

文章编号:1000-582X(2012)04-133-06

## 高比例甲醇汽油车用控制系统

杨帆<sup>1</sup>, 张 珺<sup>2</sup>, 胡佩锋<sup>3</sup>

(1. 长安大学 经济与管理学院, 西安 710064; 2. 新时代(西安)设计研究院有限公司, 陕西 西安市 710064;  
3. 美国内华达大学雷诺分校 土木工程学院, 雷诺 89557)

**摘 要:**为解决高比例甲醇汽油无法直接应用于普通汽油机的问题,立足于延长喷油脉宽的思路,设计了以微控制器(MCU, Micro Controller Unit)为核心的高比例甲醇汽油控制系统,并进行了 PROTEUS 仿真与台架试验,发现使用该控制系统时, Flyer M-TCE 发动机燃用 M85 甲醇汽油表现良好。结果表明:高比例甲醇汽油控制系统可以在不对原行车电脑进行更改的前提下有效控制发动机燃油喷射量,提供了在普通汽油发动机上应用高比例甲醇汽油的新思路。

**关键词:** 汽车运输; 替代燃料; 高比例甲醇汽油; 控制系统; 喷油脉宽; 微控制器(MCU)

**中图分类号:** U473

**文献标志码:** A

## A control system for vehicle applications of high-blend methanol gasoline

YANG Fan<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, HU Pei-feng<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, P. R. China;  
2. New Era(Xi'an)Design Engineering Co. Ltd., Xi'an 710054, Shaanxi, R. R. China;  
3. Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno, Reno 89557, U. S. A)

**Abstract:** The ordinary gasoline engines could not be fueled by high-blend methanol directly. A MCU-based high-blend methanol gasoline control system is designed to extend the injection pulse width. PROTEUS simulation and test bench are validated. Flyer M-TCE engines burning M85 go smoothly. The results indicate that the high-blend methanol gasoline control system can effectively control the engine injection mass without changing the original Electronic Control Unit, and make it feasible to apply high-blend methanol gasoline to the ordinary gasoline engines.

**Key words:** motor transportation; alternative fuels; high-blend methanol gasoline; control systems; injection pulse width; micro controller unit

交通运输是国家能源消耗与环境影响大户。2007年,汽车消耗汽油 4 894 万吨、柴油 5 050 万吨,分别占汽柴油消耗总量的 87%和 40.7%,汽车交通行业成为中国成品油的主要消耗领域<sup>[1]</sup>。根据 OICA 统计,汽车尾气排放已占全球 CO<sub>2</sub> 排放总量

的 15.9%。预计 2020 年,中国汽车保有量将超过 2 亿辆,车用燃油消耗为 3.05 亿吨,换算成原油将超过 5 亿吨,由此带来的能源安全和环境保护问题将更加突出,发展汽车代用燃料迫在眉睫。甲醇,可由煤炭、天然气等多种来源制取,且燃烧时不产生黑

收稿日期:2011-09-20

基金项目:交通运输部科技项目(2009-332-223-250)

作者简介:杨帆(1983-),女,长安大学博士研究生,美国内华达大学雷诺分校联合培养博士生,从事交通运输规划与管理研究,(E-mail) yangfan@chd.edu.cn。

郝恩崇(联系人),男,长安大学教授,博士生导师,(E-mail) xiench@chd.edu.cn。

烟,具有污染小、辛烷值高等特点。它与汽油经添加剂互溶得到的甲醇汽油,是未来交通行业中替代汽油的主要燃料<sup>[2-3]</sup>。

有关甲醇替代汽油的技术性能问题,国外学者已经进行了一系列研究。Karaosmanoglu 等介绍了添加剂对甲醇汽油分离性的影响<sup>[4]</sup>。Bilgin 等考虑和计算了不同混合比例下甲醇汽油发动机的性能表现与经济性<sup>[5]</sup>。Arapatsakos 等比较了不同混合比下甲醇汽油的排放性能<sup>[6]</sup>。

