

文章编号: 1001-0920(2008)02-0140-05

无线环境下拥塞控制算法的改进及其稳定性分析

金静花, 田玉平

(东南大学 自动化学院, 南京 210096)

摘要: 无线网络中数据传输的往返时间 RTT(roundtrip time)比有线网络中的 RTT 大,这使得针对有线网络设计的以时延作为拥塞信号的拥塞控制对偶算法应用到无线网络中时,其稳态性能下降,无线网络的带宽不能得到充分利用. 针对对偶算法进行了改进,以保证该算法在无线网络中的稳态性能不会降低;同时,就改进算法的稳定性进行了理论分析和仿真,给出了判断该分布式算法稳定的定理和参数的选择范围.

关键词: 无线网络; 拥塞控制; 对偶算法; 稳定性

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

Modified congestion control algorithm over wireless networks and its stability analysis

JIN Jing-hua, TIAN Yu-ping

(School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: JIN Jing-hua, E-mail: jinjinghua_cn@hotmail.com)

Abstract: Dual congestion control algorithm is originally designed for wired networks, which employs the roundtrip time(RTT) of the end-to-end path as a signal for network congestion. When it is deployed in wireless networks, an increase in the RTT due to additional wireless link delay will degrade network throughput and link utilization. A part of the algorithm is modified to guarantee the steady performance. A theorem is presented to judge the stability of the modified algorithm, and some parameter sets are offered.

Key words: Wireless network; Congestion control; Dual algorithm; Stability

1 引言

无线网络与有线网络存在着较大的差异,许多因特网技术都要改进后才能在无线网络中得到较好的应用. 以在因特网中普遍采用的传输控制协议 TCP 为例,该协议根据分组的丢失或时延的变化来判断网络中的拥塞情况^[1],决定是否启动拥塞控制算法(TCP Reno 协议将报文丢失直接判断为网络发生拥塞^[1];TCP Vegas 协议将队列时延作为网络拥塞信号^[2]). 在有线网络中,由于信道传输可靠,分组的丢失或时延的变化主要是由网络拥塞引起的. 因此,TCP 协议能够有效地控制网络负载,提高网络带宽利用率. 但是在无线网络中,由于信道传输不可靠,以及终端设备移动性等特点,分组的丢失或时延的变化在很多情况下是由链路误码、终端移动切换等原因导致的. 如果 TCP 不做任何修改直接运用

于无线网络,就会盲目地将分组的丢失或时延的变化都归因于网络拥塞,使得无线网络不存在拥塞时也会启动拥塞控制算法来降低源端的数据发送速率,从而使无线带宽得不到充分利用^[3].

无线网络中 TCP 性能下降的问题引起了研究人员的广泛关注,提出了许多方案来增强 TCP 在无线环境下的性能^[3-5]. 但是,这些方案都需要改变网络结构或者协议,因此很难得到推广应用. 最近,Chen 等人^[6]提出了一种新的改进方法,该方法通过改变用户应用程序的连接数来调节数据发送速率,使无线网络中的稳态发送速率能与有线网络中的相同,从而保证了无线网络的带宽利用率. 同时,此方法不需要改动网络结构或协议,较易于实现. 但 Chen 等人^[6]改进的是以丢包作为拥塞信息的主算法,并没有考虑以队列时延作为拥塞信息的对偶算

收稿日期: 2006-10-18; 修回日期: 2007-02-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60425308,60673058); 国家 863 计划项目(2006AA04Z263); 江苏省自然科学基金项目(BK2006097).

作者简介: 金静华(1981—),女,江苏苏州人,硕士,从事因特网和无线网络拥塞控制的研究; 田玉平(1964—),男,安徽马鞍山人,教授,博士生导师,从事复杂系统与网络控制的研究.

法在无线网络中的改进.

本文借鉴 Chen 等人^[6]针对主算法提出的改进方法,综合文献[7,8]所建立的对偶算法,改进其对偶算法,以保证系统的稳态性能(吞吐量、带宽利用率等)在无线环境中不会下降.考虑到原对偶算法应用于有线网络,以及改进算法的实现等问题,该改进算法更适用于无线/有线混合网络、无线局域网等拓扑结构不会经常变化的无线网络.本文研究表明,由于传输时延的存在,改进后的拥塞控制算法的稳定性分析较复杂,Chen 等人的方法和结论不能直接平推过来.

