

轮式移动机器人嵌入式自适应控制器设计与仿真

宋立博, 李劲松

(上海交通大学 工程训练中心, 上海 200240)

摘要: 在增加一阶输出信息基础上, 改写了控制律算法准则函数, 使用变分原理得出紧格式的改进无模型自适应控制(eMFAC)方程. 以差动驱动移动机器人为研究对象, 将非完整约束及传动系统误差作为外部干扰设计了具有前馈功能的Kalman改进无模型自适应控制(MFAC)运动控制器, 证明了新控制方法的全局稳定性. FreeMAT仿真及ARM7系统控制实验证实了本方法的有效性.

关键词: 改进无模型自适应控制; 轮式移动机器人; 卡尔曼方法; 变分原理

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design and simulation of embedded model-free adaptive control system of wheeled mobile robots

SONG Li-bo, LI Jin-song

(Engineering Training Centre, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: On the basis of variational principle, we derive the compact form of the enhanced model-free adaptive control method (eMFAC) and modify the control criterion function by adding the first order output signal. In designing the feedforward Kalman MFAC controller for a differential driving wheeled mobile robot, the nonholonomic constraint and the transmission error from motors to wheels in the driving transmission system are fed forward to the system for controlling the orientation angle and the motion velocity of the mobile robot. The global stability of the proposed control method is verified. Simulations are performed with the open-source freeware FreeMAT V4.0. Practical experiments are carried out on the ARM7 system. Results validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: enhanced model-free adaptive method; wheeled mobile robot; Kalman method; variational principle

1 引言(Introduction)

因在物流等领域的广泛应用, 轮式移动机器人长期成为智能控制、自动控制和运动控制的重要研究平台, 并取得大量科研和应用成果. 目前, 其运动控制普遍采用滑模变结构^[1-2]、模糊控制^[3-4]及基于运动学或动力学的模型控制方法^[5-6]. 这些控制方法的共同点是设计复杂, 运算量较大, 不适于以微控制器为核心的机器人运动控制系统中. 作为现代控制论与人工智能结合的产物, 无模型自适应控制方法(model-free adaptive control method, MFAC)是建立在输出可测条件及学习控制基础上的高级智能算法, 已在具有高度非线性、未可精确或半精确建模及存在不可测量参数特征的炼油、化工、焦炭、轻工等领域得到成功应用, 成为一种日渐成熟的工业过程和复杂系统控制技术^[7]. 同时, 因其在输入/输出耦合、响应延迟和摩擦系数等不可建模误差等方面的突出处理能力, 在惯性平台^[8]、大型舰船^[9]、直线电机^[10]、并联机器人^[11]及焊接机器人^[12]等机电

系统运动控制领域得到推广应用, 在多输入多输出(multi-input multi-output, MIMO)系统控制领域成为常用控制理论的有益补充.

本文以差动驱动移动机器人为研究对象, 在考虑非完整约束/输入输出耦合及饱和约束等因素基础上, 研究物联网环境下轮式移动机器人的MFAC自适应控制系统设计方法.

2 轮式移动机器人建模(Modeling of wheeled mobile robot)

移动机器人有机械结构模型、数学力学模型及控制方程模型等多种模型形式. 在系统建模及设计控制系统时, 最为关键的是数学力学模型及相应的控制方程模型. 为简化分析过程, 一般在忽略轴承处摩擦阻力基础上采用Lagrange方程或牛顿方程建立轮式移动机器人的运动学方程或动力学方程. 这些方程简单直观, 但存在: 1) 未考虑滚轮运动垂直方向的无滑动运动, 也就是一阶速度空间的协调方程, 即

机器人的非完整运动约束; 2) 未考虑轴承处滚动阻力、安装精度、松紧程度等非线性因素对机器人力学方程的影响; 3) 轮式移动机器人一般采用直流电机为驱动装置, 在运动控制系统设计和建模过程中未考虑控制输入信号及电机最大转速等因素的饱和约束。

机器人运动坐标系如图1所示。图1中: XOY 惯性坐标系, 位于机器人运动平面上; xoy 为机器人坐标系, o 为机器人驱动轮中心连线在惯性坐标系上的投影; x 轴为机器人底盘纵向对称线在惯性坐标系上的投影; y 轴沿两滚轮中心连线并在 o 点与 x 轴相交。

