

文章编号: 1000-5862(2015)03-0304-05

# 基于量子粒子群优化 PI 模型的主动队列网络拥塞控制

李景富<sup>1</sup> 张 飞<sup>2</sup>

(1. 黄淮学院国际学院, 河南 驻马店 463000;

2. 黄淮学院信息工程学院, 河南 驻马店 463000)

**摘要:** 为了解决无线传感器网络拥塞引起的丢包率高和网络吞吐率过低, 从而引起网络能量有效性和服务质量 QoS 降低的问题, 提出了一种基于改进 PI 主动队列管理模型和量子粒子群(Quantum-behaved particle swarm optimization, QPSO) 的拥塞控制方法. 首先定义了改进的 PI 主动队列管理模型, 然后为了对 PI 模型进行优化, 采用改进的多种群量子粒子群算法对 PI 主动队列管理模型中的参数优化, 并对该算法进行了描述, 从而得到优化的 PI 控制模型. 最后定义了多种群量子粒子群算法和 PI 主动队列模型对网络拥塞进行控制的具体算法. 实验结果表明: 该方法能有效实现 WSN 的拥塞控制, 与其它方法相比, 具有较低的数据丢包率和较大的网络吞吐率.

**关键词:** 无线传感器网络; 拥塞控制; 主动队列; 量子粒子群

**中图分类号:** TP 391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2015.03.15

## 0 引言

近年来, 随着微电子和 Internet 的发展, 网络资源的需求日益增大, 布置在底层无线传感器网络<sup>[1-2]</sup>中的节点由于通信能力有限, 同时采用多跳传输方式使其容易出现网络拥塞<sup>[3]</sup>. 当网络中的某个监测区域分布的传感器节点较多时, 会导致区域的节点通信量大, 同时区域的汇聚节点由于要处理大量业务数据, 也会导致数据分组的丢失和网络延迟, 从而使得网络吞吐率下降, 最终导致了网络拥塞, 严重时会造成网络瘫痪, 使用户无法评估监测区域发生的事件<sup>[4-5]</sup>.

目前, 已有的对 WSN 进行拥塞控制的主要研究有: (i) 文献[6]提出了一种基于自适应竞争窗口的无线传感器网络拥塞控制方法, 当节点发现缓存空置比率上升时, 得出节点会聚集更多数据包的预测结果, 从而采取缩小竞争窗口尺寸的措施, 提高数据包的传递率; (ii) 文献[7]提出了一种以 TCP 协议为基础的路径损耗确认机制来实现 TCP 选择确认机制, 当 TCP 连接到新的接入点时, TCP-PLACK 会发送特殊确认, 其中包含丢包详细信息和可用带宽; (iii) 文献[8]基于元胞遗传提出一种新的网络拥塞

控制方法, 对慢启动和拥塞避免策略进行改进, 然后结合元胞遗传并利用演化规则建立数据报文状态预测方法; (iv) 文献[9]提出了一种新的网络拥塞避免和控制算法, 在综合考虑数据包和随机指数指标标记概率和优先级权值的前提下, 建立模糊逻辑推理系统, 实现数据流的智能调控; (v) 文献[10]设计了一种基于通行量趋势预测的 AD-hoc 网络拥塞控制策略, 在当平均队列长度超过最大阈值时, 以一定概率丢弃报文, 从而发觉数据包的发送周期.

上述工作均研究了网络拥塞控制, 但由于无线传感器网络中节点能量受限和丢包原因的多样性, 使得这些算法在应用到无线传感器网络的拥塞控制时效果不理想, 具有一定的局限性.

主动队列管理<sup>[11]</sup>是一种常见的网络拥塞控制方法, 在发生拥塞的节点中使用更准确的信息来检测和控制数据流, 并采用标记或丢弃数据包方式来避免网络拥塞, 从而有效避免死锁发生.

本文针对无线传感器网络的特点, 设计了一种基于量子粒子群优化 PI 模型的主动队列网络拥塞控制方法, 在网络发生拥塞时, 采用自适应 PI 控制, 并通过量子粒子群算法对 PI 算法的控制参数进行整定, 实验证明了该方法的有效性.

