

# 基于单片机的小尺度荷电燃烧控制系统

史艳玲

(华南农业大学工程基础教学与训练中心, 广州 510640)

**摘要:** 面向小尺度荷电燃烧装置, 设计了基于单片机的控制系统, 并进行了控制实验研究。设计中采用了 STC89C52 芯片、步进电动机驱动芯片、数模转换芯片、MAX232 电平转换芯片、液晶显示 LCD1602 和矩阵键盘等, 构建了基于单片机和电压反馈的步进电动机控制系统。通过键盘输入相关控制参数, 结合电压采样信号可以实时控制步进电动机, 由步进电动机驱动旋钮调节高压直流电源, 从而控制火焰燃烧状态。运用计算机与单片机之间串口实时采集数据的实验结果表明: 当其他条件相同时, 回路电流随着极距的减小而增大; 当极距固定时, 相同电压作用下, 增大流量, 回路电流增大。当微尺度喷管流量过大、电压过高时, 空气扰动等都容易导致极板间放电, 火焰跳跃甚至熄火。以检测的反馈电压作为反馈变量, 与键盘电压设定值相比较, 以步进电动机为执行器可实现对外加高压直流电源的快速调节, 从而实现对燃烧系统的闭环实时控制。本研究为复杂的燃烧过程提供了简单的电学控制方法。

**关键词:** 微尺度燃烧; 步进电动机; 单片机; 闭环控制

**中图分类号:** TK16      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0390-06

## Control System Based on Single Chip Microcomputer for Small-scale Electrostatic Charged Combustion

Shi Yanling

(Engineering Basis for Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A control system based on single chip microcomputer was designed for small-scale electrostatic charged combustion equipment, and some experiments were carried out using the control system. The liquid ethanol was used as fuel and a glass capillary tube with inner diameter of 0.9 mm was used as nozzle in the combustion experimental system. The external electric field system was composed of a high voltage DC power source, two copper plate electrodes with diameter of 50 mm, 1 M $\Omega$  resistance and 5 nF capacity. The control system was based on a single chip microcomputer and a voltage feedback stepping motor, and a STC89C52 chip, a driver chip for the stepping motor, a digital to analog conversion chip, a MAX232 level switch chip, a LCD1602 display and a matrix keyboard were applied. The voltage sampling signals combined with the relevant parameters inputted from the keyboard were used to real-time control the stepping motor. The high voltage direct current power source was adjusted by the stepping motor and then the combustion and flame could be controlled. Serial data and experimental results using real-time acquisition between personal computer and microcontroller indicated that the circuit current increased with the decrease of electrode spacing; and it decreased with the increase of flow rate of ethanol. Too big flow rate of ethanol, too high voltage, or air turbulence all caused discharge between the plates, flame oscillation or even extinction. The detected voltage was used as a feedback variable and compared with the set value inputted from the keyboard. The stepping motor was used as an actuator to quickly adjust the high voltage DC power. Thus, the real-time closed-loop control of the small-scale combustion and flame system was achieved.

**Key words:** micro-scale combustion; stepping motor; single chip microcomputer; closed-loop control

收稿日期: 2015-07-10    修回日期: 2015-08-09

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51376066)和内燃机燃烧学国家重点实验室开放基金项目(K2016-01)

**作者简介:** 史艳玲(1976—), 女, 讲师, 主要从事高电压与绝缘和荷电喷雾研究, E-mail: yanlingsally@scau.edu.cn

引言

微小尺度燃烧是燃烧学的一个前沿研究分支，正面临着诸多难题亟待解决，如散热损失大、火焰不稳定、燃烧不完全等<sup>[1-3]</sup>。碳氢燃料的燃烧使得火焰中含有许多诸如  $\text{CHO}^+$ 、 $\text{H}_3\text{O}^+$ 、 $\text{CH}^+$ 、 $\text{e}^-$ 、 $\text{OH}$  等直接与化学反应相关的带电粒子，其带电粒子密度约为  $10^9 \sim 10^{12}$  个/ $\text{cm}^3$ ，在电场作用下，火焰中的离子流与场强之间存在密切的关系<sup>[4-5]</sup>。国内外学者针对电场对火焰的影响开展了相关的研究<sup>[6-8]</sup>。

