

文章编号: 1001-0920(2007)07-0742-04

## 基于控制理论的主动队列 RED 稳态分析

陆锦军<sup>1,2</sup>, 王执铨<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094; 2. 南通职业大学 现代教育技术中心, 江苏 南通 226007)

**摘要:** 针对 RED 算法的参数设置对算法性能具有较大影响的问题, 基于自动控制理论, 将期望队列长度作为系统输入, 将瞬时队列长度作为系统输出, 构建了在系统输入和扰动作用下的 RED 单位反馈控制系统. 提出了较传统条件更为精确的稳定条件, 并分析计算了稳态误差. 仿真结果表明, 在稳定条件下, 随着分组丢弃函数斜率的增加, RED 队列波动增加, 在稳定条件边界附近队列波动急剧增加.

**关键词:** 随机早期检测; 主动队列管理; 控制理论

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Analysis of RED based on control theory

LU Jinjun<sup>1,2</sup>, WANG Zhiquan<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Center of Education and Technology, Nantong Vocational College, Nantong 226007, China. Correspondent: LU Jinjun, E-mail: ljj@mail.ntvc.edu.cn)

**Abstract:** For the problem that the parameters of random early detection (RED) have great effect on the algorithm performance, based on control theory, taking expected queue length as input and instantaneous queue length as output, a unit feedback control system is constructed. Compared with traditional stable condition, the more precise condition is proposed, and the steady state error of the system is analyzed. The simulation result shows that the slope of the packet's discarding function influences the queue fluctuating when it is close to the border of the stable conditions, while the steady state error of the system will increase rapidly.

**Key words:** Random early detection; AQM; Control theory

### 1 引言

网络拥塞控制是目前 Internet 研究领域的-一个技术热点. RED<sup>[1]</sup>是一种有影响力的算法, 已广泛应用于路由器的缓存管理. 此算法以平均队列长度作为衡量网络拥塞程度的指标, 通过主动丢弃分组使源端调整其拥塞窗口来实现流量控制. 研究表明, RED 的算法性能敏感于网络状态<sup>[2]</sup>, 不适当的 RED 算法参数配置会使路由器吞吐量降低, 丢包率增加, 队列急剧震荡. 自适应 RED 算法对 WEB 性能以及系统稳态性能有所改善, 但缺乏严谨的科学论证<sup>[36]</sup>. 为此, Misra 等人用随机微分方程对 TCP 窗口建立数学模型<sup>[7]</sup>, 并分析了 RED 主动队列管理机制<sup>[8]</sup>. Holot 等人应用小信号理论对该模型进行了线性化, 并基于自动控制理论分析了 RED 算法的稳定性, 给出了算法的稳定条件<sup>[9]</sup>.

本文基于已有的主动队列管理机制的控制模型, 将希望队列长度和扰动作为系统的共同输入, 瞬时队列作为系统输出, 构建了单位反馈控制系统. 基于控制理论, 提出了比文献[9]更加精确的 RED 稳定条件, 并计算了系统的稳态误差.

### 2 RED 控制系统结构

Misra 等人在分析网络连续数据流和随机微分方程的基础上, 建立了 TCP 的动态模型<sup>[8]</sup>, 用一组非线性微分方程描述如下:

$$\begin{cases} \frac{dW(t)}{dt} = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))}p(t-R(t)), \\ \frac{dq(t)}{dt} = \frac{N(t)}{R(t)}W(t) - C(t). \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $W(t)$  为预期的 TCP 拥塞窗口的大小;  $q(t)$  为

收稿日期: 2006-05-22; 修回日期: 2006-10-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60374066); 教育部博士点基金项目(20020288025); 江苏省自然科学基金项目(BK2004132).

作者简介: 陆锦军(1964), 男, 江苏南通人, 副教授, 从事网络系统拥塞控制、网络行为动力学的研究; 王执铨(1939), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事网络系统的拥塞控制、容错控制等研究.

预期的队列长度;  $R(t)$  为往返时间;  $R(t) = q(t)/C(t) + T_p$ ,  $T_p$  为传输延时;  $C(t)$  为链路容量;  $N(t)$  为激活 TCP 连接数;  $P(t)$  为分组的丢弃概率.

Hollot 利用稳态工作点附近的小信号线性化来处理式(1), 在  $W \ll 1$  时,  $e^{R_0 s} \approx 1$ . 忽略高频性能, 分析各参数之间的关系, 可得到图 1 所示的基于近似模型的 AQM 控制系统框图<sup>[9]</sup>.

