



基于 MEMS 技术的微型惯性测量组合

MEMS-based Micro Inertial Measurement Unit

作者：陈义华

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005) 陈义华, 王凌云, 孙道恒

摘要：叙述了基于 MEMS 技术的微型惯性测量组合 (MIMU) 在国内外的的发展状况及其应用, 简要阐述了 MIMU 的基本原理和结构并对其优缺点进行了分析, 同时也对其发展作了总结与展望。

关键词：微惯性测量组合; 惯性导航; 微机电系统

Abstract: This paper describes the development and application of MIMU based on MEMS in and out of the country and investigates its fundamental principle and structure. The advantage and disadvantage of MIMU are analyzed, and at the same time the prospect of MIMU is also discussed.

Key words: MIMU; Inertial Navigation; MEMS

1 引言

MEMS (Micro Electro Mechanical System) 即微机电系统, 是 20 世纪末 21 世纪初兴起的工程科学前沿, 是当前一个十分活跃的研究领域。它涉及多学科的交叉, 如材料、机械、电子、信息等各工程技术学科。微机电系统有着广泛的应用前景, 它在汽车工业、生物医学工程、航天航空、精密仪器、移动通信、国防科技等方面都有极大的发展潜力, 而微型惯性测量组合 (Micro Inertial Measurement Unit, MIMU) 是微系统的一个重要分支, 是国际上近年来发展起来的新技术, 是一种依靠自身设备的自主式惯性测量组合, 隐蔽性好; 同时它具有数据更新率高、短期精度和稳定性好等特点, 加之其具有体积小、重量轻等优点, 这种技术在军事导航及民用领域正在起到越来越大的作用。因此, 微惯性测量组合的研究成为近年来惯性技术的一个发展方向^[1], 是我国 MEMS 计划中重点发展的领域之一。

2 微惯性测量组合的发展状况及其应用

国外微惯性测量组合技术的发展已经有 30 年的历史^[2], 西方国家尤其是美国, 在 MEMS 惯性器件, 微惯性测量技术以及微惯性导航技术等方面处于领先的优势。随着 MEMS 技术的发展, 应用 MEMS 技术, 能制成能够测量运动物体线加速度、角速度的惯性测量元件 (Inertial Measurement Unit,

IMU), 亦即微陀螺和微加速度计 称为 MEMS-IMU^[3]。MEMS 惯性传感器体积小, 成本低, 可靠性高, 在军用和民用方面都有非常广泛的应用。

美国国防部的 DARPA (国家高级研究计划局) 以及其他部门在 MEMS 惯性导航技术方面的投资也在逐渐增加, 研究低成本、战术级导航系统。惯性技术领域的著名研究机构, 如 Draper 实验室、Honeywell、喷气推进实验室 (JPL) BEL 公司以及其他一些著名的大学、研究中心都在 MEMS 惯性器件、MEMS-IMU 和低成本战术级的微惯性与组合导航技术等方面展开了大量的研究, 成效显著, 系统正在走向中精度、组合导航。自 20 世纪 90 年代初开始, Draper 将 MEMS 惯性技术用于军用领域, 其研究工作的进展通过下表可以体现。

表 1 Draper 实验室近年来 MEMS-INS 的项目状况表^[4]

项目计划名称	时间	体积 /cm ³	MEMS INS 中的 IMU			与 GPS 组合方式
			IMU 构成	陀螺漂移 / (°/h)	加表零偏 / 10 ⁻³ g	
ERGM(Extend-Range Guided Munition)	1995	2065	6个单轴 MEMS 惯性器件	500	20	C/A 码 GPS 紧组合
CMATD (Competent Munitions Advanced technology Demonstration)	1997	213	6个单轴 MEMS 惯性器件	50	1mg	P 码 GPS 紧组合
MMIMU(MEMS IMU)	2000	131	2个三轴 惯性测量 模块	10	0.1	P/Y 码 GPS 深组合
Low-Cost INS/GPS	2003 ~ 2005	49	1个六轴 惯性测量 模块	1	0.1	利用 GPS 芯片深组合