在使用甲醇汽油作为替代燃料方面,中国领先于世界。2007 年,中国混合燃料甲醇投入量近 10 亿加仑。许多地区的出租车和公共汽车都使用 M85 或 M100 甲醇燃料,零售点油泵出售 M15 或更低比例甲醇汽油<sup>[7]</sup>。相应的甲醇汽油理论研究也更为深入和系统。刘丹丹通过台架试验得到醇类燃料发动机醛类排放物的数据<sup>[8]</sup>。车望军等比较了甲醇汽油与汽油在排放物毒性上的差异<sup>[9]</sup>。乔映宾等针对甲醇汽油对汽车零部件的腐蚀性进行了相应研究<sup>[10]</sup>。

目前,甲醇汽油在交通行业替代汽油的研究主要围绕低混合比例和技术性能层面展开,如何在普通汽油机上应用高比例甲醇汽油尚处空白。然而,甲醇的理化特性与汽油差异很大,表现如保持燃油时的喷油量,将出现高比例甲醇汽油混合气浓度过稀的情况,混合气不能点燃。本文作者引入基于微控制器(Micro Controller Unit, MCU)的控制系统,使普通汽车应用高比例甲醇汽油并自由切换燃料成为可能,为汽油向高比例甲醇汽油平稳过渡提供了新思路。

## 1 高比例甲醇汽油控制系统的应用基础

M85 甲醇汽油和普通 RON93 汽油在化学和物理性质上的种种不同,使得在普通汽油发动机上无法直接燃用 M85。因而,首先进行 M85 替代 RON93 的相关分析与理论计算。

### 1.1 M85 甲醇汽油理论空燃比与热值

首先计算 M85 甲醇汽油的理论空燃比。

甲醇的理论空燃

$$\begin{aligned} A/F_M &= \frac{3 \times M_{O_2}}{2 \times M_{CH_3O}} \times \frac{M_A \times 100\%}{M_{O_2} \times 21\%} \\ &= 6.47. \end{aligned} \quad (1)$$

由式(1)可得到, M85 甲醇汽油的理论空燃比

$$A/F_{M85} = A/F_M \times \frac{V_M}{V_{M85}} \times \frac{\rho_M}{\rho_{M85}} +$$

$$A/F_G \times \frac{V_G}{V_{M85}} \times \frac{\rho_G}{\rho_{M85}} = 7.62.$$

RON93 汽油的理论空燃比是 14.7:1,而 M85 甲醇汽油的理论空燃比是 7.62:1。若保持相同的燃料喷射量,则 M85 甲醇汽油的可燃混合气将稀薄 193%。在 M85 甲醇汽油启动试验中,未加装控制系统的 0.8 L 三缸 M-TCE 发动机表现如下:外界温度较高时,能够成功点火,但运转抖动大,约 5 s 后自动熄火;外界温度较低时,不能完成点火和启动。使用尾气分析仪,在发动机熄火前 5 s 内检测过量空气系数,λ 值大于 2,实验结果与理论计算结果一致。

接下来计算,相同汽缸容积下 M85 甲醇汽油与 RON93 汽油理论混合气热值之比

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{1}{Q_G \times \frac{L_0}{A/F_G}} \left( Q_M \times \frac{V_M}{V_{M85}} \times \right. \\ &\quad \left. \frac{\rho_M}{\rho_{M85}} \times \frac{L_0}{A/F_{M85}} + Q_G \times \frac{V_G}{V_{M85}} \times \frac{\rho_G}{\rho_{M85}} \times \frac{L_0}{A/F_{M85}} \right) \\ &= 102\%. \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可知,在相同汽缸容积下,混合气完全燃烧时, M85 甲醇汽油与 RON93 汽油动力性能相当。

### 1.2 燃料喷射量

汽车喷油器的单次燃油喷射量可表示为<sup>[11]</sup>

$$G = \mu S \sqrt{2g\rho(P_i - P_0)} T. \quad (4)$$

其中, G 为单次燃油喷射量; μ 为喷油孔的流量系数; S 为喷油孔截面面积; g 为重力加速度; ρ 为燃油密度; P<sub>i</sub> 为喷油压力; P<sub>0</sub> 为供油压力; T 为喷油持续时间。

由式(4)可知,若想调整喷油器单次燃油喷射量,可以在喷油孔流量系数、喷油孔截面面积、供油压力和喷油压力以及喷油持续时间等制约因素上寻求改变。其中,喷油孔流量系数、喷油孔截面面积、供油压力及喷油压力,是由喷油器本身尺寸和参数决定的,改动这些参数相对困难。相比较而言,改变喷油持续时间较为简单,并且有利于多燃料多配比时的喷油量调整。因此,本文采用调整喷油持续时间的方法来加大单次燃油喷射量。

