

# 基于 PID 的移动机器人运动控制系统设计与实现

杜孝平, 赵凯琪

(北京航空航天大学软件学院, 北京 100191)

**摘 要:** 介绍了一种自主移动机器人的运动控制系统, 通过自主移动机器人的运动学建模, 提出了一种有效控制机器人沿期望速度和方向运动的 PID 闭环控制方法, 以此开发了以 STC12C5A60S2 微处理器、MC33886 电机驱动芯片与霍尔传感器为主要构件的硬件系统, 以及模块化的软件程序, 实验证实该控制方法有效且稳定。

**关键词:** 自主移动机器人; PID; 运动控制; 速度响应曲线

**中图分类号:** TP242

**文献标识码:** A

## Design and implementation of the motion control system of the mobile robot based on PID

DU Xiao-ping, ZHAO Kai-qi

(School of Software, Beihang University, Beijing 100191)

**Abstract:** A kind of motion control system of the autonomous mobile robot was introduced, and a PID closed-loop control method was proposed that controlling the robot moving along the expected direction and speed effectively through establishing the kinematics model of the autonomous mobile robot. In addition, the modular software program and the hardware system were developed whose main components were the STC12C5A60S2 microprocessor, the MC33886 motor driver chip and hall sensors. Finally, experiments proves the control method and the system effective and stable.

**Key words:** autonomous mobile robot, PID, motion control, velocity-response curve

### 1 引言

移动机器人是一个集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等多功能于一体的综合系统, 是机器人学的一个重要分支。它集中了传感器技术、机械工程、电子工程、计算机工程、自动化控制工程以及人工智能等多学科的研究成果, 代表机电一体化的最高成就, 是目前科学技术发展最活跃的领域之一<sup>[1]</sup>。近几年, 各种各样的移动机器人迅速发展, 被应用到危险的工业领域、军事检测和家庭服务中<sup>[2~4]</sup>, 每个领域的需求不同, 机器人的设计也不同, 可以分为行走机器人、轮式机器人、腿式机器人<sup>[4]</sup>。本文研究的是应用于家庭服务中的双轮差速移动机器人。

空巢老人服务机器人的一个基础功能就是在存在障碍物的环境中自主定位并避开障碍物, 此功

能由机器人的 3 个子系统配合完成, 这 3 个子系统分别为以 ARM9 微处理器为核心的信息处理子系统、以 KS109 超声波传感器阵列为主要构件的环境感知子系统以及本文研究的运动控制系统。机器人运动过程中, ARM9 微处理器作为信息枢纽, 需要从环境感知子系统中获得外界物体相对于机器人本体的位置信息, 从运动控制子系统中获得机器人的位姿信息 (位置和方向), 通过扩展卡尔曼滤波算法进行信息融合, 实现自主定位, 同时, 通过避障算法决定机器人运动状态, 为运动控制系统下发逻辑决策指令 (前行、后退、左转、右转、刹车等) 来避开障碍物。

由上可知, 机器人的运动控制系统至关重要, 决定了本文研制的空巢老人服务机器人整体性能的优劣, 其应主要完成如下 2 个功能。1) 有效执行上层逻辑的运动指令, 使机器人能够按照期望速度

和方向运动。2) 实时计算机器人的位姿信息, 并将其传输到上位机。所以, 研究一套能够可靠稳定地完成上述功能的移动机器人运动控制系统成为亟待研究的课题。

因此, 本文将研究一套基于 PID 闭环控制技术的机器人运动控制系统, 一方面通过建立运动学模型, 保证机器人能够实时将位姿信息传输给上位机, 一方面通过 PID 调节减少机器人实际速度和预设速度之间的误差, 保证机器人能够准确、及时地按照上层逻辑控制程序给定的速度和方向运行, 确保机器人整体运动的稳定可靠。

## 2 自主移动机器人运动学建模

### 2.1 机器人坐标系的建立和转换

为了方便描述现实世界中的真实情况, 研究者往往以全局坐标来描述机器人的行进路线和目标位置。但对于移动机器人而言, 它对外部世界的感知只能依靠自身所携带的各类传感器, 这些传感器获取到的信息很多是以机器人局部坐标的形式给出的, 这就致使机器人系统所获得的目标位置同研究者所期待的目标位置并不处于同一坐标系下, 因此, 本文需要对这 2 种不同的坐标系进行分析和建立并给出其转换关系, 为机器人顺利达成预设目标提供统一的坐标参考形式<sup>[5]</sup>。