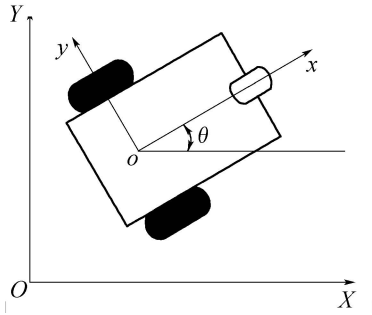


图1 系统坐标系

Fig. 1 System coordinates of robot

对于含非线性因素的轮式移动机器人, 可以作为MIMO系统处理。以 $y = [v \ \theta]^T$ 为系统输出, $u = [\tau_l \ \tau_r]^T$ 为输入时, 其非线性NARX模型可以书写为如下形式:

$$y_{k+1} = f(y_k, \dots, y_{k-ny}, u_k, \dots, u_{k-nu}), \quad (1)$$

其中: ny 为机器人输出的未知或已知阶数, nu 为输入的未知或已知阶数, $f(\cdot)$ 为已知或未知非线性函数关系, v 为机器人在 x 轴方向的运动速度, θ 为运动方向角, τ_l 及 τ_r 为左后轮及右后轮输入的PWM控制信号, k 为离散采样时刻。在忽略轴承处滚动阻力、安装精度、松紧程度等非线性误差, 对上述实际问题, 可以验证系统满足如下条件:

1) 式(1)所示非线性NARX模型系统是可控、可观的, 且输入 u 及输出 y 有界;

2) $f(\cdot)$ 关于当前输入控制信号 u_k 的偏导数 $\frac{\partial f}{\partial u_k}$ 存在且连续;

3) 式(1)系统满足广义Lipschitz条件, 即对于任意 k 和 $\Delta u(k) \neq 0$, 有 $|\Delta y(k+1)| \leq h|\Delta u(k)|$, h 为一正常数。

根据文献[13]中的结论, 易知, 式(1)可描述为如下MIMO情况下的紧格式动态线性化数据模型:

$$\Delta y(k+1) = \phi^T(k) \Delta u(k), \quad (2)$$

其中:

$$\Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k) = [\Delta v \ \Delta \theta]^T,$$

$$\Delta u(k) = [\Delta \tau_l \ \Delta \tau_r]^T, \quad \phi^T(k) = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix}$$

称为伪梯度向量或伪偏导数矩阵。

忽略滚轮的轻微周向及轴向滑动, 机器人运动满足如下条件:

$$v_x \sin \theta - v_y \cos \theta = 0. \quad (3)$$

式(3)即为机器人运动方向及滚轮切向的速度空间协调函数及非完整约束。其中: v_x 为机器人在 X 轴上的速度分量和投影, v_y 为机器人在 Y 轴上的速度分量和投影。

综合式(1)–(3), 差动驱动轮式移动机器人的MFAC控制方程可写为如下形式:

$$\begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \tau_l \\ \Delta \tau_r \end{pmatrix} + \Omega \begin{pmatrix} 0 \\ v_x \sin \theta - v_y \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Ω 为与式(3)对应的Lagrange乘子。式(4)右边第1项为隐含了非线性因素的一阶NARX模型, 第2项即代表了非完整约束对机器人运动和控制方程的影响。

3 机器人改进MFAC算法(Enhanced MFAC algorithm of mobile robot)

MFAC控制方程由控制律算法方程和伪偏导数算法方程组成, 无模型自适应控制算法最为关键的两步是伪梯度向量 φ 的实时迭代和控制输入 u 的实时更新。在实际应用中, 常使用最小二乘法或投影法结合准则函数进行伪梯度向量 φ 及控制输入 u 的在线更新。但是, 最小二乘算法和投影算法仅使用了I/O数据的零阶信息, 没有考虑高阶信息和饱和约束函数等因素的影响。为更好反映系统相应情况, 控制律算法准则函数增加一阶输出信息, 并改写为如下形式:

$$\begin{aligned} J(u(k)) = & \|y_d(k+1) - y(k+1)\|^2 + \\ & \|(y(k+1) - y(k))/T\|^2 + \lambda \|u(k) - \\ & u(k-1)\|^2 + \Omega \begin{pmatrix} 0 \\ v_x \sin \theta - v_y \cos \theta \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $y_d(k+1)$ 为期望输出, T 为采样周期, λ 为权重因子。伪偏导数准则函数可写为

$$\begin{aligned} J(\phi(k)) = & (y_d(k) - y(k-1) - \phi(k) \Delta u(k-1))^2 + \\ & \mu (\phi(k) - \hat{\phi}(k-1))^2, \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, $\hat{\phi}(k)$ 为 k 时刻 φ 的估计值。

