

# 智能车转弯控制算法的仿真及分析

秦 刚, 杜 超, 吴丹怡

(西安工业大学, 陕西 西安 710032)

**摘 要:** 针对智能车平滑转弯的问题, 文中提出了一种PID控制和预测控制相结合的控制算法。该算法借助预测控制算法的递推关系, 有效地结合PID三个参数, 实现对PID参数自整定和优化。文中的智能车导向系统选用的是电磁导引差速型转向控制, 并用系统辨识中阶跃响应参数辨识的方法对电机建立近似模型, 检测智能车在多种干扰信号下跟踪导引线的运行特性。借助MATLAB仿真工具对电机模型进行曲线仿真, 仿真结果表明: 电机能够充分利用当前已经检测到的路径信息做出转弯响应, 并预测估计出下一时刻电机的转向信息, 即使在多种干扰信号的情况下电机也能够平滑入弯, 实现实时导线的轨迹跟踪。

**关键词:** PID控制; 预测控制; 电磁导引; 路径检测; 轨迹跟踪

中图分类号: TP242.6; TP391.99 文献标识码: B 文章编号: 1003-7241(2012)12-0049-06

## Simulation and Analysis on Intelligent Car Turning Control Algorithm

QIN Gang, DU Chao, WU Dan-yi

(Xi'an Technological University Electronic-Information Engineering College, Xi'an 710032 China)

**Abstract:** In allusion to the problems having appeared in intelligent car smooth turning, this thesis proposes a sort of control algorithm combining PID control with predictive control. With the help of recurrence relations of predictive control, this control algorithm effectively combines three parameters of PID and realizes the setting and optimization of PID parameters. And the intelligent car guiding system in this thesis selects and uses electromagnetic guidance differential type steering control and employs the method of step response parameters identification in system identification in establish approximate model for motor. In addition, it tests the operation characteristics of intelligent car tracking the guide lines under the influence of interference signals. The MATLAB simulation tool carries out the curve simulation for motor model. And the result of simulation shows that the motor can make full use of current detected routing information to make turning response and can predict and estimate the turning information in the next moment. Even under the influence of various interference signals, the motor can achieve smooth entry and realize trajectory tracking of real-time wires.

**Key words:** PID control; predictive control; electromagnetic guidance; path detection; trajectory tracking

### 1 引言

智能汽车是汽车电子、人工智能、模式识别、自动控制、计算机、机械等多个学科领域的交叉综合的体现, 利用传感器对道路的信息进行采集和处理, 在此基础上利用合理的算法控制智能车的导向和加减速, 从而使得智能车能够快速稳定的自动行驶。对于一个智能车系统来说, 它的导向控制是整个系统能否正常运行的关键, 而对于电机转向控制系统而言, 若单纯采用传统

PID控制, 模型的参数难以精确测算和确定, 因而很难建立控制对象的精确模型, 从而难以获得良好的控制效果, 因此文中采用系统辨识的方法对电机进行近似建模。预测控制是对模型精确性要求不高的情况下, 采用多步预测, 滚动优化和反馈校正等控制策略, 且具有控制效果好、鲁棒性强等优点<sup>[1]</sup>。文中提出了一种PID控制和预测控制结合的控制算法, 把电机作为控制对象, 使得智能车系统能够很好的根据当前时刻路径传感器采集的路径信息预测出下一时刻的路径信息, 提前做好

转弯的准备,达到转弯平滑的效果。文中通过数学推导为预测控制和PID控制建立起一种广义联系,并在此基础上,详细阐述了基于该算法控制器的设计方法,并通过仿真实例来说明其控制算法的优越性。