收稿日期: 2014-09-28

基金项目: 河南省科技攻关课题(122102210510) 和河南省教育厅科技攻关课题(13A520786) 资助项目.

作者简介: 李景富(1981-) 男, 河南驻马店人, 实验师, 主要从事信息安全和协同过滤的研究.

## 1 PI 主动队列管理拥塞控制模型

主动队列管理模型是一种通过对网络中的中继节点建立缓存队列,当接收到其他节点转发的数据时,就将其存入缓存队列中,当队列充满时,就将部分数据丢弃,主动队列管理模型有效地实现在网络拥塞前将数据包发送到接收方,从而防止缓冲队列的溢出和数据包的丢失。

PI<sup>[11]</sup>主动队列管理模型是一种将PI控制器与主动队列管理模型相结合的自适应控制模型,能有效地实现网络拥塞的控制,PI主动队列控制模型如图1所示。

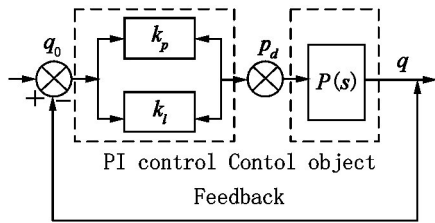


图1 PI控制模型

在图1中 $q_0$ 和 $q$ 分别是队列期望长度值和中间节点处产生的瞬时数据流队列长度峰值, $P(s)$ 是一个综合处理过程,实现节点数据的发送、接收、处理以及转发, $p_d$ 表示数据包的丢弃率,在对其进行合理取值的基础上,能用于控制中间节点的数据包到达率。

PI主动队列管理模型中,输入数据变量偏差可以表示为

$$Ed = q_0 - q. \quad (1)$$

由于队列长度为离散值,为了得到一个连续的表达模型,对控制器进行线性处理。

假设采用 $p(k)$ 表示 $k$ 时刻对应的缓存队列数据包丢弃率,可以表示为

$$p(k) = k_p Ed(k) + k_L \sum_{j=1}^k Ed(j),$$

其中 $Ed(k)$ 表示 $k$ 时刻时对应的数据输入变量偏差,其值可以根据(1)式进行计算, $k_p$ 和 $k_L$ 分别表示控制模型的比例系数和积分系数,对这2个参数进行调整可以进行有效某特定过程。

缓存队列数据包丢弃率增量表达式 $\Delta p(k)$ 可以表示为

$$\Delta p(k) = k_p((1 + T/s)Ed(k) - Ed(k-1)),$$

其中 $T$ 表示采样时间, $s$ 的值为 $k_p/k_L$ ,缓存队列的数据包丢弃率在 $k$ 时刻时的值可以通过下式算:

$$p(k) = p(k-1) + k_p(Ed(k-1) + (1 + T/s)Ed(k)). \quad (2)$$

## 2 基于量子粒子群的自适应参数整定

### 2.1 标准粒子群算法

粒子群优化算法(Particle swarm optimization algorithm, PSO)是一种简单有效的随机搜索算法,能在无需问题特征信息和梯度信息的情况下,实现非线性、不可微和多峰值问题的优化,标准的PSO算法具有搜索空间有限和容易陷入局部最优解的缺点,无法保证能以概率收敛到全局最优解。

### 2.2 改进的量子粒子群算法

Sun等在Clerc提出的粒子收敛行为的基础上,提出了一种新的PSO算法模型,在以DELTA势阱的基础上,认为粒子具有量子行为,提出了一种量子粒子群算法(Quantum-behaved particle swarm optimization, QPSO)。

在量子空间中,粒子由于满足不同的聚集态性质,因此,可以在整个可行解空间中搜索,由于粒子的位置和速度不确定,可采用波函数的平方表示粒子在空间的概率密度,并通过薛定谔方程获得粒子在某一点出现的概率密度。