再结合式(2), 与式(5)及式(6)对应的新准则函数可改写为

$$J_c(u(k)) = J(u(k)) + \Theta(\Delta y(k+1) - \hat{\phi}(k)\Delta u(k)), \quad (7)$$

$$J_c(\phi(k)) = J(\phi(k)) + \Psi(\Delta y(k+1) - \hat{\phi}(k)\Delta u(k)), \quad (8)$$

式中 Θ 及 Ψ 分别为对应的待定乘子. 根据变分原理, 控制律算法准则函数和伪偏导数准则函数取极值的条件是

$$\begin{cases} \frac{\partial J_c(\phi(k))}{\partial \phi(k)} = 0, & \frac{\partial J_c(u(k))}{\partial u(k)} = 0, \\ \frac{\partial J_c(\phi(k))}{\partial \Omega} = 0, & \frac{\partial J_c(u(k))}{\partial \Omega} = 0, \\ \frac{\partial J_c(u(k))}{\partial \Theta} = 0, & \frac{\partial J_c(\phi(k))}{\partial \Psi} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

仿照文献[13]推导过程, 在满足条件1)–3)时与式(5)–(6)对应的紧格式线性化形式的完整MFAC控制方程如下^[14]:

$$\begin{aligned} u(k) = & \\ u(k-1) + & \frac{\rho_k \hat{\phi}(k) \times \|y_d(k+1) - y(k)\|}{\lambda + (1 + 1/T^2)\|\hat{\phi}(k)\|^2} + \\ & \frac{\rho_k \phi(k) \hat{\phi}(k) \times \Delta u(k-1)}{\lambda + (1 + 1/T^2)\|\hat{\phi}(k)\|^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k) = & \\ \hat{\phi}(k-1) + & \frac{\eta_k \Delta u(k-1)}{\mu + \|\Delta u(k-1)\|^2} \times \\ & (\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{\phi}(k) = & \hat{\phi}(1), \\ \text{如果} \text{norm}(\hat{\phi}(k)) \geq \varepsilon, & \text{norm}(\Delta u(k-1)) \geq \varepsilon, \\ \text{s.t. } v_x \sin \theta - v_y \cos \theta = & 0, \end{aligned}$$

其中: $\rho_k, \eta_k \in (0, 2)$, ε 为无穷小正数; ρ_k 为学习步长, 用于调节镇定时间; λ 为惩罚因子, 用于系统响应控制; μ 为权重因子, 用于避免 $\|\hat{\phi}(k)\|$ 过小出现分母奇异情况而增加的辅助选项. $\hat{\phi}(k)$ 为 $\phi(k)$ 的在线估计值.

在不考虑采样时间 T 时, 式(10)–(11)即为标准的MFAC控制方程. 并且

$$\begin{aligned} \|\Delta u(k)\| = & \\ \frac{\rho_k \hat{\phi}(k) \times \|y_d(k+1) - y(k)\|}{\lambda + (1 + 1/T^2)\|\hat{\phi}(k)\|^2} + & \\ \frac{\rho_k \phi(k) \hat{\phi}(k) \times \|\Delta u(k-1)\|}{\lambda + (1 + 1/T^2)\|\hat{\phi}(k)\|^2} \leq & \\ \frac{\rho_k \hat{\phi}(k) \times \|y_d(k+1) - y(k)\|}{\lambda + \|\hat{\phi}(k)\|^2} + & \end{aligned}$$

$$\frac{\rho_k \phi(k) \hat{\phi}(k) \times \|\Delta u(k-1)\|}{\lambda + \|\hat{\phi}(k)\|^2}.$$

在式(1)满足一致全局Lipschitz条件时, 文献[14]已经证明紧格式MFAC是稳定的和收敛的, 并且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta u = 0$. 由式(10)可知

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\rho_k \hat{\phi}(k) \times \|y_d(k+1) - y(k)\|}{\lambda + (1 + 1/T^2)\|\hat{\phi}(k)\|^2} = & \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\|\Delta u(k)\| - \frac{\rho_k \phi(k) \hat{\phi}(k) \times \|\Delta u(k-1)\|}{\lambda + (1 + 1/T^2)\|\hat{\phi}(k)\|^2}) = & \end{aligned}$$

因此,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\rho_k \hat{\phi}(k) \times \|y_d(k+1) - y(k)\|}{\lambda + \|\hat{\phi}(k)\|^2} = 0,$$

即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_d(k+1) - y(k)\| = 0$. 也就是说, 在由式(10)–(11)组成的无模型自适应控制方程(eMFA)控制下, 轮式移动机器人系统可镇定至期望的状态 $y_d(\cdot)$.

