

# 一种柔性锁紧机构的设计与改进

陈为 宋小艳 李发动 路峰

(北京航天发射技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 本文针对某型惯性设备进行升级改造,使其具有在线自标定功能。通过对惯性设备的核心部件 IMU (惯性测量单元) 增加绕水平轴旋转功能的方法可实现惯性设备的在线自标定功能。本文介绍了一种柔性锁紧机构实现水平轴的锁紧和脱开功能,即自标定时锁紧机构脱开,使 IMU 绕水平轴自由回转,自标定结束后锁紧机构进行锁紧,使水平轴可靠锁紧以维持 IMU 姿态稳定。文章对柔性锁紧机构的工作原理和设计计算方法进行了详细说明,经过实际检测,验证了该机构设计的合理性。

**关键词:** 柔性锁紧机构; 惯性测量单元; 自标定

## 0 引言

某型惯性设备不具备在线自标定<sup>[1,2]</sup>功能,标定有效期到期后需要将惯组从工作载台上拆下来,在具有隔振地基的专用精密三轴转台上进行单机标定,标定完成后再装回工作载台并与载台进行系统标定,导致维护成本高且维护周期长。根据客户的实际需求,需要对该型惯性设备进行升级改造,使其具备在线自标定功能,直接在工作载台上进行单机标定,达到缩短标定周期、降低设备维护使用难度和成本的目的。

为此,通过对惯性设备的核心部件 IMU 增加绕水平轴旋转功能的方法,来实现惯性设备的在线自标定功能<sup>[3-5]</sup>。惯性设备自标定时,IMU 能够沿水平轴自由回转,实现多位置转位完成各参数标定工作。自标定完成后进入正常工作状态,水平轴应处于可靠锁紧态。

因此,需要设计锁紧机构<sup>[6,7]</sup>实现水平轴的锁紧和脱开功能,即自标定时锁紧机构脱开,使 IMU 绕水平轴自由回转,自标定结束后锁紧机构锁紧,使水平轴可靠锁紧维持 IMU 姿态稳定。

## 1 锁紧机构的设计与计算

某惯性设备的水平转位装置如图 1 所示。IMU 与水平轴固联,

可以绕水平轴自由转动,锁紧机构安装于基座侧面,其功能是实现自标定状态下顺利脱开,使 IMU 组件可以绕水平轴自由回转,非自标定状态下对水平轴可靠锁紧。锁紧机构在锁紧状态下提供的锁紧力要满足 30g 冲击条件下保证水平轴不发生松动。

锁紧机构初始设计方案如图 2 所示。

在锁紧机构<sup>[8]</sup>中,基座、精密电动机、谐波减速器、螺杆、螺母和锁紧盘沿轴向布置,锁紧盘与螺母固联。锁紧机构由精密电动机提供动力,经谐波减速器减速后,螺杆旋转驱动螺母和驱动锁紧盘沿导向柱直线运动,实现水平轴的锁紧和脱开。

