

文章编号 1004-924X(2018)11-2714-09

动压气浮马达轴承间隙测量设备

任同群^{1,2}, 秦波², 刘指柔², 徐向东², 王晓东^{1,2*}

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 动压气浮陀螺马达轴承间隙尺寸是决定其运转性能的重要指标。为提高轴承间隙测量的精度和自动化程度, 并实现快速批量测量, 研制了一台动压气浮陀螺马达轴承间隙自动测量设备。采用外部加力方式, 使转子体与定子产生相对位移, 从而将内部气膜间隙转化为外部微位移。设备整体结构采用模块化设计理念, 包括夹持模块、自动施力模块和位移测量模块。夹持模块实现被测动压马达定子在两轴端的固定, 采用柔性支撑方式有利于保护被测件和保证施加力的平顺性; 自动施力模块主要由三维精密位移平台集成三轴测力传感器构成, 测量时转子体与力传感器通过夹指连接, 位移平台使转子体与定子产生相对位移, 三轴测力传感器则实现施加力的精确控制和定子的调中心控制; 测量模块由二维精密位移平台集成双电感测头构成, 基于相对测量原理实现微小位移测量。实验表明: 设备测量精度在 $0.3 \mu\text{m}$ 以内。该设备可以实现外力的可控连续加载, 适用于批量测量。

关键词: 微位移测量; 动压气浮马达; 轴承间隙; 自动施力

中图分类号: TP23; TB921 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182611.2714

Clearance measurement equipment for air bearing of dynamic pressure gyro motor

REN Tong-qun^{1,2}, QIN Bo², LIU Zhi-rou², XU Xiang-dong², WANG Xiao-dong^{1,2*}

(1. *Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;*

2. *Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

* *Corresponding author, E-mail: xdwang@dlut.edu.cn*

Abstract: The clearance size of the air bearing of the dynamic pressure gyro motor is an important index to determine the motor performance and running stability. To improve the precision, automation degree, and rapid batch measurement capacity of the clearance measurement for the dynamic pressure gyro motor, a measurement equipment was developed. In this work, the internal clearance was transformed into an external micro-displacement by applying external force to the rotor. The equipment, designed based on a modular concept, was composed of a clamping module, an automatic force application module, and a displacement measurement module. The clamping module provided resilient double-clamp mounting of the stator, which was conducive to protecting the motor

收稿日期: 2018-07-06; 修订日期: 2018-07-25.

基金项目: 国家科技重大专项课题资助项目 (No. 2013ZX04001091); 国家创新群体基金资助项目 (No. 51621064)

and ensuring smooth force application. The automatic force application module was a 3-D precision motion platform integrating one triaxial force transducer. During measurement, the rotor and force transducer were connected by a pneumatic gripper, thereby the rotor would follow the motion of the platform and generate a relative displacement because of the internal clearance. The force transducer was used for precise control of the force application and the self-aligning centering of the stator. The displacement measurement module was a 2-D precision motion platform integrating double inductance probes, which measured micro-displacement based on a relative measurement principle. Experimental results show that the measurement accuracy is superior to $0.3 \mu\text{m}$. The equipment is capable of controllable and continuous force application, making it suitable for batch measurement.

Key words: micro displacement measurement; dynamic pressure gyro motor; bearing clearance; automatic force application

1 引 言

动压马达是陀螺仪表的核心元件,为陀螺仪表提供稳定可靠的转动惯量,其性能好坏直接影响仪器仪表、惯性平台乃至飞船的精度与可靠性。动压马达主要由电机和动压气浮轴承两部分组成^[1],气浮轴承间隙是指转子和定子组件之间的气膜间隙,分为轴向间隙和径向间隙。气浮轴承间隙对轴承的承载能力有一定影响^[2]。当径向间隙在一定范围内时,随着间隙的减小,其弹性支撑刚度增加^[3]。而且气浮轴承存在“最佳间隙”,当轴承实际间隙为最佳间隙时,其负载能力系数最大;当轴承实际间隙为最佳间隙的两倍时,其负载能力系数为原来的 80%^[4]。除此之外,气浮轴承内部的压力分布和转子的振动情况也受间隙值的影响^[5-7]。因此为提高动压马达的可靠性和精度,需将间隙控制在合理范围内,而控制间隙的前提是准确测出动压马达的实际间隙值。