4 机器人Kalman-MFAC控制器(Enhanced Kalman-MFAC controller of mobile robot)

轮式移动机器人一般以运动速度 v 及方向角 θ 为控制量和系统输出量. 此时, 控制器设计的最大问题是: 1) 存在非完整约束, 运动速度分量 v_x, v_y 及方向角 θ 存在耦合; 2) 因存在较大非线性因素, 采用磁阻传感器采集方向角 θ 时存在一定误差和时间延迟; 3) 机器人驱动电机至滚轮间的传动系统存在一定偏差, 在相同PWM信号控制下左右滚轮存在一定的转速差, 这些未建模因素及非线性因素直接影响机器人位置和方向角控制精度.

为引入这些未建模及非线性因素, 可将传动系统误差和滚轮法向的非完整约束作为外部干扰处理. 此时, 轮式移动机器人的控制系统结构如图2所示. 其中: d_1 为传动系统误差引入的扰动, $d_2 = v_x \sin \theta - v_y \cos \theta$ 非完整约束引入的扰动. 对于机器人而言, d_1 为不可消除误差, 每个机器人均有所不同.

在图2中: $G(d_1)$ 为与干扰 d_1 对应的传递函数, $G(d_2)$ 为与 d_2 对应的传递函数. 在本控制系统结构中, 与 $G(d_1)$ 对应的PWM信号 $0 < \rho_1 < 1$. 非完整约束 $d_2 \leq v_{\max}$, $G(d_2)$ 对应的PWM信号 $0 < \rho_2 < 1$, 均为有界干扰信号. 结合改进MFA的收敛性可知, 图2所示的轮式移动机器人控制系统亦是收敛和有界的. 为克服动态测量误差以提高控制精度, 反馈的磁阻传感器方向角信号和倍频后的编码器速度信号经Kalman滤波和融合处理后送入eMFA控制器. 方向角信号及速度信号经改进eMFA控制器运算后馈入比较环节, 与作为前馈的 $G(d_1)$ 和 $G(d_2)$ 加运算后输出PWM信号至机器人. 对 $G(d_1)$ 和 $G(d_2)$ 进行前

馈处理的优点在于考虑了常态结构误差的时不变影响. 在机器人调整至设定的方向角 θ 时, d_2 自动降低为零, 不再作为外部干扰对控制器发挥作用.

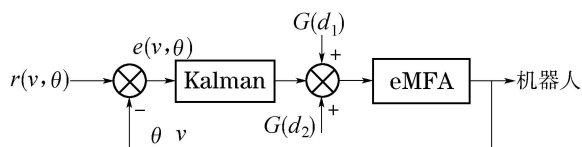


图2 轮式移动机器人控制系统结构

Fig. 2 Control system structure of the wheeled mobile robot

由于综合Kalman方法及eMFAC控制方法, 图2所示的机器人控制器可称为Kalman-eMFAC机器人运动控制器.

5 仿真与实验(Simulations and experiments)

课题组设计了小型AGV型差动驱动移动机器人. 为提高运算性能, 以NXP公司ARM7TDMI核的LPC2103为主控芯片, 以Digi公司Xbee Pro物联网模块为LPC2103与ConnectPort X4网关间的通信接口装置. 通过Xbee Pro物联网模块, 可以非常方便的实现主控计算机与机器人之间及多个机器人之间的相互通信, 并可通过亚马逊云计算服务器实现对机器人人群的远程网络控制.