另外, 其他国家的一些科研机构也对这种基于 MEMS 技术的微型惯性测量组合在导航等应用领域展开研究。我国目前的微陀螺和微加速度计的制造还未形成稳定的产品, 因此, 国内在基于 MEMS 的惯性导航、组合导航系统等方面的研究才起步, 公开报道的相关项目或相关系统的文献较少, 因此在借鉴国外经验的基础上迅速开展相关方面的研究, 稳步向前赶上是目前比较迫切的任务。

3 微型惯性测量组合的原理和结构

微型惯性测量组合的基本工作原理是以牛顿力学定律为基础, 在微型惯性测量组合的载体内部测量载体运动的加速度、角加速度, 经由积分运算得载体的速度和位置信息即载体的导航信息。

收稿日期: 2005 - 06 - 27

作者简介: 陈义华 (1980 -), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 研究方向为精密仪器及机械; 王凌云 (1978 -), 男, 四川通江人, 硕士研究生, 研究方向为精密仪器及机械; 孙道恒 (1965 -), 男, 安徽肥西人, 工学博士, 教授, 中国机械工程学会高级会员、福建省机械工程学会理事会常务理事、全国现代设计理论与方法理事会理事、中国电子学会高级会员、电子机械工程委员会委员, 主要从事 CAD/CAE、数字化产品设计、微机电系统 (MEMS) 等领域的研究。



微型惯性测量组合的原理如图 1 所示,微型惯性测量组合由六个微传感器组成,包括三个单自由度微陀螺和三个微加速度传感器。这六个传感器安装在立方体的三个正交平面上,它们的敏感轴相互垂直,组成测量体的三维坐标系。当微型惯性组合的信号提取出来后,传递给计算机进行处理,最终达到确定载体方位信息的目标。

微型惯性测量组合系统结构可分为平台式惯性导航系统(惯性导航组合安装在惯性平台的台体上)和捷联式惯性导航系统(惯性导航组合直接安装在载体上)。后者省去平台,所以结构简单、体积小、维护方便,但仪表工作条件不佳,影响精度且计算工作量大。

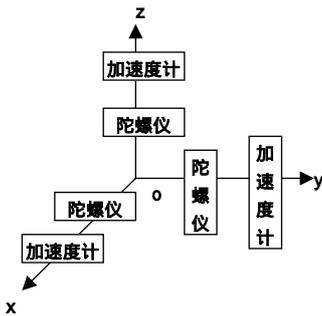


图 1 微惯性测量系统的原理图

3.1 平台式惯性导航系统

平台式惯性导航系统由以下几个部分组成,如图 2 所示。

- (1) **加速度计** 用来测量微惯性测量组合载体的线加速度;
- (2) **控制显示器** 给定导航系统的参数及初始值,显示各种信息;
- (3) **导航计算机** 计算导航信息;
- (4) **惯导平台** 模拟一个导航坐标系,把加速度计的测量轴稳定在导航坐标系,并用模拟的方法给出载体的姿态和方位信息。为了克服作用在平台上的各种干扰力矩,平台必须具有以陀螺仪作为敏感元件的稳定回路^[5]。由于加速度计和陀螺仪安装在惯性平台上,与载体的角运动隔离,因而其角运动的动态工作范围小,惯性器件的精度容易得到保证,具有导航精度高的特点。

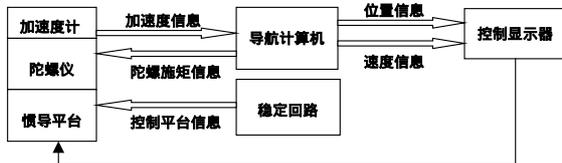


图 2 平台式惯导系统原理示意图

3.2 捷联式惯导系统

捷联式惯导系统如图 3 所示,它将加速度计和陀螺仪直接安装在载体上来测量载体的加速度和角速度,再经由计算机进行微分方程的解算和多种坐标系的转换,得到载体的速度和位置。由于计算机完成了惯导平台的功能,因此也称为“数学平台”。

