

# 基于无线传感器网络的节能型水产养殖自动监控系统

蒋建明<sup>1,2</sup>, 史国栋<sup>1,2\*</sup>, 李正明<sup>1</sup>, 史兵<sup>1,2</sup>, 宦娟<sup>1,2</sup>

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 常州大学信息科学与工程学院, 常州 213064)

**摘要:** 水产养殖的规模化发展和人力成本的不断上升迫切需要建立水质参数的无人值守自动监控系统。该文提出了一种基于改进型低能耗分层分群协议 (LEACH) 的 Zigbee 无线传感网络的水质监测和基于西门子 PLC 的变频增氧控制系统。在 LEACH-C 通信协议中, 由基站根据各节点剩余能量的估算值选定簇首, 达到各节点供电电池剩余能量的均衡, 同时从系统的实际控制精度出发, 当节点测量到的溶解氧浓度值与上次发送值误差在 0.02 mg/L 范围内时, 不向簇首发送数据, 达到节约供电电池能量的目的, 经试验发现采用优化后的 LEACH-C 协议, 比采用常规的 LEACH 协议网络有效寿命延长 33.33%。适合鲈鱼生长的水体溶解氧质量浓度大于 4.5 mg/L, 但随着浓度的上升增氧效率将逐步降低, 因此设定应急增氧的区间为 4.5~5.5 mg/L。控制系统根据无线传感网络测量的溶解氧质量浓度值, 采用 PI-PID 控制水体溶解氧浓度。保证了水体溶解氧质量浓度始终适合鱼类生长。通过试验验证, 与人工粗略控制相比, 这种控制方法大幅降低了人力成本和节约了 51% 的电能。该文可为水产养殖自动控制研究提供参考。

**关键词:** 水产养殖, 无线传感网络, 变频, 节能, 自动控制

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.13.022

中图分类号: S210; S969

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-13-0166-09

蒋建明, 史国栋, 李正明, 等. 基于无线传感器网络的节能型水产养殖自动监控系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 166-174.

Jiang Jianming, Shi Guodong, Li Zhengming, et al. Energy-efficient automatic monitoring system of aquaculture based on WSN[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 166-174. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

水产品需求的增加使传统的养殖方式从单位产量、成本和资源利用率等方面都不能满足社会需求, 高密度和工业化养殖已成为当前的发展趋势。溶解氧是制约水产养殖的重要因子, 当前许多规模化水产养殖普遍采用了机械增氧设备, 但大部分仍然采用手动控制, 不仅浪费了大量的人力资源, 而且抗风险能力差, 稍有不慎会引起鱼类因窒息大面积死亡。建立高效的无人值守的水质参数测量和溶解氧的自动控制系统显得尤为重要。许多学者提出了多种控制方式, 黄建清等研究了采用 MSP430F149 单片机构建对溶解氧、pH 值和温度参数的无线传感网络监测系统<sup>[1]</sup>。朱明瑞等研究了工厂化水产养殖溶解氧自动监测系统<sup>[2]</sup>。史兵等研究

了基于无线传感网络的参数智能监测系统<sup>[3]</sup>。庞云芝等研究了水-空气引射式冰下深水增氧机<sup>[4]</sup>。周建来等对双侧吸气射流增氧机内吸气作用进行了分析<sup>[5]</sup>。丁翔文等研究了应用耕水机养殖南美白对虾试验<sup>[6]</sup>。马从国等提出了基于现场总线的水产养殖过程智能监控系统<sup>[7-10]</sup>。本文提出了基于无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 的参数测量和节能型变频增氧控制。

## 1 系统结构

工业化水产养殖区一般地处偏僻、水域面积大, 架设悬挂通信电缆的钢绞线不仅成本大、施工困难, 而且影响到日常的捕捞。无线传感网络中的 Zigbee 通信具有低能耗、低成本、低速度传输和低复杂度的特点, 适合水产养殖参数的监测。如图 1 所示, Zigbee 节点包含普通节点、簇首和 BS 节点。普通节点采集养殖池的溶解氧、pH 值、水温等参数后把参数发送给簇首节点, 簇首节点汇总和融合各节点数据再发送给基站 (BS) 节点, BS 节点设置在靠近 PLC 的岸边, 利用 RS-485 通信把测量数据传送给 PLC (S7-300 或 S7-200)。养殖池 1 选用西门子 S7-300 中型 PLC 变频控制增氧电机, 其他

收稿日期: 2013-04-08 修订日期: 2013-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60971090) 和江苏省科技厅前瞻性研究资助项目 (2011Z0102)

