

# 基于遗传算法非线性 PID 的柴油机共轨压力控制

任卫军, 祁琳娜

(长安大学 信息工程学院, 西安 710064)

**摘要:** 高压共轨柴油机共轨压力随不同工况的调节能力及其压力的稳定性, 从根本上影响着柴油机系统的燃油经济性与排放性能; 针对共轨压力的控制, 给出了在起动、过渡、正常、停机以及故障等工况下的轨压控制策略, 设计了带预控制的积分分离非线性 PID 控制器, 采用遗传算法对 PID 参数进行了在线自适应整定, 实现了在不同柴油机工况下对不同轨压变化的优化控制; 台架实验结果表明, 在不同工况下采取的控制策略是适用的, 采用的积分分离技术能减少控制超调, 预控制技术能缩短轨压稳定时间并减少轨压波动, 遗传算法对非线性 PID 控制器参数的在线优化, 平均可在柴油机起动后 6.7 s 内完成, 所设计的非线性 PID 控制器可把轨压控制偏差稳定在 1.4% 以下。

**关键词:** 柴油机; 燃油系统; 轨压控制; 非线性 PID; 遗传算法

## Diesel Common—Rail Pressure Control with Genetic Algorithm Nonlinear PID

Ren Weijun, Qi Linna

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The fuel economy and emissions performances of high pressure common rail diesel engine are influenced severely by the adjustment and stability of rail pressure following real-time operating condition. Different rail pressure control strategies are adopted in different model of start, transition, normal, shutdown and fault conditions. A nonlinear PID with technologies of integrator separateness and pre-control is designed using in normal condition. These Parameters of nonlinear PID are adjusted adaptively by online genetic algorithm. The optimal rail pressure controls under different conditions are realized. Bench test results showed that control strategies under different conditions were suitable; the control overshoot was effectively reduced by using integral separation technology, the rail pressure settling time was shortened and rail pressure fluctuation was lessened by adopting pre-control technology, it took about 6.7 seconds after the engine starting to optimize nonlinear PID parameters by genetic algorithm, the pressure in common rail was kept at an almost constant value which fluctuation range was no more than 1.4% by the recommended genetic algorithm nonlinear PID controller.

**Key words:** diesel engine; fuel injection system; rail pressure control; nonlinear PID; genetic algorithm

## 0 引言

电控高压共轨燃油喷射技术不仅可保证柴油机达到最佳的燃烧比和良好的燃油雾化, 还可实现喷油压力、喷油量、喷油规律以及喷油定时的精确控制与灵活调节, 能有效地减少碳烟与氮氧化合物的排放<sup>[1]</sup>, 在提高柴油机整机性能方面有独特的优势, 是当今和未来柴油机喷油系统的发展方向<sup>[2-3]</sup>。喷油压力随不同工况的调节能力及其压力的稳定性从根本上影响着柴油机系统的燃油经济性和排放性能, 共轨压力的控制是高压共轨燃油喷射系统控制中非常关键的一个环节<sup>[4]</sup>。

目前国内对共轨压力控制的研究, 主要集中在两个方面: (1) 利用建模与仿真软件 Simulink<sup>[5]</sup>或 AMESim<sup>[6]</sup>等, 建立高压共轨燃油系统的数值仿真模型, 对系统升程、压力和流量特性进行模拟<sup>[7-8]</sup>。(2) 研究轨压控制策略与方法, 提出通过调节出油阀流量实现轨压控制的前馈式控制<sup>[9]</sup>和前馈控制加比例

积分反馈控制<sup>[10]</sup>等策略, 控制方法基本都采用线性 PID 及其衍生方法, 分别采用正交试验法<sup>[11]</sup>、模糊自适应<sup>[12]</sup>、神经网络<sup>[13]</sup>等 PID 参数整定方法, 但都存在着压力控制不精确和随发动机工况变化跟随差的问题。本文提出了在起动、过渡、正常、停机以及故障等不同工况下的轨压控制策略, 设计了带预控制的积分分离非线性 PID 控制器, 采用遗传算法对 PID 参数进行了在线自适应整定。实验表明该方法 PID 参数整定速度快, 共轨压力控制的稳定性和精确性均比较好。

