

# 柴油机共轨压力模糊自适应 PID 控制研究

任卫军<sup>1,2</sup>, 贺昱曜<sup>1</sup>, 张卫钢<sup>1</sup>

REN Wei-jun<sup>1,2</sup>, HE Yu-yao<sup>1</sup>, ZHANG Wei-gang<sup>1</sup>

1. 长安大学 信息工程学院, 西安 710064

2. 湖南奔腾动力科技有限公司, 长沙 410205

1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

2. Hunan Peteco Power Technology Co. Ltd., Changsha 410205, China

E-mail: wjren@chd.edu.cn

**REN Wei-jun, HE Yu-yao, ZHANG Wei-gang. Research on rail pressure control of diesel engine based on fuzzy PID. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 209-212.**

**Abstract:** The fuel injection pressure rests with the pressure in the common rail of common rail fuel injection system. The performance of system is influenced severely by the adjustment and stability of rail pressure depending on certain operating condition. A fuzzy PID is designed; the technologies of integrator separateness and pre-control for high pressure governing are added; the control strategy and realizing means are introduced. The optimal rail pressure control under different conditions is realized by online adjustment of PID control parameters. The bench test results show that the common rail pressure should increase with adding of engine speeds and injection quantity; governor parameters of PID should be chosen bigger value in high engine speed; a pre-control for high pressure governing based on the operating point is used to reduce delay time and to keep the governor deviation small; the pressure in common rail is kept at an almost constant value which fluctuation range is no more than 1.7% by the recommended control strategy and means.

**Key words:** IC engine; diesel engine; fuel injection system; pressure control; PID control

**摘要:** 柴油机高压共轨燃油系统中, 共轨压力决定了燃油喷射压力, 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系统性能。针对共轨压力控制, 设计了模糊 PID 控制器, 增加了积分分离与轨压预控制技术, 给出了共轨压力的控制策略和实现方法。通过对 PID 参数的在线自适应整定, 实现了在不同柴油机工况下对不同共轨压力变化的最佳控制。台架实验结果表明, 共轨压力随柴油机转速与单次喷油量的增加应相应提高; 当柴油机转速较高时, PID 控制器应采用较大的控制参数; 轨压预控制可有效地减少轨压波动和缩短轨压稳定时间; 提出的控制策略和实现方法可把轨压控制偏差稳定在 1.7% 以下。

**关键词:** 内燃机; 柴油机; 燃油系统; 压力控制; PID 控制

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.02.062 **文章编号:** 1002-8331(2010)02-0209-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP39; TK422

近年来国际上对环保问题的日益关注促进了清洁柴油机的研究与开发, 在各项先进技术中, 电控高压共轨燃油喷射技术不仅可实现喷油量、喷油定时的精确控制与调节, 还可实现喷油压力和喷油规律的精确调节和灵活控制, 能有效地减少碳烟与颗粒的排放, 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燃油系统的发展方向<sup>[1-2]</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共轨燃油喷射系统的性能, 燃油喷射压力的控制策略与方法是关键技术之一<sup>[3-4]</sup>。

在柴油机电子控制中, 较多地采用了 PID 控制方法<sup>[5-6]</sup>。为了实现燃油喷射压力的有效控制, 在经典 PID 控制的基础上, 设计了模糊 PID 控制器, 增加了积分分离与轨压预控制技术, 给出了燃油喷射压力的控制策略和实现方法。同时通过对 PID 参数的在线自适应整定, 实现了在不同柴油机工况下对不同轨压变化的最佳控制。