与平台式惯性导航系统相比,捷联式惯导系统具有如下优点:

- (1) 简化了导航平台,省去了复杂的机械式惯性平台,降低了整个系统的体积、重量和成本,提高了系统的可靠性。
- (2) 捷联式惯导系统提供的参数多,可以给出载体轴向上的线性加速度和角速度,因此可以得到更多的导航信息。
- (3) 捷联式惯导系统更容易安装和维护。

与此同时,捷联式系统也带来了缺点:陀螺仪和加速度计直接安装在载体上,要承受较大的振动和冲击且工作的动态范围较大,因此需要高精度的陀螺仪和进行捷联陀螺的误差补偿才能保证系统的稳定与可靠,同时计算量大,精度稍低。

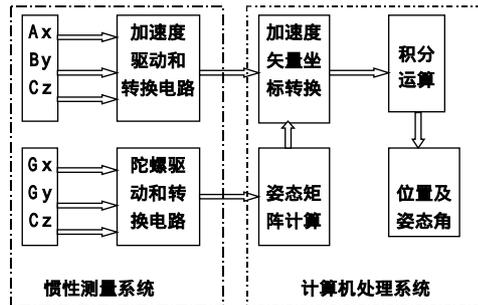


图 3 捷联式惯性导航系统原理图

4 微惯性测量组合的关键技术与问题

4.1 基本的坐标变换

捷联式惯性导航系统中,加速度计是沿载体坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 安装的,分别测量沿载体坐标系轴的比力分量 $f_{xb}f_{yb}f_{zb}$,但是真正需要测量的是惯性坐标系中的分量 $f_{xp}f_{yp}f_{zp}$,因此,要将 $f_{xb}f_{yb}f_{zb}$ 转换成 $f_{xp}f_{yp}f_{zp}$ 。而从载体坐标系到惯性坐标系的转变要用到捷联矩阵 L_{bp} ,它将矢量 F 从载体坐标系转换到惯性坐标系。如图 4 所示。

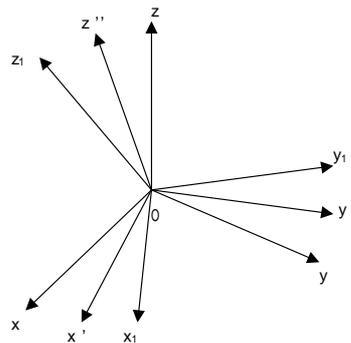


图 4 坐标变换图

惯性坐标系 $Oxyz$ 先绕 Oz 轴转动 τ ,得到坐标系 $Ox'y'z'$,再绕 Oy' 轴转动 ψ ,得到坐标系 $Ox_1y_1z_1$,这是载体相对于惯性坐标系的姿态角 τ, ψ, ϕ ,分别称为载体的航向角,俯仰角和滚动角,根据坐标轴转动的顺序,载体坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 到惯性坐标系 $Oxyz$ 的转换矩阵 L_{bp} ^[6]为

$$L_{bp} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos\phi & \cos\psi \sin\phi & -\sin\psi \\ \sin\tau \sin\psi \cos\phi - \cos\tau \sin\phi & \sin\tau \sin\psi \sin\phi + \cos\tau \cos\phi & \sin\tau \cos\psi \\ \cos\tau \sin\psi \cos\phi & \cos\tau \sin\psi \sin\phi - \sin\tau \cos\phi & \cos\tau \cos\psi \end{bmatrix}$$



