制性能评价(E)分为应用效果和策略效果两部分。应用效果(Ae)描述连续媒体流的传输性能与特征,主要包括安全级、性能、相对重要性和代价四方面。策略效果(Pe)基于数字控制论的观点,为 QoS 自适应控制给出数学性评价,主要包括可扩展性、可控性、可观测性、稳定性、灵敏性和公平性等。两者有机合成,形成完整的 QoS 自适应控制评价体系,如图3所示。

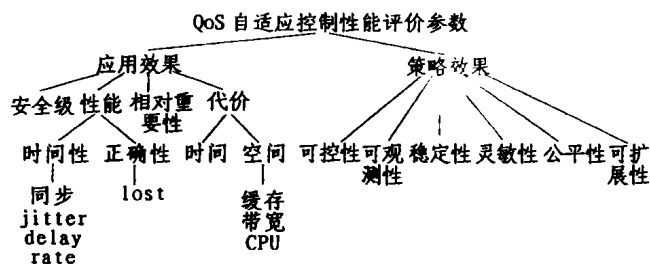


图3 QoS 自适应控制性能评价体系

应用效果中,安全级(AS)定义必须提供给应用的数据安全级别。可分为普通、秘密、机密三级。相对重要性(AI)指应用的相对重要程度,同时也代表了用户为得到服务质量愿意付出的代价。代价(AC)指执行 QoS 自适应控制策略,系统所付出的时间和空间的代价,例如花费了多少时间,占用多少缓

存、多少带宽等。性能(AP)描述与任务有关的性能参数。包括时间性和正确性两方面。时间性如传输速率、延时、抖动、同步等方面;正确性主要指网络传输的丢失率。

根据文[11]的自适应控制理论,我们定义 QoS 自适应策略效果参数。可控制性(PC)指:如果已知 t_0 时刻 QoS 自适应控制系统的输出质量为 $y(t_0)$,通过选择适当的控制变量和算法,可以在有限时间区间 $[t_0, t_f]$ 内使系统达到期望输出质量 $y(t_f)$,则称系统于时刻 t_0 是可控制的。可观测(PM)指 QoS 自适应控制系统在时刻 t_0 的资源使用状态 $x(t_0)$ 可通过有限时间区间 $[t_0, t_f]$ 内对输出质量 $y(t)$ 的观测来决定。稳定性(PSI)指 QoS 自适应控制系统,如果受到一个扰动,在扰动撤离充分长时间后,系统能够回到原来的控制状态,或扰动对控制系统行为的影响趋于 0,又称李亚普诺夫稳定性。自适应灵敏性(PA)指端系统的自适应器对突发、未期望扰动的反应能力。如果系统的灵敏性高,则说明系统将频繁地对短期扰动作出反应;如果灵敏性低,则系统只对长期的大的变化做出反应,而过滤掉多数短期影响。可扩展性(PS)判定系统网络范围扩展时,操作控制是否依然有效。在给定节点数为 N 的网络中,自适应控制的效果为 $E(N)$;若节点数增多为 $M(M \gg N)$,则效果 $E(M)$ 能否依然令人满意。

4.2 形式化描述

为了更好地对自适应控制进行评价,我们基于文[8~10]的研究,给出其评价体系的数学模型。

4.2.1 系统描述 关于多媒体 QoS 自适应控制系统模型,定义如下一些概念:

定义1(stream) stream 是数据单元的序列,这里数据单元指一帧或一个数据报文。stream 可表示为 $S = \{e_k\} k \in I$ 。其中 S 代表 stream 的一个序列; e_k 为独立实体,代表一帧或一个报文。

定义2(QoS 签名) 对每个独立实体,定义 QoS 签名 π_k 。 $\pi_k = \langle s_k, r_k \rangle$, $(s_k < r_k, s_k \in T, r_k \in T)$ 。其中 s_k 表示源端发送时间; r_k 表示接收方接收实体 e_k 的时间。

定义3(QoS 状态) QoS 状态 $\Pi = \{\pi_k\} e_k \in s, \Pi \in \Phi, \Phi$ 为所有 QoS 状态集合。我们用 $first(\Pi), last(\Pi)$ 表示 Π 中最先和最后的 QoS 签名。 $\Pi[C]$ 表示 Π 中满足条件 C 的 QoS 签名子集。

