

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0064

被动式半捷联稳定平台抗高过载结构设计*

魏晓凯¹, 李 杰^{1,2}, 郑 涛¹, 张 樾¹, 冯凯强¹, 钱海宁³

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051;

3. 淮海工业集团有限公司, 山西 长治 047100)

摘要: 针对制导炮弹内部半捷联稳定平台在只有轴承承担高过载时, 轴承容易被破坏的问题, 设计一种基于对顶半球的半捷联稳定平台抗高过载结构。以半捷联稳定平台工作原理和抗高过载设计要求为基础, 设计了基于对顶半球的抗高过载结构, 选择所用材料, 进行有限元仿真分析; 最终制造出该结构并进行地面半物理试验验证。仿真与试验结果表明, 半捷联稳定平台在受到高过载时, 该结构能起到有效的防护作用, 大大减小了轴承的轴向受力, 保证了轴承的正常运转, 可以确保稳定平台的有效测量。惯性测量系统稳定可靠工作时所承受的过载可达 11 000g, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 半捷联稳定平台; 对顶半球; 抗高过载; 结构设计; 有限元分析

中图分类号: O389; O39 **国标学科代码:** 13025 **文献标志码:** A

由于大部分制导炮弹在发射与飞行过程中往往会受到巨大的过载作用, 其发射过载可达上万 g, 并且弹载空间狭窄、旋转角速率较大, 因此要求用于这种场合作为核心器件的微机电惯性测量单元 (MEMS-IMU) 必须具有体积小和环境适应能力强等特点^[1-2]。然而, 现有的捷联式惯性测量系统无法在弹体高转速高过载环境下实现足够的测量精度; 传统的平台式惯性测量系统体积较大、抗过载性能差、成本高, 也无法在口径较小、发射过载较大、成本较低的制导炮弹中发挥作用。

针对解决制导炮弹高过载环境下的测试问题, 各国学者进行了相关的研究工作, 目前可以应用于高速滚转的大过载炮弹中的制导方式有捷联无陀螺 INS、地磁导航系统以及这两种系统的组合。这些系统具有较强的抗过载性能, 但测量精度较差, 并且地磁导航系统还容易受到来自外界环境的干扰。另外, 可以应用于火箭弹上的惯性导航方案的有由伺服电机提供的稳定平台方案。这种方案由于有伺服电机的引入而无法承受较大的过载, 无法应用于发射过载较大的炮弹上。现有的高过载环境下惯性测量研究主要集中在电路设计、器件设计、测试标定及误差补偿等方面, 对抗高过载惯性测量结构设计方法的研究和分析相对较少^[3]。

以往关于弹载惯性测量试验研究无法较好的解决高过载与有效测量的矛盾。为此, 针对发射高过载的恶劣弹载环境, 结合高过载弹药的测试需求, 本文介绍一种结构独特的被动式半捷联稳定平台, 并在此基础上设计一种基于对顶半球的被动式半捷联稳定平台抗高过载结构, 以进一步增强弹载环境下稳定平台的稳定性, 提高抗干扰与抗过载能力; 对新型结构进行分析, 验证该结构对 MEMS 惯性传感器提供的测试环境的稳定性, 及其对惯性测量系统测试精度的影响, 为被动式半捷联稳定平台在常规弹药中的应用提供依据。

* 收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51575500, 50905169); 国防基础科研项目 (B3320132012); 武器装备探索研究项目 (7131017); 山西省“1331 工程”

第一作者: 魏晓凯 (1992—), 男, 博士研究生, weixiaokai1128@163.com;

通信作者: 李 杰 (1976—), 男, 博士, 教授, Lijie@nuc.edu.cn。

1 被动式半捷联稳定平台组成及工作原理

1.1 被动式半捷联稳定平台的组成

被动式半捷联稳定平台是用来搭载惯性测量传感器件的一种机械装置,主要由内筒与轴承结构两大部分组成,图 1 为被动式半捷联稳定平台组成原理图。其中,内筒部分集成有惯性测量组合单元(MIMU)、采集存储系统及配重三部分,轴承结构部分起着支撑内筒的作用,实现了内筒与弹丸在滚转轴方向上的连接。

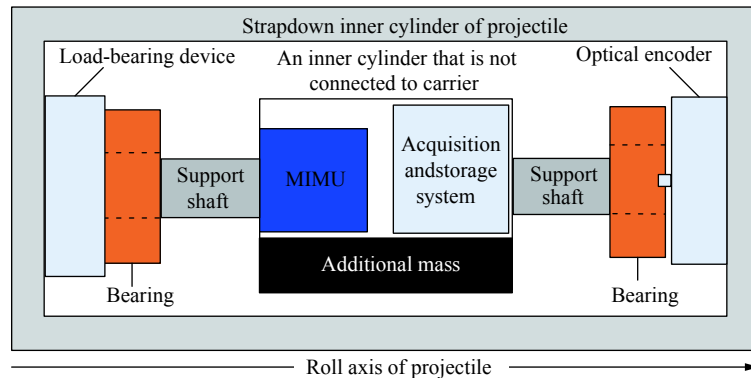


图 1 被动式半捷联稳定平台组成原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the semi-strapdown roll stability platform

