

# 发动机电子节气门控制的嵌入式软件设计

李宏超, 滕勤

(合肥工业大学汽车与交通工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 为克服电子节气门中复位弹簧和摩擦非线性的影响, 采用前馈补偿与闭环校正相结合的控制算法, 设计电子节气门控制 (electronic throttle control, ETC) 的嵌入式软件。利用不同幅值和方向的阶跃响应和斜坡响应实验对所设计的控制策略进行验证, 基于上升时间、调整时间、稳态误差和最大超调 4 个指标对结果进行评价和比较。结果表明, 非线性补偿后较补偿前提高了系统的响应速度和控制精度; 目标位置斜坡变化消除了系统的超调, 验证了目标位置滤波与限制的必要性和可行性。

**关键词:** 车辆工程; 电子节气门控制; 嵌入式软件设计; 非线性补偿

中图分类号: U271 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2017)14-1610-11

## Embedded software design of electronic throttle control in engine

LI Hongchao, TENG Qin

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology,  
Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to overcome the nonlinear influence of the return spring and friction in the electronic throttle, the embedded software of electronic throttle control (ETC) system was designed based on a combinational algorithm of feedforward compensation and closed loop correction. The control strategy was verified by step response and slope response experiments with different amplitudes and directions. The results were evaluated and compared based on the rise time, settle time, steady-state error and maximum overshoot. The results showed that the system with nonlinear compensation improved the response speed and control precision, compared to the system without nonlinear compensation. The overshoot was eliminated by slope change of desired position, which verified the necessity and feasibility of the desired position filtering and rate limiting.

**Key words:** vehicle engineering; electronic throttle control; embedded software design; nonlinear compensation

## 0 引言

节气门的主要作用是调节汽油发动机的空气充量, 进而改变输出转矩和功率。与传统的机械节气门相比, 电子节气门的优点在于可以根据驾驶员需求和整车行驶状况确定最佳节气门开度, 保证车辆的最佳动力性和燃油经济性, 并实现牵引力控制、巡航控制等功能, 提高安全性和乘坐舒适性。节气门控制的快速性有利于提升车辆的加速性能, 动态跟踪性能会影响发动机瞬态空燃比控制精度和瞬态排放, 良好的稳态控制精度和抗扰动性能将改善发动机的工作稳定性。但由于电子节气门是一个强非线性系统, 存在摩擦力、回位弹簧转矩、脉动进气等多种因素的影响, 常规的比例-积分-微分 (proportion integration differentiation, PID) 控制通常难以保证系统的鲁棒性、稳定性和控制精度<sup>[1-2]</sup>。为解决电子节气门的非线性控制问题, 研究人员在非线性和反馈控制器设计和改进控制结构两方面进行了大量研究。对于反馈控

**作者简介:** 李宏超 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 车辆动力学与控制

**通信联系人:** 滕勤, 副教授, 主要研究方向: 内燃机电控技术. E-mail: tengqin\_7348@163.com

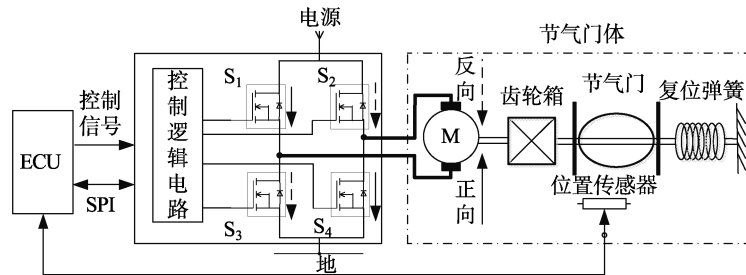
制器设计主要有 PID 控制<sup>[3]</sup>、滑模控制<sup>[4~5]</sup>和模糊控制<sup>[6]</sup>，对于控制结构，现代主要发展为前馈与反馈相结合<sup>[7~9]</sup>的形式。模糊、滑模甚至神经网络等现代智能控制算法可以很好地处理复杂的非线性问题，但系统参数繁多，计算过于复杂，占用很大的发动机电控单元（electronic control unit, ECU）资源，现有的微控制器很难快速有效地运算处理，在实际控制中会导致程序运行缓慢甚至紊乱。

考虑嵌入式软件的实现问题，本文采用静态非线性前馈补偿与分段 PID 控制相结合的方法，基于标定出的前馈补偿电压和整定出的 PID 控制参数来确定输出电压，并设计相应的嵌入式软件，分别通过不同幅度和方向的节气门开度阶跃响应和斜坡响应实验，对控制软件进行验证。

### 1 电子节气门软硬件控制结构

电子节气门由节气门及节气门轴、复位弹簧、位置传感器、减速齿轮机构和直流电机组成。直流电机通过减速齿轮机构带动节气门轴旋转，两级齿轮减速器用于降速和增大转矩并减小运动冲击。复位弹簧为考虑行车安全而在节气门体中引入的机械保护装置，当 ETC 系统出现故障时，节气门能够依靠复位弹簧回到“跛行回家”位置。

ETC 系统硬件结构如图 1 所示，节气门电机由双向 H 桥电路驱动。ECU 通过分别在两个脉宽调制（pulse width modulation, PWM）通道上输出信号，控制 H 桥对角线上的两个金属氧化物半导体（metal oxide semiconductor, MOS）场效应晶体管（ $S_1$  和  $S_4$  或  $S_2$  和  $S_3$ ）同时导通，以控制转动方向。通过改变 PWM 信号的占空比，调节有效驱动电流来控制电机的转矩。



