

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.003

# 转子磁通量超标对振动的干扰影响研究\*

周汉杰,金长生,郑淑华,方寅  
(杭州汽轮机股份有限公司,浙江 杭州 310012)

**摘要:**针对某炼油项目中蜡油加氢汽轮机在单机试车过程中驱动端轴振动超标、停机检查时发现静态电跳量过大等问题,对该机组单机试运行时的振动频谱图和轴心轨迹图进行了判断分析,并采用大头针吸附方式对该转子进行了磁性检查,确认转子被磁化。然后通过磁感效应理论分析,进一步对电涡流传感器的工作原理、磁通量对电涡流传感器的信号干扰以及电涡流传感器与被测金属体有无磁性的关系等进行了分析研究,并建立了实验模型,模拟实验和结合实际工程应用进行论证。研究结果表明,当汽轮机转子磁通量超过 API Std 612 低于 3 高斯的标准要求时,磁通量会对该点的径向振动产生较大的信号干扰影响,采取消磁滚压再消磁的对策措施,可解决这个难题,并对类似问题具有参考意义。

**关键词:** 转子磁化; 电涡流传感器; 磁通量; 振动干扰

**中图分类号:** TH113.1; TH17; TH268 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2014)10-1249-05

## Vibration interference influence by the excessive magnetic flux of rotor

ZHOU Han-jie, JIN Chang-sheng, ZHENG Shu-hua, FANG Yin  
(Hangzhou Steam Turbine Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Aiming at the vibration on the drive shaft side of wax oil hydrogenation turbine was too large to run normally when the steam turbine was in commissioning process in a refinery project and the shaft electrical run-out was also too large. The vibration spectrum and axis orbit of the turbine shaft were analyzed, and the shaft magnetism was test by using pin to approach rotor slowly, the pin was attracted, it was indicate that the rotor was magnetized. The principle of eddy current sensor, the eddy current sensor signal were influenced by the magnetic flux, and the relationship between eddy current sensor and the measured metal body were further investigated by magnetoresistance effect theory, then the experimental model was established and simulated, and combined with engineering applications. The result indicates that the magnetic flux of rotor is over ANSI/API Std 612 standers and the vibration interference is influenced by the excessive magnetic flux of rotor through theory analysis and experiment test. Then adopting degaussing and rolling countermeasures and solving this problem, it is reference for other similar problems.

**Key words:** rotor magnetizing; eddy current sensor; magnetic flux; vibration interference

## 0 引 言

某 1 200 万吨炼油项目的中蜡油加氢背压式汽轮机组,进汽参数为:3.6 MPa(a)、400 ℃,排汽压力 0.6 MPa(a),额定功率 5 016 kW,额定转速 11 045 r/min,利用美国本特利电涡流传感器来监测振动与轴位移动态变化。在第一次单机试车过程中,汽轮机升速至第

一阶暖机转速 1 500 r/min 时,前轴(非驱动端) X 方向、Y 方向两振动分别为 14.3 μm 和 10.7 μm,后轴(驱动端) X 方向、Y 方向两振动分别为 46.7 μm 和 47.5 μm (报警值 43 μm),振动超出设计值,无法再继续升速。而汽轮机的振动问题在工程应用领域中是非常普遍而又难以解决的实际问题,引起汽轮机振动的原因也多种多样。研究者一直致力于对引起汽轮机振动的原因进行分析研究和处理,针对该机组的振动问题,

收稿日期: 2014-05-19

基金项目: 浙江省科技厅优先主题重大工业资助项目(2008C01063)