移动机器人系统的坐标模型如图 1 所示, 其中,  $XOY$  表示真实环境下的全局坐标系,  $X_R O_R Y_R$  表示机器人坐标系。在室内二维环境下, 机器人的位姿状态可以由其  $X$  轴坐标、 $Y$  轴坐标及其当前运动方向  $\theta$  表示, 机器人的运动方向  $\theta$  定义为机器人坐标系  $Y_R$  与全局坐标系  $Y$  轴之间的夹角, 机器人的位姿状态可用状态向量  $[\mathbf{x}(k), \mathbf{y}(k), \theta(k)]^T$  进行描述。假设空间内的任意一点  $A$ , 其在全局坐标下的坐标值为  $(x, y)$ , 在机器人坐标系下其坐标值为  $(x_a, y_a)$ , 机器人坐标原点在全局坐标下的坐标值为  $(x_R, y_R)$ 。

可以得到自全局坐标系向机器人坐标系进行坐标变换为

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_R \\ y - y_R \end{bmatrix} \quad (1)$$

自机器人坐标系向全局坐标系进行坐标变换为

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

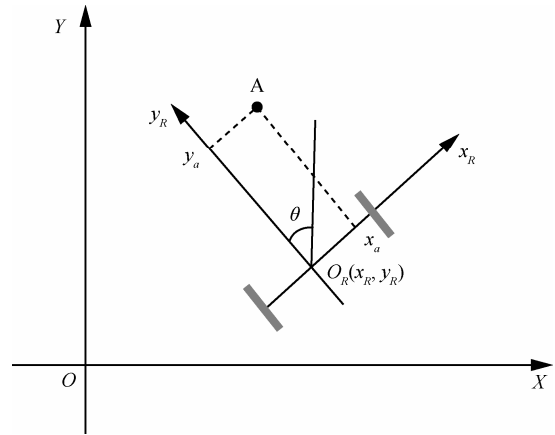


图 1 机器人坐标系

### 2.2 机器人的运动模型

本文所设计的移动机器人平台采用双轮差速驱动方式, 平台底部共有 3 个轮子, 后 2 个为驱动轮, 另外一个为万向从动轮。从动轮并不具备驱动能力, 仅对平台起辅助运动的作用, 故其理论上不会对平台的运动模型产生影响, 不参与分析。

为简化模型复杂度, 本文做出如下假设。

- 1) 机器人在运动过程中不存在驱动轮打滑或整体侧滑的情况。
- 2) 机器人平台可以视作一个刚体, 形变可以忽略。
- 3) 机器人在一个理想的平面上运动, 地面的不规则可以被忽略。

设机器人左右驱动轮的转动角速度分别为  $w_l$  和  $w_r$ , 轮子半径均为  $r$ , 两轮间距为  $L$ 。机器人当前时刻的位姿状态主要受机器人上一时刻的位姿状态和机器人系统控制量的影响。因此, 机器人的状态转移方程可以表示为

$$\mathbf{X}_R(k+1) = f_R(\mathbf{X}_R(k), \mathbf{U}_R(k)) \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{X}_R(k)$  表示机器人  $k$  时刻的位姿,  $\mathbf{X}_R(k) = [x_R(k), y_R(k), \theta_R(k)]^T$ ;  $\mathbf{U}_R(k)$  表示系统在  $k$  时刻的驱动向量,  $\mathbf{U}_R(k) = [w_l(k), w_r(k)]^T$ 。