动压马达的轴承间隙属于装配体的内部微小间隙(μm 级)。针对内部间隙,Jiao 等介绍了一种利用垂直入射的超声波直接测量油膜厚度的装置,测量范围为 $75.5 \sim 231.25 \mu\text{m}$ ^[8]。该方法需要预先知道油膜的声学特性,且要求被测件造型简单(平面)。相对于直接测量,将内部间隙测量转化为外部位移测量的间接测量方式更易实现。为使转子体和定子组件产生相对位移,需要施力装置带动转子体移动。由于被测动压马达易变形,且转子体和定子组件的相对位移量较小,所需力的范围在 3 N 以内,使用传统的液压、气压和螺旋进给等施力方式难以实现力的精确控制。目

前,通常采用的施力方式是人工钩挂重物(砝码),Kevin Radil 等介绍了一套用于测量气浮轴承径向间隙的实验装置,利用定滑轮组,依靠物体自重对气浮轴承施力^[4];王京锋等利用砝码通过杠杆给转子组件外圆加力,实现转子组件相对定子的移动^[2]。不过,该施力方式效率较低,不适用于批量测量。Nicolas Meier^[6]等人搭建的轴承径向间隙测量设备中,采用磁激励器实现了外力的可控加载。

微米级微位移测量主要采用电学测量法和光学测量法。根据传感器类型,微位移测量方法可分为电容法^[9]、电感法^[10-11]、激光三角法^[1,12]以及光栅法^[13]等。其中,电容传感器测量时容易产生边缘效应;激光三角测距传感器的测量精度易受被测表面粗糙度和倾角的影响,稳定性相对较差;光栅法测量系统相对复杂,不易集成。被测动压马达外形尺寸较小,径向测量面为弧面。比较而言,电感法对测量表面要求较低,易于实现,且精度适中,因此更适用于测量动压马达。

综上所述,本文研制了一台用于动压气浮陀螺马达轴承间隙的自动测量设备。基于间接测量方式和模块化设计理念,提高施力的效率和精度;采用电感法相对测量原理,保证测量可靠性。该设备具有较高的测量精度和效率,适用于批量自动化测量。

2 间隙测量设备总体方案

如图 1 所示,测量对象为半球型动压马达,轴承间隙为装配体内部间隙,范围在 $0 \sim 300 \mu\text{m}$ 之间。

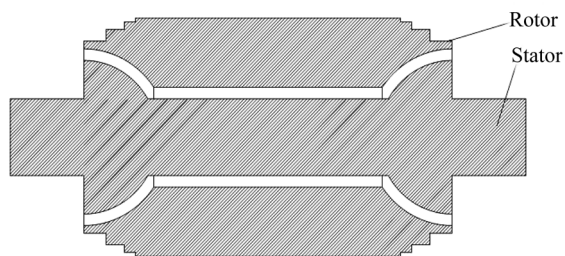


图 1 半球型动压马达结构简图

Fig. 1 Sketch of semi-spherical dynamic pressure motor

根据测量任务,测量过程可分解为被测马达固定、调心对中、间隙转化及微位移测量等环节。其中,调心对中是指通过微调转子体相对于定子组件的空间位置,使存在间隙的两个半球面同球心,达到图 1 的理想初始状态。间隙转化是指通过施加外力,使转子体和定子组件产生相对位移,将被测对象由内部间隙转化为外部微位移。上述两步均需通过夹持固定配合外力加载实现,而且,需要避免外力超载以及为安装不对称造成被测马达的损坏。

基于上述分析,该设备的总体设计方案如图 2 所示。设备整体安装在铁磁不锈钢光学平台上,平台下设置隔震缓冲垫,使整体设备具有较好的稳定性。采用模块化设计理念,将设备分为夹持模块、自动施力模块和测量模块。夹持模块采用柔性支承方式,定子固定在轴端;自动施力模块采用三维精密位移平台集成三轴测力传感器,使转子体与定子产生相对位移并实时反馈接触力;测量模块采用基于接触式电感测微传感器的相对测量策略,以满足快速、高精度以及批量测量的需求。除此之外,夹紧环节及电感测头均基于气动控制,因此还需要设计相应的控制气路以及相关的硬件控制电路。

