

基于前馈和改进 PID 的汽车电子节气门控制策略研究

张国飞, 罗翔

(东南大学机械工程学院, 南京 211189)

摘要: 本文建立了电子节气门的系统模型。针对电子节气门中复位弹簧的非线性特性, 设计了前馈补偿器将系统转化为线性系统; 针对传统 PID 控制的不足和被控电子节气门的特性, 设计了包含死区的变速积分环节和包含低通滤波的微分环节; 通过 MATLAB 仿真证明了算法良好的控制特性。最后, 通过阶跃响应实验和正弦曲线跟随实验验证了所设计的控制算法实现了电子节气门预期的控制目标。

关键词: 机械电子工程; 电子节气门; 前馈控制; 改进 PID 控制

中图分类号: U464.1

Control strategy design of automobile electronic throttle based on feedforward and improved PID

Zhang Guofei, Luo Xiang

(Mechanical Engineering School, Southeast University, Nanjing 211189)

Abstract: This paper establishes a system model of electronic throttle. Aimed at the nonlinear characteristics of the return spring in the electronic throttle, a feedforward compensator is designed to convert the system into a linear system. In view of the deficiencies of the traditional PID control and the characteristics of the controlled electronic throttle, a improved PID controller having dead zone, variable speed characteristic in integrator, and filter in differentiator is designed. The algorithm performs well in simulation. Finally, it is verified that the control algorithm realizes the expected control target of electronic throttle by step response experiment.

Key words: mechatronic engineering; electronic throttle; feedforward control; PID control

0 引言

电子节气门是汽车上发动机系统的重要部件, 其作用是控制发动机的进气口开度, 使发动机达到最佳的空燃比^[1]。在汽车行驶过程中, 车载电子控制单元 (ECU) 根据路况、驾驶员意图、驾驶模式、天气等信息, 通过内部算法的处理得出当前状态下节气门最理想的开度, 并最终通过驱动电路控制节气门精确地达到期望的位置。因此, 电子节气门控制系统的性能很大程度上影响着发动机系统的性能。

电子节气门系统中存在很多非线性环节, 因此系统的输出角度很难精确的跟随期望角度。目前, 针对汽车电子节气门系统控制策略的研究成果颇丰, 涉及的方向有模糊控制^[2]、滑模控制^[3]、神经网络^[4]等。但上述的控制策略, 或是依赖于大量的工程经验, 或是基于复杂的理论推导且难以保证系统的收敛性和稳定性, 工程应用价值较低。PID 控制在实际的工程中应用最为广泛, 但传统的 PID 控制器难以满足控制需求; 前馈控制可以基于可测量的变量或干扰, 直接在控制器输出端施加影响, 能够显著提高系统的响应速度。本文将设计一种基于前馈和改进 PID 的复合控制, 在保证系统简洁的同时, 实现电子节气门的良好控制。

