

文章编号: 1001-0920(2005) 02-0214-04

实时多媒体流控中的预测最优均匀控制器设计

魏立峰¹, 于海斌², 祁红岩¹

(1. 沈阳化工学院 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110142; 2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 网络传输的抖动影响了 VOD 的播放质量, 采用反馈控制机制进行实时多媒体流量控制是一种有效解决方法, 但因实时多媒体流控模型及性能要求的特殊性, 仅采用传统的反馈控制技术难以消除这一缺点. 针对此问题, 建立了实时多媒体反馈控制框架下的性能指标评价体系, 设计了预测最优均匀控制算法. 仿真实验表明, 该算法有效地克服了网络传输抖动带来的不利影响, 提高了 VOD 的播放质量.

关键词: 实时多媒体; 预测最优均匀控制; VOD

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design of predictive optimal averaging controller for flow control in real-time multimedia communication

WEI Li-feng¹, YU Hai-bin², QI Hong-yan¹

(1. School of Information Engineering, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; 2. Shenyang Institute of automation, Academia Sinica, Shenyang 110016, China. Correspondent: WEI Li-feng, E-mail: weilifeng62@sina.com)

Abstract: The feedback control mechanism for the real-time multimedia traffic control is discussed. Due to the particularity of the real-time multimedia flow model and performance demand, it is difficult for adopting conventional feedback control technology to overcome it. To these questions, the performance specifications of real-time multimedia feedback control frame are set up, and the model predictive optimal averaging control algorithm is designed. Simulation experiments show that this algorithm can overcome the adverse effect caused by propagation jitter and improve the quality of playback of VOD.

Key words: real-time multimedia; predictive optimal averaging control; VOD

1 引言

最近几年, 基于速率反馈的高速网络拥塞控制取得了长足进展, 国内外许多学者在该领域取得了较深入的研究^[1], 但仍有不同的网络流量控制应用领域停留在研究初期阶段. 例如实时多媒体流控的模型与网络拥塞的模型相近, 而在控制性能指标要求方面却不同于拥塞控制. 文献[2, 3]表明, 控制理论已成功应用于基于速率的视频编码和高速网络设施, 尤其在负载信息不确定时, 反馈机制可获得较好的系统性能. Wang 等^[4]扩展了这种控制策略, 利用

缓冲区本身的容错能力将速率控制在允许的波动范围内. 但是, 由于采用经典控制技术, 控制系统存在如下缺陷: 1) 较低的增益, 使得动态响应性能变差; 2) 当网络传输抖动时, 系统的鲁棒性能变差.

本文在实时多媒体流控中建立了实时多媒体反馈控制框架下的性能指标评价体系; 采用模型预测方法与优化技术相结合, 设计了以缓冲区长度为被控变量的模型预测最优均匀控制算法; 并通过仿真实验验证了该方法的有效性.

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校科技公关计划项目(20040291).

收稿日期: 2004-04-29; **修回日期:** 2004-07-06.

作者简介: 魏立峰(1962—), 男, 浙江嵊州人, 教授, 博士, 从事实时系统与应用、复杂系统建模与控制的研究; 于海斌(1964—), 男, 黑龙江密山人, 研究员, 博士生导师, 从事实时系统理论、分布式控制系统等研究.

2 反馈控制结构

通过上述分析可知, VOD缓冲区长度控制与“流程”工业过程控制中的液位均匀控制在模型结构和控制性能要求方面极为相似. 近年来针对均匀液位控制问题出现了一些采用预测及优化控制的先进控制方案^[5-7], 控制效果比传统的均匀控制方案有了明显提高, 为液位控制提供了新的思路. 因而, 均匀控制理论的发展结果可以应用到多媒体流控中.

反馈控制系统结构如图 1 所示^[5]. 整个系统包括任务模型、监视器、执行器和控制器.