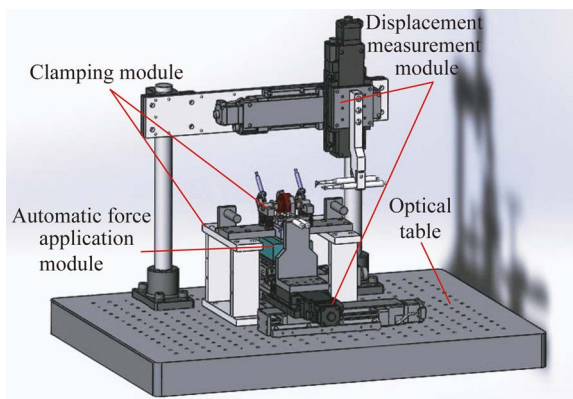


图 2 间隙测量设备整体结构

Fig. 2 Overall structure of clearance measurement equipment

3 设备搭建及工作原理

3.1 功能模块

3.1.1 夹持模块

夹持模块用于固定马达两轴端固定以及夹紧马达转子体外表面,主要包括两端固定和中间夹持结构,如图 3 所示。

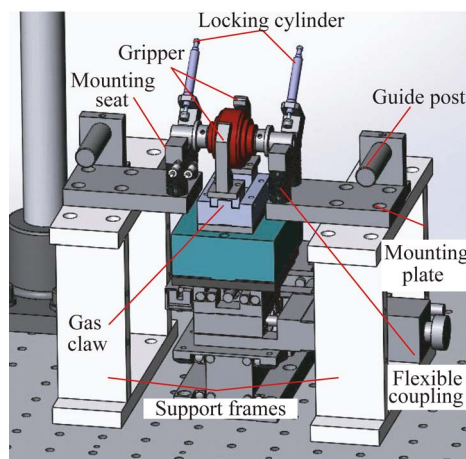


图 3 夹持模块

Fig. 3 Clamping module

两端固定结构包含:支撑架、安装底座、柔性联轴节、安装角座及气动锁紧装置。被测马达放置于安装角座,由定位销进行轴向定位,再由气动锁紧装置进行轴端自动锁紧。该方式便于操作人员快速装夹被测马达,且便于翻转。安装角座由柔性联轴节垂向支撑,经安装底座、支撑架转接,固定于光学平台。采用柔性联轴节,可以起到一定的缓冲作用,避免施力模块运动分辨力不够而造成外力的瞬间超载,同时避免施力中由于两端安装不对称造成被测马达的损坏。但是当柔性联轴节刚度较小时,施力模块的运动距离较大,可能引来较大的误差,因此需要综合考虑以选择合适的柔性联轴节。为避免轴端锁紧时对马达定子造成损害,需要转接轴端套(测量附件),锁紧结构实际对轴端套锁紧。

中间夹持结构为由二位五通电磁阀控制的双作用气动夹指,经转接板安装于施力模块的三轴测力传感器上。为抱紧转子体外表面,夹指设计为 V 形;同时为避免夹指闭合或松开时对被测马达造成冲击,在夹指与马达的接触面设置缓冲胶垫。

3.1.2 自动施力模块

自动施力模块用于动压马达的调心对中及力的自动施加,主要由三轴精密位移平台和三轴测力传感器等组成,如图 4 所示。

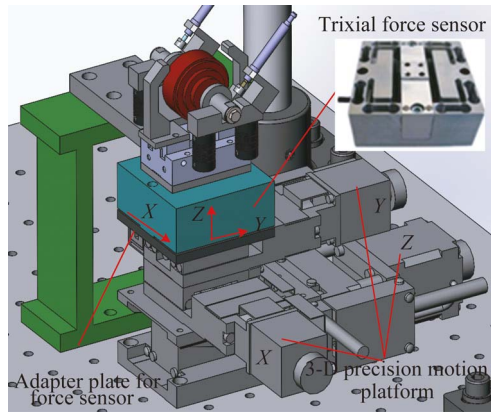


图 4 自动施力模块

Fig. 4 Automatic force application module

三轴精密位移平台安装在光学平台上,力传感器经转接板安装在三轴精密位移平台的上方。被测马达固定锁紧后,气动夹指闭合使它与施力模块连接。以径向(三轴平台 Y 向)施力为例,三轴平台 Y 向运动进而带动转子体径向运动,当转子体与定子接触时会产生径向接触力,三轴测力传感器实时监测接触力,当达到预设阈值 F_1 时,三轴平台停止 Y 向运动,即完成 Y 方向力的施加。轴向施力与径向施力原理类似。本设备采用的三轴测力传感器的量程为 $\pm 10\text{ N}$,精度为 $0.5\% \text{ FS}$ 。三轴精密位移平台中,X-Y 轴行程为 13 mm ,定位精度小于 $0.5\ \mu\text{m}$,最小运动分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$;Z 轴行程为 4 mm ,定位精度为 $7\ \mu\text{m}$,最小运动分辨率为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。由于设备功能模块的工作空间有限,三轴精密平台的 Z 轴采用水平面 Z 轴交叉滚柱导轨,在实现 Z 向运动功能的同时节省工作空间,但同时也导致 Z 方向定位精度偏低。

以测量径向间隙为例,理想起始位置如图 5(a)所示,施加径向力 F 使转子体移动并与定子组件接触,则测量位置如图 5(b)所示,此时测量得到径向间隙 d_1 。若起始位置偏离,如图 5(c)所示,当施加径向力 F 之后,定子组件与转子体接触状态如图 5(d)所示,测量得到的径向间隙近似为 d_2 ,偏离实际值。因此,在测量之前应该对马