作者简介: 张国飞 (1992-), 男, 硕士研究生, 汽车电子节气门控制技术

通信联系人: 罗翔 (1968-), 男, 教授、博导, 主要研究方向: 两足步行的机理和机构学. E-mail: luox@seu.edu.cn

40

1 电子节气门建模

本文以国内某公司的汽车电子节气门产品为研究对象,其结构简图如图 1 所示。电子节气门主要包括直流伺服电机、齿轮传动机构、复位弹簧、碟阀等部分。

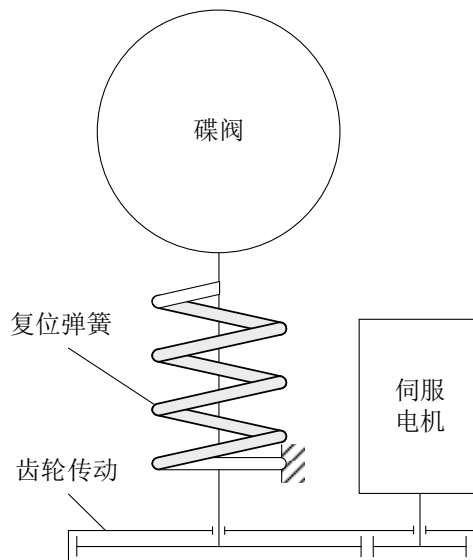


图 1 电子节气门机构简图

45

Fig.1 Mechanism schematic of electronic throttle

1.1 直流伺服电机模型

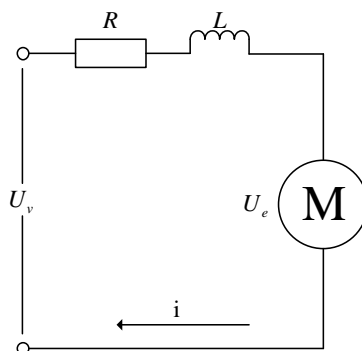


图 2 直流伺服电机等效模型

Fig.2 Equivalent model of DC servo motor

50

直流伺服电机的等效模型如图 2 所示,其电压平衡方程为

$$U_v = Ri + L\dot{i} + U_e \quad (1)$$

$$U_e = k_b \dot{\theta}_m \quad (2)$$

$$T_m = k_t i \quad (3)$$

其中 U_v 为电机的输入电压, i 为电枢电流, R 为电机的等效电阻, L 为电机的等效电感, U_e 为反向电动势, k_b 为电机的反电动势系数, θ_m 为电机转子的转角, T_m 为电机输出力矩, k_t 为电机扭矩系数。在实际应用中,由于直流电机的等效电感很小,在建模时可以

55

将其忽略，则电机的力矩方程可以表示为

$$T_m = \frac{k_t}{R} U_v - \frac{k_t k_b}{R} \dot{\theta}_m \quad (4)$$

1.2 复位弹簧模型

60 汽车电子节气门为了保证在控制系统失效的情况下仍能保持一定的开度，采用了双扭簧的设计，其力矩特性如图 3 所示。

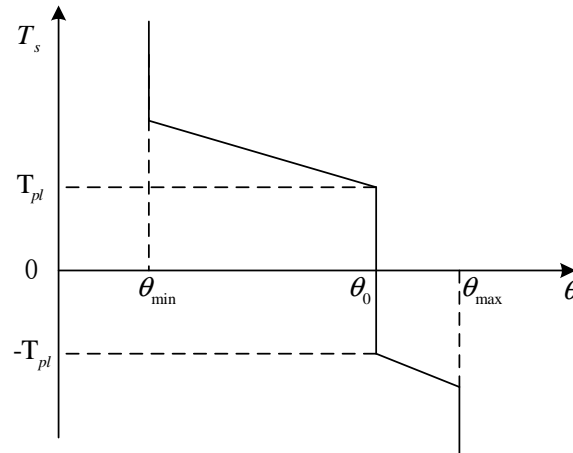


图 3 复位弹簧力矩特性

Fig.3 Torque characteristics of return spring

65 图 3 中 θ_0 即为双扭簧作用下的节气门初始转角， T_{pl} 为弹簧初始预紧力矩，弹簧力矩 T_s 可以表示为

$$T_s = k_s (\theta - \theta_0) + T_{pl} \text{sign}(\theta - \theta_0) \quad (5)$$

其中 k_s 为扭簧的扭矩系数。

1.3 摩擦模型

70 电子节气门的阀片在运动过程中所受的摩擦力主要来自于传动机构，且摩擦力的变化较为复杂^[5]。为了简化模型，本文仅考虑与碟阀转速相关的粘滞摩擦。

$$T_f = k_f \dot{\theta} \quad (6)$$

式 (6) 中 T_f 为粘性摩擦力矩， k_f 为粘性摩擦系数。

1.4 系统模型

75 依据式 (4) (5) (6) 可以得出建立在碟阀转轴上的系统动力学方程

$$i \cdot T_m - T_s - T_f = J_z \ddot{\theta} \quad (7)$$

$$J_z = J_m i^2 + J_l \quad (8)$$

$$\theta_m = i \cdot \theta \quad (9)$$

$$i\left(\frac{k_t}{R}U_v-\frac{k_t k_b i}{R}\dot{\theta}\right)-\left[k_s(\theta-\theta_0)+T_{pl}sign(\theta-\theta_0)\right]-k_f\dot{\theta}=(i^2J_m+J_l)\ddot{\theta}\quad (10)$$