1.2 被动式半捷联稳定平台工作原理

被动式半捷联稳定平台的设计利用了重力作用下的复摆运动原理。其核心是采用了配重质量块偏心安装的结构获得重力回复力矩来平衡由弹体的滚转运动对平台引起的摩擦力矩从而让平台达到稳定状态^[4]。

在弹体内部将微惯性测量组合(MIMU)安装在不与载体固连的半捷联内筒中,内筒建立一个复摆式的质量偏心结构,前后侧利用轴承连接平台外部结构。如图 2 所示为半捷联稳定平台等效运动图,弹体在空中高速滚转时,轴承对内筒产生摩擦力矩,平台内筒部分利用配重质量块由于重力产生的回复力矩使平台在滚转轴方向上保持稳定,从而隔离了外部的高速滚转运动,平台在重力回复力矩与轴承摩擦力矩共同作用下,绕滚转轴做复摆运动^[5]。此时平台与弹体滚转轴保持隔离,在俯仰与偏航方向仍和弹体保持捷联。

在靠近弹尾一端设计有炮弹发射时保护平台的过载承载装置,其在炮弹发射瞬间承受内筒受到的向后冲击力。平台内部安装有微惯性测量组合(MIMU)和解算模块,平台和弹体之间相对转速信息通过光电编码器测出并由无线传输装置传送至平台内部的解算模块,从而解算出弹体的滚转角速率以及滚转角^[6],避免弹体滚转角速率直接作用在半捷联稳定平台上,等效减小了高旋弹载环境对平台内部滚转轴向陀螺的量程要求,从而实现姿态角高精度解算的目的。

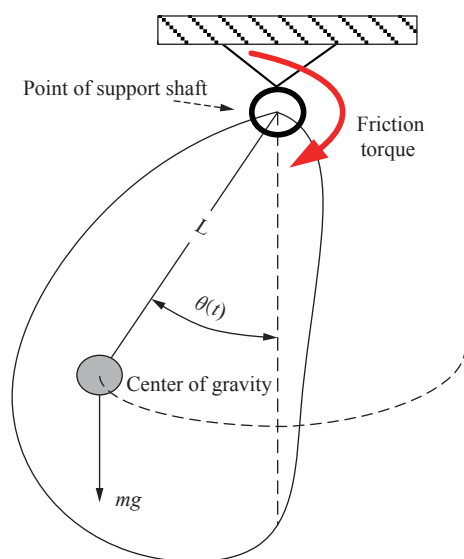


图 2 半捷联稳定平台运动简图

Fig. 2 The motion diagram of the semi-strapdown platform

2 抗高过载结构设计

2.1 抗高过载结构工作原理

抗高过载结构由轴向承载区和径向承载区构成, 轴向承载区为对顶半球结构, 径向承载区为轴承结构。图 3 为基于对顶半球结构与轴承嵌套结构的平台抗高过载结构设计方案, 当炮弹发射时, 由轴向承载区的对顶半球结构承担主要发射过载, 两半球对顶并发生一定形变, 当发射过程结束, MIMU 及电路安装区所受的轴向载荷显著变小后, 对顶半球之间由于塑性变形产生一定的间隙分离, 轴向过载转变为由轴承单独承担。由于在发射瞬间过载主要由对顶半球承担, 轴承有一定的正常工作轴向游隙, 所以高过载和对顶半球的微小形变不影响轴承的正常工作。

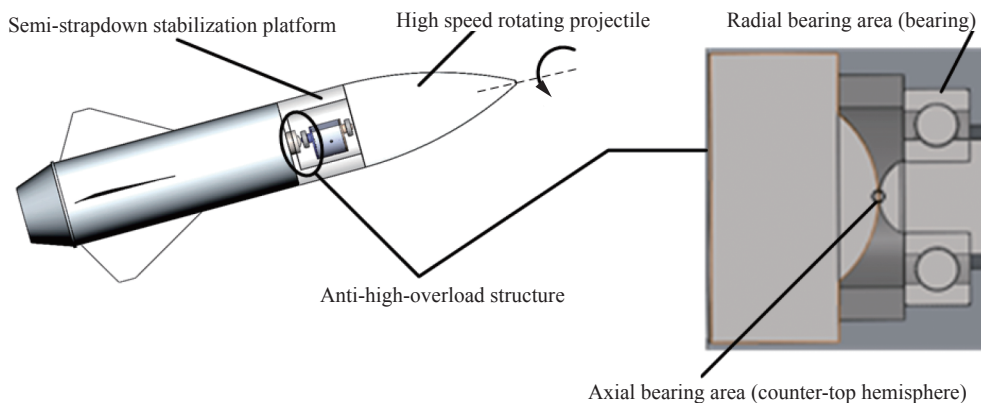


图 3 抗高过载结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of anti-high overload structure

2.2 抗高过载结构设计的原则与方法

平台抗高过载结构设计的基本原则是: 满足组成结构模型要求的合理性; 在炮弹发射瞬间, 保证轴承结构的有效运转以及保证相关测试设备的可靠性和有效性; 便于加工制造的可实现性; 采用较少的零部件, 较简单的构造形式和较直接的装配关系, 来保证系统结构的高可靠性^[7-8]。由于常规弹药特殊的应用环境, 考虑平台的弹载稳定性需求, 要求抗高过载结构除了具有一般机械设计承受载荷、安装组件和提供构型的特征外^[9], 轴向承载结构还应满足以下要求:

(1) 对顶半球结构的形变不影响轴承的正常运转——轴承的正常运转保证了平台的隔离效果, 使得平台能有效地进行测量, 其原理和特点要求对顶半球过载后的形变小于轴承的弹性形变, 保持轴承正常运转; (2) 两半球结构接触时能保持点接触——为了减小平台的摆动幅度, 要求平台受到的摩擦力矩尽可能小, 所以要求半球接触面积尽可能小; (3) 高过载后半球实现分离——高过载后, 半球结构会发生形变从而不能保持点接触且惯性飞行阶段轴承能完全承担负载, 为了避免影响平台有效运转, 要求两半球接触面分离。

2.3 轴向承载区设计

2.3.1 对顶半球结构设计

炮弹发射瞬间, 平台内部 MIMU 及电路安装区所受到的轴向载荷最大, 此时如果单独依靠轴承来承载轴向载荷是远远不够的, 为了避免轴承在此过程中损坏, 设计了如图 4 所示的含有承担发射高过载的对顶半球结构的轴向承载区, 对顶半球通过设

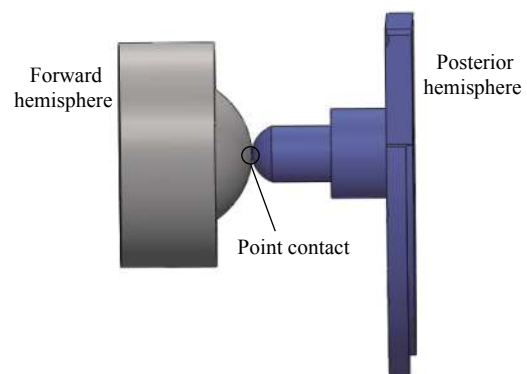


图 4 对顶半球结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of counter-top hemisphere

计点接触的方式减小摩擦力矩。图 4 是图 3 中的对顶半球结构部分。

对顶半球结构由前压螺、前半球、前压环、轴承和后半球组成。图 5 为前压螺与前半球示意图,前压螺采用了左旋螺纹设计,底面设计有扳手槽,整个前压螺与前半球用数控车床一体加工而成。图 6 为前压环示意图,前压环螺纹设计为右旋螺纹,底面设计有扳手槽。前压环用来完成固定轴承位置和限定后半球与前半球,确保轴承外圈位置不发生移动,以及保证发射后对顶半球之间存在一定的距离。

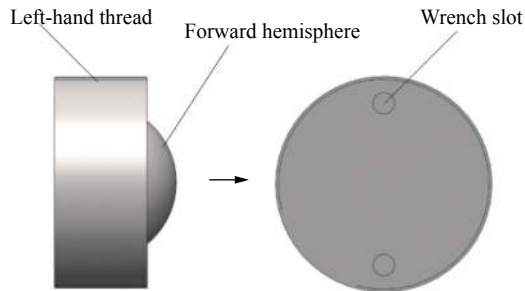


图 5 前压螺与前半球示意图

Fig. 5 Schematic diagram of front pressure screw and forward hemisphere

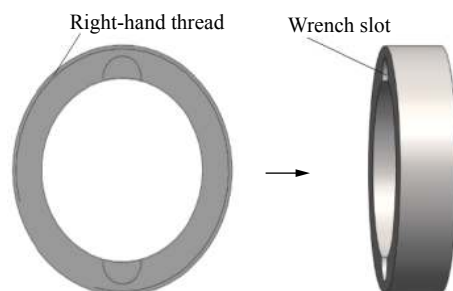


图 6 前压环示意图

Fig. 6 Schematic diagram of back pressure evolution

2.3.2 对顶半球材料确定

对顶半球形变后,应不影响轴承及稳定平台的正常工作,因后半球与轴承结构接触,故应使其产生的形变较小。针对上述设计要求,对顶半球结构采用特定的材料与工艺处理。30CrMnSi 钢为高强度调制结构钢,具有很高的强度与韧性,良好的脆透性与切削加工性能以及较强抗疲劳性能,多用于制造耐磨零配件或高负载、高速的各种零配件。所以位于内筒支撑轴的后半球选用硬度相对较高的高强度合金结构钢 30CrMnSi,并进行淬火处理,进一步提高其表面硬度,保证过载后的形变较小,不影响轴承正常运转;45 钢为优质碳素结构用钢,调制处理后具备良好的综合机械性能,切削加工性能良好,表面硬度相对较低^[10-11]。所以前半球选用硬度相对较低的碳素结构钢 45 钢,确保在承受冲击载荷时,以前半球变形为主,保证过载后两半球的分离。

2.4 径向承载区设计

径向承载区的主要作用是承受炮弹发射到落地过程中稳定平台在径向所受的载荷,同时又要保证稳定平台与弹体之间在弹体滚转轴方向上产生的摩擦力矩尽可能小。根据以上要求,在径向承载区设计了如图 7 所示的一对轴承嵌套结构。轴承嵌套结构的两级轴承共同承担轴向过载,弹簧垫圈受到轴向过载时产生相应的弹性形变,保证轴承受到过载时能正常运转,同时通过弹性形变实现对顶半球过载后的分离。轴承结构外圈采用可承受轴向载荷的角接触球轴承,为主要承载结构;内圈采用深沟球轴承,发生少量轴向位移,保证运转精度。

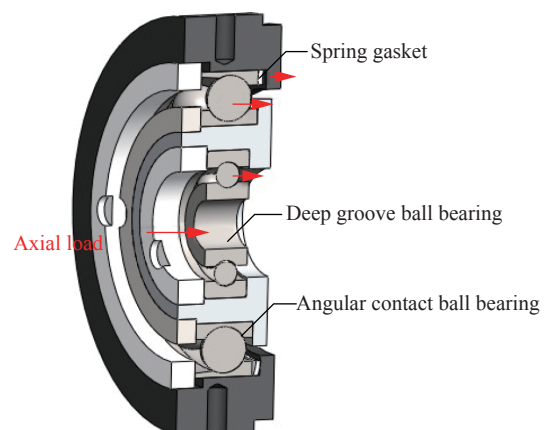


图 7 轴承嵌套结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of bearing nested structure

3 抗高过载结构力学仿真

3.1 ANSYS 力学仿真

因发射过载主要作用在轴向,故主要对轴向承载区的对顶半球结构进行力学仿真分析。在 ANSYS 中设置选用材料的力学性能,表 1 为模型材料的基本属性,将结构的承载部分简化,采用有限元

表 1 模型材料的基本属性

Table 1 The basic properties of the model material

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	切变模量/GPa
45#钢	7 850	206	0.269	355	79.4
30CrMnSi	7 850	210	0.28	800	82

方法建立如图 8 所示的对顶半球结构仿真模型, 坐标系如图中定义。

前半球边界约束条件为螺纹紧固, 可将其圆柱侧面设置为固定支撑面。依据仿真要求采用合理的划分精度等级对模型进行自由网格划分, 其网格划分模型如图 9 所示。

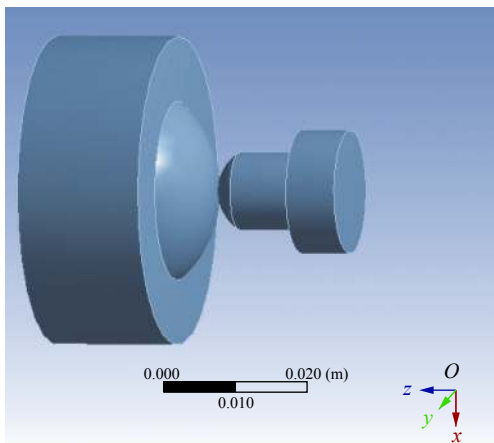


图 8 半球结构有限元模型

Fig. 8 Finite element model of hemisphere structure

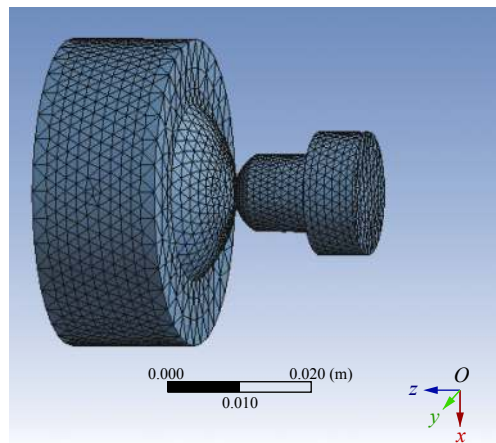


图 9 网格划分

Fig. 9 Meshing

根据实际弹载应用环境, 对顶半球结构在发射瞬间主要承受来自轴向的冲击过载, 两半球结构保持同轴, 载荷约束为 z 轴方向分别施加 5 000g、8 000g、10 000g、12 000g 的过载。根据牛顿第二定律 $F=ma$, 过载可以等效成内筒结构通过后半球对前半球施加等量的载荷力, F 为等效载荷力, m 为稳定平台质量, 取 $m=1$ kg, a 为过载。当沿 z 轴方向施加不同过载时, 对应的内筒结构对前半球施加的载荷力如表 2 所示。对结合面的处理采用 ADD 或 ULLTE 布尔操作命令进行连接, 其影响以部件间的边界条件形式出现, 分析结果包含了由于忽略结合面而带来的不利影响^[12]。

仿真过程中, 通过对内筒支撑轴施加不同的载荷力, 使得支撑轴后半球对前半球产生相应的过载效果, 其前半球形变量分布云图如图 10 所示。前半球形变量大小可由变形分析得到, 如表 3 所示。

由图 10 和表 3 可以看出, 前半球形变量随着载荷的增大而增大。当施加载荷为 12 000g 时, 前半球总形变量为 136.29 μm , 根据其应力仿真分析, 此时的最大应力为 2 055 MPa, 大于其屈服强度 355 MPa, 半球出现塑性变形, 过载变形后不再回复到原形状。

根据相关力学知识, 工艺热处理后的后半球强度与硬度明显提高, 后半球屈服强度可提高至 1 500 MPa, 远大于前半球。当对顶半球施加载荷为 12 000g 时, 后半球形变量最大为 15.89 μm , 如图 11 所示为

表 2 不同轴向过载作用下下载荷力分布情况

Table 2 Load distribution under different axial overload

序号	过载/g	载荷力/N
1	5 000	49 000
2	8 000	78 400
3	10 000	98 000
4	12 000	117 600

表 3 不同载荷下前半球的轴向形变量 (μm)

Table 3 Axial deformation of forward hemisphere at different loads (μm)

5 000g	8 000g	10 000g	12 000g
56.79	90.86	113.58	136.29

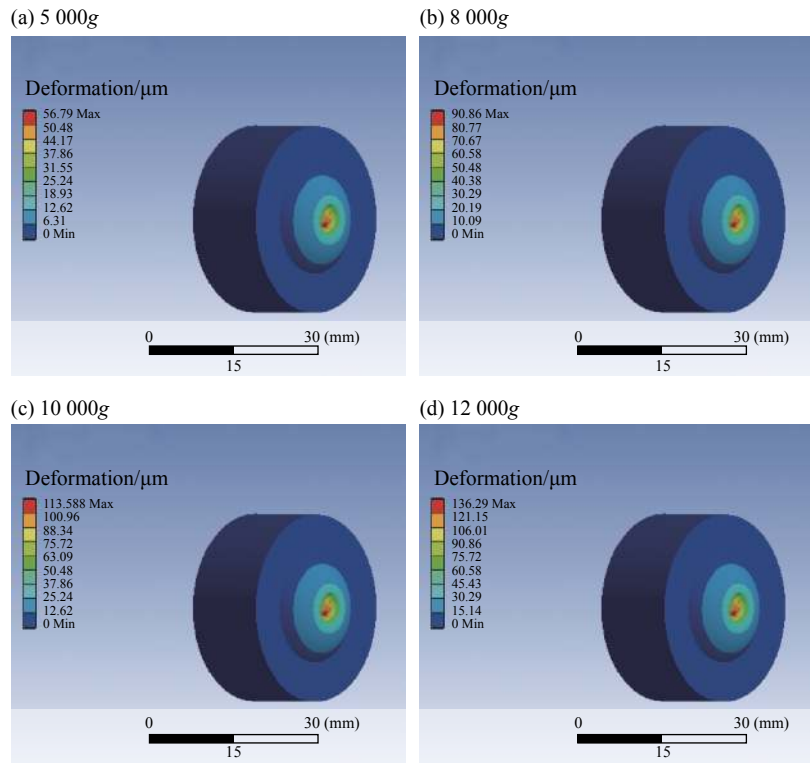


图 10 前半球在不同载荷作用下的形变量分布云图

Fig. 10 The distribution of deformation of the front hemisphere under different loads

12 000g 作用下后半球形变量分布云图。此时后半球的形变量较小,虽然也存在一定塑性变形,但可以认为该半球基本保持点接触不变,对顶半球的形变以前半球形变为主。

3.2 模拟结果分析

由以上模拟可知,对顶半球在承受 12 000g 过载时总形变量为 152.18 μm,为保证稳定平台的有效测量,轴承结构需要产生相应的轴向位移,并且保证过载后轴承恢复原状,使得对顶半球出现微小的分离状态。

轴承结构通过轴承游隙产生内外圈的相对移动以及弹簧垫圈的弹性形变而产生轴向的位移,查阅相关轴承资料,轴承游隙选择如表 4 所示。

为保证轴承运转精度,轴承游隙选择较高的精度等级,根据轴承型号,垫圈选择轴承专用 JB7590 波形弹簧垫圈 D68,其正常工作位移为 $1.50 \times 10^3 \mu\text{m}$,工作弹力为 250 N-350 N^[13]。

由以上选型及分析可得,轴承结构可产生的最大轴向位移为弹簧垫圈与轴承的总轴向位移 $1.53 \times$

$10^3 \mu\text{m}$,远大于前半球的形变量 136.29 μm,所以轴承结构在 12 000g 载荷作用下能够正常运转。弹体在发射后的飞行阶段最大轴向过载一般不超过 10g。内筒质量为 1 kg 时,产生的轴向力不超过 98 N,在弹簧垫圈工作弹力范围内,可保证相应的弹性,能实现过载后两半球分离,满足结构设计要求。

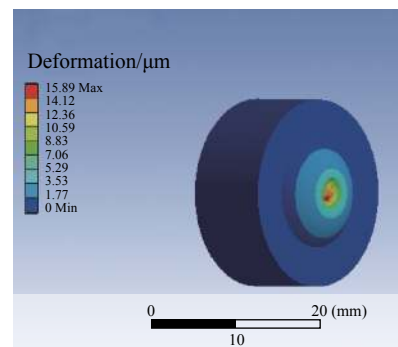


图 11 12 000g 作用下后半球的形变量分布云图

Fig. 11 Deformation distribution of the posterior hemisphere under the action of 12 000g

表 4 轴承游隙

Table 4 Bearing clearance

轴承类型	公称内径/mm	游隙等级(C0或CA级)/μm	
		最小	最大
深沟球轴承	6~10	2	13
角接触球轴承	30~50	9	17

4 抗高过载结构性能试验验证

为了使被动式半捷联稳定平台在实弹环境下得到有效应用, 检验抗高过载结构的实际应用性能, 需针对设计要求进行地面半实物仿真试验。借助地面液压冲击台模拟弹体发射瞬间的高过载环境, 对结构的抗过载性能进行试验验证。

液压冲击台通过调整负载台面自由下落的高度所产生不同的冲击强度来模拟测试对象受到不同过载的作用, 测试对象与台面刚性连接, 直接承受冲击来测试其抗过载性能。台面安装有标准加速度传感器, 实时反馈输出冲击台面的实际过载值。试验前, 将被动式半捷联稳定平台样机固定在负载台面上, 通过工装件对平台加固, 保证平台的滚转轴与负载台面垂直, 调节减震底座上的波形发生器的厚度与硬度获取合适的冲击信号脉宽。

试验过程中, 先将平台样机上电稳定 80 s, 保证平台内的传感器处于正常工作状态, 设置载荷台的下落高度, 使其对应产生 10 000g 左右的冲击过载, 进行单次冲击试验。试验完成后, 通过检验平台经过冲击后外形结构的完好性, 对顶半球形变量, 轴承结构是否正常运转以及传感器试验过程中的输出情况, 来判定该结构的抗过载性能。冲击试验现场如图 12 所示。冲击试验完成后标准加速度传感器反馈的冲击信号图谱如图 13 所示。



图 12 冲击试验现场图
Fig. 12 Impact test site

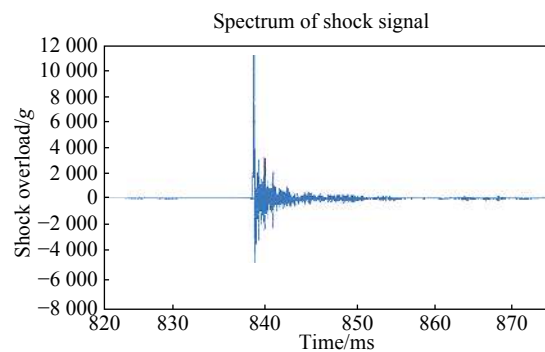


图 13 标准传感器反馈冲击信号图
Fig. 13 Shock signal of standard sensor

从冲击台标准传感器反馈冲击信号可以看出, 冲击台形成的冲击过载的峰值约为 11 000g, 主脉冲宽度约为 0.4 ms, 可以模拟弹载发射时的环境。过载后抗高过载结构各部件状态如图 14 所示。试验后平台外壳及内部组件完好, 测量对顶半球前半球出现微小变形, 形变量在 $1 \times 10^3 \mu\text{m}$ 以内。轴承结构正常运转, 无任何卡顿状况。系统在 11 000g 的强度冲击下内部传感器的输出电压, 如图 15~16 所示。通过以上结果, 可知系统在冲击过程中各部件运行良好, 传感器及相关电路电气输出正常, 在 11 000g 冲击前

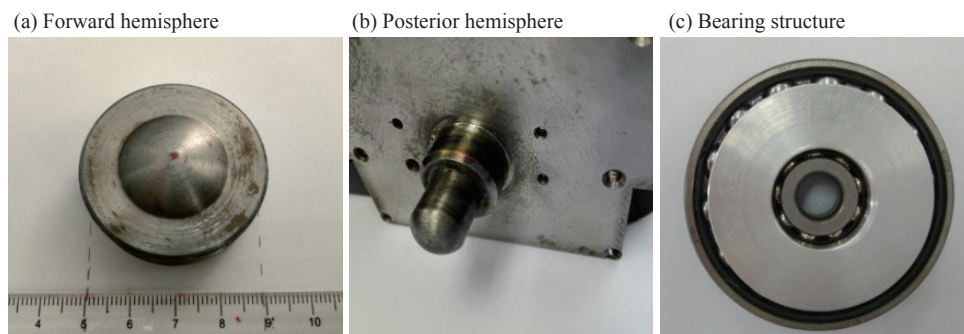


图 14 过载后抗高过载结构各部件状态图
Fig. 14 Each part of anti-high-overload of structure after overload

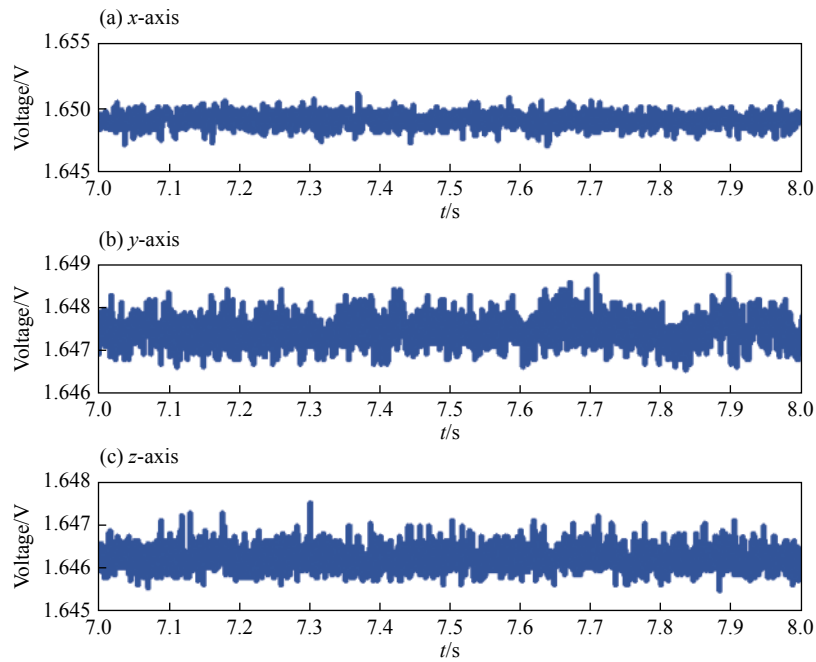


图 15 11 000g 过载下 MIMU 加速度传感器输出电压曲线
Fig. 15 Output voltage curves by accelerometer of MIMU at 11 000g

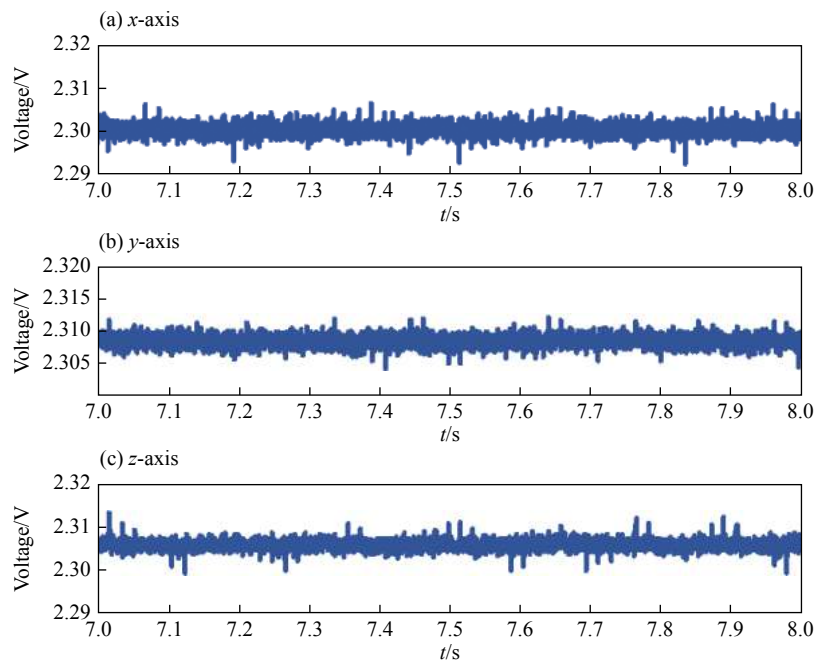


图 16 11 000g 过载下 MIMU 陀螺仪输出电压曲线
Fig. 16 Output voltage curves by gyroscope of MIMU at 11 000g

后能保持正常工作,且各传感器零偏可很快恢复。证明抗高过载半捷联式滚转稳定平台抗过载性能达到 10 000g 以上,可以验证力学仿真结果的正确性。

5 结 论

设计了一种被动式半捷联稳定平台抗高过载结构。对对顶半球结构进行了 ANSYS 力学仿真以及对抗高过载结构进行地面半实物试验,分析并验证了抗高过载结构性能,得到的主要结论如下:

(1) 系统所受过载的大小对抗高过载结构有直接的影响, 不同过载情况下对顶半球结构所受应力及形变量有所不同; 弹体所受过载越大, 抗高过载结构所受应力及形变量越大;

(2) 所设计的抗高过载结构是有效的, 能够在高过载环境下很好的对系统内部结构及 MIMU 起到保护作用, 抗高过载性能可达 11 000g, 为惯性测量系统创造了稳定良好的环境;

(3) 本研究对于被动式半捷联稳定平台而言, 为进一步隔离发射高过载恶劣环境对稳定平台的影响提供了一种有效的方法, 为高过载弹载环境下的应用奠定了试验基础, 有助于提高被动式半捷联稳定平台稳定性及可靠性。