达进行对中心,使它处于理想的初始位置。对某一方向调心对中时,首先设置接触力阈值 F_2 ,将三轴精密位移平台分别向正负方向移动,记录接触力均为 F_2 (方向相反)时的位置,求得中间位置即为理想起始位置。

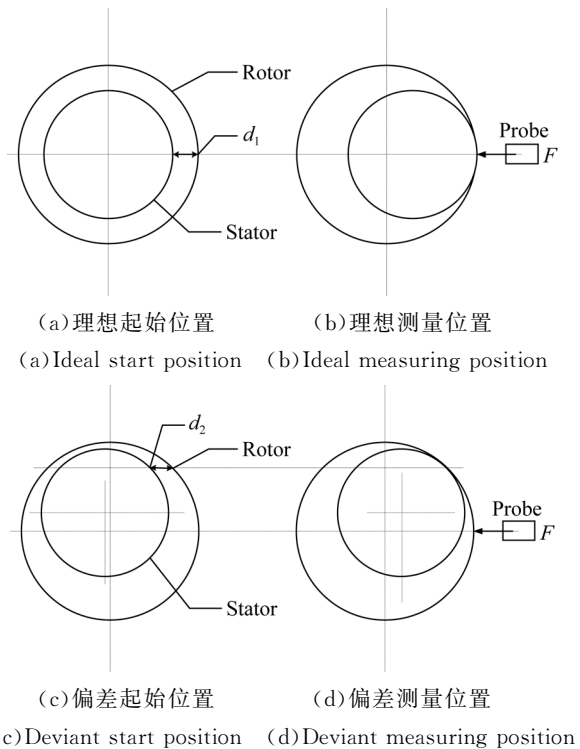
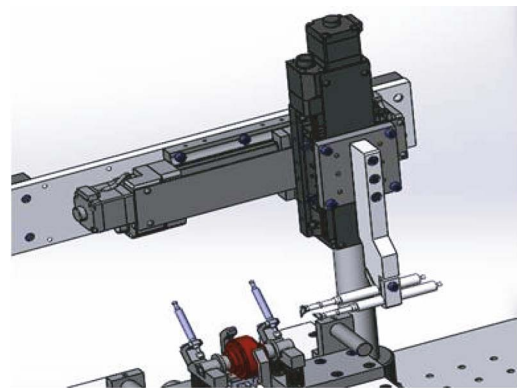


图 5 自动对中示意图

Fig. 5 Schematic diagram of self-aligning centering

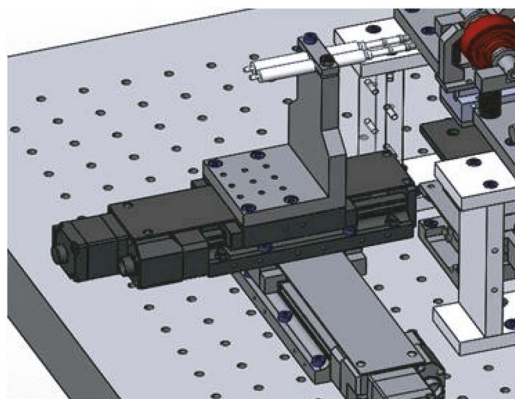
3.1.3 位移测量模块

测量模块由精密位移平台集成双电感测头组成,用于精确测量转化后的外部微位移,分为轴向和径向测量模块,如图 6 所示。



(a) 轴向测量模块

(a) Axial measurement module



(b) 径向测量模块

(b) Radial measurement module

图 6 位移测量模块

Fig. 6 Displacement measurement modules

双电感测头经转接板安装在精密位移平台上。以轴向间隙测量为例,测量时控制精密位移平台移动,使并列排布的两个测头分别抵到轴端套和转子体待测端的端面,分别读取轴向测头的示数并保存;控制施力模块靠近测头运动,当接触力达到预设力 F_1 时,停止运动;分别读取此时测头的示数,前后做差即得轴向间隙。测量模块的主要参数如表 1 所示。径向间隙测量时,被测量为弧面,为保证测量的准确性,采用平面测头。

表 1 测量模块的主要参数

Tab. 1 Key parameters of displacement measurement modules

精密位移平台	轴向 X、Z/径向 X、Y	电感测头	轴向/径向
行程范围/mm	75, 30/75, 30	测量范围/mm	±1.5
最小位移分辨率/ μm	0.1	最大允许误差/ L^2	$0.2+2.4$
重复定位精度/ μm	1	回程误差/ μm	0.25
运动速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	20	重复性/ μm	0.015
传感器	原点加限位	测量力/N	0.1

