

# FSAE 发动机进气量修正系统的设计与验证

吴新烨, 罗树友, 黄红武

(厦门大学 机电工程系 福建 厦门 361005)

**摘要:**针对限制器引起的进气管内压力损失会增加赛车实际油耗的问题, 该文以单缸四冲程赛车发动机为研究对象, 从混合气体空燃比控制、喷油量的控制和进气量测量 3 个方面分析了电喷系统, 结合电喷系统的特点建立了进气量修正方案, 在此基础上进行了控制单元的硬件和软件设计。通过对发动机喷油脉宽的检测验证了进气量修正控制单元满足设计要求, 达到了降低油耗、提高赛车竞争力的目的。

**关键词:**SAE 方程式赛车; 限制器; 控制单元; 油耗

中图分类号: U461.8 文章编号: 1005-9830(2014)02-0234-07

## Design and verification on air inflow correction system of FSAE engine

Wu Xinye, Luo Shuyou, Huang Hongwu

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In view of that the pressure loss in the air inflow pipe caused by the restrictor makes the actual fuel consumption relatively increasing, the four-stroke engine of the formula SAE car is investigated here. The electronic fuel injection (EFI) system is analyzed from three aspects of the air-fuel ratio control of the mixed gas, the control of fuel injection quantity, and the measurement of air inflow. According to the characteristics of the EFI system, the air inflow correction scheme is designed, and the hardware and software of the control unit are accomplished. The test of pulse-width of EFI system shows that the control unit of air inflow correction can meet the design requirements, reduce the fuel consumption, and improve the competitiveness of the FSAE.

**Key words:** formula SAE; restrictors; control unit; fuel consumption

目前针对赛车进气量限制器的研究主要集中在如何增加发动机的进气量, 降低进气限制器造成的进气管内压力损失。H Enomoto<sup>[1]</sup>等研究了

利用涡流增压器提高进气压力, 进而提高发动机扭矩的输出。许建民<sup>[2]</sup>等分析了限制器安装的位置对发动机动力能的影响, 利用 CFD 分析软件

收稿日期: 2013-09-12 修回日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51305372)

作者简介: 吴新烨(1980-), 博士, 助理教授, 主要研究方向: 汽车轻量化及安全, E-mail: wuxinye@xmu.edu.cn。

引文格式: 吴新烨, 罗树友, 黄红武. FSAE 发动机进气量修正系统的设计与验证[J]. 南京理工大学学报, 2014, 38(2): 234-240.

投稿网址: <http://njlgdxxb.paperonce.org>

改进了进气系统的设计。D Cordon 等利用 WAVE 分析软件对赛车发动机进行一维循环模拟仿真,分析了进气量限制器对发动机性能的影响并优化了进气系统设计<sup>[3]</sup>。M Claywell 等人通过 1D&3D 耦合分析的方法,对进气限制器改进设计<sup>[4]</sup>。戴尔豪西大学研究利用文丘里管连接进气管与发动机,其中文丘里管中心部分为圆形进气限制器,该结构一定程度上降低了限制器造成的压力损失。然而目前研究大多没有考虑限制器对赛车燃油消耗的影响,特别是对应用发动机电喷系统的赛车的影响。事实上限制器引起的进气管内压力损失,降低了发动机电喷系统对进气量测量的准确度,破坏了喷油和空燃比的控制精度,使得赛车实际油耗增加,降低了赛车燃油经济性和在耐久性比赛项目中的竞争力。

## 1 赛车电喷系统空燃比控制策略分析

电喷系统很大程度提高了发动机的功率和扭矩,降低了发动机油耗和废气排放量<sup>[5]</sup>。空燃比的控制是发动机控制核心之一,它直接影响发动机的动力性、经济性和排放性能。

### 1.1 空燃比对发动机性能的影响

空燃比与发动机的动力性、燃油经济性和排放性有着密切关系<sup>[6]</sup>。图 1 所示<sup>[7]</sup>,气缸内混合气体燃烧温度在空燃比为 12~13 时出现最高值,此时火焰传播的平均速率最高,最高爆发压力达到最大值,发动机输出最大功率,该空燃比称为功率空燃比。而当空燃比约为 16 时,空气稍微过量,而燃油完全燃烧,发动机的燃油消耗达到最低,此时的空燃比称为经济空燃比。发动机正常工作,空燃比一般介于功率空燃比和经济空燃比之间,可以是发动机获得良好的性能。