作者简介: 蒋建明(1970—), 博士生, 常州大学, 主要从事计算机测量与远程监控方面研究。镇江 江苏大学电气信息工程学院, 212013。

Email: jjm-224@163.com

\*通信作者: 史国栋(1956—), 教授, 博士生导师, 主要从事机械及电气化方面研究。镇江 江苏大学电气信息工程学院, 212013。

Email: jsjby@em.jpu.edu.cn

几个养殖池采用 S7-200 小型 PLC 控制。S7-300 同时作为服务器，通过以太网把各养殖池测量参数传

送给控制管理中心的数据库服务器存储。

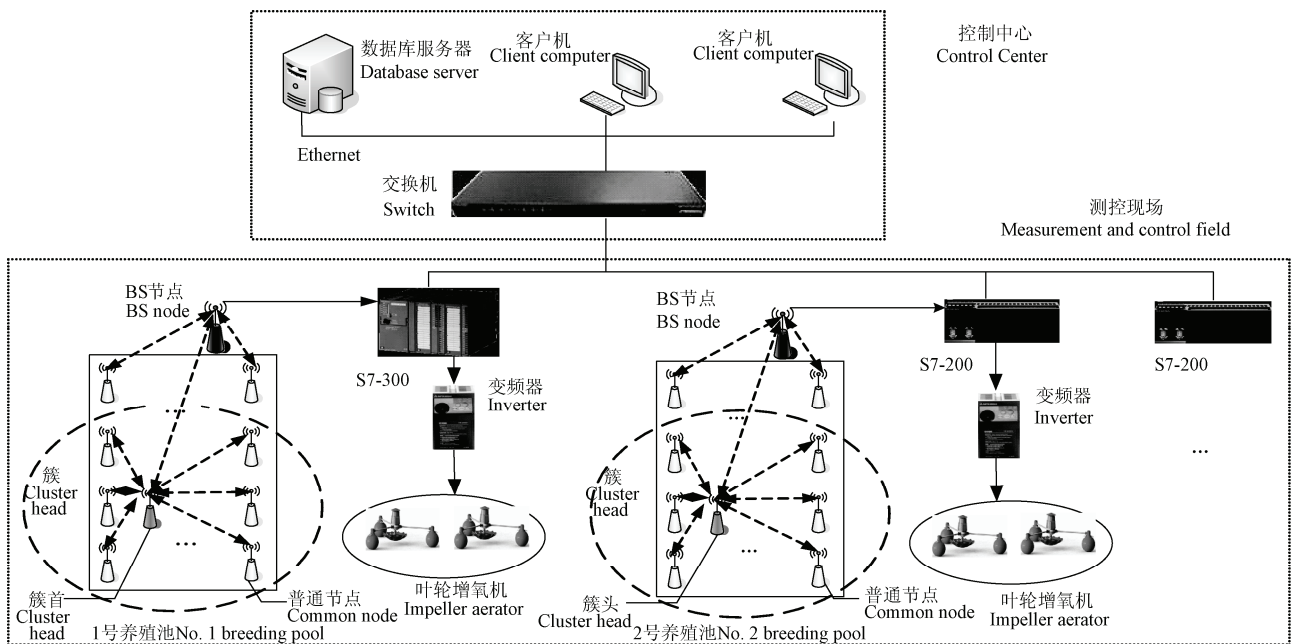


图 1 系统结构图

Fig.1 Architecture of system

## 2 基于优化 LEACH-C 协议的节能型水质参数测量

### 2.1 LEACH-C 协议

Zigbee 通信节点受地理条件的限制一般采用电池供电，单个更换供电电池非常浪费人力资源。因此节点的能量效率是一个重要指标，直接影响 WSN 的寿命。无线微型传感器网络的低能量自适应分群分层协议 (low energy adaptive clustering hierarchy, LEACH) 包含一个能够自组织大量节点的分布式分群技术，实现所有节点间能量均匀分布和群首位置循环算法，相对于通用的多跳路由协议，LEACH 协议能够将系统寿命提高 15% 左右。在图 1 所示的采用 LEACH 协议的无线传感网络中，靠近 BS 节点的普通节点采集数据直接发送给 BS。BS 节点由于架设在岸边采用固定电源供电。簇首节点从普通节点选出，采用锂电池供电。簇首节点既要接收各节点发送的数据和进行数据处理，还要发送数据给 BS，能耗远远大于普通节点，经常被选作簇首的节点会因能量耗尽而过早失效，如果 WSN 网络中失效节点达到一定个数，则该网络将瘫痪。LEACH 协议提出了周期性选取节点充当簇首，使能耗相对均衡分配到各节点，延长了网络的有效寿命<sup>[11-14]</sup>。

LEACH 协议周期性选择节点作为簇首，从理论上解决了网络的能耗均衡问题，但各节点作为簇

首期间消耗的能量不一样，而且供电电池的初始能量也不一样，因此部分节点仍然会过早失效。为此提出了在 LEACH 协议中 BS 节点根据节点剩余能量的多少选取簇首 (low energy adaptive clustering hierarchy-centralized, LEACH-C)。当在  $N$  个节点中选取  $m$  个簇首时，每个节点被选作簇首的概率为：

$$P_{i(t)} = \frac{m \times E_{i(t)}}{E_{1(t)} + E_{2(t)} + \dots + E_{N(t)}} \quad (1)$$

式中， $E_{i(t)}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的剩余能量， $J$ 。节点电池剩余能量越多，则被选作簇首的概率越高，反之则越低<sup>[15-18]</sup>。

### 2.2 LEACH-C 协议的优化

#### 2.2.1 LEACH-C 协议的实现

WSN 通信节点 CPU 采用 Chipcon 公司的 CC2430 芯片，它不仅可以在 P0 端口引脚上的输入电压，还可以在非数据发送和接受状态下 (数据发送和接受状态下由于功耗大会引起供电电池电压的降低) 采样  $AV_{DD\_soc}$  引脚上电压的 1/3 用于实现供电电池能量监测，经 AD 转换器转换后查询程序中内置对应表，自动得到剩余电量对应值。供电电池电压和剩余能量并不是简单的线型关系，其计算公式非常复杂，而节点 CPU 不可能去完成复杂计算，因此检测到供电电池电压后查表得到对应值，然后发送给簇首，再由簇首发送给基站。在江苏省镇江市横塘千亩鱼虾养殖基地的鲈鱼养殖区选择  $100 \text{ m} \times$

200 m 的养殖池，每个养殖池如图 2a 所示分布 20 个节点，除了 BS 节点附近 4 个节点外，其余 16 个节点组成一个簇，由 BS 节点根据各节点剩余能量的多少按公式 (1) 选出簇首并通知该节点，该节点采用 CSMA MAC 协议向各节点广播一条公告信息，该信息包含簇首节点的 ID，其他非簇首节点根据接收到信息的信号强度调整自己信号的发送功率，使发送信号刚好被簇首节点接收。这样各节点剩余能量达到相对均衡<sup>[19]</sup>。

