

# 机械摩擦状态监测技术研究现状

李增松, 李彬, 阴妍, 鲍久圣

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 综述了机械摩擦过程中摩擦力、摩擦热和摩擦振动噪声等摩擦状态特征量的监测方法与研究现状。阐述了摩擦力的产生机理及影响因素, 重点表述了摩擦力的监测方法——直接法和间接法; 总结了研究摩擦热的解析法和有限元法等理论方法, 着重表述了摩擦过程中摩擦温度的监测技术——直接测温法和间接测温法; 简述了摩擦振动的机理, 重点归纳了摩擦振动特征量的提取方法——时域法、频域法和时频法等; 简介了摩擦噪声机理及特性, 结合摩擦振动表述了摩擦噪声监测方法; 指出了多摩擦特征监测和综合监测为机械摩擦过程状态监测的未来发展趋势。

**关键词:** 状态监测; 摩擦力; 摩擦热; 摩擦振动; 摩擦噪声

中图分类号: TH117.1; TG806

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)02-0134-08

## Research Status of Mechanical Frictional State Monitoring

LI Zeng-song, LI Bin, YIN Yan, BAO Jiu-sheng

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**ABSTRACT:** The monitoring methods and research status of friction, frictional heat and frictional vibration and noise in mechanical frictional process were discussed. The mechanism and influencing factors of friction were explained and the presentation focused on the frictional monitoring methods: direct and indirect methods. The theoretical study of analytical and finite element methods was summarized, and the monitoring methods in frictional temperature were emphatically expressed: direct and indirect thermometry. The mechanism of frictional vibration was stated, and the extraction of frictional vibration characteristics was emphatically summed up: time domain, frequency domain method and the time-frequency method. The mechanism of frictional noise was introduced, and the monitoring method of the frictional noise with vibration was described. The future trends of multi-feature and integrated monitoring in mechanical frictional process were pointed out.

**KEY WORDS:** condition monitoring; friction; frictional heat; frictional vibration; frictional noise

机械装备通常利用摩擦副产生的摩擦力来传递 动力或进行制动, 摩擦副的摩擦性能直接影响这些设

收稿日期: 2013-01-13; 修订日期: 2014-02-14

Received: 2014-01-13; Revised: 2014-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205393); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013QNB13); 国家大学生创新训练计划项目(201210290023)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51205393); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2013QNB13); the National Innovative Training Project for Undergraduates (201210290023)

作者简介: 李增松(1989—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要研究方向为机械摩擦状态监测技术。

Biography: LI Zeng-song(1989—), Male, from Cangzhou, Hebei, Master graduate student, Research focus: state monitoring of mechanical friction.

通讯作者: 阴妍(1979—), 女, 江苏徐州人, 讲师, 主要研究方向为机械状态监测与故障诊断。

Corresponding author: YIN Yan(1979—), Female, from Xuzhou, Jiangsu, Lecturer, Research focus: mechanical monitoring and fault diagnosis.

备的运转状况。因此,对机械摩擦过程进行状态监测已成为监测机械设备运行状态及故障诊断的一种重要方式。机械摩擦过程的摩擦状态参数主要包括:摩擦力、摩擦热、摩擦振动、摩擦噪声等。这些摩擦状态参数主要受摩擦副材料特性和摩擦工况参数(速度、压力、温度等)的影响,它们之间呈现复杂的非线性关系。在实际应用中,由于摩擦过程的复杂性和特征信息的多样性,使得如何正确选定及提取信息源(即表征参数)成为实施摩擦状态监测的首要问题。结合摩擦机理及现有的技术条件不难得出,目前机械摩擦状态监测主要着眼于摩擦力(摩擦因数)、摩擦热(温升)以及摩擦振动与噪声等三大摩擦特征。文中综述了对机械摩擦过程摩擦力、摩擦热和摩擦振动及噪声等摩擦状态特征量的监测方法与研究现状。

## 1 摩擦力监测技术研究现状

一般认为,2个相互接触的物体只要有相对运动或相对运动的趋势,在接触面之间就会产生切向的运动阻力即摩擦力,且摩擦力可用来表示摩擦的大小。摩擦力通常被用来传递动力或用于制动,例如:机械式离合器利用离合片之间的摩擦力来传递动力,盘式制动器利用刹车片与制动盘之间的摩擦力进行制动。

### 1.1 摩擦力构成及影响因素

现代摩擦理论指出,摩擦力主要来源于表面微凸体变形阻力、犁沟阻力及粘着摩擦阻力,它不仅与摩擦副的材料有关,而且还受其他因素的影响,即摩擦系数不是材料的固有特性,而是材料和条件的综合特性。