王军锋等<sup>[9-11]</sup>对高压电场下的荷电液体射流雾化和燃烧进行了大量的实验研究与理论分析。Kim 等对交直流电场对甲烷的层流同轴射流火焰特性进行了实验研究<sup>[12-14]</sup>。本课题组研究了液体乙醇微尺度扩散燃烧特性<sup>[15-20]</sup>。研究中发现高压极板之间的电场，对火焰产生的带电离子团的生成速度、运动规律以及存在的时间都会产生影响，进而对火焰的形态、导电性、稳定性等产生明显的影响。当外界干扰或参数变化时，通过迅速改变外加电压即改变离子电流，从而可以解决火焰燃烧的迟滞性和稳定性问题。本文设计基于单片机的步进电动机控制系统，运用键盘设置步进电动机的转速，通过串口通信采集实时检测的反馈电压，并与键盘设置的电压范围相比较，从而控制步进电动机的转动，调节高压直流电源、最终实现火焰燃烧系统的闭环控制。

1 系统组成

实验装置包括燃料供给装置、燃料燃烧系统和观测装置，图 1 为其系统简图。燃料供给装置由微量注射泵和医用注射器组成，通过在微量注射泵上设定液体甲醇的供应流量，然后推动医用注射器把无水甲醇精确而稳定地推入到燃烧器喷管。燃料燃烧系统主要由铜套和燃烧器喷管组成。喷管为内径 0.9 mm，外径 1.2 mm 的玻璃管。喷管出口距离下极板  $L_1 = 2.9$  cm。外加电场由高压直流电源，半径为 50 mm 的铜板电极、1 M $\Omega$  电阻和 5 nF 的电容构成。控制装置为基于单片机的步进电动机控制电路板和计算机等。

运用 STC89C52 单片机、步进电动机驱动芯片、字符型 LCD、键盘阵列、12 位串行 AD、MAX232 电平转换芯片，构建了基于单片机和电压反馈的步进电动机控制驱动系统，如图 2 所示。

2 控制系统的硬件设计

2.1 步进电动机驱动电路

步进电动机是一种将电脉冲转换为角位移的执

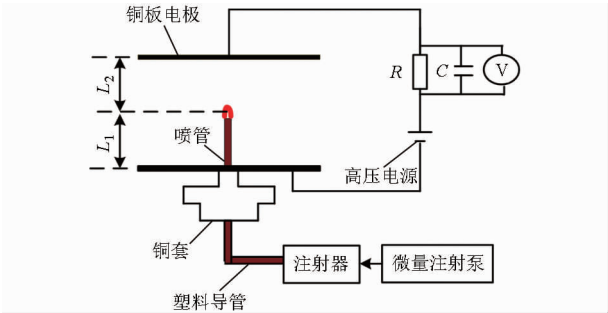


图 1 实验装置简图  
Fig. 1 Experiment setup

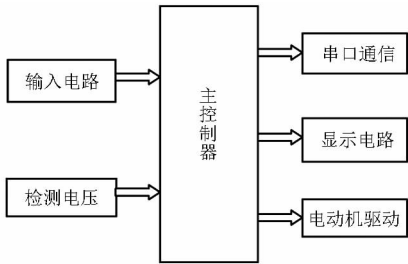


图 2 系统整体方案图  
Fig. 2 System scheme

行机构。本系统采用的步进电动机型号是 28BYJ-48-5。当对步进电动机施加一系列连续不断的控制脉冲时，它可以连续不断地转动。每一个脉冲信号对应步进电动机的某一相或两相绕组的通电状态改变一次，也就对应转子转过一定的角度（一个步距角）。当通电状态的改变完成一个循环时，转子转过一个齿距。四相步进电动机可以在不同的通电方式下运行，本系统采用四相八拍控制方式。

由于单片机 I/O 口的驱动能力有限，驱动电动机的运转还需要增加驱动放大电路。系统驱动放大电路主要由 ULN2003 芯片实现。单片机的 P2 口为输出端，驱动信号有 P2 口的 P2.0 - P2.3 输出，ULN2003 引脚 13 ~ 16 为输出端，接步进电动机，引脚 9 接电源 5 V。驱动器可提供最高 0.5 A 的电流。如图 3 所示。