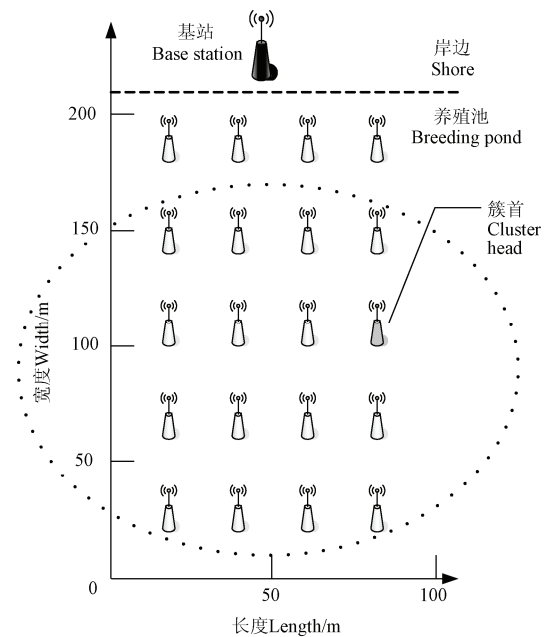
### 2.2.2 优化 LEACH-C 协议的实现

在 WSN 通信中，存在  $E_{发送} > E_{接收} >> E_{数据处理} >> E_{休眠}$  的关系，减少数据的发送和接收时间，增加节点的休眠时间可以节省电池能量。水产养殖池中参数的变化相对比较缓慢，而且对主要参数溶解氧的测量和控制并不一定要求非常精确，只要把溶解氧浓度控制在一定范围即可。如图 2b 所示，在采用 LEACH-C 协议的基础上，节点在参数测量时间间隔（本系统设定为 20 s）到后，从休眠状态唤醒，采集数据并判断是否第一次发送（第一次测量直接向簇首发送）和发送数据计时时间间隔是否到，发送数据计时时间间隔是为了防止簇首节点长期接收不到某个节点的测量值，BS 节点给各节点规定一个 200 s 时间，如果某个节点在规定时间内一直没有发送数据，不管该节点的测量数据与上次发送值是否接近，强行向簇首发送一次。如果是则发送数据并返回休眠状态，如果不是则继续判断溶解氧测量值是否大于硬阈值（3 mg/L，确认测量参数的有效性），小于等于则返回休眠状态，大于则继续判断与上次发送值之差是否大于软阈值（0.02 mg/L，测量的允许误差范围），小于等于则默认与上次测量值一致，不发送返回休眠状态；大于则发送数据。这样既节省了节点发送数据的能量，又节省了簇首接收数据的能量。

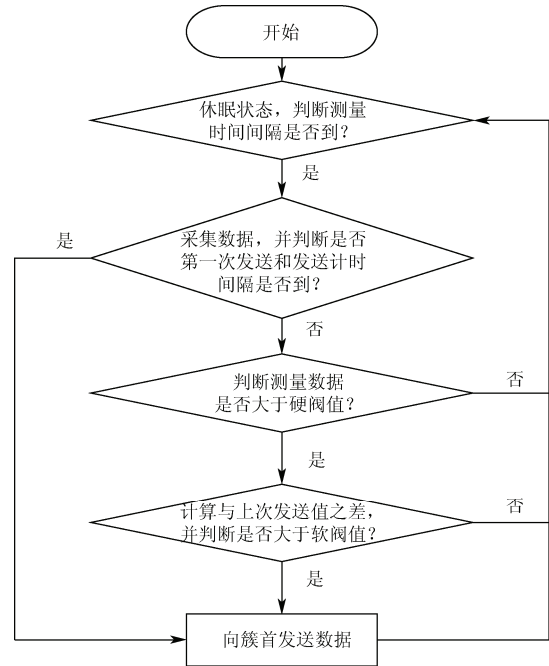
### 3 水体溶解氧的全自动变频控制

叶轮式增氧机(选用金湖机电有限公司的 1.5 kW 的 YL-1.5 叶轮增氧机)自上世纪七十年代在中国使用以来，大幅提高了单位产量。当前叶轮增氧机以价格低廉、安装方便、效率相对较高等特点在中国得到了广泛应用。但大多数养殖户依据经验人工操作，具有很大的盲目性和风险性，而且工作一般都是全频（50 Hz）工作。启动时冲击电流对增氧电机的危害和突然高速旋转对鱼虾的惊扰都很大。谷坚等研究表明叶轮增氧机在常温常压下，增氧试验在水体溶解氧 5 mg/L 以下时效率最高，成线性增长，5~7 mg/L 增长稍微趋缓，7 mg/L 以上增氧效率越来越低<sup>[15-18]</sup>。适合鲈鱼养殖水体的溶解氧质量浓度在 4.5 mg/L 以上，为此设定水体溶解氧浓度低

于 4.5 mg/L 时变频软启动增氧，控制目标为 5.0 mg/L，高于 5.5 mg/L 时则停止增氧。增氧机械在人工经验控制下无法确保高效增氧（可能溶解氧质量浓度大于 7 mg/L 还继续增氧）和及时增氧（在阴雨天或夜晚低溶解氧浓度时不一定能及时开机）。而且对大规模工业化养殖户更加难以有效控制，为此提出了在完成基于 WSN 水质参数测量的前提下，通过串行接口把溶解氧浓度数据传送给 PLC，PLC 通过变频器控制增氧机自动增氧<sup>[20-22]</sup>。



