

文章编号 1004-924X(2003)06-0637-06

# 往复式机械非平稳信号的混沌与分形

赵吉文, 俞巧云, 王建平, 贾继德, 孔凡让, 李晓峰

(中国科技大学 精密仪器与机械系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 为了研究往复式机械非平稳信号的非线性动力学特征, 以内燃机主轴承的振动信号对其故障间隙的反映为例, 在对主轴承受力分析的基础上, 进行了模拟不同间隙的故障实验, 获得了不同间隙下的振动信号, 进一步应用混沌与分形方法研究了故障信号的混沌性, 通过计算信号的两个混沌特征量—关联维数和 Kolmogorov 熵, 找出了主轴承间隙与关联维数及 Kolmogorov 熵之间的变化关系, 印证了对该类型非平稳信号进行混沌与分形研究的可行性。

**关键词:** 内燃机; 混沌; 分形; 主轴承

中图分类号: O438 文献标识码: A

## Study of fault signals from main bearing of internal combustion engine using chaos and fractal theories

ZHAO Ji wen, YU Qiao yun, WANG Jian ping, JIA Ji de, KONG Fang rang, LI Xiao feng

(*Department of Precision Mechanical and Instrumentation,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

**Abstract:** In order to study the nonlinear dynamics of unsteady signals from reciprocal machines, taking the relation between vibration signals and fault clearances of a main bearing in an internal combustion engine as an example, in addition to the mechanical analysis of the main bearing, fault experiments were carried out with varied main bearing clearances to get vibration signals, and those signals were proved to be chaos signals. The changing relation between clearances and their related dimensions and kolmogorov entropies was established by calculating their correlation dimensions and kolmogorov entropies. And the feasibility of studying this kind of non-steady signals using chaos and fractals theories was proved.

**Key words:** internal combustion engine; chaos; fractals; main bearing

### 1 引言

往复式机械故障的产生原因较为复杂, 对其故障信号进行研究是当今故障诊断领域的一个难

点<sup>[1]</sup>。内燃机的曲柄活塞机构是一种典型的往复式机构, 由于内燃机工作时气缸内气体的爆燃, 使得主轴的轴承受受到反复的冲击, 同时由于轴承润滑状况、热等方面的影响, 使得主轴承出现故障的

收稿日期: 2003-04-07; 修订日期: 2003-10-20.

基金项目: 全国高校博士点基金项目 (No. 20020358063)

几率比较大。主轴承磨损出现间隙是一种常见的故障,其危害也比较大,比如会使内燃机输出功率减小,输出扭矩不均匀,产生较大的噪声,同时还会加速其它零部件磨损等。由于内燃机主轴承故障信号是一种由复杂现象引起的非平稳信号,对他进行分析有较大的难度。

混沌与分形理论是近年来非线性科学研究中非常重要的两个方面,他们在揭示复杂系统所表现出来的非平稳性、不连续性等特性方面具有独特之处<sup>[2]</sup>。混沌与分形通过研究系统吸引子的结构及其变化来研究系统的稳定性。系统正常工作时其吸引子的结构是稳定的,当系统偏离正常工作状态时其吸引子的结构就会变化。运用混沌与分形理论计算出系统的关联维数、Kolmogorov 熵等混沌特性量,可以敏感地反映系统吸引子动态结构的变化。鉴于内燃机主轴承故障是一种由于复杂原因引起的故障现象,考虑用混沌与分形方法对其故障信号进行分析,通过重构信号系统的相空间和重构信号系统吸引子的分形特征量,找出其中反映主轴承磨损间隙的混沌特征,为往复式机械故障诊断提供一种思路。