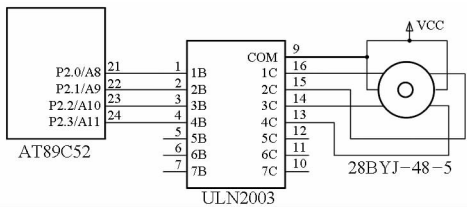


图 3 驱动电路  
Fig. 3 Drive circuit

2.2 电压测量电路

ADC0832 芯片的模拟电压输入在 0 ~ 5 V 之间。芯片转换时间仅为 32  $\mu\text{s}$ 。其引脚 8 接电源，引脚 4 接地。引脚 1 为片选信号与单片机 P3.5 相连，引脚 7 为时钟信号与单片机 P3.6 相连，引脚 5、6 为数据信号输入/输出短接并与单片机 P3.7 相连。引脚 2

为检测电压口。电路设计如图 4 所示。

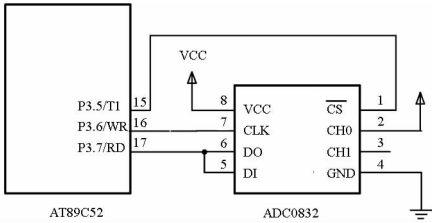


图 4 电压测量反馈电路

Fig. 4 Voltage measurement feedback circuit

2.3 其他电路

串行通信能同时实现信息双向传送的称为全双工。本设计中采用 MAX232 芯片,该芯片使用 5 V 单电源供电,可解决单片机输出接口与 RS-232 标准串行接口电气规范不一致的问题,将该芯片与单片机 P3.0 和 P3.1 连接,可以实现单片机与 PC 机之间的串口通信。

外部中断电路采用两个独立按键的功能作为启动和停止,分别和单片机 P3.2、P3.3 脚连接。当按键输入低电平中断信号,中断服务功能为系统启动时,跳转至按键矩阵扫描输入程序。

键盘是 3×4 矩阵形式,其中 1 个键为参数切换,1 个键为推出参数输入模式,其余 10 个键 0~9 用于参数值的修改。采用单片机 P1.0~P1.6 口作为矩阵扫描输入 I/O 口。当键盘中有按键按下时,发送低电平有效中断信号产生中断。根据设置的参数,控制步进电动机的速度与旋转方向。

3 控制系统的软件设计

3.1 主程序

本系统正常工作下主要由 3 种状态。如下：

- (1)运行状态,系统运行各个子函数,LCD 显示反馈电压和电动机正反转或停止等信息。
- (2)待机状态,系统运行按键扫描程序,等待指令。
- (3)参数设置状态,使用行列式键盘设置 10 个转速和电压范围。

当系统复位时主程序处于系统暂停状态,可以通过外部中断按键更改这些主程序运行的状态。当有中断产生时,中断服务程序修改状态标识 K 的值,关闭和打开相关定时器等。主程序流程图如图 5 所示。

3.2 步进电动机驱动子程序

控制功能执行程序是系统执行各项功能的程序,在主程序系统控制状态下运行。步进电动机控制程序是系统最重要的功能程序,采用定时器 0 中断来产生步进电动机驱动时序,步进电动机驱动程