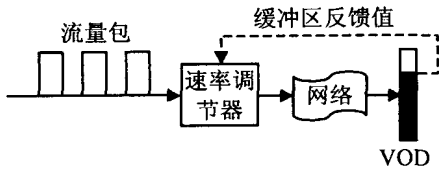


图 1 速率反馈控制系统结构

2.1 相关变量选择

根据图 1, 可建立如下控制相关变量:

1) 中间变量(对于反馈控制器是未知的): 接收速率 $\lambda(k)$, 为服务器的发送速率与网络抖动速率之和, 即 $\lambda(k) = u(k) + q(k)$, 其中 $q(k)$ 为因网络传输延迟和数据重传等产生的网络速率抖动; 播放速率 $\mu(k)$, 采用 MPEG-1 文件格式作为视频数据背景, 其平均播放速率大约为 172 kB/s. $r(k) = \lambda(k) - \mu(k)$ 为接收速率和播放速率的差值.

2) 被控变量: 缓冲区长度 $b(k)$.

3) 设定值或期望值(代表被控变量期望的性能): 缓冲区长度设定值 $B_m = B^0/2 = 100$ kB; 缓冲区上、下限域值分别为 $B_h = 150$ kB 和 $B_l = 50$ kB, 当超出其范围时, 容易产生溢出或欠载现象, 影响播放质量.

4) 操纵变量: 服务器的发送速率 $u(k)$.

2.2 速率控制模型

因缓冲区容量有限, 缓冲区动态具有饱和和非线性, 设 T_s 为控制周期, 可得如下缓冲区离散方程:

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

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

本文重点分析控制系统的抗干扰性能. 为方便起见, 将变量在稳态附近进行变量增量化处理. 假设初始稳态状态 $\lambda(0) = \mu_s(0) = u_s(0) = 172$ kB/s, $b_s(0) = 100$ kB, $q_s(0) = 0$ kB/s. 由于 $\mu(k)$ 和 $q(k)$ 作用于对象前端, 且均为不可测, 可令 $d(k) = \Delta\mu(k) + \Delta q(k)$ 表示综合不可测扰动, 即通信网络

扰动为延时传输抖动与播放速率抖动所造成干扰之和, 此时 $\Delta r(k) = \Delta u(k) - d(k)$. 因而可用发送速率控制替代速率差控制. 不特别指出, 文中所取变量以稳态值为基准增量化, 仍用 $u(k)$ 代替 $\Delta u(k)$, $b(k)$ 代替 $\Delta b(k)$. 在缓冲区约束范围内, 可去掉式(1)的非线性因子, 则系统的动态方程为

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

2.3 性能评价指标

通过以上分析, 建立如下性能指标体系:

1) 最大发送速率变化率(MRCT): 如果发送速率的变化量超出了规定的范围, 即网络传输中的速率抖动过大, 将会影响网络共享环境下的友好性.

MRCT =

$$\max_{k \in K} \hat{u}u(t+k) - u(t+k-1) \hat{u} \leq 2 \text{ kB/s}^2, \quad (3)$$

式中 $k \in K = \{0, 1, \dots\}$.

2) 超调量 $\sigma(\%)$: 缓冲区长度的超调量是以 B_m 为参考基准的, $\sigma(\%)$ 越大, 其缓冲能力越弱.

3) 过渡过程时间 $t_s(\text{s})$: 速率稳定在 $\pm 2\%$ 阶跃扰动幅值内的时间, 该值大小表明速率波动持续时间长短, $t_s(\text{s})$ 越大, 对网络造成的速率抖动时间越长.

3 模型预测最优均匀控制器设计

本文采用文献[7]的设计思路进行实时多媒体流控模型预测最优均匀控制器(MPOA)的设计.

