

基于混合 PSO/DE 算法的 AQM 控制器优化设计

彭亦飞^{1,2}, 张英杰¹

(1. 湖南大学 计算机与通信学院, 湖南 长沙 410082; 2. 邵阳学院 激光技术与信息研究所, 湖南 邵阳 422000)

摘要: 主动队列管理 (AQM) 是一种减少 TCP/IP 网络丢包和提高网络利用率的关键拥塞控制策略。将比例-积分-微分 (PID) 控制器用于 Internet 路由器的主动队列管理, 为避免参数整定试凑法的盲目性, 提出混合微粒群/差分进化优化算法用于 PID 控制器参数优化。所提出的方法在给定参数空间中进行组合优化搜索, 可以迅速得到使性能指标优化函数极小化的一组 PID 控制器参数。仿真结果表明, 在正常业务流和突发业务流两种情况下, 该方法设计的控制器均具有良好的动静态性能。

关键词: 主动队列管理; 网络拥塞; PID 控制; 粒子群优化; 差分进化

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)03-0042-04

Optimum Design for AQM Controller Based on Hybrid PSO/DE Algorithm

Peng Yifei^{1,2}, Zhang Yingjie¹

(1. School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Institute of Laser Technology and Information, Shaoyang University, Shaoyang Hunan 422000, China)

Abstract: Active queue management (AQM) is a key congestion control scheme for reducing packet loss and improving network utilization in TCP/IP networks. A proportional-integral-derivative (PID) controller is proposed as an active queue manager for internet routers. A hybrid PSO/DE optimum algorithm is applied to optimization of PID controller parameters for avoiding the aimlessness of the error and trial method of controller parameter tuning. The proposed method can fast obtain a set of PID controller parameters that minimizes the performance function by searching the given controller parameters space. The simulation experimental results show that the dynamic and steady performances of the proposed algorithm are sound under the two conditions of common business flow and sudden business flow.

Key words: active queue management; network congestion; PID control; particle swarm optimization; differential evolution

0 引言

1995年, B. Braden等人提出了主动队列管理 (Active Queue Management, AQM) 算法^[1], 作为端到端拥塞控制的一种技术手段, 可以在减小排队时延的同时保证较高的吞吐量。S. Floyd等人提出的随机早期检测 (Random Early Detection, RED) 算法^[2]符合 AQM 的思想, RFC2 309 推荐它为主动队列管理的唯一候选算法。虽然 RED 算法已被广泛用于网络队列管理中来提高系

统的综合性能, 然而, RED 算法本身依旧存在着许多不完善之处, 为此相继产生了不少有影响力的改进算法, 如 ARED^[3]、SRED^[4]、BLUE^[5]等, 但这些研究在很大程度上是依赖于直觉的, 缺乏系统的理论作为分析和设计的依据。C. Hollot等人用小信号理论, 对 V. Misra 给出的 TCP 流量控制模型^[6]进行线性化处理, 用经典线性控制理论分析了 RED 的稳定性^[7]。文献^[8]进而给出一种用于主动队列管理的 PI (Proportional integral)

收稿日期: 2008-04-23

作者简介: 彭亦飞 (1969-), 男, 湖南邵阳人, 邵阳学院讲师, 硕士研究生, 主要从事网络技术方面的研究;

张英杰 (1970-), 男, 湖南邵阳人, 湖南大学副教授, 博士, 主要从事工业过程计算机控制, CACSD 方面的教学与研究。

控制器, 增强了对队列长度的控制能力。随后, 一些文献进一步研究, 将 PID 调节器用于 AQM 控制, 并通过仿真表明其与 PI 调节器相比的优越性^[9,10]。但是, 在时变网络环境中, 一般很难确切得到系统的临界放大倍数和临界振荡周期, 也就无法使用常规 Ziegler-Nichols 方法, 整定 PI 或 PID 控制器的参数。因此, 只能采用试凑方法, 所得到的 PID 调节器虽然能够稳定工作, 但是其性能一般不能达到最优。