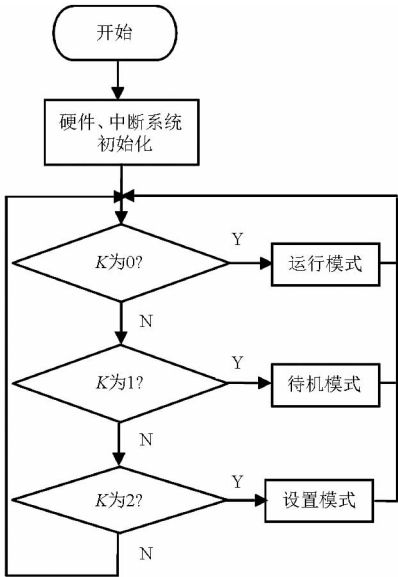


图 5 主程序框图

Fig. 5 Block diagram of main program

序框图如图 6 所示。

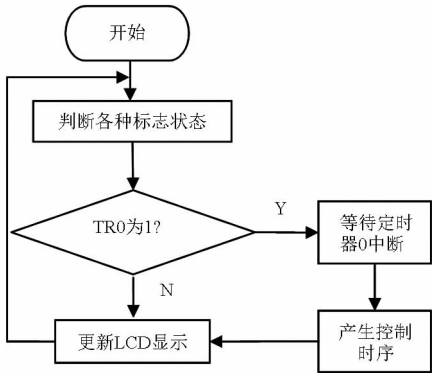


图 6 步进电动机驱动时序框图

Fig. 6 Block diagram of motor driving sequence

首先检测键盘的标志状态,比如:电动机正反转运行和停止。然后判断定时器 0 的开关标志 TR0,当 TR0=1 时,开定时器 0,当 TR0=0 时,关定时器 0。当定时器溢出产生中断时,修改 I/O 口状态,连续的状态变换产生时序,驱动电动机运转,带动高压电源转动,更新 LCD 界面状态正反转的显示状态,并根据实时检测的反馈电压确定 TR0 的值。

3.3 步进电动机控制子程序

步进电动机控制子程序用于根据反馈电压的设置范围,控制步进电动机的运转状态和定时器 0 的关闭与打开。首先运用键盘设定电压范围,最小电压设为 L,最大电压为 R,中间值为  $M = (L + R)/2$ 。当反馈电压  $U < L$  时,打开定时器 0,控制步进电动机正转调节高压直流电源旋钮,直到  $M < U < R$  时,关闭定时器 0。当反馈电压  $U > R$  时,打开定时器 0,控制步进电动机反转调节高压直流电源旋钮,直到  $L < U < M$  时,关闭定时器 0。程序设计如图 7 所示。

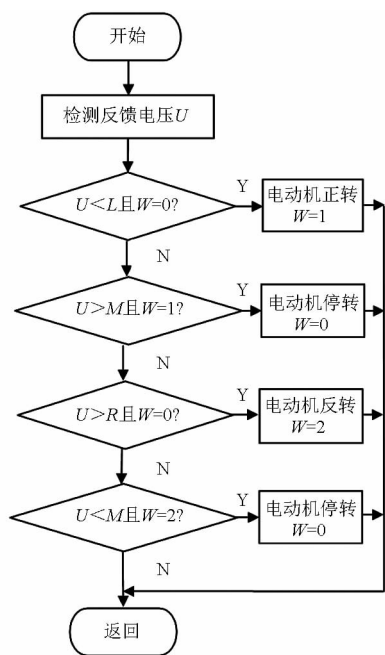


图 7 步进电动机控制框图

Fig. 7 Block diagram of stepping motor control

3.4 其他子程序

本系统采用按键外部中断方式,可以节省单片机按键扫描时间,提高系统性能。外部中断 0 为控制作用的启停切换,外部中断 1 为参数输入与系统暂停之间的切换。为保证控制系统的可靠运行,主程序处于控制模式时不可进入参数输入状态。

串口通信程序是定时器 2 的中断服务程序,定时器 1 用于设定串口通信波特率为 9 600 bit/s。当定时器 2 产生中断时,中断服务程序即启动串口向计算机发送所测量的反馈电压。

4 实验控制结果与分析

4.1 V - A 特性曲线的校准

如图 1 所示,极板半径为 5 cm,极距  $d$  为 10 cm,甲醇流量  $q_v = 1.0 \text{ mL/h}$ ,为防止高低压电源之间的共地干扰,在电路下铺一层绝缘材料,断开计算机的电源,单片机采用计算机供电,将高压电源的正极与 ADC0832 芯片的引脚 2 连接,点燃火焰,打开高压电源,步进电动机带动高压旋钮转动,火焰中的阳离子在电场力的作用下通过空气间隙到达阴极板,而阴离子则在电场力的作用下到达阳极板,从而在整个回路中形成电流,火焰中的离子流和电场的这种相互作用被称之为火焰的 V - A 特性。

本设计一共设置了步进电动机 10 种速度,通过修改定时器 0 的初始值来调节时序改变速度,选择步进电动机速度为 4,定时器 0 采用 16 位计数器,初始值  $\text{TH0} = 0\text{x}9\text{e}$ ,  $\text{TL0} = 0\text{x}58$ ,转换成十进制为  $\text{TH0} = 158$ ,  $\text{TL0} = 88$ ,使用晶振  $f = 11.059\,2 \text{ MHz}$ ,该步进电

