

微型光热驱动机构的光热膨胀理论模型与实验研究*

刘 超 张冬仙† 章海军

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室 杭州 310027)

(2008 年 8 月 20 日收到, 2008 年 9 月 10 日收到修改稿)

提出和发展了一种基于微尺度光热膨胀效应的微型光热驱动机构,建立了膨胀臂的微尺度光热传导与膨胀的物理模型,利用有限元分析和数学物理方法,推导出膨胀臂的一维温度分布表达式及光热膨胀量和偏转量的计算公式.利用准分子激光微加工系统设计制作了一个长度为 1200 μm 的微型光热驱动样机.根据激光和样机的相关参数,计算得到光热膨胀量与激光功率之间的理论关系曲线.实验结果表明,微型光热驱动机构的光热偏转量(对应于膨胀量)与照射到膨胀臂上的激光功率近似成线性关系,实验曲线与理论模型及计算结果符合良好.在理论和实验研究基础上,作为光热微驱动的应用实例,设计并加工制作了一个双向微开关型光热驱动机构,并通过实验实现了双向微开关功能.

关键词:光热膨胀臂,微驱动机构,光热传导模型,激光

PACC: 6570, 4252, 4410, 4255

1. 引 言

随着高集成化微型便携设备的日益普及,微驱动机构性能的优劣成为整个微机电系统(MEMS)的关键.根据技术原理和用途的不同,微驱动机构的驱动方式主要有静电驱动、压电驱动、磁致伸缩驱动、磁驱动和热驱动等^[1-8].其中热驱动因其结构紧凑、位移输出量大等优点而在近年得到广泛重视.

目前热驱动主要采用电热驱动^[9-11]方式.电热驱动是利用电流流过电阻产生焦耳热来驱动,其驱动力和输出变形大,但驱动电压通常采用内置小电池或通过导线与外部电源连接来提供,前者使微驱动器难以小型化,而且寿命短,后者降低了整个系统的灵活性.为了克服上述缺陷,近年来有科研工作者采用激光作为外部无线能源,利用光热效应研发微驱动机构.如 Baglio 等人研究了一种双层材料构成的扁平驱动机构^[12],Oliver 等人在多晶硅表面微加工出四层结构的微驱动器^[13],Szabo 等人报道了一种用于微型机器人的 V 型多晶硅光热驱动机构^[14].

本文在原有研究基础上^[15-17]对光热膨胀驱动机理进行了系统的理论和实验研究,建立了微尺度光热传导与膨胀的物理数学模型,利用有限元分析

和数学物理方法,推导出膨胀臂的一维温度分布表达式及光热膨胀量和偏转量的计算公式.设计并制作了微型光热驱动机构(PTA)实验样机和一种双向光热驱动微开关的应用实例,通过实验对理论模型和计算公式进行了验证,并实现了双向光热偏转和微开关功能.

2. 微尺度光热膨胀理论与物理模型

典型的对称型 PTA 如图 1 所示,两条长度 L 、宽度 W 、厚度 D 的细长光热膨胀臂左端均通过很短的细桥与基底固定,右端为自由端,两者互相连接在一起.当一束激光照射其中的一条膨胀臂时,受热的膨胀臂温度升高,长度伸长,两臂之间的长度产生差异,但是由于两臂的自由端连接在一起,其约束作用导致自由端在长度的垂直方向产生横向偏转量 d .偏转的方向取决于受热膨胀臂的选择,上臂被加热,自由端向下偏转;下臂被加热,自由端向上偏转.

对于一个狭长的薄膨胀臂,在厚度方向上的尺寸非常小,因此膨胀臂在厚度方向的温度变化可以忽略,当照射光斑的尺寸与膨胀臂的宽度相当时,可以认为膨胀臂的温度分布为沿长度方向的一维分布,用于研究推导膨胀臂温度分布的一维模型如图

* 国家高技术研究发展计划(批准号 2006AA04Z237)和国家自然科学基金(批准号 50775205)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhangdx@zju.edu.cn

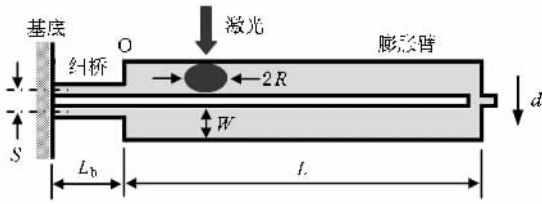


图1 PTA及其光热偏转示意图

2所示.当一束半导体激光照射在一膨胀臂(热臂)上,形成一个长轴半径为 R 的椭圆形光斑.以膨胀臂左端作为坐标轴原点 O ,光斑中心的坐标值为 L_1 ,膨胀臂右端的坐标值为 L .