注：SPI 为串行外设接口（serial peripheral interface, SPI）

图 1 ETC 系统硬件原理图

Fig. 1 Hardware principle diagram of electronic throttle control system

节气门控制包含目标位置计算和跟踪控制两部分，其中，节气门目标位置由转矩模型和进气量预测模型计算得到。ECU 根据加速踏板移动量和变化率解析驾驶者意图，计算出对发动机转矩的基本需求，得到相应节气门转角的基本期望值。考虑各种可能影响节气门开度的因素，经过统一协调后，计算出最终期望的节气门开度。

跟踪控制主要解决的问题是，保证节气门实际位置快速准确地逼近目标值，为此，采用静态前馈与动态反馈相结合的软件结构，如图 2 所示。静态非线性前馈控制器用于补偿复位弹簧组和库伦摩擦力的影响，对节气门位置进行粗调，以加快控制系统的响应速度。其中，弹簧补偿电压由目标位置与跛行回家位置的偏差  $\Delta$  决定，抗摩擦补偿电压由目标位置与实际位置的偏差  $Error$  决定。基于节气门位置传感器的输出信号，增量式分段 PID 控制

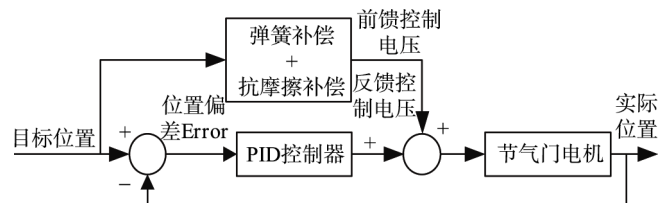


图 2 电子节气门跟踪控制原理

Fig. 2 Tracking control principle of electronic throttle

器根据不同的 Error 范围所对应的参数，对节气门位置进行动态非线性反馈控制，以实现精细调节。前馈控制器与反馈控制器的输出叠加后转化为控制信号的占空比，经限值后控制电机工作。显然，节气门跟踪控制设计包括前馈与反馈两部分内容。

## 2 控制软件实现

按照层次化和模块化的软件体系架构，与节气门控制相关的软件模块分别由 ECU 应用层的软件组件 (application software components, ASC) 和基础层的软件组件 (basic software components, BSC) 组成。BSC 包括系统上电后的初始化 (A/D 转换器、定时器和 PWM 设置等)、信号采样、PWM 输出控制等。除目标值产生以外，ASC 主要包括信号处理与数据变换、节气门自学习、目标位置滤波与限制、节气门控制、占空比转换与限制等。本文主要针对节气门控制即目标位置处理和跟踪控制进行嵌入式软件设计。

### 2.1 控制软件总体流程

节气门控制软件总体流程如图 3 所示，系统上电后，各模块初始化，读取目标位置并进行滤波与限制，节气门的目标位置根据扭矩模型计算，本文通过后台给定。经过对位置传感器信号的采集与处理，完成节气门传感器的诊断和自学习，依次确定最小开度位置、实际位置和跛行回家位置。然后，根据位置偏差 Delta 和 Error 进行相应的前馈和反馈控制，以控制节气门稳定在目标位置附近。

### 2.2 目标位置滤波与限制

为改善排放性和保证驾驶的稳定性，通常需要对目标位置进行滤波和限制处理，从而消除目标位置中的高频部分，使目标开度平滑、逐步过渡。

#### 2.2.1 目标位置滤波

目标位置滤波流程如图 4 所示，首先计算当前未过滤的目标位置与上次过滤后的目标位置偏差 $\Delta des$ ，然后根据其正负号判断节气门需要开启或关闭。若 $\Delta des > 0$ ，则方向标志位置 1，表示开启方向，否则标志位置 0，表示关闭方向。接着根据方向、扭矩命令源、目标位置 and 变化量等信息查表获取滤波系数 $\mathcal{L}$ ，最后计算滤波最大偏差 $\Delta filtermax\_des$ 。

#### 2.2.2 目标位置限制

目标位置限制用于限制目标位置变化的速度，其限制流程如图 5 所示。首先根据发动机转速和允许的最低转速 2 000 r/min 求得转速限值，然后判断节气门运动方向 (开启或关闭)，若节气门开启，则判断扭矩源是否为加速踏板或巡航模式。若满足，则根据转速限值和开启方向的速度转换系数 $\mu_{开}$ 计算限制

