

文章编号 1004-924X(2015)增-0342-07

用于微流体油液检测芯片的电阻检测法

王 强, 张洪朋*, 张剑锋, 孙玉清, 陈海泉
(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了提高微流体油液检测芯片对非铁磁性金属颗粒(铜)的检测精度和灵敏度, 本文在电感法检测法的基础上提出了电阻检测法, 并对检测芯片的电阻信号输出规律进行研究。介绍了电感法的检测原理及其检测缺陷, 制作了实验用检测芯片并设计了检测系统。最后, 实验分析了微流体油液检测芯片电阻信号输出规律。实验显示: 检测 $80\ \mu\text{m}$ 以下的铜颗粒时, 电阻法的检测精度高于电感法; 检测芯片其他参数不变, 电感线圈匝数为 800 匝时, 线圈电阻变化量为 $0.2093\ \Omega$; 微流道直径为 $230\ \mu\text{m}$ 时, 线圈电阻变化量为 $0.1857\ \Omega$ 。油液中铜颗粒粒径小于 $80\ \mu\text{m}$ 时, 电阻法检测精度高于电感法; 芯片中电感线圈匝数与电阻变化量呈线性关系, 流道直径与电阻变化量同样为线性关系。

关键词: 微流体油液检测芯片; 电阻信号; 信号输出; 非铁磁性金属颗粒

中图分类号: TP212.1; TM934.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0342

Resistance detection method for microfluidic oil detection chip

WANG Qiang, ZHANG Hong-peng*, ZHANG Jian-feng, SUN Yu-qing, CHEN Hai-quan

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding author, E-mail: zhppeter@163.com

Abstract: To improve the measuring accuracy and sensitivity of a microfluidic oil detection chip in detecting the non-ferrous metallic debris in oil, this paper presents a resistance analysis method based on the inductive analysis method adopted in previous measurement. Then it researches the resistance signal output characteristics of the detection chip. The principle and defects of the inductive analysis method are introduced. The detection chip and detection system are designed. Finally, the resistance signal output characteristic of microfluidic oil detection chip is analyzed on the basis of experiments. The experimental results show that the detection accuracy of the proposed method is higher than that of the resistance analysis method when copper particles have the size under $80\ \mu\text{m}$. The resistance change is $0.2093\ \Omega$ with the inductance coil of 800 turns when the other parameters are constant. Moreover, The resistance change of coil is $0.1857\ \Omega$ when the micro-channel has a diameter of $230\ \mu\text{m}$. In respect of detecting copper particles with a size under $80\ \mu\text{m}$, the accuracy of resistance analysis method is higher than that of the inductive analysis method. Meanwhile, there is a linear relation-

收稿日期: 2015-05-10; 修订日期: 2015-07-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51205034); 交通运输部资助项目(No. 2013329225260); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 3132014332)

ship between the resistance change and the inductance coil turns of chip, and the same is true for the relationship between the channel diameter and the resistance variation.

Key words: microfluidic oil; detection chip; resistance signal; signal output; ferrous wear debris

1 引 言

油液作为能量传递和摩擦副润滑介质被广泛应用于工业中。液压系统各部件的运动是通过液压油的传导达到执行特定机械运动的目的。数据统计显示,超过 75% 的液压系统故障^[1],约 35% 的柴油机运行故障、38% 的齿轮失效以及 40% 的滚动轴承失效是由于油液失效引起的^[2]。油液失效主要是因为油液中的固体颗粒污染物,它们来自内部机械摩擦产生的金属磨损颗粒,也存在外部进入的粉尘异物等,而磨损颗粒是机械故障的主要因素。正常情况下,液压油中的磨损颗粒物的尺寸通常为 10~20 μm ,其浓度基本恒定。当发生异常磨损时颗粒粒径上升到 50~100 μm ^[3]。开展油液磨粒检测工作,使系统内的油液保持在正常范围内,是防止液压系统发生故障的重要措施。