下面主要研究系统驱动量对机器人位姿的影响。根据机器人的硬件结构和模型假设容易推得, 机器人整体的线速度为  $v = (w_l + w_r) \frac{r}{2}$ , 机器人整体的转动角速度为  $w = \frac{w_r - w_l}{L}$ 。为方便讨论和最终实现, 将机器人的运动状态离散化。假定系统对轮子转速的采样时间为  $T$ , 则系统的状态转移方程可以表述为

$$\begin{bmatrix} x_R(k+1) \\ y_R(k+1) \\ \theta_R(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R(k) + \sin(\theta(k))(w_l(k) + w_r(k))\frac{Tr}{2} \\ y_R(k) + \sin(\theta(k))(w_l(k) + w_r(k))\frac{Tr}{2} \\ \theta_R(k) + (w_r(k) - w_l(k))\frac{T}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 2.3 里程计观测模型

里程计是移动机器人研究中使用最为普遍的传感器之一，因其造价低廉、原理简单而被广泛使用<sup>[3]</sup>。常见的里程计都是将编码器安装在机器人平台的车轮上，通过不断检测编码器的输出来间接获取车轮的运动情况，并以此为依据进一步推断出机器人的位姿状态<sup>[4]</sup>。本文所用的里程计为霍尔传感器，将霍尔传感器安装在直流减速电机的后出轴上，电机每转一圈霍尔传感器会输出一个脉冲信号，电机的减速齿轮箱减速比为 1:60，故轮子每转一圈霍尔传感器会对外输出 60 个脉冲，机器人驱动轮的直径为 64 mm。出于对里程计实际精度的考虑，本文使用圆弧模型来对里程计进行建模以更好地模拟机器人的现实运动情况<sup>[5]</sup>。

假设第  $k$  次采样时刻机器人的位姿状态为  $[x_R(k), y_R(k), \theta_R(k)]^T$ ， $O_R$  为机器人坐标系的坐标原点，现欲推算其下一采样时刻的位姿状态  $[x_R(k+1), y_R(k+1), \theta_R(k+1)]^T$ ，如图 2 所示。

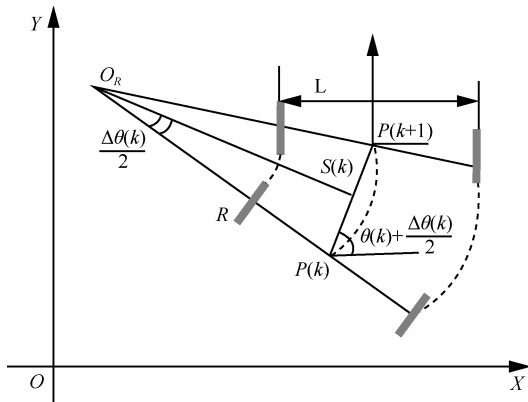


图 2 里程计圆弧模型

设由第  $k$  至  $k+1$  次采样时刻机器人的位姿增量为  $[\Delta x_R(k), \Delta y_R(k), \Delta \theta_R(k)]^T$ ，左轮行走的里程为  $\Delta l(k)$ ，右轮行走的里程为  $\Delta r(k)$ ，采样周期为  $T$ 。通过读取自  $k$  至  $k+1$  时刻机器人左右里程计所输出的脉冲数  $N_l$ 、 $N_r$ ，左右轮各自行驶的里程可以按如下公式计算。

$$\Delta l(k) = N_l \frac{1}{60} \times 64\pi \quad (5)$$

$$\Delta r(k) = N_r \frac{1}{60} \times 64\pi \quad (6)$$

进一步地，机器人的角度增量  $\Delta \theta(k)$  和旋转半径  $R$  可由左右轮的行驶里程计算得知。

$$\Delta \theta(k) = \frac{(\Delta r(k) - \Delta l(k))}{L} \quad (7)$$

$$R = \frac{L \Delta r(k)}{\Delta r(k) - \Delta l(k)} \quad (8)$$

通过三角函数关系可以计算得知该  $\Delta \theta(k)$  所对应的弦长  $S(k)$  为

$$S(k) = L \frac{3\Delta r(k) - \Delta l(k)}{\Delta r(k) - \Delta l(k)} \sin \frac{\Delta \theta}{2} \quad (9)$$

据此，可得  $k$  至  $k+1$  时刻的坐标增量为

$$\Delta x_R(k) = S(k) \cos \left( \theta(k) + \frac{\Delta \theta(k)}{2} \right) \quad (10)$$

$$\Delta y_R(k) = S(k) \sin \left( \theta(k) + \frac{\Delta \theta(k)}{2} \right) \quad (11)$$