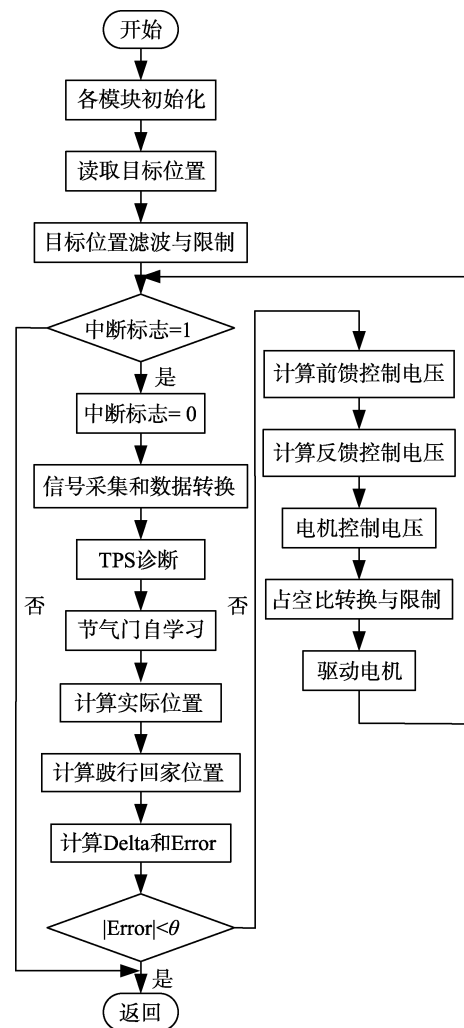


图 3 ETC 总体流程图

Fig. 3 Overall flow chart of ETC

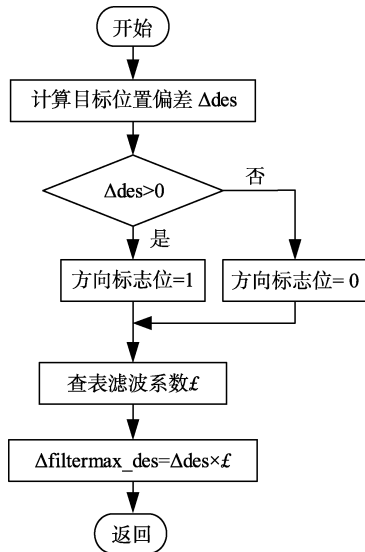


图 4 目标位置滤波流程

Fig. 4 Filtering flow chart of desired position

偏差，若不满足，则限制偏差=+100%，并对开启方向下的限制偏差进行限值；若节气门关闭，则判断扭矩源是否为加速踏板或巡航模式，若满足，则根据转速限值和关闭方向的速度转换系数 $\mu_{关}$ 计算限制偏差，若不满足，则限制偏差=-100%，并对开启方向下的限制偏差进行限值。关闭方向的限制偏差计算和限值与之类似。

### 2.2.3 最终目标位置确定

最终目标位置确定流程如图 6 所示。首先判断方向标志位，若等于 1，则最大偏差取滤波最大偏差与限制偏差的最小值，否则，取其最大值；然后根据开启或关闭方向允许的偏差 $\omega_{开}$ 或 $\omega_{关}$ 进行限值，得到最终的最大偏差并与上次滤波后的目标位置求和，得到当前过滤后的目标位置。若方向标志位=1，取当前过滤后目标位置与过滤前目标位置的最小值；否则取最大值。最后，对目标位置进行限值。

## 2.3 前馈控制设计

### 2.3.1 弹簧补偿

复位弹簧产生与节气门开启角度成正比的力矩作用在节气门轴上。弹簧力矩包括弹性力矩和弹簧预紧力矩，前者随节气门开度而变，后者与定位销安装位

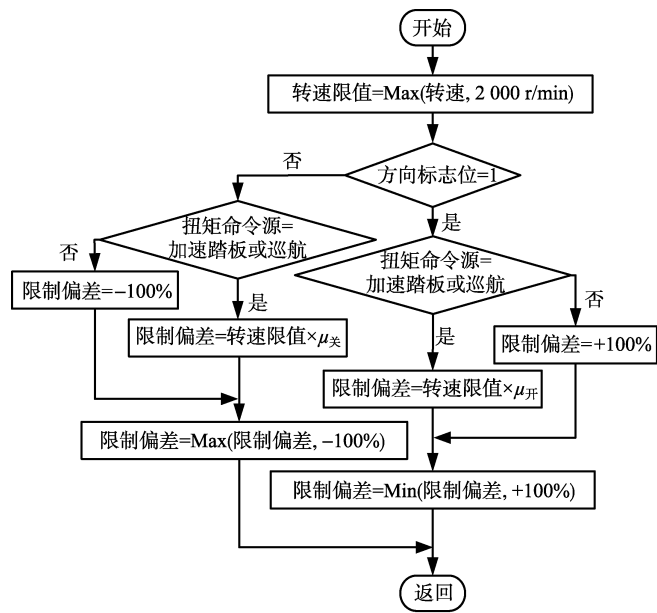


图 5 目标位置限制流程

Fig. 5 Limiting flow chart of desired position

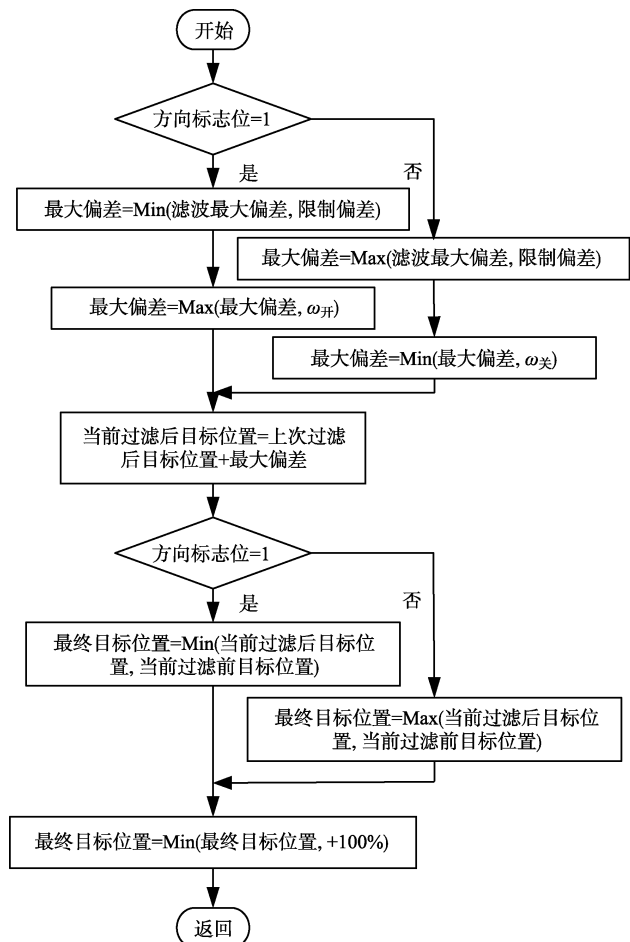


图 6 最终目标位置确定流程

Fig. 6 Determination flow chart of the final desired position

置有关<sup>[10-11]</sup>。与单纯的PID控制相比，通过采用基于弹簧力矩补偿的前馈控制，有利于加快控制系统的响应速度，因此，必须对弹簧力矩进行有效的补偿。节气门弹簧力矩的分布如图7所示。