## 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。

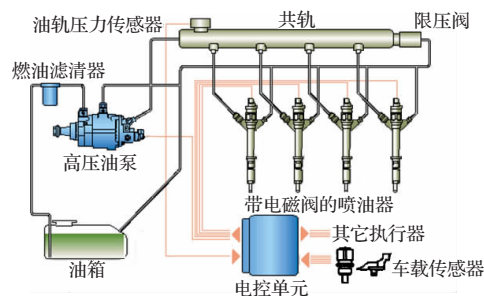


图 1 共轨燃油喷射系统组成示意图

主要部件有: 油箱: 用来存贮燃油; 燃油滤清器: 完成对燃

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2008AA11A116)。

作者简介: 任卫军(1972-), 男, 博士生, 研究方向为内燃机电控单元开发与控制策略研究。

收稿日期: 2009-05-07 修回日期: 2009-06-18

油的过滤与去除水分;共轨:装盛高压燃油;高压油泵:由高压泵、燃油计量单元等组成,通过对燃油计量单元的精确控制,决定高压泵的泵油量,达到控制共轨内压力的目的,从而决定了燃油的喷射压力;油轨压力传感器:实时监测共轨内的油压;限压阀:起保护作用,当油压超过一定限值时自动泄油;喷油器:在电控单元的控制下精准地向柴油机燃烧室内喷油。

电控单元是本系统的核心,通过采集各种车载传感器信号,判断当前柴油机的工况,决定当前喷油目标压力。在喷油器不断喷油的情况下,通过对燃油计量单元的精确控制,决定当前高压泵的泵油量,使共轨中的油压达到目标压力。同时,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 轨压控制方法与策略

### 2.1 轨压的PID控制

系统对共轨压力的控制构成一个闭环控制,符合数字PID控制要求,由电控单元执行控制。根据给定喷油目标压力与轨压传感器采集到的轨压值的差值构成控制偏差:

$$pDvt(k)=pSet(k)-pSensor(k) \quad (1)$$

则数字PID的控制为:

$$dVolSet(k)=k_p \cdot pDvt(k)+k_i \cdot \sum_{j=0}^k pDvt(j) \cdot T+ \\ k_d \cdot \frac{pDvt(k)-pDvt(k-1)}{T} \quad (2)$$

式中, $k_p$ 是比例系数, $k_i$ 为积分系数, $k_d$ 为微分系数, $T$ 为采样周期。

在实际控制中,每10ms对轨压进行一次PID控制,因此 $T$ 为10ms。喷油目标压力 $pSet(k)$ 由当前柴油机工况(柴油机转速 $nAvg$ ,当前喷油量 $qCurr$ )决定,通过查取经标定的脉谱(MAP)得到;输出 $dVolSet(k)$ 为高压泵的当前泵油流量,然后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 $pDvt(k)$ 短时间内有很大的偏差,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能允许的极限控制量,引起系统较大的超调,甚至引起系统振荡,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 $dVolSet(k)$ 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。积分分离控制算法表达式为:

$$dVolSet(k)=k_p \cdot pDvt(k)+\beta \cdot k_i \cdot \sum_{j=0}^k pDvt(j) \cdot T+ \\ k_d \cdot \frac{pDvt(k)-pDvt(k-1)}{T} \quad (3)$$

当电控单元控制喷油器喷油后,会使共轨内油量减少,造成轨压降低,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,先预估一个需要补充的油量 $qSup(k)$ 。带预控制的PID算法表达式为:

$$dVolSet(k)=k_p \cdot pDvt(k)+\beta \cdot k_i \cdot \sum_{j=0}^k pDvt(j) \cdot T+ \\ k_d \cdot \frac{pDvt(k)-pDvt(k-1)}{T}+qSup(k) \quad (4)$$

每一种高压泵,因机械等原因均有一个可允许泵油的最大值和最小值。若控制值太大,会引起泵损坏;若值太小,不会引起泵动作。因此,对PID控制形成的结果,进行限值处理,使其在 $[dVolLowLim, dVolUpLim]$ 范围,范围上下界可针对具体泵标定。

### 2.2 轨压控制策略

处于不同工况下的柴油机,对轨压控制的要求和目标不同,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。依据柴油机不同工况,轨压控制策略迁移状态机如图2所示,状态机用 $Rail\_stCtr$ 表示。