最终可得  $k+1$  时刻的机器人位姿为

$$\begin{cases} x_R(k+1) = x_R(k) + \Delta x_R(k) \\ y_R(k+1) = y_R(k) + \Delta y_R(k) \\ \theta_R(k+1) = \theta_R(k) + \Delta \theta_R(k) \end{cases} \quad (12)$$

## 3 自主移动机器人 PID 运动控制系统的设计

### 3.1 机器人运动控制系统的总体设计

本文设计了 PID 闭环控制的机器人运动系统，总体设计如图 3 所示，具体实施过程为控制模块的微处理器产生的 PWM 信号通过电机驱动模块来控制电机的转向和速度，电机转动后，霍尔传感器探测电机的脉冲数并将其传送给控制模块，控制模块计算出双轮的实际转速，将实际转速和预定转速都输入到 PID 模型，PID 模型输出新的 PWM 占空比再次控制电机，使其与预定转速相同。

### 3.2 PID 控制的实现

本控制方法的思路就是将角速度与线速度解耦，首先保证机器人在没有角速度的情况下，能够走直线，然后再将角速度叠加。因此，在机器人运动控制时，采用下面将介绍的 PID 控制方法<sup>[6-9]</sup>，以提高机器人直线运动的精度，其基本思想是将闭环系统反馈回来的实际运行速度与给定的目标运

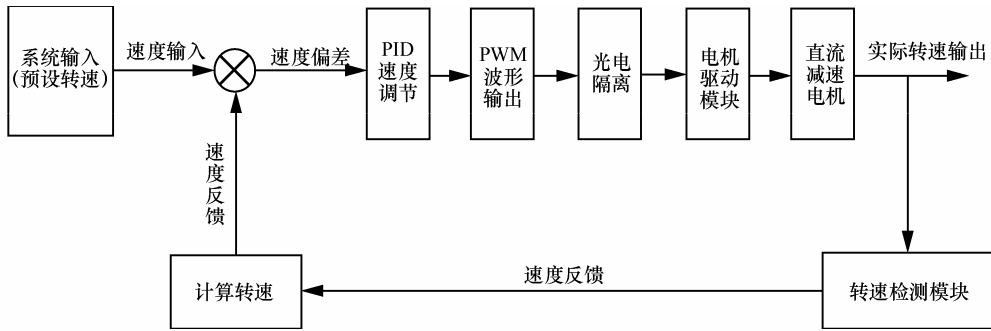


图 3 移动机器人运动控制系统总体结构

行速度进行比较，并将速度误差作为输入量送入 PID 控制器中，经过控制器的比例、微分、积分运算得出相应的误差补偿值，再将补偿过的控制信号送入被控对象进行控制，其原理如图 4 所示。本文采用增量式 PID 算法，其定义为<sup>[6]</sup>

$$u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (13)$$

其中， $u(k)$  为第  $k$  次采样时刻控制器的输出； $e(k)$  为第  $k$  次采样时刻输入的偏差； $K_p$  为比例系数，主要作用是对系统出现的误差做出快速响应； $K_i$  为积分系数，主要作用是消除系统稳态误差提高准确性； $K_d$  为微分系数，主要作用是给出预测量提升系统动态特性。

设第  $k$  次采样时刻机器人的位姿状态为  $[x_R(k), y_R(k), \theta_R(k)]^T$ ，左右轮的预设速度分别为  $v_l'$  和  $v_r'$ ，系统对轮子转速的采样周期为  $T$ ，采样周期内左右里程计所输出的脉冲数为  $N_l$ 、 $N_r$ 。假设机器人沿直线运动， $\Delta\theta(k) = 0$ ，由 2.3 节的式(5)和(6)可计算出左轮行走的里程  $\Delta l(k)$  和右轮行走的里程  $\Delta r(k)$ ，则左、右轮的实际速度  $v_l$  和  $v_r$  分别为

$$v_l = \frac{\Delta l(k)}{T} = \frac{N_l}{T} \frac{1}{60} \times 64\pi \quad (14)$$

$$v_r = \frac{\Delta r(k)}{T} = \frac{N_r}{T} \frac{1}{60} \times 64\pi \quad (15)$$

