

基于智能竞标自适应轨压控制算法

王 瑞

(中航工业 西安计算技术研究所, 西安 710065)

摘要: 设计了一种应用于高压共轨柴油发动机的轨压控制算法; 算法采用组合竞拍机制以解决复合工况下的轨压扰动问题, 并设计了一种分段动态标定算法以解决传统 PID 标定算法计算效率低的问题, 此外算法针对柴油发动机特性对 PID 控制器进行了多项改进以提高算法响应速度和跟随性; 最后通过仿真实验对算法进行了验证, 实验结果证明本算法对输入转速信号及喷油期望值具有良好的跟随性和响应速度, 并且轨压控制较为平稳, 其波动幅度不超过 1%, 基本符合高压共轨柴油发动机正常工作的需要。

关键词: 高压共轨; 轨压控制; 组合拍卖; 前馈控制; 工况切换

A Adaptive Rail Pressure Control Algorithm Based on Intelligent Bidding

Wang Rui

(Aeronautical Computing Technique Research Institute, Xian 710065, China)

Abstract: Design a rail pressure control algorithm for common Rail diesel engine. The new algorithm uses combinatorial auction mechanism to improve the pressure disturbance in complex conditions. It designs a new calibration algorithm based on the segmentation mechanism to reverse the inefficiency of the original algorithms. On the other hand, it improves many aspects of the PID controller based on the features of the diesel engine. The algorithm is verified by simulation experiment. The results prove that the output rail pressure has good tracking and efficiency. Besides, it has good stability that the amplitude of fluctuation is less than 1%. All the results proved that its features are consistent with the engine's requirement of normal running.

Keywords: high pressure common rail; rail pressure control; combinatorial auction; feedforward control; condition switch

0 引言

轨压控制算法是电控高压共轨柴油发动机的核心算法之一。其控制精度和稳定性直接决定发动机的动力和排放性能^[1]。但由于轨压变化属于一种连续、非线性、时变的控制过程^[2], 要求轨压控制算法具有良好的动态响应性和跟随性。现有研究大都采用基于复合工况的控制算法, 将轨压划分成包括起动、怠速、运行、跛行回家、驻车等工况, 针对不同工况特性分别采用开环或闭环的方式进行控制^[2-4], 这样可以有效控制精度和运算效率。但由于缺乏高效的工况切换机制, 很多同类算法还在采用定时或限值转换的工况切换方式, 因此易导致工况控制滞后和轨压非正常波动。另一方面, 现有研究在计算闭环轨压时, 通常采用人工智能算法结合 PID 算法^[4-6]以提升动态响应性, 但其缺点是收敛速度较慢, 并且易陷入局部最优的情况。

在这种背景下, 设计了一种基于组合拍卖的自适应轨压控制算法, 算法引入了经济学领域的组合拍卖机制以解决传统轨压控制算法的工况切换问题, 并大幅改进了闭环轨压算法以提升轨压控制的响应速度和运算效率。

1 算法原理说明

1.1 高压共轨系统简介

高压共轨系统的原理如图 1 所示。

在发动机工作时, 油箱内的燃油通过高压油泵加压后送至

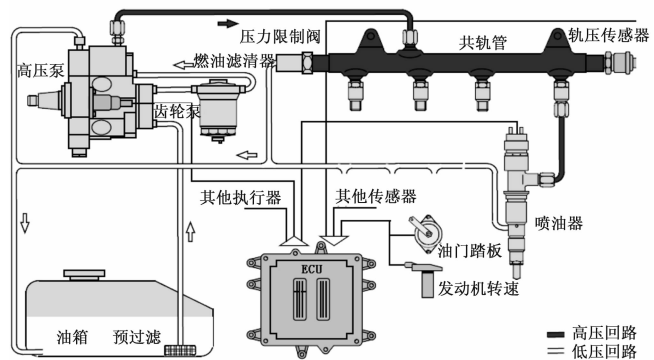


图 1 高压共轨系统原理图

共轨管, 喷油器在高压作用下向燃烧室喷射油雾。通过压力限制阀回油以进行泄压。可见轨压变化是随输入高压泵油量、输出的喷射喷油量和回油量的动态变化的过程。

1.2 算法处理流程

算法流程如图 2 所示。该算法主要包括组合拍卖和轨压计算两个环节, 前者通过组合拍卖机制实现工况自适应切换, 后者根据确定后的工况特性分别采用开环或闭环机制进行控制。针对闭环控制, 算法引入了前馈机制和分段动态标定机制, 以改进 PID 控制器的性能。