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)^[11] 和差分进化 (Differential Evolution, DE)^[12] 是新近出现的 2 种进化计算方法。由于其编码简单、易于实现和调整参数少, 这 2 种进化优化方法在许多领域得到了广泛应用。但是, 这 2 种优化算法也存在各自的缺陷: PSO 算法在进化后期由于所有微粒都向最优微粒靠近, 群体易于失去多样性; 差分进化在优化迭代后期接近最优解时收敛速度缓慢, 也易陷入局部最优。为了克服 PSO 和 DE 算法在求解优化问题时的缺陷, 受到文献[13]的启发, 本文将 PSO 和 DE 算法相结合, 提出一种混合 PSO/DE 优化算法。该算法采用双种群并行进化策略, 2 个种群中的个体分别按照 PSO 和 DE 操作进化, 并在进化过程中通过信息交流机制, 共享搜寻信息, 达到开发能力和探索能力之间的平衡, 维持种群多样性, 避免各自种群陷入局部最优。

基于以上分析, 本文首先推导基于流体流理论的网络简化模型, 基于该模型将 PID 控制器应用于计算机网络 AQM 中, 应用混合 PSO/DE 优化算法, 对控制器参数进行组合优化; 在给定的搜索空间找到使性能指标优化函数极小化的一组 PID 控制器参数; 最后, 通过 MATLAB/Simulink 仿真, 验证所提出方法的可行性。

1 问题描述

用如下非线性流体流模型来描述 TCP 网络 AQM 控制系统:

$$\dot{w}(t) = \frac{1}{\frac{q(t)}{C} + T_p} - \frac{w(t)}{2} \frac{w(t-R(t))}{q(t-R(t))} p(t-R(t)), \quad (1)$$

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} -C + \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C} + T_p} w(t), & \text{if } q(t) > 0; \\ \max \left\{ 0, -C + \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C} + T_p} w(t) \right\}, & \text{if } q(t) = 0; \end{cases} \quad (2)$$

其中: $w(t)$ 是 TCP 流的平均窗口大小;
 $q(t)$ 是瞬时队列长度; T_p 是传播时延;
 $R=q/C+T_p$ 是传输 RTT; C 是链路容量;
 N 为 TCP 连接数目; p 为丢包概率。

模型 (1) 和 (2) 反映了具有平均窗口大小和平均队列长度的 TCP 动态特性。式 (1) 描述了 TCP 的拥塞窗口调节机制, 采用加式增加 / 乘式减少 (AIMD) 拥塞控制算法, 估计 TCP 流的拥塞窗口大小。式 (1) 中的第一项描述了 AIMD 的加式增加部分, 如果没有报文丢失, 每经过一个 RTT, TCP 拥塞窗口加 1; 式 (1) 中的第二项描述了 AIMD 的乘式减少部分, 当检测到报文丢失时, 拥塞窗口减少为原来的一半。式 (2) 描述了路由器中队列随时间变化的模型, 瞬时队列长度 $q(t)$ 由报文到达速率和链路带宽之间的差值决定。当队列长度大于零时, 路由器转发报文, 队列长度不断减少; 否则, TCP 连接发送报文到路由器, 队列长度累积增长。

因为丢包概率 $0 < p < 1$, 式 (1) 可由如下具有饱和输入特性的非线性时滞微分方程描述:

$$\dot{w}(t) = \frac{1}{\frac{q(t)}{C} + T_p} - \frac{w(t)}{2} \frac{w(t-R(t))}{q(t-R(t))} \text{sat}\{u(t)\}, \quad (3)$$

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} -C + \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C} + T_p} w(t), & \text{if } q(t) > 0; \\ \max \left\{ 0, -C - \frac{N(t)}{\frac{q(t)}{C} - T_p} w(t) \right\}, & \text{if } q(t) = 0; \end{cases} \quad (4)$$

其中, 饱和输入 $u(t) = p(t-R(t))$ 可由如下非线性函数描述:

$$\text{sat}\{u(t)\} = \begin{cases} u_{\max}, & u(t) \geq u_{\max}; \\ u(t), & u_{\min} \leq u(t) < u_{\max}; \\ u_{\min}, & u(t) < u_{\min}. \end{cases} \quad (5)$$

饱和下界和上界分别为 $u_{\min}=0$ 和 $u_{\max}=1$ 。

本文采用 PID 控制器, 使队列长度在饱和输入情况下达到期望值。定义队列长度误差为 $e(t)=q(t)-q_d$, 其中 q_d 为期望队列长度, PID 控制器具有如下形式:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau - T_d \frac{d}{dt} e(t) \right], \quad (6)$$