动机的主要参数步距角是  $5.625^\circ$ ,减速比为  $1/64$ ,步进电动机带动高压电源旋钮旋转  $5.625^\circ$  的时间为

$$t = 12/f [ 65\,536 - (256\text{TH0} + \text{TL0}) ] \times 64 = 1.74 \text{ s}$$

(1)

根据实验条件可得极板电容  $C_1$  为

$$C_1 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{d}$$

(2)

式中  $\varepsilon_r$ ——相对介电常数  
 $\varepsilon_0$ ——真空绝对介电常数  
 $S$ ——铜板电极面积

代入数据可得  $C_1 = 0.68 \text{ pF}$ 。

有火焰时,将火焰和极板间火焰上方的空气等效成火焰电阻  $R_1$ ,图 1 实验装置简图的等效电路如图 8 所示,其中外加电阻  $R_2$  为  $1 \text{ M}\Omega$ ,外加电容  $C_2$  为  $5 \text{ nF}$ 。高压直流电源从 0 到  $4 \text{ kV}$  连续变化的过程,可以看成开关合在位置 1 处,并达到稳定状态,在  $t = 0$  时,把它合到位置 2,其反复变化的过程,可以看成是阶跃响应。

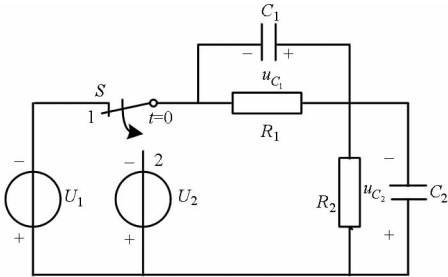


图 8 有火焰时的等效电路

Fig. 8 Equivalent electrical circuit with flame

通过文献[21]可知  $R_1 \gg R_2$ ,时间常数  $\tau_1$  为

$$\tau_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2) \approx 0.005 \text{ s}$$

(3)

ADC0832 芯片转换时间仅为  $32 \text{ }\mu\text{s}$ ,该值远小于电路稳定的时间 ( $3\tau_1 \sim 5\tau_1$ ),定时器 2 约为  $1 \text{ s}$  传送一次数据,即随机采集数据可能不是电路的稳态值。由于直流高压电源强电系统和单片机弱电系统之间的干扰,实时检测电阻两端的电压也有波动,所以在程序中设置检测电压连续 100 个取平均值。以万用表单独测量的最终稳定值作为基准,单片机的测量平均值略大于万用表检测值。由于  $R_1 \gg R_2$ ,即外加直流高压几乎都加到了极板上,并作用于燃烧的火焰,因此并不影响其对燃烧系统的控制。其 V - A 特性曲线如图 9 所示。

4.2 改变极距对 V - A 特性曲线的影响

图 10 给出了甲醇流量  $q_v = 1.0 \text{ mL/h}$ ,极距为 5、10 cm 时,在燃烧稳定情况下实时采集到的 V - A 特性曲线。从图中可以看出,由于减小极距,电离后的空气与燃烧火焰等效的电阻较小,因此电压为定

