

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413607

# 横向过载下陀螺加速度计磁悬浮控制方法研究

王 龙<sup>1,2</sup>, 李 亮<sup>3</sup>, 盛安冬<sup>1</sup>, 朱志刚<sup>2</sup>, 任墨璇<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学自动化学院 南京 210094; 2. 北京航天控制仪器研究所 北京 100854;  
3. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

**摘要:**摆式积分陀螺加速度计作为单轴敏感加速度计, 安装于惯性导航系统, 一般使用情况下它敏感输入轴方向的视加速度, 同时会受到垂直于输入轴方向的横向加速度的作用。针对摆式积分陀螺加速度计受到横向加速度作用时产生浮子绕输入轴进动周期性摆动幅度大, 从而影响仪表精度的问题, 进行了浮子受力分析, 建立了横向加速度和敏感加速度同时作用下的浮子径向动力学方程。在磁悬浮纯比例控制方法的基础上提出了一种磁悬浮比例积分控制方法, 由此提供更大磁悬浮支撑刚度来克服摆力矩和消除静态误差, 实现抑制浮子摆动幅度。对两种控制方法下的浮子径向运动进行了 Simulink 仿真与对比, 当横向加速度 0.866g 和敏感加速度 0.5g 同时作用时, 浮子径向磁悬浮位置进动周期性波动 $\pm 0.62 \mu\text{m}$  减小到 $\pm 0.24 \mu\text{m}$ ; 当横向加速度 3g 和敏感加速度 1g 同时作用时, 浮子径向磁悬浮位置进动周期性波动 $\pm 2.2 \mu\text{m}$  减小到 $\pm 0.74 \mu\text{m}$ 。通过摆式积分陀螺加速度计开展离心试验进行对比, 当横向加速度 3.15g 和敏感加速度 0.313g 时, 浮子径向磁悬浮位置进动周期性波动 $\pm 2 \mu\text{m}$  减小到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ , 当横向加速度和敏感加速度同时变化时, 浮子径向磁悬浮位置进动周期性波动减小 50% 左右。结果表明磁悬浮比例积分控制方法比磁悬浮纯比例控制方法能够大幅抑制浮子径向摆动, 摆动幅度缩小 50% 及以上。该方法具有实用的工程意义, 可以提升摆式积分陀螺加速度计受到横向加速度作用时的仪表测量精度。

**关键词:** 摆式积分陀螺加速度计; 磁悬浮; 位置; 横向加速度; 浮子; 径向

中图分类号: TH89 U666.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.30

## Research on the magnetic suspension control method of pendulous integrating gyro accelerometer under transverse acceleration

Wang Long<sup>1,2</sup>, Li Liang<sup>3</sup>, Sheng Andong<sup>1</sup>, Zhu Zhigang<sup>2</sup>, Ren Moxuan<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China; 3. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A pendulous integrating gyro accelerometer is installed in the inertial navigation system as a single-axis sensitive accelerometer. It is generally used to sensitive apparent acceleration in the direction of the input axis. Meanwhile, it will be subjected to transverse acceleration, which is perpendicular to the direction of the input axis. The PIGA is subjected to transverse acceleration, which generates a large amplitude of the float cyclic swing around the input axis, thus affecting the accuracy of the instrument. To address this problem, the force analysis of the float is carried out, and the dynamic equations of radial motion of the float have been established under the simultaneous action of transverse acceleration and sensitive acceleration. A proportional-integral control method of magnetic suspension is proposed on the basis of the purely proportional control method. The new method can provide a greater stiffness for the magnetic suspension system to overcome pendulous moments and eliminate the static position error. It would suppress the amplitude of the float swing. A Simulink simulation and comparison are conducted on the radial motion of the float under two control methods. When the transverse acceleration 0.866g and the sensitive acceleration 0.5g act simultaneously, the amplitude of the float swing decreases from  $\pm 0.62 \mu\text{m}$  to  $\pm 0.24 \mu\text{m}$ . When the transverse acceleration 3g and the sensitive acceleration 1g act simultaneously, the amplitude of the float swing decreases from  $\pm 2.2 \mu\text{m}$  to  $\pm 0.74 \mu\text{m}$ . By carrying out centrifuge tests on PIGA, it is found that the amplitude of the float

swing decreased from  $\pm 2 \mu\text{m}$  to  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  at a transverse acceleration 3.15g and a sensitive acceleration 0.313g. When the transverse acceleration and the sensitive acceleration change at the same time, the amplitude of the float swing is decreased by about 50%. The results show that the proportional-integral control method of magnetic suspension can significantly suppress the amplitude of the float swing and really reduce the swing amplitude by 50% or more compared with the pure proportional control method of magnetic suspension. The new method has practical engineering significance and can improve the instrumentation measurement accuracy when PIGA is subjected to lateral acceleration in use.

**Keywords:** pendulous integrating gyro accelerometer; magnetic suspension; position; traverse acceleration; float; radial

## 0 引言

惯导系统(inertia navigation system, INS)利用陀螺仪和加速度计(统称为惯性仪表)同时分别测量载体运动的角速度和线加速度,并经过计算机解算出载体实时的三维姿态角、速度、位置等导航信息。惯导系统同时具有信息全面、完全自主、高度隐蔽、信息实时与连续,且不受时间、地域的限制和人为因素干扰等重要特性<sup>[1]</sup>。惯性仪表是惯导系统的核心部件,对惯导系统的导航精度起着至关重要的决定性作用。传统的机电陀螺仍然是工程应用精度最高的惯性仪表<sup>[2]</sup>。