a. 节点分布图  
a. Distribution of nodes



b. 数据发送图  
b. Data transmission diagram

图 2 节点分布及数据发送

Fig.2 Distribution of nodes and data transmission

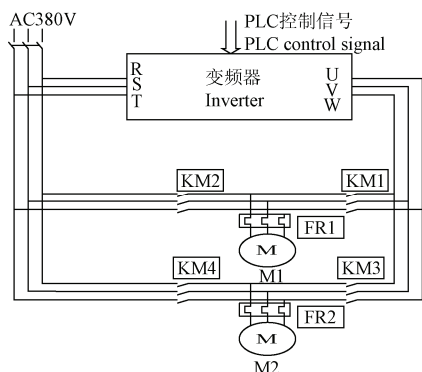


### 3.1 材 料

选择 4 个 100 m×200 m 的鲈鱼养殖池作为试验池。每个养殖池投放主养的 10 000 尾鲈鱼苗和辅养少量鲫鱼及白鲢。鲈鱼很少寻食水底饲料，鲫鱼和白鲢可以寻食剩饵，不仅减轻了污染，还增加了收益。每个养殖池采用 2 台 1.5 kW 叶轮增氧机(YL-1.5)增氧，变频器选用三菱 FR-S540E-1.5K-CHT 型，控制系统如图 1 所示，溶解氧浓度的测量采用如 2.2.2 所述优化 LEACH-C 协议的 Zigbee 传感网络，BS 节点把测量结果通过 RS-485 通信传送给 PLC,养殖池 CPU 选用西门子 PLC 控制。另外选取 2 个养殖池作为比较池，鱼苗投放及增氧机械和试验池一样，增氧机采用手动控制<sup>[23-26]</sup>。

### 3.2 控制方法

电气硬件接线如图 3 所示，图中 KM1、KM2、KM3 和 KM4 为 PLC 控制接触器，FR1、FR2 为热保护继电器，工作时保护增氧电机。控制流程如图 4 所示，当测量的溶解氧质量浓度 (Yr) 低于 4.5 mg/L 时，接触器 KM1 闭合，1 号增氧电机 (M1) 变频启动；当变频器输出频率达到 50 Hz,经过 3 min 延时测量，检测到的溶解氧质量浓度仍然低于 4.5 mg/L 时，KM1 断开，KM2 闭合；M1 切换为全频工作，同时变频器输出频率迅速降为 10 Hz (起动频率)，KM3 吸合，M2 增氧电机投入变频运行；工作稳定后如果 M2 工作频率为 10 Hz，且经过延时检测溶解氧质量浓度始终大于 5.5 mg/L 时，KM2 断开，M1 停止工作，M2 继续变频工作，工作一段时间后如果 M2 工作频率又降为 10 Hz，且经过延时检测溶解氧质量浓度始终大于 5.5 mg/L 时，KM3 断开，M2 停止工作。在自然条件好，如天气晴朗，水生植物光合作用产生大量氧气；风速大，气压高使空气中的氧气更多融入水体的情况下，水体溶解氧浓度已适合鱼类生长，则增氧设备停止工作。当



注：KM1、KM2、KM3、KM4 为接触器，M1、M2 为增氧电机  
Note: KM1, KM2, KM3, KM4 are contactors, M1, M2 are oxygen motors.

图 3 现场硬件控制接线图  
Fig.3 Control wiring diagram of field hardware

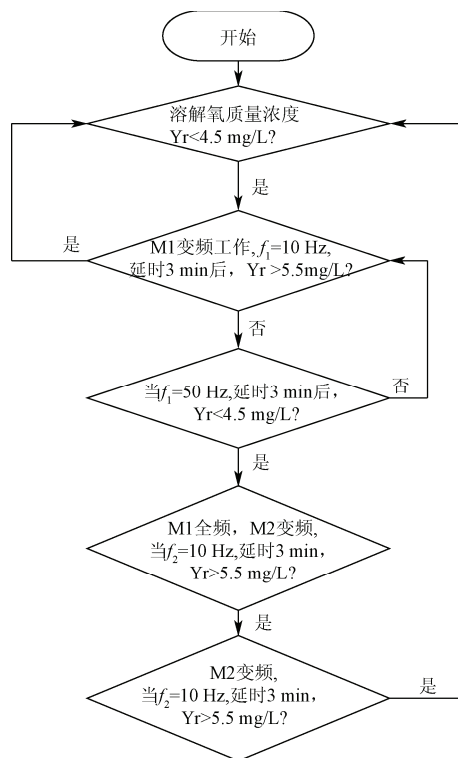


图 4 增氧电机工作流程图  
Fig.4 Work flow chart of aerator motor

前控制领域 70%以上采用 PID 控制，PLC 直接调用内置 PID 控制模块，为保证电机工作的稳定性和平滑性，增氧电机采用 PI-PID 变频控制<sup>[27-28]</sup>。

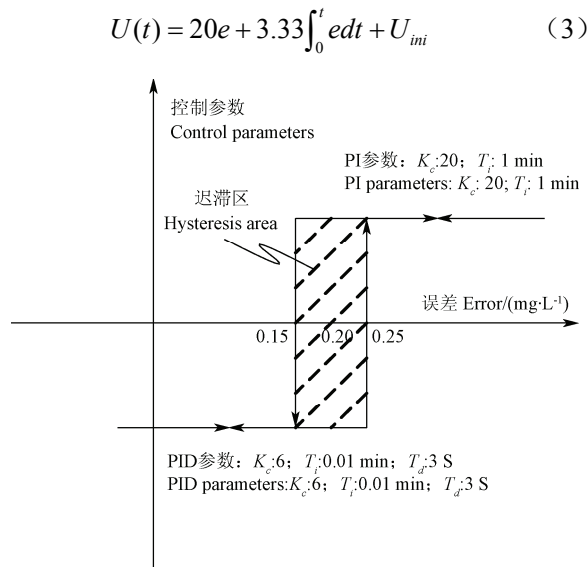
### 3.3 PI-PID 变频控制

在 PI-PID 控制过程中通过 PLC 的模拟量输出值的大小控制变频器的转速。其输出为：

$$U(t) = K_c \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + U_{ini} \quad (2)$$

