

旋转机械无线监测中的多普勒效应*

王楠^{1,2}, 孟庆丰²

(1. 陕西理工大学机械工程学院 汉中, 723001) (2. 西安交通大学机械工程学院 西安, 710049)

摘要 由于应用无线通信技术对旋转机械进行状态监测时,无线设备安装在转轴上随轴高速旋转,无线设备之间的相对位置发生变化,因此会产生多普勒效应,影响无线通信。针对这一问题,首先,提出了两种无线设备安装方式;然后,建立了旋转运动中无线设备的多普勒频移理论模型,并分析了影响无线通信的因素;最后,对水润滑轴承水膜压力进行无线监测试验,引入误码率和丢包率研究了其与轴转速之间的关系,并对多普勒频移理论模型进行验证。理论与试验分析结果表明:多普勒频移与无线设备摆动圆直径、轴转速以及电磁波入射角密切相关,尤以转速影响为甚;在 433 MHz 通信频率下,无线监测方法不能很好地用于转速接近或超过 10kr/min 的旋转机械;转速对丢包率的影响大于误码率,丢包率为误码率的 2~3 倍。

关键词 旋转机械; 状态监测; 无线设备; 多普勒效应

中图分类号 TH39

引言

传统旋转机械状态监测方法采用的有线传输方式存在以下问题:a. 需要布置大量线缆、开关等设备,不易操作;b. 若工业现场环境恶劣,则线缆和开关等存在安全隐患;c. 有些工业环境禁止/限制使用线缆或难以使用线缆,某些高速旋转设备无法通过线缆进行数据传输;d. 使用集流环作为信息传输媒介,在集流环定子与转子之间的高速摩擦将产生较大的发热和噪声,易导致测量信号漂移、测量参数出现误差;e. 集流环电刷触头的磨损及由此引发其接触电阻变化在信号传输过程中造成信息误码,影响测量精度;f. 模拟信号在线缆中远距离传输时会产生衰减且易受干扰。为了解决有线传输方式在旋转机械状态监测应用中存在的问题,采用近年来发展较为成熟的无线通信技术是最佳方案。无线传输方式具有无需复杂布线、成本低和面向具体应用等优点,且应用数字信号进行传输可避免模拟信号在线缆中远距离传输时的衰减,提高了精度,使无线通信在机械设备状态监测中的应用优势日益凸显。

应用无线通信技术对旋转机械进行监测时,无线采集发射设备一般安装在转轴上随轴高速旋转,无线接收设备设置在转子系统外部。因此,整个无

线传输过程是动态的,无线设备之间的相对位置会发生变化,导致信号无线发射频率与接收频率不一致,产生多普勒效应^[1],影响无线通信质量。由多普勒效应引起的频率偏差,即多普勒频移是通信方面重要的研究课题。目前,对移动无线传感器网络(mobile wireless sensor networks,简称 MWSN)中的多普勒效应研究较多^[1-6],大部分研究是为了适应快速变化的网络拓扑结构而对路由协议优化进行^[2-3],还有目标追踪^[4]、节点定位^[5]或时间同步机制^[6]等研究,但关于节点高速运动对信号无线传输的影响研究较少。

笔者对旋转机械无线监测中的多普勒效应进行研究,在分析两种无线采集发射设备安装方式的基础上,建立了旋转运动中无线设备的多普勒频移理论模型,通过仿真分析了影响无线通信的因素。通过对水润滑轴承水膜压力无线监测试验中的数据传输过程与结果进行分析,研究了误码率、丢包率与轴转速之间的关系,对多普勒频移理论模型进行验证,并以此对无线设备性能进行评估。最后给出了改善多普勒效应影响的相关措施。

1 问题描述

旋转机械的无线监测方法中,无线采集发射设

* 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(14JK1142);国家自然科学基金资助项目(51275380)
收稿日期:2014-11-19;修回日期:2015-06-16