在QPSO算法中,粒子在任意时刻 $t$ 时的位置方程为

$$p(t) = p_r(t) \pm \frac{L}{2} \ln[1/u],$$

其中 $u$ 为服从 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数, $L$ 的表达式可以表示为

$$L(t+1) = 2\beta |p_a(t) - p(t)|,$$

其中 $p_a(t)$ 表示第 $t$ 次迭代所有粒子的位置均值, $\beta$ 表示收缩扩张系数, $p_a(t)$ 的计算公式为

$$p_a(t) = \sum_{i=1}^M p_{li}(t) / M,$$

其中 $M$ 表示粒子总数。

令 $p_g(t)$ 表示第 $t$ 次迭代时粒子的全局最优位置, $p_l(t)$ 表示个体最优位置,获得第 $t$ 次迭代时粒子位置, $p_r(t)$ 表示个体最优 $p_l(t)$ 和全局最优位置 $p_g(t)$ 之间的随机位置,可以表示为

$$p_r(t) = \alpha p_l(t) + (1 - \alpha) p_g(t),$$

其中 $p_l(t)$ 为到第 $t$ 次迭代时粒子个体最优位置, $\alpha$ 为服从 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数, $L$ 的值可以通过下式进行计算:

$$L(t+1) = 2\beta |p_a(t) - p(t)|,$$

其中 $\beta$ 为惯性权重,通常取为固定值。

粒子在第 $t+1$ 次迭代时的位置可以表示为

$$p(t+1) = p_r(t) \pm \beta |p_a(t) - p(t)| \ln(1/u). \quad (3)$$

为了提高算法的收敛速度,对惯性权重 $\beta$ 进行改进,使其具有良好的自适应性能,使其在一定范围内动态变化, $\beta$ 的计算可以表示为

$$\beta = 0.5 + (1 - 0.5)(t_{\max} - t) / t_{\max},$$

其中 $t_{\max}$ 表示迭代的最大次数,当(10)式中的 $u$ 满足 $u \leq 0.5$ 时, $\beta$ 前的符号取值为正,当 $u > 0.5$ 时, $\beta$ 前的符号取值为负数,QPSO具有良好的性能.

### 2.3 基于改进量子粒子群的多种群参数整定算法

PI主动队列管理控制虽然控制过程简单,但PI参数的选择对于控制器的性能有重要的影响,PI参数主要包括 $k_p$ 和 $k_L$ , $k_p$ 能实现系统的粗调,能快速有效地对系统变化趋势进行扭转,但降低了系统稳定性; $k_L$ 能降低系统静态误差,提高系统精度,因此,需要对参数 $k_p$ 和 $k_L$ 进行自适应地整定.

算法1 多种群量子粒子群PI参数优化算法.

(i) 初始化:种群个数 $S-1$ ,粒子种群规模 $M$ ,迭代次数最大值 $k_{\max}$ ,子种群的最大迭代次数 $k_{s_{\max}}$ ,惯性权重 $\beta$ 的初始值;

(ii) 随机产生 $(S-1) \times M$ 个粒子组成的粒子群 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$ ,每个粒子 $p_i$ 进行编码为2维向量,

$$p_i = \{k_{p_i}, k_{L_i}\};$$

(iii) 迭代次数 $t = t + 1$ ,计算粒子适应度

$$J = e^{-\alpha}(\sigma + e_s^2 + e_{\sin}) + (1 + e^{-\alpha})(t_s + t_r),$$

其中 $\sigma$ 为超调量, $e_s$ 为静态误差, $e_{\sin}$ 为正弦跟踪误差, $t_s$ 和 $t_r$ 分别为调节时间和上升时间;

(iv) 将每个粒子的当前位置 $p_i$ 设置为个体极值 $p_i(t)$ ,将种群中所有个体的最优适应度设置为全局最优解 $p_g(t)$ ;

