

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106039

FAIMS 电源低功耗小型化及其优化研究*

钟伦超¹ 石文艳¹ 周金力¹ 游占华² 龚涛³

(1. 清华大学深圳国际研究生院 深圳 518055; 2. 中国石油集团测井有限公司技术中心 西安 710077;

3. 深圳职业技术学院 智能制造技术研究院 深圳 518055)

摘要: FAIMS 系统中最基础的部分为高场非对称射频电源,它提供电压差让离子在迁移区中实现有效的分离。通过半桥逆变的原理产生 RF 方波,设计一种三桥臂的方波产生电路,减小了通过高压直流电源的电流,从而有效减小了系统的功率。考虑 FAIMS 芯片的复杂性和仪器的便携性,改进差分式射频工作模式,有效降低了 FAIMS 对高压直流电源的输入要求,有利于高压直流电源的简化和功耗的降低,进而有利于 FAIMS 的小型化应用。结合补偿电压自动扫描,研制出优化后的高场非对称方波射频电源,通过实验对比,满足 FAIMS 迁移区的工作要求。

关键词: FAIMS;高场非对称射频电源;脉冲变压器;半桥逆变;补偿电压

中图分类号: TP216 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on low power, miniaturization and optimization of
FAIMS power supplyZhong Lunchao¹ Shi Wenyan¹ Zhou Jinli¹ You Zhanhua² Gong Tao³

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Technical Center of China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Institute of Intelligent Manufacturing Technology, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The most basic part of FAIMS system is the high field asymmetric RF power supply, which provides voltage difference for the effective separation of ions in the migration region. The principle of half bridge inverter is used to generate RF square wave. A three leg square wave generator is designed to reduce the current flowing through the high voltage DC power supply. So the power of the system is reduced effectively. Considering the complexity of FAIMS chip and the portability of the instrument, the differential RF mode is improved, which effectively reduces the input requirements of FAIMS for the high voltage DC power supply and is beneficial to the high voltage DC power supply. It is beneficial to simplify the high-voltage DC power supply and reduce the power consumption, which is conducive to the miniaturization of FAIMS. Combined with automatic scanning of compensation voltage, the optimized high field asymmetric rectangular waveform RF power supply is developed. Through experimental comparison, it meets the requirements of FAIMS migration area.

Keywords: FAIMS; high field asymmetric RF power supply; pulse-transformer; half-bridge inverter; compensation voltage

0 引言

高场非对称波形离子迁移谱技术 (FAIMS) 主要利用高场强下离子迁移率会随电场强度而变化来分离不同种类的化合物,主要用在防化、环境与医学检测等领域^[1-3],较质谱仪来说,不需要真空环境,在小型化、高性价比方面更具优势,而且可以检测生物大分子,精度达到同位素级别,具有检测范围大,类似气相离子的电泳分离等特点^[4-6]。高

场非对称波形电源系统是实现 FAIMS 技术的关键部分,加在迁移区上的高场非对称波形不同,离子在迁移区中偏转轨迹也不同,离子到达迁移区不同的位置将直接影响离子检测的灵敏度和分辨率,因此对非对称方波的控制与优化是十分必要的。中国科学院合肥智能机械研究所刘友江等^[9]通过采用反激升压原理,设计了电压幅度在线可调波形不对称高压电路产生模块,输出电压峰峰值达 1 800 V,频率达 1 MHz。

收稿日期:2021-03-18

* 基金项目:深圳市科技计划基础研究自由探索项目(JCYJ20180306174135470)资助

另外,电源系统的功耗和体积是制约整个 FAIMS 检测系统体积的关键因素。清华大学唐飞等^[10-11]研制了新型的高场非对称连续方波电源,实现对乙醇的检出限为 8.9 mg/L。由于迁移区负载电容很小,电源系统的功耗主要是高速开关、高压直流电源和电路系统的寄生电容产生的功耗,减小这 3 部分的功耗将使电源系统功耗和体积大大减小。因此电源系统的低功耗、小型化是 FAIMS 极为重要的研究内容。