2 对偶算法及其问题

2.1 对偶算法

考虑一个具有 J 个连接节点和 R 个源节点的通信网络.该网络中的一个源节点可以占用多个连接节点;反之,一个连接节点也可以被多个源节点所共享.对于每一个连接节点 $j \in \bar{J} = \{1, \dots, J\}$,所有共享该连接节点 j 的源节点的集合定义成 $R_j \subseteq \bar{R} = \{1, \dots, R\}$.对于每一个源节点 $r \in \bar{R}$,其占用的所有连接节点的集合定义为 $J_r \subseteq \bar{J}$.根据网络中节点的连接情况可以定义一个 $J \times R$ 维的 0-1 连接矩阵 $A = (A_{jr}, j \in \bar{J}, r \in \bar{R})$,其中

$$A_{jr} = \begin{cases} 1, & j \in J_r; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

对于每个连接节点 j ,设其连接能力为 C_j ,拥塞率为 $\mu_j(t)$;对于每个源节点 r ,设其数据传输速率为 $x_r(t)$.考虑存在往返时间的情况,则所有共享连接节点 j 的源节点传输速率之和为

$$y_j(t) = \sum_{r \in R_j} x_r(t - d(r, j)), \quad (1)$$

源节点 r 占用的所有连接节点拥塞率之和为

$$p_r(t) = \sum_{j \in J_r} \mu_j(t - d(j, r)). \quad (2)$$

其中: $d(r, j)$ 表示源节点 r 发送的数据包到达连接节点 j 所需时间, $d(j, r)$ 表示从连接节点 j 处产生的反馈信号到达源节点 r 所需时间,通常假设

$$d(r, j) + d(j, r) = D_r, \quad (3)$$

D_r 为源节点 r 的往返时间.

Low 等人^[7]建立的对偶算法为

$$d\mu_j(t)/dt = k_j(y_j(t) - C_j), \quad (4)$$

$$x_r(t) = M_r(p_r(t)). \quad (5)$$

其中: k_j 为常数, $M_r(p_r(t))$ 为 $p_r(t)$ 严格递减函数.

当 $k_j = 1/C_j$ 时, $\mu_j(t)$ 可看作是连接节点 j 的队列时延^[2], $p_r(t)$ 为源节点 r 占用的所有连接节点队列时延之和.在下面的分析中,取 $k_j = 1/C_j$.

Kelly 等人^[8]提出的源端传输速率调节函数为

$$x_r(t) = w_r / p_r(t), \quad (6)$$

其中 w_r 为可调节参数.显然,式(6)是(5)的特例.为了便于具体分析,下面均采用式(6).

如果只考虑产生拥塞的瓶颈节点,则矩阵 A 是行满秩矩阵.此时,可以证明^[7,8]系统(1)-(2)-(4)-(6)存在唯一的平衡点 (x^*, μ^*) ,并且该平衡点是保证网络利用率的最优解.其中

$$x^* = (x_r^*, r \in \bar{R})^T, \mu^* = (\mu_j^*, j \in \bar{J})^T,$$

$$x_r^* = \frac{w_r}{p_r^*}, p_r^* = \prod_{j \in J_r} \mu_j^*, \forall r \in \bar{R}.$$

2.2 对偶算法在无线网络中遇到的问题

源节点 r 发送的数据包在网络中传输时,客观上都存在着一个往返时间 $D_r(t)$.该往返时间包括了数据包在链路上的传输时延 $d_r(t)$ 和数据包在网络节点处等待服务的队列时延之和 $p_r(t)$.在有线网络中,发送方可以测量得到 $D_r(t)$,并且传输时延通常是固定的,用 d_r 表示,因此发送方根据 $p_r(t) = D_r(t) - d_r$ 来计算队列时延,从而调节数据传输速率来避免或缓解网络拥塞.但是,在无线网络中,终端移动切换或信号突然消失等因素也会引起时延,使 $d_r(t)$ 并不是固定不变的.称那些由于无线环境引起的时延为非拥塞时延,且源节点 r 的非拥塞时延之和用 $\tau_r(t)$ 表示,则 $d_r(t) = d_r + \tau_r(t)$,即