那么，左、右轮的实际速度和预设速度的误差为

$$e_l(k) = v_l' - v_l \quad (16)$$

$$e_r(k) = v_r' - v_r \quad (17)$$

将此误差输入到 PID 模型中，得到下一时刻发给电机的转速，从而达到控制目的。

由机器人第  $k$  次采样时刻的位姿状态  $[x_R(k), y_R(k), \theta_R(k)]^T$ ，根据 2.3 节中介绍的里程计观测模型，计算出下一时刻机器人位姿状态  $[x_R(k+1), y_R(k+1), \theta_R(k+1)]^T$ ，由微处理器以一定的通信协议将其传给上层，实现机器人运动状态的规划。

#### 4 自主移动机器人运动控制系统的硬件实现

机器人运动控制系统的硬件构架如图 5 所示，控制模块使用的是 STC12C5A60S2 微处理器，电机驱动模块使用的是 MC33886 芯片，并且控制模块和电机驱动模块之间使用 HCPL-2630 光电耦合器对控制信号进行光电隔离处理；速度检测模块使用的是 2 个霍尔传感器，驱动轮的动力源使用的是直流减速电机；此外，采用双电源系统，5 V 的电源为以 STC12C5A60S2 微处理器为核心的控制电路供电，12 V 的电源为直流减速电机供电。

本文采用 STC 公司生产的 STC12C5A60S2 单片机<sup>[10,11]</sup>作为运动控制系统的微控制器，因为它经

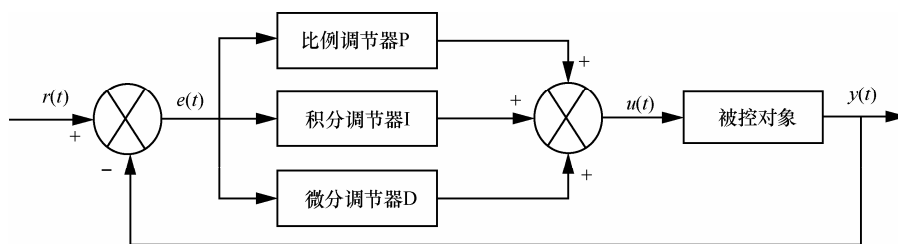


图 4 PID 模型原理

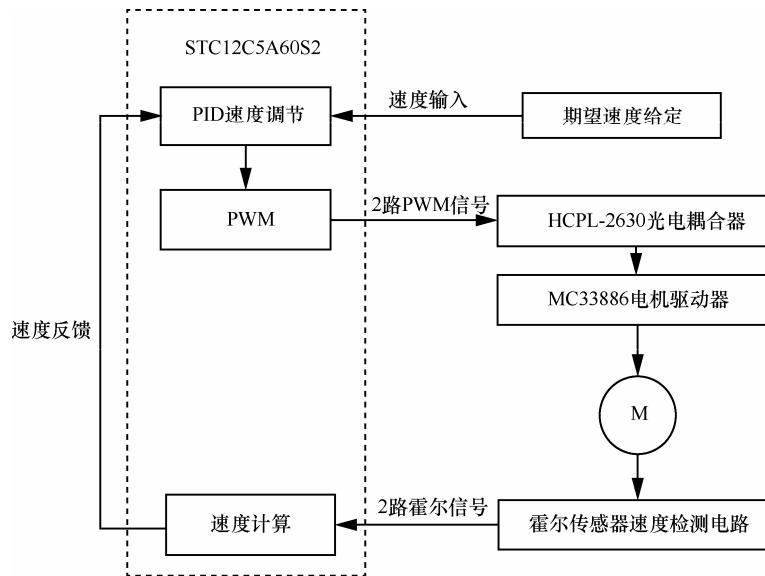


图 5 PID 运动控制系统硬件

过特殊设计可以达到超低的功耗和超强的抗干扰能力，非常适合电机控制应用，除此之外，它的指令代码完全兼容传统 8051 单片机，但速度快 8~12 倍，而且在价格方面也有很大优势。