喷油持续时间,就是喷油器处在开启状态下的时长,可以通过行车电脑(Electronic Control Unit, ECU)计算得出。而 ECU 对喷油器发出开启信号和关闭信号的时间间隔,称为喷油脉冲宽度,从几毫秒到几十毫秒不等,可由示波器测得。因为喷油器顶针从喷油器接到 ECU 的开启、关闭信号到完全开

启或关闭有一定延迟和滞后,所以喷油持续时间和喷油脉冲宽度在时间轴上不能完全重合,但这个延迟和滞后相当的微小,故通常情况下喷油持续时间可以用喷油脉冲宽度替代。

### 1.3 M85 甲醇汽油喷油脉宽理论放大倍数

在相同汽缸容积、混合气燃烧充分的条件下, M85 甲醇汽油与 RON93 汽油的燃料供给量比值为:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\frac{L_0}{A/F_{M85}}/\rho_{M85}}{\frac{L_0}{A/F_G}/\rho_G} = 1.78. \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知,若要保证相同汽缸容积下 M85 甲醇汽油的混合气为理论混合气,则 M85 甲醇汽油的单个燃油喷射量应为相同状态下 RON93 汽油的 1.78 倍,即

$$\frac{G_{M85}}{G_G} = \frac{\mu S \sqrt{2g\rho_{M85}(P_{iM85} - P_{oM85})} T_{M85}}{\mu S \sqrt{2g\rho_G(P_{iG} - P_{oG})} T_G} = 1.78. \quad (6)$$

假设燃用汽油与燃用 M85 时,喷油器的喷油与供油压力差值相等,由式(6)可以推出

$$\frac{T_{M85}}{T_G} = \frac{G_{M85}}{G_G} \sqrt{\frac{\rho_{M85}}{\rho_G}} = 1.7. \quad (7)$$

由式(7)可知,燃用 M85 甲醇汽油时的单次喷油脉冲宽度,应为同情况下燃用 RON93 号汽油时的 1.7 倍。

M85 甲醇汽油替代 RON93 汽油在动力性能上不存在问题,然而在燃料消耗量方面,前者是后者的 1.78 倍。若使用 M85 甲醇汽油替代 RON93 汽油,需要加大燃料喷射量,即增大喷油脉冲宽度。

增大喷油脉冲宽度的方案,大体划分为两类。第一类称作 ECU 前调整。这种方案靠修改汽车传感器输出信号来达到增加喷油量的目的。例如,将水温传感器的输出信号改变,让 ECU 认为车辆始终工作在低温状态下,继而自主地延长喷油脉冲宽度。这类方案调整起来比较困难,且单个传感器不能满足复杂工况,需多个传感器互相协调,可移植性差。第二类称作 ECU 后调整。这种方案将原来 ECU 直接输送到喷油器的喷油脉冲信号中途截取,进行处理后将新的喷油脉冲信号重新输送到喷油器,实现增大喷油脉冲宽度的效果。本文采用第二种方案,以 MCU 为核心,对喷油脉冲宽度定量放大,结合氧传感器的燃料喷射量修整能力,使发动机过量空气系数尽可能地保持在 1 附近,最终实现燃用 M85 甲醇汽油。

## 2 高比例甲醇汽油控制系统的模块化应用方案

### 2.1 M85 甲醇汽油喷油脉冲展宽思路

汽车每循环供油量与喷油脉冲宽度基本呈正比例关系。高比例甲醇汽油车用控制系统思路如下:截取 ECU 对喷油器提供的脉冲信号,放大喷油器开启时的电平信号至原信号宽度的 1.7 倍,再将经过处理的喷油脉冲信号通过驱动电路实时提供给喷油器,以完成系统设计目的。

### 2.2 控制系统应用模块化设计

高比例甲醇汽油控制系统应用模块化设计,按照行使功能的不同划分为电源、整形、展宽处理、驱动四个模块。ECU 的输出信号作为系统输入信号,经整形模块去噪整形之后变成陡峭的矩形波,再由展宽处理模块进行喷油脉冲信号展宽,最后经由驱动模块输出到喷油器。整个系统由电源模块供电。