近年来,随着试验和研究的深入,工程界已逐步认识了影响摩擦力的主要因素<sup>[1-2]</sup>,并将某些带规律性的影响因素应用在摩擦材料的配对、零件的寿命设计与表面工程以及摩擦副的工况环境选择中等工程实践中。目前,研究较多的影响因素主要包括材料特性、温度、正压力及滑动速度等。

### 1.2 摩擦力监测方法

为进一步研究摩擦副之间的相互力学作用,深入了解摩擦过程及摩擦状态,对摩擦力进行监测显得尤为重要。目前,摩擦力的监测方法可分为直接法和间接法。两者的主要区别在于获取摩擦力信号的方式不同,直接法是一种直接获取摩擦力(力矩)信号的方

法,而间接法为先检测出与摩擦力有关的物理参量,进而通过其与摩擦力的关系换算出摩擦力(力矩)的大小。两者共同之处在于,获得的摩擦力(力矩)信号均需经过监测系统的数据采集和计算处理部分,进而可在工控机(上位机)的界面中观测到摩擦力动态特性曲线。根据相关文献可知,间接法主要包括功率法、求差法、变形法和平衡方程法等。

#### 1.2.1 直接法

直接法的基本原理<sup>[3-4]</sup>:摩擦副采用外部牵引驱动,外部驱动元件与摩擦副的运动部件之间通过力传感器连接,并加装位移传感器检测运动部件的位移。当运动部件保持匀速直线运动时,采集力传感器的输出,便可得到摩擦力信号。此种方法较适用于直线型摩擦副,也是一种常被用于检测气缸摩擦力特性的一种方法。

#### 1.2.2 间接法

1) 功率法。功率法主要应用于振动系统中摩擦力的监测,其基本原理为<sup>[5-7]</sup>:当振动台空振,即振动系统中无目标摩擦力(称要监测的摩擦力为目标摩擦力)时,振动台自重及传动系统的摩擦阻力构成振动负载;当振动台承载振动,即振动系统中存在目标摩擦力时,除上述载荷外,又增加了目标摩擦力这个负载。振动系统消耗功率的变化间接反映振动载荷的变化,因此,监测空振和承载振动时的功率,并确定功率与摩擦力之间的关系,可达到监测目标摩擦力的目的,即为功率法。目前,此种方法在连铸工程的结晶器与铸坯间摩擦力在线监测系统中得到广泛应用,且其监测系统已日趋成熟。

2) 求差法。求差法的基本原理与功率法类似,即分别在无目标摩擦力和存在目标摩擦力的工况条件下,检测出提供给系统动力的大小,二者的差值即为目标摩擦力的大小<sup>[8]</sup>。由于在采用液压方式供能的机械系统中动力检测较为简单,此方法多见于此类系统中。利用功率法和求差法实现摩擦力在线监测的前提条件为:需在监测系统的计算处理部分预先建立无目标摩擦力时机械系统运转的功率或压力数据库,从而可以经过对比计算实现目标摩擦力的在线监测。

3) 变形法。变形法的基本思想为:在构成摩擦副的其中一个部件上安装弹性元件或应变片,通过摩擦副中的一个部件将摩擦力传递给弹性元件或应变片,从而将摩擦力信号转化为弹性元件的弹性形变或应变片的应变,这样便可以通过检测变形量或应变

得到摩擦力信号。例如,徐驰<sup>[9]</sup>将应变片型传感器安装在与抛光头相连的主轴上,将摩擦转矩信号传递到传感器,从而可以在线监测抛光头与晶圆之间的摩擦力,如图 1 所示。

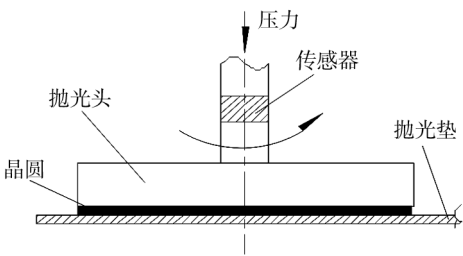


图 1 抛光头与晶圆间摩擦力的在线监测示意  
Fig. 1 Online monitoring of friction between polish and wafer

