

文章编号 1004-924X(2012)07-1566-07

不完整球形超导转子静平衡的气浮测量

高 霏^{1,2*}, 王 晖¹, 胡新宁¹, 王秋良¹

- (1. 中国科学院 电工研究所 应用超导重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种控制转子不平衡量方位的气浮平衡测定方法来提高对空心薄壁不完整球形超导转子平衡量测定的精度。采用在转子内部增加重量的方法来改变转子的不平衡量大小,使得该转子的不平衡量的方位角处于精确测量范围内,当增重量变化时其测量值也会发生相应的变化,通过静不平衡计算的相关公式即可得出其静不平衡量。该方法能够提高这种超导球形转子平衡测定的精度,不破坏转子的加工精度,不影响转子的电磁特性、超导特性等。测量转子偏心距的波动大小在 $\pm 6 \mu\text{m}$ 之内,偏心距Z轴分量的波动在 $\pm 8 \mu\text{m}$ 之内,同时可有效提高超导重力计等基于该类型超导转子的仪器的工作性能和测量精度,对于其它无机械支撑轴转子的平衡测定也有一定借鉴意义。测量过程中采用的设备简单,实验周期短,测量结果精度较高。

关键词:静平衡测量;超导转子;不完整球形转子;气浮法

中图分类号: TM37 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122007.1566

Measurement of static balance for incomplete spherical superconducting rotor with compressed air

GAO Fei^{1,2*}, WANG Hui¹, HU Xin-ning¹, WANG Qiu-liang¹

- (1. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: gaofei@mail. iee. ac. cn

Abstract: A flotation method involving the control of the unbalance orientation of a rotor is put forward to improve the measurement precision of mass imbalance of an incomplete spherical superconducting rotor. By adding additional weights within the rotor to change its quantity of the mass unbalance, this method limits the azimuth of the mass unbalance to an accurate measurable range. As the additional weights change, the observed values change simultaneously, and the mass unbalance can be derived by a relevant formula. This method can improve the measured precision without any damage to the rotor or influence on its electromagnetic and superconducting properties. The fluctuation of the measured offset is within $\pm 6 \mu\text{m}$, and its Z-axis component is within $\pm 8 \mu\text{m}$. Moreover, it can improve the working performance of some types of the devices based on the rotor greatly, and can offer

收稿日期:2012-04-23;修订日期:2012-05-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51107135)

some references for other balanced measurements of the machines without mechanical support for its rotor. The measurement equipment of this method is simple, precise, and its experimental period is short.

Key words: static balance measurement; superconducting rotor; incomplete spherical rotor; flotation method

1 引 言

转子的质量不平衡是指转子质心和转子的几何中心不重合,在转子旋转过程中,该不平衡质量会产生不平衡力矩,使转子产生振动从而造成惯性系统中转子的漂移^[1-3],降低仪表精度,这是精密仪表所不允许的。因此,精确测量转子不平衡量再调整转子的质量分布,使不平衡量达到一定的精度要求是很有必要的。

超导转子不平衡量的产生有两方面的因素:一是由转子材料、组织不均匀等形成的不平衡量,如由于材料加工、热处理、焊接等造成的密度不均匀、组织缺陷、组织微结构不一致等;二是由转子加工误差形成的不平衡量,如转子加工处理过程中存在的尺寸公差、形位公差、表面粗糙度等。转子的平衡精度采用偏心距指标衡量,偏心距是一个向量,其大小定义为单位质量的转子质心偏离形心的距离(单位为 m),其方向为从转子外球面球心指向转子质心。可见,测定超导转子的平衡精度包含 2 个内容,即不仅要确定转子不平衡量的大小,还要确定其方位。

传统的静平衡测试法^[4-6]都难以适用或达不到足够的平衡精度。采取三点支撑传感器称重的方式可以对转子进行测量^[7-10],但是,这种装置是对运行中有固定空间回转轴的转子进行轴对称静平衡测量,测出的偏心位置是相对于回转轴的,是过垂直于回转轴投影面的二维静平衡,而对相对于球心有三维空间静平衡要求的球形转子的测量无能为力;其次三点式平衡测量对 3 个传感器安装位置精度、自身加工精度和弹性应变线性度的统一性要求很高。

