

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005541

V型MEMS电热执行器技术研究*

保慧琴 卫霞 李茹
(西安明德理工学院 西安 710124)

摘要: V型电热执行器结构简单、执行力大、能够输出直线型位移,广泛用于MEMS系统中。利用热电效应,对V型电热执行器进行了讨论,得到了执行器上温度分布、最大位移以及阶跃响应时间的理论分析值,并利用有限元分析软件ANSYS进行了仿真验证,结果表明理论分析值和仿真结果保持一致。对执行器的几何参数对器件性能的影响进行研究,搭建测试平台对执行器的性能进行测试,14 V电压下可以在4 ms内达到稳定的工作状态。

关键词: 电热执行器;温度分布;位移;响应时间

中图分类号: TN37 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Research on V-beam MEMS electro-thermal actuator technology

Bao Huiqin Wei Xia Li Ru
(Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China)

Abstract: V-type electro-thermal actuator is widely used in MEMS system because of its simple structure, large execution force and linear displacement. The thermoelectric effect is used to discuss the V-beam electro-thermal actuator, the theoretical analysis values of temperature distribution, maximum displacement and step response time are obtained, and the simulation results are verified by ANSYS. The result shows that the simulation results are consistent with the theoretical results. And the influence of the geometric parameters on the performance of the device is researched.

Keywords: electro-thermal actuator; temperature distribution; displacement; response time

0 引言

MEMS系统主要包含微型传感器^[1]、微执行器和相应处理电路3部分。微执行器^[2]作为MEMS系统的动力输出机构,根据信号处理电路发出的指令完成机械操作。微执行器按照驱动原理分为电热、静电、电磁和压电执行器4种^[3]。静电执行器^[4-5]致动响应速度快,但驱动电压较高,与集成电路难兼容。电磁执行器需要用到特殊磁性材料,使制作复杂化。压电执行器制作工艺较复杂,产生的位移小。电热执行器能够产生稳定并且可控的位移,执行力大,能够与标准IC制造工艺和材料兼容。因此被广泛采用于MEMS执行器中。电热执行器分为3种典型的形式:U型、V型和Z型,U型电热执行器输出圆弧位移,而V型和Z型电热执行器输出直线型位移,本文讨论的是一种V型结构的电热执行器。

1 电热执行器的理论研究

1.1 V型电热执行器结构

V型电热执行器的基本结构如图1所示,V型悬臂梁

的两端由锚点固定在基片上,两个悬臂梁具有一定的浅角,执行器两端施加电压,梁产生焦耳热,热导致梁体温度升高,梁产生热应力而发生热膨胀,由于梁的结构对称,在顶点处输出直线位移和力,从而驱动外载做功。V型执行器结构简单,驱动输入电压小,输出较大的直线位移和力,可控性较强。

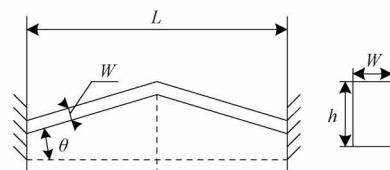


图1 V型梁电热执行器结构

1.2 V型电热执行器温度分布

V型梁的两个锚点与衬底相连,执行器两端锚处施加电压,电流流过梁产生的焦耳热导致整个梁体温度升高,梁体产生热膨胀,推动顶点出产生直线位移和力。V型执行器所产生的最大位移以及最大执行力由电源、材料、环境和

收稿日期:2020-12-14

* 基金项目:陕西省教育厅专项科研计划(20JK0951)、西北工业大学明德学院科研基金(2019XY01L02)项目资助

结构等因素共同决定。首先对梁温度分布进行分析。热传导、热对流以及热辐射是热传递的 3 种形式,都会对梁温度分布产生影响。在本文所讨论的执行器中,热量传递的具体路径为:热量经梁向两端锚点传导;热量经梁向衬底传导;梁与周围空气的热对流;以及梁与周围环境的热辐射。