式 (7) (8) (9) 中*i*为传动系统的总减速比，*J_z*为折算到碟阀转轴上的等效转动惯量，*J_m*为电机转子的转动惯量，*J_l*为碟阀和回转轴的总转动惯量。式 (10) 即为系统的最终模型。系统的输入为电压*U_v*，通过脉冲宽度调制 (PWM) 信号控制；系统的输出为碟阀转角*θ*。系统的 Simulink 模型如图 4 所示，其中虚线框 1 内为弹簧复位力矩模块，虚线框 2 内为电机电力矩模块，虚线框 3 内为摩擦力矩模块。系统各参数通过查手册和辨识得出，参数取值如表 1 所示。

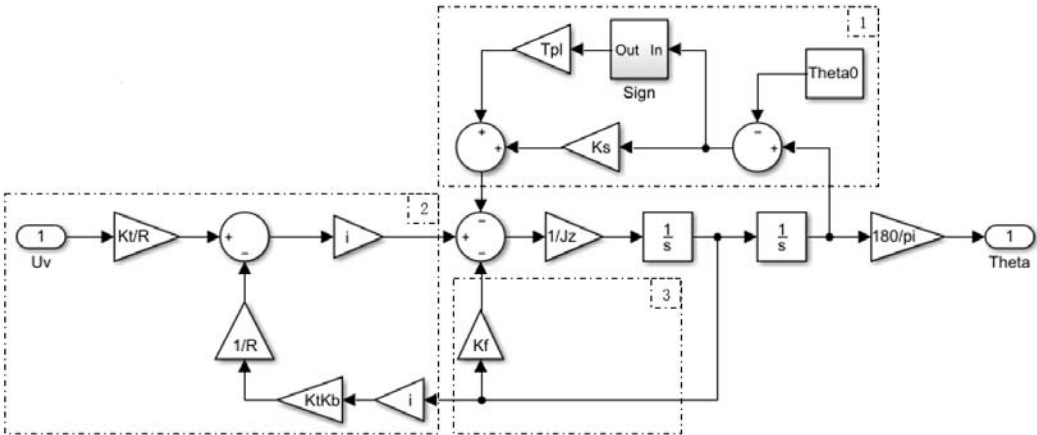


图 4 电子节气门模型
Fig.4 Model of electronic throttle

表 1 电子节气门参数
Tab.1 Parameters of electronic throttle

| 参数名 | 参数值 | 单位 |
|------------|--------|------------------------------------|
| k_t / R | 4.22 | $V \cdot s \cdot rad^{-1}$ |
| k_b | 0.0268 | $N \cdot m \cdot V^{-1}$ |
| i | 21.87 | / |
| k_f | 0.0025 | $N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$ |
| k_s | 0.082 | $N \cdot m \cdot rad^{-1}$ |
| J_z | 4.17 | $kg \cdot m^2$ |
| θ_0 | 0.14 | rad |
| T_{pl} | 0.515 | $N \cdot m$ |

2 控制算法设计

2.1 改进 PID 控制

2.1.1 带死区的变速积分

PID 控制中积分环节的主要作用是消除稳态误差^[6]。但当系统出现较大误差时，在过程的开始阶段积分环节会快速的产生很大的控制输出，导致系统产生很大的超调，引起系统的震荡。理想的积分环节应该是在系统误差较大的时候作用减弱甚至不参与控制，在误差逐渐变小的时候，积分作用逐渐变强，从而快速地消除稳态误差。

另一方面，当系统误差已经小到满足系统的控制精度时，此时比例环节和微分环节的输出都接近于零，但积分环节仍在不断累积，当积分输出大到克服系统的静摩擦时，蝶阀开始转动，系统摩擦由静摩擦转变为动摩擦，此时蝶阀会出现“抖动”的现象，产生新的误差。如此往复，系统始终无法稳定。而在积分环节的入口处增加一个死区环节，则可以有效避免这种情况的发生，死区的宽度略小于系统的控制精度即可。