磁悬浮技术是摆式积分陀螺加速度计(pendulous integrating gyro accelerometer, PIGA)关键技术之一。由于浮子平衡工艺和温控精度的限制,浮子在浮油中存在不同程度的重、浮力残差,可能发生偏移并产生误差。为此,通过采用磁悬浮辅助支承,可有效抵消浮子的重、浮力残差,同时实现精确定中。磁悬浮支承通常由一对轴向磁悬浮元件、两对径向磁悬浮元件以及磁悬浮控制电路组成,具有位置检测和加力的功能,可实现对浮子3个平动自由度的控制。磁悬浮控制分为无源控制与有源控制两类,为了保证仪表连续和逐次通电的稳定性与重复性,高精度的PIGA通常采用有源磁悬浮控制系统,控制精度优于 $0.1 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。磁悬浮定中位置精度即浮子位置精度影响PIGA的精度。孙鹏飞等<sup>[4]</sup>发现了PIGA在斜置状态时,磁悬浮不能使浮子轴精确定中,浮子轴两端出现了周期性的摆动,并分析了该现象的产生机理,进一步给出了磁悬浮定中偏差对PIGA精度的影响。PIGA倾斜工作时,受限于磁悬浮系统刚度,浮子将周期性摆动,产生定中偏差;磁悬浮定中偏差将引入交叉耦合误差,同时产生二次项误差,影响PIGA精度;磁悬浮定中偏差引起浮液对流,所产生的干扰力矩也将对仪表精度产生影响,定中偏差对仪表精度的影响成线性关系。贺宇等<sup>[5]</sup>针对目前陀螺加速度计的建模方法无法有效分析浮子运动状态的问题,提出了一种浮子六自由度运动的建模方法,对浮子以及外框架进行了完整的动力学分析,得到在无横向加速度作用时,浮子的运动方程可实现线性化,且状态方程具有静态解耦特性,通过伺服、温控、磁悬浮一

体化控制系统实现了对浮子的六自由度调整,验证了模型的正确性;在有横向加速度输入时,浮子受周期力矩的影响且由于耦合作用,各自由度均呈现出周期运动状态。

王雪<sup>[6]</sup>在硕士论文中着重讨论了机械式陀螺的精度与磁悬浮定中位置和控制规律之间的关系,并结合整表测试情况对磁悬浮硬件电路和软件控制方案中的各参数进行了优化设计,提高了磁悬浮和仪表匹配调试的效率。王雪还研究了高过载作用下有源磁悬浮控制系统,建立了惯性仪表浮子动力学关系和浮子运动状态方程,并对瞬时冲击力、阶跃常值力和简谐变化力激励下的浮子运动规律进行了分析和计算<sup>[7-8]</sup>。张静等<sup>[9]</sup>针对磁悬浮浮球控制系统非线性问题提出了一种模糊自适应比例积分微分(proportional, integral, derivative, PID)控制方法,并根据磁悬浮系统的强烈非线性提出了微分独立的改进方法,比常规PID控制和单纯模糊控制方法具有好的抗干扰性、动态特性和精度。李德才等<sup>[10]</sup>基于有源磁悬浮浮球控制系统的整体研究,提出了模糊控制和经典PID相结合的控制策略,仿真研究表明 $H_\infty$ 控制器提高了磁悬浮系统包括变参数下的鲁棒控制性能,增强了系统的抗干扰能力和动态特性,提高了系统的鲁棒性。唐哲等<sup>[11-13]</sup>在三浮陀螺磁悬浮支承技术方面展开了深入研究,指出了状态反馈和输出反馈的不同之处,实现了多路磁悬浮系统的解耦控制,提高了控制系统性能;在经典PID控制的基础上,设计了能够调整控制参数的模糊控制器,从而使系统动态性能得到了优化,还提出了尝试研究并提升磁悬浮硬件电路和所设计控制算法在复杂的动态环境下的可靠性,以确保陀螺和惯导平台的可靠性。

综上所述,目前磁悬浮技术研究公开资料大多与惯性仪表陀螺仪、浮球系统、储能飞轮、磁悬浮列车等产品有关<sup>[14-18]</sup>,极少与惯性仪表摆式积分陀螺加速度计产品相关。虽然孙鹏飞等<sup>[4]</sup>揭示了摆式积分陀螺加速度计在重力场斜置状态下磁悬浮位置(即浮子位置)周期性摆动的机理,贺宇等<sup>[5]</sup>从建立浮子运动方程印证了磁悬浮位置周期性摆动的现象,在已知浮子周期性摆动产生浮子内环干扰力矩、二次项误差以及横向交叉耦合误差等非线性误差的情况下,但都没有提出抑制磁悬浮位置周期性摆动的方法。因此,针对摆式积分陀螺加速度计在横向加速度作

用下磁悬浮位置周期性摆动问题,在原有摆式积分陀螺加速度计磁悬浮比例控制方法的基础上,研究基于比例积分算法的摆式积分陀螺加速度计磁悬浮控制方法,结合磁悬浮死区减小的措施,有效抑制横向加速度作用下磁悬浮位置周期性的摆动幅度,实现提高摆式积分陀螺加速度计受到横向加速度作用时的精度性能。

### 1 浮子受力情况简介

在加速度计领域,摆式积分陀螺加速度计依然是惯导系统应用领域的首选,力再平衡加速度计在战术/惯性导航级设备市场规模最大, MEMS 加速度计实现了战术级应用,并已向导航级应用开始渗透,部分公司致力于研制并实现量产了导航级硅 MEMS 加速度计,国外加速度计发展如图 1 所示<sup>[19-20]</sup>。