#### 2.2.1 电源模块

电源模块如图 1 所示。其中,三端稳压器 7805,可将汽车蓄电池 +12 V 电压转换为 +5 V 电压以供系统使用。电解电容  $C_1$ 、 $C_2$  用以滤除低频噪声, $C_3$ 、 $C_4$  为高频电流提供良好的旁路<sup>[12]</sup>。二极管  $D_1$  用以检测系统电源模块是否正常工作。

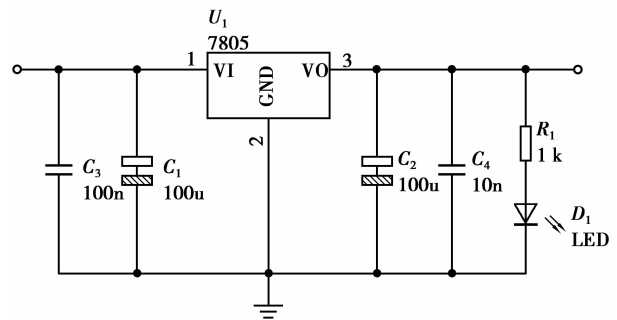


图 1 电源模块电路

#### 2.2.2 整形模块

整形模块的核心器件为 LM339。电源模块提供的 +5 V 电压与 LM339 的同相输入端相连,起到门限电平的作用。汽车蓄电池的 +12 V 电压信号经电阻  $R_1$  和 input 引脚接 LM339 的反相输入端, input 信号接喷油器负相引脚。当喷油器处在导通状态时, input 信号为接地, LM339 反相输入端电平小于正相输入端电平,整形模块输出高电平<sup>[13]</sup>。当喷油器处在截止状态时, input 信号为 +12 V, LM339 的反相输入端电平大于正相输入端电平,整形模块输出低电平,如图 2 所示。

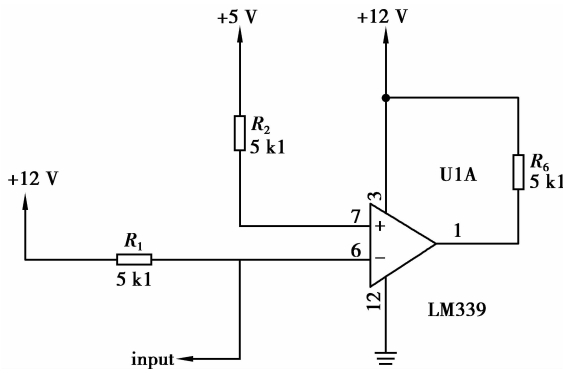


图 2 整形模块电路

### 2.2.3 展宽处理模块

由于汽车的实际运行工况较为复杂,所以很难找到一个固定的展宽值用以适应全部工况范围。在这里,利用氧传感器闭环控制的思路对展宽处理模块进行设计。

目前,常用的加热器型氧化锆式氧传感器为 4 线式传感器。这种传感器有一个电加热元件,可在发动机启动后的 20~30 s 内迅速将氧传感器加热至工作温度。它的 4 根接线分别是信号线、负信号线、电源线和加热器搭铁线。当混合气浓时,废气中几乎不含氧气,传感器的两个表面上的氧气接触量差别大,传感器产生电压高于 800 mV。当混合气稀时,废气中会残余剩余氧气,传感器产生电压低于 200 mV。在正常的闭环工作中,氧传感器输出电压信号大约在 100~1 000 mV 之间波动<sup>[14]</sup>。

展宽处理模块以 AT89C51RD2 为处理器件,喷油脉冲波形由整形模块输出至 AT89C51RD2 的 IO 口。程序设定喷油脉冲展宽量由一个常量加上一个变量得到,触发方式为下降沿触发。常量预设值为燃用 RON93 汽油时怠速工况下喷油脉冲宽度的 1.7 倍,变量由氧传感器 HO<sub>2</sub>S 信号与 450 mV 电压信号经 LM339 比较输入 AT89C51RD2 运算后得到,预设值为 0。当 HO<sub>2</sub>S 电压大于比较电压持续超过 3 s 时,系统判定混合气过浓,变量减少 0.5 ms;当 HO<sub>2</sub>S 信号小于比较电压超过 3 s 时,系统判定混合气过稀,变量增加 0.5 ms,不满足判定条件的维持上一个周期的变量值不变。