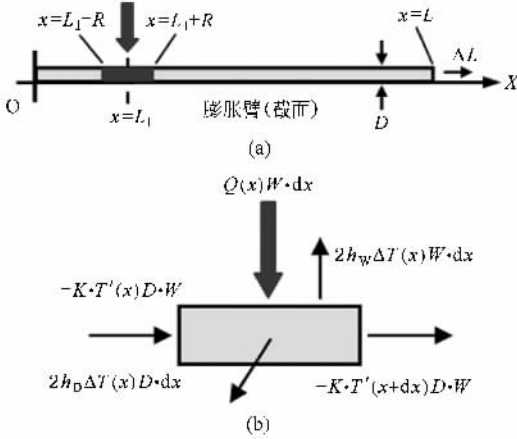


图2 理论模型 (a)膨胀臂的一维坐标系 (b)微元光热传导

设吸收激光能量后形成的热源其功率密度沿 x 方向的分布函数为 $Q(x)$ 环境温度 T_0 激光照射后膨胀臂各点温度升高到 $T(x)$, 温度升高值 $\Delta T(x) = T(x) - T_0$. 光斑热源的覆盖范围为 $(L_1 - R, L_1 + R)$, 则在整个膨胀臂区域 $(0, L)$ 范围内热源的功率密度一维分布可以表示为:

$$Q(x) = \begin{cases} \rho_A q_0 & (L_1 - R \leq x \leq L_1 + R), \\ 0 & (x < L_1 - R, x > L_1 + R), \end{cases} \quad (1)$$

其中 ρ_A 为吸收率, q_0 为入射激光功率密度, 考虑到激光光斑的尺寸很小, 可以忽略其内部的功率分布的复杂程度, 将其当作一个均匀分布的激光.

任取膨胀臂中长度为 dx 的一小段(微元), 其热流情况如图 2(b) 所示, 有激光照射获得的输入热流、导热产生的输入热流 (x 处) 和输出热流 ($x + \Delta x$ 处) 以及通过表面(上下表面和侧面)的对流换热形成的热流, 对于图中所示的热流来说, 当热流的值为正时, 热流的方向与箭头方向一致, 当热流的值为负时, 热流的方向与箭头方向相反. 当膨胀臂达到热平衡时, 进入微元的热流应该等于离开微元的热量, 因此可得到:

$$\begin{aligned} & -KT'(x)DW + Q(x)Wdx \\ & = -KT'(x + dx)DW + [T(x) - T_0] \\ & \quad \times (2Wh_w \cdot dx + 2Dh_D \cdot dx), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 K 为材料的热传导系数, h_D 和 h_w 分别为侧面和上下表面的对流换热系数.

(2)式两边同时除以因子 $(KDW \cdot dx)$, 移项变形可以得到方程

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 T(x)}{dx^2} - \frac{\alpha h_D D + h_w W}{KDW} [T(x) - T_0] \\ & = -\frac{Q(x)}{KD}. \end{aligned} \quad (3)$$