备安装有两种方式:a. 安装在转轴上,如图1(a)所示;b. 安装在转轴末端(与轴同心安装),如图1(b)所示。无线接收装置安装在旋转机械转子系统外部,位置固定。这两种安装方式均需要注意机械设备的对中及平衡问题。在理想情况下,轴旋转时采用图1(a)的安装方式,无线采集发射设备的运动轨迹为以轴径为直径的圆,因此与无线接收设备之间是有相对位置偏移的。图1(b)的安装方式看似无线设备之间不存在相对位置变化,但实际上由于设备制造、安装、调试以及人为误差的原因,不可能做到完全对中与平衡;无线采集发射设备会以一个微小直径的圆轨迹进行摆动,因此与无线接收设备之间依然有相对位置偏移。由于无线设备之间存在这种相对位置变化而产生了多普勒效应,从而导致信号无线发送频率与接收频率不一致,影响无线设备通信中的数据与命令传输。

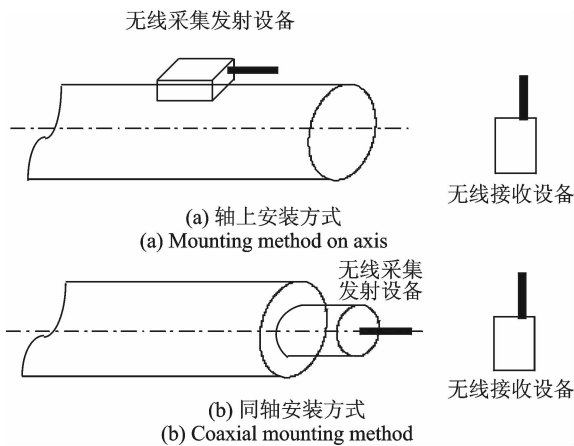


图1 无线设备安装示意图

Fig. 1 Installation sketch map of wireless equipments

2 多普勒频移理论模型

2.1 模型建立

笔者研究的多普勒效应是指在无线通信中,无线设备之间存在相对运动,无线接收设备接收信息的频率与发射设备发射信息的频率不同的现象,收发频率之差称为多普勒频移。多普勒效应可以在理论上解释无线设备在高速旋转过程中的数据误码、丢包现象以及其影响因素。

由图1可知,在两种无线设备安装方式下,无线设备之间会产生相对位置变化,无线采集发射设备以圆轨迹运动。建立的无线设备旋转运动多普勒频移理论模型如图2所示。图2中, D 为无线设备摆动圆直径(m); v 为轴转速(单位 r/min,顺时针旋

转); x, y 为无线采集发射设备在不同时刻 T_1, T_2 的两个位置; θ_1, θ_2 为对应于两个时刻 T_1, T_2 的电磁波入射角; ΔL 为电磁波路径差。无线采集发射设备A随轴以速度 v 顺时针旋转, T_2 时刻在 y 位置, T_1 时刻在 x 位置,在时间间隔 Δt ($\Delta t = T_1 - T_2$,单位 min)内无线采集发射设备向无线接收设备B发送数据。当无线设备之间有一定距离且运动间隔距离 d 较小时,可以认为电磁波入射角 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$,根据式(1)求出电磁波路径差 ΔL 。

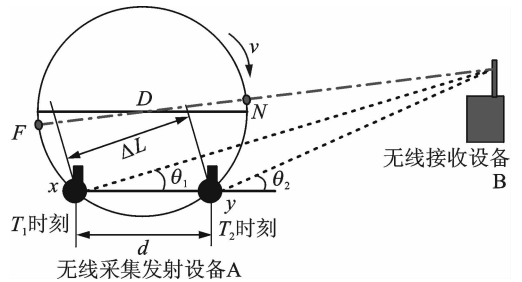


图2 多普勒频移理论模型

Fig. 2 Theory model of doppler frequency shift

$$\Delta L = d \cos \theta = D \sin(10\ 800 v \Delta t) \cos \theta \quad (1)$$

由路径差造成的接收信号的相位变化值为

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi \Delta L}{\lambda} = \frac{2\pi D \sin(10\ 800 v \Delta t) \cos \theta}{\lambda} \quad (2)$$