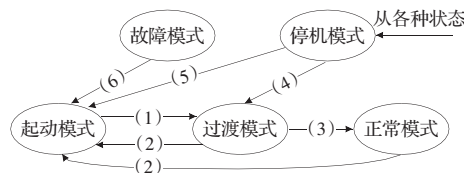


图2 轨压控制策略状态机

**起动模式:**系统初始化后进入的模式。为实现柴油机快速起动,迅速建立并达到喷油器喷射压力至关重要。因此,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。由于高压油泵的泵油效率在柴油机低速和低温下变化很大,为了防止共轨压力过冲,高压油泵的泵油量要按照所配高压油泵的物理特性,依据当前柴油机转速 $nAvg$ 和柴油机温度 $tEng$ 通过实际标定得到。当柴油机的转速大于柴油机低压起动阈值(400 r/min),并且轨压波动在一定幅值范围内(14 MPa)时,即条件(1),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方式计算的体积流量。当条件(2)满足时,即当柴油机的转速小于柴油机低压起动阈值(400 r/min),或轨压波动超出一定幅值范围(14 MPa)时,由过渡模式再迁移至起动模式。在过渡模式下等待一定的曲轴旋转次数后,即条件(3),由过渡模式迁移到正常模式。

**正常模式:**柴油机处于正常工况下,采用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。但当条件(2)满足时,由此模式直接迁移到起动模式。

**停机模式:**在任何模式下,收到停机命令后,立即转入此模式,停机命令有可能由驾驶员发出,也有可能由故障诊断系统发出。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 $dVolOff$ 。若此时柴油机转速大于闭环控制最小转速(500 r/min),即条件(4),迁入过渡模式,当柴油机转速小于闭环控制最小转速时,即条件(5),迁入起动模式。

**故障模式:**当轨压控制单元出现故障时,如轨压传感器故障等,即条件(6)时,为保证能“跛行回家”,依据油泵特性,给出一个安全替代值 $dVolFault$ 。

### 2.3 轨压控制的实现

按照轨压控制策略和式(4)PID控制的原理,轨压控制实现方法如图3所示。

## 3 PID参数的自适应整定

为保证柴油机具有良好的排放性能和动力性能,喷油压力既能随不同工况具有良好的调节能力,又能在某一工况下保证

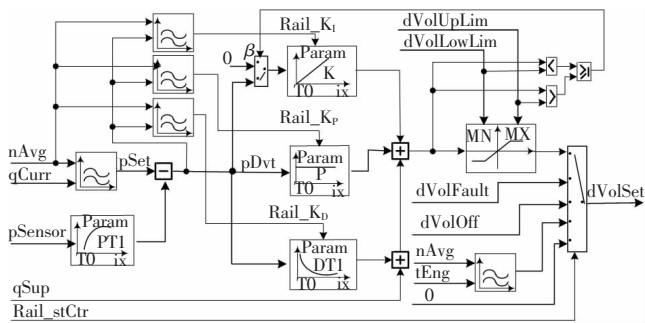


图3 轨压控制实现框图

轨压的稳定性。因此,对于轨压的PID控制实际上是一个实时动态跟踪过程,若采用固定PID参数是不能满足轨压控制要求,要根据不同工况采用变参数PID控制。

随着计算机技术发展,人们利用人工智能的方法将操作人员的工作经验作为知识存入计算机中,计算机根据现场实际情况,能自动调整PID参数,出现了智能PID控制器。但由于操作者经验不易精确描述,控制过程中各种信号量以及评价指标不易定量表示,所以人们运用模糊数学的基本理论和方法,把规则的条件、操作等用模糊表示,并把这些模糊控制规则以及有关信息作为知识存入计算机知识库中,然后计算机根据控制系统的实际响应,运用模糊推理,自动实现对PID参数的最佳调整,出现模糊自适应PID控制。

在不同工况下,对轨压控制影响最大的因素是柴油机转速和由喷油引起的轨压波动,则模糊自适应PID控制的原理如图4所示,基本设计思想是找出 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 与柴油机转速和轨压波动之间的模糊关系,在运行中通过不断检测柴油机转速和轨压波动,依据模糊控制规则,从控制表格中查取数据,对三个参数进行在线动态整定,以满足不同工况下对控制参数的不同要求,使被控轨压具有良好的动、静性能。