$$D_r(t) = d_r + p_r(t) + \tau_r(t).$$

如果发送方仍采用有线网络中估计队列时延的方法,即

$$D_r(t) - d_r = p_r(t) + \tau_r(t) \doteq q_r(t) > p_r(t),$$

则发送方会根据 $q_r(t)$ 来调节速率,即

$$x_r(t) = w_r / q_r(t). \quad (7)$$

根据 $q_r(t)$ 的定义可知

$$q_r(t) = \sum_{j \in J_r} v_j(t - d(j, r)). \quad (8)$$

其中: $v_j(t) = \mu_j(t) + \tau_j(t)$, $\tau_j(t)$ 为节点 j 与链路上的前一个节点间的非拥塞时延,因此 $\tau_r(t) = \sum_{j \in J_r} \tau_j(t)$.显然, $\tau_j(t)$ 的变化不仅与 $x(t)$ 有关,还与信道状态、切换速度等有关.为了简化,这里假设仅与 $x(t)$ 有关,即

$$\frac{d}{dt} v_j(t) = V_j \left(\sum_{s \in R_j} x_s(t - d(s, j)) \right). \quad (9)$$

此时,根据文献[8]中的原理,不难推出系统(1)-(4)-(7)-(8)-(9)存在唯一的平衡点 (x_0^*, μ^*, v^*) ,其中

$$x_0^* = (x_{0r}^*, r \in \bar{R})^T, v^* = (v_j^*, j \in \bar{J})^T,$$

$$x_{0r}^* = \frac{w_r}{q_r^*}, q_r^* = \prod_{j \in J_r} v_j^*, v_j^* = \mu_j^* + \tau_j^*,$$

$\forall r \in \bar{R}, \forall j \in \bar{J}$.显然, $x_{0r}^* < x_r^*$,即每条路径上的

稳态流量都降低了,也就是网络的吞吐量和带宽利用率都降低了.

3 对偶算法的改进

考虑式(7)中的 w_r ,若假设 w_r 随时间变化,即

$$x_r(t) = w_r(t) / q_r(t), \quad (10)$$

则可通过调节 $w_r(t)$ 来克服非阻塞时延对对偶算法稳态性能的影响.此外, $w_r(t)$ 与用户应用程序的连接数是成正比的,调节连接数与调节 $w_r(t)$ 是等价的^[6].因此,在算法实现时,只要调节应用程序的连接数,不需要改动任何的网络结构或协议.

假设 $w_r(t)$ 服从以下规律^[6]:

$$\frac{d}{dt} w_r(t) = c_r(w_r - w_r(t) \frac{p_r(t)}{q_r(t)}), \quad (11)$$

则系统(1)-(2)-(4)-(8)-(9)-(10)-(11),简称为系统,其平衡点为 (x^*, μ^*, v^*, w^*) ,其中

$$w^* = (w_r^*, r - \bar{R})^T, w_r^* = w_r \frac{q_r^*}{p_r^*}, c_r > 0,$$

$\forall r - \bar{R}$,其他符号定义同2.1节.显然,系统的稳态发送速率与有线网络对偶算法稳态发送速率是一样的,因此,网络吞吐量和链路利用率均不会降低.

4 改进算法的稳定性

4.1 稳定性判据

将系统在其平衡点 (x^*, μ^*, v^*, w^*) 处进行线性化,并作 Laplace 变换.假设 $r(t)$ 在平衡点 (x^*, μ^*, v^*, w^*) 附近不变,即 $r(t) = r^*$,则对于 $\forall r - \bar{R}$,有

$$X_r(s) = - \frac{4_r(s + 5_r)}{s(s + 1_r)} \times \left(\begin{matrix} k_j e^{-d(j,n)s} \\ s R_j \end{matrix} e^{-d(s,j)s} X_s(s) \right), \quad (12)$$