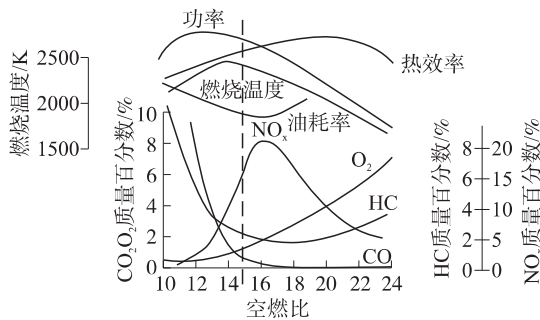


图 1 空燃比对发动机性能的影响

### 1.2 空燃比的控制要求

从理论上讲,混合气体在理论空燃比时,燃油

可以完全燃烧,此时发动机具有较好的经济性和排放性,但考虑到发动机的综合性能,在不同的工作状况下需要不同的空燃比。发动机工况通常可以分稳态工况和过度工况两大类。

#### (1) 稳态工况空燃比控制要求

发动机进入稳态工况工作时,发动机已经完全预热,进入正常运转,且转速和负荷在一定的时间内不会发生突变。稳态工况下,传统汽油机负荷变化时所需的空燃比控制要求如图 2 所示<sup>[8]</sup>。

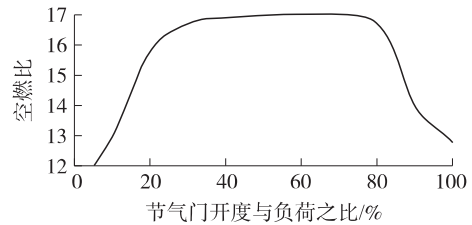


图 2 发动机负荷变化时所需的空燃比

#### (2) 过度工况时空燃比控制要求

发动机在运行当中过度工况可分为冷启动、暖机、加速和减速等 3 种形式。冷启动时,由于发动机的转速和燃烧室壁温度低、空气流速慢,不利于汽油的蒸发和雾化,因此需要供给很浓的混合气体。在暖机过程中,虽然发动机温度随着转速有所提升,但是发动机温度仍然比较低,气缸内的废气比较多,混合气体也受到一定的稀释,所以混合气体仍需要加浓,并且浓度逐渐减少,直到发动机能以正常的混合气体在稳态工况下运转为止。在加速时,节气门突然开大,进气管压力也随之增大;由于燃料流动的惯性和进气压力增大,使得燃料的蒸发量减少,大量的汽油颗粒沉积在进气管壁上,混合气体瞬间被稀释,这时需要喷入附加的燃料,已获得良好的加速性能。在减速时,节气门突然减小,但由于惯性作用,发动机仍保持很高的转速,进气管内压力降低,使得附着在进气管壁上的燃油加速气化,造成混合气体加浓,此时应减少燃料的供给。

### 1.3 空燃比控制方式

空燃比的控制方式按有无反馈信号可以分为开环控制和闭环控制两类。发动机运行时,电控单元根据发动机的工况及氧传感器反馈的空燃比信号,确定系统进入开环或者闭环控制。发动机在启动、暖机、加减速、大负荷以及减速断油的工况下,要采用开环控制<sup>[9]</sup>。空燃比的闭环控制在开环控制的基础上增加了氧传感器信号的反馈,从而构成了闭环控制回路。闭环控制弥补了开环控制的

不足,满足了空燃比高精度控制的要求<sup>[10]</sup>。

### 1.4 赛车电喷系统空燃比控制流程图

赛车发动机空燃比控制流程图如图 3 所示,电喷系统根据曲轴位置传感器、进气压力传感器、进气温度传感器信号确定发动机的进气量,然后根据目标空燃比确定基本喷油量。电喷系统通过曲轴位置传感器、节气门位置传感器、冷却水温度传感器信息判断发动机的工况,确定闭环控制或开环控制,最后确定实际喷油量,并有电控单元产生喷油信号驱动喷油器。