锁紧盘利用四个导向柱进行导向,提高锁紧盘直线运动精度。导向柱外圆柱面与锁紧盘对应的内孔

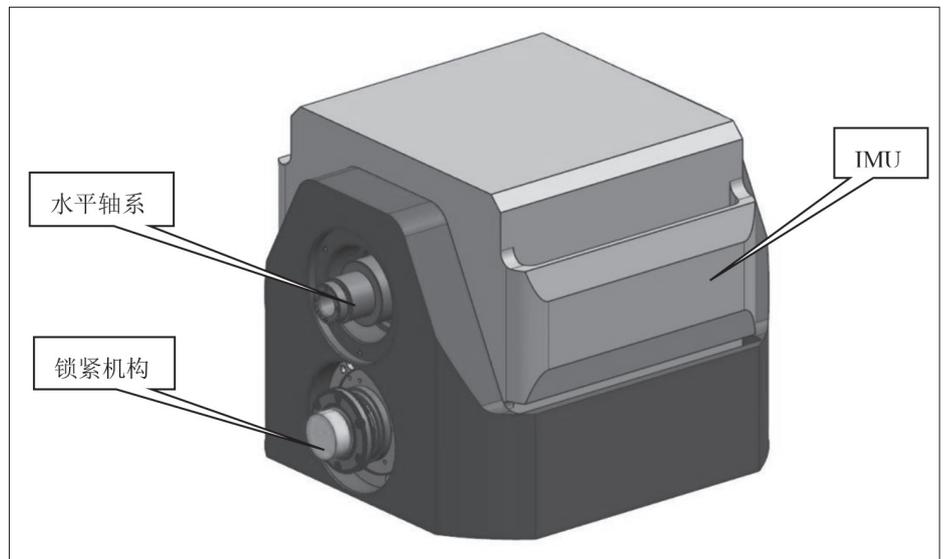


图 1 水平转位装置

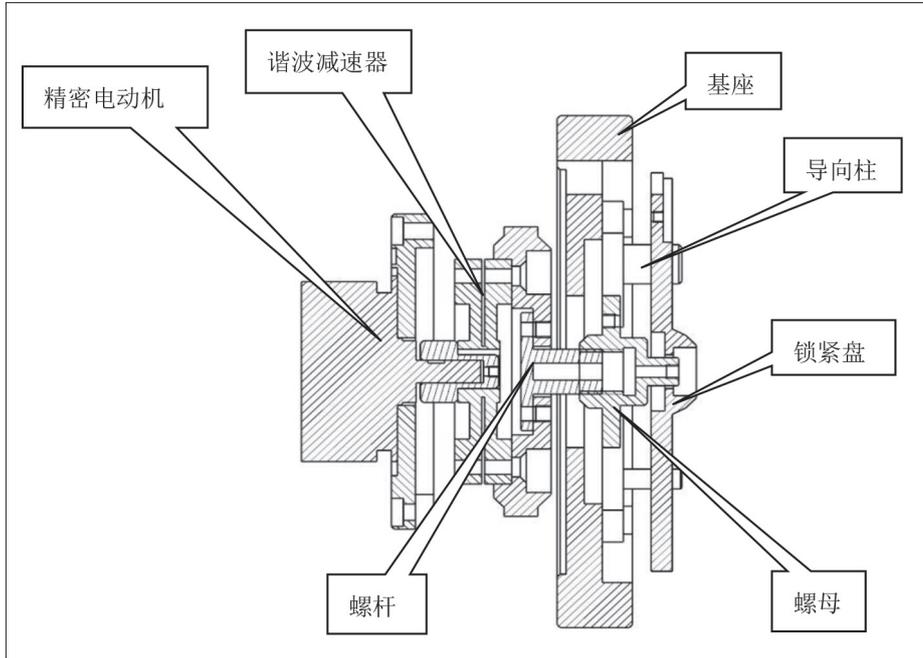


图2 锁紧机构

配加工，保证两者直线运动配合顺畅。

锁紧接触面型由锁紧盘的球头与IMU的圆锥面组成，此结构可以减小脱开力矩，既能保证锁紧又能顺利脱开，避免高低温工况无法脱开的风险。自标定工况下，锁紧盘后退，其球头与IMU上的圆锥面脱离接触，IMU可以自由回转；非自标定工况下，锁紧盘前进，其球头与IMU上的圆锥面接触并压紧实现水平轴锁定。

IMU装配完成后其组合体的重心相对于水平轴回转中心必然存在偏移量，在加速度作用下形成偏心力矩，锁紧机构提供的锁紧力矩应大于组合体绕水平轴的最大偏心力矩才能保证可靠锁紧。组合体偏心力矩可以用仿真计算的方法初步确定，实物装配完成后可以通过测量取得实际偏心力矩。