其中

$$1_r = c_r \frac{p_r^*}{q_r^*}, 4_r = \frac{w_r}{p_r^* q_r^*}, 5_r = c_r.$$

定义

$$X(s) = (X_1(s), \dots, X_R(s))^T,$$

$$G(s) = \text{diag} \left\{ \frac{s + 5_r}{s(s + 1_r)} e^{-D_r s}, r - \bar{R} \right\},$$

$$4 = \text{diag} \{ 4_r, r - \bar{R} \}, K = \text{diag} \{ k_j, j - \bar{J} \},$$

$$[R_f(s)]_{jr} = \begin{cases} e^{-d(r,j)s}, & j - J_r; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

则式(12)可写成矩阵形式,其闭环系统特征方程为

$$\det(I + G(s) 4 R_f^T(-s) K R_f(s)) = 0. \quad (13)$$

当特征方程(13)的所有特征根均具有负实部时,系统的平衡点 (x^*, μ^*, v^*, w^*) 局部渐近稳定.

令传递函数

$$G_r(s) = \frac{s + 5_r}{s(s + 1_r)} e^{-D_r s},$$

$$G_r^M = 1 / |G_r(j - c(r))|,$$

其中 $c(r) > 0$ 为满足 $\text{Im}(G_r(j - c(r))) = 0$ 和 $\text{Re}(G_r(j - c(r))) < 0$ 的最小频率.

考虑两个传递函数的频率特性

$$G_r(j) = \frac{j + 5_r}{j(j + 1_r)} e^{-jD_r}, r = 1, 2.$$

引理 1 对于任一给定的 $[0, 1]$, $\text{Co}\{G_1^M G_1(j), G_2^M G_2(j)\}$ 在 $[0,]$ 区间内不包含 $(-1, j0)$ 点的充分条件是:

- 1) $D_r^2 1_r + D_r^2 5_r + 1_r - 5_r > 0, r = 1, 2;$
- 2) 对于 $\forall [c(1), c(2)]$, $\text{Co}\{G_1^M G_1(j), G_2^M G_2(j)\}$ 不包含 $(-1, j0)$ 点. $\text{Co}(\cdot)$ 表示凸组合.

证明 对 $[0,]$ 区间分段考虑.不失一般性,假设 $c(1) < c(2)$.

- 1) 当 $0 < c(1)$ 时,将 $G_r^M G_r(j)$ 改写成

$$G_r^M G_r(j) = G_r \frac{\sqrt{2 + \frac{2}{5_r}}}{\sqrt{2 + \frac{2}{1_r}}} e^{-j(D_r + \phi_{1_r} + \frac{2}{5_r} \phi_{5_r})}.$$

其中

$$\phi_{1_r} = \arctan \frac{1}{1_r}, \phi_{5_r} = \arctan \frac{1}{5_r}.$$

令 $r(\cdot) = D_r + \phi_{1_r} + \frac{2}{5_r} \phi_{5_r}$,则

$$\frac{d r(\cdot)}{d \cdot} = \frac{D_r^4 + (D_r^2 1_r + D_r^2 5_r + 1_r - 5_r)^2}{(2 + \frac{2}{1_r})(2 + \frac{2}{5_r})} + \frac{1_r 5_r (5_r - 1_r + 1_r 5_r)}{(2 + \frac{2}{1_r})(2 + \frac{2}{5_r})}.$$

因为 $5_r > 1_r$,由条件1)可知, $d r(\cdot) / d \cdot > 0$.当 $\cdot = 0$ 时, $r(0) = /2$,所以 $r(\cdot) \in [/2,)$,即 $G_r^M G_r(j), r = 1, 2$,均在第三象限,其凸组合不可能包含 $(-1, j0)$ 点.

- 2) 当 $> c(2)$ 时,由于

$$|G_r^M G_r(j)| = G_r^M \frac{\sqrt{2 + \frac{2}{5_r}}}{\sqrt{2 + \frac{2}{1_r}}}$$

是 \cdot 的单调递减函数,且 $|G_r^M G_r(j)| = c(\cdot) = 1$,因此当 $> c(2)$ 时, $|G_1^M G_1(j)|$ 和 $|G_2^M G_2(j)|$ 均小于1,其凸组合不可能包含 $(-1, j0)$ 点.

- 3) 当 $c(1) < c(2)$ 时,由条件2)可保证 $G_1^M G_1(j)$ 和 $G_2^M G_2(j)$ 的凸组合不包含 $(-1, j0)$ 点.