## 1 高压共轨燃油喷射系统组成

柴油机电控高压共轨燃油喷射系统典型组成如图 1 所示。

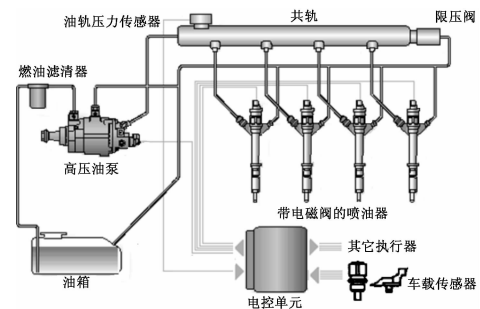


图 1 共轨燃油喷射系统组成示意图

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-01-30。

**基金项目:** 中国博士后科学基金面上资助项目(2013M532003); 江苏省博士集聚计划资助项目(2012097); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2011JC179)。

**作者简介:** 任卫军(1972-), 副教授, 博士, 主要从事内燃机控制策略研究与电控单元开发方向的研究。

电控单元是本系统的核心, 依据当前柴油机工况, 决定当前喷油目标压力。在喷油器不断喷油的情况下, 通过对高压油泵中计量单元的精确控制, 使共轨中的油压达到目标压力。通过油轨压力传感器来判断控制效果, 对控制进行修正, 形成闭环控制。

## 2. 轨压的非线性 PID 控制

### 2.1 轨压的 PID 控制

根据给定喷油目标压力  $pSet(k)$  与轨压传感器采集的轨压值  $pSensor(k)$  的差值构成控制偏差  $e(k) = pSet(k) - pSensor(k)$ , 轨压 PID 控制器为式 (1)。

$$dVol(k) = k_p \cdot e(k) + k_i \cdot \sum_{j=0}^k e(j)T + k_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (1)$$

式中,  $k_p, k_i, k_d$  分别为比例项、积分项和微分项的增益系数;  $T$  为采样周期, 每 10 ms 对轨压进行一次 PID 控制, 因此  $T$  为 10 ms; 喷油目标压力  $pSet(k)$  由当前柴油机工况决定, 输出  $dVol(k)$  为高压泵的当前泵油流量, 参照燃油计量单元物理特性, 计算出控制燃油计量单元的脉宽调制信号 (PWM) 的频率与占空比。

在 PID 控制中引入积分环节主要是为了消除静差, 提高控制精度。但当  $e(k)$  有很大的偏差时, 会造成 PID 运算的积分累积, 致使其控制量超过燃油计量单元可允许的极限控制量, 造成对计量单元损害。为防止出现此种现象, 引入积分分离控制思想。当  $dVol(k)$  超出一定范围时, 取消积分控制  $\beta = 0$ , 以免由于积分作用使系统稳定性降低, 超调量增大; 否则引入积分控制  $\beta = 1$ , 以便消除静差, 提高控制精度。

当电控单元控制喷油器喷油后, 会使共轨内油量减少, 轨压降低, 引起轨压波动。为了减少轨压波动和缩短 PID 控制引起的延迟, 引入轨压预控制技术。依据共轨内油量平衡原则, 参照当前喷射量 (包括预喷、主喷和后喷), 喷油器和高压阀的油量泄漏等因素, 预先估计一个需要补充的油量  $qSup(k)$ 。带预控制的积分分离 PID 控制器为式 (2)。

$$dVol(k) = k_p \cdot e(k) + \beta * k_i \cdot \sum_{j=0}^k e(j)T + k_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T} + qSup(k) \quad (2)$$

### 2.2 PID 参数的非线性化

传统 PID 控制的 3 个增益参数整定困难, 且参数固定, 自适应较差, 通常要在控制精度和动态特性之间进行权衡。将其 3 个增益参数定义为偏差  $e(k)$  的非线性函数, 使得 3 个增益参数按理想的方式变化, 使被控对象输出良好效果<sup>[14]</sup>。

非线性 PID 控制器中比例项增益系数  $k_p$  的非线性函数如式 (3) 所示。

$$k_p(e(k)) = a_p + b_p \cdot [1 - \text{sech}(c_p \cdot e(k))] \quad (3)$$

式 (3) 中,  $\text{sech}(x) = \frac{2}{e^x + e^{-x}}$ , 为双曲正割函数,  $a_p, b_p, c_p$  为正实常数, 当误差  $e(k) \rightarrow \pm \infty$  时,  $k_p$  取最大值  $a_p + b_p$ ; 当  $e(k) = 0$  时,  $k_p$  取最小值  $a_p$ ;  $b_p$  是  $k_p$  的变化区间, 调整  $c_p$  的大小可调整  $k_p$  变化速率。