## 2 内燃机主轴承和主轴颈受力分析

内燃机的曲柄连杆机构相互之间力的作用如图 1。活塞在爆燃气体的作用力  $P$  的作用下沿连杆对曲柄销  $B$  产生一推力  $P_c$ , 将  $P_c$  沿  $B$  点的圆周运动的切向和法向分解为  $P_T$  和  $P_N$ 。将切向力  $P_T$  平移到主轴承的中心  $O$  点, 相当于在  $O$  点加两个方向相反而大小皆等于  $P_T$  的力  $P_T''$  和  $P_T'$ , 其中  $P_T$  和  $P_T'$  组成的一个以  $O$  为旋转中心的曲柄旋转力矩  $M = P_T R$ , 称为发动机一只汽缸的输出扭矩<sup>[3]</sup>。作用在曲柄销中心  $B$  点的法向力  $P_N$  以及连杆大端的离心惯性力  $P_{rB}$  也可沿曲柄半径传递到主轴承中心点  $O$ , 而曲柄本身不平衡质量所产生的离心惯性力  $P_{rK}$  也作用在  $O$  点, 因此沿曲柄方向作用在  $O$  点的合力为:

$$\sum P = P_N - P_{rK} - P_{rB} = P_N - P_r, \quad (1)$$

式中:  $P_N = P_c \sin \beta$ ,

$$P_r = P_{rK} + P_{rB} = m_r R \omega^2,$$

$m_r$  为连杆大端和曲柄自身的不平衡质量, 因此主轴颈对主轴承冲击合力为:

$$R_o = P_T^2 + (\sum p)^2 = P_T^2 + (P_N + P_r)^2, \quad (2)$$

在曲柄的一个工作周期中,  $R_o$  是一个交变的非稳态力。由于主轴颈和主轴承之间存在间隙, 使得两者的作用表现出较大的冲击, 这种冲击通过轴承直接作用于机体, 使机体产生振动, 振动的强弱缓急和主轴承与主轴颈之间的间隙有着密切的关系。当主轴承由于磨损使得两者之间的间隙增大时, 由此产生的振动也较为强烈。因此, 可以将传感器置于邻近主轴承的机体内, 测取由  $R_o$  引起的振动信号作为内燃机主轴承的状态信号。

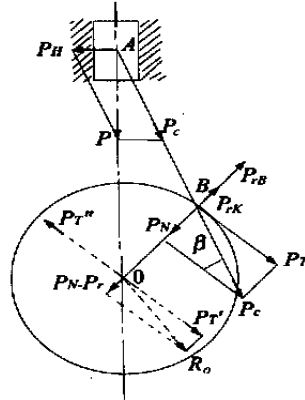


图 1 主轴承和主轴颈受力分析

Fig. 1 Mechanics analysis on the main bearing and main axis

## 3 主轴承间隙故障模拟与信号获取

基于上述力学分析, 在 EQ6100 型发动机上进行了故障模拟实验。将主轴承与主轴颈间隙按正常间隙 (Normal Clearance)、轻微磨损 (Light Clearance)、中等程度磨损 (Middling Clearance)、严重磨损 (Severe Clearance) 的次序增大, 分别进行实验。故障轴承取如图 2 所示的 4 号轴承, 测

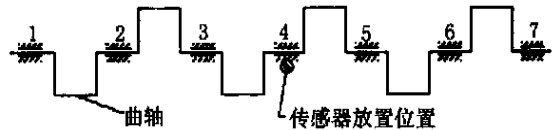


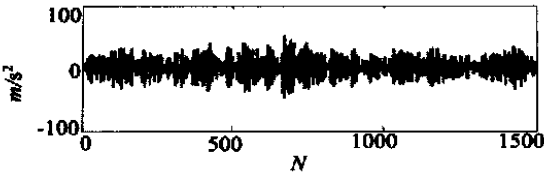
图 2 故障点设置与测点位置

Fig. 2 Setup of faults situation and location of measurement

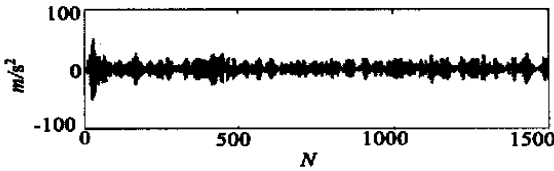
点设置在机体上距离 4 号轴承最近的位置。考虑到发动机工作时会产生剧烈振动, 为改善振动传感器的刚度条件, 扩大频响范围, 在振动传感器上装有强力磁吸盘。实验采样频率为 3 000 Hz, 放大器放大倍数为 10 倍。