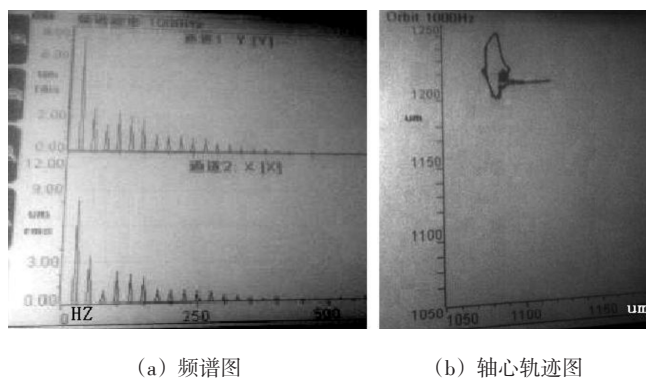
作者简介: 周汉杰(1980-),男,浙江杭州人,工程师,主要从事汽轮机调节、振动和装置监测方面的分析研究与处理。E-mail:zhouhj@htc.net.cn

经过分析研究、试验论证和实际工程应用,确认是因为转子磁通量超过 API612<sup>[1-4]</sup>标准小于3高斯的要求,对振动产生了较大信号干扰,导致汽轮机无法启机,并且国内在磁通量超标对振动产生信号干扰方面研究不多。

针对该问题,本研究从多个方面进行展开和分析论证。

### 1 问题分析

针对引言中提及的汽轮机振动超标无法开机,本研究在现场进行了停机检查。首先,安装人员对汽轮机的转子与汽缸的中心进行了复检,然后将转子的定位尺寸、转子与轴瓦的接触、轴瓦的天地间隙、轴瓦的瓦背紧力等相关数据全部检查一遍,最后又对轴子垂直方向径向跳动和水平方向的径向跳动做了检查,所有安装数据均在厂家要求的合格范围之内,并未发现有异常情况。不过,汽轮机驱动端的空转接套(联轴器的模拟当量)没有安装,于是现场决定带空转接套进行第二次试车,结果试车效果同第一次基本一致,后轴两振动值 X 方向、Y 方向在一阶暖机 1 500 r/min 时仍然维持 47  $\mu\text{m}$  左右,持续报警。为了明确振动原因,现场对振动频谱和轴心轨迹进行数据采集,频谱与轴心轨迹图如图 1 所示,频谱图如图 1(a)所示,轴心轨迹图如图 1(b)所示。



(a) 频谱图 (b) 轴心轨迹图

图1 频谱与轴心轨迹图

从振动频谱和轴心轨迹来看, X 方向、Y 方向方向的频谱相似,都从 1 倍频、2 倍频、3 倍频等逐步递减,多倍频同时出现,由于前后汽封没有碰擦现象,根据振动原理判定,应该有一定的干扰信号成分存在;轴心轨迹出现细长的一个尖角,可以理解为在 360° 方向某一点信号干扰严重,导致轴心轨迹偏移<sup>[5-7]</sup>。从这一判定依据出发,在确定本特利探头、前置器、3500 通道正常工作的前提下,本研究在现场对汽轮机转子驱动端几个点进行了静态电跳量检查,发现在轴振测量处电跳

量居然达 48  $\mu\text{m}$ (该处的径向跳动只有 0.005 mm),具体数据如图 2 所示。这与一阶暖机 1 500 r/min 时的振动数据相差不大,基本上可以判定是转子本身带有干扰信号,那么是否是因为转子表面磁化,磁通量超过 API Std 612 标准(小于 3 Gauss),对本特利电涡流传感器产生了信号干扰所致。为了验证磁性是否存在,因现场没有磁通量检测工具,本研究仅采用大头针吸附的方式来检验,结果发现转子后轴颈对大头针有比较明显吸引力,并且能感觉到在驱动端轴振动探头测量处磁性最强。为此,本研究对转子后输出轴磁通量超标影响汽轮机后轴径振动数值变化进行理论分析和实验论证。