目前,油液分析技术主要研究内容包括油液理化分析和油液磨粒分析,理化分析是对油液劣化变质程度的分析,主要包括硫化程度和氧化程度、添加剂损失等^[4-6]。磨粒分析是对油液中磨损颗粒的数量、成分、大小、形状等进行分析^[7]。油液分析诊断技术主要包括光谱分析、磁塞分析、颗粒计数、铁谱分析等。颗粒计数分析法可以实现在线检测,能够实现对机械设备运行状态进行预测,避免机械设备发生突发性故障,减少故障带来的经济损失^[8]。

微流体油液检测芯片是一种电感式在线检测传感器^[9],能够实现非接触式监测,不需要破坏液压系统油路,方便实现磨粒的在线监测。在利用该传感器检测液压油中的磨损颗粒时发现,当非铁磁金属颗粒通过检测芯片中的电感线圈时,产生的电感值变化量相对于同尺寸的铁磁性金属颗粒,其变化微小,颗粒产生的脉冲信号不明显。但是,引起的电阻脉冲信号变化明显,信噪比高。因此,可以利用电感线圈观测其电阻变化来检测非铁磁性金属颗粒。本文研究了微流体油液检测芯片检测非铁磁性金属颗粒(实验中使用铜颗粒)电

阻信号输出规律。对于优化芯片,提高电感式芯片对非铁磁金属性金属颗粒的检测能力,完善多信号分析油液污染度具有重要的意义。

2 颗粒检测原理

在之前的工作基础上提出基于微流体芯片的颗粒检测方法,如图 1 所示,用模塑法加工出 PDMS^[10-11] 微流道,线圈部分为检测区。

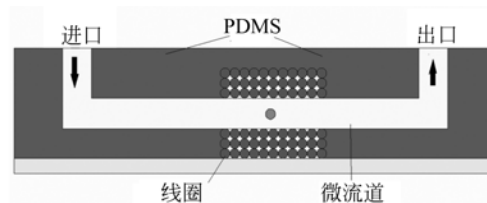


图 1 微流体油液检测芯片

Fig. 1 Microfluidic oil detection chip

当非铁磁金属颗粒通过加载高频交流电的电感线圈时,由于其相对磁导率接近于 1,由此磁场对非铁磁金属颗粒几乎没有磁化效应,另一方面,根据楞次定律,交变磁场产生的涡流效应形成的复数磁导率会削弱原有磁场,使得电感传感器的磁通量减少,视在电感减小^[12]。所以当非金属颗粒通过电感线圈时会减小其视在电感值^[13]。同时,在磁导率和涡流的共同作用下引起线圈的复数磁通量的变化,从而改变线圈的电阻特性,电感线圈的电阻值增大。实验研究发现,当非铁磁金属颗粒(实验中使用铜颗粒)的粒径较小时,其通过电感线圈时引起的电感的变化量较小,信噪比小,产生的信号几乎被淹没,但其引起的电阻变化量相对较高,信噪比高。所以,对于粒径较小的非铁磁性金属颗粒的检测,采用观测电阻优于电感。因此设计实验研究微流体油液检测芯片电阻信号输出规律。

3 实 验

3.1 微流体油液检测芯片

实验采用单线螺线管型微流体油液检测芯

片,芯片包括自制的微螺线管、检测通道,油液样本进口及出口、接线头等。芯片制作的基本材料为 PDMS(聚二甲基硅氧烷: Polydimethylsiloxane),其制作流程如图 2 所示。