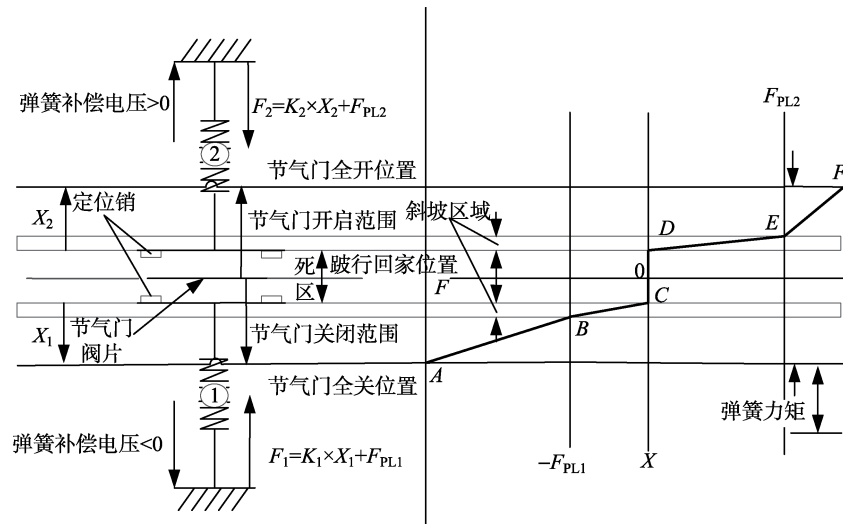


图7 节气门弹簧力矩的分布示意图

Fig. 7 Spring force distribution schematic of throttle

若将角位移  $\theta$ 、力矩  $T$  和角弹性系数  $K_r$  分别转化为线位移  $X$ 、弹簧力  $F$  和线弹性系数  $K$ ，则弹簧力为

$$F = K \cdot X + F_{PL} \quad (1)$$

其中， $F_{PL}$  为使弹簧脱离定位销所需的预紧力。

弹簧力矩的补偿原理为通过确定弹簧力矩对应的电压，在电机驱动力矩中抵消弹簧力矩，即电机驱动电压抵消弹簧力矩对应的电压。不论节气门开启还是关闭，当目标位置大于跛行回家位置时，两者的差值  $\Delta$  和弹簧补偿力矩均为正，反之，则为负。这意味着，当从跛行回家位置关闭节气门时需要施加负向力，而开启节气门时则需要施加正向力。

在定位销之间的死区内（如图7中CD段所示，包括跛行回家位置），节气门不受任何弹簧力，故弹簧补偿电压为零。但节气门通过跛行回家位置时，节气门轴的转矩将出现跳跃性变化。当克服  $F_{PL}$  使弹簧脱离定位销时，斜坡区域缓解了扭转弹簧切换时力的突变（如图7中BC和DE段所示），E、B两点对应正、反方向弹簧  $F_{PL}$ ，F点和A点分别为节气门全开和全关位置。

为确定弹簧补偿力矩所对应的前馈控制电压，需要根据节气门弹簧力的分布，标定稳态最小和最大电机控制电压与位置偏差（目标位置与跛行回家位置的偏差）之间的关系。基本方法为通过按照一定速率逐步增大/减小占空比，控制电机缓慢运动，使节气门到达不同特征点位置，记录此时的占空比数值，根据电压-占空比转换公式，求得特征点处的平均电压。根据特征点的标定结果，通过线性插值得到其他任意位置偏差所对应的弹簧补偿电压。标定结果如表1所示。

表1 特征点弹簧力矩补偿电压标定结果  
Tab. 1 Calibration results of spring torque compensation voltage at special points

节气门位置	补偿电压/V	特征点
在死区内	0	CD段
离开死区	$\pm 0.39$	E, B
全开	1.7	F
全关	-1.03	A

### 2.3.2 抗摩擦补偿

直流电机、减速齿轮、节气门轴与轴承之间的摩擦导致电子节气门的精确控制变得相当困难，对于

高精度的位置控制，摩擦导致的迟滞影响越显突出。在节气门到达目标位置前，若控制过程停在迟滞范围内，只有PID控制算法中的积分项才能补偿偏差，这将导致控制性能和精度的严重损失，尤其在位置偏差较小时<sup>[12]</sup>。

节气门所受摩擦力包括库伦摩擦和黏性摩擦<sup>[13-14]</sup>。前者与节气门的运动方向有关，后者与节气门的转动速度有关。由LuGre模型<sup>[15]</sup>可知，库伦摩擦是非线性的，黏性摩擦是线性的，因此，摩擦非线性来源于库伦摩擦。库伦摩擦即干摩擦，包括静摩擦和滑动摩擦<sup>[16]</sup>。静摩擦发生在节气门阀片运动前，在运动的一瞬间，最大静摩擦比滑动摩擦要大，之后，静摩擦消失，转变为滑动摩擦，从而表现出非线性。在节气门转动速度较低（接近零转速）时，其非线性越显突出。

“抖振”是补偿库伦摩擦的经典方法<sup>[17]</sup>，不需要精确的摩擦模型，适合于当前微处理器的嵌入式设计。其基本思想是通过施加给节气门电机一个适当的补偿电压来补偿库伦摩擦的迟滞作用，即减小库伦摩擦所导致的不必要的积分动作，从而减少调节时间。

在满足控制精度条件时，若控制偏差Error方向不变，则可认为节气门处于静止状态，存在静摩擦，此时激活抗摩擦补偿。对此，本文在控制偏差较小时，激活抗摩擦补偿，激活流程如图8所示，使能条件为：