考虑一簇传递函数的频率特性

$$G_r(j) = \frac{j + 5_r}{j(j + 1_r)} e^{-jD_r}, \forall r - \bar{R}.$$

引理 2 对于任一给定的 $[0, 1)$, $\text{Co}\{G_r^M G_r(j), r - \bar{R}\}$ 在 $[0,)$ 区间内不包含 $(-1, j0)$ 点的充分条件是:

$$1) D_r \frac{2}{1r} + D_r \frac{2}{5r} + 1r - 5r > 0, \forall r \in \bar{R};$$

2) 对于 $\forall i, k \in \bar{R}$ 和 $\forall \omega \in [-c, \bar{c}]$, $\text{Co}\{G_i^M G_i(j), G_k^M G_k(j)\}$ 不包含 $(-1, j, 0)$ 点, 其中, $-c = \min\{c(i), c(k)\}$, $\bar{c} = \max\{c(i), c(k)\}$.

证明 参见文献[9]中引理 3 的证明, 需注意两个引理的充分条件不同.

引理 3^[10] 假设 $Q = Q^* > 0, T = \text{diag}(t_i, t_i C)$, 则

$$(TQ) \quad (Q) \text{Co}\{0 \quad \{t_i\}\}.$$

其中: (\cdot) 表示矩阵特征值, $\rho(\cdot)$ 表示矩阵谱半径, \cdot^* 表示共轭转置.

定理 1 对于系统, 若如下条件成立:

$$1) D_r \frac{2}{1r} + D_r \frac{2}{5r} + 1r - 5r > 0, \forall r \in \bar{R}; \quad (14)$$

2) 对于 $\forall \omega \in [-c, \bar{c}], \forall \omega \in [0, 1], G_i^M G_i(j) + (1 - \omega) G_k^M G_k(j), \forall i, k \in \bar{R}$ 不包含 $(-1, j, 0)$ 点, 其中 $-c$ 和 \bar{c} 的定义同引理 2;

$$3) (G_r^M)^{-1} \frac{1}{C_{j i R}} A_{j r} A_{j r} < 1, \forall r \in \bar{R}, \quad (15)$$

或

$$\frac{1}{C_{j i R}} A_{j r} \frac{1}{C_{j i R}} (G_r^M)^{-1} A_{l r} < 1, \forall j \in \bar{J}, \quad (16)$$

则系统在平衡点 (x^*, μ^*, v^*, w^*) 处局部渐近稳定, 其中 $1r, 4r, 5r$ 的定义与式(12)中的定义相同.

证明 令

$$T(s) = \text{diag}\{G_r^M \frac{(s + 5r)}{s(s + 1r)} e^{-D_r s}, r \in \bar{R}\},$$

$$G = \text{diag}\{4r / G_r^M, r \in \bar{R}\},$$

$$Q(s) = R_f^T(-s) K R_f(s),$$

则式(13)可改写为

$$\det(I + T(s) G Q(s)) = 0. \quad (17)$$

根据广义 Nyquist 判据^[11], 特征方程(17)的所有根具有负实部的充要条件是对于 $\forall \omega \in [0, 1)$, $(T(j\omega) G Q(j\omega))$ 不包含 $(-1, j, 0)$ 点.

由引理 3 可知

$$(T(j\omega) G Q(j\omega))$$

$$(G^{1/2} Q(j\omega) G^{1/2}) \times$$

$$\text{Co}\{0 \quad \{G_r^M \frac{(j + 5r)}{j(j + 1r)} e^{-jD_r \omega}, r \in \bar{R}\}\}.$$

已知任一矩阵的谱半径均小于该矩阵各行和的最大值, 因此, 根据式(15)可得

$$(G^{1/2} Q(j\omega) G^{1/2})$$

$$\max_{r \in \bar{R}} \left\{ \left| \frac{4r}{G_r^M} \left(\frac{1}{C_{j i R}} A_{j r} A_{j r} \right) \right| \right\} < 1.$$

由条件 1), 2) 和引理 2 可知, 对于 $\forall \omega \in [0, 1)$, $(T(j\omega) G Q(j\omega))$ 不包含 $(-1, j, 0)$ 点.