定义4(QoS 自适应控制行为) QoS 自适应行为对特定流操作,以控制和改变其 QoS 状态。行为用 φ 表示, Ω 为不同行为的集合, $\varphi \in \Omega$ 。对特定 QoS 状态 Π 进行自适应操作 φ ,得到另一个 QoS 状态 $\varphi(\Pi)$ 。

定义5(行为效果) $E[\varphi(\Pi)]$ 表示 QoS 自适应行为 φ 对特定媒体流 Π 操作产生的效果。 $E: \Omega \rightarrow [-1, 1]$ 。效果归一化为 $[-1, 1]$ 之间的值。

定义6(QoS 自适应控制性能评价参数) 令所有 QoS 自适应控制性能评价参数集合为 Γ ,某一参数为 τ , M 为 Γ 中元素的个数。 Γ_{App} 表示与应用性能有关的评价参数集合, Γ_{Policy} 表示适应行为策略相关的评价参数。 $\Gamma = \{\tau | \tau \in \Gamma_{App} \text{ 或 } \tau \in \Gamma_{Policy}\}$ 。令 $M = count(\Gamma)$, $\tau_i \in \Gamma (i \in [1, M], i \text{ 为自然数})$ 。 $E(\varphi) = \sum_{i=1}^M W_i \times E_{\tau_i}(\varphi)$ 且 $\sum_{i=1}^M W_i = 1$ 。其中 $E_{\tau_i}(\varphi)$ 表示行为 φ 对媒体流产生的 τ_i 方面的影响效果。 W_i 为各参数的权值,表示对各参数性能的关注程度。

定义7(QoS(Π, n)) $\forall \tau \in \Gamma_{App}$,有映射函数 $\tau: \Phi^n \rightarrow R$ 。其中 Φ 为 QoS 状态域; n 表示同时对若干个流作用。QoS(Π, n) 是

评价参数 QoS 在状态 Π_i 下的计算结果。例如 $delay(\Pi_i)$ 表示流 S 在状态 Π_i 下的传输延迟时间。

4.2.2 参数描述 建立了形式化系统,我们对系统传输速率、延时抖动、公平性等几个典型参数进行描述,其他参数可以类推。

(1) 系统传输速率。它描述带宽分配情况,对于特定流 s ,如式(1)表示:

$$rate_i(\Pi_i) = \frac{quantity(\Pi_i, [C_r])}{r_{low}(\Pi_i) - r_{frru}(\Pi_i)} \quad (1)$$

$$C_r = r_{frru}(\Pi_i) \leq r_k \leq r_{low}(\Pi_i) \quad \text{其中 } r_k \in T$$

在实际应用中,由于监测结果具有一定的延时性,不十分精确,可表现为式(2):

$$rate'_i(\alpha, \beta, \Pi_i) = \frac{quantity(\Pi_i, [C_r'])}{\beta - \alpha} \quad (2)$$

$$C_r' = \alpha \leq r_k \leq \beta$$

自适应行为的控制效果 $E_{rate}_i(\varphi)$ 为:

$$rate'_i(\Pi_i) \text{ 为用户需求范围, } rate'_i(\Pi_i) = rate'_{i,base}(\Pi_i) + rate'_{i,enhance}(\Pi_i)$$

$$rate''_i(\Pi_i) \text{ 为自适应行为目标,且 } E_{rate}_i: \Omega \rightarrow [-1, 1], \varphi: \Phi \rightarrow \Phi \text{ 且 } \Pi_i = \varphi(\Pi_i)$$

若 $rate_i(\Pi_i) \in [rate'_{i,base}(\Pi_i), rate'_{i,base}(\Pi_i) + rate'_{i,enhance}(\Pi_i)]$:

$$\text{则 } E_{rate}_i(\varphi) = K_{rate}_i \frac{rate_i(\Pi_i) - rate''_i(\Pi_i)}{rate''_i(\Pi_i)}, \text{ 否则 } E_{rate}_i(\varphi) = 0. \quad (3)$$