式中， $U(t)$ 为 PLC 模拟量输出值， $U_{ini}$ 为  $U(t)$ 初值， $e$ 为误差绝对值，即实际测量值与设定值 (5 mg/L) 之差的绝对值。PID 控制指令中有 3 个主要参数：比例增益  $K_c$ ，是一个比例常数；积分时间  $T_i$ , min；微分时间  $T_d$ , min； $t$ 为时间，s。

控制过程为：当误差  $e$  较大时采用一组能迅速减小误差的 PI 控制参数；当误差  $e$  较小时为保持控制系统稳定采用另一组 PID 控制参数。系统中误差大小的判定以 0.2 mg/L 为参考，但考虑到误差变化的连续性，如果误差大小的判别界限仅以 0.2 mg/L 为界，控制参数会频繁切换，容易引起控制系统的混乱，因此在控制过程中设定迟滞控制区，如图 5 所示，当误差较大时采用能迅速减小误差的 PI 参数 ( $K_c:20$ ;  $T_i:1$  min)。代入公式 (1) 得到模拟量输出：



注:  $K_c$  为比例增益常数;  $T_i$  为积分时间;  $T_d$  为微分时间;  $e$  为溶解氧控制误差。

Note:  $K_c$  is the proportional gain constant;  $T_i$  is the integration time;  $T_d$  is the derivative time;  $e$  is the dissolved oxygen control error.

图5 PI-PID 控制示意图

Fig.5 Control schematic diagram of PI-PID

误差由大到小进入迟滞区后, 只有当误差小于 0.15 mg/L 时系统才采用另一组有利于保持系统稳定的 PID 参数 ( $K_c: 6; T_i: 0.01 \text{ min}; T_d: 0.05 \text{ min}$ ), 模拟量输出即为:

$$U(t) = 6e + 10 \int_0^t edt + 18de/dt + U_{ini} \quad (4)$$

而当误差由小增大到 0.15 mg/L 时, 控制参数仍然不变, 一直当误差增大到 0.25 mg/L 时, 控制参数才变为利于迅速减小误差的 PI 参数。

比例增益  $K_c$ : 在误差出现时, 比例控制能立即给出控制信号, 使被控制量朝着误差减小的方向变化。如果  $K_c$  太小, 虽然没有超调量, 系统输出量变化缓慢, 调节时间过长。增大  $K_c$  可以使系统反映灵敏, 上升速度加快, 而且可以减小稳态误差。因此在养殖池溶解氧设定值为 5.0 mg/L 的情况下, 当溶解氧质量浓度误差由大减小到 0.15 mg/L 前和由小增加到 0.25 mg/L 后, 比例增益  $K_c$  设定比较大 (设定值为 20) 以利于迅速减小误差。但是  $K_c$  过大会使超调量增大, 振荡次数增加, 调节时间加长, 导致动态性能变坏, 甚至不稳定。因此当溶解氧质量浓度误差由大减小到 0.15 mg/L 后和由小增加到 0.25 mg/L 前,  $K_c$  设定较小 (设定值为 6)。

积分时间  $T_i$ : 积分作用太强 ( $T_i$  太小) 使系统的稳定性变差, 超调量增大; 太弱 ( $T_i$  太大) 使系统消除稳态误差的速度减慢, 因此当溶解氧质量浓度误差较大时误差积分项小一点 ( $T_i$  大一些, 取为 1 min); 当溶解氧质量浓度误差较小时, 由于溶解

氧控制不需要很高精度, 积分项取适中 ( $T_i$  取为 0.01 min)。

微分时间  $T_d$ : 微分部分作用是阻碍被控量的变化。适当的微分作用可以使超调量减小, 缩短调节时间, 增加系统的稳定性。尤其对溶解氧这样具有较大滞后性的被控对象, PI 控制器难以达到理想的控制效果, 需要加入微分控制。在本次系统中当溶解氧质量浓度误差较大时  $T_d$  取为 0; 当溶解氧质量浓度误差较小时 ( $T_d$  取 0.05 min) 取适中值以缩小超调和调节时间<sup>[29-32]</sup>。

水产养殖中水体溶解氧浓度控制要求能迅速缩小大误差, 在小误差范围内控制稳定, 精度要求不是很高。常用的带死区 PID 控制忽略了中心区域附近误差的变化达到减小控制中心附近振荡的目的, 积分分离 PID 控制主要对积分相在误差大的情况下去除, 在目标控制中心加强积分相达到控制高精度的目的。与这 2 种 PID 控制方式相比, 本文采用的迟滞式 PI-PID 控制在误差大时采用 PI 控制迅速减小误差, 在误差小时同时改变比例和积分参数, 增加微分相达到控制稳定, 不过分追求高精度的目的, 非常适合溶解氧控制。