另外, 任一矩阵的谱半径均小于该矩阵各列和的最大值, 因此由式(16)也可得 $(G^{1/2} Q(j\omega) G^{1/2}) < 1$. 同理, 由条件 1), 2) 和引理 2 可推得系统局部渐近稳定.

4.2 参数范围及设计举例

在改进算法(1)-(2)-(4)-(8)-(9)-(10)-(11)中, 可由设计者选择的参数为 c_r 和 w_r , 其他参数(如 p_r^*, r^* 和 d_r) 都是由网络本身的特性所决定的. 因此, 本节给出了参数 c_r 和 w_r 的参考范围和选择步骤, 方便设计时使用. 同时, 给出设计例子来加以说明.

4.2.1 参数选择

为了保证改进算法在平衡点处的局部稳定性, 参数 c_r 和 w_r 的取值必须满足定理 1 的 3 个条件, 因此这 3 个条件决定了 c_r 和 w_r 的取值范围.

将 $1r, 4r, 5r$ 的定义式带入式(14), 得

$$c_r > \frac{r^*(p_r^* + r^*)}{(d_r + p_r^* + r^*)[(p_r^*)^2 + (p_r^* + r^*)^2]} \quad (18)$$

若 c_r 的取值使式(18)成立, 定理 1 的条件 1) 就能成立.

定理 1 的条件 2) 较复杂, 不便于直接计算. 借鉴文献[12, 13]中的方法给出由条件 2) 决定的参数范围. 由文献[12, 13]中的定理可知, 只要曲线 $G_r(j\omega)$ 在首次穿越负实轴时满足顺时针特性, 条件 2) 就能成立. 由 $1r$ 和 $5r$ 的定义可知, 曲线

$$G_r(j\omega) = \frac{j + 5r}{j(j + 1r)} e^{-jD_r \omega}$$

的特性与 c_r 有关, 因此曲线 $G_r(j\omega)$ 在首次穿越负实轴时必须满足顺时针特性的条件, 决定了 c_r 的取值范围. 根据[12, 13]中顺时针特性的计算公式, 在 Matlab 中计算得到, 对于 $\forall r \in \bar{R}$, 当 $d_r \in [0.1, 0.5] s, 0.1 s \leq p_r^* \leq 4 s, 0 s \leq r^* \leq 4 s$ 时, c_r 只要取图 1 相应曲线上方的值, 就能保证 $G_r(j\omega)$ 首次穿越负实轴时为顺时针, 即保证了定理 1 的条件 2) 成立.

在进行参数配置时, 首先将网络稳态值 p_r^*, r^*

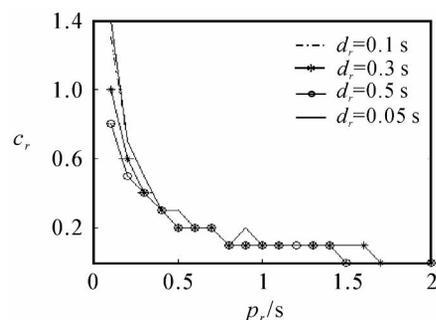


图 1 c_r 的取值范围(取曲线上方的值)

和 d_r 带入式(18),得到使式(18)成立的 c_r 的范围;然后参考图1,确定 c_r 的取值;最后根据式(15)或(16)选择参数 w_r ,保证定理1的条件3)成立,从而保证改进算法平衡点处的局部稳定性.

4.2.2 设计举例

本节以一个简单的例子来介绍如何选择参数,以保证改进算法在平衡点处的局部稳定.假设网络中存在一个瓶颈连接节点和两个源节点,即矩阵 $A = [1 \ 1]$,节点的连接能力 $C_1 = 3 \text{ Mb/s}$,稳态队列时延为 $\mu_1^* = 0.5 \text{ s}$;源节点的传输时延分别为 $d_1 = 0.05 \text{ s}$, $d_2 = 0.03 \text{ s}$,稳态非拥塞时延之和分别为 $\bar{c}_1^* = 0.75 \text{ s}$ 和 $\bar{c}_2^* = 0.4 \text{ s}$,稳态队列时延之和为 $p_1^* = p_2^* = 0.5 \text{ s}$.根据式(18)计算可得, $c_1 > 0.40$, $c_2 > 0.37$.参照图1,这里取 $c_1 = 0.5$, $c_2 = 0.8$.最后选择参数 w_1 和 w_2 保证式(15)或(16)成立.这里取 $w_1 = 0.6$, $w_2 = 0.9$.这样,改进算法的参数配置便完成.由图2可知,当系统在平衡点 (x^*, μ^*, v^*, w^*) 附近出现扰动时,经过一段时间,平衡点处的扰动将被消除,即系统又能够在平衡点处运行,保证了系统在平衡点处的局部稳定性.