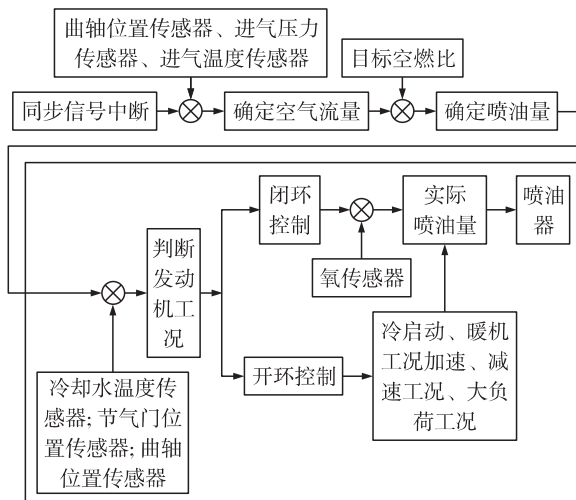


图 3 空燃比控制流程图

## 2 喷油器驱动信号分析

### 2.1 喷油特性分析

喷油器是发动机电喷系统的执行元件,它根据电控单元发出的控制信号,在一定的时刻喷射一定数量的雾化良好的燃油。喷油器的结构如图 4 所示。

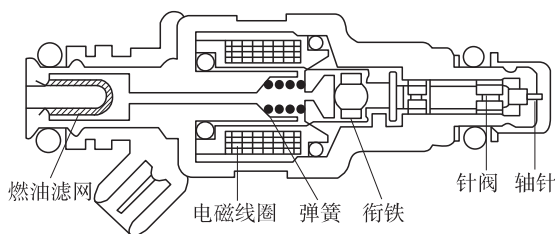


图 4 喷油器的结构

喷油器单次喷油质量  $G_f$  的计算公式为

$$G_f = \mu_n F_n \cdot \sqrt{2} \cdot g d_f (p_f - p_b) \tau_f \quad (1)$$

式中: $\mu_n$  表示喷油嘴的流量系数; $F_n$  表示喷油嘴的面积; $g$  表示重力加速度; $d_f$  表示燃料的密度;

$p_f$  表示燃料的压力, $p_b$  表示进气压力, $\tau_f$  表示开阀持续的时间。

对于发动机特定型号的喷油嘴来说,其流量系数  $\mu_n$  和喷油嘴的面积  $F_n$  都是定值,并且由于燃油压力调节器的作用使得喷油嘴的喷油压力与进气歧管的压力差  $(p_f - p_b)$  保持恒定,所以喷油器的每次喷油量仅与开阀持续的时间  $\tau_f$  成正比,因此发动机每一循环所需的燃油量可以通过控制喷油时间来确定

$$G_f = K \cdot \tau \quad (2)$$

式中: $K$  表示常数,由喷油器的结构决定, $\tau$  表示实际喷油时间

$$\tau = \tau_p \cdot F_c + \tau_n \quad (3)$$

式中: $\tau_p$  为基本喷油时间, $\tau_n$  为喷油无效时间, $F_c$  喷油的修正系数。基本喷油时间由气缸进气质量  $G_a$  和目标空燃比  $A/F$  决定,即

$$G_f = \frac{G_a}{A/F} \quad (4)$$

根据式(2)可知

$$\tau = \frac{G_a}{K \cdot (A/F)} \quad (5)$$

如果  $A/F$  是理想空燃比 14.7,那么这个喷油时间就是基本喷油时间  $\tau_p$ 。喷油无效时间  $\tau_n$  是由喷油器动作滞后引起的。当电控单元输出信号驱动喷油器工作时,开阀的时间  $\tau_o$  比关阀时间  $\tau_c$  长,在实际喷油时间内有  $(\tau_o - \tau_c)$  段时间喷油器不喷油,即为无效喷射时间。

### 2.2 喷油控制信号

在发动机的 4 个工作行程:进气行程,压缩行程,做功行程,排气行程中,喷油时刻一般在排气行程上止点前一个角度,电控单元通过调整控制信号有效电平脉冲的宽度及周期实现喷油控制。喷油控制信号如图 5 所示。