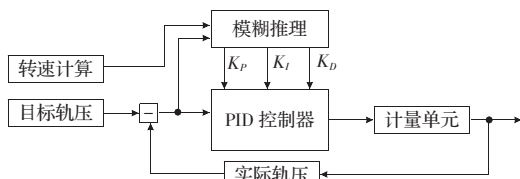


图4 轨压模糊PID控制原理图

### 3.1 输入模糊化

从图4中可以看出,转速的变化和轨压的偏差作为模糊控制器的输入。转速根据实际情况范围在0~7 000 r/min之间,其模糊子集为{LL,L,LM,M,MH,H,HH},分别表示超低速、低速、低中速、中速、中高速、高速、超高速。为控制简单,隶属函数采用分段函数,每隔1 000转为一个分段,如中速就是(3 000~4 000 r/min)。

轨压偏差,主要是目标轨压与实际轨压之间的差值。在工况没发生变化时,主要是由喷油引起的轨压波动,其模糊子集为{NB,NM,NS,O,PS,PM,PB},分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大,隶属函数采用分段函数,大于5 MPa为正大;在5 MPa与2 MPa之间为正中;在2 MPa与1 MPa正小;1 MPa与-1 MPa之间为零;-1 MPa与-2 MPa之间为负小;-2 MPa与-5 MPa之间为负中;-5 MPa以上为负大。

### 3.2 输出模糊化

$K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 三个参数的论域选择是很重要的,如果选择不当,

会造成控制系统振荡。通过对共轨系统的特性分析,采取参数仿真与实际标定的方式最后确定参数的论域:

$K_p$ 的论域为(0,0.005,0.010,0.015,0.020,0.025,0.030,0.035,0.040)

$K_i$ 的论域为(0,0.02,0.04,0.06,0.08,0.10,0.12,0.14,0.16,0.18,0.20)

$K_d$ 的论域为(0,0.002 5,0.005,0.007 5,0.010,0.012 5,0.015,0.017 5,0.020)

### 3.3 控制规则建立

模糊控制设计的核心是总结工程设计人员的技术知识和实际操作经验,建立模糊规则表。通过参数仿真和实际数据标定,得到针对PID三个参数的模糊规则表。

表1 参数 $K_p$ 的规则表

|    | LL    | L     | LM    | M     | MH    | H     | HH    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NB | 0.010 | 0.020 | 0.030 | 0.035 | 0.035 | 0.040 | 0.040 |
| NM | 0.010 | 0.010 | 0.020 | 0.030 | 0.035 | 0.035 | 0.040 |
| NS | 0.005 | 0.005 | 0.015 | 0.030 | 0.030 | 0.035 | 0.035 |
| O  | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.035 |
| PS | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.025 | 0.025 | 0.030 | 0.030 |
| PM | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.020 | 0.020 | 0.020 | 0.030 |
| PB | 0.005 | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.020 | 0.020 |

表2 参数 $K_i$ 的规则表

|    | LL   | L    | LM   | M    | MH   | H    | HH   |
|----|------|------|------|------|------|------|------|
| NB | 0    | 0    | 0    | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| NM | 0    | 0    | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 |
| NS | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.10 | 0.12 | 0.14 | 0.16 |
| O  | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.10 | 0.16 | 0.18 | 0.18 |
| PS | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.14 | 0.14 | 0.16 |
| PM | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.08 |
| PB | 0    | 0    | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |

表3 参数 $K_d$ 的规则表

|    | LL      | L       | LM      | M       | MH      | H       | HH      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| NB | 0.002 5 | 0.002 5 | 0.005 0 | 0.010 0 | 0.012 5 | 0.015 0 | 0.015 0 |
| NM | 0.002 5 | 0.002 5 | 0.005 0 | 0.012 5 | 0.015 0 | 0.015 0 | 0.017 5 |
| NS | 0.002 5 | 0.005 0 | 0.007 5 | 0.015 0 | 0.017 5 | 0.017 5 | 0.017 5 |
| O  | 0.002 5 | 0.005 0 | 0.007 5 | 0.015 0 | 0.017 5 | 0.020 0 | 0.020 0 |
| PS | 0.002 5 | 0.005 0 | 0.010 0 | 0.015 0 | 0.017 5 | 0.020 0 | 0.020 0 |
| PM | 0.005 0 | 0.005 0 | 0.010 0 | 0.017 5 | 0.017 5 | 0.020 0 | 0.020 0 |
| PB | 0.005 0 | 0.007 5 | 0.012 5 | 0.017 5 | 0.020 0 | 0.020 0 | 0.020 0 |