上述的旋转顺序是 $z-y-x$ 。事实上，可能的旋转顺序有 12 种，不同的旋转顺序对应不同的转换矩阵。当矩阵 L_{bp} 求得以后，就可以根据载体坐标中测量的比力求得在相应的惯性坐标系中的比力，从而便可以进行导航计算。

4.2 姿态矩阵

姿态矩阵一方面用于坐标变换，即把沿运载体三轴的加速度信号变换成导航坐标系三轴的加速度信号，以便进行导航参数计算。另一方面利用姿态矩阵的元素可以提取水平姿态角与航向角信息。姿态矩阵的计算，既涉及到载体姿态的实时解算，又关系到“数学平台”的即时修正。其算法性能的优劣直接影响捷联系统的导航精度，是捷联惯导的关键技术。姿态矩阵的算法有很多，比较常用的有欧拉角法、方向余弦法、四元数法和等效旋转矢量法等，欧拉角法、方向余弦法在捷联姿态计算中较少应用。

四元数理论在空间技术和捷联式惯导系统中得到了实际应用。四元数由一个实数和三个虚数组成，它是四维空间中的一个矢量，但是它的三个虚数又具有三维空间中的矢量性质。因此，任何三维空间中的一个矢量，都可以看作是一个实部为零的四元数，这个四元数是三维空间中的一个矢量在四维空间中的“映象”。这样，可以把三维空间和四维空间联系起来，用四维空间中的四元数的性质和运算规律来研究三维空间中的刚体定点转动问题，这也就是四元数方法的基本出发点。它与方向余弦法相比，计算量小、存储量小，仅需要进行简单的四元数规范化处理便可以保证姿态矩阵的正交性，因而成为一种普遍采用的方法，下面将简要介绍四元数表述的运动学方程。

在刚体定点转动理论中，根据欧拉定理，由四元数法表示得动坐标系（载体坐标系）相对于惯性坐标系的转动四元数与动坐标系的转动角速度矢量 (t) 之间的关系为 $dQ/dt = \frac{1}{2} Q \circ \Omega_{b/o}$ ^[2]，换成矩阵形式：

$$col(dQ/dt) = \frac{1}{2} mati(\Omega_{b/o}) col(Q)$$

其中 col 表示列向量， $mati$ 表示逆阵，即

$$\begin{bmatrix} dq_0/dt \\ dq_1/dt \\ dq_2/dt \\ dq_3/dt \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -w_{xb} & -w_{yb} & -w_{zb} \\ w_{xb} & 0 & w_{zb} & -w_{yb} \\ w_{yb} & -w_{zb} & 0 & w_{xb} \\ w_{zb} & w_{yb} & -w_{xb} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

这就是用四元数表示的载体姿态的运动学方程，将四元数建立联立微分方程组：

$$\begin{cases} dq_0/dt = \frac{1}{2}(-w_{xb}q_1 - w_{yb}q_2 - w_{zb}q_3) \\ dq_1/dt = \frac{1}{2}(w_{xb}q_0 + w_{zb}q_2 - w_{yb}q_3) \\ dq_2/dt = \frac{1}{2}(w_{yb}q_0 - w_{zb}q_1 + w_{xb}q_3) \\ dq_3/dt = \frac{1}{2}(w_{zb}q_0 + w_{yb}q_1 - w_{xb}q_2) \end{cases}$$

上述微分方程组中，没有奇点，因此可以表述载体的所

有姿态，同时其约束方程为 $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ 。

四元数方程则没有奇异性的问题，这是在姿态运动学中用四元数的好处之一。

当四元数表示的微分方程建立之后，可以通过在给定条件下用数值法来求解。在原则上，有两种方法求解，一是单步法，另一种是多步法。单步法中最典型的就是用标准的四阶 Rung-Kutta 法，而多步法中典型的是用四阶 Adams 法^[6]。