测试系统中加速度传感器用 B&K 4384 型传感器, 频响范围为 0.1~12 600 Hz; 电荷放大器采用 B&K 2635 放大器; 数据采集分析设备包括东方科卡 1 块、DASP6.53 大容量数据分析采集分析软件 1 套、PC 机 1 台。

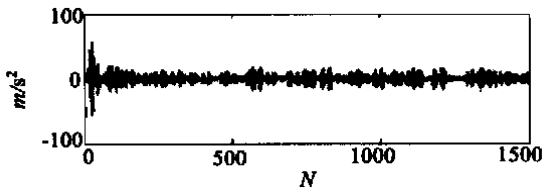
由此进行实验, 得不同间隙条件下的振动信号如图 3, 从上至下分别是正常间隙、轻微磨损、中等程度磨损、严重磨损的振动信号。



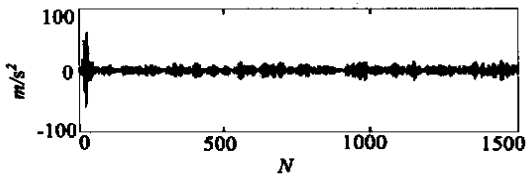
(a) 正常间隙  
(a) Normal clearance



(b) 轻微磨损  
(b) Light wear



(c) 中等程度磨损  
(c) Middle level wear



(d) 严重磨损  
(d) Heavy wear

图 3 各种间隙下的振动信号

Fig. 3 Vibration signals of all clearances

## 4 信号的混沌与分形

### 4.1 信号的混沌特性判别

在应用混沌方法提取混沌特征量之前, 必须

对主轴承故障的振动信号的混沌性质进行判断, 以确定其是否处于混沌状态。下面给出可以证明时间序列是否为混沌的一种方法—递次振幅图法, 它给出了混沌存在的充分条件<sup>[4]</sup>。绘图方法如下:

记上述振动信号滤波之后的时间序列为<sup>[5]</sup>:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n (i = 1, 2, \dots, n)$$

选定一个固定的延迟时间  $\tau$ , 不断递次在  $m$  维相空间里画出由下式:

$$x(i), x(i + \tau), x(i + 2\tau), \dots, x(i + (m - 1)\tau), \quad (3)$$

所决定的  $m$  维相空间的点, 就得出递次振幅图。实际工作中, 由于嵌入维数大于三维的图形不容易显示, 且三维图形足以解决系统混沌性的诊断问题, 所以  $m$  一般取 3。对于通过  $x(i), x(i + \tau), x(i + 2\tau), \dots, x(i + (m - 1)\tau)$  所得的图, 可以用垂直某个坐标面的平面截取该图, 从而获得该重构吸引子图形在该截面上的图形, 这个截面实际上就是庞加莱截面, 在相空间中, 该截面为通过一个不稳定的不动点的  $N-1$  维超平面, 这里为二维, 当轨道按一定的演化方向通过该平面时, 该面和相图的交点满足差分方程  $x_{n+1} = F(x_n)$  表达的离散动力关系, 该超平面为庞加莱截面的一个特例, 他不仅可以区别周期与非周期, 而且还能清晰反映出动力系统在庞加莱截面上的相应结构<sup>[4]</sup>。

据此, 时间序列混沌性的判断标准如下:

(1) 如果递次振幅图有一条明确的线, 则系统存在混沌;

(2) 如果递次振幅图虽非一条明确的线, 但也有一些规律, 是一种结构, 则也存在混沌;

(3) 如果递次振幅图全无结构, 它可能不是混沌, 是噪声。

在将所测取的振动信号进行滤波处理之后, 对其进行混沌特征的验证。分别做各种间隙对应信号的递次振幅图(三维相图)和庞加莱截面。通过观察获知, 各组信号都是混沌的。由于篇幅限制, 这里仅给出中等程度磨损时的振动信号的递次振幅图和庞加莱截面(图 4、图 5), 可以看出其递次振幅图和庞加莱截面具有明显的结构, 可以证实其混沌性。