- 1) 当前控制偏差与上次控制偏差符号相同；
- 2) 当前控制偏差不为0；
- 3) 当前控制偏差的绝对值不超过给定限值。

为建立使能抗摩擦脉冲的有效范围，需要首先确定使能最大偏差，考虑到控制精度±2%的要求，将使能最大偏差（绝对值）初始设置为2%，反复测试抗摩擦脉冲的大小和频率，以提高控制精度和减少调节时间，然后逐渐减小设置值，直到控制性能不再改善，此时的设置值即为最终的限制值。经过标定得出使能最大偏差为0.6%，同时为保证位置偏差为0，将使能最小偏差（绝对值）设置为0.2%（略大于0），即使能抗摩擦脉冲的有效范围为0.2%~0.6%。

激活抗摩擦项后，抗摩擦脉冲每秒脉动电机控制电压多次。需要标定抗摩擦脉冲电压的大小，如果设置不合适，则会导致响应不稳定。实际测试发现，脉冲电压大小设置为0.2V、 $T_{开}=0.004s$ 、 $T_{关}=0.012s$ 时，系统稳定性良好，控制精度高，调节时间少。

标定后的抗摩擦补偿电压与位置偏差的关系如图9所示，若位置偏差小于0，则说明实际位置大于

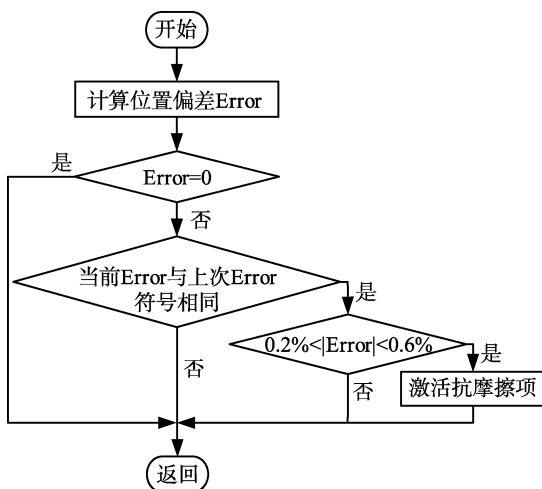


图8 抗摩擦补偿激活流程  
Fig. 8 Activated flow chart of anti-friction compensation

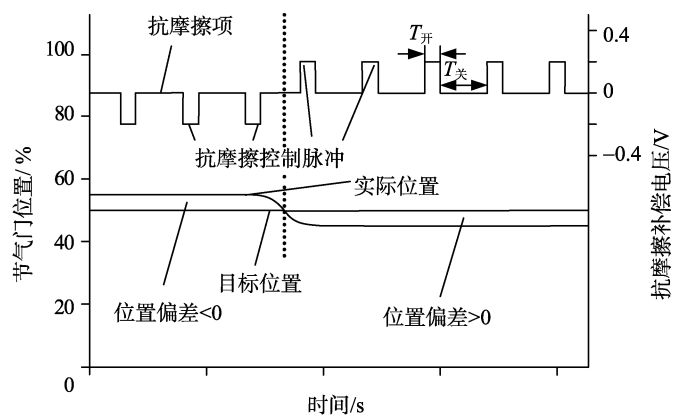


图9 节气门位置偏差与抗摩擦补偿电压的关系  
Fig. 9 Relationship between the throttle position error and the anti-friction compensation voltage

目标位置，需要施加负脉冲来减小偏差；若位置偏差大于 0，则实际位置小于目标位置，需要施加正脉冲来减小偏差。

### 2.4 反馈控制设计

由于计算机是按照时间间隔采样的，为便于在微控制器中实现反馈控制，采用离散化增量式 PID 算法，其控制律为

$$\Delta u(k) = K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)], \quad (2)$$

其中， $K_p$  为比例系数； $K_i$  为积分系数； $K_d$  为微分系数； $e(k-2)$ 、 $e(k-1)$ 和  $e(k)$ 分别为前后 3 次测量的位置偏差； $\Delta u(k)$ 为本次控制增量。实际控制量  $u(k)$ 等于控制增量的累加，即

$$u(k) = \sum_{j=0}^k \Delta u(j). \quad (3)$$

PID 控制器常用的参数整定方法主要有临界比例法、反应曲线法和衰减法等，其共同点为通过试验，依据工程经验对参数进行整定。在此采用临界比例法，整定步骤如下：

- 1) 设置  $K_i$ 、 $K_d$  为 0，增大  $K_p$ ，使其产生振荡；
- 2) 减小  $K_p$ ，找到临界震荡点；
- 3) 增大  $K_i$ ，使其达到目标值；
- 4) 观测超调、振荡和稳定时间是否符合要求；
- 5) 针对超调和振荡情况适当增加一些微分项。

为避免节气门抖动，当 Error 较小时， $K_p$ 、 $K_d$  设置为 0。

由于 PID 控制仅适用于线性系统，对于电子节气门这样的强非线性动态系统，采用单一的 PID 控制难以保证闭环系统的鲁棒性。因此，按照不同大小和方向的位置偏差划分 14 个控制区域，每个区域对应一组 PID 参数，利用线性控制的组合逼近非线性控制。基于前期开发的 ECU 后台管理系统，分别对不同区域的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  参数进行整定，软件界面如图 10 所示，整定后的参数如表 2 所示。