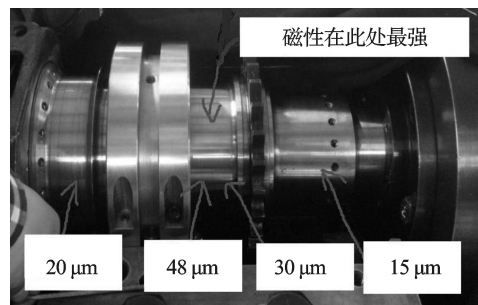


图2 转子电跳量数据分布图

### 2 磁通量产生原理及对电涡流传感器的影响分析

#### 2.1 本特利电涡流传感器工作原理

本特利电涡流传感器的工作过程如图 3 所示。当被测金属与探头之间的距离发生变化时,探头中线圈的磁通量也发生变化,磁通量的变化引起振荡电压幅度的变化,而这个随距离变化的振荡电压经过检波、滤波、线性补偿、放大归一化处理转化成电压(电流)变化,最终完成机械位移(间隙)变化转换成电压(电流)输出。综上所述,电涡流传感器工作系统中被测体可看作传感器系统的一半,即一个电涡流传感器的性能与被测体有很大关系<sup>[8]</sup>。

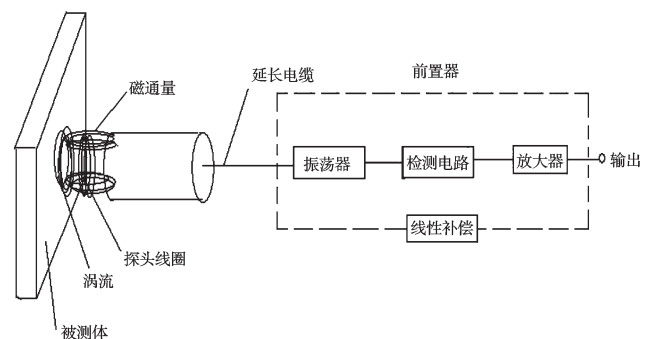


图3 电涡流传感器工作原理简图

深入研究其工作原理发现,前置器中高频振荡电流通过延伸电缆流入探头线圈,在探头头部的线圈中产生交变的磁场,如果没有金属材料靠近这一交变磁场的有效范围内,则这一磁场能量会全部损失;当有被测金属体靠近这一磁场,则在该金属表面产生感应电流,电磁学上称之为电涡流。根据焦耳-楞次定律<sup>[9]</sup>,电涡流  $i_e$  产生的电磁场与感应线圈的电磁场方向相反,这两个磁场相互叠加,改变了线圈的电感  $L$ ,这一变化与金属体磁导率、电导率、线圈的几何形状、几何尺寸、电流频率以及头部线圈到金属导体表面的距离等参数有关。通常假定金属导体材质均匀且性能是线性和各项同性,那么线圈和金属导体系统的物理性质就可由金属导体的电导率  $\sigma$ 、磁导率  $\xi$ 、尺寸因子  $\tau$ 、头部体线圈与金属导体表面的距离  $D$ 、电流强度  $I$  和频率  $\omega$  参数来描述,则线圈的电感  $L$  如下式所示:

$$L = F(\tau, \xi, \sigma, D, I, \omega) \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ —电导率,  $\xi$ —磁导率,  $\tau$ —尺寸因子,  $\omega$ —频率,  $I$ —电流强度,  $D$ —头部体线圈与金属导体表面的距离。

传感器线圈与被测体的电感原理示意图如图4所示。

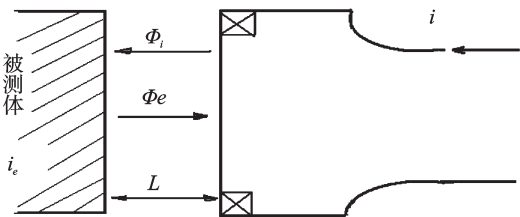


图4 传感器线圈与被测体的电感原理示意图

通常在工程应用中能做到控制  $\tau, \xi, \sigma, D, I, \omega$  这几个参数在一定范围内不变,则线圈的电感  $L$  就成为距离  $D$  的单值函数,虽然它整个函数是一非线性的,其函数特征为“S”型曲线,但可以选取它近似为线性的一段。