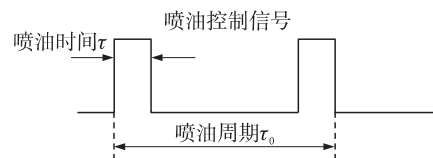


图 5 电控单元喷油控制信号

不同的负荷和转速下,喷油控制信号的喷油周期  $\tau_0$  与喷油时间  $\tau$  是不同的,以满足此工况下空燃比的控制要求。喷油周期  $\tau_0$  随着转速的增加逐渐缩短,而喷油脉冲宽度  $\tau$  直接反映了发动机每一循环的喷油量的变化。

### 2.3 喷油脉冲宽度与燃油消耗

由喷油器的特性可知,特定型号的喷油器单次喷油量仅仅与开启时间成正比。因此,对于赛车单点喷射的系统来说,发动机在任意工况下燃油消耗的质量  $Q$  可以用式(6)表达

$$Q = K \cdot \sum_{j=1}^N \tau_j \quad (6)$$

由式(6)可知,喷油脉冲宽度直接反映了发动机燃油消耗的变化,检测喷油脉宽的也是目前燃油消耗量快速检测的一种方法。

## 3 赛车电喷系统进气量测量

发动机的进气量是发动机电喷系统根据发动机工况控制喷油量的主要依据。赛车电喷系统采用速度-密度法进行进气量测量。进气量计算公式如下<sup>[11]</sup>

$$m_a = \frac{V_d p_m}{RT} \cdot \eta_v \cdot \frac{n}{120} \quad (7)$$

式中: $m_a$  为发动机每循环进气量; $V_d$  为发动机排气量; $n$  为发动机转速; $\eta_v$  为发动机的充气效率(与进气压力和转速有关); $p_m$  为进气管绝对压力; $T$  为进气管气体温度; $R$  为气体常数。

利用速度-密度测量发动机的进气量精度比较高,能适应各种原因引起的负荷的变化,因为如果负荷变化,进气压力也会随之发生变化<sup>[12]</sup>。但是赛车发动机进气歧管体积小,进气压力的波动很大。虽然电喷系统有专门的软件处理,保证进气压力稳定,但是进气管内安装  $\phi 20\text{mm}$  进气量限制器,引起限制器前、后处进气管内压力损失,造成电喷系统进气测量的误差。

## 4 进气量修正方案的建立及控制单元的实现

由于进气管安装进气量限制器,该处的通过面积变小,且截面变化很大,造成了很大的流动损失,导致了发动机充气效率下降。由于充气效率下降,发动机单位时间内燃烧的空气质量下降。在一定空燃比下,空气质量的减少也导致燃油单位燃烧量也下降。这一方面是由于进气质量的减少,燃料燃烧不充分导致,另一方面限制器上游进气压力传感器处的压力升高,而电喷系统以此处压力作为进气量计算的依据,必然导致计算的进

气量比实际的进气量高,在一定空燃比要求下,燃油喷射“过量”加剧了燃油经济性的下降。

### 4.1 进气量修正控制单元设计方案

#### 4.1.1 发动机电喷系统调整的途径

针对赛车发动机电喷燃油喷射“过量”造成赛车燃油经济性的下降。本文拟通过对电喷系统进气测量部分适当的调整,对进气量的测量进行修正。目前电喷系统调整的途径主要有以下 3 种:(1)通过转存程序芯片修改电控单元;(2)利用外部可调式的控制单元;(3)使用专业级的电控单元。

#### 4.1.2 进气量修正方案建立

本文拟采用修改进气温度传感器信号,达到修正进气量的目的。进气温度传感器反映了进气的密度,它的感应元件是负温度系数的电阻,适当的修改其电阻值就可以达到对进气量测量修正的目的。进气温度传感器的温度范围为  $-40 \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ ,而阻值变化范围为  $0 \sim 20\text{ k}\Omega$ ,温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  时典型阻值为  $3.52\text{ k}\Omega$ 。赛事是一一般在 6 月份举办,设定此时 FSAE 发动机工作时进气温度为  $27.85\text{ }^\circ\text{C}$ ,此时进气温度传感器为  $2500\text{ }\Omega$ ,该阻值作为进气量修正的基准值。

由于进气压力传感器反映的压力的变化应该与进气门处基本相一致,所以利用进气门压力变化曲线作为进气量补偿的参考曲线。在不同转速下,进气压力传感器处压力与进气门处压力损失以及温度修正值见表 1。