表 2 不同位置偏差对应的 PID 参数

Tab. 2 PID parameters under different position errors

位置偏差/%	$K_p$	$K_i$	$K_d$
<-10	-1.6	-0.02	-0.02
-10~-5	-1.4	-0.05	-0.04
-5~-3	-1.2	-0.08	-0.06
-3~-1	-0.9	-0.10	-0.08
-1~-0.5	-0.6	-0.20	-0.10
-0.5~-0.2	-0.4	-0.35	-0.13
-0.2~0	0	-0.50	0
0~0.2	0	0.50	0
0.2~0.5	0.5	0.40	0.12
0.5~1	0.7	0.20	0.10
1~3	0.9	0.12	0.07
3~5	1.1	0.10	0.05
5~10	1.3	0.05	0.03
>10	1.5	0.01	0.01



图 10 PID 参数整定软件界面

Fig. 10 Software interface of PID parameter tuning

### 2.5 占空比转换与限制

为产生驱动节气门电机的 PWM 信号，需要按式 (4) 将控制电压转换为相应的占空比：

$$ETC\_DC = \frac{ETC\_CV}{ETC\_SV} \times 100\% , \tag{4}$$

其中，ETC\_DC 为控制信号占空比；ETC\_CV 为电机控制电压；ETC\_SV 为蓄电池电压。

为保护驱动电路和避免电机过热，需要对占空比加以限制。占空比限制子程序流程图如图 11 所示。若占空比的绝对值超过 95%，输出最终的占空比大小限制为 95%；若没有超限，则返回。

### 3 实验验证

为验证软件设计的有效性，基于前期开发的台架实验用 GDI 发动机电控单元硬件系统<sup>[18]</sup>，在电子节气门实验台上进行了节气门控制实验。实验系统如图 12 所示，真空泵用于模拟发动机工作产生的脉动气流，空气流量由流量调节阀调节，并通过热膜式空气流量计测量。节气门目标位置在后台管理软件控制界面中设定，并通过 USB-CAN 转换器发送给 ECU，使节气门产生相应的动作，实验数据由 ECU 通过 CAN 总线传送给上位机。

#### 3.1 阶跃响应

##### 3.1.1 大开度阶跃响应

为防止节气门碰撞限位挡块，将目标位置限制在 2%~90% 之间。节气门开度 15%-90%-15% 的阶跃响应如图 13 所示，非线性补偿前后正反向最大上升时间分别为 0.09 s 和 0.08 s，调节时间分别为 0.21 s 和 0.14 s，稳态误差分别为 1.8% 和 0.8%，最大超调分别为 8.9% 和 5.5%。与补偿前相比，补偿后上升时间和调节时间分别减少了 11.1% 和 33.3%，稳态误差和最大超调分别减小了 55.6% 和 38.2%。

##### 3.1.2 小开度阶跃响应

节气门开度 2%-10%-2% 的阶跃响应如图 14 所示，非线性补偿前后正反向最大上升时间分别为 0.045 s 和 0.040 s，调节时间分别为 0.25 s 和 0.10 s，稳态误差分别为 0.8% 和 0.2%，最大超调量分别为 8.8% 和 5.0%。与补偿前相比，补偿后上升时间和调节时间分别减少了 11% 和 60%，稳态误差和最大超调分别减小了 75% 和 43.2%。

##### 3.1.3 讨论

电子节气门控制性能尚无统一的要求，文献<sup>[19]</sup>指出，为使电子节气门保留机械节气门优良的响应特性，要求节气门响应迅速且不碰撞限位挡块、零超调、稳态精度在 ±2% 以内。文献<sup>[20]~[21]</sup>给出的具体动态特性指标如表 3 所示。

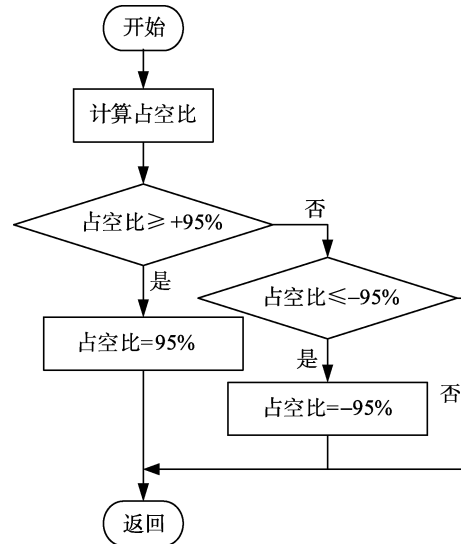


图 11 PWM 占空比限制流程图

Fig. 11 Limiting flow chart of the PWM duty cycle

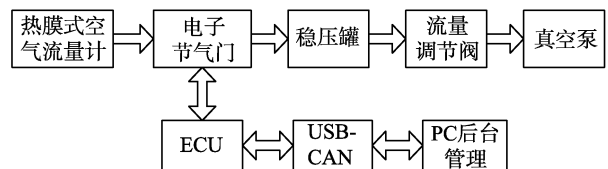


图 12 电子节气门实验台框图

Fig. 12 Block diagram of electronic throttle test bench



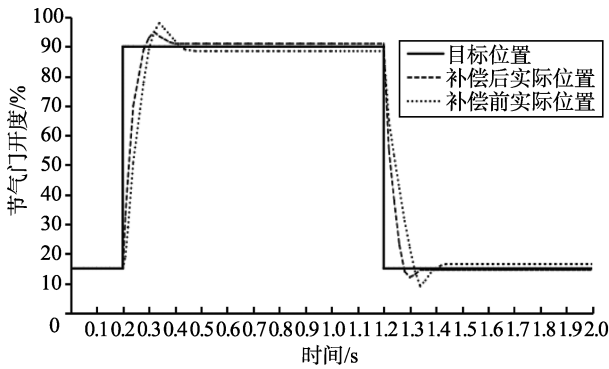


图 13 节气门开度 15%-90%-15%的阶跃响应  
Fig. 13 Step response of throttle opening from 15% to 90% to 15%