本文针对的超导转子是一种特殊结构的不完整球形转子,不仅质量小、球体带有小平台和圆柱孔,而且其结构和工作环境的特殊性,决定了这种超导转子不能采用传统测量静平衡的方法。另外,由于仪器本身对转子平衡精度要求非常高,进

一步增加了平衡的难度。本文提出了一种利于气浮测量转子静平衡的方法,气浮腔采用 6 个侧吹孔,同时在转子孔底增加垫片调整转子不平衡量的方向,使得最终测量结果的波动在 $\pm 6 \mu\text{m}$ 之内,达到了一定的测量精度。

2 气浮测量系统的构成及其工作原理

2.1 超导转子结构

超导转子截面如图 1 所示,实物如图 2 所示,转子为一个薄壁中空球体,通过形心有一盲孔,盲孔的壁上等间距隔开一定厚度的凹槽形成窗口;在赤道处加厚,增大其赤道处的惯性矩,使转子能在自由空间中绕 Z 轴(垂直于赤道平面的轴,为惯性主轴)无约束的自由旋转。

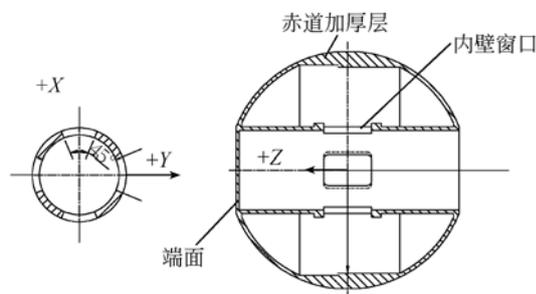
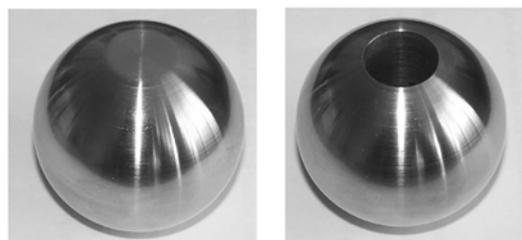


图 1 超导转子截面图

Fig. 1 Sectional view of superconducting rotor



(a) 转子顶部图

(b) 转子底部图

(a) Top of rotor

(b) Bottom of rotor

图 2 超导转子实物图

Fig. 2 Pictures of superconducting rotor

2.2 气浮测量方法原理

采用气浮法对不完整球形转子进行经不平衡量的测量,根据人为改变转子在 Z 轴的不平衡量大小,测量转子不平衡量的方位,从而推算出转子不平衡量的大小和方位。

设原转子质量为 m_0 ,偏心距为 e_0 , e_0 在 Z 轴上的分量为 e_{z0} , e_0 在 XOY 面上的投影为 e_{xy0} , e_0 与 Z 轴的夹角为 φ_0 ;不平衡量为 U_0 , U_0 在 XOY 平面的投影为 U_{xy0} ,如图 3 所示。

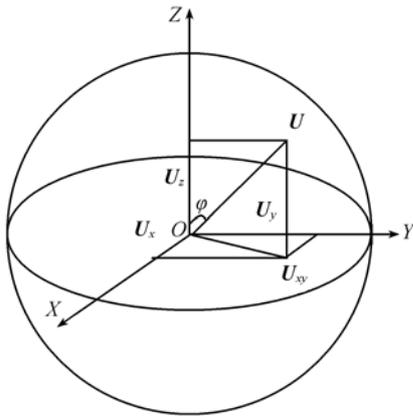


图 3 转子各分量坐标图示
Fig. 3 Coordinate graphs of rotor

将垫片放入转子孔底后,转子质量为 m_1 ,偏心距为 e_1 , e_1 在 Z 轴上的分量为 e_{z1} , e_1 在 XOY 面上的投影为 e_{xy1} , e_1 与 Z 轴的夹角为 φ_1 ;不平衡量为 U_1 , U_1 在 XOY 平面的投影为 U_{xy1} 。