1 FAIMS 原理

从 FAIMS 高场非对称波形的设计难度出发,非对称的方波是最好的但是设计难度较大,前期国内外普遍采用类似的脉冲波形代替,近年来才出现方波电源在 FAIMS 的运用^[12]。FAIMS 的原理如图 1 所示。载气通过采样口进入专用离子源,紧接着开始进入 FAIMS 迁移区,在迁移区前端上下极板间加载迁移区电极,在迁移区上下电极加载非对称的射频电压,同时为了防止离子与过滤电极发生碰撞而产生中和,针对每种离子加载不同的补偿电压,在补偿电压的不断扫描下,到达检测电极的离子种类不同,从而实现离子种类和浓度的分离检测^[13]。在这两种电压的作用下,载气带着离子源产生的离子沿着垂直于载气流动垂直的方向运动,由于加载的射频电压是非对称的,不同离子在迁移区中都有不同的运动路径。同时,在两极板之间加载上千伏的直流电压,场强与离子的静位移相反,这样在直流电压作用下,离子将沿着迁移区的中线进行运动,最后到达检测区的检测电极上,通过信号放大电路对检测信息进行放大输出,最终实现离子的检测。

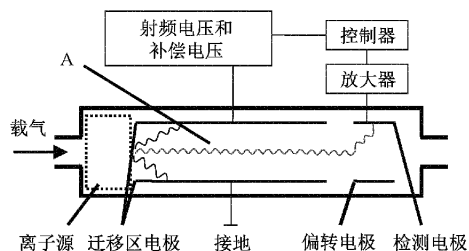


图 1 FAIMS 原理

由于系统的微型化,迁移区尺寸也大大减小,迁移区的上下极板间的间距由原来的 1 mm 减小到 0.2 mm,在保证同样的电场强度下,要求迁移区极板所加的射频高压非对称波形的频率最大提高到 2 MHz。从整个系统功耗角度考虑,迁移区为容性负载,其最大功耗计算公式:

$$P = CFV^2 \tag{1}$$

其中, P 为迁移区产生的功耗; C 为迁移区两端电容; V 为迁移区两端加载的电压。

通过上述公式可以看出,在相同电场强度下,减小电压幅值比减小频率可以更大地减小功耗,进而更有利于整个系统的微型化。

2 基于脉冲变压器的半桥逆变电路设计

非对称方波电源总体设计思路是通过半桥或全桥逆变电路耦合通过容性负载与储能电容生成高频高压的方波,然后采取高通滤波器剔除了直流分量形成高频高压非对称方波脉冲。由于传统非对称方波的电压是虚地,是以数百伏电压为基准地,因此,补偿电压会以虚地的形式加载到在数百伏上,对检测电路造成很大的电磁干扰。

本文拟采用如图 2 所示的电路拓扑,通过半桥逆变的原理产生 RF 方波,把高压直流信号逆变成高频高压方波脉冲,再把补偿电压通过低通电感电阻网络,加载到高频非对称方波上以满足 FAIMS 系统研究的各种实验需求^[14]。对于 FAIMS 所需要的高场来说,所需要的电压较大,对于逆变电路中的开关器件提出了较高的耐压要求;同时对于 FAIMS 的 RF 波形来说,其需要的频率也比较高,这就对逆变电路中的开关器件的动态特性提出了较高的要求。