积分项增益系数  $k_i$  的非线性函数如式 (4) 所示。

$$k_i(e(k)) = a_i \cdot \text{sech}(c_i \cdot e(k)) \quad (4)$$

式 (4) 中,  $k_i$  的取值范围为  $(0, a_i)$ , 当  $e(k) = 0$  时,  $k_i$  取最大值,  $c_i$  的值决定了  $k_i$  的变化快慢速度。

微分项增益系数  $k_d$  的非线性函数如式 (5) 所示:

$$k_d(e(k)) = a_d + b_d / [1 + c_d \cdot \exp(d_d \cdot e(k))] \quad (5)$$

式 (5) 中,  $a_d, b_d, c_d, d_d$  为正常数,  $a_d$  为  $k_d$  的最小值,  $a_d + b_d$  为  $k_d$  的最大值, 当  $e(k) = 0$  时,  $k_d = a_d + b_d / (1 + c_d)$ , 调整  $d_d$  的大小可调整  $k_d$  的变化速率。

因此, 非线性 PID 控制器如式 (6) 所示:

$$dVol(k) = k_p(e(k)) * e(k) + \beta * k_i(e(k)) * \sum_{j=0}^k e(j)T(e(k)) + K_d(e(k)) * \frac{e(k) - e(k-1)}{T} + qSup(k) \quad (6)$$

若非线性函数中的各项参数选择适当的话, 能够使控制系统既响应快, 又无超调现象。同时由于非线性 PID 调节器中的增益参数能够随控制误差变化而变化。因此, 其抗干扰能力和调节精度, 均比常规线性 PID 控制器要好。

## 3 PID 参数的遗传算法整定

从式 (3)、(4) 和 (5) 可以看出, 非线性 PID 控制器需要确定的参数有 9 个, 单凭人工经验和仿真调试来整定其参数显然比较困难, 不仅盲目而且很难得到最佳参数。对其参数的确定, 因遗传算法具有要求较少的优化目标和先验知识, 以及全局收敛的优点<sup>[14]</sup>, 本文运用遗传算法对非线性 PID 控制器各参数进行全局寻优。基于遗传算法的非线性 PID 控制系统如图 2 所示。其寻优过程为以下 5 步。

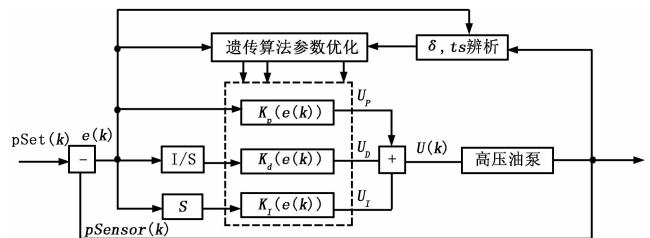


图 2 基于遗传算法的非线性 PID 控制器

(1) 参数的确定与编码: 对非线性 PID 控制器的 9 个参数采用二进制编码方式, 每个参数的编码长度为 8 位, 9 个参数依次串联成一个个体, 个体长度为 72 位。

(2) 选取初始种群: 随机产生初始种群, 针对二进制编码, 先产生 0~1 之间均匀分布的随机数, 然后规定产生的随机数 0~0.5 之间代表 0, 0.5~1 之间代表 1。

(3) 选取适应度函数: 为了获得满意的动态过渡过程, 采用误差绝对值时间积分作为参数来选择最小目标函数, 目标函数的取值越小越好。为了防止控制量太大, 在目标函数中增加控制输入平方项, 同时为了保证系统平稳性和快速性, 在目标函数中考虑超调量  $\delta$  和调整时间  $t_s$ 。因此, 目标函数为式 (7)。

$$J = \sum_{k=0}^N [\omega_1 \cdot |e(k)| + \omega_2 \cdot u(k) \cdot u(k)] + \omega_3 \cdot \delta + \omega_4 \cdot t_s \quad (7)$$

式 (7) 中,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  为加权系数, 依据各性能所占的比重来确定, 依据轨压控制特性, 适应度函数取式  $f = \frac{1}{J}$ 。