其中, K_{rate}_i 为常系数, $rate_i(\Pi_i)$ 为适应行为执行后的系统速率。

(2) 延时抖动

$$\text{标准偏差 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u)^2}{n-1}}, u \text{ 为平均值, } x_i \text{ 为样本值, 则延时抖动描述如式(4):}$$

$$jitter(\Pi_i) = \sqrt{\frac{\sum_{s_k \in \Pi_i, [C_r]} [(r_k - s_k) - delay(\Pi_i, [C_r])]^2}{quantity(\Pi_i, [C_r]) - 1}} \quad (4)$$

$$C_r = r_{frru}(\Pi_i) \leq r_k \leq r_{low}(\Pi_i)$$

适应行为的延时抖动效果为:

若 $jitter(\Pi_i) \in [jitter'_{i,base}(\Pi_i), jitter'_{i,base}(\Pi_i) + jitter'_{i,enhance}(\Pi_i)]$,

$$\text{则 } E_{jitter}(\varphi) = K_{jitter} \times \frac{jitter(\Pi_i) - jitter''(\Pi_i)}{jitter''(\Pi_i)}, \text{ 否则 } E_{jitter}(\varphi) = 0 \quad (5)$$

其中, K_{jitter} 为常系数, $jitter(\Pi_i)$ 为适应行为执行后的系统速率, $jitter''(\Pi_i)$ 为自适应行为目标。

(3) 公平性。常见的公平性判定有 Max-min 公平性和比例公平性^[6-14],我们采用加权比例公平性做为评判标准。分配方案 $x = (x, s \in S)$ 是加权比例公平的,当且仅当 x 是可行的,对于任意其他可行方案 y ,满足公式 $\sum_{i \in S} w_i \frac{y_i - x_i}{x_i} \leq 0$,其中 w

为权值系数。具体到 QoS 控制系统中, S 为多个媒体流集合,向量 $rate = (rate, s \in S)$ 为速率分配方案,其中 $rate_i$ 为某一应用速率。如果网络中所有应用速率都是非负的,并且速率之和不超过瓶颈链路能力,则称此速率分配方案可行。令 $w = (w, s \in S)$ 为权值向量,表征每一条流的重要程度,或用户为得到服务质量愿意支付的费用。我们说分配方案 $rate$ 是加权比例公平的,当且仅当 $rate$ 是可行的,且对于任意其他可行方案 $rate'$,满足公式 $\sum_{i \in S} w_i \frac{rate'_i - rate_i}{rate_i} \leq 0$ 。

文[15]证明若某可行分配方案根据权值向量 w ,最大化速率分配的系统总效用,即最大化 $\sum_{i \in S} w_i f(x_i)$,则可获得加权

比例公平性。其中 $f(\cdot)$ 是关于速率 x_i 的效用函数,它关于速率 x_i 是递增、严格拟凹、连续可微分。弹性应用恰好满足这一效用函数限制。

我们定义适应策略公平性效果的二值函数 $\varphi(\Pi_i)$ 表示对特定 QoS 状态 Π_i 进行自适应操作 φ ,得到另一个 QoS 状态 $\Pi_i', \Pi_i' = \varphi(\Pi_i)$, $rate_i(\Pi_i')$ 为适应行为执行后的系统速率, $rate_i(\Pi_i)$ 为适应行为执行前的系统速率。若 $rate = (rate, s \in S)$ 具有加权比例公平性,则 $E_{fair}[\varphi(\Pi_i)] = 1$, 否则 $E_{fair}[\varphi(\Pi_i)] = 0$ 。

其它评价参数的数学描述可依此类推,由于篇幅限制,这里不再赘述。

5 应用实例分析

QoS 自适应控制理论及评价模型,为我们设计和评定某种自适应行为的好坏提供了基础。QoS 自适应行为实际上是一种资源分配机制和策略,其目的是充分利用资源,达到资源的最优化使用。评定某自适应行为的好坏,要综合考虑各方面的因素,如行为产生的媒体流速率、媒体流丢失率,又如算法的稳定性、公平性、扩展性等。下面以 RLM 机制^[2]为例,展示自适应控制理论在其中的应用,分析策略的公平性。

RLM 机制^[2]把速率适配的任务从源端移到接收端,在源端提供分层的信号流,接收方通过简单地加入或退出多目广播组,就可调整其接收速率,获得不同的服务质量。

对应于 RLM 机制:用户需求的服务质量范围为参考模型;视频流传输为被控对象;不同层次多目广播组的加入与退出为控制器;RLM 学习算法为自适应规则。如图4所示,自适应控制理论在 RLM 机制中得到了很好的体现。