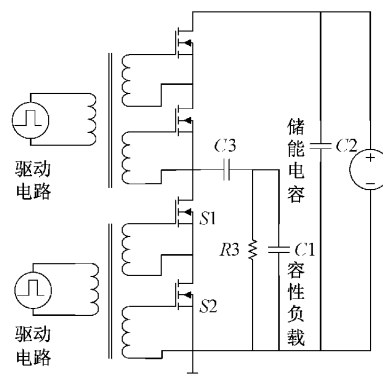


图 2 基于脉冲变压器的半桥逆变电路

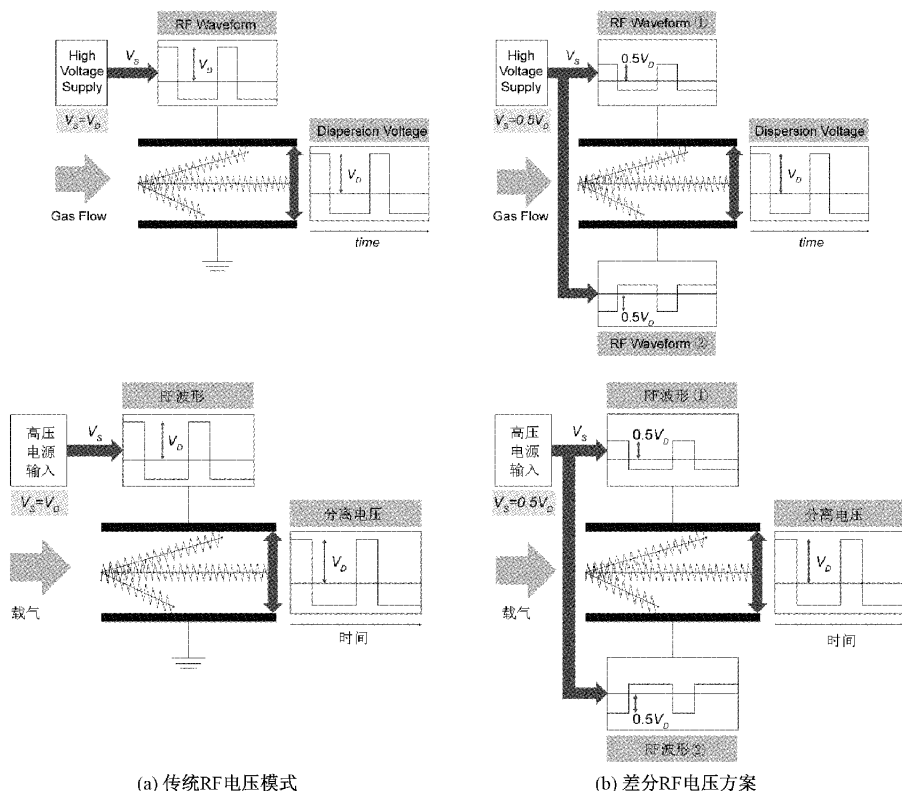
为减小电源系统的体积和功耗,针对高速开关和高压直流电源电路结构,进行合理电路布局、系统散热等理论分析和优化设计,以减小电源系统的寄生参数。当脉冲电压和频率较高的时候开关器件的损耗会增大,器件越多,损耗也会越大,电源效率会随之降低,因此,开关器件的选择非常重要。小的导通电阻、小的上升和下降时间、高的耐压和耐电流,都将使电源的功耗、脉冲质量有很大的改善。

3 差分 RF 与补偿电压研究

现有 FAIMS 的传统工作模式采用单路 RF 电压输入作为分离电压,电压幅值由高压直流电源提供,特别是当分离电压幅值达到上千伏时,需要高压直流电源提供相等的输入,对电源要求较高。随着分离电压逐步加大,物质的谱峰信号强度会逐步减弱。现有研究中通过改进 FAIMS 的工作条件来抑制离子损耗,从而提高检测信号的强度。考虑到 FAIMS 芯片的复杂性和仪器的便携性,改进分离电压实现方式能够以更低的成本获得性能的提升。

差分 RF 分离电压的方案如图 3 所示,图 3(a)为传统的 RF 分离电压模式,迁移区的两个极板中,一个接 RF 分离电压,另一个接地,在迁移区中产生相应的分离电场;图 3(b)为差分 RF 分离电压方案,迁移区的两个极板都需要接上 RF 分离电压,但是两路 RF 分离电压的频率相同,但正负的极性相反,从而在迁移区中产生两倍于单路 RF

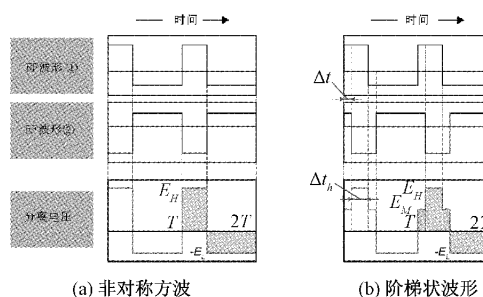
分离电压所产生的分离电场。在差分式射频工作模式下,高压直流电源的输入 V_S 降低为原来 $1/2$ 时仍可获得与传统工作模式相同的分离电压。因此,差分式射频工作模式可以降低 FAIMS 对高压直流电源的输入要求,有利于高压直流电源的简化和功耗的降低,进而有利于 FAIMS 的小型化应用。