其中: K_p 为比例增益;

T_i 和 T_d 分别为积分和微分时间常数。

式 (6) 可以重写为:

$$u(t) = K_f e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t), \quad (7)$$

其中: $K_f = K_p / T_i$ 为积分增益; $K_D = K_p T_d$ 为微分增益。

根据 AQM 控制在稳快准三方面的动静态性能要求, 定义如下性能指标函数:

$$\min_{\{k_p, k_i, k_d\}} J(k_p, k_i, k_d) = \int_0^{\infty} e^2(\tau) d\tau. \quad (8)$$

性能指标函数 ISE (即式 (8)) 既能保证系统稳定

性,又能满足系统快速性和较小的稳态误差。

为了避免试凑法带来的控制性能下降,下面采用混合 PSO/DE 优化算法,获得 AQM 控制器最优参数。

2 混合 PSO/DE 优化算法

2.1 标准 PSO 算法和 DE 算法

PSO 算法的基本原理是:假设把优化问题的潜在解看作没有质量和体积的微粒,微粒在 D 维空间飞行,根据自身经验和群体经验,在搜寻过程中调整位置。

微粒 i 由 $x_i=(x_{i1},x_{i2},\dots,x_{iD})$ 表示,其中 $x_{i,j} \in [l_d, u_d]$,

$d \in [1:D]$, l_d, u_d 分别是搜索空间的下限和上限。微粒 i 的速度表示为 $v_i=(v_{i1},v_{i2},\dots,v_{iD})$,最大速度 v_{\max} 由用户设定。微粒位置和速度的迭代公式为:

$$v_i(t+1) = wv_i(t) + R_1c_1(P_i - x_i(t)) + R_2c_2(P_g - x_i(t)), \quad (9)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (10)$$

其中: R_1 和 R_2 是 0~1 之间的随机数;

c_1 和 c_2 为加速度常数,分别为个体经验和群体经验的影响系数;

P_i 是微粒 i 的历史最好位置,用 P_{best} 表示;

P_g 是当前群体中最优微粒位置,用 G_{best} 表示;

惯性权重 w 是影响算法性能的一个重要参数,当 w 较大时,算法具有较强的全局搜索能力; w 较小则算法倾向于局部搜索。一般采用线性递减方法改变 w :

$$w = w_{\text{rmax}} - \frac{w_{\text{rmax}} - w_{\text{min}}}{\text{iter}_{\text{rmax}}} \times \text{iter}, \quad (11)$$

其中: iter_{max} 是最大迭代次数; iter 是当前迭代次数;

w_{max} 和 w_{min} 分别为初始速度和最终速度。

采用 DE/rand/1/ 策略的差分进化 (DE) 算法的基本原理是:初始种群为 $x_i^t (i=1,2,\dots,N)$,其中 t 为当前代次。在变异操作中,随机矢量 v_i^t 根据式 (12) 产生

$$v_i^t = x_{r_1}^t + F(x_{r_2}^t - x_{r_3}^t), \quad (12)$$

其中: $r_1, r_2, r_3 \in \{1,2,\dots,N\}$ 是随机数;

$F \in [0, 2]$ 为加权因子。

在杂交操作中,新种群 $\bar{x}_i^t = [\bar{x}_{i1}, \bar{x}_{i2}, \dots, \bar{x}_{iD}]$ 由随机矢量 $v_i^t = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]$ 和目标矢量 $x_i^t = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]$ 共同产生,即

$$\bar{x}_{ij}^t = \begin{cases} v_{ij}^t, & \text{if rand } b(j) \leq CR \text{ or } j = \text{rand } r(i); \\ x_{ij}^t, & \text{if rand } b(j) \geq CR \text{ or } j \neq \text{rand } r(i); \end{cases} \quad (13)$$

其中: $j \in [1, D]$, $\text{rand } b(j) \in [0,1]$ 是均匀分布随机数发生器的第 j 个值;

$CR \in [0,1]$ 为变异概率;