3.1 最优速率滤波器问题

首先将实时多媒体流控中平滑速率问题归结为最优速率滤波器设计问题. 以下分析 $d(t)$ 为阶跃扰动时的控制系统设计, 则由式(2)可得未来 k 时刻的离散化差分方程为

$$b(t+k+1) = b(t) - T_s \sum_{j=0}^k [d(t+j) - u(t+j)]. \quad (4)$$

设相邻采样时间之间的发送速率恒定, 在时刻 t , 离散时间及无穷域最优速率滤波问题可表示成如下优化问题:

$$\min_{u(t+k)} \max_{\hat{u}} \{\hat{u}u(t+k) - u(t+k-1)\hat{u}\}, \quad (5)$$

$$\text{s.t. } B_l \leq b(t+k+1\hat{u}) \leq B_h, k \in K. \quad (6)$$

其中: $K = \{0, 1, \dots\}$, $b(t+k+1\hat{u})$ 为基于当前 t 时刻信息预测未来 $t+k+1$ 时刻缓冲区长度. 由于干扰不可测, 采用内模结构预测干扰, 结构如图 2 所示. 假设任意速率干扰在 $t-1$ 时刻之后是恒定的, 由内部模型得

$$d(t+k\hat{u}) = d(t-1\hat{u}) = [d_b(t-1) - d_b(t)]/T_s. \quad (7)$$

将式(7)代入(4),可得约束方程为

$$\begin{aligned} b(t+k+1\hat{u}) = & \\ b(t) - (k+1)T_s d(t+ & \\ k\hat{u}) + T_s \sum_{j=0}^k u(k+j). & \end{aligned} \quad (8)$$

定义估计速率失衡量 $\Omega(t) = u(t-1) - d(t-1\hat{u})$. 考虑到传输系统扰动的随机特性,容易对系统控制产生高频噪声,故对估计速率失衡量进行惯性滤波后作为最后估计值,即

$$\Omega(t) = (1-\alpha)\Omega(t) + \alpha\Omega(t-1). \quad (9)$$

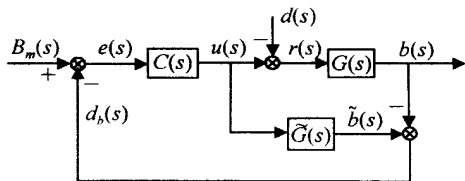


图 2 内模预测结构图

3.2 模型预测最优均匀控制算法

本节将最优速率滤波器设计问题拓展为模型预测控制问题. 设有限预测域长度为 P 个采样周期, 控制域步长为 1. 由于控制目标终点为 $b(t) \rightarrow B_m$, 且包含了固定端点条件 $b(t+P\hat{u}) = 0$. 将式(5), (6) 和(8) 扩展为

$$\min_u \|Ru(t) - eru(t-1)\|_\infty, \quad (10)$$

$$\text{s. t. } IB_l \leq Hu - nT_s d(t+k\hat{u}) + Ib(t) \leq IB_h. \quad (11)$$

其中

$$u = \begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ \dots \\ u(t+p-1) \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, e_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, n = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ p \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} T_s & 0 & \dots & 0 \\ T_s & T_s & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_s & T_s & \dots & T_s \end{bmatrix},$$

$\|x\|_\infty = \max_i \hat{u}_x \hat{u}$ 为 R^p 空间无穷范数.

在每个采样时间, 未来发送速率通过在线优化, 可使 P 步预测的缓冲区长度达到设定值, 通过解式(10)和(11)得到最优发送速率为

$$u(t) = \begin{cases} u(t-1) - \Delta u^0, & \hat{u}\Delta u^0 \hat{u} > \hat{u}\Delta u^* \hat{u}; \\ u(t-1) - \Delta u^*, & \hat{u}\Delta u^0 \hat{u} \leq \hat{u}\Delta u^* \hat{u}. \end{cases}$$

(12)

$$\Delta u^* = \frac{2\Omega(t)}{k^* + 1} - \frac{2[B_{lim} - b(t)]}{T_s k^* (k^* + 1)},$$

$$k^* = N \left\{ \frac{2[B_{lim} - b(t)]}{T_s \Omega(t)} \right\},$$

$$\Delta u^0 = \frac{2\Omega(t)}{P+1} + \frac{2[b(t) - B_m]}{T_s P(P+1)},$$

$$B_{lim} = \begin{cases} B_h, & \Omega(t) > 0; \\ B_l, & \Omega(t) \leq 0. \end{cases}$$

式中 $N\{x\}$ 表示大于或等于 x 的最小整数.