2 组合拍卖模型

2.1 组合拍卖模型

组合拍卖机制是经济学领域的一种有效的资源分配机制。实现该机制需要以下几类参与者^[7-8]:

组织者: 组织拍卖执行, 实现竞拍单元与拍卖物品的

收稿日期: 2014-09-16; 修回日期: 2014-10-17。

作者简介: 王 瑞 (1983-), 男, 陕西省西安市人, 硕士, 工程师, 主要从事嵌入式应用软件、车载动力控制软件方向的研究。

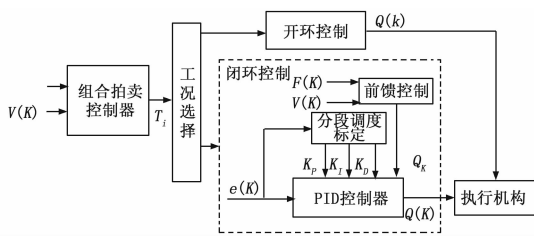


图 2 轨压计算流程图

映射；

竞拍单元：针对拍卖物品计算投标价格，提交拍卖单元参与投标；

拍卖物品：拍卖中的标的物，在资源分配时，表示需要完成的任务。

组合拍卖机制的各要素如下所示：

$$Auction = [T, A, B, U, D, P] \quad (1)$$

式中， T 为竞拍单元集合； A 为拍卖单元集合； B 为拍卖物品集合； U 为竞拍单元获取拍卖物品的收益集合； D 为竞拍单元获取拍卖物品需付出的代价集合； P 为竞拍单元针对对应物品的投标价格集合。

在本算法中，拍卖单元对应主 ECU 控制器，竞拍单元为待转换的各类工况 T_i ，拍卖物品为工况对发动机的控制权。

2.2 组合拍卖过程

根据组合拍卖分配模型，竞拍单元对拍卖物品的投标价格为竞拍收益与竞拍代价的差值，以下便从竞拍收益和竞拍代价两方面说明组合拍卖的计算和执行过程。

2.2.1 竞拍收益

竞拍收益在发动机工况选择中的含义为待选工况 T_i 对发动机在 k 时刻的运行状态的符合程度，符合程度越高，则其竞拍收益 $P_i(k)$ 越高。由于轨压控制过程的主要外部影响因素为喷油量和发动机转速^[9]，因此将 $P_i(k)$ 的影响因素表述为速度因子 $C_i(k)$ 和油量因子 $E_i(k)$ 。其计算过程如下所示。

1) 速度因子：

在发动机运行时，系统维护一个低怠速 V_{LSI} 和一个高怠速 V_{HSI} 。假设在 k 时刻由工况 T_i 控制发动机运转，则此时工况 T_i 的在 k 时刻的期望转速为 $V_i(k)$ ，该值由工况计算单元给出，其值与工况特性有关。

当 $V_i(k) < V_{LSI}$ 时，说明若由 T_i 主控时，系统将进入或处于启动或熄火工况，此时， T_i 对发动机影响的程度较大，相应的速度因子 $C_i(k)$ 较大；同理，当 $V_i(k) > V_{HSI}$ 时，系统将进入或处于高怠速工况，此时转速恒定， T_i 对系统影响的程度最小，则 $C_i(k)$ 较小；但当 $C_i(k) \in [V_{LSI}, V_{HSI}]$ 时，系统仍将处于正常运转状态， $C_i(k)$ 随 $V_i(k)$ 增大而增大。本算法设计 $C_i(k)$ 的计算公式如下所示：

$$C_i(k) =$$

$$\begin{cases} 1 - \frac{V_i(k)}{5V_{LSI}}, & V_i(k) \leq V_{LSI} \\ 0.8 - \frac{V_{HSI} - V_i(k)}{2(V_{HSI} - V_{LSI})}, & \frac{V_{LSI} + V_{HSI}}{2} < V_i(k) < V_{HSI} \\ 0.3 - \frac{V_{HSI} - V_i(k)}{5(V_{HSI} - V_{LSI})}, & V_{LSI} < V_i(k) < \frac{V_{LSI} + V_{HSI}}{2} \\ 0.1 - \frac{V_i(k) - V_{HSI}}{10(V_{MAX} - V_{HSI})}, & V_{LSI} < V_i(k) < V_{MAX} \end{cases}$$

