

## 双重控制策略在流媒体连续播放中的应用

邹 勇<sup>1</sup>, 赵 海<sup>1</sup>, 魏立峰<sup>2</sup>, 周 艳<sup>1</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳化工学院, 辽宁 沈阳 110142)

**摘要:** 传统的发送速率控制和播放速率控制由于各自的局限性, 很难克服网络时延扰动对流媒体连续播放的影响. 为了改善播放系统的性能, 将双重控制策略应用到流媒体播放中, 在发送端发送速率控制采用了内模控制器以克服传输延迟的影响, 在接收端播放速率控制采用了简单的PID控制器, 两种控制共同调节缓冲区长度. 实验表明该方法能够处理传输时延和网络扰动引起的失步对播放的影响, 缓冲区长度能够稳定在合理的区间, 有效地防止缓冲区下溢造成的播放停顿以及缓冲区上溢造成的播放跳跃. 发送速率变化率较小, 有利于避免网络拥塞的发生. 尤其是在网络出现大的扰动时, 与其他方法相比, 控制效果更加理想, 播放更加流畅.

**关键词:** 多媒体同步; 双重控制; 内模控制; 动态播放

**中图分类号:** TP273, TN915 **文献标识码:** A

## Application of dual-mode control in the continuous playback of streaming media

ZOU Yong<sup>1</sup>, ZHAO Hai<sup>1</sup>, WEI Li-feng<sup>2</sup>, ZHOU Yan<sup>1</sup>

(1. School of Information of Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;  
2. Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang Liaoning 110142, China)

**Abstract:** Because of the limitations in the traditional sending-rate control and the play-rate control, it is difficult to eliminate the delay and the influence of network disturbances in the continuous playback of streaming media. To improve the performance of the play system, a dual-mode control is applied. An internal mode feedback control of the sending-rate in the source is adopted to overcome the adverse effect caused by the propagation delay; and a simple PID controller of playback-rate in the sink is adopted to control the buffer length of the sink. Experiments show that this scheme reduces the influence of asynchronization caused by the delays in transmission and the disturbances of network in playback, and clamps buffer length at a steady value around the target buffer occupancy, effectively preventing the play-pause in buffer underflow and the play-jump in buffer overflow. The variation of the sending-rate is reduced, which is helpful to reduce the network congestion. Compared with the existing methods, it exhibits better control performances in the continuous playback under large network disturbances.

**Key words:** multimedia synchronization; dual-mode control; internal-model control; dynamic playback

### 1 引言(Introduction)

宽带通信和Internet技术的发展, 大大促进了多媒体通信技术的发展. 网络环境下的流媒体应用也随之越来越广泛. 同步是流媒体播放应用中的一个关键问题. 媒体内同步主要是维持一个媒体流内部各媒体单元的时间关系. 由于网络的时延抖动以及发送方和接收方时钟的差异, 在接收方必然会出现不同步<sup>[1]</sup>. 通常利用缓冲区技术来补偿网络时延抖动所导致的媒体播放失步. 但在网络中有不可预测的抖动发生时, 缓冲区容易发生溢出或欠载现象,

即使没有传输错误发生, 也会导致失步发生影响播放质量. 为了保证媒体的同步, 就必须将缓冲区长度(占用水平)控制在一个合理的水平.

调节缓冲区可以在发送端进行<sup>[1~3]</sup>, 也可以在接收端进行<sup>[4~6]</sup>. 文献[1,3]提出的算法是在发送端通过调整发送速率调节缓冲区. 文献[1]的算法只有在缓冲区占用情况脱离基本缓冲区的时候才进行调整. 文献[3]提出了基于反馈控制结构的内模控制器, 用以补偿网络时滞造成的影响. 文献[4]是在接收端通过调整播放速率的方法对缓冲区占用水平进行调

节. 设定一个门限, 当缓冲区占用水平高于门限时, 采用固定的最大速率播放. 低于门限时, 采用线性减少的方法降低播放速率. 文献[5]改进了该算法, 设定高、低两个门限. 文献[4,5]的方法在播放速率的变化不足以补偿缓冲区占用水平的变化时, 将严重影响播放质量. 以上方法都是使用简单的单回路控制系统, 而且都存在一定的局限性(发送速率控制受到网络环境的制约; 播放速率控制受到播放质量的制约). 当网络出现较大扰动时, 这样的简单单回路控制系统很难获得一个好的控制效果.

在此基础上, 本文提出将双重控制策略应用到流媒体连续播放中. 双重控制系统是对一个被控变量采用两个或更多的操纵变量的一种控制系统. 双重控制系统增加了控制系统的开环零点, 改善了控制品质, 提高了系统稳定性, 具有“急时治标, 缓时治本”的特点<sup>[7]</sup>. 本文采取在发送端控制发送速率、在接收端控制播放速率的双重控制的方法, 通过调节缓冲区长度, 实现了媒体的连续播放.