(v) 判断各子种群中的粒子个体的适应度是否小于个体最优位置的适应度 $J(p_i(t))$ ,若小于,则最优位置 $p_i(t)$ 被替换为粒子当前位置 $p(t)$ ;判断粒子个体的适应度是否小于粒子的全局最优位置适应度 $J(p_g(t))$ ,如果小于,采用粒子的当前位置 $p(t)$ 来更新全局最优值 $p_g(t)$ ;

(vi) 将 $S-1$ 个种群中的最差的粒子进行变异,即对这些最差适应度的粒子的每个分量添加一个 $[0, 1]$ 之间的值进行变异,实现粒子群的扰动;

(vii) 根据(3)式计算粒子在下一时刻的位置,并根据(11)式对惯性权重进行自适应的调整;

(viii) 判断各子种群的粒子是否已经收敛或达到最大迭代次数 $k_{s_{\max}}$ ,此时采用将个子种群的粒子最优位置保存为 $p_{g1}(t), \dots, p_{gs-1}(t)$ ,所有子种群的

最优粒子为 $p_g(t)$ ;

(ix) 判断 $p_g(t)$ 是否已满足收敛性要求,或者算法已经达到最大迭代次数 $k_{\max}$ ,如果收敛或达到,则算法结束,输出全局最优解 $p_g(t)$ 对应的参数 $k_p$ 和 $k_L$ 值;

否则采用 $p_{g1}(t), p_{g2}(t), \dots, p_{gs-1}(t)$ 作为粒子的初始位置,随机生成 $(S-1) \times M$ 个粒子,并重新划分为 $(S-1)$ 个子种群进行并行寻优,转入(iii).

## 3 拥塞控制算法描述

在采用多种群量子粒子群算法对PI主动控制模型进行优化后,将得到的最优参数重置PI模型,实现对网络拥塞的控制,最终得到基于多种群量子粒子群和PI的网络拥塞控制算法.

算法2 基于多种群量子粒子群算法和PI模型的拥塞控制.

(i) 初始化:初始化多种群量子粒子群算法中的各参数,其包括种群个数 $S-1$ ,粒子种群规模 $M$ ,迭代次数最大值 $k_{\max}$ ,子种群的最大迭代次数 $k_{s_{\max}}$ ,惯性权重 $\beta$ ;

(ii) 调用算法1的多种群量子粒子群算法对PI参数 $k_p$ 和 $k_L$ 进行寻优,将算法得到的最优参数 $k_p$ 和 $k_L$ 值对PI主动队列管理模型进行重置;

(iii) 当前时刻 $k = k + 1$ ;

(iv) 启动队列管理模块实现对当前队列长度 $q(k)$ 进行采样,并计算输入变量的偏差,公式为

$$Ed = q_0 - q(k);$$

$$\{p(k-1) = p(k), e(k-1) = e(k)\} \quad (4)$$

(vi) 根据(4)式计算缓存队列数据包丢弃率增量 $\Delta p(k)$ ,根据(2)式计算缓存队列的数据包丢弃率 $p(k)$ ;

(vii) 根据对历史数据进行更新;

(viii) 将丢包概率设置为 $p(k)$ 对缓存队列进行有效管理,即在缓存队列溢出之前,对缓存队列中的重复数据包进行随机丢弃,提前进行主动丢包,防止以为溢出而导致的丢包.

## 4 仿真实验

为了对所述方法进行验证,在Matlab环境下进行仿真实验,网络区域大小为 $200 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ ,将整个监测区域分为4个矩形区域,监测区域以外有多个传感器节点,负责监测区域与SINK节点之间的

数据转发,节点的最大通信距离为 30 m,MAC 层的协议为 802.11,模型缓冲队列的长度为 20 个数据包,数据包大小为 128 B, Sink 节点发出命令后,通过中继节点发送给监测区域中的节点,节点收到命令后采集监测区域中的数据.网络拓扑结构如图 2 所示.