IMU组合体的偏心力矩  $M_e$  可以控制在不大于  $200g \cdot cm$  的范围内，换算成公制单位后偏心力矩  $M_e$  为  $0.0196Nm$ ，则其  $30g$  冲击工况下最大偏心力矩为  $M_e(30g)$ ：

$$M_{e(30g)} = 30 \times M_e = 30 \times 0.0196 = 0.588Nm$$

将  $30g$  冲击工况下最大偏心力矩除以锁紧机构全系统的减速比即为需要精密

电动机提供的最小锁紧力矩  $M_d$ 。本系统谐波减速器减速比为  $64$ ，则精密电动机需要提供的最小力矩  $M_d$  为：

$$M_d = M_{e(30g)} \div 64 = 0.588 \div 64 = 0.0092Nm$$

此外，必须考虑高低温工况条件下的阻力变大的因素，精密电动机提供的力矩需要具有一定得余量，通常取安全系数不小于  $2$ 。本锁紧机构的精密电动机连续堵转力矩为  $0.0233Nm$ ，则实际安全系数为  $2.5$ ，可以满足水平转位装置锁紧的需求。

## 2 锁紧机构的改进

### 2.1 现有锁紧机构存在的问题

现有锁紧机构存在的问题主要有铅垂方向锁紧误差和水平方向锁紧误差两种。

#### 2.1.1 铅垂方向锁紧误差

锁紧过程中要求锁紧盘球头与IMU圆锥面线接触才能保证锁紧可靠，但是在锁紧机构与IMU装配时发现在铅垂方向锁紧盘球头与IMU圆锥面单侧点接触而不是线接触。经过分析发现相关机械零件存在公差累积，导致锁紧盘球头与IMU圆锥面作为最后配合节点在铅垂方向体现出累积误差，进而导致两者配合偏向一侧成为单侧点接触，存在锁紧不可靠的危险，如图3所示。

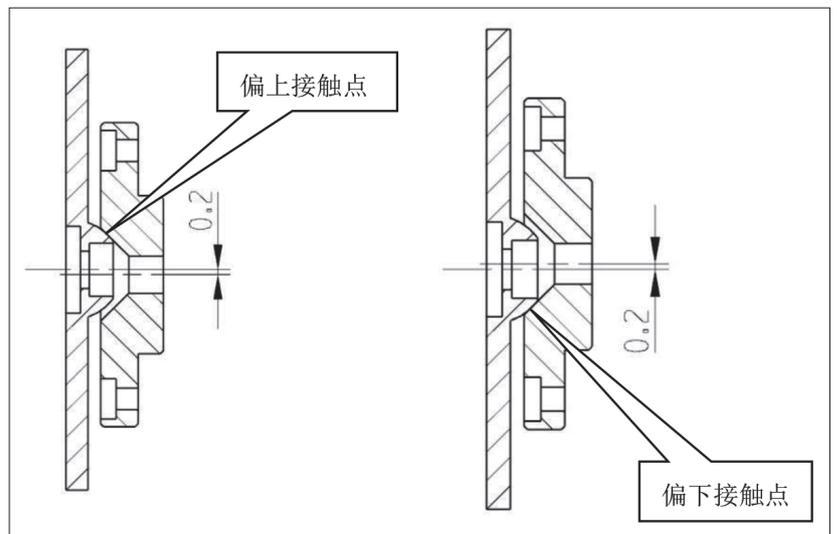


图3 锁紧盘球头与IMU圆锥面偏移图

2.1.2 水平方向锁紧误差

锁紧机构用脉冲数来控制电动机的转数，从而使锁紧盘产生线性位移。实际调试过程中发现设定相同的锁紧脉冲参数后，有些锁紧机构无法顺利脱开，高、低温工况下尤其明显。经过分析，发现由于机械零件误差累积导致不同的锁紧机构与IMU配合时在锁紧方向上存在线性尺寸误差，从而在相同脉冲参数下出现未锁紧或者过度锁紧无法脱开现象，高、低温工况时附加机械件因热胀冷缩产生的变形后此缺点会被放大。