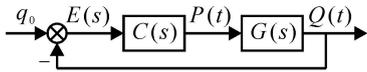


图 1 基于近似模型的 AQM 控制系统框图

图 1 中

$$G(s) = \frac{K(t)}{[T_1(t)s + 1][T_2(t)s + 1]}, \quad (2)$$

$$K(t) = \frac{[R(t)C(t)]^3}{[2N(t)]^2}, \quad (3)$$

$$T_1(t) = R(t), \quad (4)$$

$$T_2(t) = \frac{R^2(t)C(t)}{2N(t)}. \quad (5)$$

式中:  $R(t)$ ,  $C(t)$  和  $N(t)$  定义与式(1) 相同;  $P(s)$ ,  $Q(s)$  和  $E(s)$  分别为分组丢弃概率、瞬时队列长度和误差信号的拉氏变换. 在稳态时  $N(t) = N$ ,  $R(t) = R$ ,  $C(t) = C$ , 其中  $N, R, C$  均为常数, 则

$$G(s) = \frac{(RC)^3 / (2N)^2}{(Rs + 1)(\frac{R^2 C}{2N}s + 1)} = \frac{K_1}{(Rs + 1)(\frac{R^2 C}{2N}s + 1)}. \quad (6)$$

其中

$$K_1 = (RC)^3 / (2N)^2; \quad (7)$$

$C(s)$  为控制器的传递函数, 因不同队列管理算法而异. 下面推导 RED 的  $C(s)$  公式:

$$C(s) = P(s)/E(s), \quad (8)$$

$$E(s) = \frac{q_0}{s} - Q(s). \quad (9)$$

RED 算法根据最小阈值  $L_{\min}$  和最大阈值  $L_{\max}$  来实现管理. 如果平均队列长度比  $L_{\min}$  小, 则新到达的分组直接进入队列排队; 如果平均队列长度在  $L_{\min}$  与  $L_{\max}$  两个阈值之间, 则按概率  $p(x)$  对新到达的分组进行丢弃; 如果平均队列长度大于  $L_{\max}$ , 则 RED 将一律以概率 1 丢弃所到达的分组. 即

$$p(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq L_{\min}; \\ Q_{\text{RED}}(x - L_{\min}), & L_{\min} < x < L_{\max}; \\ 1, & L_{\max} \leq x. \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_{\text{RED}} = \frac{p_{\max}}{L_{\max} - L_{\min}}. \quad (11)$$

式中:  $Q_{\text{RED}}$  为分组丢弃概率函数的斜率,  $p_{\max}$  为 RED 算法平均队列长度是  $L_{\max}$  时的分组丢弃概率<sup>[10]</sup>.

$$p_{\max} \approx \frac{L_{\max} - L_{\min}}{q_0 - L_{\min}} f(R, C, N), \quad (12)$$

其中  $f(R, C, N)$  是只与  $R, C, N$  有关的函数.

RED 的平均队列与瞬时队列的关系为

$$sX(s) + K_2 X(s) = K_2 Q(s) + X(0). \quad (13)$$

其中:  $K_2 = \frac{\ln(1-A)}{D}$ ,  $A$  为平均队列的指数权值,  $D$  为队列采样时间.

由 RED 算法丢包概率函数可得

$$X(s) = \frac{1}{Q_{\text{RED}}} P(s) + \frac{L_{\min}}{s}, \quad (14)$$

$$X(0) = \frac{1}{Q_{\text{RED}}} P(0) + L_{\min}. \quad (15)$$

将式(9), (14), (15) 代入(13), 消去  $X(s)$ ,  $Q(s)$  和  $X(0)$  得

$$P(s) = \frac{K_2 Q_{\text{RED}} (q_0 - L_{\min})}{s(s + K_2)} - \frac{K_2 Q_{\text{RED}} E(s)}{s + K_2}. \quad (16)$$

令

$$N(s) = \frac{K_2 Q_{\text{RED}} (q_0 - L_{\min})}{s(s + K_2)}, \quad (17)$$

$$G_1(s) = -\frac{K_2 Q_{\text{RED}}}{s + K_2}, \quad (18)$$

则

$$p(s) = N(s) + G_1(s)E(s). \quad (19)$$

其中

$$E(s) = R(s) - C(s), \quad (20)$$

$$R(s) = q_0/s. \quad (21)$$

由此可设输入信号  $R(s)$  和干扰信号  $N(s)$  共同作用下 RED 主动队列管理闭环控制方块图<sup>[10]</sup> 如图 2 所示.