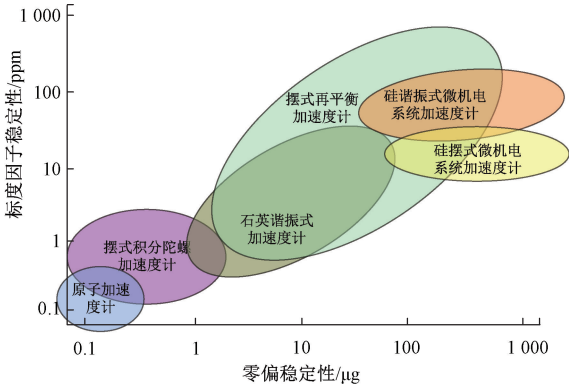


Fig. 1 Development status of accelerators abroad

摆式积分陀螺加速度计工作原理如图 2 所示。设定  $OX_1Y_1Z_1$  为摆式积分陀螺加速度计外框架固连的坐标系,  $OX_1$  为加速度输出轴也是视加速度敏感轴, 外框架绕  $OX_1$  轴转动的角度, 称为进动角度  $\alpha$ , 即外框架相对仪表基座的角度。  $Oxyz$  为莱查坐标系, 与内框架固连, 其中,  $Ox$  为陀螺加速度计敏感加速度输入轴,  $Oy$  为浮子内环轴,  $Oz$  为转子轴。  $\dot{\alpha}$  为外框架相对仪表基座的角速度。  $a_x$  为摆式积分陀螺加速度计的视加速度。  $m$  为偏心质量,  $l$  为偏心距, 则  $ml$  为仪表沿内框架轴的摆性。  $H$  为仪表转子的角动量。当视加速度  $a_x$  输入时, 仪表内框架产生了绕  $Oy$  轴的惯性力矩  $m l a_x$ , 进动转速  $\dot{\alpha}$  为:

$$\dot{\alpha} = \frac{ml}{H} a_x \quad (1)$$

同理, 陀螺加速度计当存在横向加速度输入时, 仪表内框架产生了绕  $Ox$  轴的惯性力矩<sup>[21-22]</sup>。

两套径向磁悬浮元件在浮子两端分别沿径向正交方向控制浮子的活动范围, 一套轴向磁悬浮元件控制沿浮

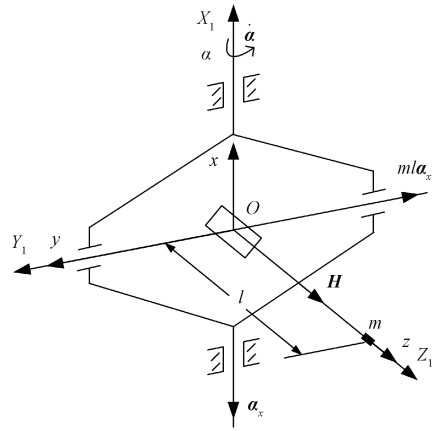


图 2 摆式积分陀螺加速度计工作原理

Fig. 2 Diagram of PIGA working principle

子轴向方向的活动范围, 实现了浮子在空间 5 个自由度上的限位, 即限制沿  $Ox$  轴、 $Oy$  轴、 $Oz$  轴的线运动, 以及限制绕  $Ox$ 、 $Oz$  轴的角运动。  $f_{zx+}$ 、 $f_{zx-}$ 、 $f_{zz+}$ 、 $f_{zz-}$  分别为浮子左端径向各路磁悬浮线圈输出的磁悬浮拉力;  $f_{yx+}$ 、 $f_{yx-}$ 、 $f_{yz+}$ 、 $f_{yz-}$  分别为浮子右端径向各路磁悬浮线圈输出的磁悬浮拉力;  $f_{zy}$ 、 $f_{yy}$  为浮子内环轴两端磁悬浮线圈输出的磁悬浮拉力。陀螺加速度计浮子的受力如图 3 所示。根据刚体动力学知识, 可将陀螺加速度计浮子的运动分解为质心的平动和绕质心的转动<sup>[23]</sup>。

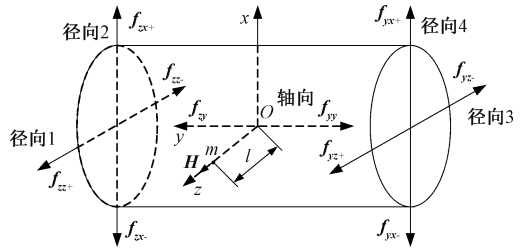


图 3 浮子受力分析

Fig. 3 Stress analysis of float

### 2 横向过载作用下浮子动力学模型

无论陀螺加速度计放置姿态, 垂直于  $OX_1$  轴输入的加速度均视为横向加速度。如图 4 所示, 例如陀螺加速度计受到  $Oy$  轴方向横向加速度  $a_y$  输入时, 偏心质量  $m$  形成绕外环轴  $Ox$  方向摆力矩  $M_x = m a_y l$ 。陀螺加速度计同时受  $OX_1$  方向敏感加速度  $a_{x1}$  时, 仪表进动, 对横向加速度进行调制, 变为陀螺加速度计  $Oy$  方向和  $Oz$  方向均受到横向加速度作用, 分别为  $a_y$  和  $a_z$ , 相位差为  $90^\circ$ 。假定  $OY_1$  轴方向横向加速度为  $a_{y1}$ , 则  $a_y = a_{y1} \cos \alpha$ ,  $a_z =$

$a_{y_1} \sin \alpha$ 。其中,  $\alpha$  为外环进动角度即外环位置, 以  $Oxyz$  与  $Ox_1Y_1Z_1$  三轴重合为起始位置  $\alpha = 0$ 。同理, 如果陀螺加速度计受到  $OZ_1$  轴方向横向加速度  $a_{z_1}$  输入时, 则  $a_y = a_{z_1} \sin \alpha, a_z = a_{z_1} \cos \alpha$ 。绕外环轴  $Ox_1$  的摆力矩  $M_{x_1}$  应该产生陀螺加速度计外环绕  $OY_1$  轴进动, 但陀螺加速度计  $OY_1$  轴不存在自由度, 因此该力矩驱动浮子绕  $Ox_1$  轴转动<sup>[24-25]</sup>。