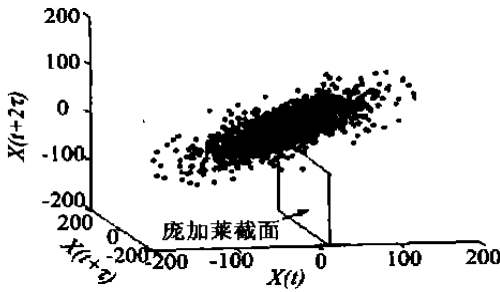


图 4 中等程度磨损振动信号三维相图

Fig. 4 3-D phase figure of the vibration signal of mid dling clearance

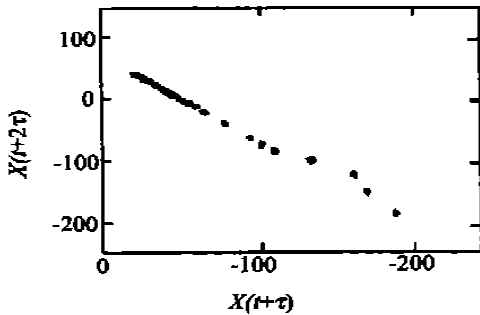


图 5 中等程度磨损振动信号庞加莱截面

Fig. 5 Poincaré section of the vibration signal of mid dling clearance

## 4.2 信号的分形特征量

对于如上述振动信号的混沌时间序列, 其研究方法很多, 所用的混沌特征量及其提取方法也很多, 但最能反映系统混沌特性, 对系统故障现象最敏感的特征量主要有两个—关联维数、Kolmogorov 熵。并且它们计算速度和计算准确率都较高, 适合用来进行故障监测。

### 4.2.1 关联维数

由于混沌系统具有某种意义上的自相似性, 因此对混沌吸引子的描述往往采用分形几何学的方法, 而分维是分形几何学研究的主要内容。分维数的取值情况是系统混沌与否的一个表征, 也是耗散系统能量变化的标志, 分维数越大, 耗散能越大, 反之亦然, 因此可以把分维数作为故障特征量, 通过系统分维数对系统故障的敏感性来实现故障诊断<sup>[2]</sup>。分形的维数有许多种类, 这里研究最具代表性的关联维数。因为关联维数不仅能很敏感地反映吸引子的不均匀性, 而且更能反映吸引子的动态结构, 并且其算法简单可靠。

对于滤波所得到的时间序列  $x_1, x_2, x_3, \dots$

$x_n (n = 1, 2, \dots)$ , 通过动力系统空间重构得如下相空间<sup>[6]</sup>:

$$B_i = [x_j, x_{j+\tau}, x_{j+2\tau}, \dots, x_{j+(n-1)\tau}], \quad (4)$$

式中:  $B$  为重构的向量空间;  $\tau$  为延迟时间, ( $j = 1, 2, \dots, m$ )

分别求相空间中各向量的距离得:

$$r_{ij} = |B_i - B_j|, \quad (5)$$

在  $\min(r_{ij})$  和  $\max(r_{ij})$  之间取一适当的  $r$ , 计算

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N \theta(r - r_{ij}), \quad (6)$$

式中:  $C(r)$  为距离小于  $r$  的向量对在所有向量对中所占的比例;

$r$  为吸引子自相似结构的无标度区;

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}; N = n - (m - 1)\tau.$$

得:

$$D_2(m, r) = \frac{\ln C(r)}{\ln r}, \quad (7)$$

$D_2(m, r)$  即为关联维数。

$r$  实际代表了混沌吸引子自相似结构的无标度区。如果  $r$  太大, 信号中有的信息会被淹没; 如果  $r$  太小, 噪声信号的干扰会被夸大。所以无标度区的选取对混沌预测的可信度有很大的影响。通常选取  $r$  的办法是<sup>[7]</sup>: 在某个嵌入维数范围内, 改变相空间的大小, 构出  $\ln C(r) - \ln r$  的曲线, 取图中更接近直线的部分对应的  $r$  作为无标度区的选取范围, 然后根据选取的  $r$ , 重新计算关联维数。

各间隙信号的  $\ln C(r) - \ln r$  的曲线如图 6, 图中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别代表正常间隙、轻微间隙、中等程度磨损间隙、严重磨损阶段的  $\ln C(r) - \ln r$  曲线。