2.2 采取的改进措施

2.2.1 铅垂方向锁紧误差改进措施

在铅垂方向上，锁紧机构存在两个配合尺寸链  $H_1$  和  $H_2$ ，如图4所示。尺寸链  $H_1$  为水平回转轴中心到IMU圆锥面轴线的距离，尺寸链  $H_2$  为水平回转轴中心到锁紧机构锁紧盘球头轴线的距离。经过计算，尺寸链  $H_1$  公差范围为  $94 \pm 0.1\text{mm}$ ，尺寸链  $H_2$  公差范围为  $94 \pm 0.1\text{mm}$ ，两个尺寸链闭合时最大偏差为  $0.2\text{mm}$ ，即在铅垂方向上内框圆锥面轴线与锁紧盘球头轴线最大偏移量为  $0.2\text{mm}$ ，导致圆锥面与球头为点接触，接触点或者在上方或者在下方，存在锁紧不可靠因素。

为了消除这一不可靠因素，对锁紧盘球头进行改进，在球头铅垂方向上的两侧各铣去一部分实体  $A$ ，消除锁紧盘球头与内框圆锥面在铅垂方向上端和下端的接触点，使锁紧盘球头与IMU圆锥面在水平方向的两侧形成可靠的线接触，从而实现锁紧机构对内框和IMU组合体可靠锁紧，如图5所示。

锁紧盘球头两侧铣去实体  $A$  的尺寸计算需要考虑两方面的因素：第一方面因素为IMU圆锥面轴线、锁紧盘轴线相对共同基准的尺寸链公差  $H_1$ 、 $H_2$ ，针对第一方面因素，球头两侧铣去实体  $A_1$  的尺寸应大于  $H_1$ 、 $H_2$  各自绝对值的和，此外考虑需要留有安全余量应该取2以上的安全系数，即：

$$A_1 > 2(|H_1| + |H_2|)$$

第二方面因素为锁紧盘球头对IMU圆锥面的锁入深度  $L$ ， $L$  值的大小根据实际工况确定。通过结构尺寸匹配必须保证球头达到锁紧深度  $L$  时在铅垂方向球头不与圆锥面接触并留有间隙  $G$  ( $G$  值建议不小于  $0.2$ )，从而得到球头两侧铣去实体尺寸  $A_2$ ，如图6所示。