4) 平衡方程法。平衡方程法即为通过对摩擦副中的运动部件进行受力分析,如图 2 所示,再利用关于摩擦力的力学平衡方程解算出摩擦力<sup>[10]</sup>。一般,此种方法需要 1 个位移传感器和 2 个测力传感器。测力传感器需测出运动部件在运动方向上所受外力  $F_1$  和  $F_2$ ,然后用位移传感器检测部件位移,从而通过监测系统计算处理后得到运动部件的加速度  $a$ ,则可列出形如式(1)的平衡方程,进而通过监测系统解算出摩擦力。有关资料显示,此种方法多用于气缸中活塞杆与气缸内壁摩擦力的在线监测系统中。

$$F_2 + ma + f = F_1 \tag{1}$$

式中: $m$  为运动部件的质量。

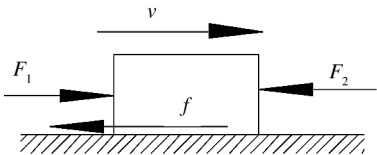


图 2 平衡方程法的受力分析示意  
Fig. 2 Force analysis of equilibrium equation

2 摩擦热监测技术研究现状

摩擦副在运转工作过程中,约有 95% 的摩擦能转化为热能。当大量的热能来不及散发而在摩擦副中积累时,必然引起其温度的升高,即产生摩擦热。现代摩擦理论指出,虽然在宏观上摩擦热仅引起摩擦副的温升,但在微观上这种温升使接触区的材料性能发生变化,从而影响摩擦状态。研究表明,在各种影响摩擦状态的因素中,尤以摩擦热及温升对摩擦状态及性能的影响最为复杂。因此,对摩擦热的监测显得

尤为关键。

2.1 理论研究方法

近年来,为了直观详实地了解摩擦过程中的摩擦热现象,许多学者开展了有关摩擦热理论的研究,为实现摩擦热的监测奠定了理论基础。摩擦热理论研究方法可分为解析法和有限元法<sup>[11-13]</sup>。解析法的贡献在于运用热力学理论建立温度场的计算模型和传热方程等,揭示出摩擦系统中的热传规律,从而为监测系统的搭建提供理论指导。以温度场计算模型为例,它有助于技术人员在实际监测系统中得出检测点与考察点间的温度关系<sup>[14]</sup>。有限元法更为直观地揭示出摩擦热温度场的数值模型,如图 3 所示的某时刻汽车制动盘温度场云图,其深色区域代表制动盘温度急剧升高,其他区域温升较小。有限元法的突出特点在于可以仿真工况条件(如滑动速度、正压力及摩擦副结构)的变化对温度场的影响<sup>[15-16]</sup>。另外,有些学者也利用有限元法对摩擦热应力耦合问题进行了研究<sup>[17]</sup>,较好地解决了热-应力耦合的仿真问题。比较精确的热-应力耦合仿真分析方法是按照热-结构耦合场的求解方法,同时计算热传导和力平衡 2 类不同场的方程<sup>[11]</sup>。



图 3 某时刻制动盘温度场分布  
Fig. 3 Temperature distribution of disk at a specific time point

2.2 监测方法

摩擦热的监测主要包括摩擦温升和摩擦热应力等两大部分。目前,对摩擦热应力的监测还处于理论研究及仿真阶段,涉及到摩擦热应力的监测系统还比较少。摩擦过程的温升可以通过接触电阻、电容法及热电偶等来直接测量,但是由于测试的是 2 个相互贴合接触的表面,测试仪器的布置存在一定困难,以致无法精确测量摩擦表面的动态温度<sup>[11]</sup>。从微观角度来看,对于属于微凸体接触型的摩擦副,即使很小的区域内温差也很大,且闪点温度维持时间较短,这也在一定程度上增加了测量工作难度。

根据相关文献,对摩擦温升的监测主要可分为直



接法和间接法等 2 种方法。两者的主要区别在于测温传感器是否和摩擦副元件相接触,直接法一般为接触式测温,即将测温元件与摩擦副元件相接触,而间接法则为非接触式测温,即测温元件与摩擦副元件不直接接触。

直接法又可分为预置法和预埋法。预置法即在摩擦副元件表面放置测温元件,从而达到拾取温度信号的目的。此种方法常见于摩擦试验台架或摩擦试验机,如图 4 所示的某型号摩擦试验机,将热电偶预置于摩擦盘表面拾取摩擦盘表面的平均温度,其测试位置明确,不会干扰温度场。预埋法即在摩擦副元件中内置测温元件,从而可以捕捉摩擦升温信号。此种方法可以测量出体积温度,但通常测点布置繁琐,且温度梯度较大时误差较大,故一般可用于传热性能较稳定材料构成的摩擦副测温系统中。

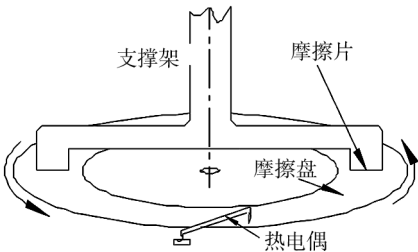


图 4 预置测温法示意

Fig. 4 Preset thermometry

间接法的基本思想为通过检测与摩擦温度相关的温度来间接推算出摩擦副的温度,这种方法的实现要借助于传热方程及热传导的相关理论。间接法主要用于测温空间受结构或材料限制的场合,以及测温元件无法直接安装在摩擦副上的工况条件。例如,徐德凯<sup>[14]</sup>利用温度传感器,检测摩擦系统中某封闭腔环境温度,间接推算出摩擦片的温度,进而得到摩擦过程中摩擦副的温升。