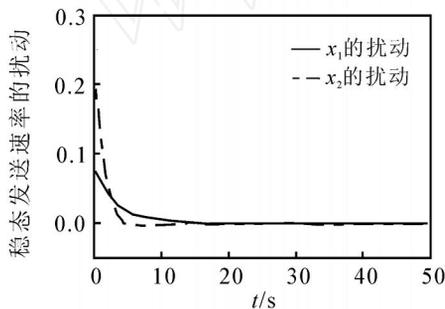


图2 平衡点 x_r^* ($r = 1, 2$) 附近的扰动

5 改进算法的实现

系统的实现关键在于 $p_r(t)$ 和 $q_r(t)$ 的估计.由第2节可知, $q_r(t) = D_r(t) - d_r$,其中往返时间 $D_r(t)$ 可由发送方估计,传输时延 d_r 通常以最小的往返时间表示,因此 $\bar{q}_r(t) = \bar{D}_r(t) - \min_t(\bar{D}_r(t))$,这里 $\bar{\cdot}$ 表示估计值.

难点在于 $p_r(t)$ 的估计,因为源节点不能明确知道队列时延的大小.本文建议采用 REM 算法^[14]的思想,在连接节点 j 处,以概率

$$m_j(t) = 1 - \phi^{p_j(t)}, \phi > 1 \text{ 为一常数}, \forall j \in \bar{J},$$

对在 t 时刻到达连接节点 j 的数据包进行标记,则源节点接收到的数据包被标记的总概率为

$$M_r(t) = 1 - \prod_{j \in \bar{J}} (1 - m_j(t)) = 1 - \phi^{p_r(t)}, \forall r \in \bar{R},$$

所以

$$p_r(t) = -\log_{\phi}(1 - M_r(t)).$$

$M_r(t)$ 可由 t 时间内源节点接收到的被标记数据包的比例来估计.

6 结语

本文针对对偶算法在无线环境中遇到的问题,提出了改进算法.该改进算法的平衡点与原对偶算法的平衡点一致,从而克服了由于无线信道、用户切换等因素造成的对偶算法性能降低的问题.同时,本文给出了改进算法的稳定性判据和实现方案.进一步的研究可以考虑队列时延估计方法的改进,以及队列时延估计值的鲁棒性问题等.

参考文献(References)

- [1] Low S H, Paganini F, Doyle J C. Internet congestion control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(1): 28-43.
- [2] Low S H, Peterson L L, Wang L. Understanding vegas: A duality model[J]. J of the ACM, 2002, 49(2): 207-235.
- [3] Balakrishnan H, Padmanabhan V, Seshan S, et al. A comparison of mechanisms for improving TCP performance over wireless links[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1997, 5(6): 756-769.
- [4] Viadya N, Metha M. Delayed duplicate acknowledgements: A TCP-Uware approach to improve performance of TCP over wireless[R]. Texas: Texas A & M University, 1999.
- [5] Ramani R, Karandikar A. ECN in TCP over wireless networks[C]. IEEE Int'l Conf on Personal Wireless Communications. Gdansk, 2000: 495-499.
- [6] Abate A, Chen M, Sastry S. New congestion control schemes over wireless networks: Delay sensitivity analysis and simulations[C]. Proc of the 16th IFAC World Congress. Prague, 2005.
- [7] Low S H, Lapsley D E. Optimization flow control-I: Basic algorithm and convergence[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 1999, 7(6): 861-874.
- [8] Kelly F P, Maulloo A, Tan D. Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness, and stability [J]. J Operational Research Society, 1998, 49(3): 237-252.
- [9] Tian Y-P. A general stability criterion for congestion control with diverse communication delays [J]. Automatica, 2005, 41(7): 1255-1262.
- [10] Vinnicombe G. On the stability of end-to-end congestion control for the internet [R]. London: Cambridge University, 2000.