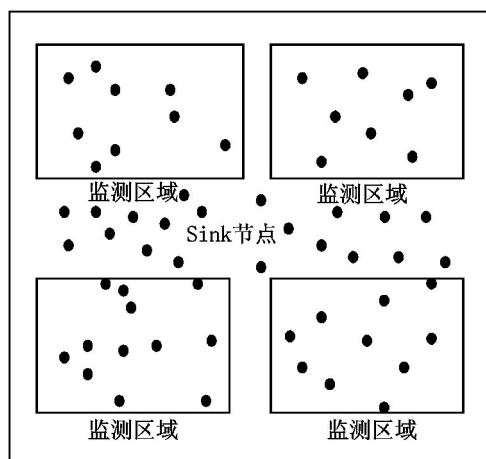


图2 网络拓扑结构

为了验证方法的优越性,将方法与经典的 PI 控制模型以及文献[11]中改进的 PI 控制模型进行网络的丢包率和吞吐量方面进行比较.该算法参数设置如下:种群个数  $S - 1 = 50$ ,粒子种群规模  $M = 100$ ,迭代次数最大值  $k_{\max} = 100$ ,子种群的最大迭代次数  $k_{s_{\max}} = 20$ ,惯性权重  $\beta = 0.9$ .3 种方法得到的吞吐量如图 3 所示.

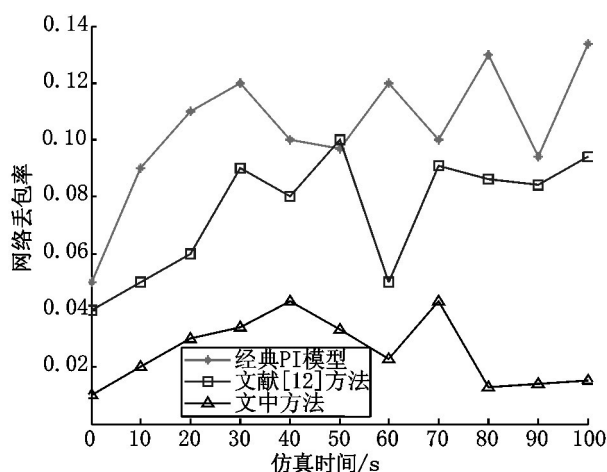


图3 丢包率比较

从图 3 中可以看出,文中方法的网络拥塞控制性能最好,丢包率在 3 种方法中最低,且在仿真期间始终低于经典 PI 控制方法和文献[12]所示的模糊 PI 控制方法.模糊 PI 控制方法由于考虑了不确定性,因此,控制性能由于经典 PI 控制方法.

3 种方法得到的网络吞吐量如图 4 所示.

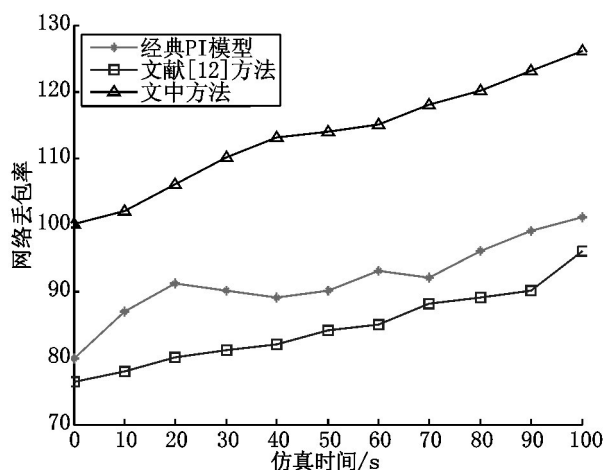


图4 吞吐量比较

从图 4 中可以看出,经典 PI 控制方法由于未对参数进行优化,始终保持较高的激励水平,从而导致链路利用率和系统吞吐率均较低,文献[12]虽然加入了模糊控制方式,但仍然无法实现较优的控制,文中方法采用了多种群自适应的量子粒子群进行寻优,对参数进行了优化整定,因此,具有较高的网络吞吐率.