### 3 摩擦振动监测技术研究现状

#### 3.1 机理

现代摩擦理论认为摩擦过程实质上是结点黏着与滑脱的过程,在这静动交换的过程中,由于静摩擦大于动摩擦,摩擦副的运动有可能呈现间歇运动而不是平稳运动,即发生摩擦振动<sup>[1]</sup>。摩擦振动不仅产生噪音,而且还会造成严重磨损并使工作质量降低。例如在机床行业中,一些机床的工作台、溜板箱的运动

过程中出现的时快时慢的现象(称为爬行),就是摩擦振动。它虽然难于感觉到,但会使加工表面的质量变坏。一些制动器在制动过程中发出尖叫声也是摩擦振动的例子。摩擦振动信号包含了丰富的反映摩擦副摩擦状态的信息<sup>[18]</sup>,尤其是摩擦磨损信息。因此,对摩擦振动信号进行采集和分析,有利于实现摩擦过程状态监测<sup>[19—23]</sup>。

#### 3.2 监测方法

摩擦振动监测的瓶颈问题是如何从摩擦振动信号中准确提取出能够反映摩擦状态的特征信息<sup>[24]</sup>,并选择出对不同工况最敏感的特征量反映不同工况下的摩擦状态。目前,摩擦振动信号的分析 and 处理方法主要包含时域法、频域法和时频法。

时域法即研究摩擦振动信号随时间的变化规律,主要涉及幅值分析、时差特性和波形特征等<sup>[25—26]</sup>。其优点在于参数计算直观简单,但采用时域分析法时,实测信号中包含有大量的背景噪声会导致监测系统不易得到信号中所包含的摩擦状态信息,因而应尽量避免在时域中提取振动特征。如苏永生等<sup>[26]</sup>通过设定幅值阈值,提取出振动峰值,并对峰值均方根值和标准差值进行了计算,以此作为特征参量来进行状态监测。

频域法指将时域信号转换成频域信号,以研究摩擦振动信号的频域特征信息,从而提取出摩擦振动的表征量<sup>[27]</sup>。目前,比较常用的频域分析法有傅里叶变换法、功率谱分析和倒频谱分析等。傅立叶变换是频域法的核心,常被用来处理平稳周期信号,当处理非平稳信号时,需采用加窗处理的方法,近似认为窗内信号平稳。功率谱分析可分为直接法和间接法,两者的区别在于:直接法是指对摩擦振动信号直接进行快速傅立叶变换得到功率谱,而间接法为对摩擦振动信号的相关函数进行傅立叶变换得到功率谱。功率谱分析的优点在于可以定性和定量的分析具有多频率成分的信号,倒频谱分析的实质为对功率谱密度取对数后,再进行傅立叶变换<sup>[28]</sup>。其复倒频谱分析保留信号中的全部信息,实倒频谱只保留了频谱幅值信息,丢去了相位信息。此方法的主要优点是能够分析和提取出复杂频谱图上的周期成分,并可以充分保留边频成分。彭恩高<sup>[29]</sup>通过对摩擦振动频谱信号进行检测与记录,为提取轴承的摩擦振动特征量奠定了基础。

时频法的基本原理为建立时间和频率之间的关

系函数,其特点在于时间和频率的局部变化,通过时频平面得出目标信号的各个频带在时间轴上的分布和排列情况。其典型的代表为小波分析法,小波分析主要涉及到小波变换和小波包变换,小波变换以傅立叶分析为基础,能较好地处理非平稳信号和局部突变信号,其突出的特点在于多分辨率分析,即可用不同的信号观察分析摩擦振动信号细节或概貌<sup>[30-32]</sup>。小波包变换不仅继承了小波变换时频局部化的特点,而且弥补了小波变换在高频带的时间分辨率高而频率分辨率低的缺点,即可对小波变换分离的高频细节信号作进一步细化分解<sup>[33]</sup>。例如,黄朝明<sup>[34]</sup>提出利用连续小波变换(CWT)时频图像和图像分割技术提取摩擦振动特征体,提取出的特征参数在不同工况下呈现出了明显的差异,较好地反映了摩擦状态。

## 4 摩擦噪声监测技术研究现状

摩擦噪声相伴摩擦振动而生,最常见的为机器制动器摩擦制动时所产生的噪音。以最典型的盘式制动器为例,一般认为其制动噪声产生的机理源于摩擦片和制动盘这对摩擦副之间的摩擦振动,并通过一定的路径传递。