### 2.2.4 驱动模块

驱动模块包含功率场效应管和场效应管驱动芯片两部分。在驱动模块中,使用功率场效应管 IRF840 来驱动喷油器。IRF840 为单极型器件,没有少数载流子的存储效应,输入阻抗高,开关速度快,驱动功率小,电路简单。场效应管驱动芯片使用 FAN3224T。FAN3224T 包含 8 引脚,具有两路并

行驱动能力。输入接展宽处理模块输出端,由逻辑电平驱动,输出接 IRF840 的栅极,控制 IRF840 导通与截止。

## 3 高比例甲醇汽油控制系统的仿真试验

仿真实验使用 Proteus VSM (Virtual System Modeling) 完成。Proteus 是一款电子设计自动化软件,提供可仿真数字和模拟、交流和直流等数千种元器件和多达 30 多个元件库。Proteus 提供多种现实存在的虚拟仪器仪表,还可提供图形显示功能,可以将线路上变化的信号,以图形的方式实时显示出来。这些虚拟仪器仪表具有理想的参数指标,例如极高的输入阻抗,极低的输出阻抗,尽可能减少仪器对测量结果的影响。此外,Proteus 还提供丰富的测试信号用于电路测试,并且具有 Schematic Drawing、SPICE 仿真与 PCB 设计功能<sup>[15]</sup>。

在高比例甲醇汽油控制系统仿真试验中,使用虚拟信号发生器输出 100 Hz 的方波模拟喷油器开启和闭合信号作为系统输入,仿真结果如图 3 所示。实际运行中,展宽量的大小取决于氧传感器的反馈波形。

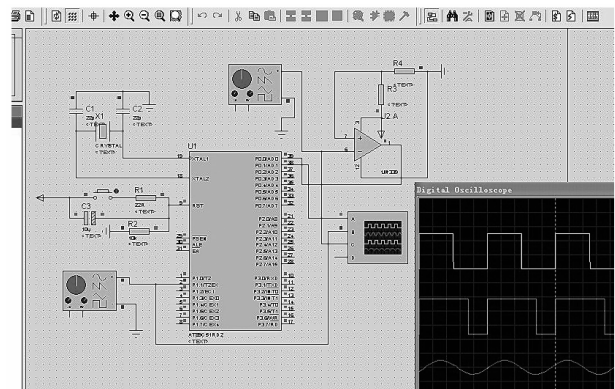


图 3 AT89C51RD2 脉宽调整仿真图

## 4 高比例甲醇汽油控制系统的台架试验

台架试验选用 Flyer M-TCE 发动机及 FST2A 电涡流测功机为主要设备,对 M85 甲醇汽油与 RON93 汽油进行油耗与排放的对比研究。试验结果,如图 4-5 所示。

由图 4-5 可知,M85 甲醇汽油在外特性工况下的燃油消耗量和有效燃油消耗率分别上升了 38.9% 和 47.4%。在尾气排放数据上,M85 甲醇汽油在 900 r/min 的低怠速工况下,一氧化碳、碳氢化合物