## 4 实验

研究的样机为轿车用某4缸直喷式柴油机,配有BOSCH公司第三代电控高压共轨燃油喷射系统CP3,该系统喷射压力可达160 MPa。其主要技术参数如表4所示。

表4 柴油机主要技术参数

| 型式                                | 直列4缸/16气门/DOHC |
|-----------------------------------|----------------|
| 缸径/mm                             | 75             |
| 行程/mm                             | 88.3           |
| 排量/L                              | 1.560          |
| 压缩比                               | 18:1           |
| 额定功率/(kW/(r·min <sup>-1</sup> ))  | 80/4 000       |
| 最大扭矩/(N·m/(r·min <sup>-1</sup> )) | 240/1 750      |

做台架实验过程中,使用申克公司的电涡流测功机,Kisler

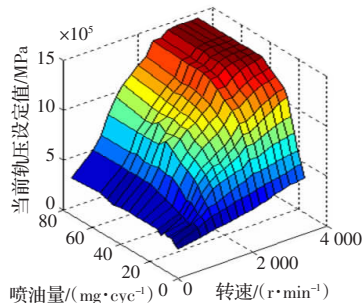


图5 不同工况下的理想目标喷射压力

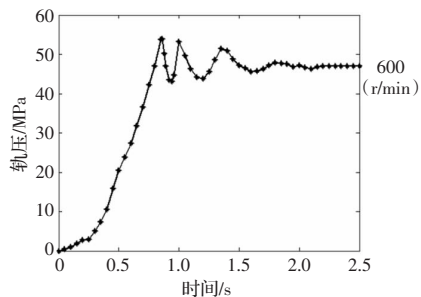


图6 起动过程轨压控制图

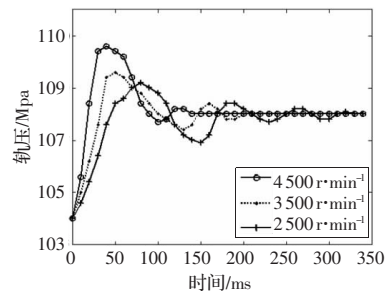


图7 可变参数PID轨压控制效果图

公司的瞬态压力传感器和角标仪, Dewetron 公司的燃烧分析仪和自行设计的电控单元与标定软件。

#### 4.1 目标轨压的标定

为了保证柴油机具有良好的排放性能和动力性能, 首先标定出在不同柴油机工况下的喷油目标压力, 标定结果如图5所示。从图5可以看出, 在不同柴油机工况下, 燃油的喷射压力是不同的, 是一个变压力过程; 随着喷油量与转速增加, 理想目标喷射压力也在增加。

#### 4.2 起动过程的轨压控制

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的效果。设定怠速为 600 r/min, 采用恒定油量(35 mg/Cyc)从起动进入怠速, 目标轨压设定为 47 MPa, 通过标定程序实时采集轨压值, 其数据结果如图6所示。

从图6中可以看出, 在起动模式, 由于开环控制, 轨压迅速上升, 快速地建立了燃油喷射压力。随后由于处于过渡模式, 轨压虽能控制, 但控制精度不高, 到了怠速控制阶段, 采用PID控制, 轨压控制精度高, 稳定性好。

#### 4.3 可变参数PID控制效果

为了测试不同PID参数对轨压的控制效果, 便于对比, 将柴油机转速分别保持在 2500 r/min, 3500 r/min, 4500 r/min, 通过增加扭矩, 目标喷油压力从 104.15 MPa 附近调整为 108.15 MPa, 用标定软件实时采样轨压值, 控制结果如图7所示。