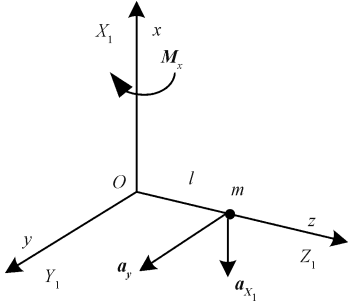


图4 摆式积分陀螺加速度计受加速度示意图

Fig. 4 Diagram of PIGA subjected to acceleration schematic

最常见的一种应用场景是在重力场下陀螺加速度计斜置时, 与水平夹角为  $\theta$ 。此时横向加速度只有由重力加速度分量产生横向加速度, 横向加速度为  $g \cos \theta$ , 在由重力加速度分量产生的敏感加速度  $g \sin \theta$  不为 0 的情况下, 仪表进动, 陀螺加速度计  $Oy$  方向横向过载为  $a_y = g \cos \theta \sin \alpha, Oz$  方向横向过载为  $a_z = g \cos \theta \cos \alpha$ 。因此, 重力场下陀螺加速度计斜置时横向加速度引起的沿  $Ox$  方向的摆力矩为:

$$M_x = ma_y l = mgl \cos \theta \sin \alpha \quad (2)$$

陀螺加速度计多个方向存在横向加速度, 等同于在  $Oy$  轴、 $Oz$  轴的投影的矢量和  $a_y, a_z$ , 同样  $a_y$  和  $a_z$  也可以合成一个横向加速度。因此, 以下针对陀螺加速度计受到 1 个方向的横向加速度作用的情况开展浮子动力学方程的讨论。设陀螺加速度计浮子轴向长度为  $L$ , 沿径向 1、3 路浮子摆动的角度为  $\vartheta$  (浮子轴  $Oy$  轴与  $OY_1$  轴的夹角), 径向 1 路磁悬浮拉力为  $F_1$ , 径向 3 路磁悬浮拉力为  $F_3, z_1$  为径向 1 路磁悬浮位移,  $z_3$  为径向 3 路磁悬浮位移,  $z_1$  和  $z_3$  指以定中位置为基准的运动位移, 则有:

$$\begin{cases} J_x \ddot{\vartheta} + C \dot{\vartheta} + \frac{L}{2} F_1 + \frac{L}{2} F_3 = M_x \\ M_x = ma_y l \cos \alpha \\ \vartheta = \frac{2z_1}{L} = \frac{2z_3}{L} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $J_x$  为浮子绕输出轴的转动惯量;  $C$  为浮子绕输出轴的转动阻尼。

基于浮子结构以  $Oxz$  平面进行对称设计, 质心位于

$Oxz$  对称平面, 径向 1 和 3 路距离中心  $O$  点等长, 浮子左右的浮液阻尼特性一致, 且径向 2 和 4 路均处于定中位置, 径向 1 和 3 路的定中位置均在  $Oy$  轴方向上, 径向 1 和 3 路的磁悬浮控制方法 (磁悬浮控制算法) 一致, 浮子在摆力矩  $M_x$  作用下绕  $Ox$  轴转动, 形成以中心  $O$  点为支撑点的跷跷板运动, 有  $z_1 = z_3, F_1 = F_3$ , 式 (3) 简化为:

$$\frac{2J_x}{L} \ddot{z}_1 + \frac{2C}{L} \dot{z}_1 + LF = ma_y l \cos \alpha \quad (4)$$

### 3 磁悬浮控制方法研究

磁悬浮控制系统考虑磁悬浮位置检测噪声以及定中时不产生磁悬浮干扰力矩, 通常设计了磁悬浮控制的死区, 即在浮子在磁悬浮死区内, 磁悬浮拉力为 0, 这样能够使仪表获得相当高的精度。在死区外, 根据磁悬浮位置分为比例区和饱和区, 在比例区磁悬浮拉力与磁悬浮位置成比例关系, 在饱和区磁悬浮拉力保持最大, 如图 5 所示, 故该磁悬浮控制方法称为比例控制。

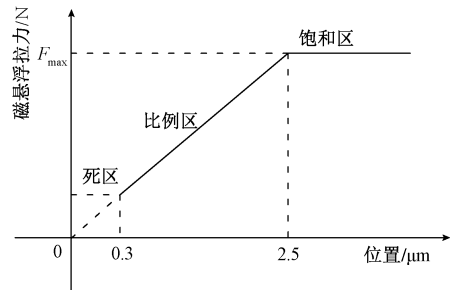


图5 磁悬浮纯比例控制算法

Fig. 5 The purely proportional control method of magnetic suspension

磁悬浮比例控制方法能够实现仪表浮子精确定中。径向 1、3 路磁悬浮比例控制方法公式如式 (5) 所示。

$$\begin{cases} F_i = 0, & z_i \leq 0.32 \\ F_i = 0.0039z_i F_{\max}, & 0.32 < z_i \leq 2.56 \\ F_i = F_{\max}, & z_i > 2.56 \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $i = 1, 3; F_{\max}$  为一个控制周期内磁悬浮最大加力。

为了在陀螺加速度计受到横向过载作用时磁悬浮系统提供更大的刚度, 抑制浮子周期性运动, 本文提出了磁悬浮控制系统加积分环节, 利用积分环节消除磁悬浮位置稳态误差, 并将死区范围缩小。径向 1、3 路磁悬浮控制算法从纯比例改为比例积分, 即比例区变为比例积分区, 并且死区大小从  $0.32 \mu\text{m}$  调整至  $0.16 \mu\text{m}$ , 如图 6 所示。其中, 比例积分算法采用增量式控制, 计算公式如式 (6) 所示。

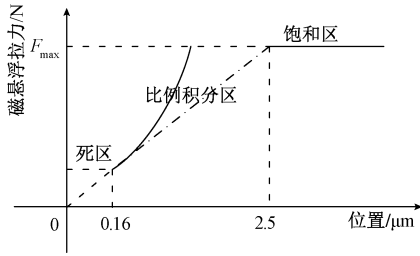


图6 磁悬浮比例积分控制算法

Fig. 6 The proportional-integral control method of magnetic suspension

$$\begin{cases} F_i = 0, & z_i \leq 0.16 \\ F_i(n) = F_i(n-1) + K_p \{z_i(n) - z_i(n-1)\} + K_i z_i(n), & 0.16 < z_i \leq 2.56 \\ F_i = F_{\max}, & z_i > 2.56 \end{cases} \quad (6)$$