该解有明确的含义: Δu^* 为在 $t+k^*$ 之内防止约束破坏的发送速率最小幅值变化; Δu^0 为满足固定端点条件的发送速率最小幅值变化, 最好的可行解是二者之大. 对于特殊选择的 P , 大的速率失衡导致 $\hat{u}\Delta u^0 \hat{u} < \hat{u}\Delta u^* \hat{u}$, 并实施发送速率 $u(t) = u(t-1) - \Delta u^*$, 这相当于获得离散、无穷域 MRCT 最优求解, 此时固定端点条件并不影响滤波性能. 对于小的速率失衡, $\hat{u}\Delta u^0 \hat{u} > \hat{u}\Delta u^* \hat{u}$, $u(t) = u(t-1) - \Delta u^0$ 被执行, 这种条件下, 固定端点条件将引起 MRCT 增加. 保证固定端点条件不影响速率滤波的预测域长度 P 的条件为

$$P \geq P_{crit} =$$

$$\frac{1}{2\hat{u}\Delta u^* \hat{u}} 2\hat{u}\Omega\hat{u} + \left\{ (\hat{u}\Delta u^* \hat{u} - 2\hat{u}\Omega\hat{u})^2 + \frac{8}{T_s} \hat{u}(b(t) - B_m)\Delta u^* \hat{u} \right\}^{1/2} - \frac{1}{2}. \quad (13)$$

4 仿真结果分析

考虑到网络中数据的传输速率受到多种因素的影响, 使其具有不可观测性、不可预估性和不确定性, 这为网络流量的仿真带来一定的困难. 为较全面考核反馈控制性能, 给出如下干扰负载.

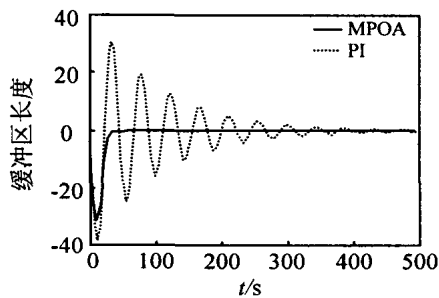
1) 阶跃干扰: 阶跃干扰是系统性能测试中常用的一种信号, 如果控制系统对阶跃扰动有较好的响应, 则对于其他扰动更能克服;

2) 低频正弦加随机干扰: 反映视频流解码和播放过程中缓慢规律的扰动变化.

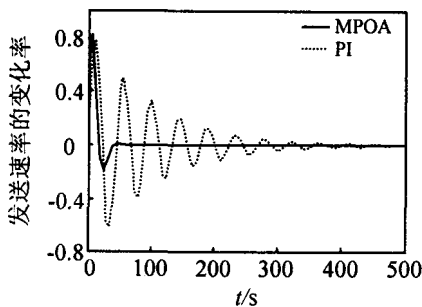
设阶跃扰动为 $d_b(t) = 6 \text{ kB/s}$, 正弦加随机扰动为 $d_b(t) = 5\sin(0.1t) + \text{Unif}(-1, 1) \text{ kB/s}$, 由方程(13)可确定临界 $P_{crit} = 25$, 选择 $P = 26$. 初态 $b(0) = B_m = 100 \text{ kB}$, $T_s = 0.5 \text{ s}$, $\alpha = 0.85$. 对比经典控制(PI 参数由文献[4]给出), 其缓冲区长度和发送速率变化阶跃响应曲线分别如图 3 和图 4 所示, 阶跃扰动的响应结果的评价性能指标列于表 1.

由上述响应结果可得到如下结论:

1) 对于阶跃扰动, 采用 MPOA 控制时的 MRCT 略大于 PI 控制时的 MRCT, 超调量和过渡过程时间均较小. 这表明采用 PI 控制时的速率长时间处于波动状态将会对网络通信造成不利影响.