(4) 遗传算法的操作: 首先, 利用适应度比例法进行复

制，即通过适配函数求得适配值，进而求得每个串对应的复制概率，复制概率与每代位串的位数乘积作为该串在下一代中应复制的个数，复制概率大的在下一代中将有较多子孙，相反会被淘汰。选择概率计算式为式 (8)，式中  $f_i$  为第  $i$  个体的适应值。

$$p(i) = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (8)$$

其次，进行单点交叉，采用动态自适应交叉率、近亲杂交回避机制及 2/4 竞争生存法相结合的混合杂交方法，将三者的优点结合以保证交叉后个体模式的多样性和进化的有效性。动态自适应交叉率与当代种群的最大适应度  $f_{\max}$ 、平均适应度  $f_{\text{avr}}$  以及参与杂交的两个个体中适应度较大的个体适应度  $f_{\text{big}}$  有关，根据交叉率推荐范围为 0.7~1 的情况，动态交叉率的计算方法如式 (9)，式中  $k_1, k_2$  为  $[0, 1]$  区间的随机数。

$$P_c = 0.7 + 0.3 \cdot k_1 \cdot (f_{\max} - f_{\text{avr}}) / f_{\text{big}} \quad (9)$$

$$(f_{\max} - f_{\text{avr}}) \leq f_{\text{big}}$$

$$P_c = 0.7 + 0.3 \cdot k_2 (f_{\max} - f_{\text{avr}}) > f_{\text{big}}$$

再次，在变异操作前，采取先将交叉后的种群中适应度最大个体直接复制进入下一代的最优个体保护措施。采用自适应变异方法，在进化后期，出现新的最优个体的代数间隔越来越长，当连续代数未产生新的最优个体时，则认为可能陷入局部最优，应给予一个较大的变异率。设连续 NG 代未出现新的最优个体，则变异率的计算公式如式 (10) 所示。 $\alpha, \beta$  是非常小的常数，当 NG 较小时，变异率非常小，变异的作用可以忽略，随着未发生进化的代数增加，变异率迅速增大

$$p_m = \alpha + NG^2 * \beta \quad (10)$$

(5) 遗传算法的终止条件：种群通过复制、交叉及变异得到新一代种群。将该代种群编码代入适配函数，观察是否满足结束条件，若不满足，则重复以上操作直到满足为止。遗传操作的终止按两代种群中最大适应度的相对误差而定。其评判标准为式 (11)：

$$E(J_i^{(k+1)}, J_i^{(k)}) = \frac{\min(J_i^{(k)}) - \min(J_i^{(k+1)})}{\min(J_i^{(k)})} \leq \epsilon \quad (11)$$

式 (11) 中， $E(J_i^{(k+1)}, J_i^{(k)})$  为两次迭代的误差， $\min(J_i^{(k)})$  和  $\min(J_i^{(k+1)})$  分别为第  $k$  次和第  $k+1$  次迭代时最大适应度值的倒数， $\epsilon$  为给定的评判标准。

### 4 轨压控制策略

不同工况下的柴油机，对轨压控制的要求和目标是不同的，应采取不同的控制策略，既可在开环控制下，也可在闭环 PID 控制下。

**起动模式：**柴油机打开点火开关后进入的模式。为实现柴油机快速起动，采用开环控制向共轨中尽可能多地供给高压燃油，促使共轨油压迅速建立。当柴油机转速大于柴油机低压起动阈值，并且轨压波动在一定幅值范围内时，由起动模式迁向过渡模式。

**过渡模式：**此时轨压控制不稳定，故障诊断管理系统不对轨压控制效果进行监控，采用的值是当前采用 PID 控制方式计算的体积流量。当柴油机转速小于柴油机低压起动阈值或轨压波动超出一定幅值范围时，由过渡模式再次迁回到起动模式。在过渡模式下等待一定的曲轴旋转次数后，由过渡模式迁移到正常模式。

**正常模式：**采用非线性 PID 闭环控制，此时轨压控制精度高，稳定性好，故障诊断系统依据轨压控制的效果进行故障监控。

**停机模式：**在任何模式下，收到停机命令后，立即转入此模式。此时轨压迅速减小，高压油泵停止供油，采用开环控制。系统若需要，可保持一个最小轨压。

**故障模式：**当轨压控制单元出现故障时，例如轨压传感器故障等，为保证能“跛行回家”，依据油泵特性，给出一个安全替代值。

### 5 实验验证

为了验证所设计的共轨压力控制策略对共轨压力的控制效果，在 AVL 发动机机架上，针对 DK4A 样机，采用课题组自主研发的 ECU 通过 C 语言编程实现了该控制策略。