### 2.2 理论分析磁通量对电涡流传感器的信号干扰

电涡流传感器和被测体金属导体之间,当高频电感线圈附近引入金属导体后,在被测体金属体表面感应的电涡流对线圈也产生反向作用,这种互感可用去耦等效电路来说明。相量形去耦等效电路如图5所示。

根据基尔霍夫定律<sup>[10]</sup>,可以将所示的去耦等效电路相量式用下列方程式表示:

$$(R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2 = \dot{U}_1 \quad (2)$$

$$(R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2 - j\omega M\dot{I}_1 = 0 \quad (3)$$

由式(3)可得式(4):

$$\dot{I}_2 = j\omega M\dot{I}_1 / (R_2 + j\omega L_2) \quad (4)$$

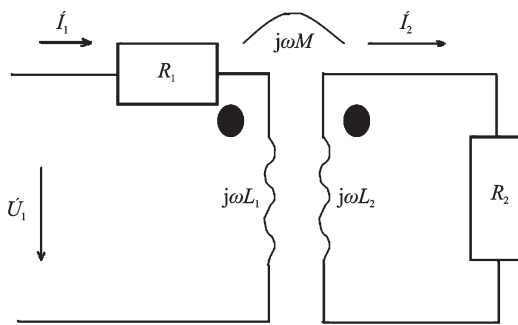


图5 相量形去耦等效电路

$R_1, j\omega L_1$ —传感器线圈的损耗阻抗和自感抗;  $R_2, j\omega L_2$ —被测金属体的等效损耗阻抗和自感抗;  $\dot{U}_1$ —传感器线圈的高频激励电压;  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$ —传感器线圈和被测金属体之间的感应电流;  $j\omega M$ —传感器线圈与被测体之间的互感抗,用来表示线圈与金属导体的耦合松紧程度,这个  $j\omega M$  会随距离  $d$  的增大而减小

将式(4)代入式(2)中联立解得下式:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 - j^2\omega^2 M^2 \dot{I}_1 / (R_2 + j\omega L_2) = \\ & [(R_1 + R_2') + j\omega(L_1 - L_2')]\dot{I}_1 = Z\dot{I}_1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $R_1$ —传感线圈的损耗阻抗,  $j\omega L_1$ —传感线圈自感阻抗,  $R_2$ —被测金属体的等效损耗阻抗,  $j\omega L_2$ —被测金属体的自感抗,  $\dot{U}_1$ —线圈的高频激励电压,  $\dot{I}_1$ —线圈感应电流,  $\dot{I}_2$ —被测金属体感应电流,  $j\omega M$ —传感器线圈与被测体之间的互感阻抗,  $R_2'$ —传感器线圈等效电阻增加量,  $L_2'$ —传感器等效电阻的减小量。

根据电压、电流、电阻之间的关系公式  $U = IR$  可以得知,在感应线圈中产生感应电流  $\dot{I}$  和感应电压  $\dot{U}$  的同时,线圈也会在涡流磁场反作用下产生一定的阻抗,在此称为反射阻抗,用  $Z$  来表示,那么可得结果如下式所示:

$$\dot{U}_1 = Z\dot{I}_1 \quad (6)$$

将上列方程式(5~6)联立解得式(7~9):

$$Z = (R_1 + R_2') + j\omega(L_1 - L_2') \quad (7)$$

$$R_2' = R_2 \omega_2 M_2 / (R_2^2 + \omega_2 L_2^2) \quad (8)$$

$$L_2' = L_2 \omega_2 M_2 / (R_2^2 + \omega_2 L_2^2) \quad (9)$$

式中:  $R_1$ —传感线圈的损耗阻抗,  $j\omega L_1$ —传感线圈自感阻抗,  $R_2$ —被测金属体的等效损耗阻抗,  $j\omega L_2$ —被测金属体的自感抗,  $\dot{U}_1$ —线圈的高频激励电压,  $\dot{I}_1$ —线圈感应电流,  $\dot{I}_2$ —被测金属体感应电流,  $j\omega M$ —传感器线圈与被测体之间的互感阻抗,  $R_2'$ —传感器线圈等效电阻增加量,  $L_2'$ —传感器等效电阻的减小量,  $Z$ —反射阻抗。