综合第一方面因素和第二方面因素，球头两侧铣

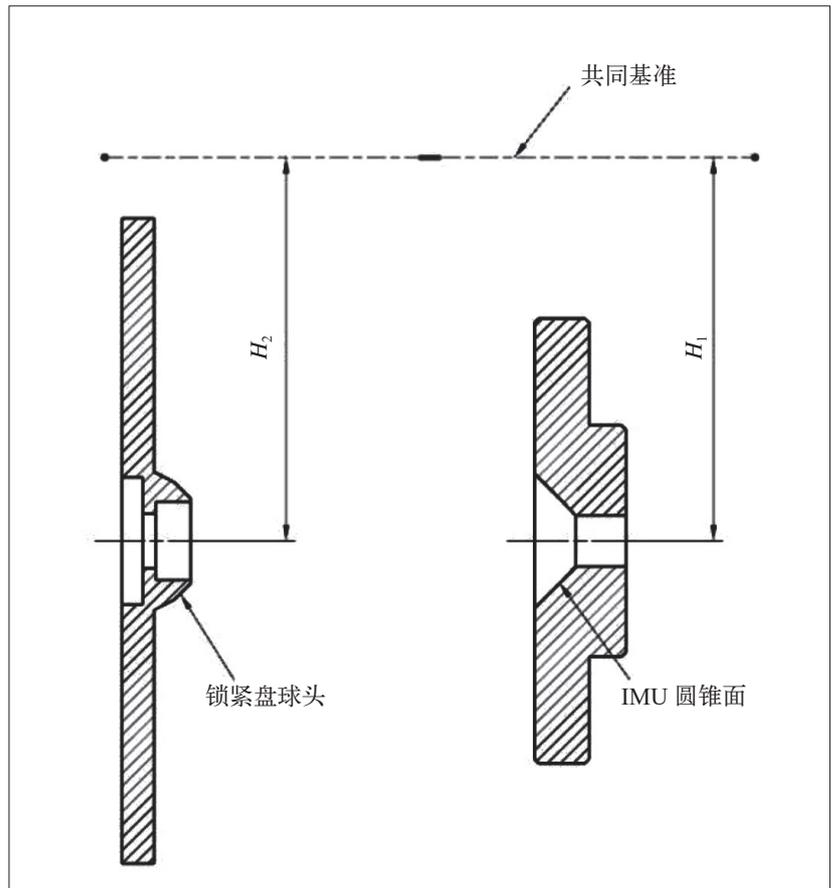


图4 铅垂方向尺寸配合

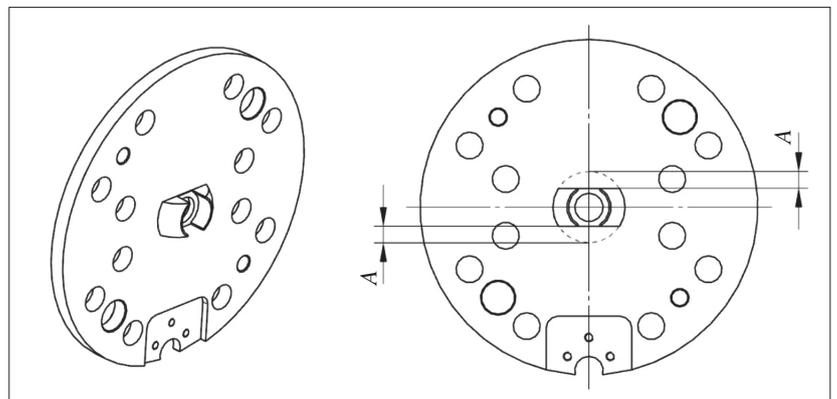


图5 改进的锁紧盘

去实体 A 的最终尺寸取  $A_1$ 、 $A_2$  两者中绝对值的最大值。

### 2.2.2 水平方向锁紧误差改进措施

在锁紧盘和螺母之间设置碟簧<sup>[9]</sup>，电动机提供的锁紧力矩通过碟簧形变传递至锁紧盘，将锁紧盘球头压紧在 IMU 锥面上，从而实现 IMU 组合体的锁紧，碟簧如图 7、图 8 所示。

通过试验验证，进行碟簧型式的选择，整体式碟簧、两开片式碟簧刚度过大导致电动机体积庞大而无法实现锁紧机构在体积上的要求。四开片以上型式碟簧刚度偏小，产生足够的锁紧力需要的变形量过大，严重影响惯组尺寸。综合考虑碟簧刚度和惯组尺寸，确定碟簧为内部整体外端三开型式。

通过设计碟簧悬臂长度和变形量来改变压紧力，以 ANSYS Workbench 作为仿真分析平台对碟簧的厚度和悬臂长度进行优化分析，使其在屈服极限内对锁紧盘施加稳定的压紧力，经过数次拟合逼近，最终确定碟簧厚度为 0.6mm。

对于碟簧材料的选择经过了两轮设计和试验。第一轮设计采用常用的弹性材料为 65Mn 钢带，试验过程中发现同等尺寸该材料制成的碟簧刚度过大，对锁紧、脱开的力矩缓冲作用很弱。此外，为了获得一定的弹性必须对加工后的碟簧进行热处理，而 65Mn 制成的碟簧热处理后变形量很大，而且耐腐蚀能力差。

针对 65Mn 的缺点，将碟簧材料改为铍青铜，该材料制成的碟簧刚度适中，热处理变形小，经过钝化处理耐腐蚀能力较强，缺点是成本高。综合考虑性能和成本，确定碟簧材料为铍青铜。

由于簧片的存在，通过其自身的形变可以补偿水平轴线方向零件的尺寸累积误差，从而使得用相同的电气参数可以适应具有不同机械误差的水平转位装置，省去大量的单台电气参数调试工作，对提高批生产效率大有帮助。