### 4.1 机理

近年来,对摩擦噪声的研究包括摩擦噪声的产生机理和特性两方面。摩擦噪声的形成机理主要有粘着-滑动机理、摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率机理、自锁-滑动机理和模态耦合机理等<sup>[35]</sup>,其中对粘着-滑动机理的研究相对较多。每种机理都有各自的局限性,即仅能解释一些特定摩擦噪声现象,而无法一般性地解释所有摩擦现象。例如,粘着-滑动理论不能较好地解释较高声强级的摩擦噪声,摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率机理也不能解释摩擦噪声往往在摩擦系数较大处出现的现象。摩擦噪声特性主要指摩擦副材料与工况条件对摩擦噪声的影响规律,从而为摩擦系统结构设计及降噪提供理论指导。

### 4.2 监测方法

摩擦噪声和摩擦振动具有良好的相关性,且振动和噪声具有某些相同的特征参数,例如,王大鹏<sup>[36]</sup>指出了振动速度与声压间的直接关系可转化为具体的数学表达式,因此摩擦噪声和摩擦振动监测的基本思路都是一样的。一般认为,摩擦噪声是摩擦系统的振

动造成,因此监测摩擦噪声的工作大部分都转化为对摩擦振动的监测。摩擦噪声监测与摩擦振动监测稍有不同的是摩擦噪声已有一些表征量(如声压、声强、声功率和方向系数等),但为更加准确地表征噪声现象,仍需要借助与摩擦振动类似的频域法或时频法等来提取表征参数。

## 5 摩擦状态综合监测技术研究现状

机械摩擦过程的表征参数不仅涉及如前所述的摩擦状态特征量(摩擦力、摩擦热、摩擦振动、摩擦噪声等),还包括摩擦副材料特性<sup>[37-39]</sup>以及摩擦工况参数(滑动速度、正压力、环境参数等)<sup>[40-44]</sup>等相关因素,只有将摩擦状态特征量与工况参数和材料参数结合起来,才可以完整地表征机械摩擦过程。由于摩擦副材料特性是其内在特性<sup>[45-50]</sup>,在摩擦过程中难以监测,而速度、压力等摩擦工况参数是易于实现监测的工况参数,因此对机械摩擦过程进行摩擦状态监测,除了需要监测以上所述的摩擦状态特征量外,也应对摩擦工况参数进行监测,即最终要实现摩擦状态综合监测。

近年来,为了研究摩擦特征量的动态特性,即为了获取不同工况条件对摩擦状态特征量的影响,研究者也在逐步探索综合监测技术,并取得了一定成果。总体上可分为以下3部分。

1) 摩擦力、摩擦热与载荷、速度同时监测,例如文献[40-42]在摩擦力监测系统中,同时监测了摩擦副表面温度、载荷及滑动速度等工况参量,以综合监测的思想研究了工况对摩擦力这个特征量的影响。

2) 摩擦热与速度同时监测,例如蒋兴奇<sup>[43]</sup>以轴承为研究对象,研究了轴承摩擦热对速度和动力学特性的影响,为实现综合监测奠定了理论基础。

3) 摩擦振动与速度、载荷同时监测,例如梁爽<sup>[44]</sup>在试验机上同时监测了速度、法向力和摩擦振动,从而获得不同工况的摩擦振动特性,其监测系统已具有了综合监测系统的雏形。

以上的大多数研究还仅着眼于工况参数对单个摩擦特征量的影响,现有研究还没有实现对摩擦力、摩擦热、摩擦振动、摩擦噪声等摩擦状态量与滑动速度、正压力、环境温度等摩擦工况量的全面综合监测。因此,为全面、准确监测机械摩擦状态,需要将各摩擦工况参数与各摩擦状态特征量结合起来进行综合监测<sup>[51]</sup>。摩擦状态综合监测系统构成如图5所示。

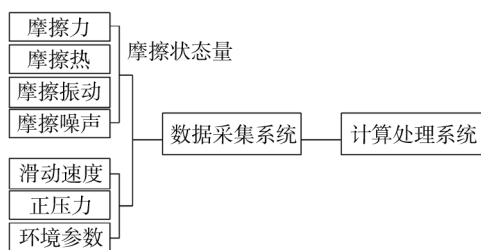


图 5 摩擦状态综合监测系统

Fig. 5 System chart of integrated monitoring in mechanical friction

## 6 结语

在摩擦过程状态监测领域,国内外研究者已做了大量工作,取得了很多具有使用价值和理论意义的研究成果。在对摩擦力的研究及监测方面,已初步认识了摩擦力的影响因素,并实现了利用直接法或间接法来进行摩擦过程的摩擦力监测;在对摩擦热的研究及监测方面,在理论上已对摩擦温度场模型及分布有了较深入的研究,且已可直接或间接的实现摩擦过程温度的在线监测;在对摩擦振动与噪声的研究与监测方面,已开始探索较准确的摩擦振动与噪声的表征量,并且对摩擦噪声机理进行了深入研究,已能解释某些摩擦噪声现象。总体来看,目前对机械摩擦状态的监测还仅着眼于对单个摩擦状态特征量的监测,并且在将各摩擦状态特征量和摩擦工况量结合起来,探索基于两者内在关系的摩擦状态综合监测方面的研究有待深入,因此发展多摩擦特征监测进而向摩擦状态综合监测拓展理应是未来机械摩擦监测技术的发展趋势。