4.3 误差及补偿

虽然微惯性测量组合有很多优点，但是同其它测量系统一样，存在着误差随时间迅速积累增长的问题，这主要是由惯性传感器的误差所引起的，也是惯导系统的主要缺点。惯性传感器的误差可以分为确定性误差和随机性误差两种。确定性误差的数值大小和变化规律是系统性的、有规律的，它可以通过标定测试的方法来建立模型，从而在系统中加以补偿；随机性误差则具有无规律性和偶发性，只能通过系统辨识等统计方法得到它们的统计规律再利用滤波估计的方法加以补偿。

在加速度计产生的误差中，主要有固定偏差（恒定加速度条件下偏离标准加速度电压标称值的固定值）、比例因子误差（输出电压的变化与输入加速度的变化比）、随机误差（该误差是由于加速度计的不稳定性引起的，其中包括由于温度不稳定而产生的误差）等。可以通过补偿固定偏差、利用器件敏感地球引力加速度分量来调整器件的位置使加速度计尽可能互相正交以减少交联误差，通过标定测试的方法来建立模型从而在系统中加以补偿和通过统计方法等手段来降低这些误差源引起的误差，从而提高系统的精度。

在陀螺仪产生的误差中，一般包括常值漂移、确定性漂移和随机漂移三个部分。常值漂移可在陀螺仪装入系统前通过试验测试后确定，并加以补偿。确定性漂移又可以分为静态误差和动态误差两种。前者由载体线运动引起，后者由载体的角运动引起的。确定性漂移可以通过离线测试，建立陀螺仪的静态误差模型和动态误差模型，编制成误差软件装入导航计算机。根据载体的线运动和角运动，进行实时补偿。陀螺仪的刻度因素误差和温度误差也可以通过离线测试建模与补偿。陀螺仪的随机漂移中的常值部分在同一次的启动过程中保持为常值。它在随机漂移中所占的比例较大，所以要给陀螺仪测漂和补偿。

通过以上的分析可知，由于惯性传感器存在随时间积累的误差，这就要求寻求一种误差不随时间积累导航信号，用它来校正惯导系统，抑制微惯性测量组合随时间的积累的误差。而全球定位系统 GPS (Global Position System) 是以人造卫星为基础的无线电导航系统，在地球的任何位置、任何时刻只要能同时观测到 4 颗以上的卫星，就可以得到用户的三维坐标、三维速度分量和精确定位。它是一种高精度的全球三维实时导航的导航系统，而且能够进行全球、全天候、全天时、多维连续定位，其精度不随时间变化而变化，因此，可以将高精度的 GPS 信息，作为外部量测输入，在运动过程

（下转 139 页）



相位和频率,分析处理并使协调控制级做出相应补偿。因此,为了使系统的总体功能及精度得到进一步提高,本系统增加了如下的补偿方法。

动静踏步修正法用来修正静力试验。静踏步修正法是指加载命令在加至终值处时,停止加载,即静踏步等待。如果在规定的最大等待时间内所有通道反馈值与命令的误差进入设定的误差带,则继续下一终值点的加载。反之,如果在规定的最大等待时间内有通道反馈值与命令值的误差不能进入设定的误差限,则视为超差。动静踏步修正法是指在设定频率下从某一终值向另一终值加载的过程中检测命令与反馈的误差。在误差超过给定误差带时,通过不断降低加载的频率,最终使反馈与命令的误差达到给定要求的过程。

幅值修正法和相位修正法是在周期性重复加载过程中使用的辅助控制方法。通过检测反馈幅值与给定命令的误差以及各通道反馈间的相位与命令相位的误差,对加载命令的幅值和相位进行修正,从而改变反馈值,最终使反馈幅值、相位与给定加载幅值、相位的误差在给定的误差限内。

在协调修正级,本系统采用了用于嵌入式控制系统中 PC-104 模块。该模块与 PC 全兼容,集成度高,体积小,功耗低,工作温度范围宽,组态灵活、方便。

3.2 采用以太网实现通讯、由 VME 总线与控制级交互工作

传统的协调加载控制系统工作站与子站间的通信通过 PC 机的并行口来完成,协调级以板卡的形式插入 PC 机的扩展插槽中。对工作件实施静力或疲劳试验时,若某工作站发生故障,控制级失去指令控制而继续加载,试件很有可能会破坏,或停止加载而导致疲劳试验失败。