从图7可以看出, 当柴油机处于高速时, 喷油的时间间隔短, 要求轨压响应速度快, 调节精度高, 应采用较大的PID参数。当柴油机处于低速时, 喷油的间隔时间相对较长, 响应速度要求相对低些, 为防止系统超调, 可选取较小的PID参数。当工况稳定后, 轨压控制精度均可达 1.7%。

## 5 结束语

(1) 在不同的柴油机工况下, 为保证高压共轨柴油机具有良好的排放性和动力性, 目标喷油压力应随柴油机转速与单次喷油量的增加而增加。

(2) 采用轨压预控制, 能很好地补偿因喷油带来的轨压波动。

(3) 在柴油机的不同工况下, 对轨压控制应采取不同的控制策略。

(4) PID控制参数应随柴油机的转速与轨压波动幅度动态自适应调整, 在低转速时, 三个参数采用较小值; 在高转速时, 三参数采用较大值。在稳定工况下, 轨压控制精度可达 1.7%。

## 参考文献:

- [1] Mallamo F, Badami M, Millo F. Effect of compression ratio and injection pressure on emissions and fuel consumption of a small displacement common rail diesel engine, 2005-01-0379[R]. Detroit: Society of Automotive Engineers Inc., 2005.
- [2] Hotta Y, Inayoshi M, Nakakita K. Achieving lower exhaust emissions and better performance in an HSDI diesel engine with multiple injection, 2005-01-0928[R]. Detroit: Society of Automotive Engineers Inc., 2005.
- [3] 王洪荣, 张幽彤, 王军, 等. 共轨柴油机轨压控制研究[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(9): 778-781.
- [4] 肖文雍, 杨林, 梁锋. GD-1 高压共轨式电控柴油机燃油喷射压力控制策略的研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(3): 235-240.
- [5] 苏岩, 刘忠长, 郭亮, 等. 基于PID对柴油机怠速稳定性控制的研究与优化[J]. 内燃机工程, 2008, 29(3): 20-24.
- [6] 袁银南, 朱磊, 杨鲲, 等. 实现柴油机全程电子调速PID参数整定的仿真研究[J]. 内燃机工程, 2006, 27(1): 23-26.

(上接 180 页)

间结构较低维混沌系统复杂, 产生的实值序列具有更强的不可预测性, 从而应用 Rössler 三维混沌系统置乱的水印图像具有保密性更高的特点, 可以更好地保护水印信息的安全。

(2) 针对均值或中值滤波、JPEG 压缩和缩放等干扰, 由于带给图像的误差, 符合在局部空间上是均匀的特点, 可以应用带干扰修正的水印提取算法。通过使用没有嵌入水印信息的小波低频系数的变化, 来逼近干扰对嵌入水印信息的小波系数的影响, 从而在减少此影响后, 可以更精确地提取水印。

## 参考文献:

- [1] Barni M, Bartolini F. Improved wavelet-based watermarking through

pixel-wise masking[J]. Image Process, 2001(10): 783-791.

- [2] 李诺, 闫德勤. 一种二维 DCT 彩色图像数字水印的新算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(2): 43-45.
- [3] 王化丰, 张桂香, 绍勇. 基于 Logistic 映射的混沌流密码设计[J]. 计算机工程, 2007, 33(10): 164-165.
- [4] 陈永强. 一种基于混沌加密的自适应图像水印方法[J]. 计算机应用, 2007, 27(10): 2453-2455.
- [5] Wang Shi-hong, Kuang Jin-yu, Li Jing-hua. Chaos-based communications in large community[J]. Phys Rev, 2002, 66(6): 1-4.
- [6] 陈士华, 谢进, 陆君安, 等. Rössler 混沌系统的追踪控制与同步[J]. 物理学报, 2002, 4(4): 749-752.
- [7] Reddy A A, Chatterji B N. A new wavelet based logo-watermarking scheme[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26: 1019-1027.
- [8] 黄政. 基于小波变换的数字水印方法研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.