(2)

式中， V_{MAX} 为发动机所能达到的最大速度； $C_i(k)$ 的变化区间为 $[0, 1]$ 。

2) 油量因子：

k 时刻的油量因子 $E_i(k)$ 与实际的喷油量期望 $F(k)$ 和假设工况 T_i 控制下对喷油量的期望值 $F_i(k)$ 有关，其中 $F(k)$ 由系统喷油控制模块计算得到， $F_i(k)$ 由工况计算单元计算得到。当两者的符合度越高时，说明工况 T_i 越贴近实际工况，则 $E_i(k)$ 越高，反之 $E_i(k)$ 越低，其计算公式为：

$$E_i(k) = \frac{F_i(k) - F(k)}{\max_j F_j(k) - F(k)} \quad (3)$$

式中， $\max_j F_j(k)$ 为 k 时刻工况集 T 中喷油量期望的最大值。

3) 竞拍收益：

由于速度因子和油量因子并不独立，因此工况 T_i 的竞拍收益 $U_i(k)$ 可由如下公式估算得到：

$$U_i(k) = (C_i(k))^{\omega_1} \cdot (E_i(k))^{\omega_2} \quad (4)$$

式中， ω_1 、 ω_2 为两项影响因子的权值，其值与发动机实际特性相关，满足 ω_1 、 $\omega_2 \leq 1$ 且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

2.2.2 竞拍代价

竞拍代价在发动机工况选择中的含义为当前工况转换到目标工况的难易程度。该难易程度可以工况切换所经历的过渡工况计数为依据。在本算法中，实际工况划分如图 3 所示。

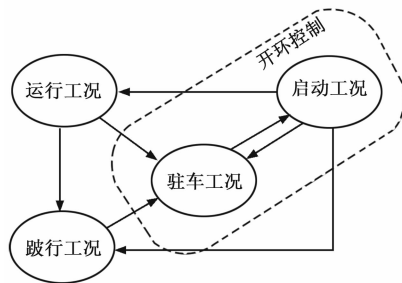


图 3 工况划分示意图

如图所示，以驻车为例，该工况到运行工况的转换路径为 2，到启动工况的路径长度为 1。根据这种方法归纳代价 $D_i(k)$ 的公式如下：

$$D_i(k) = \begin{cases} \frac{\theta}{n - L_{ji}} & L_{ji} \in [0, n] \\ 1 & L_{ji} = \infty \end{cases} \quad (5)$$

式中， L_{ji} 表示当前工况 T_j 到 T_i 转换的路径长度，当路径不存在是，表示为 ∞ ； θ 表示为 $D_i(k)$ 的权值，用于平衡 $P_i(k)$ 的取值。

2.2.3 竞拍结果/工况选择

通过上述公式，可知在 k 时刻竞拍价格如下式所示：

$$P_i(k) = U_i(k) - D_i(k) \quad (6)$$

则在 k 时刻根据组合拍卖过程选择工况的原则是选择竞拍价格最大的对应工况，即满足如下公式的 T_i ：

$$G = \max_{i \leq n} P_i(k) \quad (7)$$

本算法根据上述组合拍卖过程，可得到 k 时刻的最优工况，再根据工况特性分情况计算轨压。

3 轨压计算环节

与传统将轨压作为控制量的轨压控制算法不同，本算法的

轨压计算环节以燃油流量 $Q(k)$ 作为控制量。因为在高压共轨系统中是通过燃油计量阀的开闭来实现流量控制，从而间接实现轨压控制^[10]，因此采用 $Q(k)$ 作为控制量可以从一定程度上提高控制的精度和响应速度。如图 1 和图 3 所示，根据组合拍卖环节的工况选择结果，轨压计算环节根据工况类型可分为开环和闭环两种计算方式。

3.1 开环控制过程

驻车工况和起动机工况属于开环控制工况：在启动工况时，算法设置 $Q(k)$ 为常量，以驱动执行单元迅速建立轨压；当处于驻车工况时，算法设置 $Q(k)$ 为 0，此时发动机轨压将降为 0，停止喷油。