在微观下环境下的流体行为与宏观下的流体行为有很大差异,流体速度不仅与浮升力有关,而且还会受到粘滞力的影响。对于微小器件来说,空气粘滞力对空气速度的影响起决定作用,并且由于空气粘滞力的存在,空气流动得很慢,热对流的散热形式可以忽略。一般情况下,热辐射所产生的热量损失与总热量相比不到其 1%,即使温度为 1 000 ℃,热传导所产生的热量损失也是热辐射的 100 倍,故在本文中,热辐射形式也可以被忽略。即执行器两端施加电压后产生的焦耳热只能沿着执行器梁向两端锚点传递,由于有基底,热还会通过执行器梁和基底之间的空气层向基底传递。V 型执行器中热传导路径如图 2 所示。

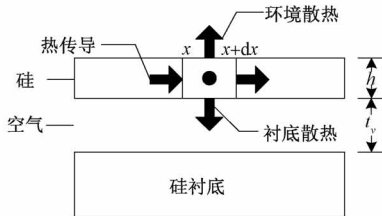


图 2 V 型热电执行器的热传导路径

根据文章上述讨论,热传递形式主要是热通过梁向两个锚点传导以及热通过梁向基底传导。

由于 V 型执行器的长度远大于其截面尺寸,故可以将其温度分布分析简化为一维热稳态问题,方程如下所示:

$$k_p \frac{d^2 T}{dx^2} + J^2 \rho = \frac{S}{h} \frac{T - T_r}{R_T} \quad (1)$$

其中, k_p 为硅导热系数; R_T 是指 V 型梁与衬底之间的热阻,反映了热量由梁向衬底传导的强度; J 为电流密度; ρ 为硅的电阻率; S 是指微元体形状对热量传递的影响因子。根据相关文献可以查得其表达式为^[6-8]:

$$S = \frac{h}{w} \left[\frac{2t_v}{h} + 1 \right] + 1 \quad (2)$$

其中, h 为 V 型梁厚度; w 为梁宽度; t_v 为空气层厚度。求解的边界条件为:

$$T(0) = T(L) = T_r \quad (3)$$

其中, T_r 为环境温度,一般等于室温; L 为梁的长度。将式(2)、(3)代入式(1),即可求出 V 型热点执行器的温度分布。也可以采用 ANSYS 有限元分析求解该问题, V 型执行器的三维实体用 SOLID226 单元构建,并进行耦合分析^[9],图 3 为 ANSYS 仿真结果。

如图 3 所示, V 型执行器工作状态达到稳态时的温度分布呈现出良好的对称性。将 ANSYS 仿真结果与理论计算结果相比,得到图 4 结果。

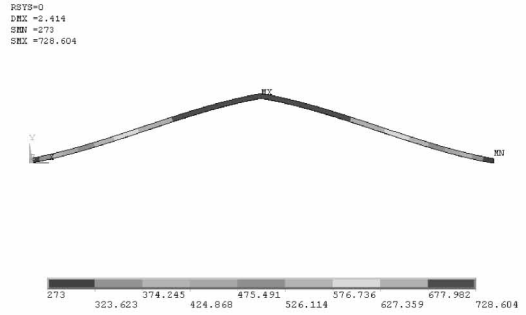


图 3 V 型梁电热执行器 ANSYS 仿真结果

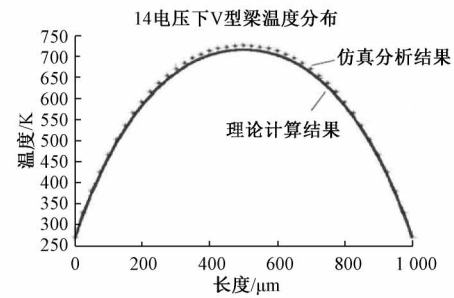


图 4 V 型梁电热执行器的稳态温度分布

图 4 中,实线为理论推导的梁温度分布结果,虚线为 ANSYS 仿真模拟出的温度分布结果,可以看出温度分布近似于二次曲线,具有良好的对称性。两者的最高温度都出现在 V 型梁顶点处,越接近锚点,梁上的温度越低。ANSYS 仿真的最高温度为 728.604 K,而理论计算的最高温度为 717.015 6 K,误差为 1.59%。