MC33886 电机驱动芯片是一款单片式电源 IC，可同时驱动 2 个电机，最大能够提供 5.2 A 驱动电流，并可在高达 10 kHz 的频率上实现电机 PWM 调速、正反转、制动等实时控制功能，同时，具备过压、过热、过流保护以及故障状态提示等功能，完全满足了本系统对驱动芯片的要求<sup>[12,13]</sup>。

特别需要注意的是，直流电机在启停、换向时会产生一个瞬时的泵升电压，泵升电压的电压值往往会比驱动器的电压值高出很多，而且电机的转速越高，泵升电压就越高。若任由这种瞬时电压进入控制电路网，会对与之相连的逻辑电路产生极大影响，轻则导致逻辑电路工作不稳定发生系统重启，重则直接击穿或烧毁电路。为了避免这种情况出现，本系统利用 HCPL-2630 光电耦合器对控制信号进行光电隔离处理，避免了控制端与执行端在电路上的直接交互，从而保障电路工作的安全稳定。

本文使用双电源系统，第一类用电模块是以 STC12C5A60S2 微处理器为核心的控制电路，其对瞬时放电能力要求不高，自身功耗也很小，但却对电源的品质要求较高，最好是波纹稳定并具备一定保护功能的电源，7.4 V、2 200 mAh 锂聚合物电池符合此要求，而且它的特点是能量密度高，有利于

系统续航，安全性好，没有记忆效应，方便用户使用，且其自身已经具有电池保护板，可以防止短路、过度充电和过度放电的危险；第二类用电模块是直流电机，电机在启动的瞬间会产生一个极大的冲击电流，这个电流甚至会超过额定电流的 4~7 倍<sup>[12]</sup>，一般电源（尤其是加装了保护电路的电源）根本无法提供如此大的瞬时放电能力，如果电机与上述第一类模块共用一个电源，则有可能导致电机启动的瞬间其他模块失灵或重启，而且电机在换向的时候会产生一个很高的泵升电压，有可能会将其他模块击穿或烧毁，所以选用 11.1 V、4 200 mAh 花牌竞技型锂聚合物电池为直流电机供电，其放电倍率可达 35 C，主要应用于大功率航模飞行表演中，完全可以满足机器人系统中 37 mm 直流减速电机的用电需求。

## 5 自主移动机器人运动控制系统的软件实现

机器人运动控制系统的软件部分，全部采用程序模块化设计，包括初始化模块、中断测速模块、PID 算法模块、PWM 脉宽调制模块，整体的程序流程如图 6 所示。首先初始化 PWM 模块、定时器模块等，开总中断和外部中断，设定速度初值。因为设置相关寄存器使 PWM 信号开始输出，直流减速电机的位置变化引起霍尔信号变化，从而产生外部中断，中断函数统计脉冲数。当定时器 T0 到时，根据脉冲数，计算电机的实际转速。当定时器 T1 到时，将设定转速和实际转速同时输入到 PID 模型