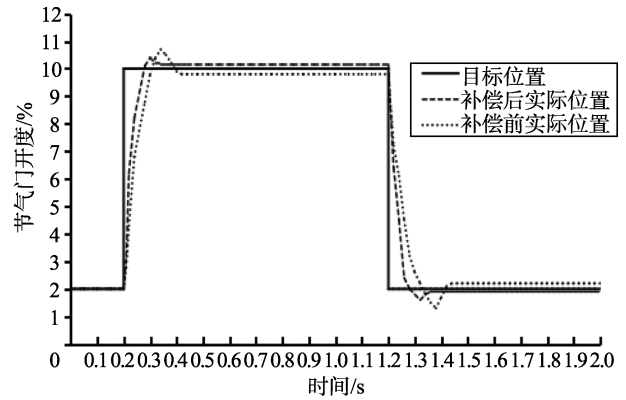


图 14 节气门开度 2%-10%-2%的阶跃响应  
Fig. 14 Step response of throttle opening from 2% to 10% to 2%

由以上阶跃响应实验可以看出，非线性补偿后的上升时间和调节时间满足控制要求，但依然存在超调。这是由于，若后台给定的目标位置过大，则初始 Delta 过大，必然会造成补偿过度，从而引起较大超调。对此，需要减小初始 Delta，即缓慢给定目标位置直至最终期望的目标位置。基于目标位置滤波与限制流程，考虑到软件实现的简单性，用斜坡函数响应代替突变阶跃响应，利用目标位置斜坡缓慢变化模拟目标位置滤波与限制，从而验证其可行性。

### 3.2 斜坡响应

非线性补偿后节气门开度 10%-90%-10%的斜坡响应如图 15 和图 16 所示，斜率分别为 $\pm 2000$ 、 $\pm 1000(1/s)$ 。前者稳态误差为 0.54%，最大超调为 3.2%；后者稳态误差为 0.43%，最大超调为 0。

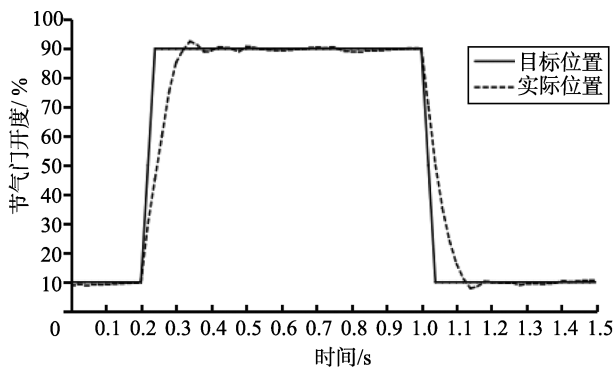


图 15 斜率 $\pm 2000(1/s)$ 的斜坡函数响应  
Fig. 15 Ramp function response with the slope of  $\pm 2000(1/s)$

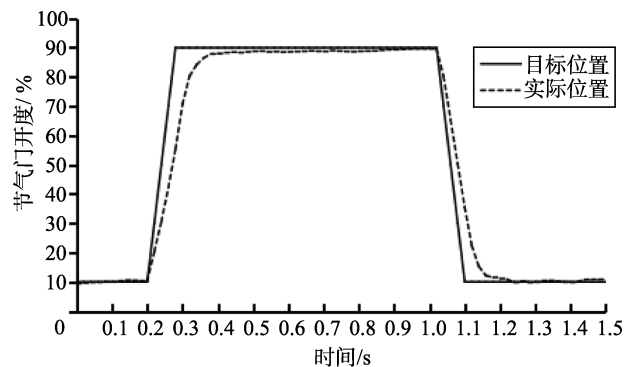


图 16 斜率 $\pm 1000(1/s)$ 的斜坡函数响应  
Fig. 16 Ramp function response with the slope of  $\pm 1000(1/s)$

非线性补偿后节气门开度 2%-10%-2%的斜坡响应如图 17 和图 18 所示，斜率分别为 $\pm 200$ 、 $\pm 100(1/s)$ 。前者稳态误差为 0.25%，最大超调为 3.6%；后者稳态误差为 0.2%，最大超调为 0。

表 3 ETC 动态性能指标

Tab. 3 Dynamic performance requirements of ETC

指标	文献[20]	文献[21]
上升时间/ms	<3%: $\leq 20$	全关 $\rightarrow$ 全开: $\leq 100$
	3%~10%: $\leq 40$	全开 $\rightarrow$ 全关: $\leq 60$
	>10%: $\leq 60$	
调节时间/ms	$\leq 200$	全关 $\rightarrow$ 全开: $\leq 140$
		全开 $\rightarrow$ 全关: $\leq 100$
稳态误差/%	$\leq \pm 0.1$	$\leq \pm 2$
最大超调/%	$\pm 5$	0 (不允许超调)