所以垫片的质量分别为 $(m_1 - m_0)$,垫片的质心距离转子球心的距离为 r 。

由于不平衡量 U 的大小

$$|U| = \sqrt{|U_x|^2 + |U_y|^2 + |U_z|^2} = m|e|, \quad (1)$$

$$|U_{xy}| = \sqrt{|U_x|^2 + |U_y|^2} = |U| \sin \varphi, \quad (2)$$

$$|U_z| = |U| \cos \varphi.$$

假设垫片加工和安装精度足够高,即认为垫片的质量全部加在 Z 轴上,对 x, y 轴毫无影响,所以

$$|U_{xy1}| = |U_{xy0}|,$$

可以得出:

$$|U_1|^2 = |U_{xy1}|^2 + |U_{z1}|^2 = |U_{xy0}|^2 + |U_{z1}|^2,$$

由公式(2)得:

$$|U_1|^2 = (|U_0| \sin \varphi_0)^2 + (|U_1| \cos \varphi_1)^2,$$

即:

$$\frac{|U_1|^2}{|U_0|^2} = \frac{\sin^2 \varphi_0}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}} = \frac{\sin^2 \varphi_0}{\sin^2 \varphi_1},$$

根据(1)可得:

$$\frac{|e_1|}{|e_0|} = \frac{m_0 \sin \varphi_0}{m_1 \sin \varphi_1}. \quad (3)$$

另外,Z 轴的不平衡分量大小的变化 $|\Delta U_z|$ 为:

$$|\Delta U_z| = |U_{z1}| - |U_{z0}|,$$

即:

$$(m_1 - m_0) \cdot r = m_1 |e_1| \cos \varphi_1 - m_0 |e_0| \cos \varphi_0, \quad (4)$$

由式(3),(4)联立求解可以得到

$$\begin{cases} |e_1| = \frac{(m_1 - m_0) \cdot r}{m_1} \cdot \frac{\sin \varphi_0}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|} \\ |e_0| = \frac{(m_1 - m_0) \cdot r}{m_0} \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|} \end{cases} \quad (5)$$

由上可知,根据不同增重片引起转子不平衡量的改变,从而改变转子质量和静止时质心的位置,根据其质量 m 和偏转角 φ 的变化,可以测得转子的不平衡量。

3 测量实验装置及测量过程

3.1 实验装置

整个测量系统主要由气浮装置、转子初始水平位置调整系统、角度测量系统以及高精度天平组成。图 4 所示为该系统的装置示意图。

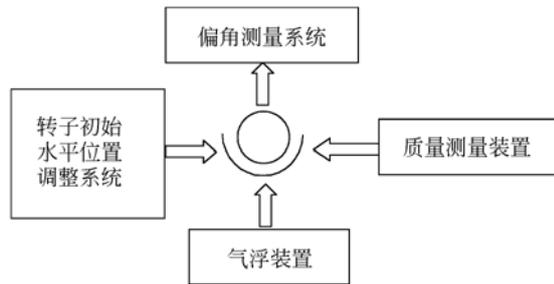


图 4 测量系统装置示意图
Fig. 4 Diagram of measurement system device

各部分功能如下:气浮支撑装置负责转子的起浮,一定压力的气流经由转子与支撑碗间隙流动,形成的稳定的压力将转子浮起。气流完全平稳后,转子在质量偏心力矩的作用下偏离初始水平位置。

传统气浮法采用底吹式气浮腔,只适用于完整球形转子,针对所描述的转子结构,设计了符合其使用的侧吹式气浮腔(图5)。该气浮腔在腔体内壁均匀分布6个直径为0.15 mm的气孔,避开孔口和端面,底部具有一个自然排气孔,腔体的球度达到 $0.5\ \mu\text{m}$,可以使得转子稳定气浮,自由摆动。