综上，带有死区的变速积分环节设计如下

$$k_i' = k_i f[e(k)] \quad (11)$$

$$f[e(k)] = \begin{cases} 0 & |e(k)| \leq \varepsilon \\ 1 & \varepsilon < |e(k)| \leq A \\ \frac{A+B-|e(k)|}{B} & A < |e(k)| \leq A+B \\ 0 & A+B < |e(k)| \end{cases} \quad (12)$$

式（11）中 k_i 为全局积分系数， k_i' 为变速积分系数，函数 f 为误差与积分变速系数的映射， $e(k)$ 为第 k 个控制周期的系统误差；式（12）中 ε 为死区宽度， A 和 B 为积分变速节点。改进的积分环节模型如图 5 所示，其中非线性映射 f 利用 MATLAB 中的 Stateflow 实现。

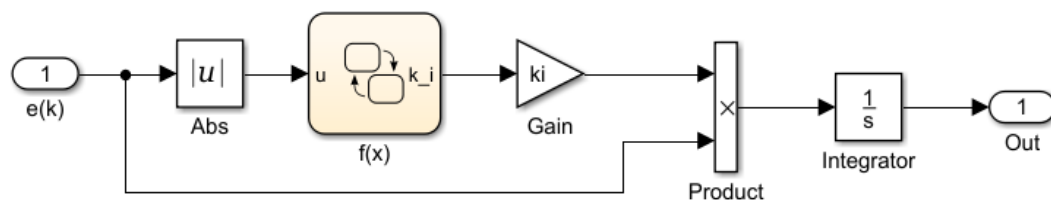


图 5 改进的积分环节模型

Fig.5 Model of improved integral part

2.1.2 微分滤波

微分环节在 PID 控制中根据误差变化的趋势提前产生控制量，对抑制系统超调，减弱系统震荡有很显著的作用。在实际的控制系统中，微分环节是基于传感的反馈信号工作的。传感信号中如果混杂了来自机械系统或电路系统的高频噪声信号，则微分环节会将噪声信号放大，引起信号的失真^[7]。因此，需要在微分环节之前设置低通滤波器来抑制高频噪声，改善系统的特性。增加一阶低通滤波后的微分环节的传递函数为式（13），其中 k_D 为微分系数， N 为滤波系数。实际的控制系统中以差分代替微分，离散的微分环节模型如图 6 所示。

$$\frac{Y_D}{U_D} = \frac{k_D s}{1 + Ns} \quad (13)$$

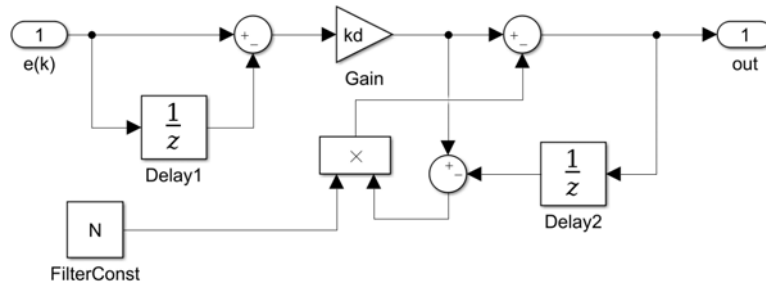


图6 微分环节模型

Fig.6 Model of differential part

2.2 前馈补偿控制

复位弹簧是系统中的一个非线性环节，但任意转角下复位弹簧的力矩是可以获知的，因此可以采用前馈补偿的方法来消除或减弱复位弹簧非线性特性对系统的影响。则控制器最终的输出电压 U_v 可以表示为式 (14)，其中 U_{PID} 为改进 PID 控制的输出电压， U_f 为前馈补偿控制的输出电压。

$$U_v = U_{PID} + U_f \quad (14)$$

弹簧补偿通过电机产生额外的力矩实现，即

$$i \cdot \Delta T_m = T_s \quad (15)$$

由式 (4) (5) 可建立式 (16) 所示的复位弹簧力矩补偿电压 U_k 与碟阀转角的关系。

$$U_k(\theta) = \frac{k_s(\theta - \theta_0) + T_{pl} \cdot \text{sign}(\theta - \theta_0)}{i \frac{k_t}{R}} \quad (16)$$