## 5 结论

为了有效减少提高 WSN 的网络的拥塞控制,提出了一种基于量子粒子群优化的和 PI 模型主动队列的网络拥塞控制方法.首先,设计了基于队列主动管理模型和 PI 结合的 PI 主动队列网络拥塞控制模型,然后通过多种群的量子粒子群进行 PI 控制器参数的整定,最后,将该参数优化的 PI 主动队列管理模型进行拥戴控制.仿真结果证明了文中方法设计合理,与其他方法相比,具有较高的吞吐量和丢包率,是一种可行有效的网络拥塞控制方法.

## 6 参考文献

- [1] Chen Zhongnan, Nan Guofang. Optimization of sensor deployment for mobile wireless sensor networks [A]. International Conference on Computational Intelligence and Vehicular System [C]. Washington D C: IEEE Computer Society, 2010: 218-221.
- [2] 孙毅,李敏,柯珊珊,等.面向用电信息采集的无线传感器网络拥塞控制算法[J].传感器与微系统,2013,8(32):22-25.
- [3] Gundy A, Radenkovic M. Promoting congestion control in opportunistic networks [C]//Proc of the IEEE informcom,

- Brazil 2009: 837-845.
- [4] Radenkovic M ,Grundy A. Congestion aware forwarding in delay tolerant and social opportunities networks [C]// Proc of the WONS 2011 ,Bardonecchia 2011: 60-70.
- [5] 赵广松 ,陈鸣. 基于接收阈值的容延网络拥塞控制机制 [J]. 软件学报 2013 ,12( 1) : 53-163.
- [6] 方晨 ,刘昊 ,时龙兴. 一种基于自适应竞争窗口的无线传感器网络拥塞缓解策略 [J]. 东南大学学报 ,2013 , 43( 3) : 686-690.
- [7] 方世林 ,王岳斌 ,胡虚怀 ,等. 用于分层移动 IPv6 网络拥塞控制的新机制 [J]. 计算机应用研究 ,2013 ,30( 11) : 3448-3449.
- [8] 张春琴 ,谢立春. 一种基于元胞遗传的网络拥塞控制方法 [J]. 四川大学学报: 自然科学版 ,2013 ,50( 6) : 1241-1246.
- [9] 罗成 ,谢维信. 传感器网络拥塞避免与控制的模糊 AQM 算法 [J]. 电子学报 2014 ,4( 4) : 679-684.
- [10] 王文涛 ,王豪 ,朱容波 ,等. 一种基于通信量趋势预测的 Ad-hoc 网络拥塞控制策略 [J]. 2014 ,41( 8) : 148-153.
- [11] Holot C V ,Misra V ,Towsley D ,et al. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows [J]. IEEE Transactions on Automatic Control ,2002 ,47( 6) : 945-959.
- [12] 胡源 ,牛玉刚 ,贾廷纲. 一种自适应 PI—模糊切换策略的无线网络拥塞控制机制 [J]. 系统仿真学报 2014 ,3( 26) : 596-599.

## The Network Congestion Control Based on Quantum Particle Swarm Algorithm and Improved PI Active Queue Management Model

LI Jingfu ZHANG Fei

( 1. International College ,Huanguai University ,Zhumadian Henan 463000 ,China;

2. School of Information Engineering ,Huanguai University ,Zhumadian Henan 463000 ,China)

**Abstract:** Aiming at the wireless sensor network having the defect of low throughput and high packet drop rate ,a congestion control method based on PI reactive management model and quantum particle swarm algorithm was proposed. Firstly ,the improved PI reactive management model was defined and equations for the packet drop rate and queue length were given ,then in order to optimize the PI model ,the quantum particle swarm algorithm was used to obtain the PI parameters ,the algorithm is proposed to specify the process of optimizing the parameters ,so the optimized model is proposed. Finally ,the specific algorithm based on PI reactive management model and quantum particle swarm algorithm used for congestion control was defined. The simulation experiment shows the method in this paper can realize the WSN congestion control ,and compared with the other methods ,it has lower data packet dropping rate and larger throughput rate.

**Key words:** wireless sensor network; congestion control; active queue management; quantum particle swarm

( 责任编辑: 冉小晓)