$\text{rand } r(i) \in [0,1]$ 是随机选择指数,它确保 x_i^t 能从 v_i^t 中得到至少 1 个参数。选择操作公式为

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} \bar{x}_i^t, & \text{if } \Phi(\bar{x}_i^t) < \Phi(x_i^t); \\ x_i^t, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\Phi(x)$ 代表适应函数。

2.2 混合 PSO/DE 优化算法

PSO 算法在优化初期阶段,群体多样性较高,适应值变化较大,微粒迅速收敛到局部最优;随着群体中的个体向群体最优个体靠近,群体多样性急剧降低,适应值变化缓慢或接近为零,算法出现“早熟”现象。差分进化算法由于在选择操作中采用“贪婪”搜索策略,即经过变异和交叉操作后的个体与父代个体进行竞争,只有当其适应度好于父代时才被选作为子代,否则直接进入下一代,机制容易使算法陷入局部最优点而停滞。

针对 PSO 算法和 DE 算法陷入局部最优的缺点,本文将 PSO 算法和 DE 算法相结合,提出一种混合优化算法。其基本思想是:当 PSO 微粒群体陷入局部最优点时,微粒同时根据自身群体的经验和 DE 群体中最优个体的信息确定下一步的位置,从而使陷入局部最优的微粒脱离局部最优点,并以较大概率向全局最优点靠近。混合 PSO/DE 优化算法步骤如下:

1) 设置群体规模 N 、最大迭代次数 T_{max} 、求解精度 ϵ 、最大惯性权重 w_{max} 、最小惯性权重 w_{min} 、控制因子 λ 、加速因子 c_1 和 c_2 、加权因子 F 、变异概率 CR ;

2) 在不同区域初始化群体 POP^{PSO} 和 POP^{DE} , 设置次代数 $t=0$;

3) 根据 PSO 算法 (9)~(11),对 POP^{PSO} 群体进行速度、位置更新,根据 DE 算法 (12)~(14),对 POP^{DE} 群体执行变异、杂交、选择操作;

4) 分别选出 POP^{PSO} 群体和 POP^{DE} 群体中最佳个体 $G_{\text{best}}^{\text{PSO}}$ 和 $G_{\text{best}}^{\text{DE}}$, 将 $G_{\text{best}}^{\text{PSO}}$ 和 $G_{\text{best}}^{\text{DE}}$ 中的较优个体作为公共最佳个体;

5) 更新次代数 $t=t+1$,并记录公共最佳个体,如果满足精度要求或已达到最大迭代次数,则终止算法;否则转至步骤 3)。

3 仿真实验

下面基于 TCP/AQM 模型 (1)~(2),采用混合 PSO/DE 优化算法进行 AQM 控制器优化设计。

假设 100 个相同的 TCP 连接共享一个容量为 10 Mbps 的瓶颈链路,即 $N=100$, $C=1\ 250$ packets/s。瓶颈链路容量的传输时延为 $T_p=0.08$,期望队列长度为 $q_d=150$ packets, $u_{\text{min}}=0$, $u_{\text{max}}=1$,节点缓存大小为 300 packets。

混合 PSO/DE 优化算法中的参数设置为: $w_{\text{max}}=0.9$, $w_{\text{min}}=0.4$, $c_1=c_2=2$, $CR=0.8$, $F=0.5$, $\lambda=3$,群体规模 $N=40$,最大迭代次数为 500。图 1 给出了适应度函数

值在迭代过程中的收敛情况, 得到的最优 PID 参数为: $K_p=0.2$, $K_i=0.021$, $K_d=0.057$ 。

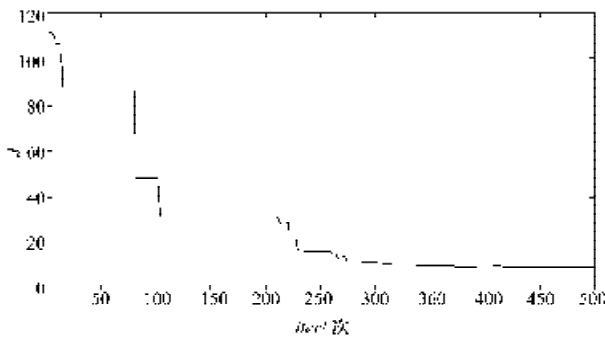


图1 适应度迭代变化图

Fig. 1 Variation chart for fitness iteration

在 MATLAB/Simulink 中, 对利用以上得到的 PID 主动队列管理算法进行仿真, 仿真结果见图 2、3。图 2 为正常业务流下的队列变化情况, 图 3 为突发业务流下的队列变化情况。连接数 N 在 30 s 时由初始的 100 增加到 150, 至 60 s 返回至 100。