本系统管理级与协调修正级通过以太网实现通讯的功能,再经由 VME 总线与控制级交互工作。通过自己定义的通信协议有效地对试件进行操作,试验定义、进入试验、谱段加载、试验卸载、退出,有条不紊,并且多个工作站之间可以利用 TCP/IP 协议实现切换,更稳定的实施控制。

* * * * *

(上接 137 页)

中频繁修正 INS (Inertial Navigation System) 以控制其误差随时间的积累,就可以大幅度的提高微惯性测量的精度了。

6 结语

微惯性测量组合是一种基于 MEMS 的具有多样化特点的技术,利用其尺寸小的特点,可以代替过去相应的传统的复杂的机械电子装置,而且可以很大程度的提高相关产品的性能。微惯性测量组合所具有的许多特点和优点使其得到越来越广泛的应用,特别是在惯性导航、组合导航、制导系统等方面,从过去的发展来看,今后微型惯性测量组合将向芯片型的 MEMS IMU 和 MEMS INS 以及组合导航的方向发展。

参考文献:

- [1] 邓海棠,王凤梅. 微型惯性测量组合姿态测试系统[J]. 传感器世界, 2004,09.
- [2] 闻新,张伟,黄勤珍. 微型惯性测量装置的技术分析与发展建议[J]. 中

3.3 数字信号处理技术

实时控制级由通道机和伺服控制器组成。通道机用于产生直流、正弦波、三角波、方波和梯形波,并可按一定斜率均匀加载和卸载;伺服控制器为闭环控制系统的主要部分,PID 参数的调节及输出控制由一个单独的处理器完成。数字闭环运算的速度直接影响了控制精度。单片机的性能好,价格低,所以以往的伺服控制器均采用单片机。但随着通道的增加,单片机的速度劣势显现出来,现在采用专用的数字处理器 (TMS320-31) 来完成,控制周期由原来的 3ms 提高到 25us,实时性得到很大的提高。

3.4 改进后的伺服控制系统性能指标

- 伺服更新时间 25us;
- 可任选反馈一至反馈四,四种控制方式可动态切换;
- 系统开环、闭环切换功能;
- 数字伺服阀平衡设置,精度 1/65 535;
- 伺服阀颤振幅值数字修改,精度 1/100;
- 控制系统静态精度 0.02% (典型状态);
- 控制系统动态精度 0.05% (典型状态);
- 软件复位接口。

4 结语

与目前国内该类系统相比,本系统具有鲜明的特点:集成了多种试验和多种控制方法,做到控制与用户操作的分离,从而根本上保证了系统的可靠性;采用 PC104 和 DSP 技术,精度明显提高且便于用户升级。

参考文献:

- [1] 刘杰,马中武. 多通道协调加载控制系统的设计[J]. 测控技术,1996,7.
- [2] 黄献龙,李尚义,黄泽焕,张德新. 静力试验用电液伺服加载系统的分析和实验—如何实现系统保护[J]. 导弹与航天运载技术,2000,3.
- [3] 大型构件测试精度高——五通道加载系统填补国内空白.
- [4] MTS 810 FlexTest™Material Testing Systems. www.mts.com.
- [5] 刘瑞华. 微机电惯性测量元件在导航系统的应用研究[J]. 中国民航学院学报,2003,6.
- [6] 李荣冰. 基于 MEMS 技术的微型惯性导航系统的发展现状[J]. 中国惯性技术学报,2004,12.
- [7] 胡小平. 自主导航理论与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2002.
- [8] 肖业伦. 航空航天器的运动建模—飞行动力学的理论基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003,6.