将式(8,9)代入式(7)中,联立方程可得式(10):

$$Z = [R_1 + R_2 \omega_2 M_2 / (R_2^2 + \omega_2 L_2^2)] + j\omega [L_1 - L_2 \omega_2 M_2 / (R_2^2 + \omega_2 L_2^2)] \quad (10)$$

其中:反射阻抗  $Z$  公式(10)中实际数据部分为下式:

$$R = R_1 + R_2 \omega_2 M_2 / (R_{22} + \omega_2 L_2^2) \quad (11)$$

实际数据部分式(11)是等效损耗电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和互感系数  $M$  的函数。显然,当线圈和被测体间的距离减小时,其值增大,这一变化与被测体是否是磁性材料无关。而产生虚数据部分为下式:

$$L = L_1 - L_2 \omega_2 M_2 / (R_2^2 + \omega_2 L_2^2) \quad (12)$$

式中: $R_1$ —传感线圈的损耗阻抗, $R_2$ —被测金属体的等效损耗阻抗, $\omega L_2$ —被测金属体的自感抗, $\omega M$ —传感器线圈与被测体之间的互感阻抗, $Z$ —反射阻抗, $R$ —感应线圈输入阻抗, $L$ —感应线圈输入电感。

式(12)中第一项  $L_1$  与静磁效应有关,即被测体是不是磁性材料有关,式(12)中第二项与电涡流效应有关。电涡流产生一个与原磁场方向相反的磁场,该磁场使线圈的电感减小。间距  $d$  越小,电感量减小程度就越大。当传感器与被测体间的间距减小时,静磁效应使得电感增大,而电涡流效应却使等效电感减小,这两种效应是相反的。当被测材料是软磁性材料时,以静磁效应为主,因而间距  $d$  减小时,线圈的等效电感量增大;如果被测金属体材料为非铁磁材料或硬磁材料时,线圈的等效电感量减小。因此,这种电感量的变化都是产生虚值量的变化,即信号干扰成分。

### 2.3 理论分析结论

从以上分析来看,转子磁化后磁通量超标是会对电涡流传感器的正确测量产生较大的干扰影响,在实际的电涡流传感器应用中,电涡流传感器安装之后如图3所示。由于受金属的影响,磁力线发生变形,当转子旋转后,电涡流线圈不断地切割磁力线,通过线圈的磁通量则不停地变化,在测量端产生一定量电动势,其频率是电涡流传感器的测量有效频率的倍频,3500系统是不可能把它作为干扰信号而屏蔽掉的,这一部分干扰量就通过调制解调回路叠加到系统测量中去,对正确的测量数据产生一定的影响。因此,下面再从模拟实验来验证磁通量超标对振动信号产生的影响。

## 3 磁通量感应模拟试验

笔者在实验室中以图3为模型进行模拟实验,用一块表面抛光处理过的平板作为被测体,平板材料与转子材料类似,在材料表面选取①、②、③3个点,对该物体表面进行电跳量测试,磁通量感应对电跳量的影响模拟实验示意图如图6所示。