## 2 智能车电机动态模型的建立

本文以智能汽车为模型,基于电磁传感器即选用电磁导引的方式,通过在车体前方安装的绕线电感作为路径传感器实现对路径信息的检测,采用MC9S12XS128微控制器,构建自主寻迹控制系统。智能车系统的控制结构是以微处理器为核心,车速控制器、直流电机和测速传感器构成一个闭环,该闭环的输入为路径判别后经模糊控制处理后的速度给定,输出直接驱动后轮;而舵机控制器构成一个控制系统通道,其输入为模糊处理后的路径转角偏差,输出直接控制前轮转向;最后以车体位置情况作为道路识别反馈控制器的输入,其输出直接与道路中心线参数比较从而构成一个大的闭环控制系统。

车体在行驶中,对偏移角度控制要求精确。本设计是通过左右两个独立电机的差速控制驱动电机转向,纠正车体姿态,对于偏移角度 $\theta$ 有:

$\theta > 0$  时,左电机减速,左转弯;

$\theta < 0$  时,右电机减速,右转弯;

$\theta = 0$  时,左右电机同步控制,直行。

为了使得智能车能够准确的跟踪导引线并平滑转弯,实时轨迹跟踪,偏移距离 $d$ 和偏移角度 $\theta$ 的耦合关系以及导向电机的控制是关键。由于电机模型难以精确建立,故采取了对电机模型参数辨识的方法<sup>[2-4]</sup>,得到近似模型,然后通过对模型结合算法进行实验仿真验证其可行性。具体步骤如下:

(1) 某一时刻,控制器给定直流电机驱动电路PWM信号,占空比为25%,测得当前时刻电机的转速值并记录,得到转速的阶跃响应曲线。

(2) 通过对阶跃响应曲线的分析,通过系统辨识的方法辨识电机模型的数学模型的参数。

(3) 通过MATLAB仿真工具箱对电机数学模型参数验证其辨识的准确性。

阶跃响应法是常用的经典辨识方法之一,它是通过实验数据来描述系统的阶跃响应曲线,再由曲线计算出被辨识对象的模型参数的一种方法。首先根据步骤(1)得到电机速度的阶跃响应数据如表1所示(所测的速度数据为相对速度,与选用的编码器有关)。

表1 电机速度的阶跃响应数据

$t/s$	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
$v$	0	30	55	67	89	113	150	189
4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8
190	190	182	182	181	181	182	182	187

对上述数据进行分析,且在工业系统中,电机模型通常用二阶模型描述,数学模型结构为:

$$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (1)$$

只要求出参数 $K$ 、 $T$ 和 $\xi$ ,就确定了电机数学模型。式(1)的 $G(s)$ 可以分解为

$$G(s) = \frac{K}{T^2(s + \omega_1)(s + \omega_2)} \quad (2)$$

求解

$$\begin{cases} K = \frac{y(\infty)}{U_0} \\ \omega_1 = \frac{1}{T}(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}) \\ \omega_2 = \frac{1}{T}(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $U_0$ 为阶跃响应的速度幅值,当 $\xi \leq 1$ ,故

$$\begin{cases} T = \frac{1}{\sqrt{\omega_1 \omega_2}} \\ \xi = \frac{\omega_1 \omega_2}{\sqrt{\omega_1 \omega_2}} \end{cases} \quad (4)$$

因此,只要由实验曲线计算出 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 后,即可求得 $T$ 和 $\xi$ ,为了便于分析,将式(2)改写成

$$G(s) = \frac{K \omega_1 \omega_2}{(s + \omega_1)(s + \omega_2)} \quad (5)$$

当输入为单位阶跃响应时,对式(5)进行Laplace逆变换,得到

$$y^*(t) = 1 - \frac{\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} e^{-\omega_1 t} + \frac{\omega_2}{\omega_2 - \omega_1} e^{-\omega_2 t}$$

或者为

$$1 - y^*(t) = 1 - \frac{\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} e^{-\omega_1 t} + \frac{\omega_2}{\omega_2 - \omega_1} e^{-\omega_2 t} \quad (6)$$