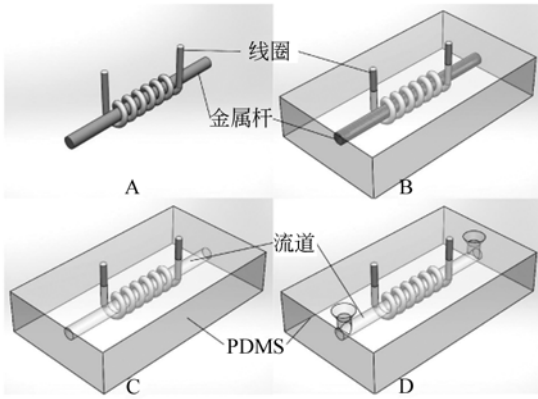


图 2 微流体油液检测芯片制作流程

Fig. 2 Production process of microfluidic oil detection chip

微流道和电感线圈的制作,首先采用绕线机(YH-4A1型)将直径为 $25\ \mu\text{m}$ 细漆包线绕在细金属杆上,通过绕线器设置线圈的参数,并将其固定在载玻片基体上;采用一定质量比例将聚二甲基硅氧烷和固化剂混合均匀,抽真空消除气泡后浇铸到基体上并使其淹没金属杆和线圈;放入烘箱中加热固化;将金属杆抽出后形成流道,金属杆的直径决定微流道的直径,采用模塑法制作的微流道能够减小检测颗粒和检测线圈之间的距离,提高颗粒检测灵敏度;在流道两端打孔形成储液槽,并连接注油软管;最后焊接连接微电感线圈和数据采集系统的导线,完成油液检测芯片制作。

3.2 实验装置

设计实验系统如图 3 所示:其中主要包括微流体油液检测芯片,阻抗分析仪(Agilent E4980A),微量注射泵(Harvard pump 11 plus)及计算机等。

微流体油液检测芯片是本实验的核心,它作为传感器检测通过电感线圈的颗粒。阻抗分析仪连接芯片的 2 个端口,它不仅向微流体油液检测芯片中的电感线圈提供低压高频交流电,使其产生交变磁场,而且实时监测记录电感线圈的等效电阻值的变化量,然后通过模数转换装置进入计算机。当一个微小非铁磁性颗粒通过检测区域

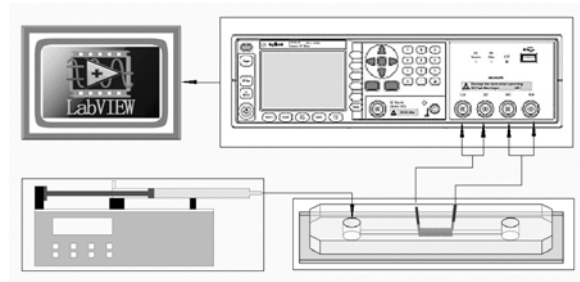


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Diagram of experiment system

时,在颗粒的涡流和磁导率的共同作用下,引起线圈的复数磁通量的变化,从而改变电感线圈的电阻特性,电感线圈的电阻值增大,形成一个与磨粒相关的正向脉冲信号。微量注射泵(Harvard pump 11 plus)推动注射器以一定的速率将混有颗粒的油样通过软管注入检测芯片中。使用 LabVIEW 对输入的电感信号进行滤波处理,将外界对微电阻信号的干扰屏蔽。实验实物如图 4 所示。



图 4 检测系统实物图

Fig. 4 Map of detection system

4 实验与结果分析

实验采用阻抗分析仪(Agilent E4980A),激励电压设为 $2\ \text{V}$,激励源频率为 $2\ \text{MHz}$,研究微流体油液检测芯片电阻脉冲信号输出规律。在保证其他参数相对不变的情况下,主要针对颗粒粒径、电感线圈匝数和流道宽度 3 个参数进行分析。采用上述制作检测芯片的方法制作实验所需芯片。采用芯片参数如表 1 所示。实验中使用铜颗粒与洁净液压油混合均匀制成样液。通过对这 3 个参数的研究,得出了在各自变化时,颗粒流过电感线圈时的最大电阻检测值与原电感测量值,两者相

减得出螺线管线圈的电阻变化量。对电阻变化量的分析,可得知影响微流体油液检测芯片电阻脉冲信号输出规律的因子。

采用芯片 3 对 80 μm 的铜颗粒进行检测,得

到的电阻信号和电感信号如图 5 所示。点阻信号的信噪比高于电感信号,并且有些铜颗粒产生的电感信号被噪声淹没,故而对于 80 μm 以下的铜颗粒,采用电阻信号检测更精确,漏检率低。

表 1 实验芯片参数
Tab.1 Parameters of chip

编号参数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
线径/ μm	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
流道宽/ μm	270	270	270	270	270	230	270	300	470	630
匝数	400	500	600	700	800	600	600	600	600	600