3.2 控制系统

本设备的控制系统主要包括电路控制系统和气路控制系统。其中,电路控制系统采用分布式结构。

3.2.1 电路控制系统

电路控制系统主要实现精密位移平台的运动控制、力信号和位移信号采集以及力传感器的过载保护。运动控制系统采用“PC+运动控制卡(MPC08E)”结构,如图 7 所示。工控机根据控制程序通过 PCI 总线向运动控制卡发送控制指令,

后者根据控制指令向各步进电机驱动器发送脉冲/方向信号,同时自动检测导轨限位开关,进而完成对 7 个精密导轨的控制。当摁下急停按钮时,运动控制卡的外部报警输入端口输入高电平,运动控制卡立即停止输出脉冲信号,使全部导轨停止运动。电磁阀用于控制气路的通断,实现夹指和电感测头的控制。运动控制卡根据控制指令更改连接电磁阀 IO 口的电平值,进而实现 3 个电磁阀的开关控制。

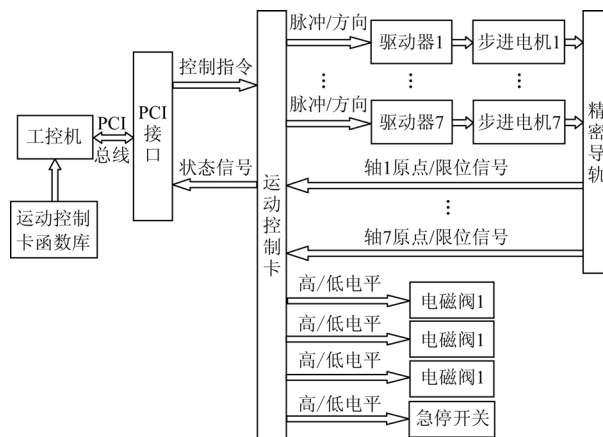


图 7 运动控制系统原理图

Fig. 7 Schematic diagram of motion control system

力、位移信号采集系统采用“PC+数据采集卡(PCI1710UL)”的结构,完成对 4 个电感测头及 3 轴力信号的采集,如图 8 所示。其中,力过载保护电路采用“电压跟随器+绝对值电路+电压比较电路”的方式。电压跟随器对前级电路呈高阻状态,对后级电路呈低阻状态,起到“隔离”作用。绝对值电路实现双向力的绝对值选取,便于电压比较。电压比较电路的输出端与运动控制卡外部报警输入端连接,当力过载时,其输出为高电平,则全部导轨停止运动,从而完成硬件保护。

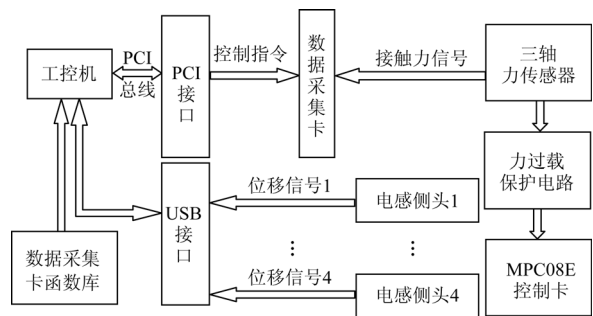


图 8 信号采集系统原理图

Fig. 8 Schematic diagram of signal acquisition system

3.2.2 气路控制系统

本设备的气动装置有三处:四个电感测头、两个锁紧气缸以及一个夹紧气爪。因此,气路控制包含 3 个支路,如图 9 所示。其中,电感测头需要较小且稳定的气压来保证测头的正常伸出状态,因而其在支路设置二级精密减压阀。夹指需要实现“夹紧-松开”的双向动作,且动作时要求平稳,避免对被测马达造成冲击,因而其在支路上动作控制采用二位五通阀,同时设置调速阀。锁紧装置与被测马达的接触端采用软质材料,因而其支路无特殊设置。

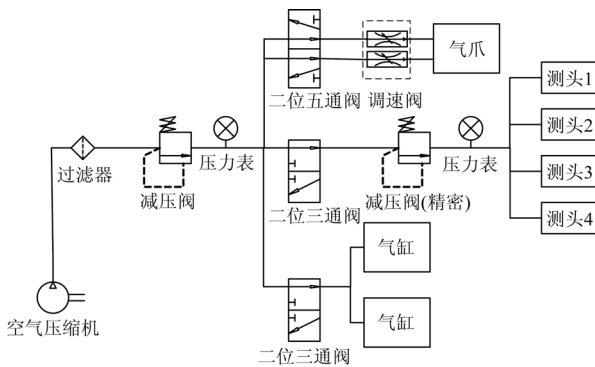


图 9 气路控制系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of pneumatic control system