(a) 传统RF电压模式 (b) 差分RF电压方案

图 3 传统 RF 分离电压与差分 RF 分离电压

在差分 RF 的基础上,拟进一步引入两路 RF 分离电压之间的相位差可控制,形成一种新的阶梯状 RF 波形,如图 4 所示。相位差 $\Delta t/T$ 为两路 RF 之间的压差。限定 $\Delta t/T$ 的变化范围为 $[0, d_{diff}]$ 之间,其中 d_{diff} 为单路 RF 电压的占空比。当 $\Delta t/T$ 为 0 时,最终产生的合成波形为非对称方波,其频率、占空比均与 RF 电压相同,如图 4(a)所示。当 $\Delta t/T$ 不为 0 时,最终产生的合成波形为阶梯状波形,如图 4(b)所示。



(a) 非对称方波 (b) 阶梯状波形
图 4 差分 RF 相位差的阶梯状 RF 波形

同时,阶梯状波形相比于无相位差的 RF 分离电压来说,有更高的信号强度。在分离电压作用下,离子在极板间垂直于极板方向做往复振动,接触到任意极板的离子均会发生中和,从而产生离子损耗。极板附近能够发生离子损耗的区域为损耗区域,处于离子振动幅值范围内的离子均会发生损耗,故一块极板的损耗区域高度 Δ 就等于离子的振动幅值 s ,实际能够通过离子的有效间距 $g_{eff} = g - 2\Delta = g - 2s$,并且 s 越大,迁移区里离子的损耗就越多。而在相同场强条件下,阶梯状波形比非对称方波产生的振动幅值要更小一些,这意味着阶梯状波形与非对称方波相

比,损耗区域高度 Δ 减小,抑制了离子损耗,增大了有效极板间距 g_{eff} ,使离子信号提升,如图 5 所示。由此可知,差分式射频工作模式产生的阶梯状波形可以提高 FAIMS 的信号强度,获得更好的信噪比。

在 FAIMS 电源系统中,产生高精度的直流补偿电压是极为重要电压信号之一,可以使离子平行于迁移区极板方向运动,抵消迁移率变化带来的影响,最终被电极检测。补偿电压是通过 DSP 芯片控制数模转换(D/A)芯片进行

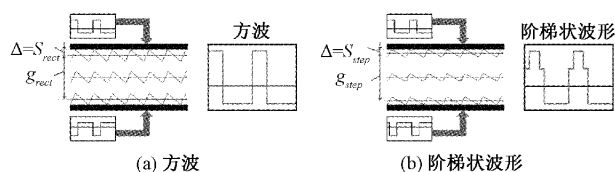
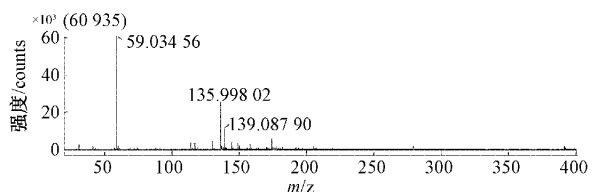


图 5 阶梯状波形减小离子振幅

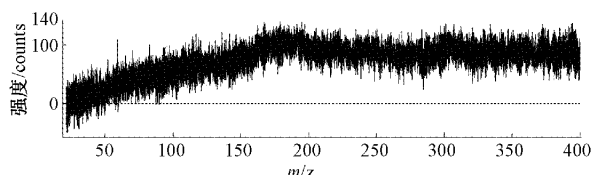
数模转换^[15],并用运算放大器进行直流补偿电压的二次放大,实现锯齿波形状的直流补偿电压自动扫描,可实现最大范围 $-15\sim 15$ V,在扫描电压范围任意设定扫描区间和扫描周期,最小扫描精度为 0.01 V,通过电感和电阻硬件网络叠加到高压高频非对称方波上,最终加载到 FAIMS 迁移区。