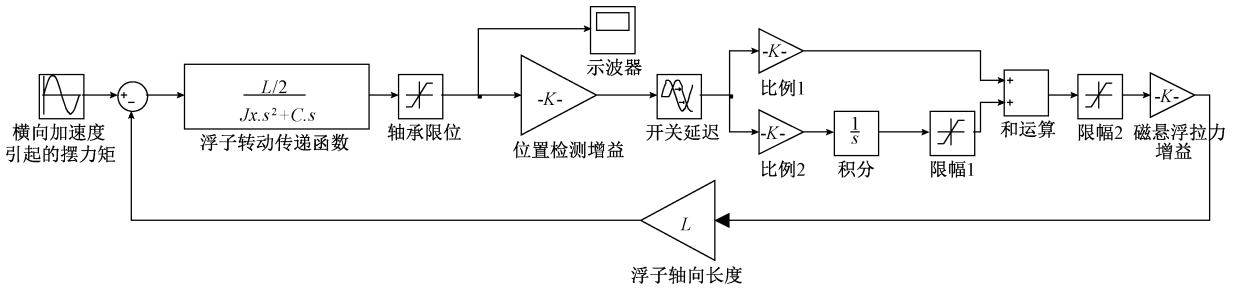


图7 浮子动力学仿真模型

Fig. 7 Simulation model of float dynamics

选取模拟陀螺加速度计在重力场下最常见的测试位置,陀螺加速度计输入轴与水平夹角 30°,此时陀螺加速度计敏感加速度为 0.5g (g 代表重力加速度大小 9.81 m/s<sup>2</sup>), 横向加速度为 0.866g。仿真结果如图 8 所示,磁悬浮控制采用纯比例控制方法时,浮子径向 1 路磁悬浮位置进动周期性波动±0.62 μm,而采用比例积分控制方法后,进动周期性波动±0.24 μm。

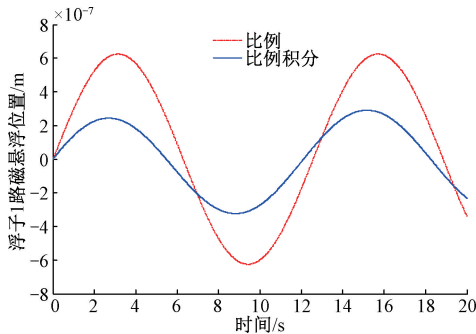


图8 横向加速度 0.866g 和敏感加速度 0.5g 时两种磁悬浮控制方法仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation results of two magnetic suspension control methods at traverse acceleration of 0.866g and sensitive acceleration of 0.5g

其中,  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数,通常取  $K_i = \frac{K_p T}{T_i}$ ,  $T$  为采样时间,  $T_i$  为积分时间常数。

### 4 浮子动力学 Simulink 仿真

结合磁悬浮控制回路,根据式(4)~(6),建立浮子沿径向 1、3 路转动闭环控制系统仿真模型,如图 7 所示。考虑到磁悬浮位置检测到磁悬浮拉力的时间延迟以及电路上各环节开关延迟时间,在仿真模型中增加时间延迟环节。检测位置增益为浮子位置物理量转为数字量的关系。如图 7 所示的磁悬浮比例积分控制模型,只需将比例 2 和积分断开即可变成磁悬浮纯比例控制仿真模型。通过设置  $M_{x1}$  给系统输入正弦摆力矩,正弦摆力矩的幅值为横向加速度,正弦摆力矩的周期为敏感加速度产生的进动周期。

为进一步验证大横向加速度条件下磁悬浮比例积分控制方法抑制浮子周期性摆动的效果,设置陀螺加速度计横向加速度为 3g,敏感加速度为 1g,仿真结果如图 9 所示,磁悬浮控制采用纯比例控制方法时,浮子径向 1 路磁悬浮位置进动周期性波动±2.2 μm,而采用比例积分

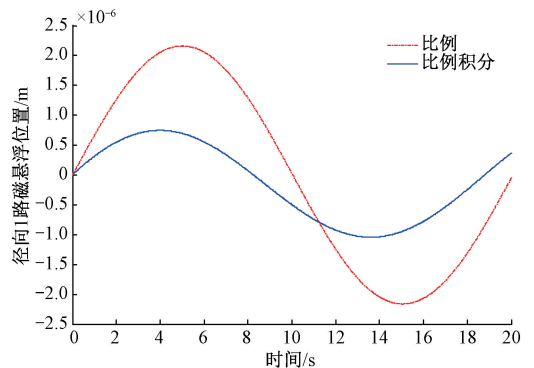


图9 横向加速度 3g 和敏感加速度 1g 时两种磁悬浮控制方法仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of simulation results of two magnetic suspension control methods at traverse acceleration of 3g and sensitive acceleration of 1g

控制方法后,进动周期性波动 $\pm 0.74 \mu\text{m}$ 。通过 Simulink 仿真验证,磁悬浮控制方法采用比例积分方法后,在陀螺加速度计受到横向加速度输入时,能够大幅抑制横向过载引起的浮子沿输入轴的进动周期性摆动。