比较各图中线性区直线的斜率可以发现: 随着主轴承和主轴颈之间间隙的增加, 线性区斜率变大。该斜率就是各故障间隙信号所对应的关联维数。各间隙信号对应的关联维数如表 1。

表 1 间隙与关联维数的变化关系

Tab. 1 Relation between clearances and correlation dimension

间隙	正常间隙	轻微磨损	中等程度磨损	严重磨损
关联维数	2.770 6	2.935 5	3.183 8	3.372 6

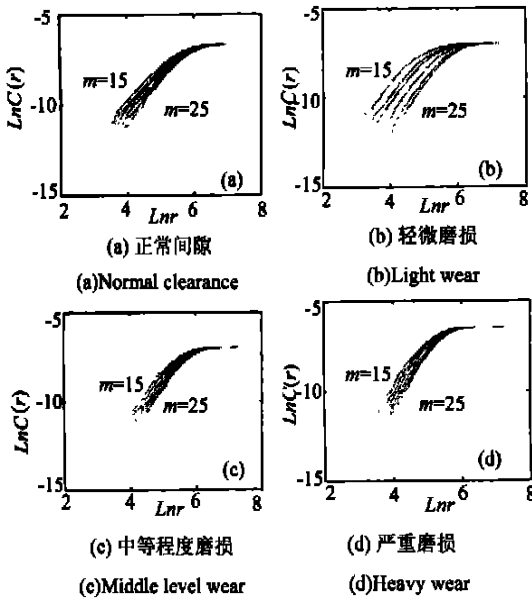


图 6 各间隙信号的  $LnC(r)-Lnr$  的曲线图

Fig. 6  $LnC(r)-Lnr$  curves of all clearance signals

关联维数越大, 意味着信号系统的耗散能越大, 引起这种能量变化的冲击力也就越大, 这和前面力学分析的结果也较吻合, 说明该特征量能很好地识别不同的故障间隙。

#### 4.2.2 Kolmogorov 熵(K 熵)

Kolmogorov 熵是根据统计热力学中熵的概念而定义, 是用来描述动态系统混沌程度的一个度量, 同时它也是系统能量变化的一个重要标志<sup>[8]</sup>, 所以本文也把它作为一种识别故障间隙的特征量进行研究。

对于  $n$  维动力系统, 将其相空间分割成若干个边长为  $r$  的  $n$  维立方体盒子, 对滤波后所得的时间序列  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , 取延迟时间为  $\tau$ , 令  $P(i_0, i_1, \dots, i_d)$  表示起始时间系统轨道在第  $i_0$  个格子中, 时间为  $\tau$  时在第  $i_1$  个格子中, 和时间为  $(d-1)\tau$  时在第  $i_d$  个格子中的联合概率, 记为  $P_i$ , 则 Kolmogorov 熵定义为:

$$K = - \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\tau} \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i, \quad (8)$$

其计算方法如下:

通过系统相空间重构得到如式(4)的相空间

$B_i$ , 根据式(5)计算得  $r_{ij}$ , 根据  $r_{ij}$  的取值不断减小  $r$  的取值, 计算得  $C(m, r_{ij})$  系列, 当  $C(m, r_{ij})$  的值不随  $r_{ij}$  的改变而变化时, 得  $C(m, r)$ 。改变相空间的维数  $m$  大小并分别计算  $C(i, r)$ ,  $i$  在  $m$  的变化范围内取值。根据下式:

$$K(m, r) = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C(m, r)}{C(m+1, r)}, \quad (9)$$

计算的一系列的  $K_i$  值, 当  $K_i$  的取值不随  $m$  的增大而改变时, 得到的即是 Kolmogorov 熵。

将模拟间隙故障实验测取的各间隙的振动信号滤波后进行相空间重构, 计算对应 K 熵, 得结果如表 2。

表 2 间隙与 K 熵的变化关系

Tab. 2 Relation between clearances and K entropy

间隙	正常 间隙	轻微 磨损	中等程 度磨损	严重 磨损
K 熵	1.033 6	1.341 8	1.532 7	1.901 6

由表中数据可以看出, 随着主轴承和主轴颈之间间隙的增加, 对应故障信号的 Kolmogorov 熵也逐渐增加, 基本反映了由于间隙增加而引起冲击增大, 从而使得系统耗散能增加的规律, 同时和关联维数对故障间隙信号能量的反映规律相吻合, 说明该特征量能够刻画故障信号系统吸引子的混沌特征并反映其动态变化。