(1) 目标轨压标定：为了保证柴油机具有良好的排放性能和动力性能，首先需要标定出在不同柴油机工况下的目标轨压值，如图 3 所示。可以看出，在不同柴油机工况下，燃油的目标喷射压力是不同的，随着喷油量与转速增加，目标轨压值也在增加。

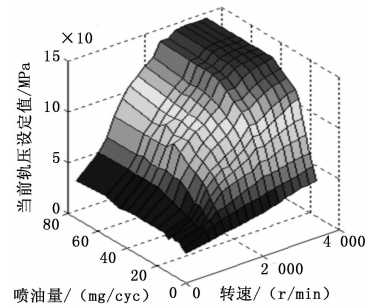


图 3 目标轨压值标定 MAP 图

(2) 轨压控制策略验证：在不同发动机工况下，采用不同的轨压控制策略。通过测试起动到怠速这段过程的轨压变化，来验证轨压控制策略效果。设定怠速为 800 r/min，怠速目标轨压设定为 35 MPa，起动到怠速这段时间轨压变化如图 4 所示。

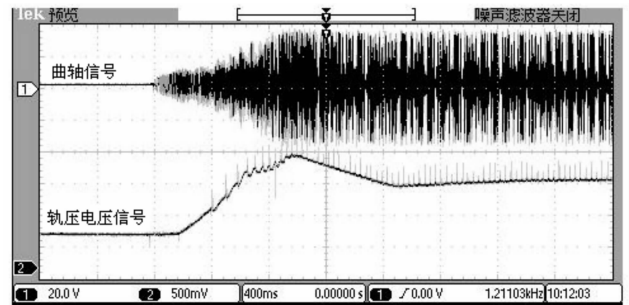


图 4 起动到怠速过程中轨压的变化图

从图 4 可以看出，在起动模式，采用开环控制，快速建立燃油喷射所需压力，发动机快速起动。随后在过渡模式，采用非线性 PID 控制，此过程进行非线性 PID 参数的遗传算法实时优化，参数不是最优，轨压虽能控制，但控制精度不高。到正常模式，非线性 PID 参数逐步得到优化，最终达到最优，轨压控制精度越来越高。经过 60 次起动实验，非线性 PID 参数遗传算法优化平均会在起动后 6.7 s 内完成，柴油机通常要

进行至少 15 s 怠速预热, 才进行功率输出作业, 因此, 满足柴油机实际工作需要。

(3) 非线性 PID 控制效果: 将柴油机转速设定在 2 500 r/min, 目标喷油压力从 104.15 MPa 附近调整至 109.15 MPa, 用标定软件实时采样轨压值, 图 5 显示分别采用遗传算法非线性 PID 控制器和模糊自适应线性 PID 控制器<sup>[12]</sup>对轨压的控制效果。

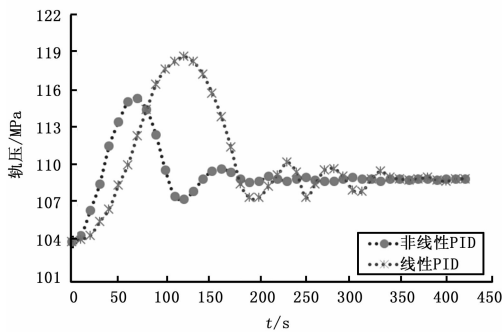


图 5 变轨压下的非线性 PID 控制对比图

从图 5 可以看出, 非线性 PID 控制器的参数随控制误差而实时调整, 最大超调量为 6%, 控制误差小于 2% 的调节时间为 210 ms, 在稳定工况下时, 轨压控制精度可保持在 1.4% 以内。而采用模糊自适应 PID, 最大超调量为 9%, 控制误差小于 2% 的调节时间为 280 ms, 在稳定工况下, 轨压控制精度保持在 1.7%。