## 4 结果与分析

### 4.1 LEACH 协议及优化 LEACH 协议比较

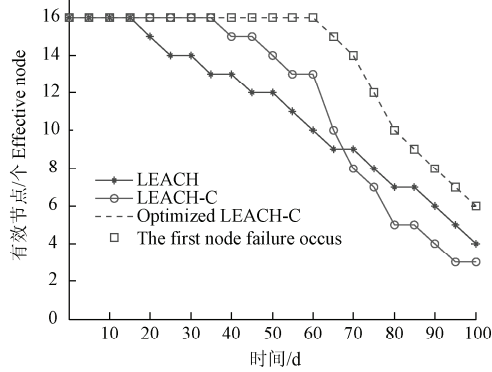
选择 3 个 100 m×200 m 的养殖池, 节点布置如图 2a 所示, 供电电池选用工作电压 3.2 V 的 IFR26650 锂电池。养殖池 1-3 无线通信分别采用 LEACH、LEACH-C 和优化 LEACH-C 协议, 经统计得到图 6 所示测量结果。如图 6a 所示, 采用优化的 LEACH-C 协议的养殖池 3 出现第一个失效节点的时间为第 60 天, 比采用 LEACH 协议养殖池 1 的 15 d 延长了 300%, 比采用 LEACH-C 协议养殖池 2 的 40 d 延长了 50%。主要原因是优化后的 LEACH-C 协议既节约了能量, 又保证了剩余能量的均衡。假设簇内有效节点个数低于 10 时 WSN 失效, 则养殖池 3 有效寿命为 80 d, 比养殖池 1 的 60 d 延长了 33.33%, 比养殖池 2 的 65 d 延长了 23%。同时可以发现养殖池 1 出现失效节点个数缓慢增长, 而养殖池 3 不仅有效寿命长, 而且出现失效节点后个数迅速增加, 便于批次更换供电电池。

### 4.2 自动控制与手动控制比较

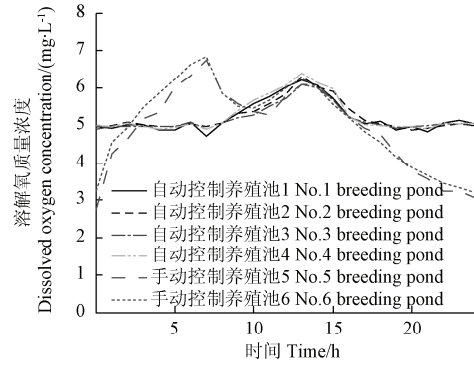
如 3.1 所述选择 4 个养殖池自动控制和 2 个手动控制。手动控制方式为: 0:00~4:00 单机工作, 4:00~8:00 双机工作, 阴雨天根据实际情况开机, 工作方式均为全频增氧。自动控制如第 3 节所述。在 2012 年 6 月 20 日分别对自动控制的养殖池 1-4 和手动控制的养殖池 5-6 的水体溶解氧质量浓度进

行 24 h 监测。如图 6b 所示，在养殖池 1-4 中，当自动增氧控制系统工作时，溶解氧能基本维持在 5.0 mg/L 左右。在 10:00~15:00 无需增氧机工作，

外界自然条件即可保持溶解氧质量浓度大于 5.0 mg/L。养殖池 5-6 采用手动控制，溶解氧质量浓度起伏比较大。



a. 剩余有效节点对比  
a. Remaining active nodes contrast



b. 溶解氧浓度变化图  
b. Changes in the concentration of dissolved oxygen

注：LEACH 为低能量自适应分群分层协议；LEACH-C 为集中式低能量自适应分群分层协议；Optimized LEACH-C 为优化的 LEACH-C 协议  
Note: LEACH means low energy adaptive clustering hierarchy; LEACH-C means low energy adaptive clustering hierarchy-centralized; Optimized LEACH-C means optimized low energy adaptive clustering hierarchy-centralized.

图 6 剩余有效节点和溶解氧浓度变化图

Fig.6 Graphs of remaining active node and changes in the concentration of dissolved oxygen

2012 年 12 月收获后统计结果如表 1 所示。由统计结果可知，采用溶解氧自动控制养殖池由于能始终保持适合鱼类生长的溶解氧浓度，单个鱼体平均重量大，单价略高，总产量也大。虽然电气控制设备（各养殖池需要一台 PLC 作为服务器集中向控

制中心服务器传输测量参数，养殖池 1 采用 S7-300 中型 PLC 作为服务器，其他养殖池选用 S7-200 小型 PLC 作为客户机向 S7-300 传送即可。）投入大，但不仅最终效益高于手动控制养殖池，而且这些电气设备可以使用多年，减少了后期的投资成本。

表 1 各养殖池数据统计  
Table 1 Statistics of each breeding pond

养殖池 Pond	饲料 Fodder		耗电量 Power consumption		幼苗 Seedling	机电设备 Electrical Equipment	人力 Labor costs	场地租金、药品等 Venue, rent, Medicines, etc.	总产值 Total output value		利润 Profit
	质量 Quality/kg	价值/元 Value/Yuan	电量 Power/(kW·h)	价值/元 Value/Yuan	价值/元 Value/Yuan	价值/元 Value/Yuan	价值/元 Value/Yuan	价值/元 Value/Yuan	质量 Quality/kg	价值/元 Value/Yuan	价值/元 Value/Yuan
1 (自动增氧 Automatic aeration)	1 763	8 462	1 203	662	13 000	25 000	600	3 750	3 215	83 590	32 116
2 (自动增氧 Automatic aeration)	1 735	8 328	1 169	643	13 000	15 000	600	3 750	3 107	80 782	39 461
3 (自动增氧 Automatic aeration)	1 696	8 141	1 226	674	13 000	15 000	600	3 750	3 312	86 112	44 947
4 (自动增氧 Automatic aeration)	1 737	8 338	1 187	653	13 000	15 000	600	3 750	3 406	88 556	47 215
5 (手动增氧 Manually aeration)	1 726	8 285	2 507	1 379	13 000	5 000	2 500	3 935	2 308	55 392	21 293
6 (手动增氧 Manually aeration)	1 718	8 246	2 615	1 438	13 000	5 000	2 500	3 925	2 065	49 560	15 451