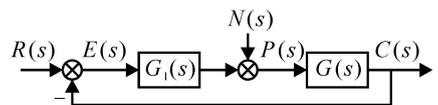


图 2 RED 主动队列管理框图

根据线性叠加原理, 控制系统输出  $C(s)$  应为  $R(s)$  和  $N(s)$  单独作用下系统输出的叠加, 即

$$C(s) = C_1(s) + C_2(s), \quad (22)$$

$$C_1(s) = \frac{G_1(s)G(s)}{1 + G_1(s)G(s)} R(s), \quad (23)$$

$$C_2(s) = \frac{G(s)}{1 + G_1(s)G(s)} N(s). \quad (24)$$

### 3 稳定性分析

在求解稳态误差之前, 必须分析系统的稳定

性. 稳定是前提, 否则讨论稳态误差无意义.

系统的特征方程为

$$D(s) = 1 + G_1(s)G(s) = 0,$$

即

$$(s + K_2)(Rs + 1) \left( \frac{R^2 C}{2N} s + 1 \right) - K_1 K_2 Q_{RED} = 0. \quad (25)$$

展开后得

$$\begin{aligned} & \frac{R^3 C}{2N} s^3 + \left[ \frac{R^2 C}{2N} (1 + RK_2) + R \right] s^2 + \\ & \left( \frac{R^2 C}{2N} K_2 + 1 + RK_2 \right) s + K_2 - K_1 K_2 Q_{RED} = 0. \end{aligned}$$

表 1 Routh 表

$s^3$	$\frac{R^3 C}{2N}$	$\frac{R^2 C}{2N} K_2 + 1 + RK_2$
$s^2$	$\frac{R^2 C}{2N} (1 + RK_2) + R$	$K_2 - K_1 K_2 Q_{RED}$
$s$	$a_1$	$0$
$s^0$	$K_2 - K_1 K_2 Q_{RED}$	

建立 Routh 表(见表 1), 其中

$$\begin{aligned} a_1 = & \frac{\frac{R^2 C}{2N} K_2 + 1 + RK_2 \left[ \frac{R^2 C}{2N} (1 + RK_2) + R \right]}{\frac{R^2 C}{2N} (1 + RK_2) + R} - \\ & \frac{\frac{R^3 C}{2N} (K_2 - K_1 K_2 Q_{RED})}{\frac{R^2 C}{2N} (1 + RK_2) + R}, \end{aligned}$$

可知  $a_1 > 0$ . 由表 1, 根据 Routh 稳定判据可知, 使队列系统稳定的充要条件是

$$K_1 Q_{RED} < 1. \quad (26)$$

而文献[9] 给出的 RED 算法的稳定条件为

$$\begin{aligned} & K_1 Q_{RED} \left[ \sqrt{\frac{X_e^2}{N} + 1}, \right. \\ & \left. X_e = 0.1 \min \left\{ \frac{2N}{R^2 C}, \frac{1}{R} \right\} \right]. \end{aligned}$$

这说明本文推导的稳定条件比文献[9] 的稳定条件更加精确.

#### 4 稳态误差计算

下面求解稳态误差. 根据线性叠加原理

$$e_{ss} = e_{ss1} + e_{ss2}. \quad (27)$$

其中:  $e_{ss}$  为 RED 队列管理系统总的稳态误差,  $e_{ss1}$  为输入信号  $R(s)$  作用下的稳态误差,  $e_{ss2}$  为干扰信号  $N(s)$  作用下的稳态误差. 根据终值定理, 有

$$e_{ss1} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sR(s) \frac{E(s)}{R(s)}, \quad (28)$$

$$e_{ss2} = \lim_{t \rightarrow \infty} e_2(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sN(s) \frac{E(s)}{N(s)}, \quad (29)$$