细桥结构可有效地限制膨胀臂的热量向基底传导, 同时, 由于细桥尺寸非常小, 因此在膨胀臂的左右端点 $x = 0$ 和 $x = L$ 处, 均可认为与大气界面相连, 当端点处达到热平衡时, 热边界条件为

$$T(0) = T_0, T(L) = T_0. \quad (4)$$

利用边界条件, 解方程(3)可得

$$\Delta T(x) = \begin{cases} \frac{2\rho_A q_0 \operatorname{sh}(bR)}{KDb^2 \operatorname{sh}(bL)} \operatorname{sh}[b(L - L_1)] \operatorname{ch}(bx) & (0 \leq x \leq L_1 - R), \\ \frac{2\rho_A q_0 \operatorname{sh}(bR)}{KDb^2 \operatorname{sh}(bL)} \operatorname{sh}[b(L - L_1)] \operatorname{ch}(bx) \\ - \frac{\rho_A q_0}{KDb^2} \{ \operatorname{ch}[b(x + R - L_1)] - 1 \} & (L_1 - R \leq x \leq L_1 + R), \\ \frac{2\rho_A q_0 \operatorname{sh}(bR)}{KDb^2 \operatorname{sh}(bL)} \operatorname{sh}[b(L - L_1)] \operatorname{ch}(bx) \\ - \frac{2\rho_A q_0}{KDb^2} \operatorname{sh}(bR) \operatorname{sh}[b(x - L_1)] & (L_1 + R \leq x \leq L), \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$b^2 = \frac{\chi(h_D D + h_W W)}{KDW} \quad (6)$$

(5)式描述了激光照射在光热膨胀臂上时,膨胀臂内温度的升高值沿长度方向的分布.这一理论公式具有普适性,只要将膨胀臂材料的各种物性参数、几何尺寸以及激光的能量分布代入(5)式,即可得到其一维的光热温度分布.

对于一个已知其温升分布的膨胀臂而言,设材料的热膨胀系数为 α ,则膨胀臂的伸长量可以表示为一个积分量

$$\begin{aligned} \Delta L &= \alpha \int_0^L \Delta T(x) dx \\ &= \alpha \frac{2\rho_A q_0 R}{KDb^2} - \alpha \frac{2\rho_A q_0}{KDb^3} \text{sh}(bR) \text{ch}[b(L-L_1)] \\ &\quad - \alpha \frac{2\rho_A q_0}{KDb^3 \text{sh}(bL)} \text{sh}(bR) \text{sh}[b(L-L_1)] \\ &\quad \times [1 - \text{ch}(bL)]. \end{aligned} \quad (7)$$

将激光的功率、光斑尺寸参数、膨胀臂的结构参数和材料的热物参数包括导热系数、对流换热系数(在常温下表面对流换热系数恒定,但在温度较低或温度较高时会发生变化,可用迭代法计算得到)^[18]及热膨胀系数等代入,即可得到膨胀臂的光热伸长量.当微驱动机构的几何尺寸及热物参数等一定时,膨胀臂的伸长量与激光功率近似成线性关系.

表1为本文设计的PTA的几何和热物参数以及激光相关参数.

表1 激光参数和PTA的热物及几何参数

激光光斑长轴半径 $R/\mu\text{m}$	50
激光功率 P_0/mW	0—4
激光波长 λ/nm	650
光斑中心坐标 $L_1/\mu\text{m}$	400
膨胀臂长度 $L/\mu\text{m}$	1000
细桥长度 $L_b/\mu\text{m}$	200
膨胀臂宽度 $W/\mu\text{m}$	90
两细桥之间的距离 $S/\mu\text{m}$	60
膨胀臂厚度 $D/\mu\text{m}$	40
材料的热传导系数 $K/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0.24
材料的热膨胀系数 α/K^{-1}	32×10^{-6}
侧面的对流换热系数 $h_D/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	500
上下表面对流换热系数 $h_W/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	30
膨胀臂的初始温度(环境温度) $T_0/^\circ\text{C}$	20

当激光照射在其中一膨胀臂上时,其长度方向(纵向)的理论伸长量与激光功率之间的关系可根据(7)式计算得到,理论曲线如图3所示,当功率为4 mW时,最大理论膨胀量为1.69 μm .