## 6 结论

(1) 针对柴油机的不同工况模式, 设计了相适应的共轨压力控制策略, 起动时轨压建立迅速, 起动速度快。

(2) 在柴油机起动后, 进行遗传算法实时非线性 PID 参数的优化, 优化过程平均在 6.7 s 内完成, 优化速度满足柴油机工作实际。

(3) 预控制的积分分离非线性 PID 共轨压力控制器, PID 参数随控制误差自适应调整, 响应速度快, 轨压波动小, 稳定

工况下时, 轨压控制精度可在 1.4% 以内。

## 参考文献:

- [1] 陈海龙, 欧阳光耀, 黄 康. 增压式高压共轨柴油机燃烧排放特性研究 [J]. 内燃机工程, 2012, 33 (6): 39-44.
- [2] 陈 远, 肖 兵. 基于 DSP 的喷油器电磁阀驱动电路设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 1054-1057.
- [3] 周文华, 竺春秋, 苏 瑜. 共轨柴油机电控系统若干关键技术 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2011, 45 (1): 118-121.
- [4] Yoshihiro H, Minaji I, Nakakita Kiyomi. Achieving lower exhaust emissions and better performance in an HSDI diesel engine with multiple injection 2005-01-0928 [C/CD]. SAE Technical Paper. Detroit: Society of Automotive Engineers Inc., 2005.
- [5] 樊 良, 王剑平, 曹 诚, 等. 柴油机高压共轨系统仿真研究 [J]. 内燃机, 2011, (2): 39-41.
- [6] 田丙奇, 马修真, 范立云, 等. 高压共轨喷油系统循环喷油量波动研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34 (5): 610-614.
- [7] 沈苏海, 吴培莉, 赵 辉. 船舶电控柴油机燃油共轨系统的建模与仿真 [J]. 上海海事大学学报, 2013, 34 (1): 36-40.
- [8] 陈海龙, 欧阳光耀, 徐海成. 基于泵控制阀的轨压控制仿真研究 [J]. 内燃机工程, 2009, 30 (2): 57-60.
- [9] 黄国钧, 张幽彤, 苏海峰, 等. 基于流量特性的共轨系统前馈式压力控制策略研究 [J]. 北京理工大学学报, 2011, 31 (3): 272-276.
- [10] 郭修其, 周文华, 郑朝武. 基于自动代码生成的共轨压力控制策略 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2011, 45 (8): 1441-1445.
- [11] 金江善, 平 涛, 凌励逊. 柴油机高压共轨燃油喷射系统共轨压力控制技术的研究 [J]. 柴油机, 2006, 28 (3): 5-7.
- [12] 任卫军, 贺昱曜, 张卫钢. 柴油机共轨压力模糊自适应 PID 控制研究 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (2): 209-212.
- [13] 宋秦中, 隆武强, 杨永平. 高压共轨柴油机共轨压力闭环控制算法的研究 [J]. 内燃机, 2007, (5): 12-14.
- [14] 刘 耀, 蔡锦达. 基于遗传算法的生物芯片反应仪温控箱 PID 控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (9): 2410-2412.

(上接第 1400 页)

## 参考文献:

- [1] 王国臣. 矿井安全综合视频监控系统的的发展 [J]. 煤炭科技, 2006, 25 (8): 65-67.
- [2] 田洪现, 杨 维, 杨公训. 基于 H.264 的煤矿井下无线视频通信 [J]. 矿山机械, 2006, 34 (9): 27-29.
- [3] 刘艳兵, 杨 维, 王曙光, 等. 煤矿井下无线视频监控系统的的设计与实现 [J]. 湖南科技大学学报 (自然科学版), 2009, 24 (4): 16-20.
- [4] 钱华明, 刘英明, 张振旅. 基于 S3C2440 嵌入式无线视频监控系统的的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (6): 1132-1134.
- [5] 孙彦景, 钱建生, 张 徽, 等. 基于工业以太网的 H.264 煤矿视

频监控系统 [J]. 计算机工程, 2006, (8): 212-217.

- [6] 崔 童. 视频编解码系统在嵌入式多核处理器上的设计实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [7] 杨学超, 刘文萍. 视频图像序列中的运动目标检测技术 [J]. 计算机应用与软件, 2008, 25 (1): 215-218.
- [8] 杨 珺, 史忠科. 基于改进单高斯模型法的交通背景提取 [J]. 光子学报, 2009, 38 (5): 1293-1296.
- [9] 陈 超, 杨克俭. 基于改进的单高斯模型的运动目标检测方法 [J]. 微型机与应用, 2010, 29 (4): 39-42.
- [10] 李乃安, 欧阳宁, 等. 实时目标检测与跟踪系统的设计与实现. [J]. 激光红外, 2008, 38 (1): 88-91.