## 5 试验验证

为了验证磁悬浮比例积分控制方法的正确性以及相比纯比例控制方法能够有效抑制浮子周期性摆动,本文设计了小横向过载的重力场试验和大横向过载下的离心机试验。

在重力场试验中,使用高精度程控多齿分度头(规格型号为 ZDFT-720)控制陀螺加速度计与水平面的夹角,分度头最大分度间隔误差 $<0.4''$ 。选取陀螺加速度计在重力场下最常见的测试位置,陀螺加速度计输入轴与水平夹角 $30^\circ$ ,此时陀螺加速度计敏感加速度为 $0.5\text{g}$ ,横向加速度为 $0.866\text{g}$ 。如图 10 所示,磁悬浮控制系统采用磁悬浮纯比例控制方法时,径向 1、3 路磁悬浮位置进动周期性波动幅度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ,采用比例积分控制方法后,径向 1、3 路磁悬浮位置进动周期性波动幅度为 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ ,表明了所提方法在重力场下抑制效果明显。

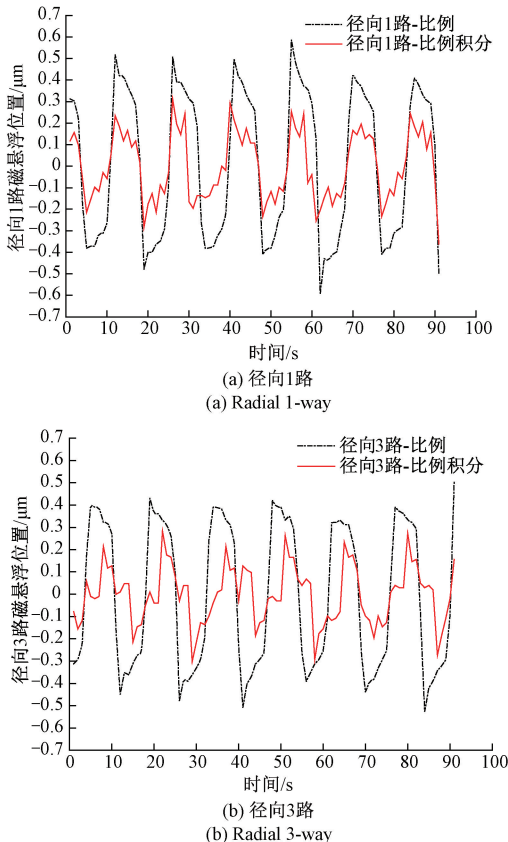


图 10 横向加速度 $0.866\text{g}$ 和敏感加速度 $0.5\text{g}$ 时两种磁悬浮控制方法实测结果对比

Fig. 10 Test results comparison of two magnetic suspension control methods at traverse acceleration of  $0.866\text{g}$  and sensitive acceleration of  $0.5\text{g}$

在离心机试验中,共设计了 2 种试验,第 1 种是恒定敏感加速度和恒定横向加速度,第 2 种是变敏感加速度和变横向加速度。本研究使用了摆臂长度为 $R$ 的精密离心机,陀螺加速度计水平安装在摆臂一端,即陀螺加速度计与离心机主轴(转轴)的距离为 $R$ ,陀螺加速度计输入轴 $Ox_1$ 与摆臂轴线成一定的夹角 $\theta$ ,这样离心机带动陀螺加速度计进行绕离心机主轴的圆周运动,离心机转速为 $\omega$ 。由离心加速度 $a_l$ 的投影正交分量 $a_{l1}$ 、 $a_{l2}$ 分别作为陀螺加速度计的敏感加速度和横向加速度。可知陀螺加速度计敏感加速度和横向加速度随着离心机转速 $\omega$ 同步恒定或同步变化。当然必须将重力加速度 $1\text{g}$ 考虑在内,与离心机产生的横向加速度 $a_{l2}$ 作矢量和,得到陀螺加速度计的综合横向加速度 $a_{l3}$ ,如式(7)所示。

$$\begin{cases} a_l = R\omega^2 \\ a_{l1} = R\omega^2 \cos \theta \\ a_{l2} = R\omega^2 \sin \theta \\ a_{l3} = \sqrt{(R\omega^2 \sin \theta)^2 + 1} \end{cases} \quad (7)$$

第 1 种试验,离心机转速恒定,陀螺加速度计的敏感加速度恒定为 $0.313\text{g}$ ,横向加速度为 $3.15\text{g}$ ,如图 11 所示,磁悬浮控制系统采用磁悬浮纯比例控制方法时,径向

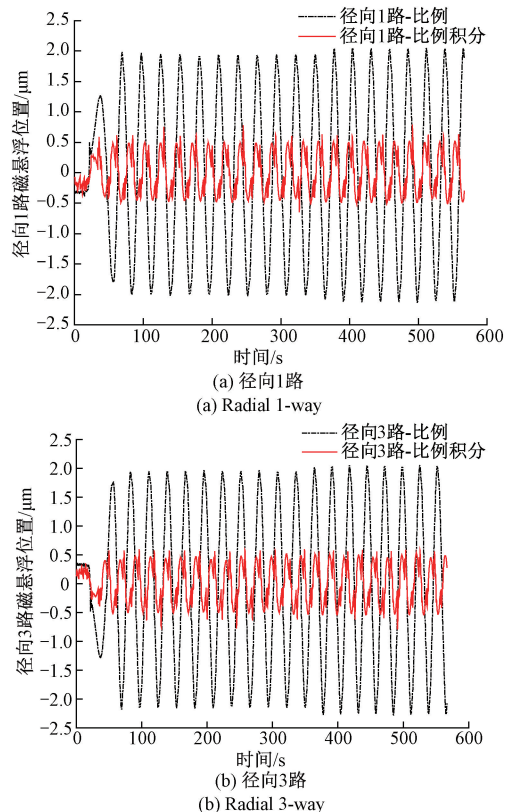


图 11 横向加速度 $3.15\text{g}$ 和敏感加速度 $0.313\text{g}$ 时两种磁悬浮控制方法实测结果对比

Fig. 11 Test results comparison of two magnetic suspension control methods at traverse acceleration of  $3.15\text{g}$  and sensitive acceleration of  $0.313\text{g}$