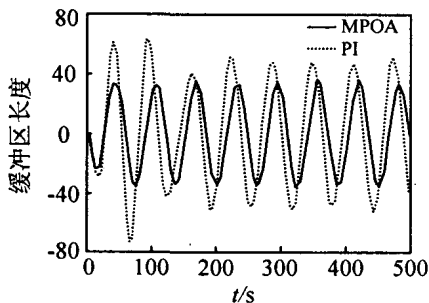


(a) 缓冲区长度

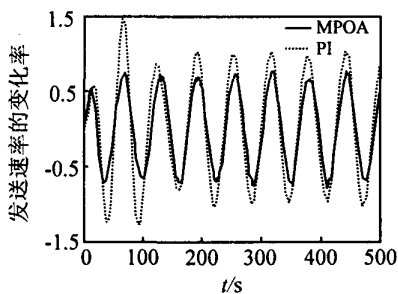


(b) 速率变化率

图3 阶跃扰动下缓冲区长度和速率变化率响应曲线



(a) 缓冲区长度



(b) 速率变化率

图4 正弦加随机扰动缓冲区长度和速率变化率响应曲线

表1 各种扰动作用下控制性能评价

扰动类型	控制算法	MRCT/(kb/s^2)	$\sigma/\%$	t_s/s
阶跃	MPOA	0.82	26.12	45.5
阶跃	PI	0.77	38.14	388
正弦+随机	MPOA	0.76	35.30	-
正弦+随机	PI	1.45	75.63	-

而MPOA控制速率波动平缓且收敛速度快,克服网络抖动能力强。

2) 对于正弦加随机扰动,采用MPOA控制时的MRCT和超调量较小;采用PI控制时的MRCT和超调量较大。这表明尽管MPOA控制是针对阶跃扰动设计的,但由于其模型预测特性使得该算法对于其他类型干扰仍可获得较好的控制性能。

综上所述,模型预测最优均匀控制的综合控制性能均优于传统的PI控制。

5 结 语

本文通过对比“流程”工业中物料平衡控制与实时多媒体缓冲区长度控制,阐述了两者之间存在极为相似的模型特点和性能指标要求。将“流程”工业中物料平衡控制中的先进控制技术映射到实时多媒体流控中,采用模型预测方法与优化技术相结合,详细推导了以缓冲区长度为控制变量的最优均匀控制算法。通过仿真实验验证了该方法的有效性,并证明该方法在各种扰动负载下的综合控制效果优于传统的PI控制方法,提高了反馈控制理论在实时多媒体流控中应用的有效性。

参考文献(References)

- [1] 汪小帆, 孙金生, 王执铨. 控制理论在 INTERNET 拥塞控制中的应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(02): 129-134.
(Wang X F, Sun J S, Wang Z Q. Application of control theory to Internet congestion control [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(02): 129-134.)
- [2] Kolarov A, Ramamurthy G. A control-theoretic approach to the design of an explicit rate controller for ABR service[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 1999, 17(5): 741-753.
- [3] Liew S C, Tse D C. A control-theoretic approach to adapting VBR compressed video for transport over a CBR communication channel[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 1998, 16(1): 42-45.
- [4] Wang C-H, Ho J-M, Chang R-I. A control-theoretic method for rate-based flow control of multimedia communication [A]. *Multimedia, Internet, Video Technologies 2001 of WSES/IEEE International Multi-conference* [C]. 2001: 2451-2456.
- [5] 郭方路, 岳红, 高东杰. 一种新的最优均匀液位控制策略[J]. 化工仪表与自动化, 2002, 26(5): 5-8.
(Guo F L, Yue H, Gao D J. A new optimal averaging level control strategy [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2002, 26(5): 5-8.)
- [6] McDonal K A, McAvoy T J, Tits A. Optimal averaging level control[J]. *AIChE J*, 1986, 32(1): 75-86.
- [7] Campo Peter J, Manfred Morari. Model predictive optimal averaging level control[J]. *AIChE J*, 1989, 35(4): 579-591.