执行器两端锚点施加的电压大小会对执行器性能产生影响,施加电压越大,梁发生的热膨胀变形就越大,则输出的位移和力就越大。图 5 中显示 V 型执行器两端施加电压逐步增加时产生的最高稳态温度以及最大稳态位移。

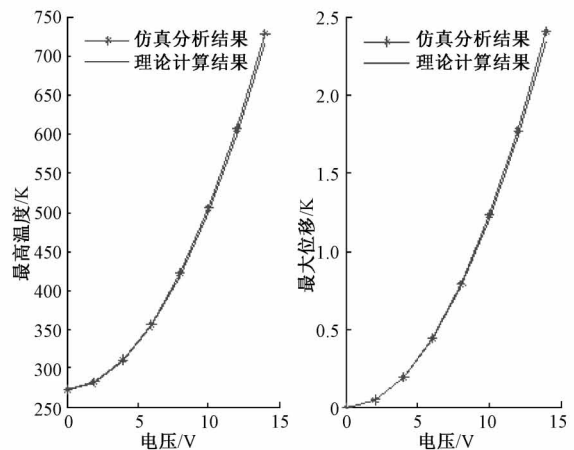


图 5 V 型梁电热执行器最高温度与最大位移同电压的关系曲线

图 5 中,星型曲线为 ANSYS 仿真结果,平滑曲线为理论推导结果。其中,左半图为最大稳态温度与电压变化曲

线,右半图为电热执行器最大位移与电压变化曲线。由图得出理论计算结果和 ANSYS 仿真结果基本一致。

1.3 电热执行器动态特性分析

作为一种驱动机构,电热微执行器的动态特性是影响整个系统响应速度的重要因素。静电效应与磁电效应制作的微执行器具有较低的响应时间,而电热效应的响应时相对较长,故这里需要对热执行器的响应时间进行进一步讨论。

一般情况下,电热执行器可以看作 1 个一阶系统(热传递系统)与 1 个二阶系统(机械响应系统)的串联^[10],两个系统的传递函数如下:

$$G_1(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{1 - \frac{s^2}{\omega_0^2} + 2\zeta \frac{s}{\omega_0}} \quad (5)$$

故整个系统的传递函数可以表示为:

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \quad (6)$$

一般,电热执行器热传递的响应时间^[11]要远远大于其机械响应时间,故整个系统可以用 1 个一阶系统来表示,式中时间常数 τ 可以表示为:

$$\tau_1 = (\beta + \gamma_1)^{-1} \quad (7)$$

其中,

$$\beta = \frac{Sk_v}{t \cdot hcD}, \gamma_n = \frac{k_p}{cD} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \quad (8)$$

这里的相关系数与 1.2 节中的相同。若输入为一阶跃函数,通过拉普拉斯反变换就可以得到系统在时域内的响应曲线。系统的时域表达式为:

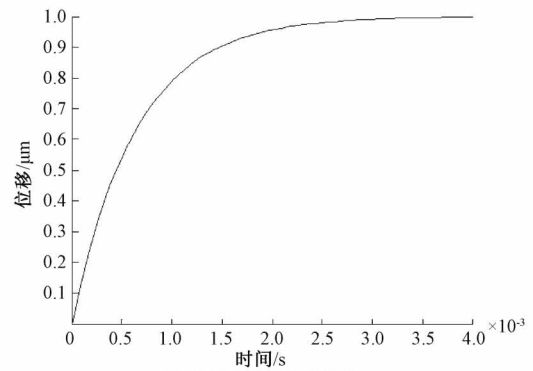
$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