令: $\omega_2 = \alpha \omega_1$ 代入式(6)可得

表2 阶跃响应速度归一化数据

$t/s$	0	0.5	1	1.5	2	2.5
$y^*(t)$	0	0.1579	0.2895	0.3526	0.4684	0.5947
$t/s$	3	3.5	4	4.5	5	5.5
$y^*(t)$	0.7895	0.9947	1	1	0.9579	0.9579
$t/s$	6	6.5	7	7.5	8	
$y^*(t)$	0.9526	0.9526	0.9579	0.9579	0.9842	

$$1 - y^*(t) = \frac{\alpha}{\alpha - 1} e^{-\omega_1 t} - \frac{1}{\alpha - 1} e^{-\alpha \omega_1 t}$$

$$= \frac{\alpha}{\alpha - 1} e^{-\omega_1 t} \left[ 1 - \frac{1}{\alpha} e^{-(\alpha - 1)\omega_1 t} \right] \quad (7)$$

对式(7)取以10为底的对数,得

$$\log[1 - y^*(t)] = \log \frac{\alpha}{\alpha - 1} - \omega_1 t \log e + \log \left[ 1 - \frac{1}{\alpha} e^{-(\alpha - 1)\omega_1 t} \right] \quad (8)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\log \left[ 1 - \frac{1}{\alpha} e^{-(\alpha - 1)\omega_1 t} \right] \rightarrow 0$ , 则式(8)简

化为

$$\log[1 - y^*(t)] = \log \frac{\alpha}{\alpha - 1} - \omega_1 t \log e = \log \frac{\alpha}{\alpha - 1} - 0.4343 \omega_1 t \quad (9)$$

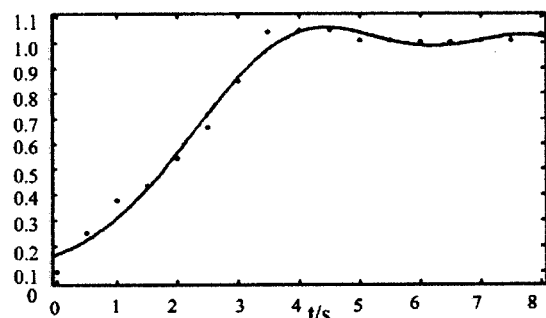


图1 阶跃响应归一化后  $y^*(t)$  的曲线

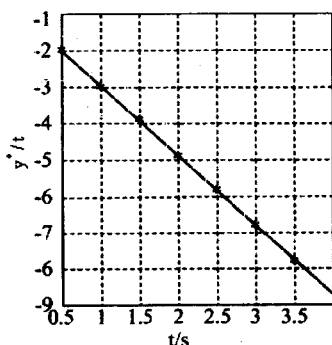


图2  $y^*(t)$  拟合后的直线

表2所示为阶跃响应归一化数据,图1是归一化数据曲线图。

从上图可以看出,在0到4.5s之间曲线可以近似视为直线。式(9)中,当  $t \rightarrow \infty$  时,趋近于一条直线如图2所示,将(9)式化为一般直线方程形式:

式中:

$$\begin{cases} y = at + b \\ a = -0.4343 \omega_1 \\ b = \log \frac{\alpha}{\alpha - 1} \end{cases} \quad (10)$$

为了消除数据误差干扰,需要利用最小二乘原理确定参数  $a$ ,  $b$  的值。设表2中任一组数据为:  $(t_i, y^*(t_i)), i = 1, 2, 3, \dots, n$ , 则每一个观测数据点与拟合曲线的偏差为:

$$y^*(t) - y_i^*(t) = at_i + b - y_i^*(t), i = 1, 2, 3, \dots, n$$

而偏差的平方和为

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a, b)}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (at_i + b - y_i^*(t)) t_i = 0 \\ \frac{\partial F(a, b)}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (at_i + b - y_i^*(t)) = 0 \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i y_i^*(t) \\ a \sum_{i=1}^n t_i + bn = \sum_{i=1}^n y_i^*(t) \end{cases} \quad (11)$$