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G_1(s)G(s)}, \quad (30)$$

$$\frac{E(s)}{N(s)} = \frac{-G(s)}{1 + G_1(s)G(s)}. \quad (31)$$

将式(6), (18), (21) 和(30) 代入(28) 得

$$e_{ss1} = \frac{q_0}{1 - Q_{RED} K_1}. \quad (32)$$

将式(6), (17), (18) 和(31) 代入(29) 得

$$e_{ss2} = \frac{-Q_{RED} K_1 (q_0 - L_{min})}{1 - Q_{RED} K_1}. \quad (33)$$

故

$$\begin{aligned} e_{ss} = e_{ss1} + e_{ss2} = & \frac{q_0 (1 - Q_{RED} K_1) + Q_{RED} K_1 L_{min}}{1 - Q_{RED} K_1} = \\ & \frac{q_0 - p_0 K_1}{1 - Q_{RED} K_1}. \end{aligned} \quad (34)$$

式中  $p_0$  为期望队列长度是  $q_0$  时的丢包概率, 且

$$p_0 = Q_{RED} (q_0 - L_{min}). \quad (35)$$

从式(34) 可以看出, 在  $Q_{RED} K_1 < 1$  系统稳定范围内,  $e_{ss} > 0$ . 若根据文献[9] 给出的 RED 算法稳定条件  $Q_{RED} K_1 \left[ \sqrt{(X_e/K)^2 + 1} \right]$ , 在稳定范围内取值  $Q_{RED} K_1 = 1$ , 则  $e_{ss} \rightarrow \infty$ . 下一节的仿真实验将证明, 在该点附近的稳态误差急剧增加, 队列波动呈现等幅振荡, 从而进一步说明了文献[9] 给出的稳定条件在本例中不太合适.

#### 5 仿真分析

使用 NS2<sup>[12]</sup> 仿真实验平台, 实验的网络拓扑结构如图 3 所示. 瓶颈链路位于 A 与 B 之间, 链路容量为 1.5 Mb/s, 链路延时为 50 ms, 所有发送源端为持久的 FTP 流, 节点  $C_i$  为发送端与 A 相连, 节点  $D_i$  为接收端与 B 相连, 其链路带宽均为 10 Mb/s, 延时均为 30 ms. 往返时间  $R = q_0/C + T_p$ . 由图 3 可知,  $T_p$  传输延时为 220 ms,  $q_0/C$  排队延时. 当链路容量不变时, 排队延时取决于队列长度; 当队列长度  $q$  一定时,  $R$  为常数.

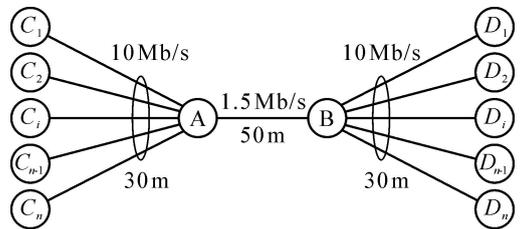


图 3 网络拓扑结构

仿真实验中有关参数初始值设定如下: 100 个 FTP 流作为数据流,  $L_{max} = 350$ ,  $L_{min} = 100$ ,  $p_{max} = 0.25$ ,  $A = 0.002$ , 则  $Q_{RED} = 1.0 @ 10^{-3}$ . 若  $q_0 = 280$ , 则  $R = 1.72$  s,  $p_0 = 0.18$ . 实验过程中保持  $q_0 = 280$

时的丢包概率不变, 则当  $Q_{RED}$  变化时, 队列长度在 280 上下波动. 由稳定条件  $K_1 Q_{ED} < 1$  和式 (7) 得到  $Q_{ED} < 1.2 @ 10^{-3}$ . 图 4~ 图 6 为  $Q_{RED}$  分别等于  $0.4 @ 10^{-3}$ ,  $1.0 @ 10^{-3}$ ,  $1.2 @ 10^{-3}$  时瞬时队列变化曲线.