3.2 闭环控制环节

当发动机处于运行或跛行回家工况时，系统采用闭环控制，采用统一的 PID 算法实现轨压的动态变化调整。

PID 控制器的输入为轨压期望值 $R(k)$ 和反馈值 $R'(k)$ 。其中 $R(k)$ 根据转速和喷油量期望之查 Map 表决定，而 $R'(k)$ 由发动机传感器采集得到。PID 控制规律如下所示：

$$e(k) = R(k) - R'(k) \quad (8)$$

$$Q(k) = L[K_{reset}Q_I(k) + Q_D(k) + Q_P(k)] + C^{1-L}Q_F(k) \quad (9)$$

其中， $e(k)$ 为输入偏差信号； $Q_I(k)$ 、 $Q_D(k)$ 和 $Q_P(k)$ 分别为 PID 控制的积分分量、微分分量和比例分量； $Q_K(k)$ 为前馈分量； C 为前馈系数，用于跛行工况计算； L 为例外工况系数，当工况为跛行回家或转速传感器故障时其值为 1，此时分离 PID 环节，由于 $C^{1-L} = 1$ ，因此通过安全轨压 $C * Q_K(k)$ 控制油量流量变化； K_{reset} 为积分分离系数。

3.2.1 积分分项计算

积分分项的作用为消除控制静差，提高系统无差度。本算法引入积分分离思想以缓解当积分积累过大或 K_I 增大过快时造成的系统振荡^[4]。因此设置一轨压超调阈值 R_{reset} ，当轨压反馈 $R'(k) > R_{reset}$ 时，通过公式 (9) 积分分离系数 K_{reset} 暂时剔除积分环节。 K_{reset} 控制规律如下所示：

$$K_{reset} = \begin{cases} 0, & R'(k) > R_{reset} \\ 1, & R'(k) \leq R_{reset} \end{cases} \quad (10)$$

积分分项控制规律如下所示：

$$Q_I(k) = Q_I(k-1) + \Delta Q \quad (11)$$

$$\Delta Q = K_I[e(k) - JG_{flow}(Q(k-1) - R(k))] \quad (12)$$

其中： K_I 为 PID 积分系数； J 为燃油泄漏系数， G_{flow} 为燃油泄漏流系数，两者用于计算当系统计入燃油泄露时的轨压偏差增益。

3.2.2 微分分项计算

微分分项的作用为利用系统偏差变化率形成超前控制，以加速系统响应。微分环节的输入信号为控制偏差在两次相邻采样周期的差值，如下式所示：

$$e_D(k) = e(k) - e(k-1) \quad (13)$$

为缓解传统 PID 微分控制器中输入信号噪声对系统产生的不良影响，本算法对微分环节的控制信号进行一阶线性滤波。其公式为：

$$e'_D(k) = e_D(k) + H \cdot [e'_D(k-1) - e_D(k)] \quad (14)$$

其中： H 为滤波系数。

因此微分环节的计算公式为：

$$Q_D(k) = K_D \cdot e'_D(k) \quad (15)$$

3.2.3 比例分项计算

比例环节用于减小系统控制偏差。其计算公式为：

$$Q_P(k) = K_P \cdot e(k) \quad (16)$$

3.2.4 前馈补偿计算

在本算法中前馈补偿环节的输出值 $Q_K(k)$ 有两重作用，当系统为正常运行时， $Q_K(k)$ 通过开环的正向激励提高 PID 控制器对快速变化的响应速度^[11-12]；当系统为跛行回家工况时， $Q_K(k)$ 用作跛行回家时的轨压安全输出值。其控制规律如下所示：

$$Q_K(k) = S_A \cdot F(k) + S_B \cdot R(k) + S_C \quad (17)$$

其中： S_A 为前馈喷油系数， S_B 为轨压期望系数， S_C 为常量系数。

3.2.5 控制参数标定

本算法采用分段过程实现 PID 控制参数动态标定。其实现原理图 4 所示，根据 4 个边界轨压值分为 5 个独立的处理过程。根据控制偏差 $e(k)$ 所落范围决定使用的处理过程。各过程含义及处理方式如下所示：