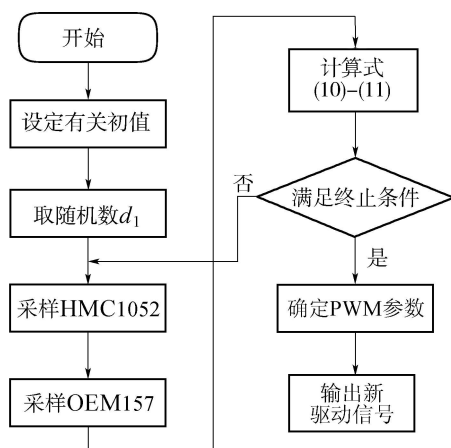


图3 控制系统流程图

Fig. 3 Flowchart of the Kalman-eMFAC control system

在控制系统硬件设计上, 磁阻传感器采用Honeywell公司HMC1052芯片, 经由LM347N组成的有源滤波放大电路输入LPC2103的ADC引脚. 倾角传感器采用VTI公司SCA100T-01双轴陀螺, 用于运动地面平整度测量及引起的PWM校正, 经阻容滤波电路输入LPC2103的ADC引脚. 转速检测采用Nidec Nemicon公司的OME-157-N1旋转编码器, 用于电机转速测量及机器人运动速度计算. 电机驱动芯片采用ST公司的L298N芯片, 用于电机速度及机器人运动速度调节. 倍频电路采用SN74LS74 D触发器芯

片, 将编码器输出脉冲信号的4倍频和细分以提高速度控制精度. 系统流程如图3所示.

系统期望输出 $y_d = (0.5 \text{ m/s}, 45^\circ)$, 初始状态 $(0, 25^\circ)$ 时, 设定 $\eta = 0.1$, $\mu = 0.2$, $\lambda = 0.3$, $\rho = 0.1$ 及采样周期 $T = 0.02 \text{ s}$, 使用FreeMAT4.0得到的速度及方向角偏差仿真结果分别如图4及图5所示. 由图4及图5可知, 方向角及速度误差在第10s已收敛至设定的0.0005精度之内, 而PID控制($k_p = 6.0$, $k_i = 0.2$, $k_d = 3.0$)则分别需要30s及25s左右才可实现状态镇定, Kalman-eMFAC机器人运动控制器很好实现了机器人的速度和方向角控制. 收敛及状态镇定之后的控制输入为 $u = [0.5886 \quad -0.4938]^T$, 符号相反说明左后及右后驱动电机转向相反, 绝对值不同与左后、右后传动系统引入的误差 d_1 有关.

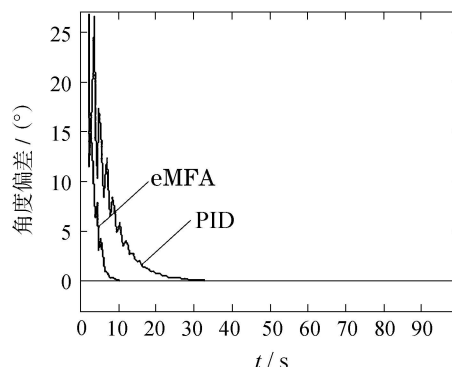


图4 机器人角度偏差

Fig. 4 Orientation error of the wheeled mobile robot

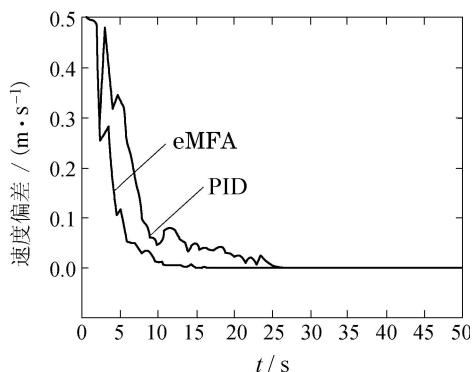


图5 机器人速度偏差

Fig. 5 Speed error of the wheeled mobile robot

需说明的是, 上述设定值并非最优数值. 经限幅处理和代码优化等环节后, 在以NXPLPC2103为核心芯片的嵌入式运动控制系统上进行了实际控制实验. 运动控制实验表明, 在HMC1052测量精度范围内, 方位角最大误差为 $\pm 2^\circ$, 运动速度控制精度高于98%. 编程环境为免费软件WinARM V20080331, LPC2103采用ISP编程方式.

6 结语(Conclusions)

在考虑一阶输出信息基础上, 使用变分原理

得出紧格式线性化eMFAC方程. 以差动驱动轮式移动机器人为研究对象, 将非完整约束和传动系统偏差等作为外部扰动设计了具有前馈功能的机器人Kalman-eMFAC运动控制器, FreeMAT仿真及LPC2103 ARM7系统运动控制实验证实了本方法的有效性. 与滑模变结构及PID等控制方法相比^[15], 采用Kalman-eMFAC方法设计的机器人运动控制器不含参数整定环节、运算量小、收敛速度快、控制精度高, 非常适合在机器人运动控制方面应用. eMFAC方程中的 η , μ , λ 及 ρ 参数优化方法和在线优化理论尚有待研究.