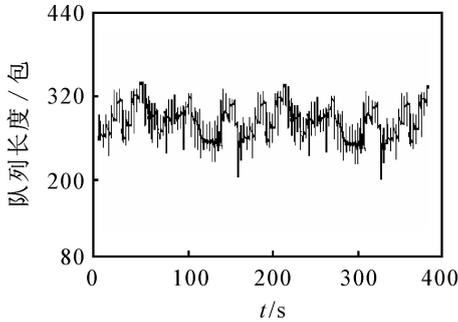


图 4  $Q_{RED} = 0.4 @ 10^{-3}$  瞬时队列变化曲线

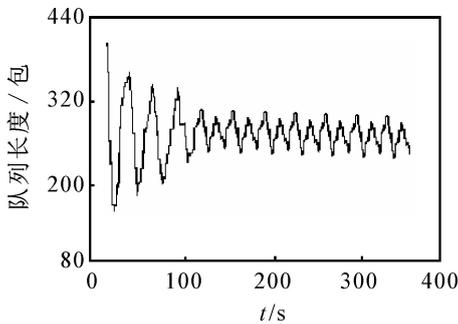


图 5  $Q_{RED} = 1.0 @ 10^{-3}$  瞬时队列变化曲线

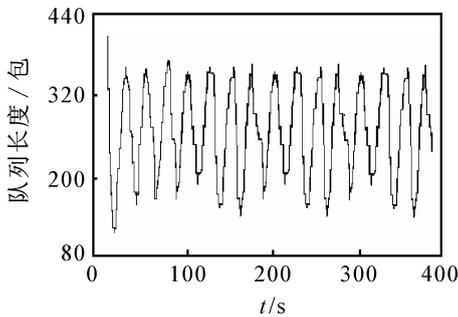


图 6  $Q_{RED} = 1.2 @ 10^{-3}$  瞬时队列变化曲线

由图 4~ 图 6 可以看出: 当  $Q_{RED}$  较小时, 队列的变化较稳定; 随着  $Q_{RED}$  的增大, 队列波动增大; 当

表 2 队列误差统计表

序号	$Q_{RED}$	队列误差
1	$0.25 @ 10^{-3}$	4.56
2	$0.4 @ 10^{-3}$	4.32
3	$0.55 @ 10^{-3}$	5.52
4	$0.7 @ 10^{-3}$	7.83
5	$0.85 @ 10^{-3}$	12.67
6	$1.0 @ 10^{-3}$	25.46
7	$1.1 @ 10^{-3}$	55.68
8	$1.2 @ 10^{-3}$	64.21

$Q_{RED}$  为  $0.4 @ 10^{-3}$  时, 队列较快地稳定在 280 附近; 在  $Q_{RED}$  为  $1.0 @ 10^{-3}$  时, 队列需经过较长的时间才能稳定在 280 附近; 当  $Q_{RED}$  为  $1.2 @ 10^{-3}$  时, 系统处于临界稳定状态, 队列波动幅度较大, 几乎成等幅振荡. 在稳定范围内取若干  $Q_{RED}$ , 分别进行实验, 数据从第 60 s 开始统计, 得到队列误差与  $Q_{RED}$  的关系如表 2 所示.

由表 2 可以看出, 队列误差随着  $Q_{RED}$  的增大而呈增大趋势, 且在  $Q_{RED}$  为  $1.2 @ 10^{-3}$  时, 即在临界稳定条件附近队列误差急剧变大.

## 6 结 论

本文基于已有的主动队列管理近似模型, 根据控制理论将主动队列管理 RED 看作在输入和扰动共同作用下的单位反馈控制系统, 提出了该队列控制系统的稳定条件(此条件比文献[9]给出的稳定条件更加精确), 计算了该稳定条件下的稳定误差. 仿真结果表明, 队列波动随着分组丢弃概率函数斜率  $Q_{RED}$  的增加而加大, 在稳定条件边界附近急剧增大, 在稳定条件范围内, 较小的  $Q_{RED}$  队列波动较小, 故要控制 RED 队列时, 可适当减小随分组丢弃概率函数的斜率. 这一结论对队列控制具有现实指导价值.

## 参考文献(References)

- [1] Braden B, Clark D, Crowcroft J. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the internet, request for comments (RFC) 2309[EB/OL]. (20020215). <http://www.cisg.law.pace.edu/cisg/biblio/ferrari4.html>. <http://www.ietf.org/rfc/>.
- [2] Floyd S. A report on some recent development in TCP congestion control[J]. IEEE Communication Magazine, 2001, 39(4): 84290.
- [3] Le L, Aikat J, Jeffay K, et al. The effects of active queue management on Web performance[C]. Proc of the ACM Sigcomm 2003. Karlsruhe, 2003: 2652276.
- [4] Floyd S, Gummadi R, Shenker S. Adaptive RED: An algorithm for increasing the robustness of RED's active queue management [EB/OL]. (200205218). <http://www.icir.org/~floyd>.
- [5] Kunniyur S, Srikant R. A time scale decomposition approach to adaptive ECN marking[C]. Proc of the IEEE INFOCOM. Anchorage: IEEE Communications Society, 2001: 133021339.
- [6] Athuraliya S, Low S, Li V H, et al. REM: Active queue management[J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 4253.
- [7] Misra V, Gong W B, Towsley D. Stochastic differential equation modeling and analysis of TCP window size behavior[C]. Performance 99. Istanbul, 1999.