## 参考文献

- [1] 刘佐民. 摩擦学理论与设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2009.
- LIU Zuo-min. Tribology and Design Principles [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2009.
- [2] RONEN A, ETSION I, KLIGEMAN Y. Friction-reducing Surface-texturing in Reciprocating Automotive Components [J]. Tribology Transaction, 2001, 44(3): 359—366.
- [3] BAKSHI I A, BRENDZY J L, WALKER N. Mould-strand Interaction in Continuous Casting of Steel Billets [J]. Iron-making and Steelmaking, 1993, 20(1): 54—62.
- [4] 江秋雯, 李小宁, 路建萍, 等. 气缸缸摩擦力测量方法的研究[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(1): 45—48.
- JIANG Qiu-wen, LI Xiao-ning, LU Jian-ping, et al. Study of Testing Methods of Low Value Friction of Pneumatic Cylinders [J]. Machine Building & Automation, 2011, 40(1): 45—48.

- [5] 姚曼, 温承浩, 魏勇, 等. 功率法用于板坯连铸结晶器摩擦力在线检测的试验研究[J]. 钢铁, 2001, 36(5): 29—31.
- YAO Man, WEN Cheng-hao, WEI Yong, et al. Test of On-line Measurement of Mould Friction on Slab Caster by Power-method [J]. Iron and Steel, 2001, 36(5): 29—31.
- [6] MA Yong, WANG Xu-dong, ZANG Xin-yang, et al. Research on Online Measurement Method for Mould Friction in Continuous Casting [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(3): 346—350.
- [7] 魏树立. 连铸结晶器摩擦力异常预报研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- WEI Shu-li. Research of Abnormal Predicting with the Friction in Continuous Casting [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [8] 王旭东, 臧欣阳, 马勇, 等. 液压振动下板坯连铸结晶器摩擦力检测实验研究[J]. 钢铁, 2006, 41(11): 23—25.
- WANG Xu-dong, ZANG Xin-yang, MA Yong, et al. Mold Friction Monitoring on Caster under Hydraulic Oscillation [J]. Iron and Steel, 2006, 41(11): 23—25.
- [9] 徐驰. 基于摩擦力在线测量的化学机械抛光终点检测技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- XU Chi. Study on Chemical Mechanical Polishing Endpoint Detection Technology Based on Friction Online Measurement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [10] ANDRIY K, OYELAYO A, ALI E, et al. The Effect of Laser Surface Texturing on Transitions in Lubrication Regimes during Unidirectional Sliding Contact [J]. Tribology International, 2005, 38(3): 219—225.
- [11] 吴婧斯. 汽车盘式制动器热-结构耦合仿真分析及其寿命研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- WU Jing-si. Thermal-structure Coupled Simulation and Life Research for a Automotive Disc Brake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [12] 杜红光. 基于 ANSYS 的秸秆活塞式成型特性及摩擦热分析[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- DU Hong-guang. Study of Briquetting Properties and Frictional Heat Distribution Law of Reciprocating Straw Briquetting Based on ANSYS [D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [13] 蒋慧平, 董霖. 铝钢复合轨/受电靴摩擦热与接触热电阻热耦合的温度场有限元模拟研究[J]. 润滑与密封, 2010, 35(1): 45—48.
- JIANG Hui-ping, DONG Lin. FE Simulation Research of Temperature Field Couple under Contact Resistor-Friction Thermal between Aluminum-Stainless Steel Composite Conductor Rail and Collector Shoe [J]. Lubrication Engineering, 2010, 35(1): 45—48.