设置碟簧后，锁紧动作和脱开动作是逐步加力过程，从而在高低温工况时锁紧盘与内框锥面之间被

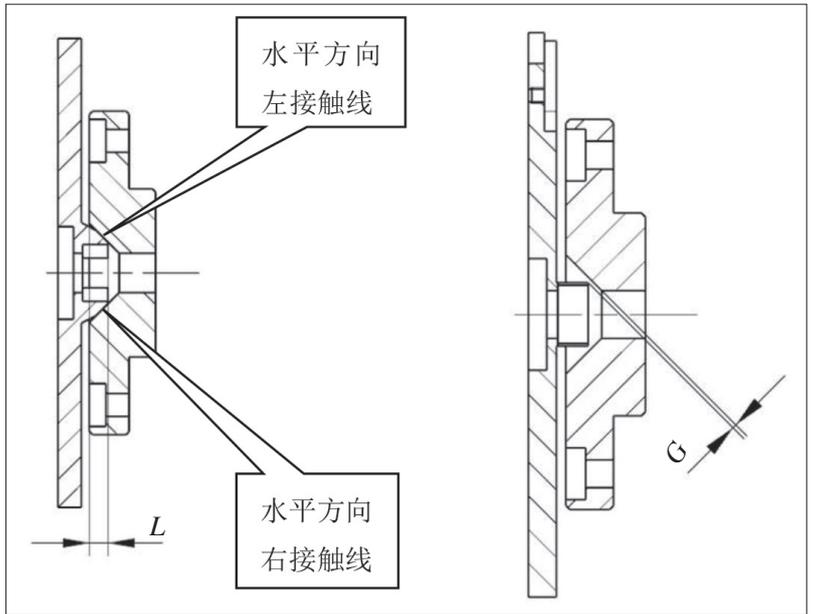


图 6 改进后锁紧盘球头与 IMU 圆锥面配合图

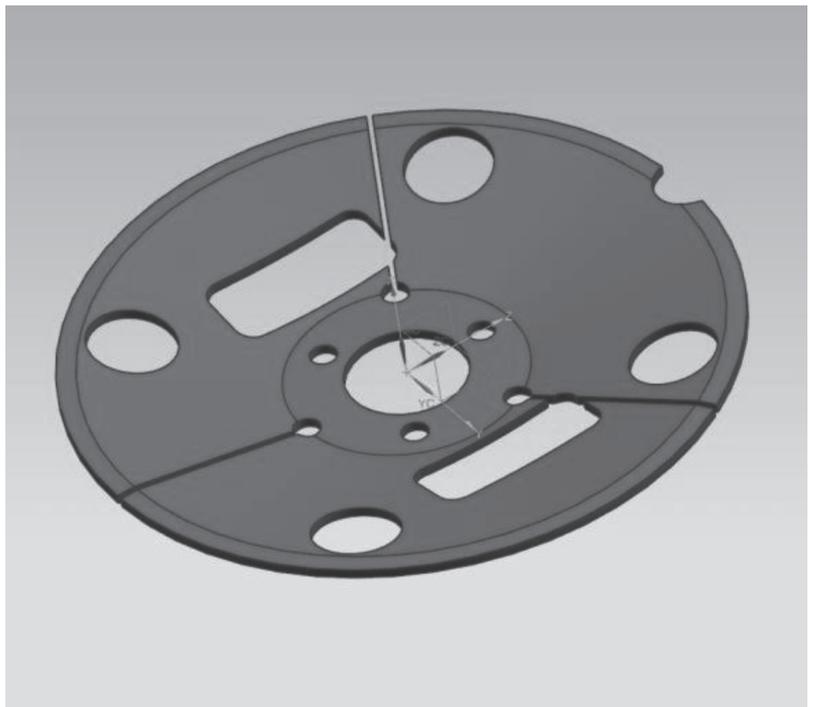


图 7 碟簧

附加因机械件热胀冷缩产生的额外应力后，仍然能够顺利脱开。

经过改进的锁紧机构在铅垂方向锁紧对中准确锁紧动作可靠，在水平方向上锁紧力、脱开力稳定，批次产品调试参数统一，高低温调试参数与常温调试参数统一，降低了调试工作难度，使得调试效率大幅度提高，达到了改进的预期效果。