还定义了抗体的交叉变异. 自适应的交叉变异的目的是增加种群的多样性, 扩大算法的搜索空间.

实验数据与问题有关, 本次实验的最好效果参数值不一定是其他问题的最优参数, 因而寻求普适的最佳参数模型是下一步努力的方向.

## 6 结 语

本文分析了进化算法的机制, 对量子进化算法进行了改进. No Free Lunch 定理表明, 没有哪一种方法能够最有效地解决所有问题, 这也是目前混合算法受到重视的一个原因. 理论分析和实验数据均表明, 本文提出的基于免疫算子的量子进化算法是有效可行的. 下一步的工作是进一步利用量子的其他优秀性能(如量子的纠缠性、相干性等), 充分挖掘量子的并行机制, 探索更高效合理的进化模型.

## 参考文献(References)

- [1] Narayanan A. An introductory tutorial to quantum computing[C]. Proc of IEEE Colloquium on Quantum Computing: Theory, Applications and Implications. London: IEEE Press, 1997, 1: 123.
  - [2] Narayanan A, Moore M. Quantum-inspired genetic algorithm[C]. Proc of IEEE Int Conf on Evolutionary Computation. Nagoya, 1996: 61266.
  - [3] Han K H, Kim J H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problems[C]. Proc of IEEE Int Conf on Evolutionary Computation. Lajolla, 2000: 135421360.
  - [4] 李斌, 谭立湘, 邹谊. 量子概率编码遗传算法及其应用[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(5): 802810.  
(Li Bin, Tan Lixiang, Zou Yi. Quantum probability coding genetic algorithm and its applications[J]. J of Electronics & Information Technology, 2005, 27(5): 802810.)
  - [5] 张葛祥, 李娜. 一种新量子遗传算法及其应用[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 472479.  
(Zhang Gexiang, Li Na. A novel quantum genetic algorithm and its application [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 472479.)
  - [6] 马淑霞. 基于下降搜索的量子进化算法[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(3): 3902393.  
(Ma Shuxia. Quantum evolutionary algorithm based on descending search [J]. J of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(3): 3902393.)
  - [7] 杨孔雨, 王秀峰. 自适应多模态免疫进化算法的研究与实现[J]. 控制与决策, 2005, 20(6): 7172720.  
(Yang Kongyu, Wang Xiufeng. Research and implement of adaptive multimodal immune evolution algorithm[J]. Control and Decision, 2005, 20(6): 7172720.)
  - [8] 王磊, 潘进, 焦李成. 免疫算法[J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74278.  
(Wang Lei, Pan Jin, Jiao Licheng. The immune algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(7): 74278.)
  - [9] 张著洪, 黄席樾. 一种新的免疫算法及其在多模态函数优化中的应用[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 17221.  
(Zhang Zhuohong, Huang Xiye. Novel immune algorithm and its application to multimodal function optimization[J]. Control Theory and Application, 2004, 21(1): 17221.)
  - [10] 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
(Pan Zhengjun, Kang Lishan, Chen Yuping. Evolutionary computation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.)
- 
- (上接第 748 页)
- [8] Misra V, Gong B W, Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED [C]. Proc ACM/SIGCOMM. Stockholm, 2000: 1512160.
  - [9] Holot C, Misra V, Towsley D, et al. A control theoretic analysis of RED[C]. Proc IEEE INFOCOM. Alaska, 2001: 15121519.
  - [10] 陈佐, 李仁发, 徐成, 等. RED 的队列稳态误差分析[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(11): 187421878.  
(Chen Zuo, Li Renfa, Xu Cheng, et al. Steady state error analysis of RED queue [J]. J of Computer Research and Development, 2004, 41(11): 187421878.)
  - [11] Hong Y, Cao Y, Sun H, et al. RED parameters and performance of TCP connections[J]. IEEE Electronics Letters, 2001, 37(24): 148921491.
  - [12] Vint. The network simulator n2[EB/OL]. (2003206210). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
  - [13] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 3972413.