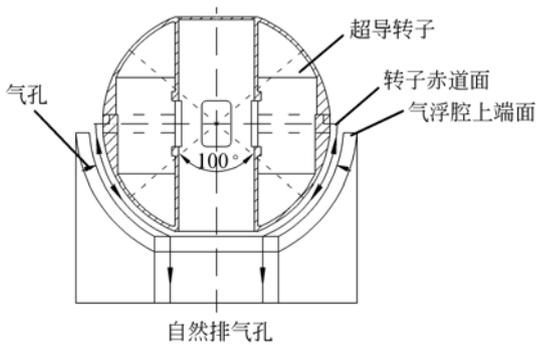


图5 气浮腔截面图

Fig. 5 Sectional view of air cavity

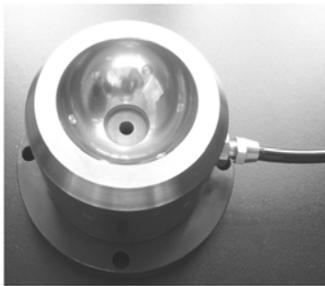


图6 气浮腔实物图

Fig. 6 Picture of air cavity

转子初始水平位置调整系统保证转子初始处于水平状态,即保证Z轴竖直,采用JCS-042A高精度圆柱度仪进行水平面的校正和调整,如图7所示,并在转子表面画出水平截面圆。



图7 转子水平调整装置

Fig. 7 Horizontal setting for rotor

高精度天平负责测量转子的质量,采用德国原装赛多利斯(Sartorius)CP224S,内置全自动校准系统,开机后自动校准,灵敏度为0.1 mg。

3.2 实验过程

首先,使用定位工装,将实验过程中需要的增重片安装到转子孔底,如图8所示,定位工装由铜制成,中心有一个自然通气孔,两侧有2个用于拔出的通孔结构,垫片由密度很小的铝合金加工而成,并采用黏性剂进行粘贴。由于定位工装是根据不同转子的孔工配合加工而成,所以保证了增重片在转子孔底的位置具有很好的重复性和确定性。

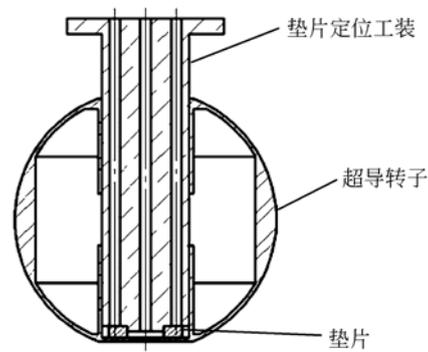


图8 垫片安装图示

Fig. 8 Installation drawings of weight sheets

采用精密电子天平称量放置增重片后的超导转子的质量,采用深度尺测量超导转子中心管孔口到增重片上端面的深度 h ,根据超导转子中心管尺寸和增重片厚度计算增重片质心到坐标原点O的距离 r 。

将转子置入气浮腔内,端面向上,用高精度圆柱度仪进行水平调整,当转子端面水平时,即认为转子Z轴竖直向上,沿气浮腔上端面在转子表面画出水平截面圆。

将添加了增重片的超导转子放入气浮装置的球腔中,超导转子的孔口向上;缓慢通入气体使超导转子处于气浮状态,观察转子浮起后的摆动情况;轻轻地触动超导转子,反复观察转子的摆动情况,若超导转子连续、稳定地小幅摆动,即表明超导转子实现了连续、稳定地气浮。

当转子停止摆动后,质心垂直向下,关闭气浮,转子垂直落下,沿气浮腔上端面在转子表面划下与不平衡量垂直的截面圆。该截面圆与水平截面圆之间的夹角即为偏转角 φ 。通过图像处理工

具,测量出其角度大小。

4 测量实验结果及误差分析

4.1 实验结果

超导转子在定向添加垫片前后,气浮测定的偏转角 φ 的值见表 1。由表可见,重复测量 3 次的 φ 角波动在 0.1° 之内,具有较好的重复性。

表 1 φ 角的测量结果

Tab. 1 Measurement of Angle φ

| 偏转角 | 测量次数 | | |
|------------------------|---------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 |
| $\varphi_1 / (^\circ)$ | 6.117 0 | 6.125 1 | 6.130 9 |
| $\varphi_0 / (^\circ)$ | 9.168 9 | 9.197 9 | 9.117 6 |