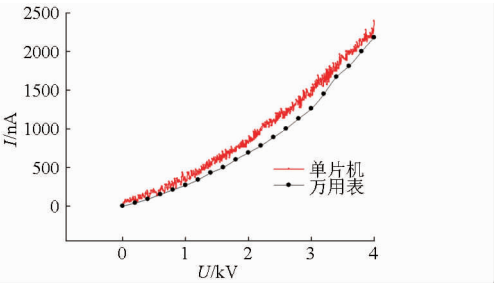


图 9 V - A 特性曲线的校准

Fig. 9 Calibration of volt - ampere characteristics curve

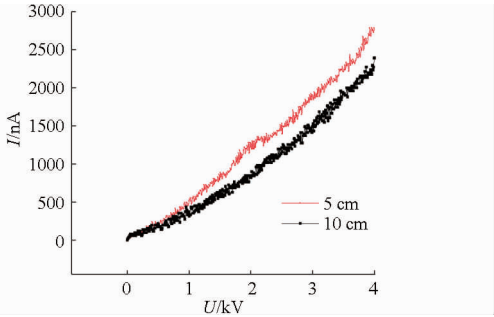


图 10 改变极距对 V - A 特性曲线的影响

Fig. 10 Effect of changing distance on volt - ampere characteristics curve

值时,回路电流随着极距的减小而增大。

4.3 改变流量对 V - A 特性曲线的影响

实验极距固定为 5 cm,选用流量  $q_v$  的范围为 0.6 ~ 1.5 mL/h,其 V - A 特性曲线如图 11 所示,相同电压作用下,增大流量,回路电流增大。实验过程中,当流量为 0.6 mL/h,电压在 0 ~ 4 kV 范围内时,燃烧基本稳定。由于流量太小火焰很小,受外界干扰容易熄火。当流量为 1.5 mL/h,电压小于 3 kV 时,燃烧基本稳定,但当电压超过 3 kV 后产生的离子风改变了火焰周围的局部对流环境,增大了燃烧速度,也增大了火焰离子产生的速率,回路电流继续增大,导致火焰跳跃,继续增大电压至 4 kV,再继续增大电压至 5 kV 以上,可听到放电的声音,看见火焰快速跳跃乃至熄火等现象。

4.4 闭环响应的实时曲线

极距固定在 4 cm,通过键盘输入设置  $L = 800$  nA,  $M = 900$  nA,  $R = 1\,000$  nA。微尺度喷管流量过大,电压过高,风的扰动,极距的变化,都容易导致电流改变、火焰跳跃或者熄火,为了观测到步进电动机能实现快速反应,实时连续检测电压 20 个取平均值,将

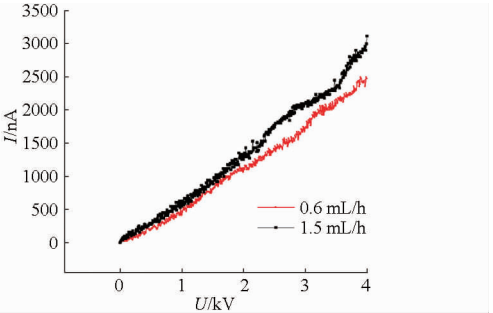


图 11 改变流量对 V - A 特性曲线的影响

Fig. 11 Effect of changing flow on volt - ampere characteristics curve

步进电动机速度选为 10,初始值  $TH0 = 0xfc$ ,  $TL0 = 0x18$ ,根据式(1)可得步进电动机 0.07 s 带动高压旋钮旋转 5.625°。

将流量固定在 1.3 mL/h,直流高压固定在 3.2 kV,在  $t = 0$  时,打开通信传送数据,步进电动机旋转调节高压电源的变化,步进电动机不停地向左旋转,电源从 3.2 kV 调整到 1.44 kV,从图中可看出 7 s 时间内,电流从 2 115 nA 立刻变化到 883 nA,电流稳定在设定范围附近,步进电动机停转,如图 12 所示。

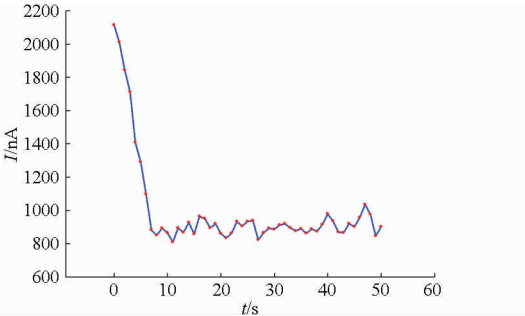


图 12 闭环系统响应

Fig. 12 Response of closed loop

5 结论

- (1)运用单片机串口通信功能实现与便携式计算机之间的通信,能实时记录电压数据,得到不同条件下的 V - A 特性曲线。
- (2)将检测的反馈电压作为反馈变量,与设定值相比较,通过步进电动机实现对高压直流电源的调节,从而实现对燃烧系统的闭环控制。
- (3)本研究为复杂的燃烧过程提供了一个简单方便的电学控制方法。

参 考 文 献

1 Gan Y H, Luo Y L, Wang M, et al. Effect of alternating electric fields on the behavior of small-scale laminar diffusion flames [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89:306 - 315.