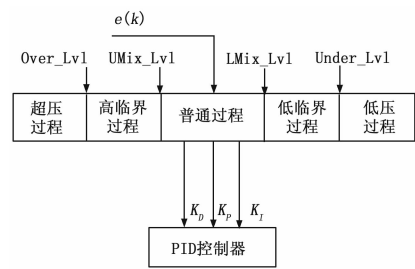


图 4 分段动态标定示意图

普通过程：此时轨压处于稳定状态，PID 控制过程为线性控制过程，因此控制系数设为定值 C_J ，其中 $J \in \{I, P, D\}$ ；

超压过程：此时轨压变化过大，PID 控制器需要采取保护措施抑制这种过压变化，此时控制参数设置为定值 O_J ；

低压过程：与超压过程类似，此时控制参数设置为定值 U_J 。

高临界过程：此时轨压增长率过快，PID 控制器采用动态控制，参数计算如下所示：

$$K_J = \frac{R_{mix} - \Delta P}{R_{ovr} - R_{mix}} \cdot (O_J - C_J) + C_J \quad (18)$$

其中： R_{mix} 和 R_{ovr} 为边界轨压，对应图 4 的 $UMix_Lvl$ 和 $Over_Level$ ；

低临界过程：此时轨压降低率过快，计算过程如下：

$$K_J = \frac{\Delta R - R_{mix}}{R_{mix} - R_{undr}} \cdot (C_J - U_J) + C_J \quad (19)$$

其中： R_{mix} 和 R_{undr} 为边界轨压，对应图 4 的 $LMix_Lvl$ 和 $Under_Lvl$ 。

4 仿真实验

为验证算法实际性能，在自制发动机仿真平台上进行验证。该仿真平台基于 LabVIEW 搭建，用于模拟六缸高压共轨柴油发动机的运行特性。实验情景设置为从转速 700 r/min 快速上升至 1 400 r/min，并维持在该状态一段时间，以测试轨压反馈值 R' 变化规律。实验采样点共 500 个，采样周期为 50 ms。根据采样点绘制信号变化趋势图如图 5 所示，其横坐

标为采样点计数，纵坐标为相关采样信号数值。为将图例中所示四种信号变化趋势映射到同一张图中，根据实验数据将轨压反馈值沿 y 轴向下平移 25 mpa。由于轨压反馈值 P 根据发动机传感器采集得到，因此图 5 的轨压变化趋势基本可以反映算法对轨压的控制结果。

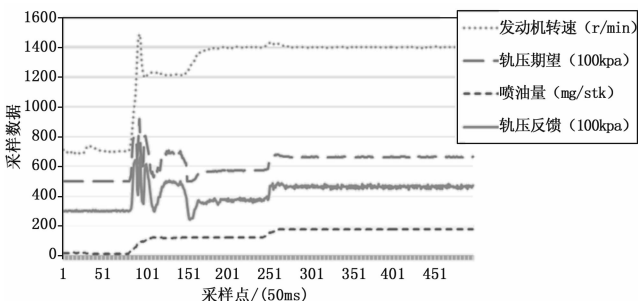


图 5 轨压曲线趋势图

根据图 5 可以看出，轨压反馈值、轨压期望值与发动机转速、喷油量期望值的变化基本同步，且变化趋势基本一致，由于发动机转速和喷油量期望可以基本代表用户对动力控制的期望变化，因此该趋势可以说明该算法具有较好的响应速度和跟随特性。

此外，如图 5 所示，当转速稳定在 1 400 r/min 时，轨压反馈信号维持平稳的趋势，但具有微小的波动，这是燃油计量阀开闭过程对轨压反馈造成的扰动^[10]。可以从数据对波动幅度进行说明。转速维持在 1 400 r/min 时的部分采样数据如表 1 所示。

表 1 1 400 r/min 采样数据

数据	1	2	3	4	5
引擎转速	1409.4	1415.4	1426.4	1433.3	1433.5
轨压期望	576.8	582.3	636.1	647.1	649
喷油期望	130.06	139.38	152.75	154.44	154.94
轨压反馈	586.5	575.5	615.1	666.8	670