根据表 1 中的测量数据,代入式(5)计算得出转子加垫片前后偏心距的结果如表 2 所示。

表 2 偏心距 $|e_0|$ 的测量结果

Tab. 2 Measurement of $|e_0|$ (μm)

| 偏心距 | 测量次数 | | |
|------------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 |
| $ e_0 $ | 25.848 0 | 25.706 2 | 26.446 6 |
| $ e_{0z} $ | 25.517 7 | 25.375 7 | 26.112 4 |
| $ e_1 $ | 38.630 7 | 38.488 5 | 39.254 3 |
| $ e_{1z} $ | 38.410 8 | 38.268 8 | 39.029 8 |

注:转子质量为 114.937 4 g,半径为 25 mm,

转子球心到孔底的距离为 23.293 0 mm

垫片质量为 0.064 2 g,厚度为 0.344 2 mm

转子球心到垫片质心的距离为 23.120 9 mm

4.2 误差分析

通过计算过程得出,该方法的误差主要来源于质量 m 、垫片与转子球心的距离 r 以及转子偏转角 φ 的测量。下面从理论上分析每个参数和操作造成的误差。

(1) 转子球心到垫片质心的距离 r 的精确程度对测量精度的影响:

转子偏心距的公式

$$|e_0| = \frac{(m_1 - m_0) \cdot r}{m_0} \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|},$$

由于 $|e_0| \ll r$,则由上式可得:

$$\frac{|e_0|}{r} = \frac{(m_1 - m_0)}{m_0} \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|} \ll 1,$$

当 r 变化为 Δr 时,对 $|e_0|$ 的影响为

$$\Delta |e_0| = \frac{(m_1 - m_0)}{m_0} \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|} \cdot \Delta r.$$

假设 $r \geq 20$ mm, $\Delta r = 0.1$ mm,符合精密电子深度尺的分辨率,因此:

$$\Delta |e_0| = |e_0| \cdot \frac{\Delta r}{r} \leq \frac{1}{200} |e_0| = 0.005 |e_0| \ll |e_0|.$$

所以,当 r 的变化量小于 0.1 mm 时,其对精度的影响可以忽略不计。

(2) 加垫片后质量 m_1 的精确程度对测量精度的影响:

当 m_1 变化为 $m_1 + \Delta m_1$ 时,有

$$|e_0| + \Delta |e_0| = \frac{(m_1 + \Delta m_1 - m_0) \cdot r}{m_0} \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|}.$$

经过转化可得:

$$\Delta |e_0| = \frac{\Delta m_1 \cdot r}{m_0} \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|} = \frac{\Delta m_1}{m_1 - m_0} |e_0|.$$

当 $\Delta m_1 = 0.1$ mg 时,即符合精密电子分析天平的分辨率,垫片质量 $m_1 - m_0 \geq 0.05$ g 时, $\Delta |e_0| \leq 0.002 |e_0| \ll |e_0|$,即 m_1 对测量精度的影响也可以忽略不计。

(3) 转子质量 m_0 的精确程度对测量精度的影响:

当 m_0 变化为 $m_0 + \Delta m_0$ 时,有:

$$|e_0| + \Delta |e_0| = \left[\frac{m_1}{m_0 + \Delta m_0} - 1 \right] \cdot r \cdot \frac{\sin \varphi_1}{\sin |\varphi_1 - \varphi_0|}$$

经过推导后可得:

$$\Delta |e_0| = -\frac{m_1}{m_1 - m_0} \cdot \frac{1}{\frac{m_0}{\Delta m_0} + 1} |e_0|,$$

由于 $m_0 \gg \Delta m_0$,所以 $\frac{m_0}{\Delta m_0} \gg 1$,

代入式中可得:

$$\Delta |e_0| \approx -\frac{m_1}{m_1 - m_0} \cdot \frac{\Delta m_0}{m_0} |e_0|.$$

垫片质量相对于转子自身质量可以忽略不计,所以 $m_1 \approx m_0$

$$\Delta |e_0| \approx -\frac{\Delta m_0}{m_1 - m_0} |e_0|.$$

当 $\Delta m_0 = 0.1$ mg,垫片质量 $m_1 - m_0 \geq 0.05$ g 时, $\Delta |e_0| \leq 0.002 |e_0| \ll |e_0|$,即 m_0 对测量精度的影响也可以忽略不计。