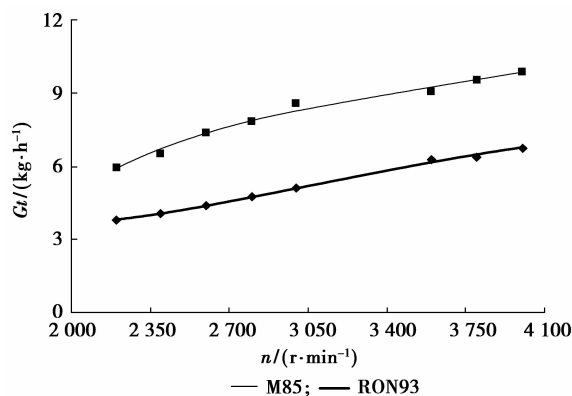


图 4 M85 与 RON93 外特性油耗量比较图

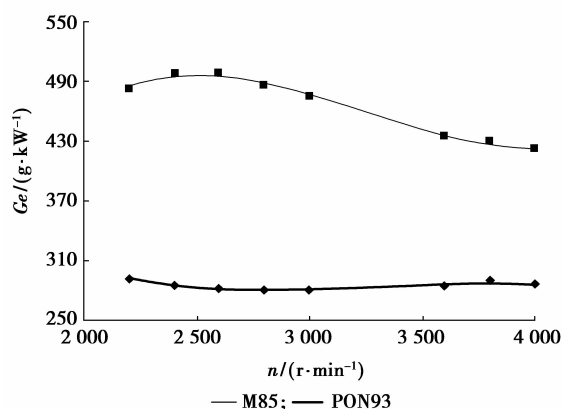


图 5 M85 与 RON93 外特性燃油消耗率比较图

排放量较 RON93 汽油相比分别下降了 7.4% 和 7.8%，氮氧化物排放量上升了 47.4%；2 500 r/min 的高怠速工况下，一氧化碳、氮氧化物排放量分别下降了 63.3 和 8.4%，氮氧化物排放量上升了 37.5%。实验结果表明，尾气中除了氮氧化物浓度升高之外，一氧化碳和碳氢化合物浓度都出现不同程度的降低。

为了检测发动机燃用 M85 甲醇汽油时燃烧情况是否良好，选择 5 个工况，使用尾气分析仪测取各工况下的过量空气系数，结果如表 1 所示。

由表 1 可知，使用高比例甲醇汽油车用控制系统燃用 M85 时的各工况过量空气系数均可以维持在理论值附近，燃烧质量是良好的。

表 1 燃用 M85 时的过量空气系数

转速/ $(r \cdot \min^{-1})$	节气门开度/%	$\lambda$
960	0(低怠速)	1.043
2 600	12%(高怠速)	1.083
3 000	20%	0.997
3 000	30%	0.977
3 000	35%	0.952

## 5 结 语

鉴于当前严峻的能源与环境形势，加强交通运输行业节能减排，推动清洁替代燃料的发展至关重要。针对高比例甲醇汽油的应用难点，本文提出了通过增大喷油器开启电平长度来应用 M85 甲醇汽油的方法，并设计出基于 MCU 的展宽处理系统。不仅有效解决了 M85 应用困难的问题，而且该系统将汽车内部构造的改动程度降到了最低。但是，该控制系统响应速度较慢，没有针对不同燃料调节供油提前角。如果能对汽车运行的各个工况进行进一步的细分处理，相信会取得更加理想的效果。

## 参考文献:

- [1] 董杨,叶盛基,林革,等. 我国节能与新能源汽车发展研究报告[R]. 北京:中国汽车工业协会,2010.
- [2] ZAIDI H A, PANT K K. Catalytic conversion of methanol to gasoline range hydrocarbons[J]. Catalysis Today, 2004, 96(3):155-160.
- [3] 陈伟芳. M15 甲醇汽油对发动机排放的影响[J]. 内燃机工程, 2009, 30(3): 27.  
CHEN WEI-FANG. Effect of M15 methanol gasoline on engine emissions[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2009, 30(3): 27.
- [4] KARAOSMANOGLU F, ISIGIGUR-ERGUDENLER A, AKSOY H A. A new blending agent and its effects on methanol-gasoline fuels[J]. Energy Sources, 2000, 22(3): 235-245.
- [5] BILGIN A, SEZER ?. Effects of methanol addition to gasoline on the performance and fuel cost of a spark ignition engine [J]. Energy Fuels, 2008, 22(4): 2782-2788.
- [6] ARAPATSAKOS C I, KARKANIS A N, SPARE P D. Gas emissions and engine behavior when gasoline-alcohol mixtures are used [J]. Environmental Technology, 2003, 24(9): 1069-1077.
- [7] WEIRAUCH W. China leads world in methanol fuel blending [J]. Hydrocarbon Processing, 2008, 87(3): 19.
- [8] 刘丹丹. 发动机非常规排放物甲醛的检测与分析[J]. 能源工程, 2009(6): 41-44.  
LIU DAN-DAN. The testing and analysis of unregulated pollutant emissions from engine [J]. Energy Engineering, 2009(6): 41-44.
- [9] CHE W J, LIU G M, QIU H, et al. Comparison of immunotoxic effects induced by the extracts from methanol and gasoline engine exhausts in vitro[J]. Toxicology in Vitro, 2010, 24(4): 1119-1125.