4 FAIMS 实验验证与结果分析

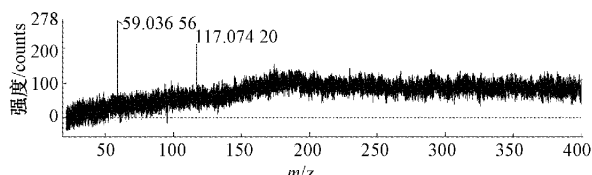
已知条件为:丙酮的质荷比 m/z 为 59,载气速度控制为 150 L/h。首先在敞开的大气环境中,迁移区两端也不加载电压,丙酮与混杂有空气杂质的载气在紫外灯电离后直接通过迁移区而被检测到带有杂质的丙酮离子峰,如图 6(a)所示,质谱图上 135 与 139 的质荷比为空气中其他杂质。



(a) 不加载 RF 电压和补偿电压



(b) 加载 RF 电压为 1180 V, 不加载补偿电压



(c) 加载 RF 电压 1180 V 与补偿电压 -4.1 V

图 6 性能验证实验质谱

其次,在迁移区上加上图 7 所示的高场非对称方波电压,输出正电压最大值为 1180 V,负电压为 -480 V,频率 189 kHz,占空比约 30%,不加补偿电压,此时质谱图如图 6(b)所示。从图中可以看出,在没有加载补偿电压的情况下,离子在迁移区电场电压的吸引下较早发生偏离,使得其位移没有得到补偿,从而撞击到上下极板上发生离子中和,后端离子检测电极与仪器无离子信号探测,从而没

有一个有效的离子质谱图出现。

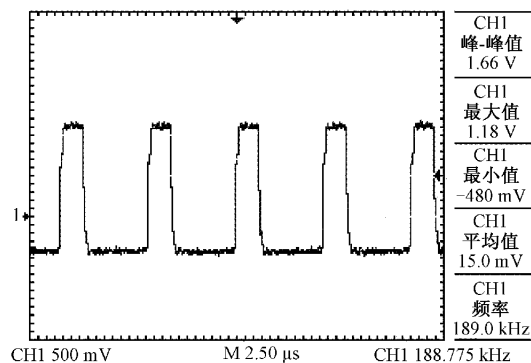


图 7 高场非对称方波 RF 电压

最后,前面的实验条件与加载的高场非对称方波电压不变,通过改变补偿电压使丙酮再次出现离子峰,通过实验可知,当补偿电压为 -4.1 V时,质荷比为 59(丙酮本身)和 117(丙酮离子与分子发生分子离子反应再次生成的二聚物离子)的再次出现,其他的杂质离子峰则没有出现。通过分析,前端迁移区与后端质谱仪检测锥口之前的距离适合丙酮离子与中性样品分子发生分子离子反应,所以会同时出现两种离子峰。由于有补偿电压的作用,其他杂质则不会发生反应,所以在质谱图里没有出现,从侧面也说明对应的补偿电压可以让丙酮离子而非其他离子发生有限偏移,从而更好的实现离子的检测,和前述 FAIMS 运行机理以及本文设计的半桥逆变差分 RF 与补偿电压预想效果一致,实现了系统性能的验证。

对图 7 所示的方波电压数据进行处理,计算其平均电压为 -8.6 V,上述实验测试丙酮离子的信号重新出现时的补偿电压为 -4.1 V,两者相加则为本次实验丙酮所对应补偿电压实际值,即 -12.7 V。

RF 电压的频率对离子信号有着很大的影响。电压频率低会导致离子运动加速从而呈现振幅过大,较早就到达迁移区的上下极板发生中和,从而很难检测到有效离子,致使整个 FAIMS 灵敏度不高。如图 8 所示,当频率逐渐加大。由 0.1 MHz 到 1 MHz 时,分别选择 190 kHz,510 kHz,