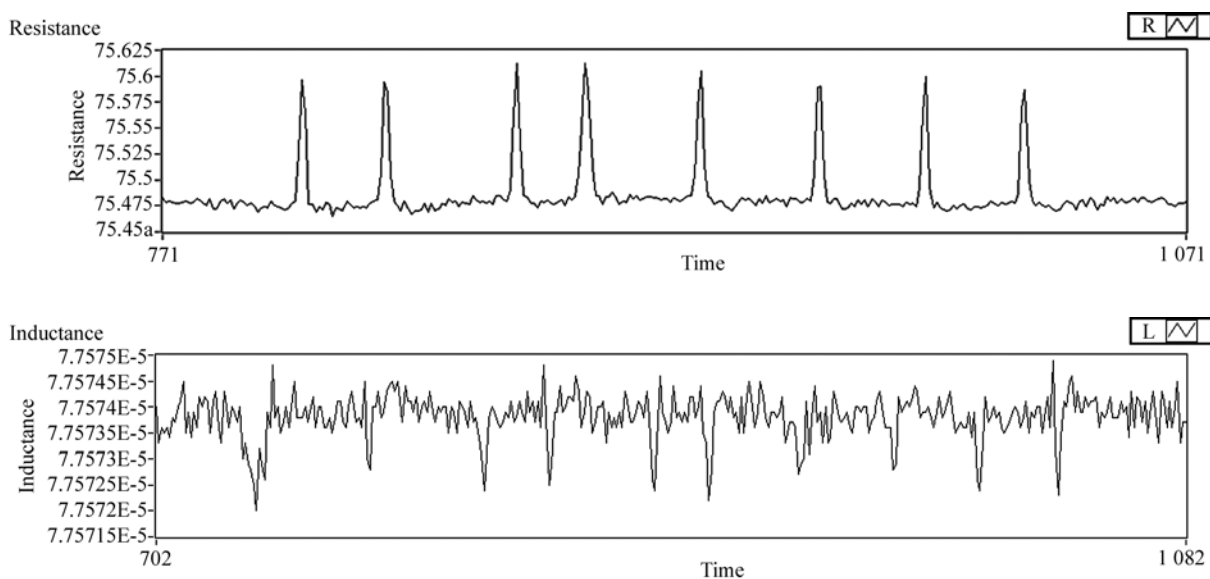


图 5 铜颗粒产生的电阻信号和电感信号
Fig. 5 Resistance signal and inductive signal generated by copper particles

表 2 同一芯片检测不同粒径颗粒的电阻变化量
Tab. 2 Variation of resistance with different particles detected by one chip

铜颗粒粒径/ μm	基础电阻测量值/ Ω	颗粒流经过程最大电阻值/ Ω	电阻变化量/ Ω
55	75.465 0	75.528 4	0.063 4
80	75.480 0	75.599 4	0.119 4
100	75.530 0	75.710 9	0.182 9
122	75.505 0	75.738 7	0.233 7
155	75.380 0	75.911 9	0.531 9

由表 2 的电阻变化值,得出颗粒尺寸与电阻变化值之间的关系如图 6 所示。

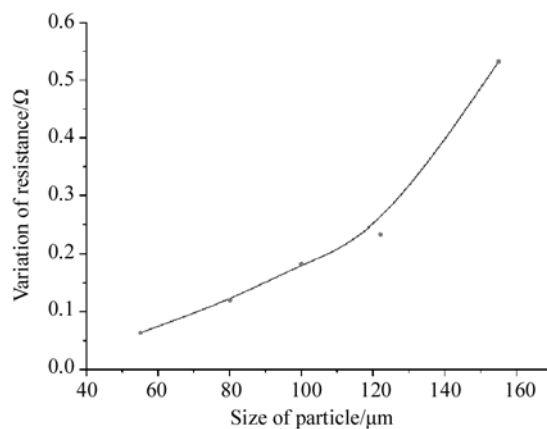


图 6 颗粒粒径与电阻变化值关系曲线图
Fig. 6 Relationship between size of particle and variation of resistance

表 3 匝数不同的芯片检测同一颗粒的电阻变化量

Tab. 3 Variation of resistance with same particle detected by chips with different turns

匝数 n	基础电阻 测量值/ Ω	颗粒流经过程 最大电阻值/ Ω	电阻变化量/ Ω
400	38.792 0	38.874 7	0.082 7
500	55.511 2	55.621 4	0.110 2
600	75.210 0	75.372 8	0.162 8
700	87.595 0	87.769 4	0.174 4
800	120.945 0	121.154 3	0.209 3