其中: λ 为电磁波波长。

电磁波波长 λ 为

$$\lambda = c / f \quad (3)$$

其中: c 为电磁波速度, 3×10^8 m/s; f 为电磁波频率(即无线设备通信频率,433 MHz)。

由式(2)求得多普勒频移 f_d 为

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = \frac{D \sin(10\ 800 v \Delta t) / \Delta t}{\lambda} \cos \theta =$$

$$\frac{v_d}{\lambda} \cos \theta = f_{\max} \cos \theta \quad (4)$$

其中: f_{\max} 为最大多普勒频移; v_d 为无线设备相对转速。

2.2 影响因素分析

由式(4)可知,多普勒频移 f_d 由无线设备摆动圆直径 D 、轴转速 v 以及电磁波入射角 θ 所确定。理想情况下, D 不变, θ 变化微小($\cos \theta \approx 1$), f_d 主要与轴转速 v 有关,转速越大,频移越大,相应的无线设备收发信息频率差距增大。轴转速 v 由式(5)确定,对式(5)进行变换得到转速 v 的变化范围如式(6)所示。

$$0 \leq \sin(10\ 800 v \Delta t) \leq 1 \quad (5)$$

$$0 \leq v \leq ((\pi/2) + 2n\pi) / (10\ 800 \Delta t) \quad (n = 0, 1, \dots) \quad (6)$$

由式(6)可知,轴转速 v 是有上限的。在旋转机械设备设计制造时或者在工程应用中,均有额定转速限制,因此轴转速变化有一定范围。由式(3)可得 $\lambda \approx 0.69 \text{ m}$,不失一般性,假定时间间隔 Δt 变化范围为 $0.0001 \sim 0.5 \text{ min}$,摆动圆直径 D 的变化范围为 $(0.1 \sim 200) \times 10^{-3} \text{ m}$ 。摆动圆直径 $D > 20 \times 10^{-3} \text{ m}$ 时,对应图 1(a)无线设备安装方式,摆动圆直径近似为轴径,电磁波入射角 $\cos\theta = 0.98$ 。基于以上参数,对轴系运转一个周期内(即轴转一圈, $v\Delta t \leq 1$) f_d 与 v 之间的变化关系进行仿真,如图 3 所示。

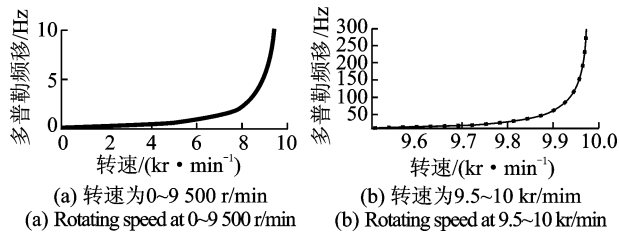


图3 多普勒频移随转速变化关系

Fig. 3 Relationships between Doppler frequency shift and rotating speed

由图 3 看出,多普勒频移 f_d 随着轴转速 v 的增大而增大,转速越高,多普勒频移变化越大。由图 3(a)可知,轴转速在 $0 \sim 8 \text{ kr/min}$ 时,多普勒频移变化范围为 $0 \sim 2 \text{ Hz}$;轴转速在 $8000 \sim 9500 \text{ r/min}$ 时,多普勒频移变化范围为 $3 \sim 10 \text{ Hz}$ 。由图 3(b)可知,当轴转速超过 9.5 kr/min ,特别是在 $9.5 \sim 10 \text{ kr/min}$ 之间,多普勒频移快速增大,超过 50 Hz ,最高可达 300 Hz 。可见,多普勒频移受转速的影响主要表现在轴高速运转情况,当轴转速 $v \leq 8 \text{ kr/min}$ 时,轴转速对多普勒频移的影响较小。另外,图 2 中的点划线与摆动圆交于两点,表示无线采集发射设备距离无线接收设备的近点 N 与远点 F 。如果无线采集发射设备朝着电磁波入射方向运动,即离无线接收设备距离越近(从 F 点开始,沿着上半圆周运动到 N 点)。由式(4)可知, f_d 逐渐减小,接收频率上升;反之,如果无线采集发射设备背离电磁波入射方向运动,即离无线接收设备距离越远(从 N 点开始,沿着下半圆周运动到 F 点),则 f_d 逐渐增大,接收频率下降。这说明无线设备之间的相对位置与运动方向也影响无线通信质量,而这正是多普勒效应的内涵所在。