- ring, 2010, 35(1): 45—48.
- [14] 徐德凯. 采煤机盘式制动器智能监测系统的研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- XU De-kai. Development of Intelligent Detection System for Hydraulic Disk Brake of Coal Cutter[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [15] JOSEF V. Frictionally Excited Thermoelastic Instability in Disk Brakes: Transient Problem in the Full Contact Regime[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2007, 49(2): 129—137.
- [16] 高诚辉, 林谢昭, 黄健萌. 制动工况参数对制动盘摩擦温度场分布的影响[J]. 工程设计学报, 2006, 13(1): 44—48.
- GAO Cheng-hui, LIN Xie-zhao, HUANG Jian-meng. Effects of Operating Condition Parameters on Distribution of Friction Temperature Field on Brake Disc[J]. Journal of Engineering Design, 2006, 13(1): 44—48.
- [17] CHOI Ji-hoon, LEE In. Transient Thermoelastic Analysis of Disk Brakes in Frictional Contact[J]. Journal of Thermal Stresses, 2003, 26(3): 223—224.
- [18] 李刚, 金城, 陈光雄, 等. 摩擦振动引起的波状磨耗的试验研究[J]. 润滑与密封, 2012, 37(9): 24—27.
- LI Gang, JIN Cheng, CHEN Guang-xiong, et al. Experimental Study on Corrugated Wear of Sliding Surfaces Caused by Friction-induced Vibration[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(9): 24—27.
- [19] LOU T A H, ROULIAS D, PAULY E, et al. The Combined Use of Vibration, Acoustic Emission and Oil Debris On-line Monitoring Towards a More Effective Condition Monitoring of Rotating Machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(4): 1339—1352.
- [20] LI Chuan, LIANG Ming. Enhancement of Oil Debris Sensor Capability by Reliable Debris Signature Extraction via Wavelet Domain Target and Interference Signal Tracking[J]. Measurement, 2013, 46(4): 1442—1453.
- [21] 刘龙涛, 李传日, 马甜, 等. 有限元仿真在振动结构疲劳分析中的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 23—29.
- LIU Long-tao, LI Chuan-ri, MA Tian, et al. Application of Finite Element Simulation in Vibration Structure Fatigue Analysis[J]. Equipment Environment Engineering, 2013, 10(4): 23—29.
- [22] 章新瑞. 加速度计在振动试验中的应用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 89—92.
- ZHANG Xin-rui. Application of Accelerometers in Vibration Test[J]. Equipment Environment Engineering, 2013, 10(2): 89—92.
- [23] 陈励. 正弦振动试验中的共振利用[J]. 装备环境工程, 2013, 10(2): 48—51.
- CHEN Li. Application of Resonance in Sine Vibration Test[J]. Equipment Environment Engineering, 2013, 10(2): 48—51.
- [24] 任宗英. 摩擦磨损过程摩擦振动特征提取方法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- REN Zong-ying. Research on Characteristics Extraction Method of Friction Vibration in the Friction and Wear Process[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [25] FADI Al-Badour, CHEDED L, SUNAR M. Non-stationary Vibration Signal Analysis of Rotating Machinery Via Time-frequency and Wavelet Techniques[C]//10th International Conference on Information Science Signal Processing and their Application, 2010: 21—24. (余不详)
- [26] 苏永生, 王永生, 颜飞, 等. 离心泵空化故障识别的时域特征分析方法研究[J]. 水泵技术, 2010(4): 1—4.
- SU Yong-sheng, WANG Yong-sheng, YAN Fei, et al. Research on Analysis of Time Domain Characteristics in Centrifugal Pump Cavitations Fault Identification[J]. Pump Technology, 2010(4): 1—4.
- [27] GIOVANNI B, CONSOLATINA L, ALFREDO P, et al. A DSP-based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis[J]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001, 3(21): 572—577.
- [28] 李晓虎, 贾民平, 徐飞云. 频谱分析法在齿轮箱故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2003, 23(3): 168—170.
- LI Xiao-hu, JIA Min-ping, XU Fei-yun. Spectrum Analysis and Its Application to Gearbox Fault Diagnosis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003, 23(3): 168—170.
- [29] 彭恩高. 船舶水润滑橡胶尾轴承摩擦振动研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- PENG En-gao. Research on Friction-induced Vibration of Marine Water-lubricated Rubber Stern Tube Bearing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [30] LI Bing, GAO Yong. Application of Wavelet Transform in Mode SSSR Signal Analysis and Processing[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(7): 76—80.
- [31] WU Jian-da, HSU Chuang-chin. Fault Gear Identification Using Vibration Signal with Discrete Wavelet Transform Technique and Fuzzy-logic Inference[J]. Expert Systems with Application, 2009, 36(2): 378.
- [32] SUN Zeng-shou, FAN Ke-ju, ZHANG Bo. New Development of Research on the Second Wavelet Transform Based Structural Damage Detection[J]. Journal of Zhengzhou University Engineering Science, 2010, 31(1): 1—5.
- [33] 李国宾, 关德林, 李延举. 基于小波包变换和奇异值分解