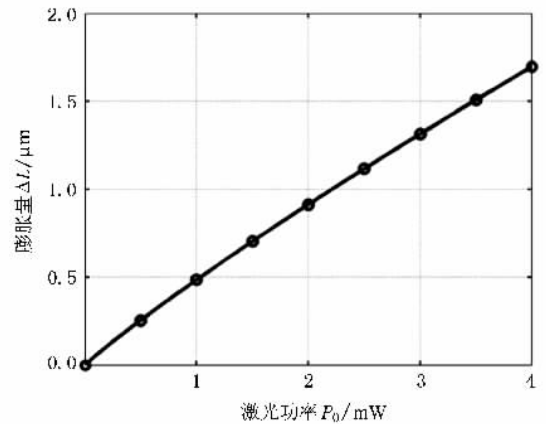


图3 理论计算得到的膨胀量与激光功率的关系曲线

与外臂四等分的管状压电陶瓷二维扫描器^[19]可将纵向的伸长量转变为放大的横向偏转量一样,PTA也可将纵向的伸长量转变为放大的横向偏转量,光热偏转量的理论公式为:

$$d = k\Delta L(L + L_b)S, \quad (8)$$

其中 k 为待定的比例系数,与PTA的物理及机械特性有关($L + L_b$)远大于 S ,在本文的PTA中其比值约为20,因此,PTA可将微小的光热膨胀量 ΔL 放大数倍乃至十几倍,获得较明显的光热偏转量 d .

3. PTA 的实验研究

用准分子激光微加工平台(Optec Promaster,比利)设计制作了一个PTA,图4为其SEM图.选用黑色聚丙烯塑料作为制作材料,其优点是具有较低的热导率,加热过程中热量损失小,同时其热膨胀系数较大,在同样的温升下能获得更大的伸长量.实验中首次采用波长650 nm的半导体激光作为驱动光源,激光功率可调,用功率计预先测定照射到膨胀臂处的激光功率的可调范围为0—4 mW,用自行研制的CCD显微监控和视频运动测量系统进行光热微驱动实验.

图5所示为PTA光热驱动过程中的CCD视频截图,右图为对应左图的放大部分.图5(a)为未受激光照射时的状态,图5(b)为4 mW激光照射下的偏转状况,从视频中可明显观察到PTA的光热偏

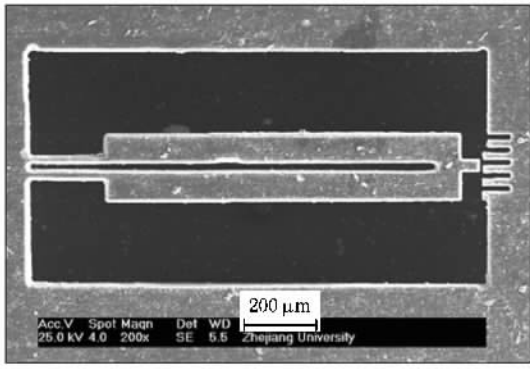


图 4 PTA 的 SEM 照片

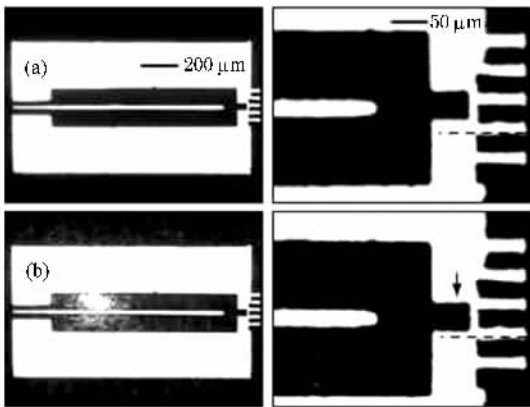


图 5 PTA 光热微驱动的显微视频截图 (a) 未受激光照射 (b) 受 4 mW 激光照射

转, 改变激光功率大小, 测得一系列实验数据, 绘制出偏转量和激光功率的关系曲线如图 6 所示, 两者近似成线性关系. 光热偏转量曲线的形状和趋势与图 3 所示的光热膨胀量的理论曲线相吻合. 在功率为 4 mW 时, 最大偏转量为 $10.80 \mu\text{m}$, 偏转量和伸长量之间比例系数 k 约为 0.32, 总的放大倍数约为 6.4 倍. 图中每一点为多次测量的平均值, 误差条显示多次测量的最大不确定度约为 $\pm 0.42 \mu\text{m}$, 这主要取决于 CCD 显微视频测量系统的图像放大倍数和分辨率.