由表 3 的电阻变化值,得出线圈匝数与电阻变化值之间的关系如图 7 所示。

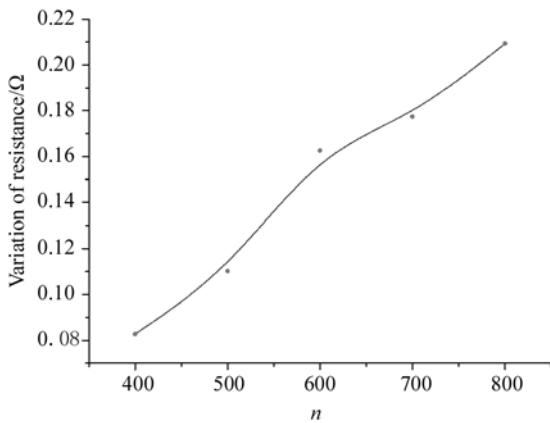


图 7 线圈匝数与电阻变化值关系曲线图

Fig. 7 Relationship between turns of coil and variation of resistance

当螺线管线圈的其他参数一定时,非铁磁性金属颗粒(铜颗粒)流经螺线管电感中心,检测到电阻变化值随着匝数的增加而增大。如图 8 所示,螺线管电感可以简化为多层同心圆,每个线圈产生的磁场均分布在线圈中心,所以随着线圈匝数的增加,螺线管电感中心的磁场也不断增强。由于铜颗粒导电,在颗粒内部产生的涡流也增强,

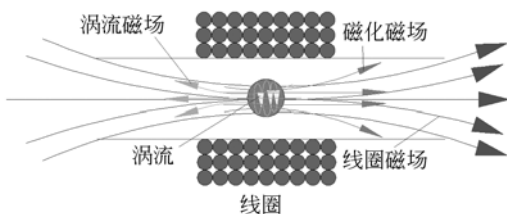


图 8 线圈电阻变化机理

Fig. 8 Mechanism of coil resistance variation

涡流影响磁场分布并进而影响线圈电阻,使得电阻变化量也增大。

表 4 流道直径不同的芯片检测同一颗粒电阻的变化量

Tab. 4 Variation of resistance with same particle detected by chips with different flow diameter

流道 直径/ μm	基础电阻 测量值/ Ω	颗粒流经过程 最大电阻值/ Ω	电阻变化 量/ Ω
230	66.335 0	66.520 7	0.185 7
270	73.085 0	73.249 0	0.164 0
300	72.165 0	72.310 9	0.145 9
430	91.145 0	91.267 3	0.122 3
630	118.475 0	118.571 9	0.096 9

由表 4 中的数据,得出流道直径作为变量时,其与输出电阻变化值的关系曲线如图 9 所示。

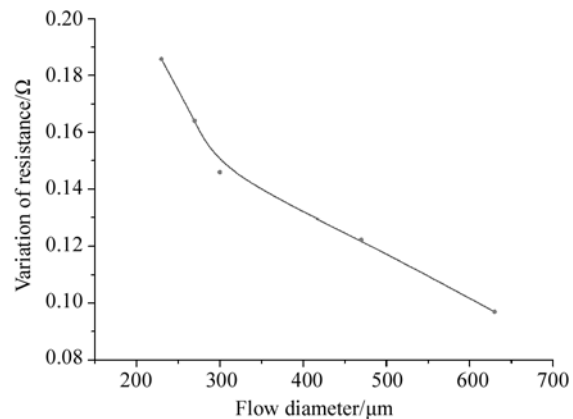


图 9 流道直径与电阻变化值关系曲线图

Fig. 9 Relationship between flow diameter of chip and variation of resistance

当其他参数一定时,电阻的变化量会随着颗粒所处流道直径的增大而减小。这是因为流道直径的增大使得颗粒所经过区域的磁场强度减弱,磁场对颗粒的涡流效应减弱。因此,非铁磁性颗粒对电感线圈的影响减弱,所测出的电阻变化量也相应减小。由此可知,流道直径与电阻变化量成负相关,尽量减小流道直径可提高芯片电阻信号输出效果。