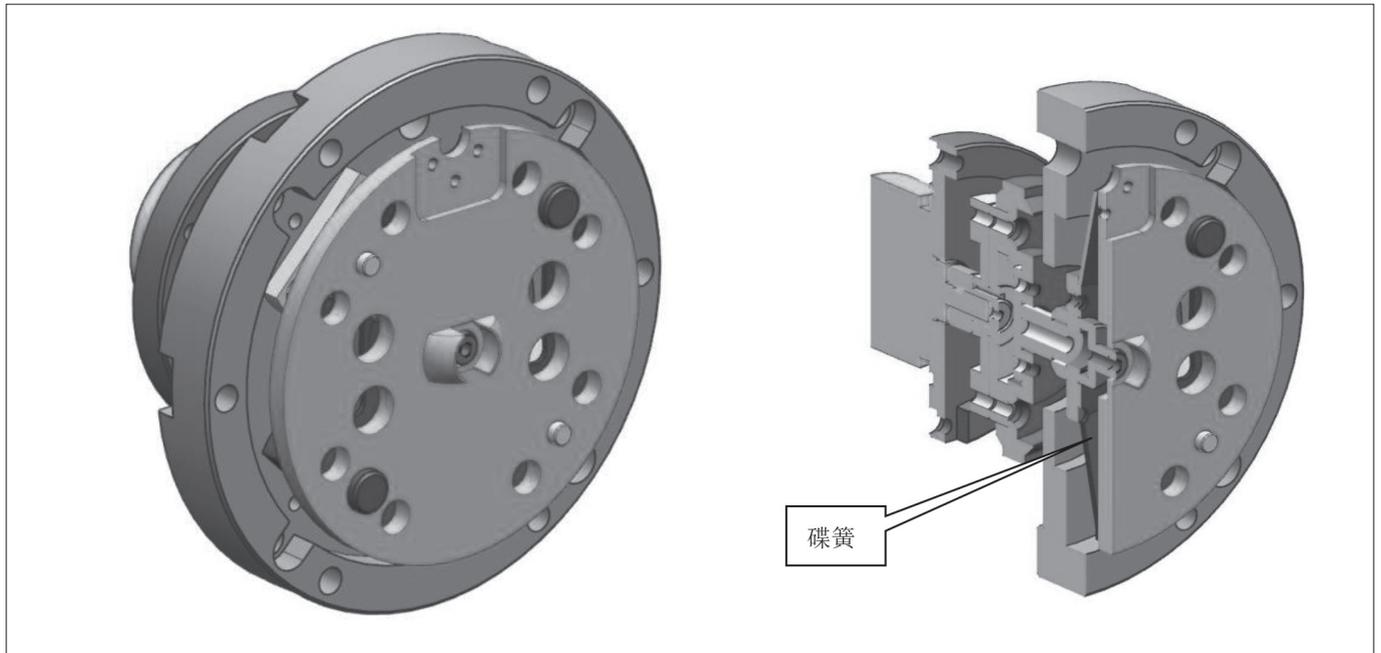


图8 改进后的锁紧机构

### 3 试验验证

#### 3.1 试验目的

通过试验来验证改进后的锁紧机构的设计合理性和性能稳定性。

#### 3.2 试验方法

改进后的锁紧机构在试验工装上进行常温锁紧、脱开试验，试验次数 2000 次，未发生无法锁紧、无法脱开的故障。锁紧机构装入整机进行高低温试验，低温  $-40^{\circ}\text{C}$  保温 4h 后，进行 1000 次锁紧、脱开试验未发生故障；高温  $+60^{\circ}\text{C}$  保温 4h 后，进行 1000 次锁紧、脱开试验未发生故障。

锁紧机构随整机在指定的振动谱的条件下进行振动试验，监测水平轴角度传感器输出值，试验结果证明水平轴角度变化量不大于  $15''$ ，锁紧机构在振动条件下锁紧可靠。

锁紧机构随整机进行 30g 冲击试验，监测水平轴角度传感器输出值，试验结果证明水平轴角度变化量不大于  $20''$ ，锁紧机构在 30g 冲击条件下锁紧可靠。

#### 3.3 试验结果

试验证明，改进后的锁紧机构可以实现在常温、低温和高温工作条件下能够正常锁紧和脱开，在振动、冲击工作条件下能够对水平轴可靠锁紧，满足设计要求。

### 4 结语

通过对锁紧盘球头进行改进，在球头铅垂方向上的两侧各铣去一部分实体 A，消除锁紧盘球头与内框圆锥面在铅垂方向上端和下端的接触点，使锁紧盘球头与 IMU 圆锥面在水平方向的两侧形成可靠的线接触，从而实现锁紧机构对 IMU 组合体的可靠锁紧。