作为光热微驱动的一个应用实例, 我们进一步设计制作了一种双向微开关型 PTA, 如图 7 所示,

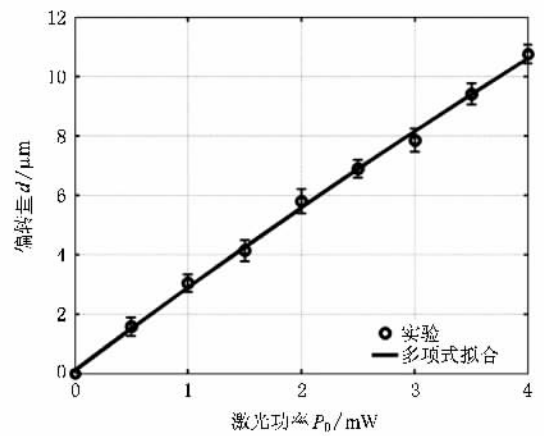


图 6 实验测得的偏转量与激光功率的关系曲线

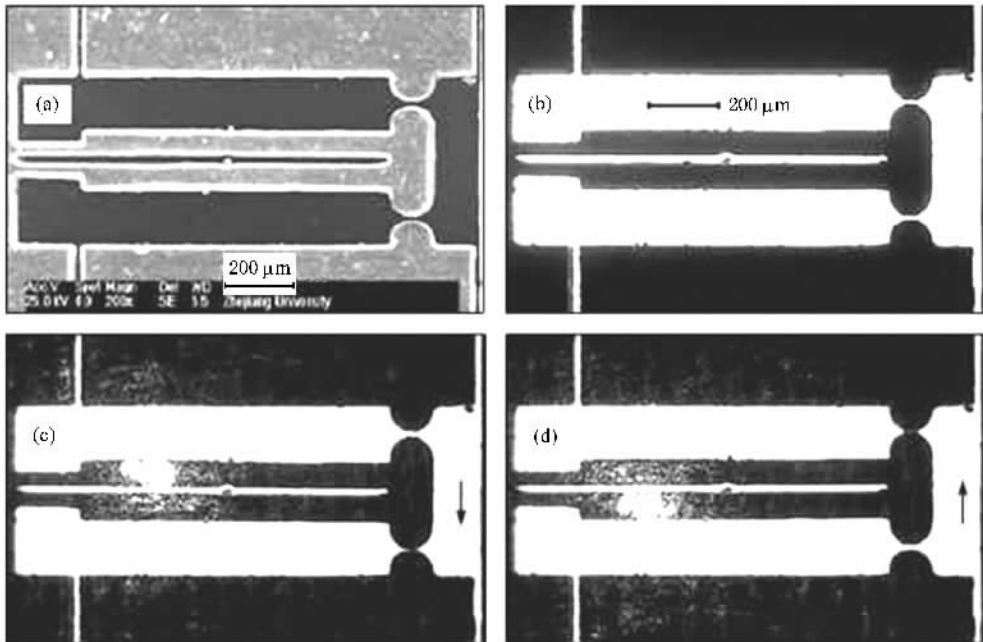


图 7 双向开关型 PTA 的光热驱动显微图 (a) SEM 照片 (b) 未受激光照射 (c) 激光照射上臂时向下偏转 (d) 激光照射下臂时向上偏转

(a)为其 SEM 照片 (b)为未受激光照射时的状况, (c)为激光照射上臂时 PTA 向下偏转,下面的两个触点接触 (d)为激光照射下臂时 PTA 向上偏转,上面的两个触点相连,交替改变激光照射位置,从视频中可以明显观察到 PTA 实现了双向微开关的开、关功能。

4. 结 论

建立了微尺度光热膨胀的理论模型,推导出微膨胀臂在激光照射下的温度分布以及光热膨胀量和偏转量的计算公式,并根据设计制作的 PTA 的几何

尺寸和热物参数以及激光相关参数进行了理论预测,给出了光热膨胀量与激光功率之间的理论关系曲线.用黑色聚丙烯材料在准分子激光微加工平台上加工制作出对称型 PTA 和双开关型 PTA,并在自行研制的 CCD 显微监控和视频运动测量系统下进行了光热驱动实验,测得的实验曲线验证了理论预测的准确性,并实现了 PTA 的光热偏转驱动和双开关型 PTA 的微开关功能.这种用单种材料制备的 PTA 结构简洁,制作方便,无需导线连接,易于集成和微型化,并可实现远程控制.本文的理论和实验证明了其在 MEMS 等领域具有很高的实际应用价值。