需注意的是,实际应用中无线设备摆动圆直径对多普勒频移的影响主要与无线设备安装方式有关。由式(4)可知,其他参数不变时,多普勒频移与摆动圆直径成正比关系。根据仿真参数的假设,如

果摆动圆直径大于 $20 \times 10^{-3} \text{ m}$,无线设备采用的应是图 1(a)的安装方式(此时摆动圆直径近似为轴径),但由于多普勒频移与摆动圆直径成正比,轴径越大,影响越大。因此,在试验条件允许的情况下,应尽量采用图 1(b)的无线设备安装方式,减小摆动圆直径对多普勒频移带来的影响。

3 试验及结果分析

通过在水润滑轴承试验台^[7-8]上对水膜压力的无线采集与传输试验,验证旋转机械无线监测中的多普勒频移理论模型以及对无线设备性能进行评估。评估标准采用误码率(bit error rate,简称 BER)和丢包率(packet loss rate,简称 PLR)。误码率和丢包率是衡量数据在规定时间内传输精确性和准确性的指标,表示数据通信质量。水润滑轴承试验台如图 4 所示,由图可知,无线采集发射设备安装采用图 1(b)方式。试验对象为八纵向沟槽平面橡胶轴承,应用无线传感器网络(wireless sensor networks,简称 WSNs)点对点数据传输技术对橡胶轴承径向截面全周连续水膜压力进行监测。水膜压力无线监测试验之前,已经对整个轴系进行对中和平衡调整,但试验过程中还是发现无线采集发射设备存在小幅圆周摆动,即无线设备之间有相对运动,存在多普勒效应。试验是在实验室内进行,没有电磁干扰。试验参数设置如下:无线设备通信频率为 433 MHz ;轴转速 v 为 $0 \sim 1 \text{ kr/min}$;四通道同时采样;采样频率为 1024 Hz ;采样点数为 256;每个通道每次发送 4 个数据(1 个数据包),每个数据 2 个字节,共 8 个字节。因此,无线设备每个通道在一个试验周期内发送的总字节数是固定的,即 512 个字节,发送的总数据包为 64。误码率和丢包率的数据统计是针对两次试验周期进行的,即对相关数据取平均值。无线设备之间的距离为 3 m ,无线接收设备距离地面 0.5 m ,轴径为 100 mm 。无线设备的摆

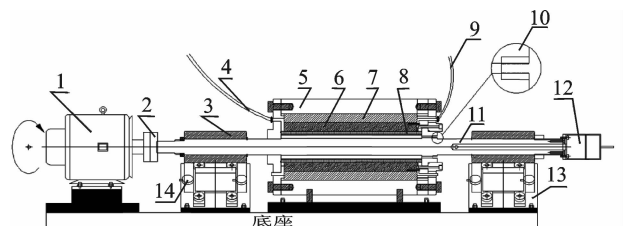


图4 水润滑轴承试验台

Fig. 4 Test rig of water-lubricated bearing

动圆直径 D 随载荷的增大而减小,经过测试其变化范围为 $(0.04 \sim 0.5) \times 10^{-3}$ m。当无线采集发射设备分别运动到摆动圆顶部与底部位置时,电磁波入射角 θ 将达到两个极限值,即当 $D = 0.5 \times 10^{-3}$ m 时,电磁波入射角将有两个变化范围, θ 分别为 $0 \sim 3.33 \times 10^{-5}$ ($^\circ$), $0 \sim 2.22 \times 10^{-5}$ ($^\circ$)。可见, θ 变化非常微小, $\cos\theta \approx 1$ 。

3.1 误码率与轴转速关系

误码率定义为无线传输中无线设备接收到的错误比特数与发送总比特数的百分比,数学表达式为

$$\text{BER} = \frac{B_e}{B_s} \times 100\% \quad (7)$$

其中: B_e 为错误比特数; B_s 为无线设备发送总比特数。

试验中,在每个转速 v 下都会对每个通道接收到的数据进行统计,误码率统计如表1所示,表中误码率的计算取4个通道的平均值。图5为误码率随转速变化关系图。由表1与图5可以看出,转速对无线设备的误码率是有影响的,轴转速从240 r/min开始,每个通道接收到的错误字节数随着转速的增加而逐渐增大,只是各个通道的变化幅度稍有不同。相应的整个无线设备的误码率也随转速的增加而增大,但误码率最大不超过1.37%,在可接受范围对试验结果的影响不大。