锁紧机构增加簧片后，实质上是将刚性锁紧转变为柔性锁紧，使相同的锁紧参数适应产品累积尺寸误差，对产品批产节省调试时间降低调试难度意义重大；使锁紧力逐步施加和释放保证顺利锁紧和脱开，能吸收高低温工况下结构件热胀冷缩引起的附加应力，从而有效地吸收环境振动冲击，保证可靠锁紧。

试验证明，改进后的锁紧机构具有锁紧、脱开功能稳定及可靠性高等优点，对后续锁紧机构的设计具有一定的借鉴意义。

### 参考文献：

- [1] 王斌. 一种惯组系统自标定与自动化测试方案的设计 [J]. 九江学院学报：自然科学版, 2020, 35(3):18-20.
- [2] 张洁琦, 黄帅. 一种飞行器惯组单轴自标定装置 [J]. 黑

(下转第 33 页)

项目。项目名称：白酒风味特征与安全性评价及其应用；项目编号：FK2021-WB06。

#### 参考文献：

- [1] 程伟, 吴丽华, 徐亚磊, 等. 浓香型白酒酿造微生物研究进展 [J]. 中国酿造, 2014, 33(1):1-4.
- [2] 沈怡方. 白酒生产技术全书 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998:54-74.
- [3] 余乾伟. 传统白酒酿造技术 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014:13.
- [4] 曹敬华, 陈萍, 杨林, 等. 传统白酒生产的现代化改造及新技术 [J]. 酿酒, 2021, 48(4):19-23.
- [5] 谢永文, 肖曙光, 谢永俊, 等. 论传统白酒酿造向机械智能化酿造设备成套生产线转型的必要性 [J]. 酿酒科

技, 2014, 235(01):63-64.

- [6] 胡开礼. 机械化小曲白酒酿造工艺研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [7] 宋书玉, 赵建华. 中国白酒机械化酿造之路 [J]. 酿酒科技, 2010, 197(11):99-104.
- [8] 余乾伟. 传统白酒酿造技术 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2014:13.
- [9] 张健, 李波, 程平言, 等. 酱香型白酒制酒机械化生产试验的研究 [J]. 中国酿造, 2018, 37(12):148-153.
- [10] 周金虎. 论传统白酒生产机械化智能化设备 [J]. 酿酒, 2017, 44(4):21-24.

**作者简介:** 杨牢记(1976.05-), 男, 安徽亳州人, 本科, 工程师, 研究方向: 白酒机械设计与应用、企业安全管理等。

#### (上接第28页)

- 龙江科技信息, 2018(18):46-47.
- [3] 雷旭亮, 陆煜明, 武雨霞, 等. 一种激光捷联惯组系统级在线自标定系统及方法:CN201810430381.5[P]. 2020-07-14.
- [4] 刘雪锋. 一种旋转调制惯导用转位机构的研究和实现 [J]. 黑龙江科学, 2022, 13(18):45-47.
- [5] 赵晓伟, 孙谦, 李宏, 等. 一种车载激光捷联惯组免拆卸标定方法 [J]. 导航与控制, 2016(1):17-22.
- [6] 汤继强, 赵韶璞, 王阔. 磁悬浮控制力矩陀螺锁紧机构可靠性设计及优化 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(3):597-605.

- [7] 关福州, 王俊. 机械式精密锁紧机构的设计与分析 [J]. 金属加工(冷加工), 2013(6):41-42.
- [8] 孙桓, 傅则绍. 机械原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1994:558-581.
- [9] 徐峰, 李庆祥. 精密机械设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005:416-419.

**作者简介:** 陈为(1978.10-), 男, 汉族, 河北唐山人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 精密机械设计。