- 的柴油机振动信号特征提取研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8): 149—152.
- LI Guo-bin, GUAN De-lin, LI Yan-ju. Feature Extraction of Diesel Engine Vibration Signal Based on Waveletpacket Transform and Singularity Value Decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 149—152.
- [34] 黄朝明. 柴油机缸套-活塞环摩擦振动量化分析方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- HUANG Zhao-ming. Study on Frictional Vibration of Diesel Cylinder Liner-Piston by Using Quantification Analysis Methods[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [35] 陈光雄. 金属往复滑动摩擦噪声的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- CHEN Guang-xiong. Investigation into Friction-induced Noise under Metal Reciprocating Sliding Conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [36] 王大鹏. 盘式制动器制动噪声分析与研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2012.
- WANG Da-peng. Analysis and Research of Disc Brake Squeal Noise[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2012.
- [37] 董晨竹, 邢斌赛, 郝杰, 等. 电火花沉积 Fe 基涂层的组织及耐磨性[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 37—39.
- DONG Chen-zhu, XING Bin-sai, HAO Jie, et al. Microstructure and Wear Properties of Fe-based Coating Prepared by Electrospark Deposition[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 37—39.
- [38] 赵运伟, 黄巍, 田海燕, 等. 电泳-电沉积 Ni-金刚石复合镀层及其耐磨性能研究[J]. 表面技术, 2013, 42(2): 77—79.
- ZHAO Yun-wei, HUANG Wei, TIAN Hai-yan, et al. Research on the Ni-diamond Composite Coating by Electrophoretic-Electrochemical Deposition and Its Wear Resistance[J]. Surface Technology, 2013, 42(2): 77—79.
- [39] 黄建龙, 吴建宏, 党兴武. 表面粗糙度对 GCr15/35CrMo 摩擦副摩擦磨损特性的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(4): 62—64.
- HUANG Jian-long, WU Jian-hong, DANG Xing-wu. Influence of Surface Roughness on Friction and Wear Characteristic of GCr15/35CrMo Friction Pair[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 62—64.
- [40] 袁智军, 莫易敏, 周然杰. 工况条件对微型汽车离合器摩擦副摩擦因数的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(6): 74—76.
- YUAN Zhi-jun, MO Yi-min, ZHOU Ran-jie. Effect of Working Conditions on Friction Coefficient of Friction Pair of Mini-vehicles Clutch[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(6): 74—76.
- [41] 汤春球, 祁建得, 吕俊成, 等. 离合器摩擦副表面温度对摩擦因数的影响[J]. 润滑与密封, 2009, 34(7): 66—68, 73.
- TANG Chun-qiu, QI Jian-de, LYU Jun-cheng, et al. The Influence of Friction Surface Temperature on Friction Coefficient of Clutch Friction Pair[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(7): 66—68, 73.
- [42] 刘焜, 邴雷刚, 刘小君, 等. 大滑滚比工况下弹流摩擦试验研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(21): 2573—2576.
- LIU Kun, BING Lei-gang, LIU Xiao-jun, et al. Experimental Study on EHL Friction under Big Slide-roll Ratio Conditions[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(21): 2573—2576.
- [43] 蒋兴奇. 主轴轴承热特性及对速度和动力学性能影响的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- JIANG Xing-qi. Study on Heat Characteristics of Spindle Bearings and Influences on Speed and Dynamics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [44] 梁爽. 车辆制动摩擦特性及摩擦颤振的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- LIANG Shuang. Research on Braking Friction Characteristics and Chatter of Railway Vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [45] 田峰, 杨辉. 40Cr 钢表面高能喷丸纳米化及其耐磨性能[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 52—54.
- TIAN Feng, YANG Hui. Experimental Study on Wear Behavior of Nano-crystallization Surface of 40Cr[J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 52—54.
- [46] 周静, 陈汉宾, 张隆平. 瓷罗拉等离子喷涂防静电耐磨涂层工艺[J]. 表面技术, 2013, 42(6): 66—68.
- ZHOU Jing, CHEN Han-bin, ZHANG Long-ping. Technology Investigation of Antistatic and Anti-abrasive Coatings Prepared by Plasma Spray on Porcelain Roller[J]. Surface Technology, 2013, 42(6): 66—68.
- [47] 牛少鹏, 邓畅光, 张吉阜, 等. 超音速火焰喷涂碳化铬基涂层的高温摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 10—13.
- NIU Shao-peng, DENG Chang-guang, ZHANG Ji-fu, et al. Study on High Temperature Friction and Wear Performance of Chromium Carbide Based Coatings Sprayed by HVOF[J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 10—13.
- [48] 冶艳, 尚魁平, 鲍明东, 等. CrN 硬质镀层对磨热固性塑料的摩擦学行为研究[J]. 表面技术, 2012, 41(1): 27—29.
- YE Yan, SHANG Kui-ping, BAO Ming-dong, et al. Study on Tribological Behavior of CrN Hard Film Against Thermosetting Plastics[J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 27—29.