## 2 缓冲区(Buffer)

### 2.1 缓冲区长度(Buffer length)

在接收端设置缓冲区用以补偿网络抖动, 缓冲区长度(指缓冲区容量)的选取是关键. 缓冲区设置的太小, 将不能抵消时延抖动而影响播放质量, 严重时会造成媒体数据的丢失. 缓冲区设置的太大, 会增加播放时延(如视频会议系统, 播放时延的增加会影响系统的交互性). 文献[1]指出网络时延受限条件下, 当各个媒体单元经历不同时延实现媒体内同步所需的补偿缓冲区长度为 $2r\Delta$ , 其中 $r$ 是播放的标准速率,  $\Delta$ 是最大时延 $d_{\max}$ 和最小时延 $d_{\min}$ 之差.

但在真实的网络环境中,  $\Delta$ 是时变的, 在较大时间尺度内很难预先确定, 缓冲区长度也就很难选取. 考虑到网络时延抖动的复杂性, 在确定缓冲区长度时, 可以将文献[1]的结论与网络的统计特性、播放时延、系统资源等因素相综合确定缓冲区的长度. 一种可行的缓冲区模型如图1所示<sup>[1]</sup>. 先按上述方法确定基本缓冲区 $B$ 的大小, 然后在其两侧适当增加附加缓冲区, 附加缓冲区原则上要能够弥补网络抖动造成的失步. 当缓冲区运行在上、下限(HL, LL)之间时, 认为播放正常, 当缓冲区位置小于LL或高于HL时, 容易造成缓冲区欠载或溢出, 导致播放不连续.

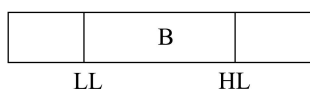


图1 缓冲区模型

Fig. 1 Buffer model

### 2.2 速率控制模型(Sending rate control model)

速率控制模型, 如图3左侧所示. 设接收端缓冲区长度为 $b(k)$ , 服务器的发送速率 $u(k)$ , 媒体接收速率为 $\lambda(k)$ , 媒体播放速率为 $\mu(k)$ ,  $q(k)$ 为网络扰动, 缓冲区的容量大小 $B^0 = 300 \text{ kB}$ , 发送数据包的大小为 $1 \text{ kB}$ . 控制周期 $T_s$ 内媒体接收速率与媒体播放速率的差值 $r(k) = \lambda(k) - \mu(k)$ , 即单位时间缓冲区长度的变化. 由于缓冲区的容量有限, 缓冲区动态具有饱和非线性, 缓冲区的离散方程如下:

$$b(k) = \text{Sat}_{B^0} \{b(k-1) + T_s r(k-1)\} = \text{Sat}_{B^0} \{b(k-1) + T_s (\lambda(k-1) - \mu(k-1))\}. \quad (1)$$

其中

$$\text{Sat}_z = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ a, & z > a, \\ z, & \text{其他.} \end{cases}$$

相关变量分析:

$\lambda(k)$ : 接收速率, 对接收端缓冲区来说, 接收速率相当于服务器的发送速率与网络抖动之差, 即 $\lambda(k) = u(k) - q(k)$ ,  $q(k)$ 是因为网络负载变化和重发而造成的网络速率抖动.

$\mu(k)$ : 播放速率, 采用MPEG-1视频压缩格式为视频数据背景, 平均播放速率为 $172 \text{ kB/s}$ .

被控变量: 选择缓冲区长度 $b(k)$ 为被控变量, 将缓冲区长度控制在合理的范围内, 从而避免欠载和过载的发生, 将会得到好的播放质量.

缓冲区长度设定值:  $B^0 = 300 \text{ kB}/2 = 150 \text{ kB}$ . 设定值过高, 在负载波动时容易产生过载而造成丢包; 设定值过低, 在负载波动时容易产生欠载而造成缓冲区数据“真空”影响播放质量.

缓冲区上、下限(HL, LL): 依据缓冲区模型, 将HL设定为 $225 \text{ kB}$ , 将LL设定为 $75 \text{ kB}$ .

操纵变量: 服务器的发送速率 $u(k)$ . 为方便问题分析, 本文将变量进行增量化处理. 假设初始稳定状态:

$$\begin{aligned} \lambda_s(0) &= \mu_s(0) = u_s(0) = 172 \text{ kB/s}, \\ b_s(0) &= 150 \text{ kB}, q_s(0) = 0 \text{ kB/s}, \end{aligned}$$

不失一般性, 在稳态附近变量增量化处理:

$$\begin{aligned} \Delta\mu(k) &= \mu(k) - \mu_s(0), \\ \Delta\lambda(k) &= \lambda(k) - \lambda_s(0), \\ \Delta u(k) &= u(k) - u_s(0), \\ \Delta b(k) &= b(k) - b_s(0), \\ \Delta q(k) &= q(k) - q_s(0). \end{aligned}$$

在设计速率控制模型时, 本文假设 $u(k)$ 恒等于172 kB/s. 不特别指出, 文中所取变量以稳态值为基准增量化, 用 $u(k)$ 代替 $\Delta u(k)$ ,  $b(k)$ 代替 $\Delta b(k)$ , 考虑到延迟时间 $\tau$ , 令 $d = \tau/T_s$ , 缓冲区的动态方程为

$$b(k) = b(k-1) + T_s\{u(k-1-d) - q(k-1-d)\}. \quad (2)$$

本文取采样周期 $T_s = 0.5$  s.