1、3路磁悬浮位置进动周期性波动幅度为 $\pm 2\ \mu\text{m}$ ,采用比例积分控制方法后,径向1、3路磁悬浮位置进动周期性波动幅度为 $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ ,表明了所提方法在恒定横向过载下抑制效果相当显著。

第2种试验,离心机转速从0升速至一档,保持1 min后升速至二档,保持1 min后降速至0。在该试验中,陀螺加速度计的敏感加速度从0g变化至2.12g再变化至5g再变化至0g,横向加速度同步从0g变化为3.15g再变化至5.05g再变化至0g,该试验过程包括了恒定加速度和恒定横向加速度。如图12所示,在敏感加速度和横向加速度变大或变小的动态条件下,相当于斜坡激励,磁悬浮控制系统采用磁悬浮比例积分控制方法,径向1、3路磁悬浮位置进动周期性波动幅度缩小了50%左右,表明了本文提出的方法在横向过载变化的条件下同样表现出对浮子周期性摆动具有很好的抑制效果。

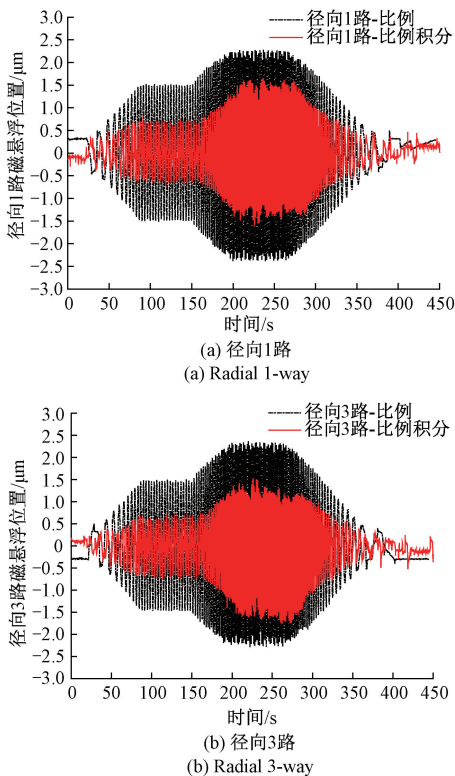


图12 横向加速度和敏感加速度变化时两种磁悬浮控制方法实测结果对比

Fig. 12 Test results comparison of two magnetic suspension control methods when both traverse acceleration and sensitive acceleration vary

## 6 结 论

摆式积分陀螺加速度计受到横向加速度作用,浮子偏心质量块产生摆力矩驱动浮子运动,当存在敏感加速

度输入时,陀螺加速度计外框架进动使得摆力矩呈现与外环角度相关的正弦变化,使得浮子来回摆动。磁悬浮系统径向1、3路出磁悬浮拉力克服浮子摆动,并考虑存在浮液阻尼和浮子转动惯量,从而建立起浮子径向动力学模型。将浮子径向动力学模型与磁悬浮控制系统相结合,开展Simulink仿真和实物试验验证,在敏感加速度和横向加速度均恒定或者均变化的情况下,本研究提出的磁悬浮比例积分控制方法比纯比例控制方法能够更好地抑制浮子摆动。浮子摆动越小,软导线弹性、浮液流动等干扰力矩作用越小,仪表输出误差越小,可提高摆式积分陀螺加速度计的精度。磁悬浮比例积分控制方法实现简单,容易工程化,可推广应用。

## 参考文献

- [1] 王巍. 惯性技术研究现状及发展趋势[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 723-729.  
WANG W. Status and development trend of inertial technology[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 723-729.
- [2] 沈玉芄, 杨文钰, 朱鹤, 等. 2020年国外惯性技术的发展与展望[J]. 航天导弹, 2021(4): 7-12.  
SHEN Y P, YANG W Y, ZHU H, et al. Development and prospect of foreign inertial technology in 2020[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(4): 7-12.
- [3] 王巍, 孙文利, 李亮, 等. 摆式积分陀螺加速度计技术发展综述[J]. 导航与控制, 2023, 22(5): 12-15, 103.  
WANG W, SUN W L, LI L, et al. Review on the development of pendulous integrating gyro accelerometer technology[J]. Navigation and Control, 2023, 22(5): 12-15, 103.
- [4] 孙鹏飞, 严小军, 赵晓萍. 磁悬浮定中偏差对陀螺加速度计精度的影响[J]. 导航与控制, 2010, 9(1): 51-56, 46.  
SUN P F, YAN X J, ZHAO X P. The effect of magnetic suspension regulation error to PIGA precision [J]. Navigation and Control, 2010, 9(1): 51-56, 46.
- [5] 贺宇, 孙文利, 冯毅博. 三浮陀螺加速度计浮子六自由度运动分析[J]. 导航与控制, 2021, 20(6): 45-52, 103.  
HE Y, SUN W L, FENG Y B. 6-DOF motion analysis of PIGA floater[J]. Navigation and Control, 2021, 20(6): 45-52, 103.
- [6] 王雪. 三浮陀螺仪磁悬浮支承技术研究[D]. 北京: 北京航天控制仪器研究所, 2013.  
WANG X. Research on magnetic suspension in three-floated gyroscope[D]. Beijing: Beijing Institute of Aerospace Control Devices, 2013.