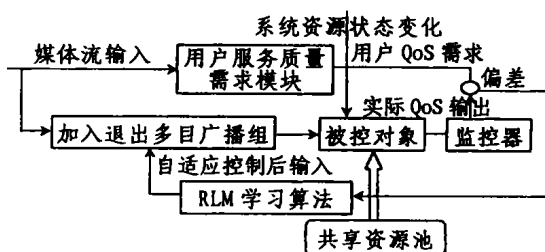


图4 RLM 机制自适应控制模型

通过监控器,利用公式(2)、(4)我们可以计算系统速率、延时抖动,并考虑其自适应行为的控制效果。RLM 自适应控制机制具有可控制性。已知当前应用速率和加入的组播层数,为了达到特定的速率和质量,我们可以通过 RLM 算法,逐渐增加组播层数,直到服务质量符合我们的要求。为提高 RLM 的扩展性和收敛速度,RLM 还提出共享学习方法。

目前的 RLM 机制不具有公平性,我们可以对其进行改造。当多个应用流竞争同一信道时,利用前文所述的公平性原则,分配资源,可获得整个系统最优化。首先,各应用根据信道当前的资源使用情况和各用户的 QoS 需求,确定资源分配方案,使其满足加权比例公平性原则。然后,在资源分配方案确定的基础上,以各用户分配的资源数量变化为扰动,利用 RLM 学习算法,进行自适应调整,加入或退出多目广播组,直到系统偏差符合要求。这里需要一个高效、公平的带宽分配算法。由此可见,自适应控制的公平性原则可用于指导和控制系统,以达到系统资源最优化的目的。

(下转第28页)

资源描述,但并不是直接用来描述资源,而是定义了描述资源的规则。PICS (The Platform for Internet Content Selection) 提供了一种标注 Internet 内容特殊属性的方法。P3P (Platform for Privacy Preferences) 采用 XML 提供了一种进行隐私策略的描述格式,以便保护 Internet 使用者的个人隐私信息或其他保密信息,不会未经允许而被站点或他人获取。XML Signatures 提供的是一种描述对 XML 文档进行数字签名的方法。采用 XML 的语法描述数字签名的方法、计算和验证签名的处理方式,以便保证数据的完整性、可信性和不可抵赖性。

4 问题与发展

SGML 由于具有坚实的理论基础和长时间发展积累的丰富的经验,已形成了较为完善的理论体系与标准体系。XML 以 SGML 为其基础,使得 XML 迅速形成其标准体系,并被广泛接受,其应用范围甚至超出 W3C 制定 XML 时的预期应用范围。在这些应用的刺激下,出现了许多新的问题亟待研究。

1) 数据模型 XML 在被广泛采用后,数据量急剧增大。如何对这些数据有效地存取、查询、挖掘,已成为 XML 被进一步使用的瓶颈问题。这其中的理论基础问题是 XML 的数据模型问题,以及在该模型上建立起来的存储、索引、查询机制。这方面的研究主要有 Pennsylvaniad 的 UnQL 计划、AT&T 的 StrucQL 计划与 XML-QL 计划、Stanford 在 Lore 计划等^[7]。

2) 功能的完善与增加 当前 XML 的许多标准都在不断的完善增强之中,如:正处于草案阶段的 DOM 3 将比 DOM 2 具有更强的事件处理能力和文档操作能力;刚提出的标准草案 CSS 3 比 CSS 2 具有更丰富的图形处理、文字布局与媒介描述能力。还有许多新的功能需求的出现,使许多标准正在制定中,如:文档范式的生成与表达、文档的安全性保证等等。

3) 行业应用标准的制定 XML 最大特点之一在于它的可扩展性,各行业可根据自身的应用需求约定 DTD 或 Schema,制定行业标准。如电子商务标准。XML 要在各行业广泛应用,需要制定统一的行业标准。

(上接第39页)

结束语 本文运用自适应控制论建立 QoS 自适应控制模型,提出形式化评价体系。这是跨领域的结合,为研究 QoS 自适应机制提供一个崭新的思路。今后的工作包括:进一步用现有 QoS 自适应机制来验证 QoS 自适应控制和评价模型的有效性;进一步研究各性能参数之间的相互关系;应用提出的模型和控制理论来指导实际的策略和算法设计。