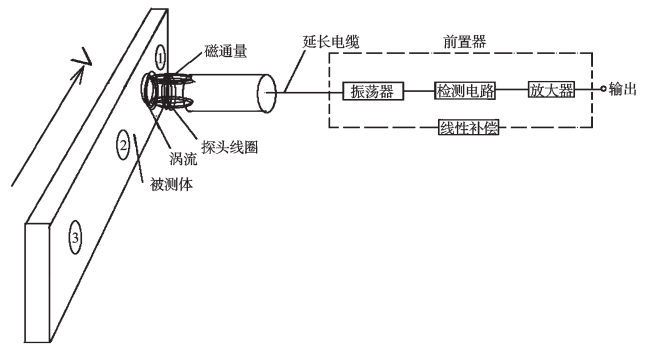


图6 磁通量感应对电跳量的影响模拟实验示意图

本研究在模拟实验中,首先用专业磁测量高斯计对该金属表面进行磁通量检查,根据 API Std 612 标准汽轮机转子磁通量需小于 3 Gauss 的要求,保证金属表面磁通量在 3 Gauss 以内,然后匀速缓慢移动该平板(采用相应工装轨道定位,保证平板与探头垂直并间隙不变),测量①、②、③三点的电跳量分别为 10  $\mu\text{m}$ 、11  $\mu\text{m}$ 、9  $\mu\text{m}$ 。然后对③号点用磁铁进行磁化,并用大头针吸附的方法检测,直到大头针被微微吸引,再用专业磁测量高斯计对三点进行磁通量检查,结果发现①、②号点磁通量仍然在 3 Gauss 以内,③号点磁通量已达到 10 Gauss 左右,并以磁化过的③号点为中心发散分布,此时,再从①号点开始,如图6所示,同第一次方法一样,匀速缓慢移动该平板,测量出①、②、③三点的电跳量分别为 11  $\mu\text{m}$ 、11  $\mu\text{m}$ 、42  $\mu\text{m}$ 。接下来对该平板进行退磁处理,直至①、②、③三点的磁通量均在 3 Gauss 以内,再次从①号点开始匀速移动该平板,测量出①、②、③三点的电跳量值分别为 11  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$ 、10  $\mu\text{m}$ ,电跳量数据基本和第一次无磁状况下的电跳量数据一致,3次模拟实验的电跳量数值如表1所示。从模拟实验数据分析来看,磁通量超标是明显会对振动信号产生较大影响。所以针对某1200万吨炼油项目的中蜡油加氢汽轮机振动超标问题,将以上的分析研究和实验论证应用于实际工程中,将该汽轮机转子返厂退磁处理。

表1 模拟实验电跳量数值

电跳量 状态	位号	被测金属块	被测金属块	被测金属块
	①点/ $\mu\text{m}$	②点/ $\mu\text{m}$	③点/ $\mu\text{m}$	
初始状态	10	11	9	
③号点磁化后	11	11	42	
③号点退磁后	11	10	10	

## 4 转子返厂退磁滚压处理

基于上述的分析与实验,本研究在现场将蜡油加氢这台汽轮机转子返厂,对驱动端轴振动测量处先做

退磁处理,再做滚压处理,再次做了退磁处理,使达到API612对磁通量的标准要求,针对这台汽轮机转子轴颈表面,电跳量只能控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内。然后重新进行单机试运行,在一阶暖机 $1\ 500\ \text{r/min}$ 时,前轴两振动值 $X$ 、 $Y$ 分别为 $11.9\ \mu\text{m}$ 和 $12.1\ \mu\text{m}$ ,后轴两振动值 $X$ 、 $Y$ 分别为 $19.6\ \mu\text{m}$ 和 $20.6\ \mu\text{m}$ 。升速至 $11\ 590\ \text{r/min}$ 时,前轴两振动值 $X$ 方向、 $Y$ 方向分别为 $17.9\ \mu\text{m}$ 和 $24.3\ \mu\text{m}$ ,后轴两振动值 $X$ 方向、 $Y$ 方向分别为 $26.1\ \mu\text{m}$ 和 $24.4\ \mu\text{m}$ ,单机试运行状态良好,成功解决了掉现场轴振动超标,汽轮机开不起来的难题。3次单机试运行振动值如表2所示。