表 1 不同转速下压力损失及温度修正值

转速/ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	进气压力传 感器处压 力/ $\text{kPa}$	进气门处 压力/ $\text{kPa}$	压力损 失/ $\%$	修正温 度/ $\%$
1500	98.8	98.1	0.71	0.71
2000	98.2	96.4	1.83	1.87
2500	97.7	94.6	3.17	3.28
3000	97.2	94.2	3.09	3.18
3500	97.1	92.4	4.84	5.09
4000	96.9	90.6	6.50	6.95
4500	96.9	90.1	7.02	7.55
5000	96.9	88.8	8.36	9.12
5500	96.9	88.5	8.67	9.49
6000	97.1	88.2	9.17	10.09
6500	97.1	88.2	9.17	10.09
7000	97.1	88.1	9.27	10.22

进气温度传感器是电阻式传感器,因此可以

通过外接电路改变其信号的阻值,达到修正温度的阻值。而温度补偿传感器阻值可以通过非线性插值得取。由于进气温度传感器具有负温度系数特性,因此可以通过并联不同阻值的电位器实现不同转速下阻值改变。表 2 所示为对应不同转速下的进气温度传感器阻值以及修正电阻值。

表 2 温度补偿电阻值

转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	传感器 阻值/Ω	修正电 阻值/Ω	转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	传感器 阻值/Ω	修正电 阻值/Ω
1500	2208	18904	4500	973	1593
2000	2055	11545	5000	812	1203
2500	1760	5946	5500	780	1134
3000	1500	3750	6000	750	1071
3500	1318	2788	6500	720	1011
4000	1120	2029	7000	700	972

#### 4.1.3 进气量修正控制单元设计框图

为了实时的对 FSAE 发动机电喷系统进气量进行修正,需要设计与现有的电控系统匹配的控制单元。控制单元硬件电路要求可靠性高,且不影响原有的系统正常工作;软件设计要求足够的控制精度,且具有一定抗干扰能力。

控制单元的硬件电路设计包括单片机系统的电路设计、转速信号采集电路的设计、以及驱动电路设计。确定硬件电路的总体方案,控制系统组成如图 6 所示。



图 6 进气量修正控制单元框图

#### 4.2 控制单元硬件电路设计

##### (1) 微控制器选型

本文设计控制单元选用 NEC 公司 78K0/FC2 系列微控制器  $\mu D78F0883$ ,该芯片性能可靠、功能强大,满足外部电控单元功能,运算速度,存储空间等要求。

##### (2) 系统时钟电路

时钟产生电路为 CPU 以及外围硬件提供时钟,它是系统正常工作必须的条件。本文设计主系统时钟采用频率为 12 M 的外部振荡时钟。

##### (3) 系统电源电路

系统电源为整个系统提高能量,是整个系统正常工作的基础,具有极其重要位置。FSAE 赛车发动机电喷系统的供电电源是有蓄电池提供的。系统电源设计采用了 LM7805 进行了稳压处

理,使得电压稳定输出 5 V。

##### (4) 系统复位电路

单片机正常工作时,RST 端保持低电平。当 RST 为高电平并保持 10 ms 以上时间可以实现单片机复位。

##### (5) 调试编程电路

设计中目标系统与仿真调试器选用 16 - pin 连接口,编程接口 UART,通信引脚 X1/X2,时钟选择由 X1 引脚连接的振荡器产生。

##### (6) 输入级转速信号处理电路设计

根据信号的特性,本文选用 ON Semiconductor 公司的 NCV7001 信号处理芯片,配合适当的外围电路对信号进行滤波、限幅、比较、整形等处理将其转化成 3.3 V 电平的方波信号。

##### (7) 输出级驱动电路设计

单片机的输出是连接由光电耦合器 TL817 和电位器组成一组补偿电路。

##### (8) 硬件抗干扰措施

发动机的工作环境非常恶劣,一方面要承受高温、震动、腐蚀、高湿等恶劣环境的影响,另一方面还受到自身以及外界的电磁波的影响。因此控制单元必须具有一定的可靠性和抗干扰的能力,才能保证他的正常工作<sup>[13]</sup>。本文在硬件抗干扰制定了如下防护措施:(1)采用光电隔离技术;(2)合理布线。