(4) 加垫片后偏角 φ_1 的精确程度对测量精度的影响:

当 φ_1 变化为 $\varphi_1 + \Delta\varphi_1$ 时,有:

$$|e_0| + \Delta|e_0| = \frac{(m_1 - m_0) \cdot r}{m_0} \cdot$$

$$\frac{\sin \varphi_1 \cos \Delta\varphi_1 + \cos \varphi_1 \sin \Delta\varphi_1}{\sin(\varphi_0 - \varphi_1) \cos \Delta\varphi_1 - \cos(\varphi_0 - \varphi_1) \sin \Delta\varphi_1}$$

假设角度测量精度为 0.1° , 即 $\Delta\varphi_1 = 0.1^\circ$, 所以有 $\cos \Delta\varphi_1 \approx 1$, $\sin \Delta\varphi_1 \approx \Delta\varphi_1 = \frac{0.1 \cdot \pi}{180}$ rad, 代入上式并整理后可得

$$|e_0| + \Delta|e_0| \approx \frac{(m_1 - m_0) \cdot r}{m_0} \cdot$$

$$\frac{\sin \varphi_1 + \Delta\varphi_1 \cos \varphi_1}{\sin(\varphi_0 - \varphi_1) \Delta\varphi_1 - \cos(\varphi_0 - \varphi_1) \sin \Delta\varphi_1},$$

即:

$$\frac{\Delta|e_0|}{|e_0|} = \frac{-\Delta\varphi_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_0 - \varphi_1) + \Delta\varphi_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1)},$$

假设 $\varphi_0 = 10^\circ$, $\varphi_1 = 6^\circ$, 则:

$$\frac{\Delta|e_0|}{|e_0|} \approx 0.0415.$$

角度测量可以通过多次测量取平均值的方法来消除系统带来的随机误差, 提高角度测量精度。

(5) 转子偏角 φ_0 的精确程度对测量精度的影响:

当 φ_0 变化为 $\varphi_0 + \Delta\varphi_0$ 时, 有:

$$|e_0| + \Delta|e_0| = \frac{(m_1 - m_0) \cdot r \cdot \sin \varphi_1}{m_0} \cdot$$

$$\frac{1}{\sin(\varphi_0 - \varphi_1) \cos \Delta\varphi_0 + \cos(\varphi_0 - \varphi_1) \sin \Delta\varphi_0}$$

假设角度测量精度为 0.1° , 即 $\Delta\varphi_0 = 0.1^\circ$, 所以有 $\cos \Delta\varphi_0 \approx 1$, $\sin \Delta\varphi_0 \approx \Delta\varphi_0 = \frac{0.1 \cdot \pi}{180}$ rad, 代入上式并整理后可得:

$$|e_0| + \Delta|e_0| \approx \frac{(m_1 - m_0) \cdot r \cdot \sin \varphi_1}{m_0} \cdot$$

$$\frac{1}{\sin(\varphi_0 - \varphi_1) + \Delta\varphi_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_1)}$$

参考文献:

- [1] 安胜利, 杨黎明. 转子现场动平衡技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
AN SH L, YANG L M. Rotor Dynamic Balancing Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 朱效方. 光电式陀螺静平衡测试仪设计[D]. 哈尔

即:

$$\frac{\Delta|e_0|}{|e_0|} = \frac{\Delta\varphi_1 \sin \varphi_1}{\sin \varphi_1 [\sin(\varphi_0 - \varphi_1) - \Delta\varphi_1 \cos(\varphi_0 - \varphi_1)]},$$

假设, $\varphi_0 = 10^\circ$, $\varphi_1 = 6^\circ$, 则:

$$\frac{\Delta|e_0|}{|e_0|} \approx -0.2435.$$

可见, 由 φ_0 带来的误差小于 φ_1 的误差, 但是这 2 个角度的测量是整个方法中的主要误差来源, 所以, 该实验需要解决的当务之急即是提高偏转角测量的精度, 从而得到符合转子精度要求的结果。