(下转第150页)

用锌电解整流供电系统的微粒群优化控制策略每年可为企业带来超过 1 500 万元的经济效益。

5 结 语

本文在分析锌电解整流供电系统控制特性的基础上,建立了基于整流效率和整流系统稳流精度的整流供电系统多目标优化控制数学模型,并根据整流供电系统的分级递阶控制特性,借鉴递阶遗传算法中递阶编码的方法,提出一种递阶多目标 PSO 算法,用于整流供电系统各机组电流分配的优化决策。实验结果表明,本文提出的基于 PSO 算法的整流供电系统优化决策方法有效地提高了整流效率和稳流精度,为有色金属电解生产的节能降耗提供了一种新的思路和方法。

参考文献(References)

- [1] Yang Chun-hua, Shen De-yao, Wu Min. Expert optimized control technique for electrolytic deposition process of by hydrometallurgy of zinc [J]. Trans on Nonferrous Metal Society China, 1997, 7(4): 133-137.
- [2] 刘钊斌,冯公伟,崔督普,等. 硅整流所电力设计[M]. 北京:冶金工业出版社,1983.
(Liu Chan-bin, Fen Gong-wei, Cui Du-pu, et al. Design of rectifier power system [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1983.)
- [3] 桂卫华,王雅琳,阳春华,等. 基于模拟退火算法的锌电解过程分时供电优化调度[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(1): 127-130.
(Gui Wei-hua, Wang Ya-lin, Yang Chun-hua, et al. Optimal dispatching system of time sharing power supply for electrolytic zinc process based on simulated annealing algorithm [J]. Control Theory & Applications, 2001, 18(1): 127-130.)
- [4] 黄海悦,申群太. 神经网络专家系统在整流直流电力经济运行中的应用[J]. 控制与决策, 2001, 16(6): 940-942.
(Huang Hai-yue, Shen Quan-tai. Application of neural network expert system to optimal operation of direct-current power system[J]. Control and Decision, 2001, 16(6): 940-942.)
- [5] Zitzler E, Deb K, Thiele L. Comparison of multi-objective evolution algorithms: Empirical results [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 173-195.
- [6] Ray T, Liew K M. A swarm metaphor for multiobjective design optimization [J]. Engineering Optimization, 2002, 34(2): 151-153.
- [7] Coello C A, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiobjectives with particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279
- [8] Hu X, Eberhart R C. Multiobjective optimization using dynamic neighborhood particle swarm optimization[C]. Proc of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Hawaii, 2002: 1677-1681.
- [9] Carlo R R, Prospero C N. An effective use of crowding distance in multi-objective particle swarm optimization [C]. Proc of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. Washington, 2005: 257-264.
- [10] Hwang S K, Koo K, Lee J S. Homogenous particle swarm optimizer for multi-objective optimization problem [C]. Proc of the first ICGST International Conference on Artificial Intelligence and Machine Learning. Cairo, 2005: 141-147.
- [11] 王俊年,申群太,周少武. 基于混合递阶遗传算法的判决反馈 RBF 网络信道均衡器设计[J]. 信号处理, 2006, 22(2): 226-229.
(Wang Jun-nian, Shen Qun-tai, Zhou Shao-wu. Design of RBFN equalizers with decision feedback based on hybrid hierarchy genetic algorithm [J]. Signal Processing, 2006, 22(2): 226-229.)

(上接第 144 页)

- [11] Desoer C A, Yang Y T. On the generalized nyquist stability criterion [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1980, 25: 187-196.
- [12] Tian Y-P, Yang H-Y. Stability of the internet congestion control with diverse delays[J]. Automatica, 2004, 40(9): 1533-1541.
- [13] Tian Y-P. Stability analysis and design of the second-order congestion control for networks with heterogeneous delays [J]. IEEE/ACM Trans Netw, 2005, 13(5): 1082-1093.
- [14] Athuraliya S, Low S H, Li V H, et al. REM: Active queue management [J]. IEEE Networks, 2001, 15(3): 48-53.