- [ 7 ] 王雪,朱志刚,沙立. 三浮陀螺有源磁悬浮系统力学模型分析[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 94-98.  
WANG X, ZHU ZH G, SHA L. Mechanics model analysis of active magnetic suspension system in three-floated gyroscope[J]. Journal of China Inertial Technology, 2012, 20(1): 94-98.
- [ 8 ] 徐一民,邓忠武,王雪. 三浮陀螺仪磁悬浮控制系统优化设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(9):90-93.  
XU Y M, DENG ZH W, WANG X. Optimization design of three-floated gyroscope magnetic suspension control system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(9):90-93.
- [ 9 ] 张静,徐林. 磁悬浮系统的模糊自适应PID控制[J]. 计算机应用, 2009, 29(z1): 329-331,334.  
ZHANG J, XU L. Fuzzy adaptive PID control in magnetic levitation system [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(z1): 329-331,334.
- [10] 李德才,王智奇,曾元鉴,等. 模糊控制理论在有源磁悬浮系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(2): 214-218, 224.  
LI D C, WANG ZH Q, ZENG Y J, et al. Application of fuzzy control theory in active magnetic suspension system[J]. Journal of China Inertial Technology, 2010, 18(2): 214-218, 224.
- [11] 唐哲. 三浮陀螺有源磁悬浮系统高精度控制技术研究[D]. 北京:中国航天科工集团第二研究院, 2019.  
TANG ZH. Research on high-accuracy control technology of active magnetic suspension system in TFG [D]. Beijing: The Second Academy of CASIC, 2019.
- [12] 吴辽. 高精度三浮陀螺仪有源磁悬浮系统技术研究[D]. 北京:中国航天科工集团第二研究院, 2016.  
WU L. Research on technology of high-accuracy active magnetic suspension system in TFG [D]. Beijing: The Second Academy of CASIC, 2016.
- [13] 吴辽,杨孟兴,王卿,等. 一种提升三浮陀螺标定快速性的磁悬浮结构优化设计[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(2):242-247.  
WU L, YANG M X, WANG Q, et al. An optimal design of magnetic levitation structure for improving calibration speed of three-floated gyroscope [J]. Journal of China Inertial Technology, 2020, 28(2):242-247.
- [14] 李至勇,杨杰,周发助,等. 电磁悬浮系统的改进滑模控制方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(4):87-94.  
LI ZH Y, YANG J, ZHOU F ZH, et al. Improved sliding mode control method for electromagnetic levitation system[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(4):87-94.
- [15] 李卫东,王玮崧,王新屏. 磁悬浮列车简捷鲁棒控制与仿真研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(2): 56-60.  
LI W D, WANG W S, WANG X P. Research on simple and robust control and simulation of maglev train [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(2): 56-60.
- [16] 钟志贤,祁雁英,蔡忠侯,等. 磁轴承用位移传感器差动安装的误差补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10):17-23.  
ZHONG ZH X, QI Y Y, CAI ZH H, et al. Research on the error compensation method for differential installation of displacement sensor for magnetic bearing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10):17-23.
- [17] 张泽宇,李杰,胡陈君,等. 一种适用于高量程加速度计的标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12):45-51.  
ZHANG Z Y, LI J, HU CH J, et al. Calibration method for high range accelerometer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12):45-51.
- [18] ZHOU W K, WANG W M, SUN CH. Optimal calibration method of PIGA's orthogonal poses for gravity field testing [J]. Journal of Sensors, 2023, 2023(1): 7441499.
- [19] 薛连莉,翟峻仪,葛悦涛. 2020年国外惯性技术与回顾[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3):59-67.  
XUE L L, ZHAI J Y, GE Y T. Development and review of foreign inertial technology in 2020 [J]. Navigation Positioning & Timing, 2021, 8(3):59-67.
- [20] 蒋金玲,张晶,朱欣华,等. 硅微谐振式加速度计温度补偿方法研究综述[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1):1-15.  
JIANG J L, ZHANG J, ZHU X H, et al. Review of temperature compensation methods for silicon micro-resonant accelerometers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1):1-15.
- [21] 王巍,牛文韬. 摆式积分陀螺加速度计技术[M]. 北京:中国宇航出版社,2022.  
WANG W, NIU W T. Pendulous integrating gyro accelerometer technology [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2022.
- [22] 周晓俊,凌林本,杨功流,等. 基于结构设计的陀螺加速度计温度系数补偿方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023,31(2): 207-212.  
ZHOU X J, LING L B, YANG G L, et al. Temperature coefficient compensation method of gyro accelerometer based on structure design[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(2): 207-212.



- [23] ZHOU X J, YANG G L, NIU W T, et al. Precise measurement and compensation of the micro product of inertia for float assembly in pendulous integrating gyroscopic accelerometers[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1564.
- [24] ZHOU X J, YANG G L, NIU W T, et al. Analysis and suppression of nonlinear error of pendulous Integrating gyroscopic accelerometer at instrument level[J]. *Sensors*, 2023, 23(3): 1221.
- [25] LIU Y K, YU ZH W, REN SH Q. On pseudo second-order term of pendulous integrating gyro accelerometer calibrated in dual-Axis precision centrifuge [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-9.

### 作者简介



王龙, 2012 年于北京理工大学获得学士学位, 2014 年于北京理工大学获得硕士学位, 现为南京理工大学博士研究生、北京航天控制仪器研究所高级工程师, 主要研究方向为惯性仪表设计。  
E-mail: 415920709@qq.com

**Wang Long** received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2012, and received his M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2014. He is currently a Ph. D. candidate at Nanjing University of Science and Technology. He is a senior engineer at Beijing Institute of Aerospace Control

Devices. His main research interest is inertial instrument design.



李亮, 2003 年于西北工业大学获得学士学位, 2007 年于西北工业大学获得硕士学位, 现为北京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为惯性仪表设计。  
E-mail: 415920709@qq.com

**Li Liang** received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2003, and received his M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2007. He is currently a Ph. D. candidate at Beihang University. His main research interest is inertial instrument design.



朱志刚 (通信作者), 1988 年于西北工业大学获得学士学位, 1991 年于西北工业大学获得硕士学位, 1994 年于西北工业大学获得博士学位, 现为北京航天控制仪器研究所研究员, 主要研究方向为惯性导航系统。  
E-mail: zilan862@sina.com

**Zhu Zhigang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 1988, received his M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 1991, and received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 1994. He is currently a research fellow at Beijing Institute of Aerospace Control Devices. His main research interest is inertial navigation system.