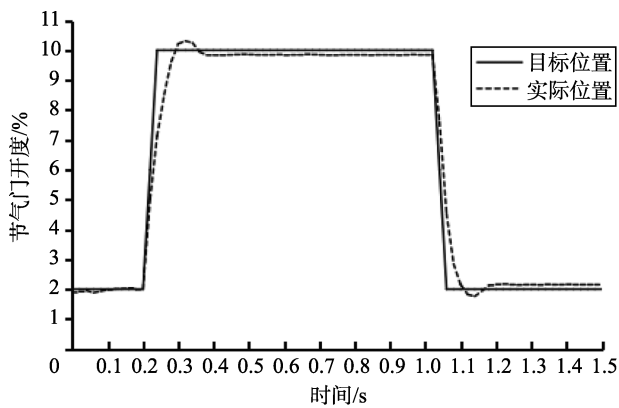


图 17 斜率±200 (1/s) 的斜坡函数响应

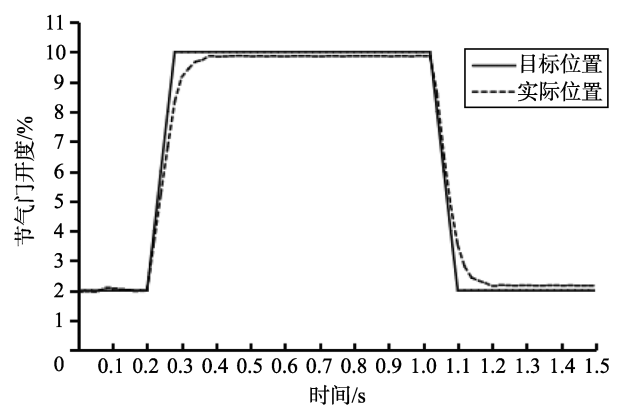


图 18 斜率±100 (1/s) 的斜坡函数响应

Fig. 17 Ramp function response with the slope of  $\pm 200$  (1/s) Fig. 18 Ramp function response with the slope of  $\pm 100$  (1/s)

实验结果表明, 目标位置的缓变可以减少甚至消除超调, 但是过度缓慢变化则会导致节气门响应过慢, 因此必须根据实验结果选择合适的斜率, 即目标位置滤波与限制滤波系数和最大限制偏差的选择需要根据实验结果进行标定。

## 4 结论

- 1) 非线性补偿后较补偿前, 提高了系统的响应速度和稳态精度, 验证了 ETC 软件的正确性、可靠性。
- 2) 目标开度斜坡响应实验验证了目标位置滤波与限制的必要性和可行性。

## [参考文献] (References)

- [1] GREPL R, LEE B. Modeling, parameter estimation and nonlinear control of automotive electronic throttle using a rapid control prototyping technique[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(4): 601-610.
- [2] JIAO X H, SHEN T L. PID control with adaptive feedback compensation for electronic throttle[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(30): 221-226.
- [3] JIANG S, SMITH M H, KITCHEN J. Optimization of PID control for engine electronic throttle system using iterative feedback tuning[R]. Washington DC: SAE Technical Paper, 2009.
- [4] 张帅, 孙仁云, 单玉梅, 等. 基于滑模控制的发动机电子节气门研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9 (21): 6444-6448. ZHANG S, SUN R Y, SHAN Y M, et al. Research on electronic throttle of engine based on sliding mode control[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(21): 6444-6448. (in Chinese)
- [5] BAI R, WANG H B, GUO D. Nonlinear control of the electronic throttle under input saturation[C]//3rd International Conference on Informative and Cybernetics for Computational Social Systems. Jinzhou: IEEE, 2016: 160-163.
- [6] AZEEM M F, KAREEM A. A fuzzy logic based super-twisting sliding mode control scheme for electronic throttle control[C]//2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. New York: IEEE, 2016: 485-492.
- [7] 杨世春, 朱昌吉, 李德刚, 等. 基于非线性模型的直喷汽油机电子节气门控制研究[C]//中国内燃机学会燃烧、节能、净化分会 2008 年学术年会. 长春, 2008: 1-6. YANG S C, ZHU C J, LI D G, et al. Research on electronic throttle control of GDI engine based on nonlinear model[C]//The Annual Meeting of Combustion, Energy Conservation and Purification in 2008. Changchun, 2008: 1-6. (in Chinese)
- [8] WANG C H, HUANG D Y. A New intelligent fuzzy controller for nonlinear hysteretic electronic throttle in modern intelligent automobiles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2332-2345.
- [9] YUAN X F, WANG Y N, WU L H, et al. Neural network based self-learning control strategy for electronic throttle valve[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 3757-3765.
- [10] LI Y F, YANG B, ZHENG T X, et al. Extended state observer based double loop integral sliding mode control of electronic

- throttle valve[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(5): 2501-2510.
- [11] GONG X, HU Y F, SUN P Y, et al. A nonlinear feedforward-feedback controller design for electronic throttle based on flatness[C]//24th Chinese Control and Decision Conference. New York: IEEE, 2012: 1542-1547.
- [12] SAKMAN L E, GUCLU R, YAGIZ N. Examples for the design of mechatronic systems: modeling, control and diagnosis[M]. London: Springer, 2005.
- [13] MCHAREK M, HAMMADI M, AZIB T, et al. Modeling and multi-objective optimization of an electronic throttle in open-loop[C]//17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM). Compiègne: IEEE, 2016: 331-335.
- [14] AI-ASSADI S, BREITINGER J, MURPHY N. Model-based friction and limp home compensation in electronic throttle control[R]. Washington DC: SAE Technical Paper, 2006.
- [15] OLSSON H, ÅSTRÖM K J, WIT C C D, et al. Friction models and friction compensation[J]. *European Journal of Control*, 1998, 4(3): 5517-5522.
- [16] POPOV V L. Coulomb's law of friction[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [17] ISERMANN R. Mechatronic systems: fundamentals[M]. London: Springer-Verlag London Limited, 2005.
- [18] 胡颖智. 台架试验用 GDI 发动机电控单元硬软件设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.  
HU Y Z. Design of electronic control unit hardware and software for bench experiment GDI engine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] 陈虹, 宫洵, 胡云峰, 等. 汽车控制的研究现状与展望[J]. *自动化学报*, 2013, 39 (4): 322-346.  
CHEN H, GONG X, HU Y F, et al. Automotive control: the state of the art and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 322-346. (in Chinese)
- [20] GANER J, BONDESSON R. Adaptive realtime control of a nonlinear throttle unit[D]. Lund: Lund Institute of Technology, 2000.
- [21] GRIFFITHS P G. Embedded software control design for an electronic throttle body[D]. California: University of California, 2002.