解式(11)方程组,求的  $a, b$  的值:

$$\left\{ \begin{aligned} a &= \frac{n \sum_{i=1}^n t_i y_i^*(t) - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n y_i^*(t)}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n t_i} \\ b &= \frac{(\sum_{i=1}^n y_i^*(t) - a \sum_{i=1}^n t_i)}{n} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

结合式(9)即可求得  $\omega_1$  和  $\omega_2$  :

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_1 &= -2.303a \\ \omega_2 &= \frac{1}{1-10^{-b}} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

将式(13)代入式(4)可以求出  $T$  和  $\xi$ , 在 MATLAB 的编译环境下, 根据表 2 和式(13)、式(12)编写程序, 生成的电机数学模型和参数结果如下所示:

$$G(s) = \frac{1.3956}{(s+1.118)(s+1.249)}$$

$$T = 0.8465$$

$$\xi = 1.1814$$

### 3 PID 预测控制算法

#### 3.1 预测控制理论

预测控制算法对模型精确性要求不高, 采用了多步预测, 滚动优化和反馈校正等控制策略, 且具有控制效果好、鲁棒性强等优点。能够根据系统的历史信息 and 选定的未来控制输入, 预测系统的未来输出值, 从而能够更好的控制转向电机转弯。预测控制的模型采用最小方差控制受控自回归积分滑动平均(CARIMA)模型来描述受随机干扰的对象, 这个预测模型可以写成<sup>[5-9]</sup>

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k-1) + C(z^{-1})\xi(k)/\Delta \quad (14)$$

式中:  $\Delta$  为差分算子,  $\Delta = 1 - z^{-1}$ ;  $y(k)$ 、 $u(k)$  和  $\xi(k)$  分别表示输出、输入和均值为零的白噪声序列。

$$A(z^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i}, B(z^{-1}) = \sum_{i=0}^{n_b} b_i z^{-i}, C(z^{-1}) = 1$$

滚动优化的目标函数:

$$J = E\left\{ \sum_{j=1}^n [\hat{y}(t+j) - y_r(t)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right\} \quad (15)$$

( $j=1, 2, \dots, n$ )

式中:  $n$  为最大预测长度, 一般应大于  $B(z^{-1})$  的阶数,  $m$  为控制长度 ( $m \leq n$ );  $\lambda(j)$  是大于零的控制加权

系数。

根据预测理论, 为了预测超前  $j$  步输出, 引入丢番图 Dioaphanyine 方程

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}) \quad (16)$$

$$E_j(z^{-1})B(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1})$$

可得 CARIMA 模型的  $j$  步预测输出值为:

$$y(t+j) = G_j(z^{-1})\Delta u(t+j-1) + F_j(z^{-1})y(t) + H_j\Delta u(t-1) + E_j(z^{-1})\xi(t+j) \quad (17)$$

所以  $t+j$  时刻  $y(t+j)$  的最优预测值可表示为

$$\hat{y}(t+j) = G_j\Delta u(t+j-1) + F_j y(t) + H_j\Delta u(t-1) \quad (18)$$

其目标函数向量形式为:

$$J = E\{(y - y_r)^T + u^T \lambda u\} \quad (19)$$

定义给定输入为:

$$y_r^T = [y_r(t+1), \dots, y_r(t+n)] \quad (20)$$

将最优预测值  $y$  和输入给定值  $y_r$  代入上式, 则使  $u$  取最小值的控制律为:

$$u(t) = \sum_{j=1}^n p_j y_r(t) - \sum_{j=1}^n p_j F_j(z^{-1})y(t) - \sum_{j=1}^n p_j H_j(z^{-1})\Delta u(t-1) + p_1 \sum_{i=1}^{n_b} \lambda_i^1 \Delta u(t-i) \quad (21)$$

#### 3.2 PID 控制器

连续时间 PID 调节器的传递函数可有以下式导出:

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{dt(t)}{dt} \right] \quad (22)$$