表1 不同转速下的误码率

Tab.1 Bit error rate under different shaft speeds

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	各通道接收的错误字节数/Bytes				误码率/% (均值)
	一通道	二通道	三通道	四通道	
120	0	0	0	0	0
240	0	0	1	0	0.05
480	2	1	3	1	0.34
720	3	4	5	4	0.78
960	7	6	8	7	1.37

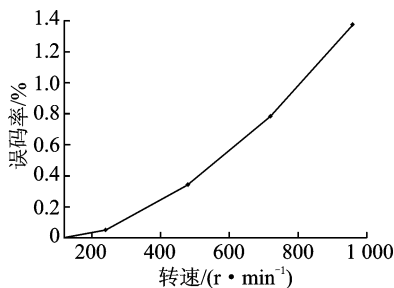


图5 误码率随转速变化关系

Fig. 5 Relationships between BER and rotating speed

3.2 丢包率与轴转速关系

丢包率定义为无线传输中丢失的数据包数量与

无线设备发送的总数据包的比率,数学表达式为

$$\text{PLR} = \frac{P_e}{P_s} \times 100\% \quad (8)$$

其中: P_e 为丢失的数据包数; P_s 为无线设备发送的总数据包数。

丢包率统计如表2所示。丢包率随转速 v 变化曲线如图6所示。可以看出,轴转速对丢包率也是有影响的,轴转速从480 r/min开始,每个通道丢失的数据包数基本随着转速的增大而增加,总的丢包率则是一直随转速的增大而增加,最大丢包率不超过2.34%。将表2与表1比较看出,转速对丢包率的影响大于误码率(丢包率是误码率的2~3倍),即随着轴的转速增大,数据丢失的几率比接收到错误数据的几率大。

表2 不同转速下的丢包率

Tab.2 Packet loss rate under different shaft speeds

转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	各通道丢失的数据包数/Packets				丢包率/% (均值)
	一通道	二通道	三通道	四通道	
0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0
480	1	1	0	1	1.17
720	1	1	1	2	1.95
960	1	2	1	2	2.34

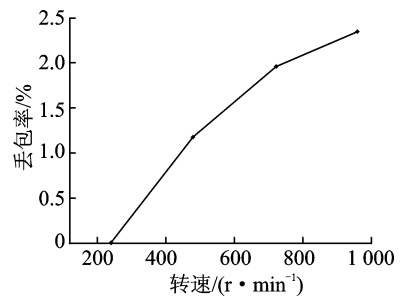


图6 丢包率随转速变化关系

Fig. 6 Relationships between PLR and rotating speed

由多普勒频移理论模型的分析可知,转速对与丢包率和误码率有显著影响。由于无线设备之间存在相对运动产生了多普勒效应,而多普勒效应会导致无线设备间收发数据的频率不一致,即存在多普勒频移,影响无线数据通信,因此才出现了数据的误码以及丢包的现象。由误码率、丢包率与轴转速之间关系的试验结果可以看出,多普勒频移理论模型得到了较好的验证。轴转速相对较高时,由于多普勒效应的存在,数据的无线传输将受到一定影响,会出现数据的错传及误传。但在本次水润滑橡胶轴承水膜压力试验中,转轴速最高不超过1kr/min,由图3(a)及理论分析可知,轴转速 $\leq 1\text{kr}/\text{min}$ 时,多普勒频移不到1 Hz。将试验参数代入式(4)可得,试

验中的最大多普勒频移 $f_{\max} \approx 0.72\text{Hz}$ 。因此,水膜压力测试试验中,多普勒效应对无线通信影响较小。从试验结果看,数据无线传输的误码率和丢包率较低,最大误码率与丢包率分别为 1.37% 与 2.34%,此结果对水膜压力数据的采集与分析影响不大,数据的传输误差可以接受。另外,经过多次试验发现,水膜压力数据的重复性较好。由于水膜压力监测试验是在实验室进行的,没有电磁干扰,因此无线设备运行情况及无线设备性能良好。