5 结 论

本文提出了一种气浮测量转子静平衡的方法。理论研究和初步试验证明, 该气浮测量法测量精度高, 重复性好, 使用灵活方便, 测量数据较少, 同时实验设备简单, 受外界干扰小。另外, 该方法无需校验转子标定, 已知转子质量和轴相质心位置即可以直接计算静不平衡量, 且与转子转速无关。

该方法适用于非完整球形转子静不平衡量的测量, 避免了传统气浮测量法底吹式气浮腔的弊端, 能够提高超导其平衡测定的精度, 测量转子偏心距大小的波动在 $\pm 6 \mu\text{m}$ 之内, 偏心距的 Z 轴分量的波动在 $\pm 8 \mu\text{m}$ 之内, 不破坏转子的加工精度, 不影响转子的电磁特性、超导特性等, 同时重复测量过程中消除了系统带来的随机误差。但是由于转子结构的特殊性决定了转子角度测量的困难, 现阶段采用在转子表面划线的办法进行测量, 测量精度需要进一步提高, 拟采用光纤传感器进行非接触式角度测量, 进一步提高角度测量精度, 该文所提出的理论分析仍然适用。

滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

ZHU X F. Design of Testing Instrument for Static Balance of Gyroscope With Photoelectric Method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

- [3] 贺晓霞, 高钟毓, 李树文, 等. 球形转子不平衡量的一种自动测量方法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 50-54.

- HE X X, GAO ZH Y, LI SH W, *et al.*. Automatic method to measure mass unbalance of spherical rotor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(2): 50-54. (in Chinese)
- [4] 黎波. 用动平衡方法得到静平衡数据的理论分析[J]. 广西农业机械化, 2010(5): 24-26.
- LI B. Theoretical analysis on calculating static balance data with dynamic balance [J]. *Guangxi Agricultural Mechanization*, 2010(5): 24-26. (in Chinese)
- [5] 张鸣. 利用秒表法找转子静平衡[J]. 淮南职业技术学院学报, 2010, 10(3): 16-18.
- ZHANG M. Stopwatch method to measure the rotor static balance [J]. *Journal of Hunan Vocational & Technical College*, 2010, 10(3): 16-18. (in Chinese)
- [6] 郝山义, 孙新民. 球形空心铍转子静平衡趋小化解析分析[J]. 机械设计与制造, 2011(12): 200-201.
- HAO SH Y, SUN X M. Resolution analytical for static balanced of spherical hollow be rotor [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(12): 200-201. (in Chinese)
- [7] 崔大朋. 一种球形气浮气动陀螺仪的研制及其相关技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- CUI D P. *Research and Development on a Pneumatic Gyroscope with a Spherical Gas-bearing* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] CUI D P, YAO Y X, QIN D L. Study on the dynamic characteristics of a new type externally pressurized spherical gas bearing with slot-orifice double restrictors[J]. *Tribology International*, 2010, 43(4): 822-830.
- [9] CUI D P, YAO Y X, QIN D L. Static balance method for a special gyroscope rotor with a spherical cavity[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2009, 16-19: 680-682.
- [10] 李丙乐, 王厚生, 王晖, 等. 特殊结构陀螺转子的称重静平衡方法[J]. 工艺与检测, 2006(9): 83-87.
- LI B L, WANG H SH, WANG H, *et al.*. Method of measuring the static balance through weighing the specific structure gyroscope rotor [J]. *Technology and Test*, 2006(9): 83-87.

作者简介:



高 霏(1986—), 女, 河北衡水人, 博士研究生, 主要从事转子平衡技术方面的研究。E-mail: gaofei@mail. iee. ac. cn



王 晖(1972—), 男, 山西太原人, 博士, 副研究员, 主要从事强磁场下材料性能及加工技术研究。E-mail: huiwang@mail. iee. ac. cn



胡新宁(1977—), 男, 山东乳山人, 博士, 副研究员, 主要从事低温精密仪器科学技术研究。E-mail: xininghu@mail. iee. ac. cn



王秋良(1965—), 男, 湖北黄冈人, 研究员, 博士生导师, 主要从事超导磁体科学技术研究。E-mail: qiuliang@mail. iee. ac. cn