参考文献

- 1 Yeadon N J. QoS Filtering for Multimedia Communications. Lancaster: [PhD thesis]. 1996. 5
- 2 McCanne S R. Scalable Compression and Transmission of Internet Multicast Video. Berkeley: [PhD thesis]. 1996. 10
- 3 Semret N, et al. Market Pricing of Differentiated Internet Services. In: Proc. of the 7th Intl. Workshop on Quality of Service (IEEE/IFIP IWQoS'99), London: UK, June 1999
- 4 Semret N. Market Mechanisms for Network Resource Sharing: [PhD thesis]. Columbia University, 1999. Available at: <http://comet.columbia.edu/~nemo/work.html>
- 5 Courcoubetis C, Siris V A. Managing and pricing service level agreements for differentiated services. In: Proc. of 6th IEEE/IFIP

4) 支持工具 为了 XML 得到更高效的应用,需要相关的支持工具。特别是存储工具和编辑制作工具。当前在存储工具方面主要有两种模式:a) 以关系数据库为基础,增加转换接口。当前大型的数据库厂商主要采用这种方式支持 XML 的存储、管理,如 Oracle、Microsoft。b) 以新的数据模型为基础,进行直接的 XML 数据的存储、管理,如 Software AG 公司的 Tamino Server、eXcelon 公司的 eXcelon Sever。

但这两种模式都有其缺陷,第一种模式由于是基于转换的间接方式,其功能与效率都受到极大的限制。而第二种模式由于其数据模型的理论基础与技术经验的限制,还很成熟,但它是 XML 存储的发展方向。

当前 XML 的编辑制作工具已经较多了,如浏览工具: Microsoft IE、Mozilla、Amaya; 分析工具: IBM XML4J、MSXML; 编辑工具: XMLWrite、XML Spy 等。但这些工具在功能、实用性、易用性方面都有待改进。

除了以上这些问题外,语义 Web (Semantic Web) 概念的提出,将在理论体系、标准制定以及应用模式等方面都将为 XML 带来新的研究课题。

结束语 本文首先概述了 XML 的发展与特点。针对 XML 标准的复杂体系,笔者通过总结,给出了 XML 相关标准的体系框架,对基础标准进行了分类,并讨论了它们之间的相互关系。文章最后讨论了 XML 相关的研究热点与发展方向。

参考文献

- 1 W3C. "Extensible Markup Language (XML) 1.0" W3C Recommendation. February 10, 1998. <http://www.w3c.org/TR/1998/REC-xml-19980210.html>
- 2 Goldfarb C F. The SGML Handbook. Clarendon Press. Oxford 1990
- 3 Goldfarb C F, Prescod P. The XML Handbook. Prentice Hall PTR, 1998
- 4 Wang Yong-Qun, Chang Ming. Structured Markup Language and Its Application in Database System. Computer Applications (in Chinese), 1998(10): 13~16
- 5 W3C. <http://www.w3c.org/>
- 6 XML. 中国论坛. <http://www.xml.net.cn>
- 7 McHuge J. Data Management and Query Processing For Semistructured Data: [Dissertation]. Stanford University, 2000. 3

Intl. Conf. of Quality of Service (IWQoS'99), London: UK, May-June 1999

- 6 Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. Journal of the Operational Research Society, 1998, 49(3): 237~252
- 7 Amir E. An Agent-based Approach to Real-time Multimedia Transmission over Heterogeneous Environments. Berkeley University, 1998
- 8 Li Baochun, Nahrstdt K. Configurable Adaptors for Multimedia Delivery an End System Middleware Solution. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997
- 9 Li Baochun. Adaptive Behavior of Quality of Service in Distributed Multimedia Systems. Urbana, Illinois, 1997
- 10 Li Baochun, Nahrstdt K. A Control Theoretical Model for Quality of Service Adaptations. Urbana, Illinois, 1997
- 11 卢志恒. 控制论引论. 北京师范大学出版社
- 12 Chatterjee S. ERDoS QoS Architecture: [Technical Report]. May 1998
- 13 Huard J-F, Lazar A A. On End-to-End QoS Mapping. Available at: <http://comet.ctr.columbia.edu/>
- 14 Kelly F P. Charging and rate control for elastic traffic. European Transactions on Telecommunications, 1997, 8(1): 33~37
- 15 Roberts J W. Bandwidth sharing and admission control for elastic traffic