避免网络拥塞的约束条件:

网络产生拥塞的因素主要有: 1) 不断增加的数据流而导致网络没有足够的带宽; 2) 网络中已有数据流发送速率的剧烈扰动<sup>[2]</sup>. 第一个因素是无法避免的. 针对第二个因素可以采取稳定数据流的方式, 即对数据流发送速率的波动给予一定的限制, 设置约束条件. 在控制系统中, 由于网络扰动的快速变化, 可能出现没有足够的网络带宽用以满足控制器输出所需带宽(增加发送速率时需要的带宽)的情况, 在这种情况下, 如果仍然使用控制器计算出的速率来发送数据, 将对网络中的其他数据流产生影响, 容易造成网络拥塞的发生. 所以, 为了减弱数据流发送速率变化而产生的网络波动, 防止网络拥塞. 必须对发送速率进行限制, 对其设置约束条件.

文献[3]为了防止网络抖动和拥塞, 以MRCT(发送速率最大变化量)作为约束条件, 即

$$\left| \frac{du(t)}{dt} \right| \leq R_m = 2 \text{ kB/s}^2.$$

但经过仿真实验发现: 在网络扰动较小时, 该约束条件对控制系统的稳定性影响很小. 当网络扰动较大时, 由于约束条件苛刻, 系统无法稳定, 缓冲区出现欠载和溢出的情况. 文献[8]以TFRC(TCP-friendly rate control)算法<sup>[9]</sup>为基础对发送速率进行限制, 提出了一种实时视频流传输控制算法, 使视频流具有TCP-friendly的性质, 减少了网络发生拥塞的可能性, 提高了视频流的发送质量.

本文也采用TFRC算法来确定发送速率上限, 并将其作为控制器输出的约束条件. TFRC算法是由Floyd等人提出的, 具有在网络阻塞发生时平滑地调节发送速率的功能. 其公式<sup>[10]</sup>如下:

$$T_{\max} = \frac{s}{R\sqrt{\frac{2p}{3}} + t_{\text{RTO}}(3\sqrt{\frac{3p}{8}})p(1 + 32p^2)}, \quad (3)$$

$T_{\max}$ 是发送速率上限,  $s$ 是数据包的大小,  $R$ 是Rtt时间,  $p$ 是稳定状态的丢失率,  $t_{\text{RTO}}$ 是TCP重传超时间.

在网络带宽充足的情况下, TFRC算法确定的发送速率上限大于控制器计算的发送速率, 控制算法能够得到真正的执行. 在网络带宽不充足的情况下, TFRC算法确定的发送速率上限可能小于控制器计

算的发送速率, 这时应使用TFRC算法确定的发送速率. 这种情况下, 约束条件会对控制的性能产生一定的影响.

### 2.3 动态播放模型(Dynamic playback model)

动态播放模型(图3右侧)根据缓冲区的长度来调整播放的速率<sup>[5]</sup>. 当缓冲区长度大于设定值时, 播放速率增加(不能高于最大允许播放速率 $\mu_{\max}$ ); 当缓冲区长度小于设定值时, 播放速率减小(不能低于最小允许播放速率 $\mu_{\min}$ ). 针对TV品质的视频要求时延抖动不能超过10 ms, 在这个范围内人眼感觉不到播放速率的变化, 如果正常的播放速度为25 帧/秒, 即每帧持续40 ms, 那么按TV品质的视频对延抖动的要求, 每帧持续时间应在30 ms至50 ms之间, 则按照播放速率为172 kB/s进行换算:

$$\mu_{\max} = 172/25 \times 33 = 227.04 \text{ kB/s},$$

$$\mu_{\min} = 172/25 \times 20 = 137.6 \text{ kB/s}.$$

播放速度变化范围在25%以内时, 用户都不会刻意去关注<sup>[11]</sup>. 即使变化范围达到50%, 有时也仍能被用户接受<sup>[6]</sup>. 所以在一定程度内超出最大和最小允许播放速率范围, 都是可以接受的. 动态播放模型动态方程的推导, 其过程与2.2节基本相同, 只是将假设条件变为 $u(k)$ 恒等于172 kB/s且不存在网络扰动. 这里就不在赘述, 其动态方程为

$$b(k) = b(k-1) - T_s\mu(k-1). \quad (4)$$

## 3 双重控制策略(Dual mode control strategy buffer)

控制系统操纵变量的选择应该既考虑工艺的合理和经济, 又要考虑控制的快速性. 前者是从静态考虑, 后者是从动态考虑. 这两种要求有时可以统一于某一个操纵变量, 但有时也会出现矛盾. 过程控制系统中有很多这样的例子, 如喷雾干燥控制系统、换热器控制系统, 为了能够综合两类操纵变量的优点、克服各自缺点的控制系统, 双重控制系统于20世纪60年代初期出现在化工过程控制领域<sup>[7]</sup>, 并广泛应用在实际化学工业过程的非线性系统中<sup>[12]</sup>.

### 3.1 双重控制的结构特点(Structure characteristic of dual mode control)

双重控制系统是对一个被控变量采用两个或更多的操纵变量的一种控制系统, 其典型示例图如图2所示, 它由一个检测装置、两个控制器和两个调节阀组成, 控制器之间串联并存在主、副关系. 在实际应用中主调节器的位置可以调整, 本文将其调整为主、副调节器并联的结构, 如图4所示.

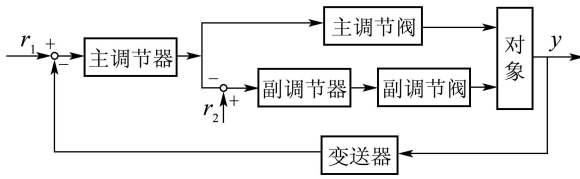


图2 双重控制典型示例图

Fig. 2 Dual mode control diagram of classical example

### 3.2 流媒体播放中的双重控制模式(Dual mode control in playback of streaming media)

在网络出现较大扰动时, 单独的发送速率控制或播放速率控制由于其自身的局限性(发送速率控制受到网络环境的制约; 播放速率控制受到播放质量的制约), 都不能很好地解决流媒体连续播放的问题. 为此本文借鉴了双重控制策略的思想, 结合缓冲区模型的自身特点, 将两个单回路的控制合并在一起(如图3所示), 使用发送速率和播放速率作为操纵变量对被控变量(缓冲区长度)进行调节, 来克服网络时延扰动对缓冲区的影响, 继而实现流媒体的连续播放.

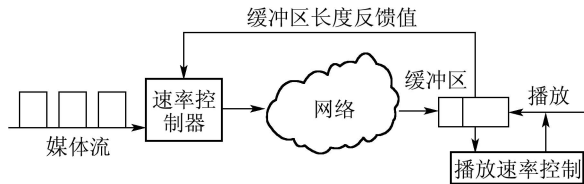


图3 双重控制系统在流媒体连续播放中的应用示意图

Fig. 3 Dual mode control in the application of continuous playback of streaming media

本文的双重控制系统由两个并联的控制回路组成, 如图4所示, 分别是发送速率控制回路和播放速率控制回路. 两个回路共用一个监视器, 每个回路有一个控制器和一个执行器, 监视器负责检测缓冲区长度并将其分别反馈给发送速率控制器和播放速率控制器. 发送速率控制器位于发送端, 播放速率控制器位于接收端. 两个控制器独立地按自身的控制策略来计算发送速率和播放速率, 两种控制作用共同作用于缓冲区. 由于网络传输的时滞性, 在设计发送速率控制器时采用了内模控制器; 播放速率控制没有时间滞后, 控制效果更为直接, 在设计播放速率控制器时只采用了简单的PID控制器. 这里考虑到两个控制回路的不同特点, 本文选择速率控制器为主调节器, 播放速率控制器为副调节器.

文中发送速率控制中的发送速率及播放速率控制中的播放速率都属于网络体系结构层次中的应用层范畴. 与工业控制中的调节阀相比, 流媒体播放控制系统中的执行器简单易行. 在发送速率控制回路

中, 数据包的大小为1 kB, 流媒体发送系统可以通过改变发送数据频率的方式执行控制器的输出, 发送相应速率的流媒体数据. 在播放速率控制回路, 流媒体播放系统可以通过改变播放时间间隔的方式执行控制器输出, 按相应速率进行播放.

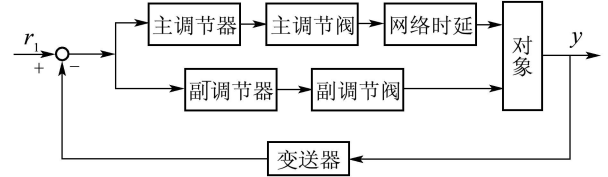


图4 本文提出的双重控制示意图

Fig. 4 Dual mode control diagram presented in this paper

### 3.3 基于速率控制模型的内模控制器(Internal mode control based on sending rate control model)

在实际的网络传输过程中, 由于网络传输延迟与抖动, 使得缓冲区长度与速率模型表现为积分时滞特性, 和开环不稳定时滞系统一样, 这类过程在系统性能与稳定性方面由于受到时滞的影响难以获得满意的效果. 在一般的反馈系统中, 负载干扰对系统的影响是不可避免的. 在多媒体的播放过程中, 干扰主要产生于被控系统的输入端, 由于特征方程中含有时滞项, 使得系统的抗干扰控制显得比一般非时滞系统更加难以达到理想的效果. 本文使用内模控制器设计控制器, 内模控制器的有效性和具体的设计过程详见文献[3].

媒体速率控制离散化内模控制结构如图5所示, 由式(2)得  $G_p(z) = \frac{0.5z^{-d-1}}{1-z^{-1}}$ , 控制器参数按如下步骤选取:

a) 采用简单的比例反馈控制将不稳定的积分时滞对象镇定, 选取比例反馈系数  $K_f = 0.5$  闭环后的广义模型为:  $G_e(z) = \frac{0.5z^{-d-1}}{1-z^{-1}-0.25z^{-d-1}}$ , 考虑到最大延迟时间  $\tau = 3T_s = 1.5$  s, 广义模型的根都在单位圆内, 该广义对象是稳定的.

b) 广义对象模型可分解成两部分:

$$G_e(z) = G_{e+}(z)G_{e-}(z) = \{0.5z^{-d-1}\} \left\{ \frac{1}{1-z^{-1}-0.25z^{-d-1}} \right\}. \quad (5)$$

式中  $G_{e+}(z)$  是模型中纯滞后部分,  $G_{e-}(z)$  是模型中最小相位部分.

c) 内模控制器的传递函数为

$$G_{imc}(z) = G_{e-}(z)^{-1}f(z). \quad (6)$$

式中

$$f(z) = \frac{1}{1 - \beta z^{-1}} = \frac{1}{1 - 0.5z^{-1}}, \beta < 1. \quad (7)$$

选择  $\beta = 0.5$ , 满足  $f(1) = G_{e+}^{-1}(1)$  条件, 以获得闭环系统的零偏差要求.

d) 解决由模型失配而引起的闭环系统不稳定简单而有效的方法是, 在反馈通道中插入一个反馈滤波器  $G_f(z)$  见图 5, 适当选择滤波器的结构和参数, 可以有效地抑制输出振荡, 获得期望的动态特性和鲁棒性. 通常反馈滤波器可选择较简单的形式

$$G_f(z) = \frac{1 - \alpha_f}{1 - \alpha_f z^{-1}}, 0 < \alpha_f < 1. \quad (8)$$

本文选取  $\alpha_f = 0.05$ .

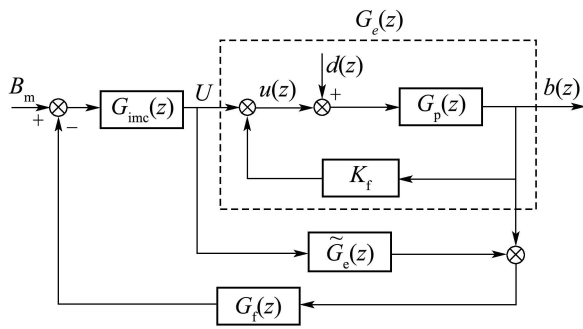


图 5 内模控制系统方框图

Fig. 5 Internal model control diagram

### 3.4 播放速率控制器(Playback rate controller)

本文根据缓冲区的占用水平选择相应的播放速率, 采用简单的 PID 控制器(如图 6), 对播放速率进行反向调节, 播放速率在最大和最小允许播放速率之间变化.

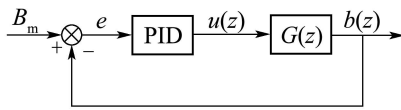


图 6 播放速率控制系统方框图

Fig. 6 Playing rate control system diagram

由式(4)得  $G(z) = -\frac{0.5z^{-1}}{1 - z^{-1}}$ , 为了保障播放速率控制副回路的快速响应, 仿真时只采用了比例控制, 比例控制器的传递函数为  $D(z) = k_p$ , 经仿真计算在  $k_p = -0.45$  可以满足控制器快速反应的要求.

### 3.5 控制系统的稳定性分析(Stability analysis of control system)

由于在双重控制系统中发送速率控制回路中存在网络传输延迟引起的滞后, 该回路为积分时滞

环节, 是不稳定环节, 必须考虑到系统稳定性问题. 本文采用双重控制策略构造的控制回路(图 7)比较复杂, 为此在分析回路的稳定性时, 使用了梅森公式<sup>[13]</sup>进行分析, 梅森公式中的系统特征式:

$$\Delta = \Sigma(\text{各条回路的增益}) + \Sigma(\text{不相接触的两条回路增益之积}) - \Sigma(\text{不相接触的三条回路增益之积}) + \dots$$

闭环回路增益:

$$l_1 = G_{imc}(z)\tilde{G}_e(z)G_f(z) (\text{与 } l_3 \text{ 和 } l_4 \text{ 未相接触}),$$

$$l_2 = G_{imc}(z)G_p(z)G_f(z),$$

$$l_3 = G_p(z)K_f (\text{与 } l_1 \text{ 未相接触}),$$

$$l_4 = G(z) (\text{与 } l_1 \text{ 未相接触}),$$

$$\Delta = 1 - (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) + (l_1 \cdot l_3 + l_1 \cdot l_4).$$

当内模控制模型失配时( $d = 3$ ), 系统特征式的 6 个特征根为:

$$p_1 = 0.010, p_2 = 0.634,$$

$$p_{3,4} = -0.452 \pm i0.722,$$

$$p_{5,6} = -0.905 \pm i0.277$$

均在单位圆内, 所以系统是稳定的.

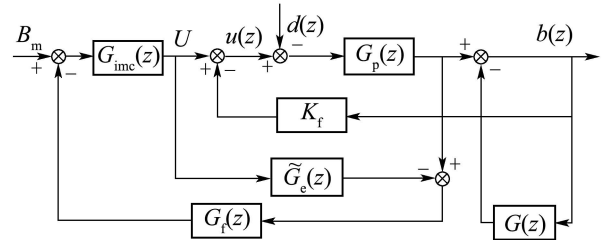


图 7 双重控制系统结构图

Fig. 7 Dual mode control diagram

## 4 仿真结果(Simulation)

在网络拥塞控制算法的作用下, 网络中的 TCP 流将处于稳定的发送状态. 当出现新的大流量的 TCP 流(如 ftp 下载或视频播放)时, 会占用较大带宽, 会对网络造成较大的扰动, 对网络中已有的 TCP 流造成较大的影响. 这种情况的出现在控制理论中相当于工业控制系统中的负荷变化.

本文使用 MATLAB 进行仿真实验, 通过施加较大的阶跃扰动来分析比较双重控制与在发送端或接收端使用单回路控制系统的性能. 实验条件如下:

1) 设阶跃扰动  $q(t) = 60 \text{ kB/s}$ .

2) 模型匹配时  $\tau = T = 1 \text{ s} (d = 2)$ ; 模型失配时  $\tau = 1.5 \text{ s}, T = 1 \text{ s} (d = 3)$ .

本文采用缓冲区长度、发送速率和播放速率变化量作为评价指标.

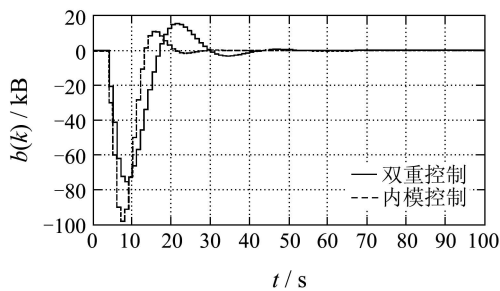
#### 4.1 双重控制与仅在发送端使用内模控制的性能对比分析(Comparative analysis of dual model control and internal mode control in the source)

文献[3]指出在存在网络时延扰动的前提下,发送速率控制采用一般的常规控制方法时控制效果较差,相比之下内模控制具有较好的控制性能.本文提出的双重控制策略是对文献[3]的一种有益补充,所以在进行性能比较时,选择了双重控制策略与仅在发送端使用内模控制器的控制策略进行性能比较.

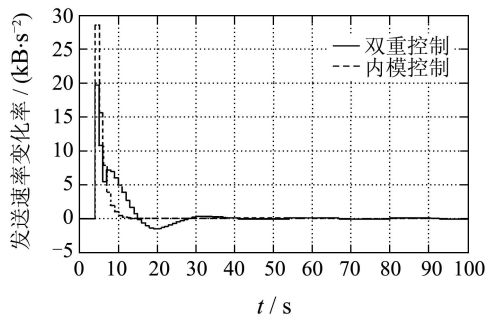
##### 4.1.1 网络带宽充足(Sufficient network bandwidth)

此时控制器的输出可以无限制地执行,内模比例系数 $K_f$ 的取值对控制结果有很大的影响,当 $K_f$ 较小时,控制的作用较弱,缓冲区不能稳定在设定值(图略).当 $K_f = 0.5$ 时,控制效果良好,如图8所示.

从图8、图9可以得到如下结论:对于阶跃扰动,在网络带宽充足的条件下,双重控制策略无论在速率控制模型匹配或失配时,其性能指标明显优于仅在发送端使用内模控制器的控制策略的性能指标,缓冲区能够控制在合理的范围内,速率变化相对较小,对网络产生影响相比也较小.而仅在发送端使用内模控制器的控制策略在扰动增加到一定程度后,超调量过大,缓冲区容易产生欠载现象,媒体播放质量不能保证.



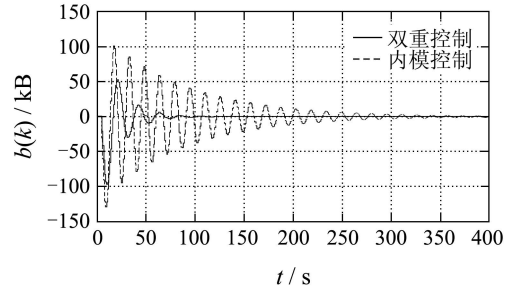
(a) 缓冲区长度



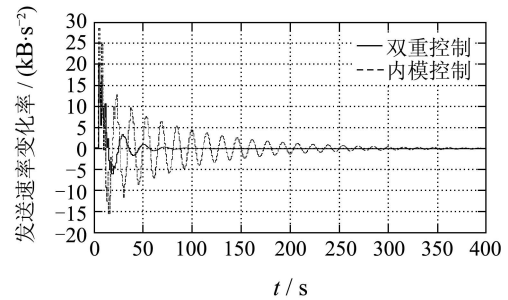
(b) 发送速率变化率

图8 速率控制模型匹配时的阶跃响应曲线( $\tau = T = 1$  s)

Fig. 8 Step response curves of the case the sending rate model matches the process( $\tau = T = 1$  s)



(a) 缓冲区长度



(b) 发送速率变化率

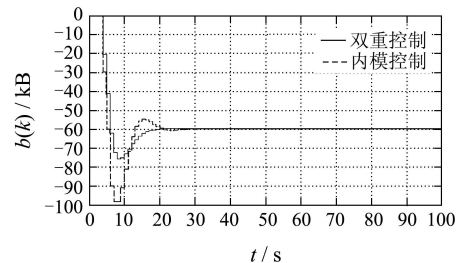
图9 速率控制模型失配时的阶跃响应曲线( $\tau = 1.5$  s,  $T = 1$  s)

Fig. 9 Step response curves of the case the sending rate model matches the process( $\tau = 1.5$  s,  $T = 1$  s)

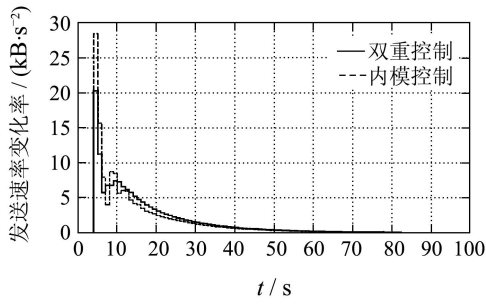
##### 4.1.2 网络带宽不充足(Insufficient network bandwidth)

在网络带宽不充足时,采用TFRC算法对速率控制器的输出进行约束,这里假设TFRC算法约束后的控制器最大输出为30 kB/s.在 $K_f = 0.5$ 时出现积分饱和(图略).在 $K_f = 0.4$ 条件下的响应曲线如图10、11所示.

从图10和图11可以得到如下结论:对于阶跃扰动,在网络带宽不充足的条件下,在速率控制模型匹配时,如果发送速率控制器的比例系数过大,将导致积分饱和.在降低比例系数后,积分饱和现象消失.但由于存在约束条件,发送速率控制器不能充分发挥作用,控制效果明显降低,缓冲区只能稳定在缓冲区的较低水平位置,但播放还是正常的.双重控制无论在速率控制模型匹配还是失配时,控制的性能指标明显优于仅在发送端使用内模控制器的控制策略的性能指标.



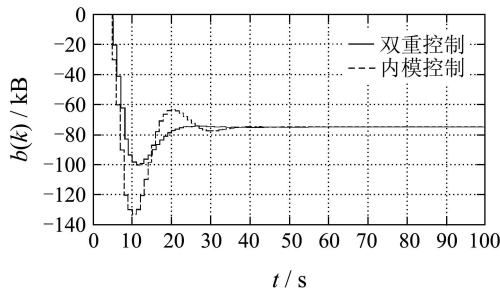
(a) 缓冲区长度



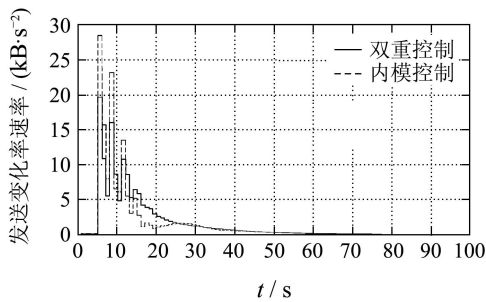
(b) 发送速率变化率

图 10  $K_f = 0.4$  时速率控制模型匹配时的阶跃响应曲线 ( $\tau = T = 1$  s)

Fig. 10 Step response curves of the case the sending rate model matches the process ( $\tau = T = 1$  s)



(a) 缓冲区长度



(b) 发送速率变化率

图 11  $K_f = 0.4$  时速率控制模型失配时的阶跃响应曲线 ( $\tau = 1.5$  s,  $T = 1$  s)

Fig. 11 Step response curves of the case the sending rate model mismatches the process under

$K_f = 0.4$  ( $\tau = 1.5$  s,  $T = 1$  s)

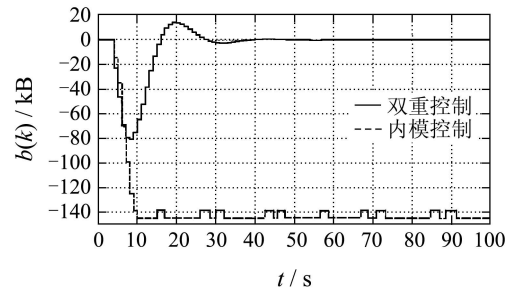
#### 4.2 双重控制与仅在接收端使用播放速率控制性能的对比分析(Comparative analysis of dual model control and playback rate control in the sink)

本文将双重控制策略与文献[5]提出的播放速率控制的方法进行性能比较分析, 文献[5]的算法是根据缓冲区的当前占用情况决定合适的播放速率. 假设缓冲区中有  $i$  个数据帧, 则播放速率由下式确定(式中参数的具体意义参见文献[5]).

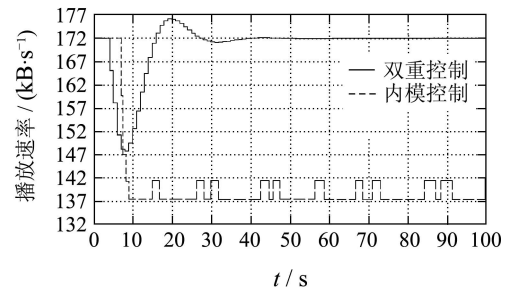
$$\mu(i) = \begin{cases} \mu_{\min} + \frac{\mu - \mu_{\min}}{LL} \cdot i, & i < LL, \\ \mu, & LL \leq i \leq HL, \\ \mu + \frac{\mu_{\max} - \mu}{N - HL} \cdot (i - HL), & i > HL. \end{cases} \quad (9)$$

由于播放速率控制的方法只在接收端进行调节, 播放速率只是由缓冲区中数据帧的数量决定, 与网络的拥塞状况和时延无关. 由于篇幅限制, 本文仅给出了双重控制策略在网络带宽充足和速率控制模型匹配条件下的性能分析.