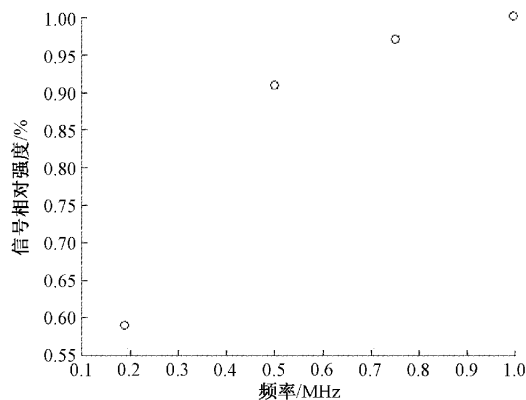


图 8 不同 RF 电压频率对应的离子信号

760 kHz 与 1 MHz 频率下,均采取 RF 电压控制下,利用 SIMION 进行模拟仿真,计算得出随着频率增加,检测信号的强度也逐渐加大。

5 结 论

本文分析 FAIMS 电源相关参数,确定了电源系统技术指标,使用阶梯状 RF 可以提高信号强度,解决了传统波形在高压下难以检测出信号的限制,提高 FAIMS 的信号强度。通过实验,给定相应的补偿电压,实现在质谱图中丙酮离子峰的精确显示。同时,对电源系统进行了小化型设计并研制了样机,该系统所采取的直流高压较传统电路降低一半,但是高场离子分离能力相当,减小了电子器件的耐压要求,降低了系统的功耗,增强了电路的稳定性,提高了系统整体鲁棒性。下一步,主要将结合 RF 电压的频率、纹波噪声与白噪声的综合影响因素去提高 FAIMS 系统整体灵敏度。

参考文献

- [1] HUANG Y C, CHUANG H H, DUTKIEWICZ E P, et al. Predicting breast cancer by paper spray ion mobility spectrometry 414 mass spectrometry and machine learning [J]. *Analytical Chemistry*, 2020, 92(2):1653-1657.
- [2] 李庄,林丙涛,陈池来,等.基于二维扫描高场不对称离子迁移谱技术检测挥发酚[J].*分析化学*,2011,39(1):107-110.
- [3] 秦诗棋,周沉桢,刘泽,等.利用 FAIMS 法鉴别黄斑烟污染物的来源[J].*中国烟草学报*,2018,24(4):1-10.
- [4] KESHET U, ALON T, FIALKOV A, et al. Open probe fast GC-MS-combining ambient sampling ultra-fast separation and in-vacuum ionization for real time analysis[J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2017,52:417-426.
- [5] 刘友江.高场不对称波形离子迁移谱技术研究[D].安徽:中国科学技术大学,2015.
- [6] 陈池来.二维高集成高场不对称波形离子迁移谱[D].安徽:中国科学技术大学,2011.
- [7] HUO X, TANG F, CHEN J, et al. Characterization of the impact of the ejection slit on miniature rectilinear ion trap analysis[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2016, 39(2):44-50.
- [8] SNYDER D T, PULLIAM C J, COOKS R G. Extending the mass range of a miniature ion trap mass spectrometer using the inverse Mathieu q scan[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2016, 38(5):55-58.
- [9] 刘友江,王焕钦,陈然,等.高场不对称波形离子迁移谱关键测控模块研究[J].*仪器仪表学报*,2012,33(9):1974-1979.
- [10] 王晓浩,张亮,唐飞.用于 FAIMS 系统的法拉第筒离子探测器[J].*仪器仪表学报*,2010,31(1):208-212.
- [11] 郭江,唐飞,杨涛.基于 FAIMS 的高场非对称方波电源系统设计[J].*西南科技大学学报*,2010,25(1):51-55.
- [12] 杨吉.用于 FAIMS 系统的高场非对称方波电源系统研究[D].山西:中北大学,2010.
- [13] 王涛龙,梁庭,王心心,等.基于 LTCC 技术的微型 FAIMS 生化气体传感器制备[J].*传感技术与传感器*, 2016,3(3):7-9.
- [14] 游占华.基于变压器驱动的 FAIMS 电源系统研究[D].山西:中北大学,2012.
- [15] 赵思洋,杜晓霞,游占华,等.采集控制多线程一体化的集成式 FAIMS 主控系统设计与实现[J].*仪器仪表与传感器*, 2020,11:68-73.

作者简介

钟伦超,工学博士,助理研究员,主要研究方向为大数
据、智能制造、传感器设计等。

E-mail: qiangshou302@mail. tsinghua. edu. cn

石文艳,博士研究生,主要研究方向为分析仪器。

E-mail: shiwenyanu@163. com

周金力,博士研究生,主要研究方向为 FAIMS 小型化
运用。

E-mail: zjl18@mails. tsinghua. edu. cn

游占华,工学硕士,主要研究方向为传感器设计。

E-mail: zhanhua7901212@163. com

龚涛(通信作者),工学博士,特聘副研究员,主要研究方
向为智能制造、纳米材料、机器人和微流控等。

E-mail: gongtao@szpt. edu. cn