对于位置控制，若仅基于实际位置补偿，则控制仍是“滞后”的，不能充分发挥前馈补偿“及时”的优势；若仅基于期望位置补偿，则系统容易超调。为此引入权重因子 ω ，设计控制律为

$$U_f = (1 - \omega)U_k(\theta_y) + \omega U_k(\theta_r) \quad (17)$$

式 (17) 中 θ_y 为碟阀的实际转角， θ_r 为碟阀的期望转角。由于弹簧复位力矩的方向在碟阀初始转角 θ_0 的两侧是相反的，因此式 (16) 仅在 θ_y 和 θ_r 位于 θ_0 的同一侧时适用。当 θ_y 和 θ_r 分别位于 θ_0 的两侧时，仅基于实际位置补偿。最终的前馈补偿控制律表示为

$$U_f = \begin{cases} (1 - \omega)U_k(\theta_y) + \omega U_k(\theta_r) & (\theta_r - \theta_0)(\theta_y - \theta_0) > 0 \\ U_k(\theta_y) & (\theta_r - \theta_0)(\theta_y - \theta_0) \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式 (18) 的 Simulink 模型如图 7 所示。

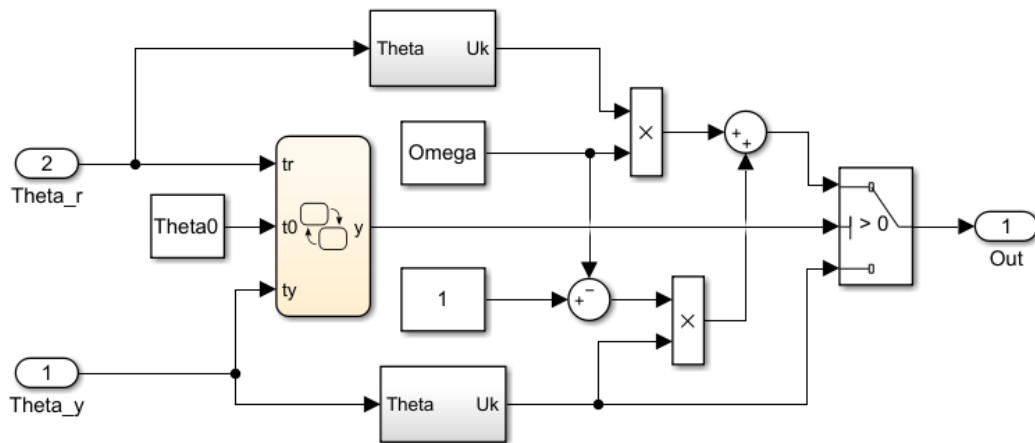


图 7 前馈补偿模型

Fig.7 Model of feedforward compensation

2.3 系统仿真

基于 2.1 和 2.2 的控制模型，搭建如图 7 所示的控制系统模型。由图可知，节气门的控制电压由两部分组成，一部分为复位弹簧的前馈补偿控制，另一部分为改进 PID 控制。同时，考虑到直流伺服电机实际的供电范围，在控制器和节气门之间加入了“饱和环节”，电机的额定工作电压为 $\pm 24V$ 。