4 测量实验与分析

4.1 设备测量不确定度分析

动压气浮马达轴承间隙测量设备实物如图 10 所示。其中,设备主体上部为力信号放大器及电感测头接口盒,图中右下方红色按钮为急停按钮。夹持模块支撑刚度由实验确定,确定原则如下: F_1 为 100 g 时,被测马达的整体平动量小于 $60 \mu\text{m}$ 。

在该测量设备的设计方案中,测量模块中精密位移平台的主要功能为携带测头移动到指定位置,由于最终位移的测量方式为双测头相对测量,因此该精密位移平台的定位误差不影响测量结果。在 3.1.2 节所述对中模式中,对中误差应包括施力模块精密位移平台运动误差和力传感器的测量误差。对中时,导轨运动实际上为双向相对运动,通过力传感器实现了闭环反馈控制,因而其带来的对中误差近似为 2 倍的运动分辨率,即 $0.2 \mu\text{m}$ 。三轴力传感器的标称精度为 $0.5\% \text{ FS}$,但在实际使用中,测量接触力阈值 F_1 为 100 g,对

中接触力阈值 $F_2 < 100 \text{ g}$,均为固定值,此时三轴力传感器的实际精度应为特定测量点的标定精度。以竖直方向调心为例,力传感器测量误差即为 Z 向测量偏差的极差值。表 2 为针对 100 g 砝码,力传感器的测量数据。由表可知,Z 向测量偏差的极差为 0.03 N。经实验验证,在该设备目前夹持模块的刚度下,相当于位移平台移动 $1 \mu\text{m}$,即由力传感器测量误差造成的对中误差为 $1 \mu\text{m}$ 。其它方向结果接近,不一一列出。

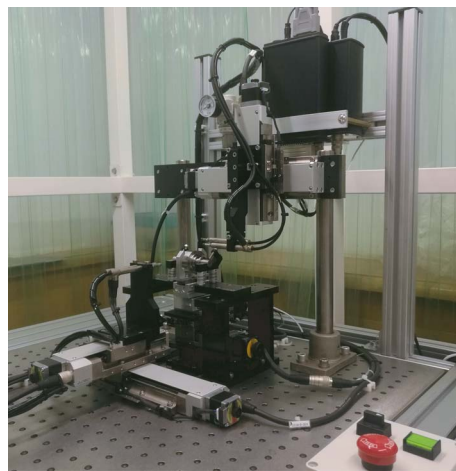


图 10 动压气浮马达轴承间隙测量设备实物

Fig. 10 Clearance measurement equipment for air bearing of dynamic pressure gyro motor

表 2 三轴力传感器的标定结果

Tab. 2 Calibration results of triaxial force transducer

实验次数	砝码重量/g	三轴力传感器读数 N			Z 向偏差/N
		X	Y	Z	
1	100	-0.008	-0.022	0.908	-0.072
2	100	-0.008	-0.033	0.896	-0.084
3	100	-0.006	-0.028	0.892	-0.088
4	100	-0.006	-0.028	0.916	-0.064
5	100	0.003	-0.033	0.894	-0.086
6	100	-0.006	-0.011	0.887	-0.093
7	100	-0.022	-0.039	0.885	-0.095
8	100	-0.017	-0.017	0.904	-0.076
Z 向偏差间的极差/N					0.03

参考图 5 可得,由对中误差造成的径向间隙测量误差 ϵ_c 为:

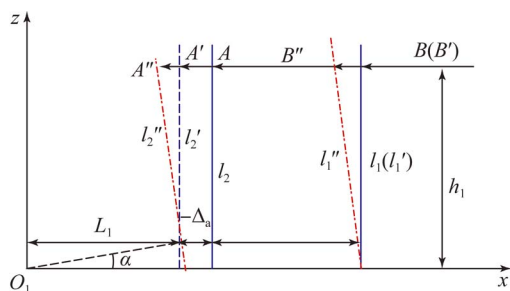
$$\epsilon_c = \sqrt{(R-r)^2 - \delta^2} - (R-r), \quad (1)$$

其中: $R-r$ 为转子体内径与定子外径的差值, δ 为对中误差的绝对值。将 ϵ_c 对 $R-r$ 求导可得:

$$\epsilon'_{c_{R-r}} = -[(R-r)^2 - \delta^2]^{-1/2} \cdot \delta - 1 < 0. \quad (2)$$