- [10] 乔映宾, 张永光. 甲醇汽油应用情况及存在问题的探讨[J]. 石油化工, 2005, 34(增刊): 74-77.  
QIAO YING-BIN, ZHANG YONG-GUANG. On application and problems of methanol gasoline [J]. Petrochemical Technology, 2005, 34(z1): 74-77.
- [11] 孙培岩, 唐佚, 唐运榜, 等. 电喷汽车百公里油耗随车测量新方法[J]. 小型内燃机与摩托车, 2004, 33(6): 35.  
SUN PEI-YAN, TANG YI, TANG YUN-BANG, et al. A new approach to measuring the 100-kilometer fuel consumption of EFI vehicle on the move[J]. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2004, 33(6): 35.
- [12] 王春芳, 王兆安, 王开艳. 弧焊逆变器主电路的改进和实验验证[J]. 电力电子技术, 2010, 44(7): 51-52.  
WANG CHUN-FANG, WANG ZHAO-AN, WANG KAI-YAN. Main circuit improvements and its experimental verification for arc welding inverter[J]. Power Electronics, 2010, 44(7): 51-52.
- [13] ZHANG Y J, CHEN L, FAN L Y. A design of elevator positioning control system model [C]. // Proceedings of IEEE 2008 International Conference on Neural Networks and Signal Processing., June 7-11, 2008, Nanjing, China, [s. l.]: IEEE Press, 2008: 535-538.
- [14] RAJABBEIGIA N, ELYASSI B, ABBAS K A, et al. Oxygen sensor with solid-state  $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2\text{-TiO}_2$  reference [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2005, 108(1-2): 341-345.
- [15] 胡凯伟, 孙毅, 毛亚郎, 等. 基于 PROTEUS 的 ARM 温度采集系统仿真设计[J]. 机械设计与制造, 2010, 2(2): 28.  
HU KAI-WEI, SUN YI, MAO YA-LANG, et al. The proteus-based simulation design of temperature acquisition ARM system [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, 2(2): 28.

(编辑 张小强)

~~~~~

(上接第 132 页)

- [8] NIKKHAJOEI H, LASSETER R H. Micro-grid fault protection based on symmetrical and differential current components [EB/OL]. (2006-12-02) <http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/publicatio/2007public/microgrid-protection-1.Pdf>.
- [9] AI-NASSERI H, REDFERN M A, OGORMAN R. Protecting micro-grid systems containing solid-state converter generation [C] // Proceedings of the 2005 International Conference on Future Power Systems, Nov 18, 2005, Amsterdam, Netherlands. [s. l.]: IEEE Press, 2005:1-5.
- [10] SALAM A A, MOHAMED A., HANNAN M A.. Technical challenges on miro-grids[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2008, 3(6): 64-67.
- [11] 周念成, 贾延海, 赵渊. 一种新的配电网快速保护方案[J]. 电网技术, 2005, 29(23):68-73.  
ZHOU NIAN-CHENG, JIA YAN-HAI, ZHAO YUAN. A new high-speed protection scheme for distribution network [J]. Power System Technology, 2005, 29(23):68-73.
- [12] LI Y W, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Micro-grid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1707-1719.
- [13] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a micro-grid with multiple distributed generation units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006 21(4):1821-1831.
- [14] KARINIOTAKIS G N, SOULTANIS N L, TSOUCHNIKAS A I, et al. Dynamic modeling of micro-grids [C] // Proceedings of the 2005 International Conference Future Power Systems, Nov 18, 2005, Amsterdam, Netherlands. [s. l.]: IEEE Press, 2005: 6-7.
- [15] MARNAY C, ROBIO F J, SIDDIQUI A S. Shape of the micro-grid [C] // Proceedings of the 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Jan28-Feb1, 2001, Columbus, USA. [s. l.]: IEEE Press, 2001, 1: 150-153.
- [16] 周念成, 贾延海, 赵渊. 基于配电网系统保护的馈线终端[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 66-68.  
ZHOU NIAN-CHENG, JIA YAN-HAI, ZHAO YUAN. Feeder terminal unit based on system protection to distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 66-68.

(编辑 张小强)