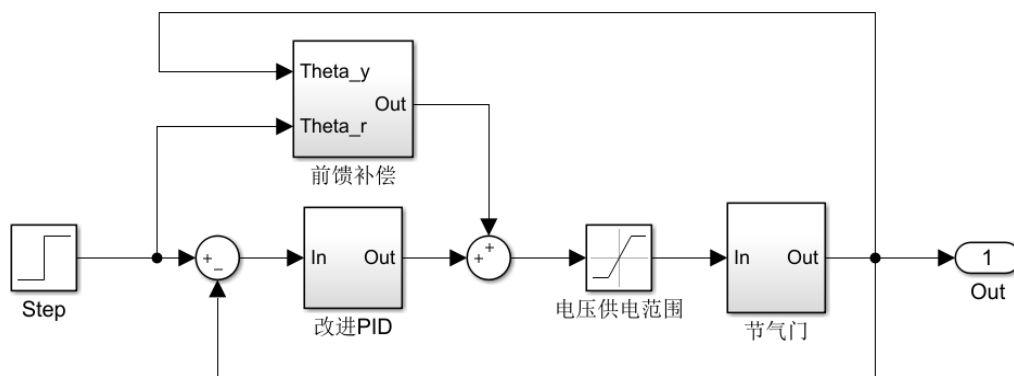


图 8 控制系统框图

Fig.8 Block diagram of control system

系统的阶跃响应如图 9 所示，图 10 为局部放大的阶跃响应曲线。由图可知，系统的超调量仅为 0.3%，上升时间约为 60ms，峰值时间约为 78ms，调整时间约为 130ms（系统的位置控制精度要求为 0.05° ），无稳态误差。系统的动态性能和稳态性能优异，因此可以初步认为，控制器的设计能够满足系统实际控制的需求。

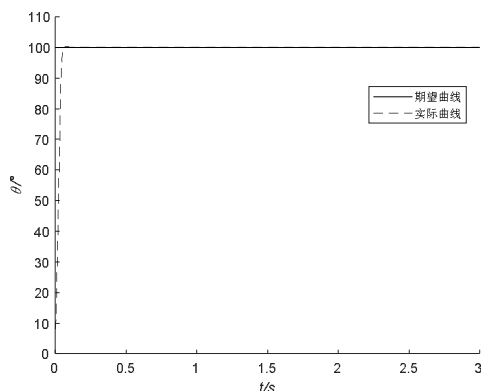


图 9 阶跃响应曲线

Fig.9 Curves of step response

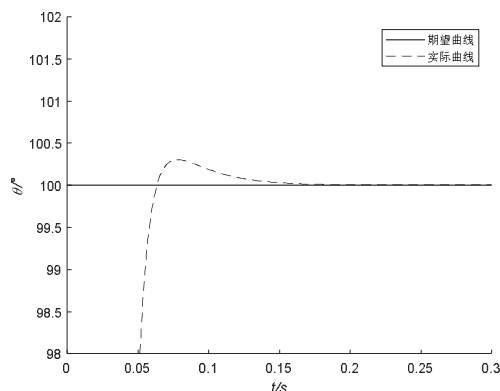


图 10 局部放大的阶跃响应曲线

Fig.10 Magnified curves of step response

3 实验与分析

3.1 实验平台简介

160 电子节气门系统的实验平台如图 11 所示, PC 端的上位机通过 CAN 总线与节气门控制
板通信, 控制板驱动节气门碟阀转动。控制器硬件基于 STM32F4 开发, 包含电源、通信、
电机驱动、位置检测、电流检测等模块; CAN 设备为 Kvaser CAN 总线分析仪。实验中, 由
上位机将目标开度发送给控制器, 控制器在每个控制周期结束时将节气门的目标开度和实际
165 开度反馈给上位机; 上位机将位置信息绘制成曲线在界面上动态显示出来, 同时将节气门的
运行数据保存到数据库中。



图 11 电子节气门实验平台

Fig.11 Experiment platform of electronic throttle

3.2 实验结果

170 系统的阶跃响应曲线如图 12 所示。控制参数为比例系数 $k_p=1.776$, 全局积分系数
 $k_i=6.98$, 微分系数 $k_d=0.05449$, 滤波系数 $N=0.5$, 积分变速节点 $A=0.6$, $B=5$, 积分
死区宽度 $\varepsilon=0.01$, 前馈补偿权重因子 $\omega=0.2$ 。由图可知, 系统的超调量为 2.5%, 上升时