## 5 结 论

本文分别探讨了基于 WSN 水质参数的测量和

溶解氧自动节能控制。在养殖池水质参数有线测量困难的情况下，对 Zigbee 无线测量通信网络进一步优化，与采用常规 LEACH 协议的通信网相比，有

效提升了 30%左右的网络有效寿命。为了适应水产养殖工业化、规模化趋势,对高密度水产养殖中最重要的溶解氧因子进行自动变频控制,通过试验发现,采用自动控制的养殖池产量比采用人工控制的养殖池增加 34%以上,利润增加 50%以上。在上述控制网络中实现投饲机及其他设备的自动控制值得进一步研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] 黄建清, 王卫星, 姜晟, 等. 基于无线传感网络的水产养殖水质监测系统开发与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 183—190.  
Huang Jianqing, Wang Weixing, Jiang Shen, et al. Development and test of aquaculture water quality monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(4): 183—190. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱明瑞, 曹广斌, 蒋树义, 等. 工厂化水产养殖溶解氧自动监控系统的研究[J]. 大连水产学院学报, 2007, 22(3): 226—230.  
Zhu Mingrui, Cao Guangbin, Jiang Shuyi, et al. Automatic monitoring and control system of dissolved oxygen levels in recirculating aquaculture[J]. Journal of dalian fisheries university, 2007, 22(3): 226—230. (in Chinese with English abstract)
- [3] 史兵, 赵德安, 刘星桥, 等. 基于无线传感网络的规模化水产养殖智能监控系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 136—140.  
Shi Bing, Zhao Dean, Liu Xinqiao, et al. Intelligent monitoring system for industrialized aquaculture based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 136—140. (in Chinese with English abstract)
- [4] 庞云芝, 李秀金. 水-空气引射式冰下深水增氧机的设计与性能实验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 112—116.  
Pang Yunzhi, Li Xiujin. Design of water-air spurting aerator used under ice and in deep water and experimental study on its performance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(3): 112—116. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周建来, 邱白晶, 郑铭, 等. 双侧吸气射流增氧机内吸气作用的分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 72—78.  
Zhou Jianlai, Qiu Bajing, Zheng Lin, et al. Analysis on inner aspiration of dual waterlog Aspirating aerator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 72—78. (in Chinese with English abstract)
- [6] 丁翔文, 张树阁, 孙新超, 等. 应用耕水机养殖南美白对虾试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 130—135.  
Ding Xiangwen, Zhang Shuge, Sun Xinchao, et al. Experimental study on applying biofan to cultivate Penaeus vannamei[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 130—135. (in Chinese with English abstract)
- [7] 马从国, 赵德安, 秦云, 等. 基于现场总线技术的水产养殖过程智能监控系统[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 113—115.  
Ma Congguo, Zhao De'an, Qin Yun, et al. Intelligent monitoring and control for aquiculture process based on fieldbus[J]. Transactions of the CSAM, 2007, 38(8): 113—115. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨玮, 吕科, 张栋, 等. 基于 Zigbee 技术的温室无线智能控制终端开发[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 198—202.  
Yang Wei, Lü Ke, Zhang Dong, et al. Development of wireless intelligent control terminal of greenhouse based on Zigbee [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 198—202. (in Chinese with English abstract)
- [9] 宋佳, 彭宇, 彭喜元, 等. 基于簇内数据聚内算法的 WSNs 故障检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2214—2219.  
Song Jia, Peng Yu, Peng Xiyuan, et al. Fault detection technique based on clustering in WSNs[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(10): 2214—2219. (in Chinese with English abstract)
- [10] 成小良, 邓志东. 基于 Zigbee 规范构建大规模无线传感器网络[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 158—164.  
Chen Xiaoliang, Deng Zhidong. Construction of large-scale wireless sensor network using Zigbee specification[J]. Journal on Communications, 2008, 29(11): 158—164. (in Chinese with English abstract)
- [11] 谷坚, 顾海涛, 门涛. 几种机械增氧方式在池塘养殖中的增氧性能比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 148—151.  
Gu Jian, Gu Haitao, Men Tao. Performance comparison for different mechanical aeration methods in pond[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 148—151. (in Chinese with English abstract)
- [12] 刘兴国, 刘兆普, 王鹏祥, 等. 基于水质监测技术的水产养殖安全保障系统及应用[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 186—191.  
Liu Xingguo, Liu Zhaopu, Wang Pengxiang, et al. Aquaculture security guarantee system based on water quality monitoring and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 186—191. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘星桥, 赵德安, 全力, 等. 水产养殖多环境因子控