中，输出 PWM 的占空比，重新对电机调速。只要程序运行，就一直进行以上循环，不断调节。

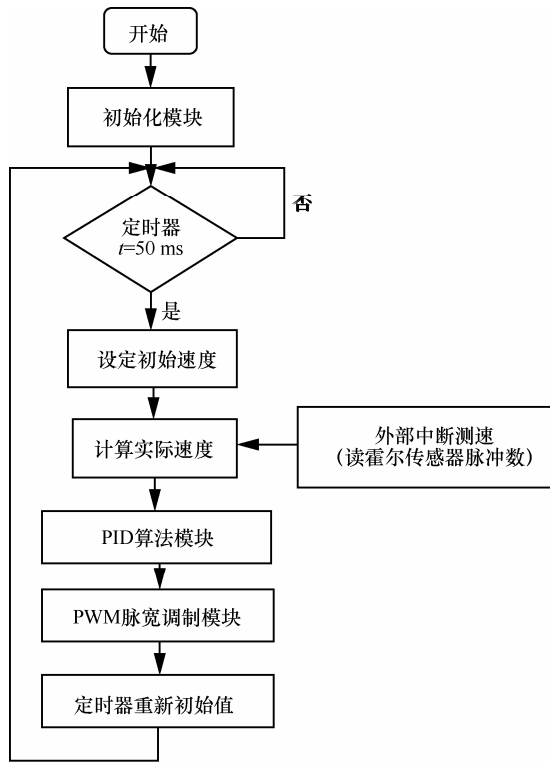


图 6 机器人运动控制系统程序流程

### 6 实验结果和分析

本文研制的自主移动机器人如图 7 所示，令机器人在图 8 的环境中沿直线行走，预设速度为 80 r/min，同时，建立 STC12C5A60S2 单片机和 ARM9 之间的串口通信以及 ARM9 和 PC 机之间的 Wi-Fi 通信，那么即可将机器人的实时速度值发送到 PC 机上保存，并用 Matlab 软件绘出 PID 控制的速度响应曲线，不断调整 PID 模型的 3 个参数，最后取得  $P=3.12$ ， $I=0.5$ ， $D=0.4$ 。



图 7 自主移动机器人实物



图 8 实验环境

图 9 是采用 PID 闭环控制方法得到的机器人速度响应曲线，此时，超调量是 7.5%，调节时间是 4 s，稳态误差是  $\pm 1.25\%$ ，图 10 是理论上 PID 控制最理想的速度响应曲线。由此可知，机器人实际速度响应曲线已经与理论值非常接近，并且 4 s 后机器人实际速度能够基本与预定速度相同，说明本文基于 PID 闭环控制建立的机器人运动系统确实有效且稳定可靠。

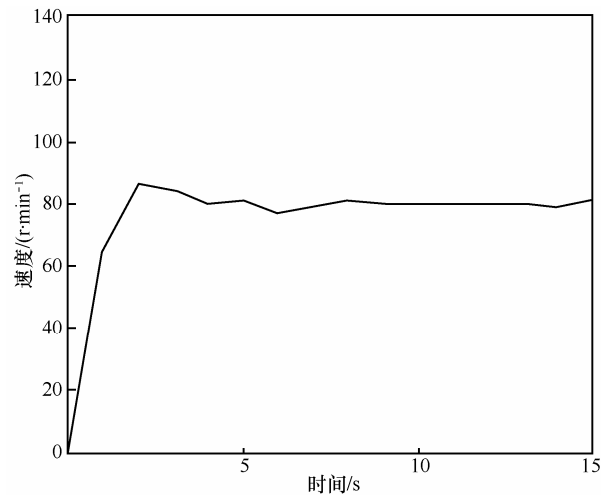


图 9 实际环境 PID 控制响应

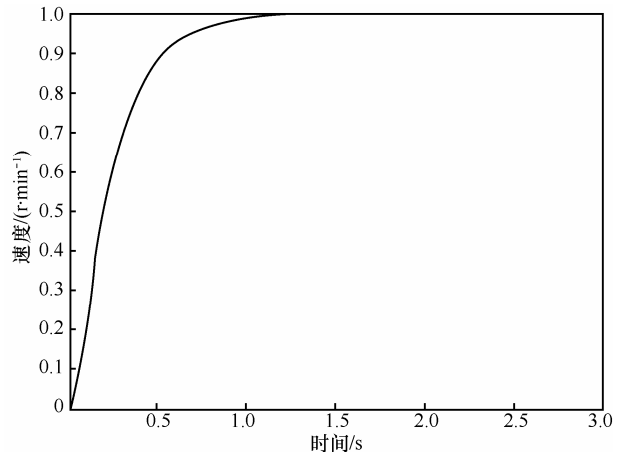


图 10 PID 控制理想响应

对比图 9 和图 10 可知, 本文实验条件下仍然没有达到最理想状态, 其原因可能是机器人机械结构的公差、轮子打滑、负载不均衡、霍尔传感器和直流减速电机精度等因素的影响, 而且虽然本文应用 PID 算法对机器人运动系统进行实时控制, 但任何控制算法都不能保证机器人的运行状态完全准确, 控制系统本身就存在一定的滞后性和不确定性。

## 7 结束语

本文开发了可以自主移动的机器人, 研究了自主移动机器人的运动控制系统, 建立了机器人的运动学模型, 运用 PID 闭环控制方法, 通过调节 PID 算法的参数, 得到了理想的速度响应曲线, 降低了机器人实际速度和预设速度之间的误差, 使机器人能够准确地按照上层逻辑控制程序给定的速度和方向运行, 保证了机器人整体运动的稳定可靠。