式中,  $e(t)$  为给定输入  $y_r(t)$  与实际输入  $y(t)$  的差, 即控制器的输入,  $u(t)$  为控制器的输出,  $k_p$  为比例系数, 或称比例增益,  $T_I$  为积分时间常数,  $T_D$  为微分时间常数。因此调节器的传函  $G_c(s)$  为:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + \frac{k_p}{T_I s} + k_p T_D s = \frac{k_p T_I T_D s^2 + k_p T_I s + k_p}{T_I s} \quad (23)$$

用差分近似上式中的微分, 可导出离散时间 PID 控制的差分方程如下:

$$u(t) = u(t-1) + p_0 e(t) + p_1 e(t-1) + p_2 e(t-2) \quad (24)$$

通过 Z 变换可以得到 PID 调节器的离散时间传递函数  $G_c(z)$  如下:

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = k_p + \frac{k_I}{1-z^{-1}} + k_D(1-z^{-1}) = \frac{p_0 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2}}{1-z^{-1}}$$

式中,

$$p_0 = k_p + k_I + k_D = k_p + k_p \frac{T_s}{T_I} + k_p \frac{T_D}{T_s}$$

$$p_1 = -k_p - 2k_D = -k_p - 2k_p \frac{T_D}{T_s},$$

$$p_2 = k_D = k_p \frac{T_D}{T_s}$$

其中,  $T_s$  为采样周期,  $k_p$  为比例系数,  $k_I$  为积分系数,  $k_D$  为微分系数。

PID 调节器的一般表达式可表示为:

$$L(z^{-1})u(t) = M(z^{-1})y_r(t) - N(z^{-1})y(t) \quad (25)$$

### 3.3 PID预测控制器的建立

根据PID控制与预测控制规律的相似性,把PID控制和预测控制有效地结合起来,并借助预测控制算法的递推关系,以实现PID参数自动整定和优化。

结合式(21)和式(25),令

$$L(z^{-1}) = \Delta = 1 - z^{-1}$$

$$M(z^{-1}) = \sum_{j=1}^n p_j, N(z^{-1}) = \sum_{j=1}^n p_j F_j(z^{-1})$$

$$\sum_{j=1}^n p_j H_j(z^{-1}) \Delta u(t-1) = p_1 \sum_{i=1}^{n_b} \lambda_i^1 \Delta u(t-i),$$

$$\lambda_i^1 = \frac{1}{p_1} \sum_{j=1}^n p_j h_{i-1}^j \quad (i=1, 2, \dots, n_b)$$

考虑如下速度型PID调节器结构为:

$$u(t) = \frac{k_I}{1-z^{-1}} e(t) - [k_p + (1-z^{-1})k_D]y(t)$$

即

$$(1-z^{-1})u(t) = k_I y_r(t) - [k_I + (1-z^{-1})k_p + (1-z^{-1})^2 k_D]y(t) = k_I y_r(t) - [(k_p + k_I + k_D) - (k_p + 2k_D)z^{-1} + k_D z^{-2}]y(t) \quad (26)$$

$$\text{可得 } L(z^{-1}) = \Delta = 1 - z^{-1}, M(z^{-1}) = k_p = \sum_{j=1}^n p_j$$

$$N(z^{-1}) = (k_p + k_I + k_D) - (k_p + 2k_D)z^{-1} + k_D z^{-2} = \sum_{j=1}^n p_j F_j(z^{-1}) = \sum_{j=1}^n p_j f_0^j + \sum_{j=1}^n p_j f_1^j z^{-1} + \sum_{j=1}^n p_j f_2^j z^{-2}$$

$$\text{解得 } k_p = -\sum_{j=1}^n p_j (f_1^j + 2f_2^j), k_I = \sum_{j=1}^n p_j,$$

$$k_D = \sum_{j=1}^n p_j f_2^j \quad (27)$$

将式(27)代入式(26)并整理,可得控制  $u(t)$  的表达式

$$u(t) = u(t-1) - \sum_{j=1}^n p_j (f_1^j + 2f_2^j)[y(t-1) - y(t)] +$$

$$\sum_{j=1}^n p_j [y_r(t) - y(t)] + \sum_{j=1}^n p_j f_2^j [2y(t-1) - y(t-2) - y(t)] \quad (28)$$

下面给出PID结构的预测控制算法的步骤:

(1) 设定被控对象阶次  $n_b$ , 预测时域  $n$  和控制时域  $m$ , 性能指标加权序列  $\lambda(j)$ , ( $j=1, 2, \dots, n$ );

(2) 在线估计被控对象多项式系数  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$ ;

(3) 用Dioaphanyine方程的递推求解  $G_j(z^{-1})$  和  $F_j(z^{-1})$ ;

(4) 用

$$[p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)] = [1, 0, \dots, 0][G^T(t)G(t) + \lambda_0^j]^{-1} G^T(t)$$

求  $p_j(t)$ ;

(5) 用式(27)求的  $k_p, k_I, k_D$ ;

(6) 用式(28)计算控制量  $u(t)$ ;

(7)  $t = t + 1$ , 返回到第二步。

## 4 仿真实例及分析

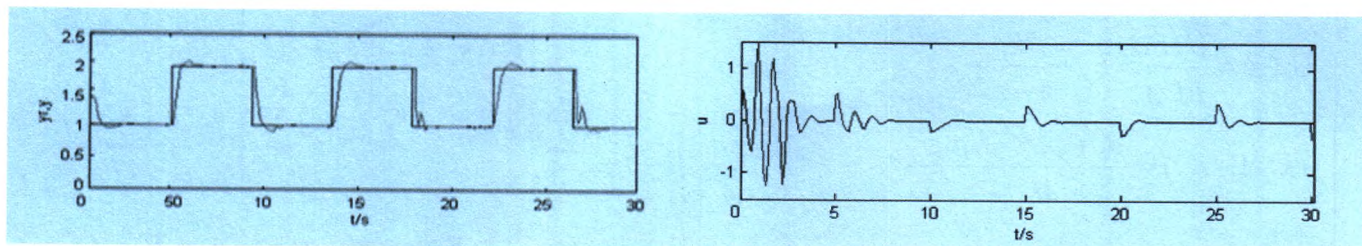
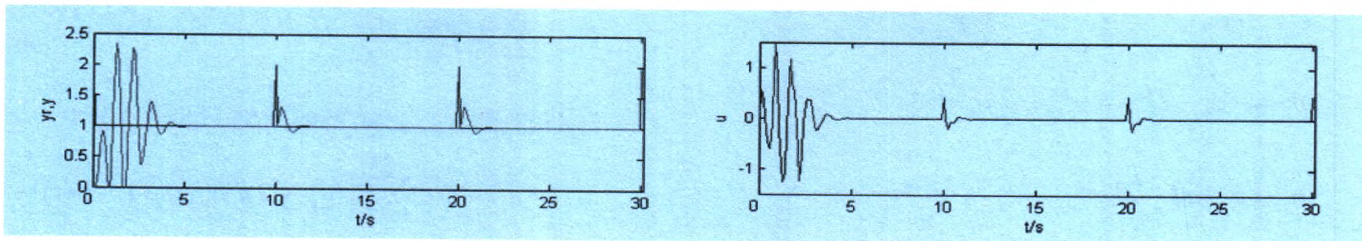
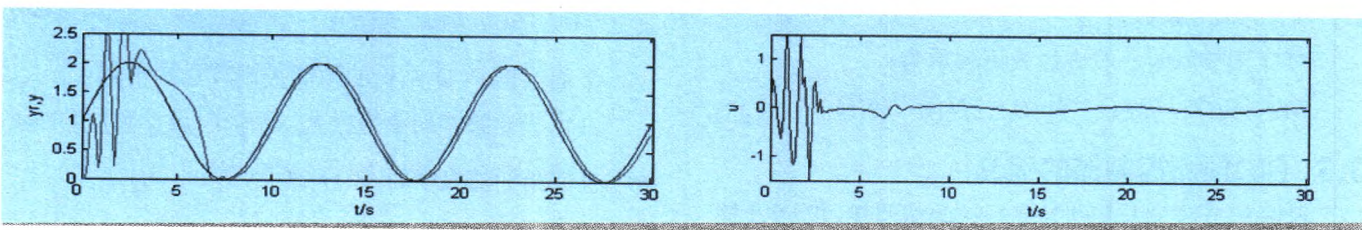
上述已经通过最小二乘参数辨识的方法得到电机的近似模型,结合PID预测控制算法的实现,用MATLAB仿真工具箱对电机对象进行算法仿真验证,

$$\text{其对象模型为: } G(s) = \frac{1.3956}{(s+1.118)(s+1.249)}$$

PID预测控制器的参数为:时域长度  $p$  和预测长度  $n$  为  $p=n=6$ , 控制长度  $m=2$ , 控制加权系数  $\lambda=0.8$ ,  $\lambda_1=1$ , 柔化系数  $\alpha=0.3$ ,  $k_p=1.3, k_I=0.3, k_d=1.6$ 。

图中,给定输入  $y_r$  周期为100,时间为  $T$ ,幅值为1



图3 方波干扰下输入  $y_r$  和预测输出  $y$  的轨迹跟踪和控制增量  $u$  的输出曲线图4 脉冲干扰下输入  $y_r$  和预测输出  $y$  的轨迹跟踪和控制增量  $u$  的输出曲线图5 正弦干扰下输入  $y_r$  和预测输出  $y$  的轨迹跟踪和控制增量  $u$  的输出曲线

的方波干扰信号、脉冲干扰信号、正弦干扰信号,  $y$  为在干扰信号下的预测输出跟踪轨迹,如图3至图5所示:

文中通过对电机理想模型的控制算法仿真实验发现,该方法具有良好的超前预测性能,在不同的干扰下,电机输出以较高的精度跟随期望输入信号,误差几乎为0,鲁棒性强等特点。对于控制增量  $u$  的输出稳定时间明显缩短,在7秒以后出现了周期性的超调量,使得预测的输出更为准确。该算法能有效的抑制超调,实时跟踪性能明显优于一般的PID控制,具有较强的鲁棒性。

## 5 结束语

文中通过得到电机的近似模型,把路径传感器检测到的路径信息作为电机转向控制的给定输入,借助PID预测控制算法,使得电机在扰动信号的作用下,能够预测输出以较高精度的轨迹跟踪路径检测传感器给定的输入信号。从仿真的曲线可以看出,该方法输出曲线跟随给定输入曲线误差比较小,电机能够很好的响应转弯,达到预想的效果。

## 参考文献:

- [1] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
- [2] 张玉择. 系统辨识与建模[M]. 北京:水利电力出版社,1995.11.
- [3] 任永益,饶鹏,潘孟春. 自动导向车控制系统的数学模型及应用[J]. 国防科技大学学报,2006,19(6):43.
- [4] 刘彩虹. 智能小车路径跟踪技术的研究[D]. 杭州:浙江大学 2007.6.
- [5] 雷贞勇,谢光骥. 飞思卡尔智能车舵机和测速的控制设计与实现[J]. 西安交通大学学报,2010.02,18(2):91.
- [6] 师五喜. 预测控制中Diophantine方程的显式解[J]. 自动化学报,2006,32(1):150.
- [7] 张萍,屈宝存. 非最小相位系统的PID预测自校正控制器[J]. 控制与决策,2007,23(7):15-18.
- [8] MILLER R M, SHAH S L, WOOD R K, et al. Forecast and PID control technology [J]. ISA Transactions, 2008,38(1):11-23.
- [9] NORMEY-RICO J E, GO J, CAMACHO E F. A Smith-predictor-based generalized predictive controller for mobile robot path-tracking[J]. Control Engineering Practice, 2008,16(4):407-428.

作者简介:秦刚(1968-)男,副教授,研究方向:智能控制和人工智能。