- 制系统的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 205—208.
- Liu Xingqiao, Zhao Dean, Quan Li, et al. Research on control system of aquaculture with multi-environmental factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(3): 205—208. (in Chinese with English abstract)
- [14] 高峰, 俞立, 张文安, 等. 基于无线传感网络的作物水份状况监测系统研究与设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 107—112.
- Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(2): 107—112. (in Chinese with English abstract)
- [15] 袁凯, 庄保陆, 倪琦, 等. 室内工厂化水产养殖自动投饲系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 169—176.
- Yuan Kai, Zhuang Baolu, Ni Qi, et al. Design and experiments of automatic feeding system for indoor industrialization aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(3): 169—176. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 181—185.
- Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 181—185. (in Chinese with English abstract)
- [17] 顾海涛, 何康宁, 何雅萍. 耕水机的性能及应用效果研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(4): 40—44.
- Gu Haitao, He Kangning, He Yapping. Research on function and application of biofan[J]. Fishery Modernization, 2010, 37(4): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李振安. 三角叶片水车式增氧机的研究与设计[J]. 北京农业工程大学学报, 1992, 12(2): 54—59.
- Li Zhenan. Research and design of triangular paddle wheel aerator[J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1992, 12(2): 54—59. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李震, 王宁, 洪添胜, 等. 农田土壤含水率监测的无线传感器网络系统设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 212—217.
- Li Zhen, Ning Wang, Hong Tiansheng, et al. Design of wireless sensor network system based on in-field soil water content monitoring [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 212—217. (in Chinese with English abstract)
- [20] West R W, Paulson, W L. Jet aeration in activated sludge system[J]. Journal of water pollution control federation, 1969, 41(10): 164—167.
- [21] 何东健, 邹志勇, 周曼. 果园环境参数远程检测 WSN 网关节点设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 182—186.
- He Dongjiaoan, Zou Zhiyong, Zhou Man. Design of WSN gateway nodes for remote detection of orchards environment parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 182—186. (in Chinese with English abstract)
- [22] 谷坚, 门涛, 刘兴国, 等. 基于氧传质的池塘机械增氧节能技术[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 120—125.
- Gu Jian, Men Tao, Liu Xingguo, et al. Energy-saving technology for pond mechanical aeration based on oxygen mass transfer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(11): 120—125. (in Chinese with English abstract)
- [23] 肖德琴, 古志春, 冯健昭, 等. 稻田水分监测无线传感器网络优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 174—179.
- Xiao Deqin, Gu Zhichun, Feng Jianzhao, et al. Design and experiment of wireless sensor networks for paddy field moisture monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 174—179. (in Chinese with English abstract)
- [24] Ropponen A, Linnavuo M. Low-frequency localization and identification system with ZigBee network[J]. International Journal on Smart Sensing And intelligent Systems, 2011, 4(1): 75—93.
- [25] Huanjia Yang, Lili Yang. Hybrid Zigbee RFID sensor network for humanitarian logistics centre management[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 3(4): 938—948.
- [26] 乔晓军, 张馨, 王成, 等. 无线传感器网络在农业中应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(增刊): 232—234.
- Qiao Xiaojun, Zhang Xin, Wang Cheng, et al. Application of the wireless sensor networks in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(Supp.): 232—234. (in Chinese with English abstract)
- [27] 杨玮, 李民赞, 王秀. 农田信息传输方式现状及研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 1—7.
- Yang Wei, Li Minzan, Wang Xiu. Status quo and progress of data transmission and communication technology in field information acquisition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 197—217. (in Chinese with English abstract)
- [28] 崔光照, 靳嵩. 基于无线传感器网络的农业环境监测



- 系统[J]. 通信技术, 2008, 41(12): 287—289.
- Cui Guangzhao, Jin Song. An agricultural environment monitor system based on wireless sensor network[J]. Communications Technology, 2008, 41(12): 287—289. (in Chinese with English abstract)
- [29] 徐志如, 崔继仁. 基于单片机的温室智能测控系统的设[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(5): 46—48.
- Xu Zhiru, Cui Jiren. Design of greenhouse intelligent measuring and controlling system based on single-chip microcomputer[J]. Transducer and Microsystems Technologies, 2006, 25(5): 46—48. (in Chinese with English abstract)
- [30] 余晓波, 宋良图. 农田信息采集系统的软硬件设计[J]. 仪表技术, 2011, 19(1): 19—21,24.
- Yu Xiaobo, Song Liangtu. Software and hardware design of field information collection system[J]. Instrumentation Technology, 2011, 19(1): 19—21,24. (in Chinese with English abstract)
- [31] 邴志刚, 卢胜利, 刘景泰. 面向精准灌溉的传感器网络的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 294—296.
- Bing Zhigang, Lu Shengli, Liu Jingtai. Research on sensor net works for precision irrigation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 294—296. (in Chinese with English abstract)
- [32] 匡秋明, 赵燕东, 白陈祥. 节水灌溉自动控制系统的研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 136—139.
- Kuang Qiuming, Zhao Yandong, Bai Chenxiang. Automatic monitor and control system of water saving irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(6): 136—139. (in Chinese with English abstract)

## Energy-efficient automatic monitoring system of aquaculture based on WSN

Jiang Jianming<sup>1,2</sup>, Shi Guodong<sup>1,2\*</sup>, Li Zhengming<sup>1</sup>, Shi Bing<sup>1,2</sup>, Huan Juan<sup>1,2</sup>

(1. Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213064, China)

**Abstract:** Because of the expanding scale of aquaculture and rising labor costs, it is urgent to establish an automatic monitoring and control system of water quality. The optimized protocol of centralized low-power hierarchical clustering (LEACH-C) for a wireless sensor network communication and frequency control aeration system based on a programmable logic controller (PLC) was adopted. In a LEACH-C communication protocol, cluster heads were selected according to the residual energy of each node by the base station with fixed power supply. The aim of balancing the residual energy of each node was reached. From the actual control accuracy of the system, the changes in dissolved oxygen concentration was less than 0.02 mg/L than the value last time, and the corresponding node sent no data to its cluster head for saving energy. The test proved that the lifetime of a network adopted optimized LEACH-C protocol was 33.33% longer than that of a network adopted conventional LEACH protocol. The concentration of dissolved oxygen in water which was suitable for the perch growth was no less than 4.5 mg/L. As the concentration increased, the aeration efficiency will be gradually reduced. Therefore, the range of emergency oxygen was set from 4.5 to 5.5 mg/L. Based on measured value of dissolved oxygen content from the wireless sensor networks, a PI-PID algorithm was used in controlling the concentration of dissolved oxygen in the water body. When the error was large, the use of a set of PI parameters could quickly narrow the error; while error-hour, using a set of PID parameters could remain stable. In order to ensure the smooth switching of the two sets of parameters, a hysteresis switching area was set. This would ensure the timeliness and efficiency in oxygen supply when the dissolved oxygen concentration in water was less than 4.5 mg/L, or more than 5.5 mg/L. The dissolved oxygen in water was always suitable for the growth of fish. It is verified by experiment that compared with the artificial rough control, labor costs were significantly reduced and nearly half of the electricity was saved by this control method.

**Key word:** aquaculture, wireless sensor networks, frequency converters, energy saving, automatic control

(责任编辑: 秦学敏)