在系统实验验证过程中, 发现 PID 控制与理想状态仍存在偏差, 在今后的研究中, 将进一步对其进行动力学建模, 并研究先进的控制算法实现更加精确的控制。

## 参考文献:

- [1] 黄永志, 陈卫东. 两轮移动机器人运动控制系统的设计与实现[J]. 机器人, 2004, 26(1): 40-44.  
HUANG Y Z, CHEN W D. Design and implementation of motion controller of two-wheeled mobile robot[J]. Robots, 2004, 26(1): 40-44.
- [2] LIU S Y, GAO X S, LI K J, et al. A small-sized wall-climbing robot for anti-terror scout[C]//International Conference on Robotics and Biomimetics. 2007: 15-18.
- [3] PALACIAN J, SALSE J A, VALGANON I, et al. Building a mobile robot for a floor cleaning operation in domestic environment[C]//IMTC 2003-Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2003: 20-22.
- [4] KAMIMURA A, KUROKAWA H. High-step climbing by a crawler robot dir-2-realization of automatic climbing motion[C]//The 2009 IEEE/RJS, International Conference on Intelligent Robotics and Systems. 2009:11-15.
- [5] 祁红岩, 梁燕华. 基于 TMS320F2812 的移动机器人控制系统设计[J]. 现代科学仪器, 2010, 23(3): 27-29.  
QI H Y, LIANG Y H. Control system design of mobile robot based on TMS320F2812[J]. Modern Scientific Instruments 2010, 23(3): 27-29.
- [6] 张文杰. 基于多传感器室内移动机器人自主定位方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2009.  
ZHANG W J. Research on mobile robots localizations based on multi-sensor[D]. Harbin Institute of Technology 2009.
- [7] 汪海燕, 李娟娟, 张敬华. 自适应模糊 PID 控制的无刷直流电机及仿真[J]. 微电机, 2003, 36(4): 41-44.  
WANG H Y, LI J J, ZHANG J H. The design of BLDCM's self-adaptive PID controller and system's simulation[J]. Micro-motors, 2003, 36(4): 41-44.
- [8] 李琳, 曾孟雄. 模糊 PID 控制在运动控制中的应用[J]. 机械与电子, 2006, 25(2):65-67.  
LI L, ZENG M X, Fuzzy PID controller's application in motion control system[J]. mechanical and Electronic, 2006, 25(2): 65-67.
- [9] 李东亮, 毋玉芝. 模糊自适应 PID 控制器在足球机器人中的应用[J]. 微计算机信息. 2008, 24(23): 282-283.  
LI D L, WU Y Z. Application of fuzzy self-tuning PID controller in soccer robot[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(23): 282-283.
- [10] ARKIN R C. Motor schema-based mobile robot navigation [J]. International Journal of Robotics Research, 1987, 8(4): 92-112.
- [11] ASAMA H, SATO M, BOGONI L, et al. Development of an omni-directional mobile robot with 3D of decoupling drive mechanism[J]. 1995 IEEE International Conference, 1995, 2(2): 1925-1930.
- [12] 罗丹羽, 张丽娟, 崔均亮. 智能功率模块 PS21265 在直流无刷电机伺服系统中的应用[J]. 电气开关, 2013, 51(6): 84-86.  
LUO D Y, ZHANG L J, CUI J L. Application of IPM PS21265 in BLDCM servo system [J]. Electrical Switch. 2013, 51(6): 84-86.
- [13] 郑宏. 移动机器人导航和 SLAM 系统研究[D]. 上海交通大学, 2007.  
ZHENG H. Navigation and slam system for mobile robot[D]. Shanghai Jiaotong University, 2007.

## 作者简介:



杜孝平 (1962-), 男, 重庆人, 博士, 北京航空航天大学教授, 主要研究方向为数据挖掘技术及应用、大数据处理、智能交通技术等。



赵凯琪 (1992-), 女, 河北张家口人, 北京航空航天大学硕士生, 主要研究方向为移动机器人运动控制、数据挖掘。