## 5 结 论

通过对内燃机主轴承所受冲击力的分析, 对由于主轴承间隙产生的振动的振源位置有了一定的认识, 进而进行了故障间隙模拟实验, 并运用混沌与分形方法对所得信号进行分析, 证明了所研究振动信号的混沌性, 找出了主轴承故障间隙与其对应振动信号的关联维数、K 熵两个分形特征量之间的关系。说明了在主轴承产生故障间隙时内燃机对应部位的振动信号具有混沌自相似结构, 可以运用混沌与分形的方法进行研究, 并且可以把混沌与分形的特征量用于类似内燃机主轴承间隙故障的往复式机械故障诊断的模式识别上来。

## 参考文献:

- [ 1 ] 孔凡让, 贾继德. 活塞销故障的诊断研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21( 1 ): 403- 406.  
KONG F R, JIA J D. Research of fault diagnostic of plunger bolt[ J ]. *Journal of Vibration and Shock*, 2002, 21( 1 ): 403- 406. ( in Chinese )
- [ 2 ] 石博强. 机械故障诊断的分形方法- 理论与实践[ M ]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.  
SHI B Q. *Fractals method of diagnostic of mechanical failure theories and practice* [ M ]. Beijing: Publishing Company of Metallurgy Industry, 2001. ( in Chinese )
- [ 3 ] 郑启福. 内燃机动力学[ M ]. 北京: 国防工业出版社, 1991.  
ZHENG Q F. *Internal-combustion engine dynamics* [ M ]. Beijing: Publishing Company of National Defence Industry, 1991. ( in Chinese )
- [ 4 ] 卢侃. 混沌动力学[ M ]. 上海: 上海翻译出版公司, 1990.  
LU K. *Chaos dynamics* [ M ]. Shanghai: Publishing & Translation Company of Shanghai, 1990. ( in Chinese )
- [ 5 ] 陈刚. 小波变换在微型光谱仪光谱信号处理中的应用[ J ]. 光学 精密工程, 2002, 10( 5 ): 552- 558.  
CHEN G. Application of wavelet in the spectrum signal processing of micro spectrometer [ J ]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10( 5 ): 552- 558. ( in Chinese )
- [ 6 ] 杨绍清. 两种实用的相空间重构方法[ J ]. 物理学报, 2002, 15( 11 ): 2454- 2457.  
YANG SH Q. Two practice methods of phase space reconstruction [ J ]. *Acta Phastica Sinica*, 2002, 15( 11 ): 2454- 2457. ( in Chinese )
- [ 7 ] 孙海云. 相空间重构延迟时间的确定[ J ]. 山东工业大学学报, 2000, 30( 2 ): 107- 110.  
SUN H Y. Determination for the delay time of phase space reconstruction [ J ]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2000, 30( 2 ): 107- 110. ( in Chinese )
- [ 8 ] 黄润生. 混沌及其应用[ M ]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.  
HUANG R SH. *Chaos and its application* [ M ]. Wuhan: Publishing Company of Wuhan University, 2000. ( in Chinese )
- [ 9 ] 龙运佳. 混沌振动研究方法与实践[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
LONG Y J. *Practice and research method of chaos vibration* [ M ]. Beijing: Publishing Company of Qinghua University, 1997. ( in Chinese )
- [ 10 ] 石文孝. 混沌序列的神经网络实现[ J ]. 光学 精密工程, 2000, 8( 3 ): 231- 233.  
SHI W X. Chaos generation based on neural network[ J ]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8( 3 ): 231- 233. ( in Chinese )

作者简介: 赵吉文( 1973- ), 男, 安徽人, 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系博士研究生, 研究方向为智能信息处理;

孔凡让( 1951- ), 男, 安徽人, 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 教授, 博士生导师, 研究方向为测控技术、创新工程、故障诊断等。