2 Gan Y H, Luo Z B, Cheng Y P, et al. The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 595 - 604.

- 3 潘剑锋, 张会峰, 唐爱坤, 等. 微热光电系统中多孔介质燃烧室性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 193 – 197.  
Pan Jianfeng, Zhang Huifeng, Tang Aikun, et al. Experiment on porous media combustor of micro-thermophotovoltaic system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 193 – 197. (in Chinese)
- 4 Meng X W, Wu X M, Kang C, et al. Effects of direct-current (DC) electric fields on flame propagation and combustion characteristics of premixed  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$  flames [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11): 6612 – 6620.
- 5 Yamashita K, Karnani S, Dunn-Rankin D. Numerical prediction of ion current from a small methane jet flame [J]. Combustion and Flame, 2009, 156(6): 1227 – 1233.
- 6 Vega E V, Lee K Y. An experimental study on laminar  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$  premixed flames under an electric field [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(2): 312 – 319.
- 7 王宇, 姚强. 电场对火焰形状及碳烟沉积特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(8): 237 – 239.  
Wang Yu, Yao Qiang. Variation of flame shape and soot deposits by applying electric fields [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(8): 237 – 239. (in Chinese)
- 8 孙天旗, 刘杰, 段浩, 等. 不同电极下电场对甲烷/空气稀燃火焰影响的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(3): 38 – 43.  
Sun Tianqi, Liu Jie, Duan Hao, et al. Effects of electric fields with different electrodes on methane/air lean combustion flame [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(3): 38 – 43. (in Chinese)
- 9 闻建龙, 王军锋, 陈松山, 等. 荷电喷雾燃烧的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(5): 4 – 7.  
Wen Jianlong, Wang Junfeng, Chen Songshan, et al. Experimental research on electrostatic charged spray combustion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 4 – 7. (in Chinese)
- 10 王军锋, 王泽, 霍元平, 等. 荷电电压/介质物性对静电雾化特征的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4): 469 – 472.  
Wang Junfeng, Wang Ze, Huo Yuanping, et al. Effects of liquid properties on electrostatic spray characteristics [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 469 – 472. (in Chinese)
- 11 张军, 闻建龙, 王军锋, 等. 毛细管环电极下的静电雾化模式的研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 124 – 127.  
Zhang Jun, Wen Jianlong, Wang Junfeng, et al. Investigation on modes of electrostatic spray under capillary-annular electrode configuration [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 124 – 127. (in Chinese)
- 12 Won S H, Ryu S K, Kim M K, et al. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in coflow jets [J]. Combustion and Flame, 2008, 152(4): 496 – 506.
- 13 Kim M K, Ryu S K, Won S H, et al. Electric fields effect on liftoff and blowoff of non-premixed laminar jet flames in a coflow [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(1): 17 – 24.
- 14 Ryu S K, Kim Y K, Kim M K, et al. Observation of multi-scale oscillation of laminar lifted flames with low-frequency AC electric fields [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(1): 25 – 32.
- 15 Gan Y H, Xu J L, Yan Y Y, et al. A comparative study on free jet and confined jet diffusion flames of liquid ethanol from small nozzles [J]. Combustion Science and Technology, 2014, 186(2): 120 – 138.
- 16 甘云华, 王美, 史艳玲. 乙醇小尺度射流扩散火焰燃烧温度及稳燃特性 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(17): 2802 – 2807.  
Gan Yunhua, Wang Mei, Shi Yanling. Combustion temperature and stability characteristics of ethanol small-scale jet diffusion flame [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(17): 2802 – 2807. (in Chinese)
- 17 史艳玲, 罗智斌, 甘云华, 等. 小尺度荷电锥-射流场强分布特性研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 15 – 20.  
Shi Yanling, Luo Zhibin, Gan Yunhua, et al. Analysis on distribution of electric field strength of small-scale cone-jet electro-spraying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 15 – 20. (in Chinese)
- 18 甘云华, 张夏, 罗智斌. 微尺度锥射流雾化模拟分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4000 – 4007.  
Gan Yunhua, Zhang Xia, Luo Zhibin. Numerical analysis on micro-scale cone-jet spraying [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4000 – 4007. (in Chinese)
- 19 Gan Y H, Wang M, Luo Y L, et al. Effects of direct-current electric fields on flame shape and combustion characteristics of ethanol in small-scale [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(1): 1 – 14.
- 20 Gan Y H, Luo Z B, Cheng Y P, et al. The electro-spraying characteristics of ethanol for application in a small-scale combustor under combined electric field [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87: 595 – 604.
- 21 Dunn-Rankin D. Behavior of a small diffusion flame as an electrically active component in a high-voltage circuit [J]. Combustion and Flame, 2012, 159(1): 210 – 220.