将系统的响应时间规定为输出从 0%~100% 所用的时间,一般为 $3\tau \sim 4\tau$, 故可以得到系统的响应时间。

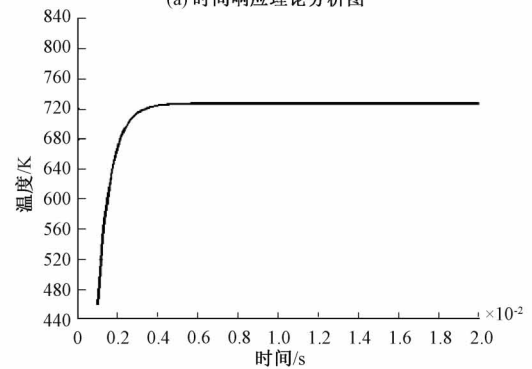
图 6(a)为 V 型梁电热执行器在施加 14 V 工作电压的情况下的时间响应曲线,由曲线的变化趋势可以得到系统的响应时间为 3.5 ms;图 6(b)为 ANSYS 模拟曲线,可以看出响应时间为 4 ms,与理论分析相比,误差为 12.5%。这里瞬态分析的误差稍大,这主要是由于在理论分析中,认为热响应速率远低于机械响应速率,故将热响应时间作为 V 型电热执行器的响应时间。同时,从仿真结果可以看出,微尺度下的热传递速率要比宏观尺度下的高得多^[12],由此可见,器件的小型化、微型化可以极大地改善系统的某些特性,在微观尺度下,通过合理的设计,电热执行器也会具有很短的响应时间。

1.4 微执行器性能影响因素分析

除了工作电压外,微执行器的几何参数也会对器件的整体性能产生影响,因此通过研究几何参数与微执行器输出关系曲线的变化趋势,可以帮助找到执行器输出较大而几何尺寸较小的一组或几组最优解,这会为器件的性能优



(a) 时间响应理论分析图



(b) 时间响应ANSYS仿真图

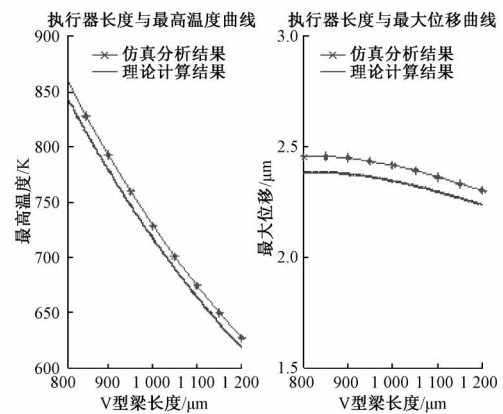
图 6 电热执行器响应时间曲线

化以及与其他器件集成带来很大的方便。

图 7 中分别为执行器长度、宽度、厚度、偏转角度以及空气层厚度与温度、位移的变化曲线。根据上述执行器结构尺寸对其最高温度以及最大输出位移的影响分析中可以发现一项普遍存在的规律,那就是执行器的最高温度变化趋势与其最大输出位移的变化趋势保持一致,故可以得到一个结论,即不论电热执行器的结构尺寸如何变化,只要器件最终的温度上升,其产生的最大输出位移必然增大,增大的幅度与结构尺寸相关。