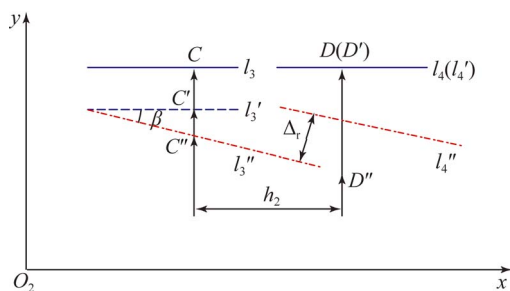
因此, 径向间隙测量误差 ϵ_c 相对于 $R-r$ 单调递减。由用户处可知, $R-r$ 的最小值约为 $3 \mu\text{m}$, 则径向间隙的最大测量误差 ϵ_{max} 为 $-0.25 \mu\text{m}$ 。轴向间隙测量误差分析方法及结论类似。

施力过程中被测马达相对于测量方向可能会发生扭摆, 从而引入附加误差。图 11 为本设备测量相对位移的原理简图。在轴向间隙测量时, 一个测头抵在轴端套端面, 另一个测头抵在转子体端面; 径向间隙测量时, 一个测头抵在轴端套外圆弧面, 另一个测头抵在转子体与轴端套等径阶梯外圆弧面。由于相对测量, 不失一般性, 假设 B 与 B' 重合, D 与 D' 重合。其中, 轴向双电感测头平行等高设置, 径向双电感测头平行等长设置。实/虚线分别代表施力前/后被测马达的位置。



(a) 轴向间隙测量

(a) Measurement of axial clearance



(b) 径向间隙测量

(b) Measurement of radial clearance

图 11 相对位移测量原理简图

Fig. 11 Principle schematic of relative displacement measurement

由相对测量原理可知, 当被测马达整体平动时, 间隙测量值为:

$$\Delta_a = (A-B) - (A'-B'),$$

$$\Delta_r = (C-D) - (C'-D'). \quad (3)$$

而当被测马达同时发生转动时, 测量面则变为图 11 中的红色虚线, 此时间隙测量值为:

$$\Delta_a = (A-B) - (A''-B''),$$

$$\Delta_r = (C-D) - (C''-D''). \quad (4)$$

以轴向间隙测量为例, 由于轴向测头等高设置, 可简化测头为一条直线 $z = h_1$, 则 $B(B'')$ 、 $A(A'')$ 分别为该直线与测量面等效直线 $l_1(l_1'')$ 、 $l_2(l_2'')$ 的交点, 参考图 11(a) 的几何关系, 可得轴向间隙测量值为:

$$\Delta_{am} = L_2 - (L_2 - \Delta_a) \cos \alpha - \tan \alpha \cdot \sin \alpha (L_2 - \Delta_a) \approx L_2 - (L_2 - \Delta_a) \cos \alpha, \quad (5)$$

其中 Δ_a 为轴向间隙的真实值。对于径向测量而言, 被测件的整体扭摆使两测头的相对变化量近似相等, 引入的误差可忽略。类似的, 参考图 11(b) 的几何关系, 可得径向间隙测量值为:

$$\Delta_{rm} = \tan \beta \cdot h_2 + \Delta_r \sqrt{1 + \tan^2 \beta} \approx \tan \beta \cdot h_2 + \Delta_r. \quad (6)$$

对于径向测量而言, 被测件的整体扭摆使两测头的相对变化较明显, 变化量与两测头的摆放间距以及扭摆角度有关, 引入误差为 $\tan \beta \times h_2$ 。

4.2 测量实验

为验证该部分的测量误差, 1:1 加工实心零件, 并用本设备进行测量, 理论间隙为 0, 实际测量结果如表 3 所示。

表 3 1:1 实心零件的测量结果

Tab. 3 Measurement results of 1:1 solid part

测量次数	右侧轴向间隙/ μm	右侧径向间隙/ μm	左侧径向间隙/ μm	左侧轴向间隙/ μm
1	-0.014	0.053	0.088	-0.121
2	-0.132	0.064	0.088	-0.115
3	-0.077	0.054	0.083	-0.095
4	-0.037	0.063	0.098	-0.077
5	-0.066	0.061	0.104	-0.085
6	-0.043	0.066	0.108	-0.090

极限情况下, 扭摆的回转中心可假设为马达的一个轴端, 监测多次实验中马达两轴端在实际测量时的相对位移量不超过 $1 \mu\text{m}$ 。马达两轴端间距为 70 mm, 测头的摆放间距为 10 mm, 此时,

$\tan\beta\approx 1.42\times 10^{-5}$,最大引入误差约为 $10\text{ mm}\times 1.42\times 10^{-5}=0.142\text{ }\mu\text{m}$ 。在相对测量方式下,特别是本设备的电感测头伸缩量较小(μm 量级),电感测头精度近似为其测量分辨率 $0.015\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,最大综合误差约为 $0.157\text{ }\mu\text{m}$,该结论与表 3 测量结果吻合。