间为 44ms，峰值时间为 56ms，调整时间为 74ms，无稳态误差。系统的正弦信号跟随曲线如图 13 所示，由图可知，曲线跟随无滞后和动态误差，曲线跟随效果良好。

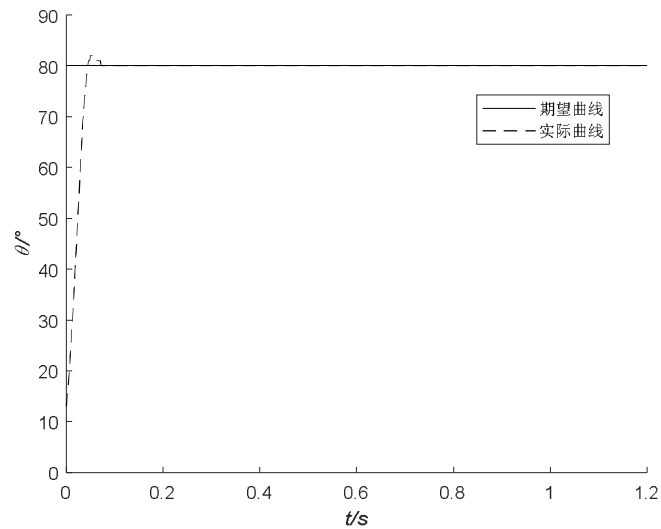


图 12 阶跃响应实验曲线
Fig.12 Curves of step response experiment

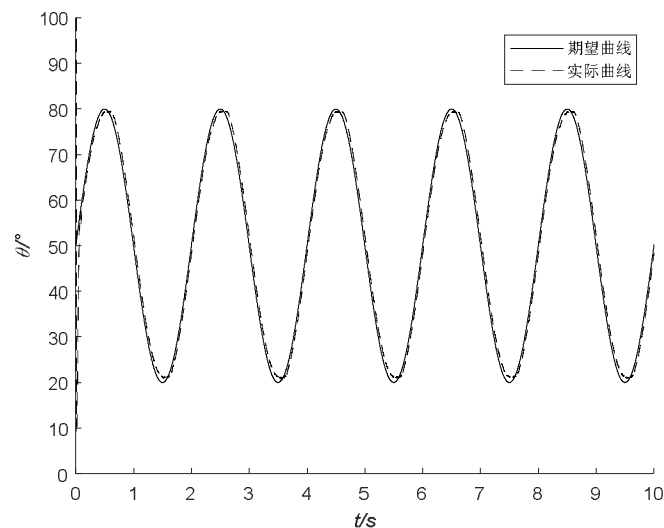


图 13 正弦信号跟随实验曲线
Fig.13 Curves of sinusoidal signal experiment

4 结论

本文建立了电子节气门的数学模型，基于工程中广泛应用的前馈控制和 PID 控制，设计了前馈补偿和改进 PID 复合控制的控制策略。仿真和实验表明，系统动态特性好，响应速度快，无静差，跟随精度高，系统结构简洁，稳定性高，具有很强的工程应用价值。

[参考文献] (References)

[1] 崔宏宇, 崔宏巍. 单燃料燃气汽车发动机空燃比控制器设计[J]. 农机化研究, 2006, 第五期: 106-108
[2] 朱二欣. 电子节气门控制系统的开发研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005
[3] 杨振东. 基于模糊 PID 电子节气门控制系统的研究与开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2008

- 190 [4] 毛六平, 王耀南. 基于模糊高斯基函数神经网络的电子节气门控制的仿真研究[J]. 电气应用, 2006,25
(11): 39-43
- [5] B.Ashok, S.Denis Ashok, C.Ramesh Kumar. Trends and future perspectives of electronic throttle control
system in a spark ignition engine[J]. Annual Reviews in Control, 2017, 000: 1-19
- [6] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
- 195 [7] 曲东才. MATLAB平台下数字微分信号提取研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(8): 1081-1086