致谢 费燕琼副教授、王永等提供了仿真程序, 上海腾微电子有限公司借用了ConnectPort X4 Starter Kit套件, 致以谢意.

参考文献(References):

- [1] LIU H, WU Y X. Robust dynamical sliding mode control of a class of nonholonomic systems [C] // *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. Dalian: IEEE, 2006, 1: 791 – 796.
- [2] CHEN C Y, LI T S, YEH Y C. EP-based kinematic control and adaptive fuzzy sliding-mode dynamic control for wheeled mobile robots [J]. *Information Sciences*, 2009, 179(2): 180 – 195.
- [3] TZAFESTAS S G, DELIPARASCHOS K M, MOUSTRIS G P. Fuzzy logic path tracking control for autonomous non-holonomic mobile robots: design of system on a chip [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(8): 1017 – 1027.
- [4] DEMIRLI K, KHOSHNEJAD M. Autonomous parallel parking of a car-like mobile robot by a neuro-fuzzy sensor-based controller [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2009, 160(19): 2876 – 2891.
- [5] HASHIMOTO K, HOSOBATA T, SUGAHARA Y, et al. Realization by biped leg-wheeled robot of biped walking and wheel-driven locomotion [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona: IEEE, 2005, 1: 2970 – 2975.
- [6] LIU S C, TAN D L, LIU G J. Robust leader-follower formation control of mobile robots based on a second order kinematics model [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(9): 947 – 953.
- [7] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望 [J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(4): 586 – 592.
(HOU Zhongsheng. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 586 – 592.)
- [8] 王海森, 万彦辉, 孟卫锋. 无模型自适应控制策略在惯性平台调平系统上的应用 [J]. *战术导弹控制技术*, 2006, (1): 86 – 87, 103.
(WANG Haimiao, WAN Yanhui, MENG Weifeng. Application of model-free self-adaptive control tactics to the leveling system of platform inertial navigation system [J]. *Control Technology of Tactical Missile*. 2006, (1): 86 – 87, 103.)
- [9] 马洁, 陈智勇, 侯忠生. 大型舰船综合减摇系统无模型自适应控制 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(11): 1289 – 1292.
(MA Jie, CHEN Zhiyong, HOU Zhongsheng. Model-free adaptive control of integrated roll-reducing system for large warships [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(11): 1289 – 1292.)
- [10] 曹荣敏, 侯忠生. 永磁直线电机的无模型学习自适应控制 [J]. *电气传动*, 2006, 36(7): 22 – 25.
(CAO Rongmin, HOU Zhongsheng. Mode-free learning adaptive control of permanent magnet linear motor [J]. *Electric Drive*, 2006, 36(7): 22 – 25.)
- [11] GERASIMOS G R. Model-based and model-free control of flexible-link robots: a comparison between representative methods [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2009, 33(10): 3906 – 3925.
- [12] LU F L, WANG J F, FAN C J, et al. An improved model-free adaptive control with G function fuzzy reasoning regulation design and its applications [J]. *Journal of Systems and Control Engineering*, 2008, 222(18): 817 – 828.
- [13] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
(HOU Zhongsheng. *Non-parameterized Model and its Adaptive Control Theory* [M]. Beijing: Science Press, 1999.)
- [14] 刘飞祥, 李虹. 无模型控制律的一种改进算法 [J]. *工业控制计算机*, 2008, 21(6): 66 – 67.
(LIU Feixiang, LI Hong. Research of improved model-free adaptive control algorithm [J]. *Industrial Control Computer*, 2008, 21(6): 66 – 67.)
- [15] 宋立博, 李劲松, 费燕琼. 四轮差动驱动型AGV嵌入式运动控制器设计与研究 [J]. *中国机械工程*, 2008, 19(24): 2903 – 2907.
(SONG Libo, LI Jinsong, FEI Yanqiong. Design and research of embedded controller of an 4 - wheel differential drive automate guided vehicle [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(24): 2903 – 2907.)

作者简介:

宋立博 (1973–), 男, 副研究员, 中国机械工程学会工业自动化分会高级会员, 目前研究方向为嵌入式运动控制系统、特种机器人等, E-mail: lbsong@sjtu.edu.cn;

李劲松 (1976–), 男, 工程师, 目前研究方向为移动机器人、飞行器自动控制等, E-mail: ljs@sjtu.edu.cn.