表2 3次单机试运行振动值列表

项目	位号	前轴振动 (非驱动端)/ $\mu\text{m}$		后轴振动 (驱动端)/ $\mu\text{m}$	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
第一单机试车 $1\ 500\ \text{r/min}$		14.3	10.7	46.7	47.5
第二次单机试车(带空转接套) $1\ 500\ \text{r/min}$		9.8	10.4	46.8	47.7
第三次单机(返厂退磁处理后) $1\ 500\ \text{r/min}$		11.9	12.1	19.6	20.6
第三次单机(返厂退磁处理后) $11\ 590\ \text{r/min}$		17.9	24.3	26.1	24.4

## 5 结束语

综上所述,本研究从实际问题出发,分析研究出由于转子磁化干扰振动信号是引起蜡油加氢汽轮机振动的原因,然后通过磁感效应的去耦等效电路理论分析磁通量对电涡流产生的影响,建立实验模型进行模拟实验进行分析论证,并根据以上分析将问题转子

返厂退磁处理、在实际工程现场对该机组进行试车测试的结果表明,汽轮机转子或其他精密旋转机械转子磁化后,转子磁通量超过API Std 612标准要求对振动会产生明显的干扰影响,退磁滚压再退磁处理后,转子磁通量达到API Std 612标准对转子磁通量的要求,即可解决转子磁通量超标影响振动偏大的问题。

## 参考文献(References):

- [1] American Petroleum Institute. API612-2003, Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries—Steam Turbines—Special—Purpose Applications[S]. American Petroleum Institute, 2003.
- [2] American Petroleum Institute. API612-2005, Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries—Steam Turbines—Special—Purpose Applications[S]. American Petroleum Institute, 2005.
- [3] ISO. ISO 14661-2000. 国际标准中译本[S]. ISO, 2000.
- [4] American Petroleum Institute. API670-2000, Machinery Protection Systems[S]. American Petroleum Institute, 2000.
- [5] 陈进. 机械设备振动监测与故障诊断[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1999.
- [6] 张思主编. 振动测试与分析技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [7] 虞和济, 韩庆大, 原培新. 振动诊断的工程应用(实例汇集)[M]. 北京:冶金工业出版社, 1992.
- [8] 张洪润, 傅瑾新. 传感器技术大全[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2007.
- [9] 谷俊杰, 丁常富. 汽轮机控制监视和保护[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [10] 孟得东. 基于电涡流式金属探测仪的特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 2009.

[编辑:张豪]

### 本文引用格式:

周汉杰, 金长生, 郑淑华, 等. 转子磁通量超标对振动的干扰影响研究[J]. 机电工程, 2014, 31(10): 1249-1253.

ZHOU Han-jie, JIN Chang-sheng, ZHENG Shu-hua, et al. Vibration interference influence by the excessive magnetic flux of rotor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(10): 1249-1253.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1243页)

- [6] SUN Z, KANG X Q, WANG X H. Experimental system of cavitation erosion with water-jet[J]. **Materials & design**, 2005, 26(1): 59-63.
- [7] LIM W L, CHEW Y T, LOW H T, et al. Cavitation phenomena in mechanical heart valves: the role of squeeze flow velocity and contact area on cavitation initiation between two impinging rods[J]. **Journal of biomechanics**, 2003, 36(9): 1269-1280.
- [8] ZHANG L, LUO J, YUAN R B, et al. The CFD analysis of twin flapper-nozzle valve in pure water hydraulic[J]. **Pro-**

**cedia Engineering**, 2012, 31: 220-227.

- [9] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2002, 124(3): 617-624.
- [10] MAHMOUD H, KRIAA W, MHIRI H, et al. Numerical analysis of recirculation bubble sizes of turbulent co-flowing Jet[J]. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, 2012, 6(1): 58-73.

[编辑:罗向阳]