#### 4.3 控制单元软件设计

软件设计主要实现对处理后的曲轴信号的接收,计算出发动机的转速,然后根据发动机转速,控制光电耦合器完成对相应的传感器信号的调节。

##### (1) 转速的测量

本文设计采用测频法进行转速的测量<sup>[14]</sup>。中断服务程序流程图如图 7 所示。

##### (2) 控制程序设计

控制程序是嵌入在定时器 TM01 中断服务程序中,主要为分支程序的设计。首先根据读出计数器 TM00 的值换算为转速,然后根据转速的大小执行相应子程序。控制程序流程图如图 8 所示。

##### (3) 软件抗干扰措施

有时程序系统受到强干扰后,会使微处理器的程序计数器的值改变,从而使主程序不能正常工作,陷入瘫痪状态。为了使系统受到干扰后能够恢复到正常工作状态,在软件设计使用了“看门狗”监视跟踪定时器(WATCHDOG)。在  $\mu D0883$  中,监视跟踪定时器实质上是一个 16 位

的计数器,它具有独立的时钟电路。监视定时器启动后,每个状态周期其计数值加 1。当计数器(64 K 状态周期)溢出时,就把 RESET 引脚拉至低电平,并保持两个周期状态,从而使单片机系统复位重新开始。对 WATCHDOG 的设计就是对定时器的初值设置,如果程序运行正常,那么就可每次不到 64 K 状态周期对监视器清零一次。

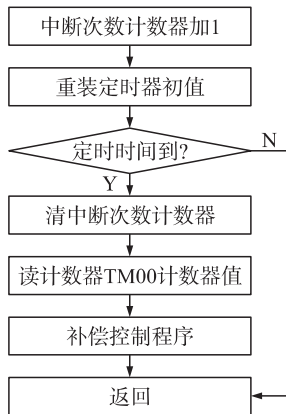


图 7 中断服务程序设计

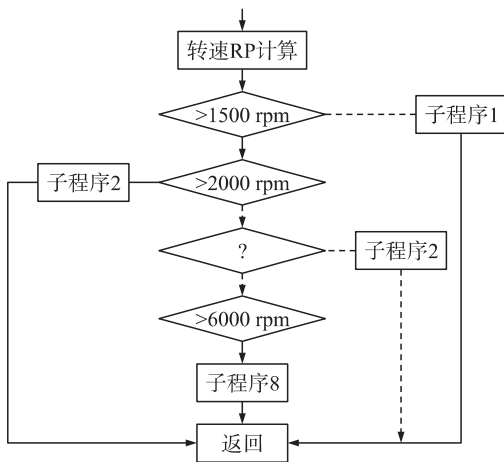


图 8 控制程序流程图

## 5 试验与测试

### 5.1 试验设备

为了验证进气量修正控制单元是否满足设计要求,本文对其与发动机进行了试验测试。试验设备包括 FSAE 赛车电喷发动机、进气量修正控制单元和泰克 TDS1002 示波器。

### 5.2 试验结果

由喷油器的特性可知,特定型号的喷油器单次喷油量仅仅与开启时间成正比。因此,对于赛车单点喷射的系统来说,喷油控制信号脉冲宽度

直接反映了燃油消耗量的变化,故可以通过测量喷油脉宽来检测燃油消耗的变化。试验中喷油控制信号如图 9 中所示。

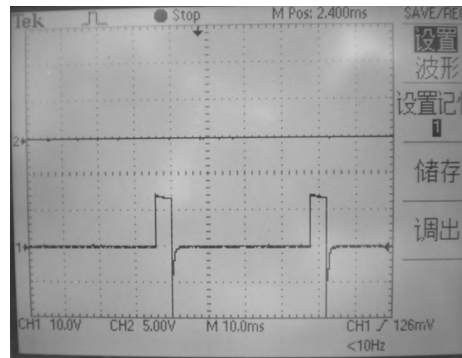


图 9 喷油控制信号

在试验中,进气量修正控制单元的输出信号线与电喷系统温度传感器信号线并联。试验过程中,进气量修正控制单元配合原有的电控系统可以稳定的工作。表 3 喷油脉冲宽度的测量数据,其中  $\tau_1$  为未安装限制器时的喷油脉宽,  $\tau_2$  为安装限制器未进气量修正的喷油脉宽,  $\tau_3$  为安装限制器并进气补偿的喷油脉宽。