2 执行器性能测试

输出位移是 V 型执行器的一项重要性能指标,输出位



(a) V型执行器长度与输出关系曲线

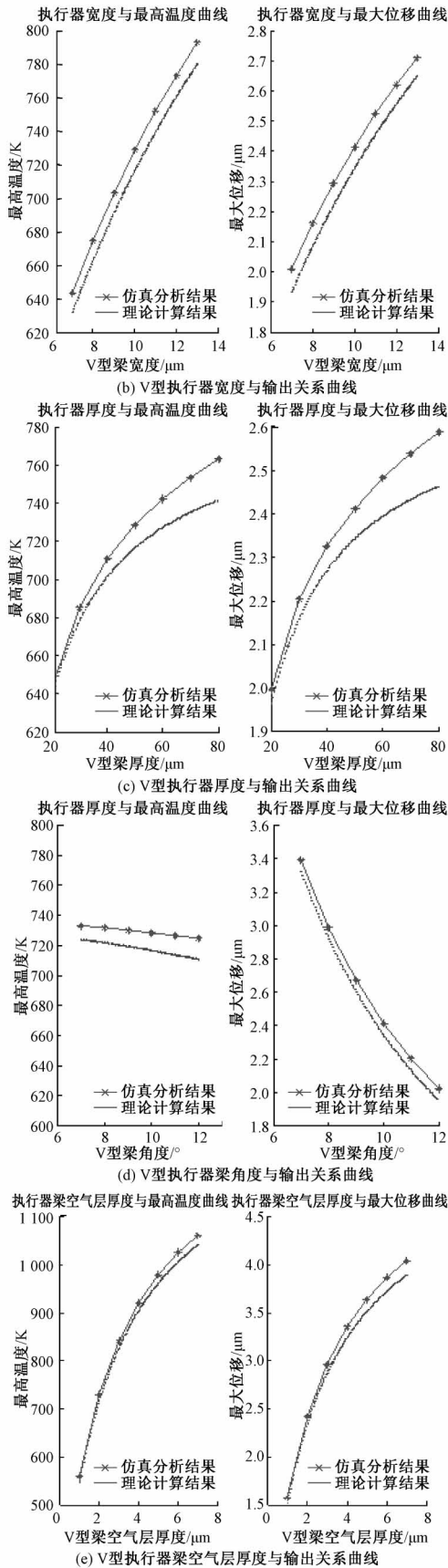
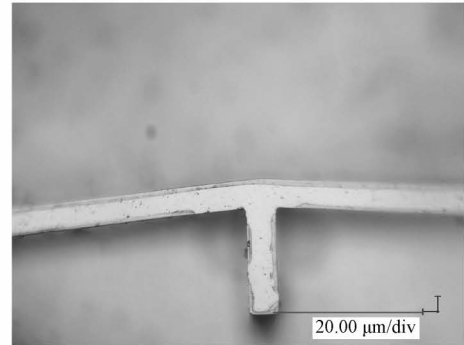


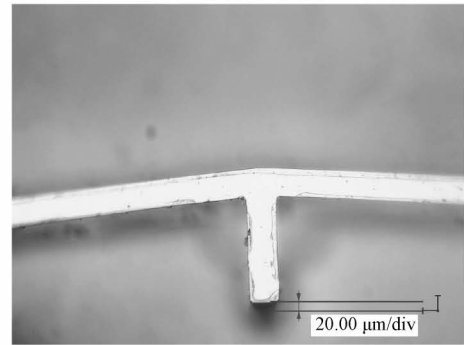
图 7 V 型梁温度与位移同空气层度的关系曲线

移测量平台由显微镜、电流表、直流稳压源和显示屏组成^[13],其中直流稳压源提供直流电压信号,通过调节其大小,可以观察执行器在不同电压条件下的变形;电流表显示通过执行器的电流,确保意外情况使电流增大将器件烧毁;显微镜与显示屏可以抓拍所观测的图片并对执行器输出的位移进行精确测量^[14]。

图 8(a)中 V 型执行器不加驱动电压时产生的位移为 0,图 8(b)为 V 型执行器外加 17 V 驱动电压时显微镜下的变形。



(a) 0 V 驱动电压下位移



(b) 17 V 驱动电压下位移

图 8 V 型电热执行器在相应电压下所产生的位移

表 1 中列出了 V 型执行器施加不同驱动电压时的实验测量位移,电流大小以及 ANSYS 仿真位移结果。其中 14 V 电压下测量位移为 9.074 074 μm 。ANSYS 仿真位移为 8.31 μm 。理论分析值和 ANSYS 仿真模拟得到的结果基本一致。

表 1 单个 V 型电热执行器测量结果

电压/V	测量位移/ μm	仿真位移/ μm	电流/mA
17	12.592 59	11.842	36.70
14	9.074 074	8.310	35.75
10	5.648 148	4.097	32.39
8	2.914 815	2.622	28.70
6	2.129 630	1.475	22.67
4	0.877 778	0.656	15.33
2	0.211 111	0.164	7.42
0	0	0	0

执行器响应速度对微机械操作效率具有重要的意义,响应时间指从稳态值的10%上升到90%所需要的时间。不同于静电驱动的执行器,电热执行器响应速度较慢,本文采用电学测试法测试V型执行器的动态响应速度,实验平台由示波器、信号发生器、和负载电阻组成^[15]。信号发生器产生的方波信号周期为50ms,最小电压幅值为0V,峰值电压幅值为10V。V型执行器和信号发生器通过一个30Ω的电阻相连,示波器的一个通道连接到V型执行器以测量和记录执行器的变化。