5 结 论

本文实验结果表明,利用电感式微流体油液检测芯片对油液中微小金属颗粒进行检测时,监

测电感线圈的电阻信号可以更加精确的检测油液中粒径小于 80 μm 铜颗粒。同时实验证明,当铜颗粒经过电感线圈时,电阻的变化量随着颗粒粒径的增大而增大,电阻的变化量随着线圈匝数的增大而增大,芯片中电感线圈最大为 800 匝时,电阻变化量最大;随着颗粒所处流道直径增大电阻的变化量减小,芯片微流道直径最小为 230 μm

参考文献:

- [1] ZHANG X M, ZHANG H P, SUN Y Q, *et al.*. Effects of eddy current within particles on the 3D solenoid microfluidic detection chip [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 385: 546-549.
- [2] 殷勇辉. 基于电感测量和光纤技术的在线油液监测方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2002.
YIN Y H. *Study on the On-line oil Monitoring Technology Based on the Methods of Inductance and Optic-fiber Transducer* [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2002. (in Chinese)
- [3] TUCKER JE, SCHULTZ A, LU C, *et al.*. LASERNET FINES optical wear debris monitor [C] *International Conference on Condition Monitoring*, 1999: 445-452.
- [4] BARRETT M. Oil analysis [J]. *Materials Evaluation*. 2012(1):32-40.
- [5] POLEY J. Oil analysis information Part II [J]. *Tribology & Lubrication Technology*. 2012, (1): 71.
- [6] VANRENSELEAR J. Used-oil analysis for predictive maintenance [J]. *Tribology & Lubrication Technology*, 2012(1): 34.
- [7] 许斌,余学军. 油液分析技术在设备维修中的应用与研究[J]. *润滑油*,2006,2:61-64.
XU B, YU X J. The calibration method of particle counting and particle contamination level standards [J]. *Lubricating Oil*,2006,2:61-64. (in Chinese)
- [8] 张兴明. 时谐磁场金属颗粒磁化特性及微流体油液检测机理研究[D]. 大连:大连海事大学,2014.
ZHANG X M. *Study on Metal Particle Magnetization in Harmonic Field and Mechanism of Mi-*

crofluidic Oil Detection [D]. Dalian: Dalian Maritime University,2014. (in Chinese)

[9] 张洪朋,张兴明,郭力,等. 微流体油液检测芯片设计[J]. *仪器仪表学报*,2013,04:762-767.
ZHANG H P, ZHANG X M, GUO L, *et al.*. Design of the oil detection microfluidic chip [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34 (4): 762-767. (in Chinese)

[10] 夏飞. PDMS 微流控芯片的制备工艺研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
XIA F. *Study on Preparation of PDMS Microfluidic Chip* [D]. Nan jing: NanJing University of Science and Technology,2010. (in Chinese)

[11] 张高朋,田桂中,曹伟龙. 微流体系统中微通道制作工艺的研究进展[J]. *微纳电子技术*,2013,50(8):512-527.
ZHANG G P, TIAN G ZH, CAO W L. Research progress of the micro-channel fabricating process in the microfluidic system [J]. *Micronanoelectronic Technology*,2013,50(8):512-527.

[12] 张兴明,张洪朋,陈海泉,等. 微流体油液检测芯片分辨率-频率特性研究[J]. *仪器仪表学报*,2014,02:427-433.
ZHANG X M, ZHANG H P, CHEN H Q, *et al.*. Study on the resolution-frequency characteristic of microfluidic oil detection chip [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014(02):427-433. (in Chinese)

[13] DU L, ZHE J, CARLETTA J, *et al.*. Real-time monitoring of wear debris in lubrication oil using a microfluidic inductive coulter counting device [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9 (6): 1241-1245.

作者简介:



王 强(1990—),男,江西吉安人,2014年于大连海事大学获得工学学士学位,主要研究方向为微流控芯片技术、机电一体化等。E-mail: w_qiang29@163.com



张洪朋(1978—),男,辽宁铁岭人,教授、博士生导师,2005年于大连海事大学获得博士学位,主要研究方向为轮机工程、机电一体化、微流体芯片技术等。E-mail: Zhppeter@163.com