表 3 喷油信号测试结果

发动机转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	喷油周期/ ms	喷油脉冲宽度		
		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$
1500	80	4.8	4.8	4.8
1800	69	4.4	4.4	4.4
2100	53	4.15	4.15	4.15
2900	42	4.2	4.3	4.1
4000	32	4.8	4.96	4.6
4200	28	4.9	5.08	4.7
5000	24	5.2	5.3	5.1
6000	21	5.5	5.5	5.2
6800	19	5.2	5.2	5.0

从表 3 结果表明,通过对进气量的修正,赛车发动机喷油控制信号脉冲宽度得到了有效降低。进气量修正控制单元在一定程度上降低了燃油消耗量,提高了赛车的燃油经济性。

## 6 结论

SAE 方程式比赛越来越受到全球各高校和汽车行业的关注,但国内参与该赛事才刚刚起步。赛车制作水平和车手的竞技能力与国外还有一定

差距。本文结合 FSAE 赛车研究课题,对基于赛事规则安装的  $\phi 20$  mm 限制器的影响进行了分析,通过剖析发动机电控喷油系统,建立了通过改变进气温度传感器信号实现进气量修正的方案,完成了控制单元硬件和软件设计,并通过发动机匹配测试,检测了喷油信号的变化,验证了补偿方案的可行性。

#### 参考文献:

- [1] Enomoto H, Hiroyuki M. The package of the turbo-charged engine for the FSAE vehicle with the custom lubricant system [A]. Proceeding of SETC [C]. Niigata, Japan: Society of Automotive Engineering of Japan, 2007: 1-8.
- [2] 许建民, 刘金武, 李晓宇. FSAE 赛车进气系统改进设计 [J]. 厦门理工学院学报, 2009, 17(4): 43-47.  
Xu Jianmin, Liu Jinwu, Li Xiaoyu. Enhanced intake system design of FSAE race car [J]. Journal of Xiamen University of Technology, 2009, 17(4): 43-47.
- [3] Cordon D, Dean C. One-dimensional engine modeling and validation using Ricardo wave [R]. Moscow, US: National Institute for Advanced Transportation Technology, University of Idaho, 2007.
- [4] Claywell M, Horkheimer D. Improvement of intake restrictor performance for a formula SAE race car through 1D & coupled 1D/3D analysis methods [J]. SAE, 2006-01-3654.
- [5] 付吉平, 张振东, 尹丛勃, 等. 摩托车发动机电控喷油和电子点火控制系统研究 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2009(3): 88-92.  
Fu Jiping, Zhang Zhendong, Yin Congbo, et al. Study on the control system of EFI and EI for motorcycle engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2009(3): 88-92.
- [6] 吴建华, 常绿, 韩同群. 汽车发动机原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [7] 顾维东. 电喷摩托车发动机空燃比控制的研究 [D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2006.
- [8] Heywood J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York, US: McGraw Hill Book Company, 1988.
- [9] 姜卓. 汽油机新型 ECU 的硬件设计与喷油控制策略研究 [D]. 上海: 上海交通大学内燃机研究所, 2000.
- [10] 邓旭斌. 摩托车电控发动机硬件系统设计及控制策略研究 [D]. 广州: 广东工业大学机电工程学院, 2008.
- [11] 徐远望. 电控燃气摩托车发动机的研究 [D]. 杭州: 浙江大学能源工程学院, 2004.
- [12] 万冬, 白富强, 顾维东, 等. 摩托车电喷系统进气量计量方法的研究 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2007, 36(1): 12-14, 18.  
Wan Dong, Bai Fuqiang, Gu Weidong, et al. Investigation of air intake characteristics of the fuel injection system of four-stroke motorcycle engine [J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2007, 36(1): 12-14, 18.
- [13] 吴远鹏, 习纲, 葛林. 小型汽油发动机电喷系统平台——MSE2.0 [J]. 摩托车技术, 2003(10): 10-13.  
Wu Yuanpeng, Xi Gang, Ge Lin. MSE2.0: An electronic injection system platform for small gasoline engines [J]. Motorcycle Technology, 2003(10): 10-13.
- [14] 张付军. 基于模糊控制理论和 MVEM 模型的汽油机控制系统研究 [D]. 北京: 北京理工大学机械与车辆工程学院, 2006.