从表 1 可以发现，轨压反馈波动幅度 < 1%，属于正常波动范围。

上述实验结果证明，本算法具有较好的运行特性，基本可以满足高压共轨电控柴油发动机的轨压控制需求。

5 结论

设计了一种应用于高压共轨电控柴油发动机的轨压控制算法。在传统算法的基础上，在以下几方面进行了改进：首先，传统算法采用定时或限值转换的方式进行工况切换，极易产生轨压波动，为解决此问题，采用组合拍卖机制设计了一种动态工况切换机制，实现工况平稳转换；其次，针对目前 PID 参数标定算法收敛慢、易陷入局部最优的问题，设计了一种分段调度的动态标定算法来进行参数标定；另外，针对柴油发动机运行特性对 PID 控制器本身进行了多项改进，包括前馈环节设计、分离积分环节设计以及部分环节的降噪处理。最后通过长时间的仿真实验证明，改进算法具有较好的动态响应性和跟随性，且实验数据与期望特征相差 < 1%，说明该算法在一定程度上可以满足高压共轨柴油发动机轨压计算需求。

参考文献：

[1] 尤丽华, 安伟, 张美娟. 基于神经网络的柴油机共轨系统轨压控制方法 [J]. 中国农机化, 2009, 6: 78-81.

[2] 徐劲松, 申立中, 王贵勇, 等. 高压共轨柴油机轨压复合控制策略的研究 [J]. 内燃机工程, 2012, 33 (2): 54-59.

[3] 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.

[4] 任卫军. 车用高压共轨柴油机燃油系统控制及故障监控策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.

[5] 石磊, 薛冬新, 宋希庚. 基于神经网络的柴油机轨压模型补偿容错控制研究 [J]. 车用发动机, 2009, 4: 16-20.

[6] 孟丽, 韩璞, 任燕燕, 等. 基于多目标粒子群算法的 PID 控制器设计 [J]. 计算机仿真, 2013, 30 (7): 388-391.

[7] 万路军, 姚佩阳, 孙鹏. 有人/无人作战智能体分布式任务分配方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (2): 310-316.

[8] 李冯敬, 姚佩阳, 张杰勇, 等. 基于多 Agent 的分布式通信对抗目标分配系统 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (12): 283-286, 290.

[9] 仇滔, 雷艳, 彭璟, 等. 高压共轨燃油系统轨压控制策略研究 [J]. 内燃机工程, 2013, 34 (2): 83-87.

[10] 刘兴华, 樊志强, 高琢. 高压共轨燃油系统轨压波动特性的实验研究 [J]. 汽车工程, 2010, 32 (7): 575-578.

[11] 李兴春, 刘智勇, 李兴高. 多变量多时滞系统的前馈补偿解耦及 IMC-PID 控制 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 130-134.

[12] 王宇林, 李琳, 彭志明. 前馈一改进型 PID 复合控制策略的研究 [J]. 机床与液压, 2012, 40 (11): 50-53.

(上接第 1616 页)

[8] Viola P, Michael J. Jones, Snow D. Detecting Pedestrians Using Patterns of Motion and Appearance [A]. Proceedings of the Ninth IEEE International Conference on Computer Vision [C]. 2003: 734-741.

[9] Dalal N, Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection [A]. Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. 2005.

[10] 冯凯文, 孟凡荣, 牛强, 等. 基于趋势点状态模型的时间序列预测算法 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28 (12): 4510-4512.

[11] 高云龙, 潘金艳. 基于 Boosting 梯度下降理论的时间序列建模方

法 [J] 中国科学, 2011, 41 (7): 928-943.

[12] 宋晓宇, 袁帅, 郭寒冰, 等. 基于自适应阈值区间的广义 Hough 变换图形识别算法 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 25 (5): 1109-1117.

[13] Wu B, Nevatia R. Detection of Multiple, Partially Occluded Humans in a Single Image by Bayesian Combination of Edgelet Part Detectors [A]. Proceeding of the Tenth IEEE International Conference on Computer Vision [C]. 2005.

[14] 郝溪, 陈淑荣, 尹道素, 等. 融合 HOG 与颜色特征的粒子滤波行人跟踪算法 [J]. 微型机与应用, 2014, 33 (6): 40-43.

[15] 杨淑莹, 邓飞, 等. 基于时间序列自适应建模的粒子滤波动态目标跟踪 [J]. 光电子, 2011, 22 (11): 1725-1730.