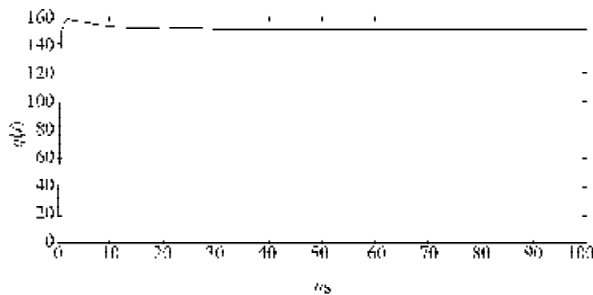


图2 正常业务流下的队列变化图

Fig. 2 Queue variation chart under common flow

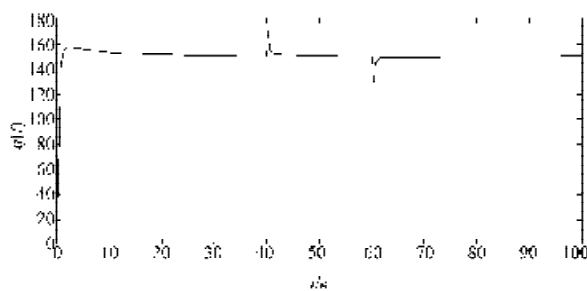


图3 突发业务流下的队列变化图

Fig. 3 Queue variation chart under burst flow

从仿真结果可以看出, 基于混合 PSO/DE 优化的 AQM 控制算法具有较快的响应速度, 动态性能良好。

4 结语

本文基于流体流理论的网络简化模型, 将 PID 控制器应用于 AQM 控制系统中。利用混合 PSO/DE 优化算法对 PID 控制器参数进行优化, 在给定的搜索空间,

迅速找到使系统性能指标函数极小化的一组 PID 控制器参数。仿真结果表明, 基于混合 PSO/DE 优化算法的 PID 主动队列管理算法在正常业务流和突发业务流 2 种情况下均具有较好的综合性能。

参考文献:

- [1] Braden B. Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet[EB/OL]. [1998-04-20]. <http://www.rfcnet/rfc2309.html>.
- [2] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 1993, 1(4): 397-413.
- [3] Feng W, Kandlur D, Saha D, et al. A Self-Configuration RED gateway[C]//Proceedings of the INFOCOM 99. New York: IEEE Computer Society, 1999: 1320-1328.
- [4] Ott T J, Lakshman T V, Wong L H. SRED: stabilized RED [C]//Proceedings of the INFOCOM 99. New York: IEEE Computer Society, 1999: 1346-1355.
- [5] Athuraliya S, Low S, Li V H, et al. REM: Active queue management[J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48-53.
- [6] Misra V, Gong W B, Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[C]// Proc ACM/SIGCOMM. Stockholm: ACM, 2000: 151-160.
- [7] Holot C V, Misra V, Dowsley T, et al. A control theoretic analysis of RED[C]// Proc IEEE INFOCOM. Alaska: IEEE communications society, 2001: 1510-1519.
- [8] Holot C H, Misra V, Towsley D, et al. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows [C]//Proc IEEE INFOCOM. Alaska: IEEE communications society, 2001: 1726-1734.
- [9] 任丰原, 王福豹, 任勇, 等. 主动队列管理中的 PID 控制器[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(1): 94-99.
- [10] 陆锦军, 王执铨. 基于粒子群优化的网络拥塞控制新算法 [J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1446-1451.
- [11] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway: IEEE service center, 1995: 39-43.
- [12] Price K V. Differential evolution: A fast and simple numerical optimizer[C]//Proceedings of the 1996 Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society. Piscataway: Berkeley, 1996: 524-527.
- [13] 栾丽君, 谭立静, 牛奔. 一种基于粒子群优化算法和差分进化算法的新型混合全局优化算法[J]. 信息与控制, 2007, 36(6): 708-714.

(责任编辑: 张亦静)