5 结 论

本文在比较分析现有微位移测量技术的基础上,基于模块化设计思想,研制了一台用于测量动压气浮马达间隙的测量设备,详细介绍了该设备的设计方案和工作原理。采用机械式力加载机

构,将内部间隙转化为外部微位移,然后采用双电感测头的相对测量方式进行位移测量,从而得到间隙值。该设备可以实现力的可控平滑加载,具有较高的测量精度和效率,适用于批量测量。实验结果证明:被测件对中误差导致的最大测量误差为 $0.25\text{ }\mu\text{m}$,施力过程中被测件扭摆导致的最大测量误差为 $0.157\text{ }\mu\text{m}$ 。因此,本设备的综合测量精度优于 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

基于 4.1 节分析,若保持夹持模块支承部分的柔性,且使被测马达只能沿测量方向整体平动,则可以有效避免前述施力过程中由于扭摆造成的测量误差。因此,设备夹持模块的结构设计还需要进一步优化。

参考文献:

- [1] 刘胜春. 基于双测头的动压马达气膜刚度测量技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
LIU SH CH. *Research on Gas-film Rigidity Measurement of Dynamic Pressure Motor with Dual-probe* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [2] 王京锋,刘景林,闫亚超. 陀螺电机动压气体轴承间隙误差分析与改进 [J]. 中国惯性技术学报,2015, 23(6):786-793.
WANG J F, LIU J L, YAN Y CH. Analysis and improvement on gap deviation of gas-dynamic bearing for gyroscope motor [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(6): 786-793. (in Chinese)
- [3] LAI T, CHEN S, MA B, *et al.*. Effects of bearing clearance and supporting stiffness on performances of rotor-bearing system with multi-decked protuberant gas foil journal bearing [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2014, 228(7): 780-788.
- [4] RADIL K, HOWARD S, DYKAS B. The role of radial clearance on the performance of foil air bearings [J]. *Tribology Transactions*, 2002, 45(4):485-490.
- [5] DAL A, KARACAY T. Dynamics of externally pressurized air bearing with high values of clearance [J]. *Volume 2: Dynamics, Vibration and Control; Energy, Fluids Engineering Micro and Nano Manufacturing*, 2014.
- [6] MEIER N, GEORGIADIS A. Automatic assembling of bearings including clearance measurement [C]. *Procedia CIRP, Research and Innovation in Manufacturing: Key Enabling Technologies for the Factories of the Future-Proceedings of the 48th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Ischia, Italy*, 2016, 41: 242-246.
- [7] CHEN Y X, YANG S N. Dynamic measurement of bearing radial clearances [J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 295:361-366.
- [8] JIAO J P, ZHANG Q, WU B, *et al.*. Measurement of lubricant film thickness using incidence ultrasound [C]. *Proceedings-2008 IEEE International Ultrasonics Symposium, Beijing, China: IUS*, 2008:836-839.
- [9] ADDABBO T, BERTOCCI F, FORT A, *et al.*. A clearance measurement system based on on-component multilayer tri-axial capacitive probe [J]. *Measurement*, 2018, 124: 575-581.
- [10] 杨劲,任同群,王晓东. 位移补偿器压电陶瓷片微位移自动测量设备 [J]. 光学精密工程,2016,24 (10s):461-467.
YANG J, REN T Q, WANG X D. Automatic measurement equipment for micrometric displacement of piezoelectric ceramic piece of displacement compensator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (10s): 461-467. (in Chinese)
- [11] PODHRAŠKI M, TRONTELJ J. A differential monolithically integrated inductive linear displacement measurement microsystem [J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 384.
- [12] IBARAKI S, KITAGAWA Y, KIMURA Y, *et al.*. On the limitation of dual-view triangulation in reducing the measurement error induced by the

speckle noise in scanning operations [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1):731-737.

- [13] 朱革, 张超, 付敏, 等. 交变光场时空耦合型位移测量系统的研制 [J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(8):

2011-2022.

ZHU G, ZHANG CH, FU M, *et al.*. Development of alternating light field space-time coupling type displacement measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2011-2022. (in Chinese)

作者简介:



任同群(1980—),男,辽宁大连人,博士,副教授,2005年、2008年于天津大学分别获得硕士、博士学位,主要从事精密测量、机器视觉及信号处理方面的研究。E-mail: ren_tq@dlut.edu.cn



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,教授,1992年于哈尔滨船舶工程学院获得硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事精密测量、微小器件装配方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn