

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G01C 21/16 (2006.01)

G01C 19/72 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200510074856.4

[45] 授权公告日 2008 年 7 月 23 日

[11] 授权公告号 CN 100405015C

[22] 申请日 2005.6.7

[21] 申请号 200510074856.4

[73] 专利权人 中国航天时代电子公司

地址 100854 北京市海淀区永定路 52 号

[72] 发明人 王 巍 张志鑫 杨清生 张桂才

张 红 朱红生 单联洁 丁东发

王颂邦 张元春

[56] 参考文献

JP63132111A 1988.6.4

JP2002161321A 2002.6.4

JP2000-180171A 2000.6.30

光纤陀螺的研究评述. 程加斌, 张炎华.

光机电信息, 第 13 卷第 10 期. 1996

捷联惯导系统中的减震技术. 刘一谦, 王世震, 李红. 飞航导弹, 第 8 期. 1990

一种新颖的 QUBIK 惯性测量装置. 杨庭楣. 系统工程与电子技术, 第 5 期. 1991

审查员 杨士林

[74] 专利代理机构 中国航天科技专利中心

代理人 安 丽

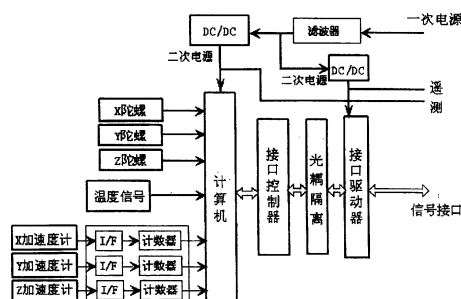
权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 6 页

[54] 发明名称

一种具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统

[57] 摘要

一种具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统, 主要包括三只光纤陀螺、三只石英加速度计、本体结构等, 其特点在于: (1) 所述的光纤陀螺采用全固态数字闭环光纤陀螺; (2) 所述的加速度计采用抗冲击石英加速度计; (3) 所述的本体采用薄壁加筋金属合金结构。本发明在对外连接无需任何减振的情况下, 能够承受恶劣的冲击、振动等力学环境条件并保持较好精度, 同时也使惯性测量系统保持了安装精度的长期稳定性, 提高了惯性测量系统的综合性能。



1、一种具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，主要包括三只光纤陀螺、三只石英加速度计、本体结构，其特征在于：

(1) 所述的光纤陀螺采用全固态数字闭环光纤陀螺；

(2) 所述的加速度计采用抗冲击石英加速度计；

(3) 所述的本体采用薄壁加筋金属合金结构，使得整个惯性测量系统对外连接不需减振器。

2、根据权利要求 1 所述的具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，其特征在于：所述的全固态数字闭环光纤陀螺由光路部分和电路部分组成，光路部分由宽带光源、光纤耦合器、光电探测器、多功能集成光学芯片和光纤线圈构成，从宽带光源发出的光，经光纤耦合器和多功能集成光学芯片后分成两束，分别按顺时针和逆时针方向沿光纤线圈传输，并在多功能集成光学芯片的 Y 分支的合光点上发生干涉相位差，此相位差由多功能集成光学芯片调制和反馈后经过光纤耦合器，之后到达光电探测器；电路部分包括放大滤波电路、A/D 转换、FPGA 逻辑电路、D/A 转换器，放大滤波电路对光电探测器的输出模拟信号进行前置放大和选通滤波，并通过 A/D 转换器进行模数转换后，送入逻辑电路进行处理，其产生的方波调制与数字相位阶梯波反馈信号之和经过 D/A 转换器后加至多功能集成光学芯片的一臂上。

3、根据权利要求 1 或 2 所述的具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，其特征在于：所述的全固态数字闭环光纤陀螺是基于 FPGA 逻辑电路的全数字处理闭环光纤陀螺，其中所述的 FPGA 逻辑电路由数字解调器、加法器、存储器、寄存器、晶振、分频器组成，数字解调器、第一个加法器和第一个存储器完成回路积分，产生数字相位阶梯波的高度；寄存器、第二个加法器和第二个存储器产生完整的数字相位阶梯波发生器；第三个加法器将晶振和分频器产生的方波调制信号作为偏置调制与数字相位阶梯波叠加后加到多功能集成电路芯

片的一臂上。

4、根据权利要求 1 所述的具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，其特征在于：所述的抗冲击石英加速度计由表头和伺服回路组成，加速度计表头包括上力矩器、下力矩器和位于上述两力矩器之间的粘有线圈的石英玻璃摆片，石英玻璃摆片包括支承环、挠性梁、摆和六个支承凸台，支承环位于摆片外缘，为圆环状结构，支承环上正反两面共有六个支承凸台，石英摆片的中部为半圆状的摆，摆通过两个方形的薄挠性梁与支承环相连，在沿输出轴方向上在所述的石英玻璃摆片的支承环和摆之间加有限制石英玻璃摆片变形的限位结构。

5、根据权利要求 4 所述的具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，其特征在于：所述的限位结构与摆之间的间隙为 $\delta = \frac{\delta_b}{n_b}$ ，其中， δ_b 为挠性梁应力等于材料极限强度时，摆的变形； n_b 为安全系数。

6、根据权利要求 4 或 5 所述的具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，其特征在于：所述的限位结构为沿输出轴方向上设置在石英玻璃摆片支承环上的限位凸台，或设置在加速度计力矩器上同支承环与摆之间间隙相对的限位销钉。

7、根据权利要求 2 所述的具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，其特征在于：所述的全固态数字闭环光纤陀螺光路部分全部用硅橡胶填充，并进行固化封装，光纤线圈采用局部硅橡胶加固。

8、根据权利要求 1 所述的具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统，其特征在于：所述的金属合金为镁合金，或铝基复合材料。

一种具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统

所属技术领域

本发明涉及一种光纤陀螺惯性测量系统，特别是一种具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统。

背景技术

惯性测量系统是实现导弹、运载火箭等飞行器制导与稳定控制的关键敏感测量设备和基准信息源，能够在飞行过程中为飞行器建立基准坐标系，敏感其运动的角速度、视加速度，准确测量姿态、位置、速度等，并通过接口高速输出数据，同时为惯性制导和姿态控制系统提供测量信息，以实现稳定飞行，准确命中目标。新型战术武器不仅要求快速反应、机动突防、精确打击能力，还要求小型化、多功能，在恶劣的环境条件下保持高可靠性、适应强烈的振动、冲击和大过载，同时要求性能保持长期稳定和高寿命，能够在长期贮存条件下始终保持性能稳定，这对其中的惯性测量系统提出了很高的要求。

基于传统惯性器件的惯性测量系统往往采用惯组加速率陀螺、结构与电源系统分开等方式很难实现小型化，由于机械式惯性仪表存在高速转子，自身抗振性能差，对外连接需要依靠减振器才能适应弹上恶劣的力学环境要求，这就需要在役期内多次进行测试、标定与维修，长期稳定性不能保证，而且后期维护成本高，以上分析表明基于传统惯性器件的惯性测量系统不能满足新型战术武器的要求。

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的新型全固态惯性仪表，具有体积小，重量轻，高可靠性，抗振动、冲击，力学环境特性好等优点，因而光纤陀螺惯性测量系统以其优良的性能成为国内外新型制导与控制系统研制中的关键支撑性高新技术。国外中低精度的光纤陀螺及其惯性测量系统虽然已经产品化，但是其关键技术和设备都是严格封锁和保密的，国内也有相当多的单位进行光纤

陀螺的研制,但在光纤陀螺及其惯性测量系统的工程化技术方面一直未能突破,尤其在其性能指标的一致性、研制技术的稳定性和产品的环境适应性尤其是具有高的抗振性和抗冲击能力方面一直不能满足军民品领域应用的要求。

初期研制的光纤陀螺尺寸大、光纤环和光纤陀螺内部光路部分没有进行固化封装,有的虽然进行了固化处理,但传统的固化方法和材料等不能与光纤这种新型材料相匹配,因而光纤陀螺的抗振性和其它性能指标都不高。现有的加速度计抗冲击性能较差,当加速度计受到沿输出轴方向的大冲击时,石英挠性摆片将发生很大变形,一旦挠性梁受到的应力大于材料的强度,挠性梁就会发生断裂失效。本体结构设计方面只提供部分仪表的安装定位,电路部分和本体部分分别安装在另一底座上,体积大、重量大,系统必须采用减振器对外连接,只能适应较低的力学环境条件要求,不能满足弹(箭)的在发射、飞行和再入阶段等过程中的强烈振动、冲击和大过载。

发明内容

本发明的技术解决问题是:提供一种具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统,该装置抗振性能好、可靠性高、环境适应性强、长期稳定性好、工程化程度高,可以迅速推广应用。

本发明的技术方案是:一种具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统,主要包括三只光纤陀螺、三只石英加速度计、本体结构等,其特点在于:

(1)所述的光纤陀螺采用全固态数字闭环光纤陀螺;

(2)所述的加速度计采用抗冲击石英加速度计;

(3)所述的本体采用薄壁加筋金属合金结构,使得整个惯性测量系统对外连接不需减振器而能满足恶劣的力学环境要求。

所述的全固态数字闭环光纤陀螺由光路部分和电路部分组成,光路部分由宽带光源、光纤耦合器,光电探测器、多功能集成光学芯片和光纤线圈构成,从宽带光源发出的光,经光纤耦合器和多功能集成光学芯片后分成两束;分别按顺时针和逆时针方向沿光纤线圈传输,并在多功能集成光学芯片的Y分支的

合光点上发生干涉相位差，此相位差由多功能集成光学芯片调制和反馈后经过光纤耦合器，之后到达光电探测器；电路部分包括放大滤波电路、A/D 转换、FPGA 逻辑电路、D/A 转换器，放大滤波电路对光电探测器的输出模拟信号进行前置放大和选通滤波，并通过 A/D 转换器进行模数转换后，送入逻辑电路进行处理，其产生的方波调制与数字相位阶梯波反馈信号之和经过 D/A 转换器后加至多功能集成光学芯片的一臂上。

所述的抗冲击石英加速度计由表头和伺服回路组成，加速度计表头包括上力矩器、下力矩器和位于上述两力矩器之间的粘有线圈的石英玻璃摆片，石英玻璃摆片包括支承环、挠性梁、摆和六个支承凸台，支承环位于摆片外缘，为圆环状结构，支承环上正反两面共有六个支承凸台，石英摆片的中部为半圆状的摆，摆通过两个方形的薄挠性梁与支承环相连，在沿输出轴方向上在所述的石英玻璃摆片的支承环和摆之间加有限制石英玻璃摆片变形的限位结构。

本发明与现有技术相比的优点在于：由于采用全固态数字闭环光纤陀螺、抗冲击石英加速度计和本体薄壁加筋金属合金结构，使本发明在对外连接无需任何减振的情况下，能够承受恶劣的冲击、振动等力学环境条件并保持较好精度，同时也使惯性测量系统保持了安装精度的长期稳定性，提高了惯性测量系统的综合性能。

附图说明

图 1 为本发明的结构组成原理框图；

图 2 为图 1 中的光纤陀螺原理框图；

图 3 图 2 中的 FPGA 逻辑电路原理框图；

图 4 为图 1 中石英加速度计的结构示意图；

图 5 为图 4 中加有限位凸台的石英玻璃摆片外形示意图；

图 6 为图 4 中加有限位销钉的下力矩器顶视图；

图 7 为图 4 中加有限位销钉的力矩器结构示意图；

图 8 为图 1 中石英加速度计装配后，限位销钉与摆片之间的位置关系图；

图 9 为现有的石英加速度计挠性梁在 250g 输出轴方向加速度作用下，最大拉应力示意图；

图 10 为本发明中的抗冲击石英加速度计挠性梁在 250g 输出轴方向加速度作用下，最大拉应力示意图；

图 11 为本发明中的光纤陀螺在 10 ~ 2000 Hz/8g 正弦扫描下的输出曲线。

具体实施方式

如图 1 所示，本发明具有高抗振性能的光纤陀螺惯性测量系统主要包括三只光纤陀螺、三只石英加速度计、本体结构等，其中采用正交放置的三个光纤陀螺完成被测体坐标系三个轴的角速度测量，三个光纤陀螺采用全固态数字闭环光纤陀螺；三个石英加速度计正交放置完成被测体坐标系三个轴的加速度测量，三个石英加速度计采用抗冲击石英加速度计；计算机实现信号处理，它在 4ms 周期内完成从陀螺和加速度计信号取样、误差补偿，发送数据给被测体上计算机和遥测系统的功能，具有高速采集、处理、传输功能；二次电源把一次电源变换为上述部件所需的直流电源；本体结构用于安装上述部件，它采用薄壁加筋铝合金或镁合金金属合金或铝基复合材料等，要保证光纤陀螺和加速度计敏感轴三轴正交性，提供电磁屏蔽与减振功能，保证需要的刚度。提供与被测体的连接基准和连接孔，同时使得整个惯性测量系统对外连接不需减振器而能满足恶劣的力学环境要求。

光纤陀螺是利用光纤构成的一种环状干涉仪，属纯光学、静止型陀螺，从本质上摆脱了转子陀螺的范畴，无运动部件，全固体化，抗振和抗冲击性能基础好；但是内部光纤细而轻，缠绕在轴上和散布在腔内的光纤如果不加以合理固定，极易在振动和冲击等过程中发生位移或受到应力，影响光信号在光路中传输，从而影响光纤陀螺的性能；光纤经过合理的加固处理后，在振动条件下就可以保持初始位置，光信号在光路中传输时就不会受到影响，因而全固态化的光纤陀螺，具有优良的抗振和抗冲击性能。

为了满足小型化的要求，本体结构设计时体积和质量受到很大的限制，安

装仪表的部位壁很薄，强度和刚度不足，抗振性能差，在采用加筋结构后抗振性能得到了一定的提高，但是还不能完全满足要求，在结构限制无法突破的情况下，必须采用新型密度小、具有更高比强度和比高度的结构材料来取代传统的 LY12 结构材料。本实施例的本体结构采用 Al/SiCp 铝基复合材料后，其密度与 LY12 接近，但强度和刚度高，在同样壁厚的情況下抗振性能大大提高；同时本体外罩采用密度更小的镁合金材料，不仅质量轻，还具有吸振性能和电磁屏蔽性能。

如图 2 所示，本发明采用的全固态数字闭环光纤陀螺由光路部分和电路部分组成，光路部分由宽带光源 1、光纤耦合器 2、光电探测器 5、多功能集成光学芯片 3 和光纤环 4 构成，从宽带光源 1 发出的光，经光纤耦合器 2 和多功能集成光学芯片 3 后分成两束，分别按顺时针和逆时针外方向沿光纤环 4 传输，并在多功能集成光学芯片 3 的 Y 分支的合光点上发生干涉相位差，多功能集成光学芯片 3 作为相位调制器将此相位差调制后返回经过光纤耦合器 2 到达光电探测器 5；电路部分由前置放大和滤波电路 6、A/D 转换 7、FPGA 逻辑电路 8、对 FPGA 逻辑电路产生的数字信号进行数模转换的 D/A 转换器 9 及对 FPGA 逻辑电路产生的 2 复位数字补偿信号的进行数模转换的 D/A 转换器 10 及增益控制电路 15 组成，放大滤波电路 6 对光电探测器 5 输出的信号进行前置放大和选通滤波，并通过 A/D 转换器 7 进行模数转换后，送入 FPGA 逻辑电路 8 对数字量进行处理，并存储陀螺的输出信号，同时其产生的方波调制信号和数字相位阶梯波反馈信号叠加之和进行经过 D/A 转换 9，输入到增益控制器 15 中，由增益控制 15 调整增益幅后将方波调制信号和数字相位阶梯波反馈信号之和加到多功能集成光学芯片 3 的一臂上。

如图 3 所示，FPGA 逻辑电路 8 主要由数字解调 80、加法器 81、存储器 82、速率寄存器 83、加法器 84、存储器 85、加法器 86、晶振 88、分频器 87 组成，其中数字解调 80、加法器 81 和存储器 82 完成对多功能集成光学芯片 3 输出的调制误差信号的数字回路积分功能，产生数字相位阶梯波的高度；寄存

器 83、加法器 84 和存储器 85 完成对数字回路积分后的信号进行二次积分,产生数字相位阶梯波,加法器 86 将晶振 88 和分频器 87 产生的方波调制信号作为偏置调制与数字相位阶梯波叠加后加到多功能集成电路芯片 3 的一臂上,使光纤线圈中的顺时针和逆时针光波产生一个固定相位差(等于阶梯波的高度),抵消旋转引起的 Sagnac 相移,光纤陀螺始终工作在灵敏度最高的零个位差点附近,提高光纤陀螺的标度因数稳定性和动态范围,同时回路积分输出的旋转速率数字量存储在速率寄存器 83 中作为陀螺的输出值。

此外,光纤陀螺小型化设计,也是提高光纤陀螺抗振性能的结构基础,因为通过小型化刚性设计,可以大大提高光纤陀螺的谐振频率。因此,本发明将图 2 中的光纤线圈 4 的长度减少为 300m,尽可能扩大其曲率半径,光纤线圈 4 的骨架直径尺寸为 $\phi 76\text{mm}$,而且改进光纤对接技术,采用套管保护,尽可能节省空间,同时电路设计分成模拟、数字电路板上下两块安装,有效降低了陀螺直径,经过设计后,本发明的光纤陀螺尺寸为 $\phi 78\text{mm} \times 49\text{mm}$ 。之后,将光纤陀螺光路部分全部用硅橡胶填充,并进行固化封装,光纤线圈 4 采用局部硅橡胶加固。

如图 4、5 所示,本发明中的抗冲击石英加速度计由上力矩器 11、下力矩器 14、粘有线圈 13 的石英玻璃摆片 12 组成,石英玻璃摆片 12 包括支承环 21、挠性梁 22、摆 23、正反两面六个支承凸台 24 和限位凸台 25,支承环 21 位于摆 23 外缘,为圆环状结构,支承环 21 正反两面共有六个支承凸台 24,并具有两个限位凸台 25,石英摆片 12 的中部为半圆状的摆 23,摆 23 通过两个方形的很薄的挠性梁 22 与支承环 21 相连,在摆 23 与支承环 21 之间具有一定的间隙,两个限位凸台 25 处在支承环 21 与摆 23 之间的间隙之中。

如图 6、7、8 所示,本发明的抗冲击石英加速度计的另一结构,它由上力矩器 11、下力矩器 14、粘有线圈 13 的石英玻璃摆片 12 组成,石英玻璃摆片 12 包括支承环 21、挠性梁 22、摆 23、六个支承凸台 24,支承环 21 位于摆 23 外缘,为圆环状结构,上面正反两面共有六个支承凸台 24,石英摆片 12 的

中部为半圆状的摆 23，摆 23 通过两个方形的很薄的挠性梁 22 与支承环 21 相连，在摆 23 与支承环 21 之间具有一定的间隙，下力矩器 14 具有限位销钉 141，限位销钉 141 位于同支承环 21 与摆 23 之间的间隙相对的位置。仪表装配时，粘有线圈 13 的石英玻璃摆片 12 固定在上下力矩器之间，由于限位销钉 141 同支承环 21 与摆 23 之间的间隙相对，装配后限位销钉 141 处在支承环 21 与摆 23 之间的间隙中。上述抗冲击石英加速度计的两实施例中的限位凸台 25 或限位销钉 41 与摆 23 之间的间隙为

$$\delta = \frac{\delta_b}{n_b}$$

其中， δ_b 为挠性梁应力等于材料极限强度时，摆的变形； n_b 为安全系数。在本实施例中，挠性梁应力等于材料极限强度时，摆的变形 $\delta_b = 0.05\text{mm}$ ，安全系数 $n_b = 1.3$ ，间隙 $\delta \approx 0.04\text{mm}$ 。

图 9 所示为使用现有石英玻璃摆片，加速度计挠性梁在 250g 输出轴方向加速度作用下，最大应力的计算结果。挠性梁的最大应力为 $7.159 \times 10^7 \text{Pa}$ ，已超过石英玻璃材料的抗拉强度 $5 \times 10^7 \text{Pa}$ ，因此挠性梁将发生断裂。

图 10 所示为本发明的加有限位结构的石英玻璃摆片，加速度计挠性梁在 250g 输出轴方向加速度作用下，最大应力的计算结果。由于限位结构的保护，挠性梁的最大应力被限为 $3.898 \times 10^7 \text{Pa}$ ，小于石英玻璃的抗拉强度 $5 \times 10^7 \text{Pa}$ ，挠性梁不会损坏。试验表明，抗冲击石英加速度计可以承受 250g 的半正弦跌落式冲击，为惯性测量系统的抗振提供了基本保障。

经过以上各措施，大大提高了光纤陀螺的抗振动冲击能力，达到了冲击试验可承受 100g 的量级，过载试验可承受 55g 的量级，正弦扫描振动 10~2000 Hz/8g，振动条件下保持精度，2000Hz 内无谐振等优良抗振性能。图 11 中给出了光纤陀螺在正弦扫描振动试验中的输出曲线。

采用全固态光纤陀螺和抗冲击石英加速计及本体薄壁加筋金属合金结构以后，惯性测量系统对外连接无需减振器，而是直接刚性相连，在表 1 所示的恶

劣力学环境下，能够保持精度和稳定性；并且由于不存在非金属弹性连接，使惯性测量系统能够长期保持安装精度，保证可靠性和长期稳定性，在长期贮存条件下，有利于始终保持初始标定精度。

表 1 光纤陀螺惯性测量系统力学环境条件

正弦对数 扫描振动	10 ~ 52Hz, 振幅 $\pm 0.75\text{mm}$; 52 ~ 2kHz, 8g; 每个方向持续时间 30 分钟
随机振动	10 ~ 100Hz, +6dB/oct; 100 ~ 1000 Hz, $0.06\text{g}^2/\text{Hz}$; 1000 ~ 2000Hz, -6dB/oct; X、Y、Z 三方向, 每方向 5min
冲击	70g, 持续时间 6 ~ 8ms, 三个输入方向, 每个方向 3 次

采用本发明前的光纤陀螺惯性测量系统在表 1 所示的随机振动条件下其振动中与振动前的零偏值比较相差很大，表 2 列出了这套光纤陀螺惯性测量系统随机振动试验振前、振中、振后零偏变化的比较，以其中的 X 轴为例，振动前陀螺仪的零偏值为 $1.3546^\circ/\text{h}$ ，振动中陀螺仪的零偏值为 $-17.3922^\circ/\text{h}$ ，振动前与振动中的零偏值变化为 $18.7468^\circ/\text{h}$ ，精度变化很大，不能满足零偏值变化 $<10^\circ/\text{h}$ 的使用要求；振动前加速度计的零偏值为 0.0046g ，振动中加速度计的零偏值为 -0.8422g ，振动前与振动中的零偏值变化为 0.8468g ，精度变化很大，不能满足零偏值变化 $<0.002\text{g}$ 的使用要求，说明此方向抗振性能不好。其它方向的分析结果与此结论相同。

采用本发明后的光纤陀螺惯性测量系统已经研制了数十套，都经过了大量力学环境试验的考核，表 3 列出了其中一套光纤陀螺惯性测量系统在表 1 所示随机振动条件下进行试验的振前、振中、振后零偏变化的比较，同样以其中的 X 轴为例进行说明，振动前陀螺仪的零偏值为 $1.1773^\circ/\text{h}$ ，振动中陀螺仪的零偏值为 $-1.6752^\circ/\text{h}$ ，振动前与振动中的零偏值变化为 $2.8525^\circ/\text{h}$ ，精度变化较小，完全满足零偏值变化 $<10^\circ/\text{h}$ 的使用要求；振动前加速度计的零偏值为 -0.9900g ，振动中加速度计的零偏值为 -0.9915g ，振动前与振动中的零偏值变化为 0.0015g ，满足零偏值变化 $<0.002\text{g}$ 的使用要求。其它方向的分析结果与

此结论相同，充分说明采用本发明后的光纤陀螺惯性测量系统具有良好的抗振性，环境适应性强，可靠性高，工程化程度得到了很大突破。

表2 采用本发明前的光纤陀螺惯性测量系统随机振动试验振前、振中、振后零偏比较

陀螺仪	均值($^{\circ}/h$)			
	振前	振中	振后	振前与振中差
X	1.3546	-17.3922	1.9867	18.7468
Y	3.1897	30.7859	0.4392	-27.5962
Z	-1.9031	-25.4275	1.8555	23.5244
加速度计	均值(g)			
	振前	振中	振后	振前与振中差
X	0.0046	-0.8422	0.0076	0.8468
Y	0.0541	1.0309	0.0599	-0.9768
Z	-0.0239	-0.9701	-0.0417	0.9462

表3 采用本发明后的光纤陀螺惯性测量系统随机振动试验振前、振中、振后零偏比较

陀螺仪	均值($^{\circ}/h$)			
	振前	振中	振后	振前与振中差
X	1.1773	-1.6752	1.2992	2.8525
Y	1.7062	-0.3960	1.8279	2.1022
Z	0.5701	-1.2149	0.2278	1.7850
加速度计	均值(g)			
	振前	振中	振后	振前与振中差
X	-0.9900	-0.9915	-0.9902	0.0015
Y	-0.0051	-0.0067	-0.0050	0.0016
Z	-0.0057	-0.0039	-0.0056	-0.0018

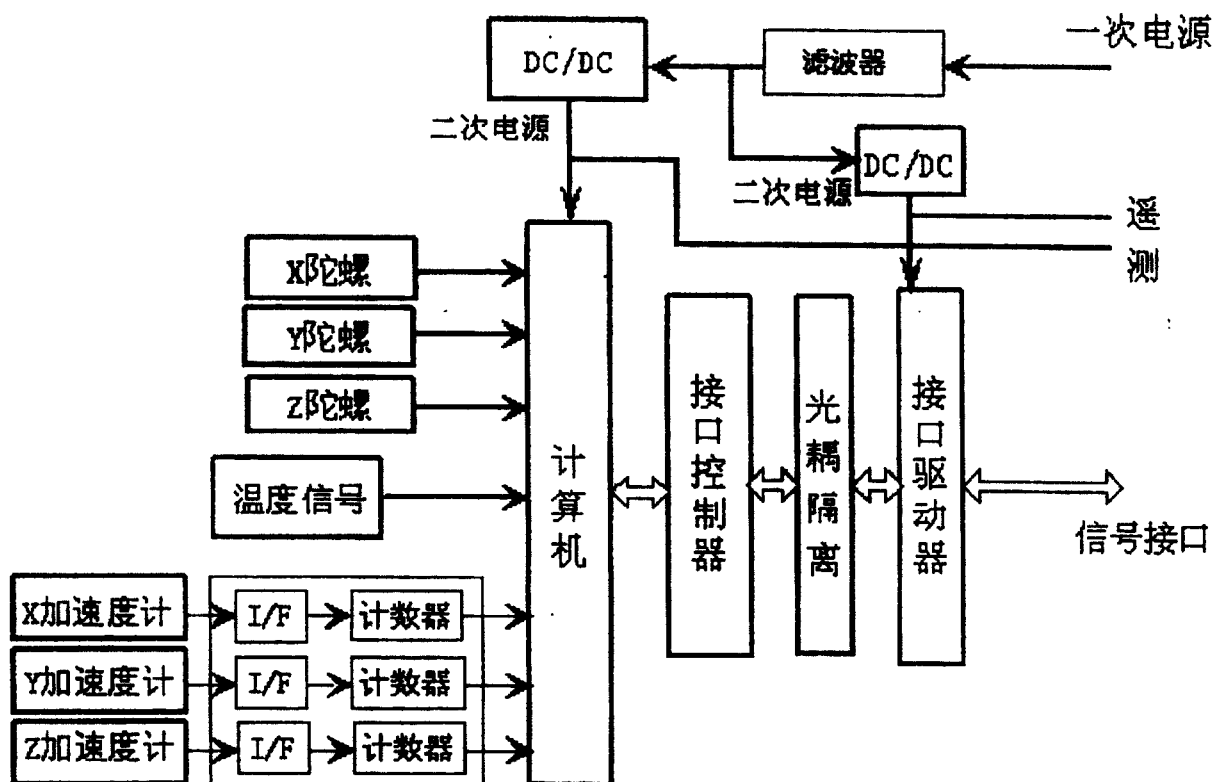


图 1

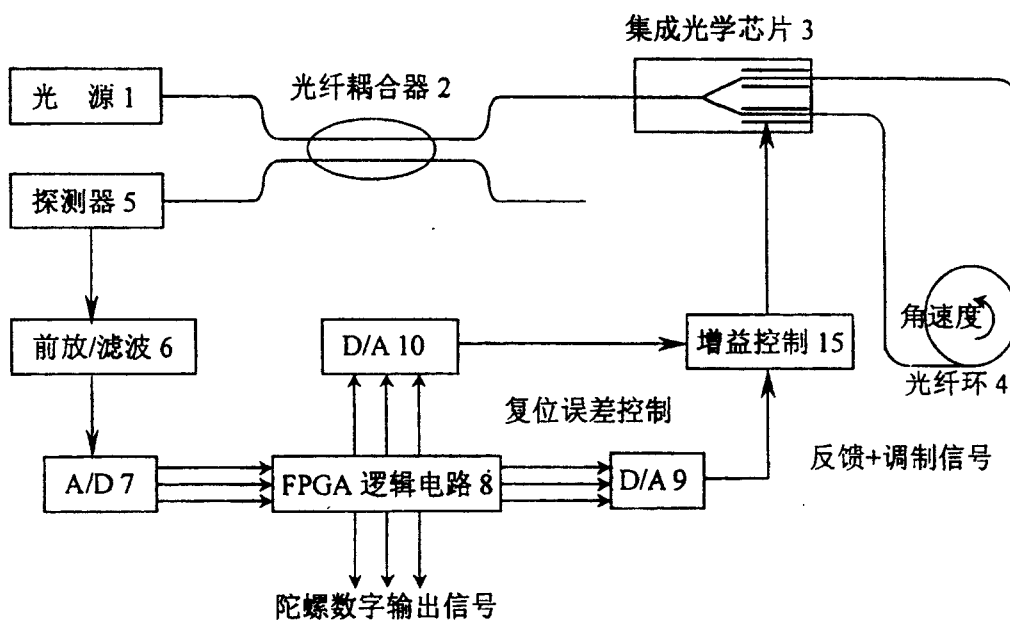


图 2

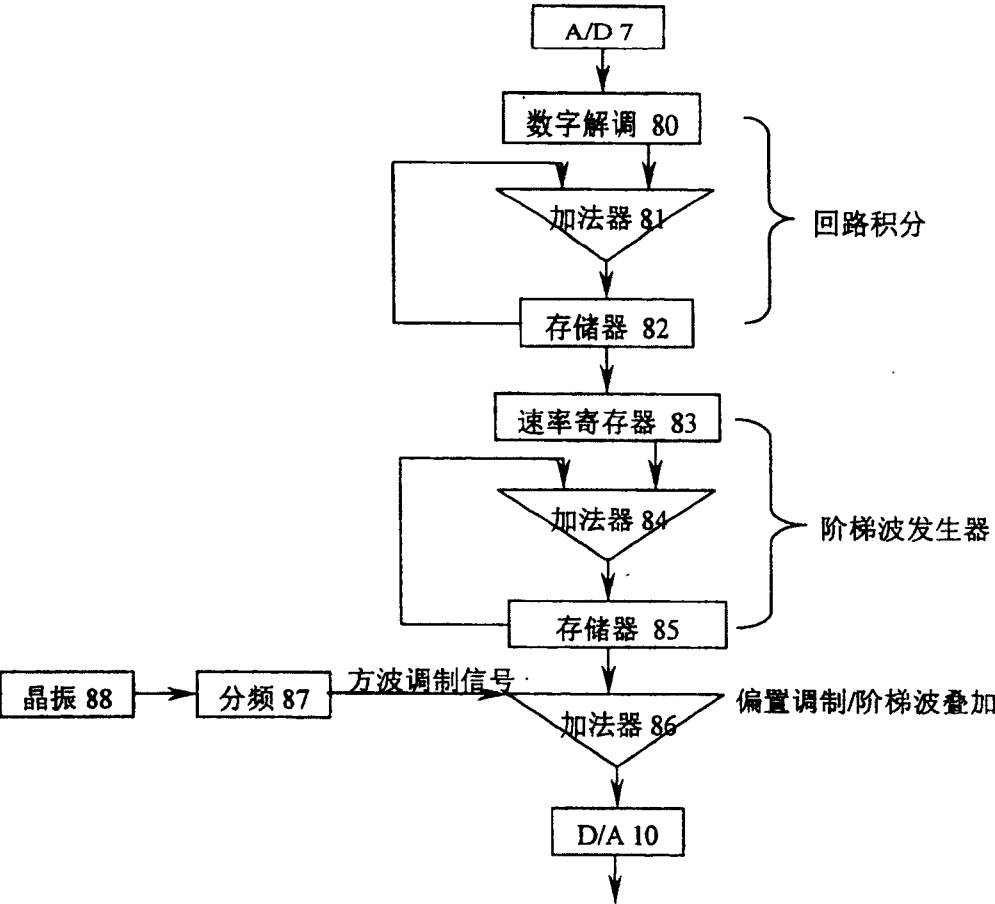


图 3

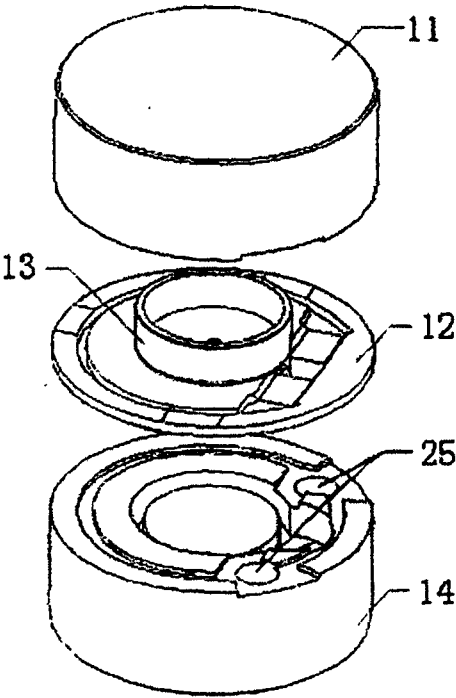


图 4

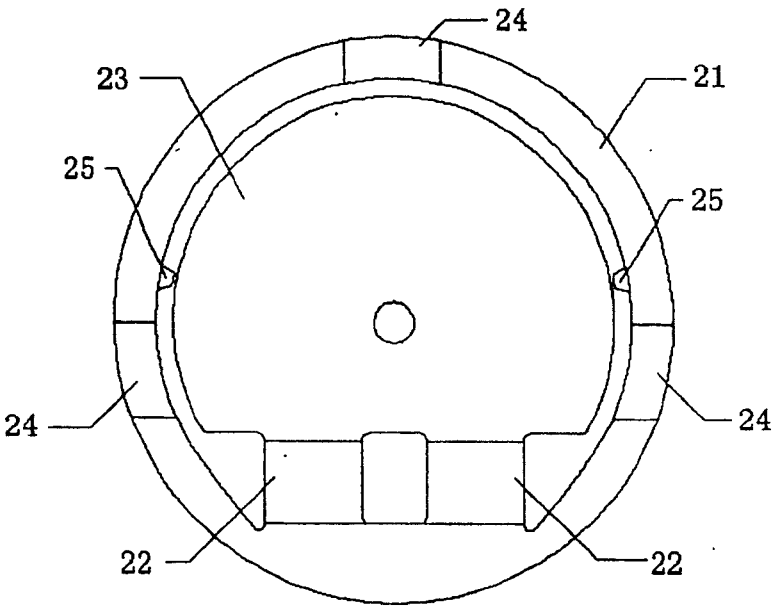


图 5

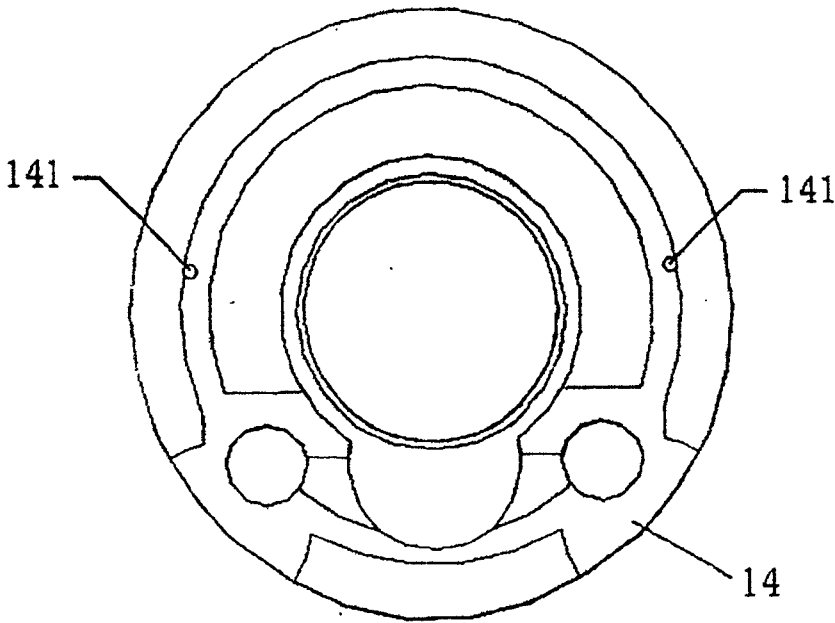


图 6

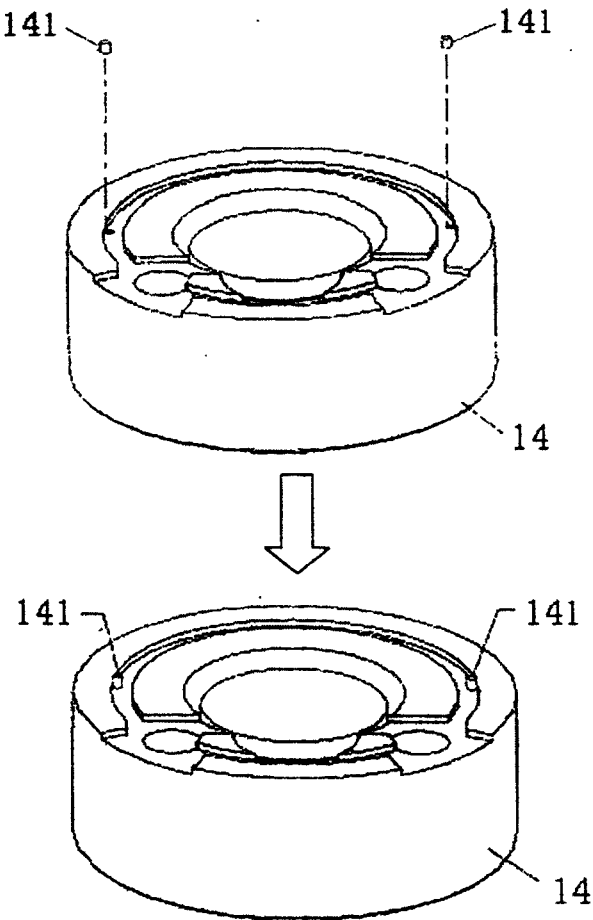


图 7

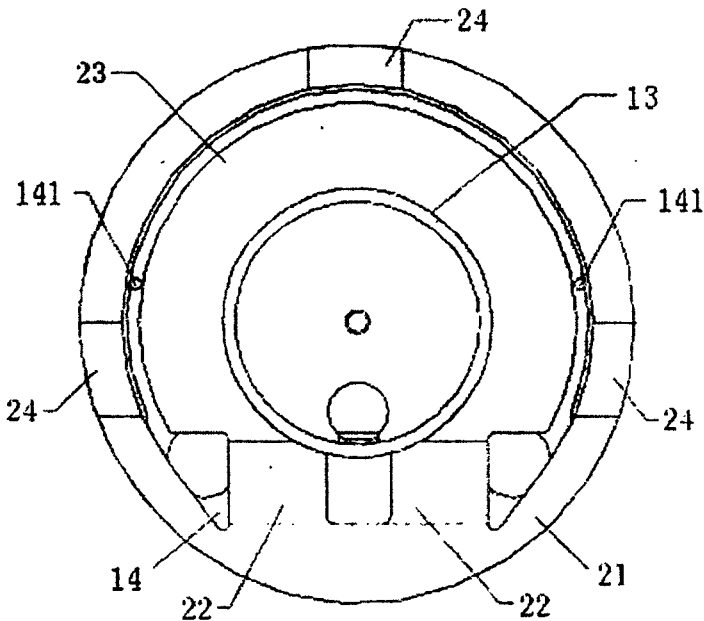


图 8

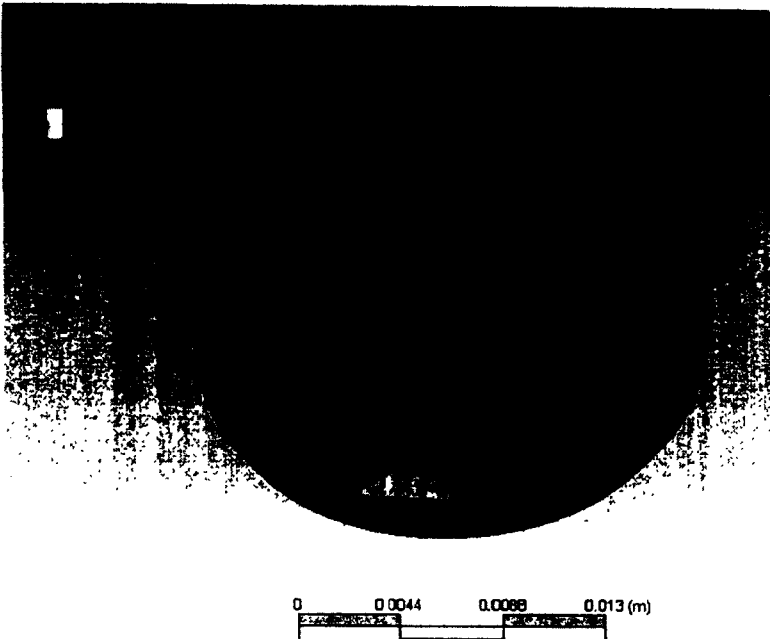


图 9

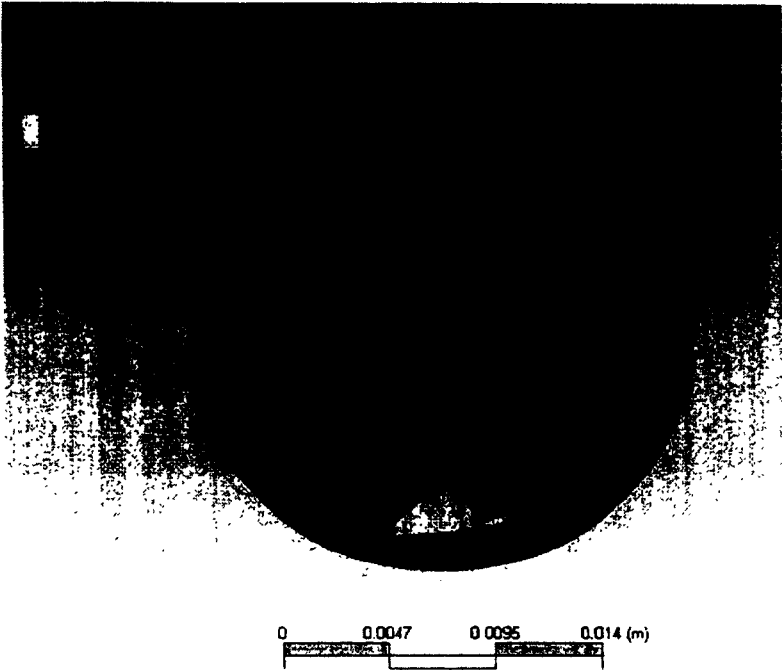


图 10

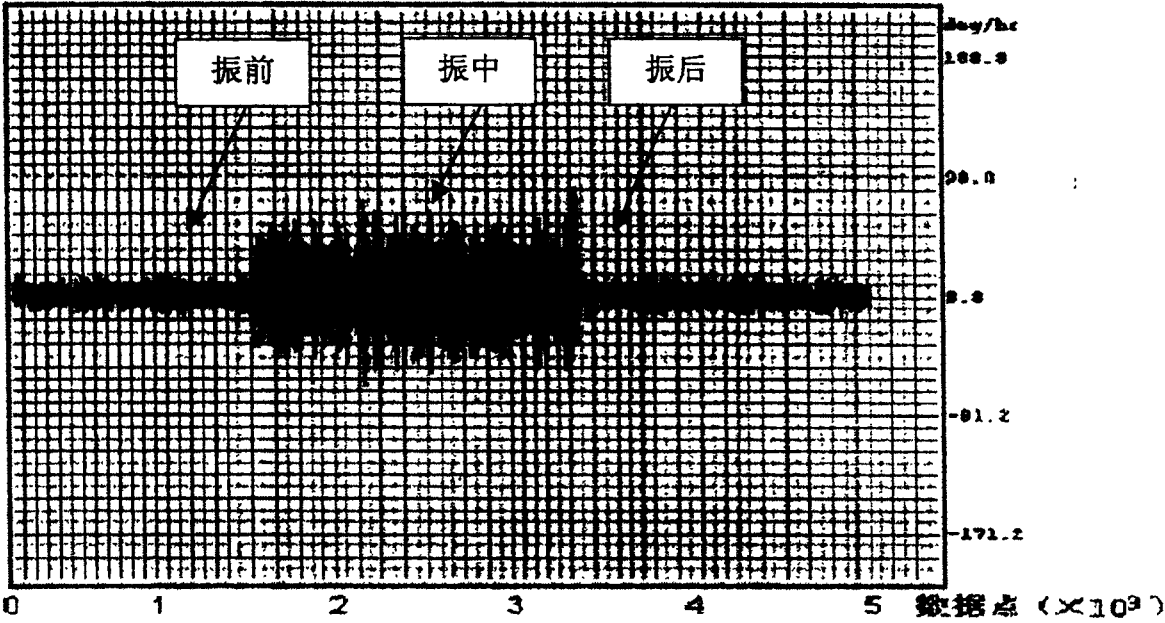


图 11