- [1] Andrew Y J L , Tien N C 2000 *J. Microelectromech. S.* **9** 126
- [2] Pelrine R E , Kornbluh R D , Joseph J P 1998 *Sens. Actuat. A* **64** 77
- [3] Shen J , Jywe W , Chiang H , Shu Y 2008 *Prec. Eng.* **32** 71
- [4] Park Y W , Kim D Y 2004 *J. Magn. Magn. Mater.* **272—276** (suppl) E1765
- [5] Pang H L , Li Y J , Lu X , Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6382 (in Chinese) [庞海龙、李英骏、鲁欣、张杰 2006 物理学报 **55** 6382]
- [6] Fu S , Ding G , Wang H , Yang Z , Feng J 2007 *Microelectron. J.* **38** 556
- [7] Fang Y M , Huang Q A , Li W H 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1709
- [8] Huang Q , Lee N K S 1999 *J. Micromech. Microeng.* **9** 64
- [9] Lin L W , Lin S H 1998 *Sens. Actuat. A* **71** 35
- [10] Moulton T , Ananthasuresh G K 2001 *Sens. Actuat. A* **90** 38
- [11] Feng Z Y , Luo H S , Yin Z W , Guan C L , Ling N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3609 (in Chinese) [冯祖勇、罗豪、殷之文、官春林、凌宁 2004 物理学报 **53** 3609]
- [12] Baglio S , Castorina S , Fortuna S , Savalli N 2002 *Sens. Actuat. A* **101** 185
- [13] Oliver A D , Vigil S R , Gianchandani Y B 2003 *IEEE Trans. Electron. Devices* **50** 1156
- [14] Szabo F R , Kladitis P E 2004 *ICMENS* 2004 446
- [15] He Y L , Zhang H J , Zhang D X 2005 *J. Micromech. Microeng.* **15** 1637
- [16] Zhang D X , Liu C , Zhang H J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3107 (in Chinese) [张冬仙、刘超、章海军 2008 物理学报 **57** 3107]
- [17] Zhang D , Zhang H , Liu C , Jiang J 2008 *Microscope Res. Tech.* **71** 119
- [18] He Y L 2008 *Ph. D. Thesis* (Hangzhou : Zhejiang University) (in Chinese) [何玉琳 2008 博士学位论文 (杭州 浙江大学)]
- [19] Tian X J , Wang Y C , Dong Z L , Xi N 2005 *Chin. J. Sci. Instrum.* **26** 928 (in Chinese) [田孝军、王越超、董再励、席宁 2005 仪器仪表学报 **26** 928]

Theoretical modeling of microscopic photothermal expansion and experimental study of photothermal microactuators^{*}

Liu Chao Zhang Dong-Xian[†] Zhang Hai-Jun

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 20 August 2008; revised manuscript received 10 September 2008)

Abstract

A novel photo-thermal microactuator based on microscopic photothermal expansion is developed. A theoretical model of photo-thermal expansion for photo-thermal microactuator is established. Using finite element analysis and numerical method, the expressions of the temperature distribution and the linear thermal expansion are deduced. A photo-thermal microactuator of 1200 μm length is fabricated by using an excimer laser micromachining system. According to the parameters of the laser and the photo-thermal microactuator, a theoretical relationship between the expansion and the laser power is calculated. The results indicate that the photo-thermal microactuator deflection (corresponding to expansion) is approximately linear with the laser power irradiating the expansion arm, according with theoretical predictions quite well. As an application, a Bi-switch like photo-thermal microactuator is built and the successful photo-thermal microactuation experiment shows the Bi-switch function can be realized.

Keywords: photothermal expansion, microactuator, model of photothermal transmission, laser

PACC: 6570, 4252, 4410, 4255

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA04Z237) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50775205).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangdx@zju.edu.cn