3.3 改善多普勒效应影响的措施

由多普勒频移理论模型与试验结果可知,轴转速是影响无线通信质量的主要因素,因此在实际监测中,在满足测试条件的前提下,可通过控制轴转速来降低多普勒效应带来的影响。此外,无线设备之间的相对位置与运动方向也是影响无线通信质量的因素,分别与无线设备摆动圆直径与电磁波入射角相关,这两个因素是可以人为控制的。无线设备的摆动圆与安装方式、轴系对中与平衡相关,电磁波的人射角与无线设备相对位置相关,因此在试验前通过选择合适的无线设备安装方式以及对试验台与无线设备进行调试,尽量减小这两个因素在试验中对无线通信质量的影响。最后,应进一步研究多普勒频移校正/补偿算法和无线传输中的时间同步问题,从数据处理方面减小误差,提高数据传输精度。

4 结 论

1) 多普勒频移与无线设备摆动圆直径、轴转速以及电磁波的入射角有关,轴转速是主要影响因素。转速越大,频移越大,相应的无线设备收发信息频率差距增大,无线传输中的误码率和丢包率也增大。

2) 多普勒频移受轴转速的影响显著地发生在旋转机械高速运行时。当转轴速度超过 8 kr/min,多普勒频移大于 2 Hz,随着速度的继续增大迅速上升,最高可达 300 Hz,此时无线通信将受到很大影响。在 433 MHz 通信频率下,无线监测方法不能很好地用于转速接近或超过 10 kr/min 的旋转机械。

3) 转速对丢包率的影响大于误码率(丢包率是误码率的 2~3 倍),即随着轴的转速增大,数据丢失的几率比接收到错误数据的几率大。

参 考 文 献

[1] 张菁,王熙君,李怡然,等. 多普勒效应在工程技术中

的应用[J]. 物理与工程,2014(S2): 13-15.

Zhang Jing, Wang Xijun, Li Yiran, et al. Doppler effect and its engineering applications[J]. Physics and Engineering, 2014(S2): 13-15. (in Chinese)

[2] 胡夏芸. 高速转动无线传感器网络通信测试系统设计与实现[D]. 南京:南京理工大学,2014.

[3] 廖惜春,丘敏,麦汉荣. 无线传感网络中多普勒效应的研究与仿真[J]. 传感技术学报,2007,20(12): 2674-2678.

Liao Xichun, Qiu Min, Mai Hanrong. The research and simulation of doppler effect in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(12): 2674-2678. (in Chinese)

[4] An Y K, Yoo S M, An C, et al. Doppler effect on target tracking in wireless sensor networks[J]. Computer Communications, 2013, 36(7): 834-848.

[5] Dai K S, Huang Z H. Bridge field testing by using wireless and laser doppler sensing technologies Case studies [C] // 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Shanghai, China: Taylor and Francis-Balkema, 2014: 591-596.

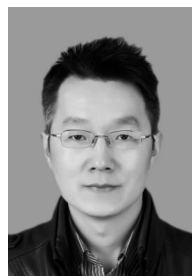
[6] 王建平,孔德川,陈伟. 一种基于多普勒效应的水下无线传感器网络时间同步机制[J]. 传感技术学报,2014,27(5): 680-686.

Wang Jianping, Kong Dechuan, Chen Wei. Design of a time synchronization mechanism based on doppler effect for underwater wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(5): 680-686. (in Chinese)

[7] 王楠,孟庆丰,耿涛. 水润滑轴承水膜压力无线测试系统研究[J]. 振动、测试与诊断,2014,34(5): 812-817.

Wang Nan, Meng Qingfeng, Geng Tao. Research on wireless measurement system for film pressure of water-lubricated bearing[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 812-817. (in Chinese)

[8] Wang N, Meng Q F, Wang P P, et al. Experimental research on film pressure distribution of water-lubricated rubber bearing with multiaxial grooves[J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, 2013, 135(8): 1-6.



第一作者简介:王楠,男,1983年12月生,博士、讲师。主要研究方向为无线传感器网络技术及应用、机械设备监测及诊断。曾发表《水润滑轴承水膜压力无线测试系统研究》(《振动、测试与诊断》2014年第34卷第5期)等论文。
E-mail: heroyou@126.com.