从图12可以看出在较大阶跃扰动条件下仅使用播放速率控制的方法控制效果并不理想, 缓冲区很快出现欠载, 播放出现停顿. 而双重控制的效果非常理想, 播放正常.



(a) 缓冲区长度



(b) 播放速率

图 12 阶跃响应曲线

Fig. 12 Step response curves

综上所述, 采用双重控制策略, 无论在网络带宽充足与否, 还是在速率控制模型匹配或失配的条件下, 其控制性能明显好于在发送端或接收端使用单回路控制系统的性能, 系统具有较强的鲁棒性.

#### 5 结论(Conclusion)

本文采用了双重控制策略, 同时对发送速率和播放速率进行调节, 实现了媒体的连续播放. 仿真结果表明双重控制策略在各种条件下, 其控制性能明显优于在发送端或接收端使用单回路控制系统的性能, 缓冲区能够快速稳定在合理的区间, 超调量明显降低, 发送速率变化率也较小, 对网络中的其他数据

流产生的影响也较小,有利于避免网络拥塞的发生,播放质量明显提高。

### 参考文献(References):

- [1] 许延,常义林,刘增基.一种新的媒体内同步控制算法[J].计算机研究与发展,2002,39(12):1675-1680.  
(XU Yan, CHANG Yilin, LIU Zengji. A new algorithm for intra-media synchronization[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2002, 39(12): 1675-1680.)
- [2] HUANG C, XU L H. SRC: Stable rate control for streaming media[C] // *Proceedings of IEEE Globecom*. San Francisco, 2003, 7: 4016-4021.
- [3] 于海滨,魏立峰,陆勇林.实时多媒体流控中的内模控制器设计[J].通信学报,2004,25(11):90-97.  
(YU Haibin, WEI Lifeng, LU Yonglin. Design on internal model controller for flow control in real-time multimedia communication[J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2004, 25(11): 90-97.)
- [4] YUANG M C, LIANG S T, CHEN Y G. Dynamic video playout smoothing method for multimedia applications[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 1998, 6(1): 47-60.
- [5] 许延,常义林,刘增基.网络环境下视频连续播放控制算法[J].电子学报,2004,32(7):1078-1081.  
(XU Yan, CHANG Yilin, LIU Zengji. A control scheme for video continuous playback in network environment [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(7): 1078-1081.)
- [6] 严峻,戴琼海.基于模糊控制的自适应播放算法[J].清华大学学报(自然科学版),2008,48(1):157-160.  
(YAN Jun, DAI Qionghai. Adaptive media playout algorithm based on fuzzy control[J]. *Journal of Tsinghua University(Natural Science)*, 2008, 48(1): 157-160.)
- [7] 邵惠鹤.工业过程高级控制(第二版)[M].上海:上海交通大学出版社,2003.  
(SHAO Huihe. *Industry Advanced Process Control (2nd edition)*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003.)
- [8] 周正武,董育宁. IP网络实时视频流的传输控制算法AVTC的研究[J].计算机研究与发展,2004,41(5):812-820.  
(ZHOU Zhengwu, DONG Yuning. Research on a transmission control algorithm of the real-time video stream AVTC over IP network[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, 41(5): 812-820.)
- [9] FLOYD S, PADHYE J, WIDMER J. Equation-based congestion control for unicast applications[C] // *Proceedings of ACM SIGCOMM Conference*. Stockholm: ACM, 2000, 45-58.
- [10] PADHYE J, FIROIU V, TOWSLEY D, et al. *Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation*[EB/OL], 1998. <http://www.ecse.rpi.edu/Homepages/shivkuma/teaching/sp2001/readings/Padhye98.pdf>.
- [11] KALMAN M, STEINBACH E, GIROD B. Adaptive media playout for low-delay video streaming over error-prone channel[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video TechSpecial Issue on Wireless Video*, 2004, 14(6): 841-851.
- [12] 刘士荣,林卫星,俞金寿,等.非线性动态系统神经模糊建模与内模/PID双重控制系统设计[J].控制理论与应用,2004,21(4):553-560.  
(LIU Shirong, LIN Weixing, YU Jinshou, et al. Neurofuzzy modeling for nonlinear dynamic systems and double control system design with internal model control and PID control[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(4): 553-560.)
- [13] FRANKLIN G, POWELL J, EMAMI-NAEINI A. *Feedback Control of Dynamic Systems(3rd edition)*[M]. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1993.

### 作者简介:

邹勇 (1975—),男,博士研究生,研究方向为计算机网络、多媒体通信, E-mail: ykzouyong@sina.com;

赵海 (1959—),男,教授,博士生导师,研究方向为信息融合、嵌入式技术、复杂网络;

魏立峰 (1962—),男,教授,博士,研究方向为实时系统与应用、复杂系统建模与控制;

周艳 (1968—),女,博士,研究方向为普适计算。