参考文献:

- [1] ALI J, FANG J C. Realization of an autonomous intergrated suite of trapdown astro-inertial navigation system-susing unscented particle filtering [J]. *Computer & Mathematics with Applications*, 2009, 57(2): 168–181. DOI: 10.1016/j.camwa.2008.07.042.
- [2] FRESCONI F. Guidance and control of a projectile with reduced sensor and actuator requirements [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, 34: 1757–1766. DOI: 10.21236/ada539868.
- [3] LYSHEVSKI S E. Signal processing in cyber-physicalMEMSsensors: inertialmeasurement and navigation systems [J]. *IEEE Transactionson Industrial Electronics*, 2017, 64(12): 9618–9625. DOI: 10.1109/tie.2017.2701783.
- [4] 曲光伟, 王艳辉, 邹德滨, 等. 复摆运动状态的研究 [J]. *物理与工程*, 2009(5): 21–23. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7104.2009.05.008.
QU Guangwei, WANG Yanhui, ZOU Debin, et al. Study on the motion behaviors of the compound pendulum [J]. *Physics and Engineering*, 2009(5): 21–23. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7104.2009.05.008.
- [5] 段晓敏, 李杰, 刘俊. 被动式半捷联平台的动力学模型及其稳定性分析 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(9): 1436–1441. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.09.016.
DUAN Xiaomin, LI Jie, LIU Jun. Research of the dynamic model of a partial strapdown platform and the impact analysis between the pitching angle and the stability of the platform [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(9): 1436–1441. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.09.016.
- [6] 张樾, 李杰, 范建英, 等. 半捷联微惯性测量系统同轴度误差解析评定 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(3): 503–509. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.03.018.
ZHANG Xi, LI Jie, FAN Jianying, et al. Analysis and evaluation of coaxiality error of semi-strapdown micro inertial measurement system [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(3): 503–509. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2015.03.018.
- [7] 段晓敏, 李杰, 刘俊. 空气升力对被动式半捷联平台稳定性影响分析 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(11): 1813–1819. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.11.012.
DUAN Xiaomin, LI Jie, LIU Jun. Influence of air lift on the stability of passive partial strapdown platform [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(11): 1813–1819. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.11.012.
- [8] 李杰, 赵诣, 刘俊, 等. 高旋弹药飞行姿态测量用半捷联 MEMS 惯性测量装置研究 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(11): 1398–1403. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.11.009.
LI Jie, ZHAO Yi, LIU Jun, et al. Research on semi-strapdown MEMS inertial measurement device for flight attitude measurement of high-speed rotating ammunition [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(11): 1398–1403. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.11.009.
- [9] 李杰, 刘俊. 制导弹药用微惯性测量单元结构设计 [J]. *兵工学报*, 2013, 34(6): 712–717. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.06.009.
LI Jie, LIU Jun. Design of micro-electromechanical systems inertial measurement unit structure for guided ammunition [J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(6): 712–717. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.06.009.
- [10] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册: 常用机械工程材料 [M]. 单行本. 北京: 化学工业出版社, 2013: 68–70.
- [11] MANKARI K, ACHARYYA S G. Development of stress corrosion cracking resistant welds of 321 stainless steel by simple surface engineering [J]. *Applied Surface Science*, 2017, 426: 944–950.

- [12] 胡仁喜, 康士廷, 等. ANSYS 14.0 机械与结构有限元分析: 从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 120–122.
- [13] 刘泽九. 滚动轴承应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 134–136.

Design of anti-high-overload structure of passive semi-strapdown stabilization platform

WEI Xiaokai¹, LI Jie^{1,2}, ZHENG Tao¹, ZHANG Xi¹, FENG Kaiqiang¹, QIAN Haining³

(1. *Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education,*

North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology,

North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

3. Huaihai Industries Group Co., Ltd, Changzhi, 047100, Shanxi, China)

Abstract: Aiming at the high-g launching overload of the guided ammunition, the semi-strapdown stabilization platform in the shell is easily damaged when only the bearing bears axial high overload, the “counter-top hemisphere” structure was designed. Based on the analysis of the working principle and anti-overload design requirements of the semi-strapdown stabilization platform, this study analyzed the forces situation of “counter-top hemisphere” structure, the materials used were selected, and the finite element simulation analysis was performed. Finally, the structure was manufactured, and it was verified by semi-physical test. It was shown that when the semi-strapdown stabilization platform is subjected to high overload, the structure can play an effective protective role, when projectile and the internal semi-strapdown stabilization platform is under high overload condition, and provides the foundation for attitude measurement of the projectile. The anti-high-overload buffer structure supports a stable and reliable working environment for the inertial measurement system, which has engineering application value. The inertial measurement system can still work stably and reliably when overload reaches 11 000g. The design has engineering application value.

Keywords: semi-strapdown stabilization platform; counter-top hemisphere; anti-high-overload; structural design; finite element analysis

(责任编辑 王小飞)