图9为示波器中显示的电压变化情况,在电压加载的过程中电压缓慢上升直到15ms时稳定,即在10V的驱动电压下V型电热执行器的响应时间为15ms。

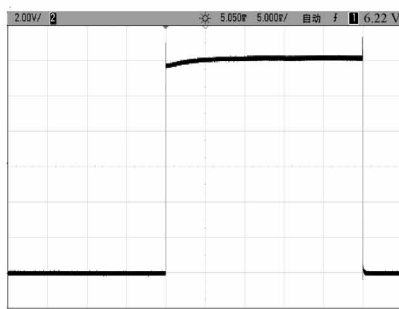


图9 V型电热执行器响应时间

3 结 论

微执行器作为微电子机械系统(MEMS)的动力输出机构,可以将声、光、电、热等能量转化为具有一定位移或力的机械能。V型电热执行器能够产生稳定并且可控的位移,执行力大,与标准IC制造工艺和材料兼容。其温度分布呈现出良好的对称性,近似于二次曲线,越接近顶点,梁上的温度越高。施加于V型电热执行器的驱动电压越大,其温度越高,位移越大。V型电热执行器响应速度较快,14V电压下可以在4ms内达到稳定的工作状态。

参考文献

- [1] 佐磊,孙洪凯,何怡刚,等. 无失效数据的MEMS传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(6): 78-81.
- [2] 何彦霖,董明利,孙广开,等. 复合式驱动小型两栖机器人水下运动控制研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):222-229.
- [3] 张绪平,张卓. V型和Z型电热微驱动器性能比较与分

- 析[J]. 北京工业大学学报,2015,11(41):1636-1643.
- [4] AFRANG S, NEMATKHAH N. A new MEMS based variable capacitor using electrostatic vertical comb drive actuator and auxiliary cantilever beams[J]. *Microsystem Technologies*, 2019(2): 1-11.
- [5] 王青. 电致伸缩驱动的微进给测控系统设计[J]. 电子测量技术,2020,43(16):6-10.
- [6] ZHAO Y L, HU T J, LI X Y, et al. Design and characterization of a large displacement electro-thermal actuator for a new kind of safety-and-arming device[J]. *Energy Harvesting and Systems*, 2015, 2(3): 143-148.
- [7] THANGAVEL A, RENGASWAMY R, SUKUMAR P K, et al. Modelling of Chevron electrothermal actuator and its performance analysis[J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(4): 1767-1774.
- [8] 刘双杰,郝永平,王兴. 一种双环境下的硅基MEMS执行器设计与分析[J]. 纳米技术与精密工程,2014,6(12):445-448.
- [9] 陈尚,张世军,穆星科,等. MEMS陀螺仪技术国内外发展现状简述[J]. 传感器世界,2016,4:19-23.
- [10] 邓炬锋,史春景,郝永平,等. 引信MEMS执行器的设计与分析[J]. 机械设计与制造,2016,9:197-200.
- [11] 田文超,陈志强,贾建援,等. 低压大位移静电微驱动器驱动机理分析[J]. 西安电子科技大学学报,2014,41(2):85-89.
- [12] 秦雷,谢晓瑛,李君龙. MEMS技术发展现状及未来发展趋势[J]. 现代防御技术,2017,45(4):1-5.
- [13] LI X Y, ZHAO Y L, HU T J. Design of a large displacement thermal actuator with a cascaded V-beam amplification for MEMS safety-and-arming devices[J]. *Microsystem Technologies*, 2015,2(11):2367-2374.
- [14] 许伟达,潘潇雨,许砾,等. 高压大电流MOSFET驱动器失效分析[J]. 国外电子测量技术,2019,38(10): 146-151.
- [15] SHABESTARI N P, VAZIRI M R R, BAKHSHANDEH M, et al. Fabrication of a simple and easy-to-make piezoelectric actuator and its use as phase shifter in digital speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Optics*, 2019, 48(2): 272-282.

作者简介

保慧琴,硕士,讲师,主要研究方向为MEMS设计与制备。
E-mail:821907406@qq.com