

飞行器的一种空间定向与导航的方法

李磊源, 李汉军, 施文康

(上海交通大学信息检测技术与仪器系, 上海 200030)

摘 要: 这个系统利用重力加速度计与磁通门磁强计实现对飞行器的空间姿态测量, 并能以此为基准实现飞行器的惯性导航。在方向的测量中使用了三个传感器代替传统的单个传感器测量以减小加速度计与磁通门计在较小角度时灵敏度的下降。通过实验得知这种方法是十分有效的。

关键词: 磁通门; 姿态测量; 空间定位

中图分类号: TM 937. 1; V 241. 643 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-1194(2003)02-0020-03

0 前言

三维空间中的姿态是各种飞行器的一项必不可少的运行参数。现在几乎没有例外都是利用各种陀螺仪对此进行测量。从笨重无比的机械式陀螺到静电陀螺、光纤陀螺、声表面波陀螺, 性能各有优劣, 但设备都比较昂贵。本文在一种传统的单传感器测量方法的基础上提出了一种利用三个重力加速度计与三个磁通门磁强计实现空间姿态测量的方法, 以提高在各种姿态下的测量精度。另一方面, 可以通过连续测量运动方向, 配合飞行器与基准点的距离采用类似惯性导航系统的方法实现飞行器运动轨迹的测量。这种测量方法的特点是所使用的传感器比较廉价, 特别适合使用于大批量、高损耗、活动区域较小的微型与超微型飞机上。

1 探测器坐标系定义

这里使用的方位标定系统是“拉塞尔方位系统”(Russell Attitude System), 各个坐标定义如图 1 所示。飞行器的位置为 P , O 为起始位置(即基准点)。系统的三个定位参数是: 纵向偏距(ON)、水平偏距(OE)和垂直位移(OV)。在实际系统中这些参数都无法直接得到, 因此这里通过测试另外三个参数: 倾斜角、方位角与距离(分别在图 1 中表示为 θ 、 Φ 与 OP), 通过关系

$$OV = OP \cos \theta; OE = OP \sin \theta \cdot \sin \Phi; ON = OP \cdot \sin \theta \cdot \cos \Phi,$$

就可以得到纵向偏距、水平偏距和垂直位移三个参数。

在测量中, 方向角 Φ 与倾斜角 θ 由磁通门传感器与重力加速度传感器得到, 飞行器运动距离采用了光电测距的方式得到。

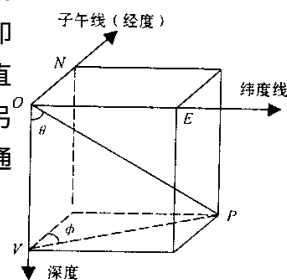


图 1 拉塞尔方位系统

2 技术方案与实现

本技术方案的关键在于组合利用了磁通门磁强计、加速度传感器以及相应的电路系统。

2.1 磁通门传感器

磁通门磁强计是测量磁场强度的一种传感器, 其测量原理是通过对被测磁场的磁通进行调制获得

* 收稿日期: 2002-06-18

作者简介: 李磊源(1977—), 男, 上海市人, 硕士生(现在美国攻读博士), 研究方向为计算机自动检测与控制技术、网络化自动检测系统等。

一个反映被测磁场强度的交变信号。一般采用二次谐波测量法。

磁通门传感器的结构：在一个 O 型无磁金属骨架上绕上高导磁率合金薄带做成磁芯。在其两臂绕上激励绕组，然后将两个激励绕组串联，使两臂沿铁芯上产生的瞬时磁通方向相反，幅度相等。环绕整个金属骨架再绕上信号绕组与反馈绕组。信号绕组用于接收二次谐波信号，反馈绕组用来补偿被测磁场^[1]。

由于磁芯材料的磁导率很高且其矫顽力很低，所以它的磁滞回线很窄；外磁场 H 有微小的变化就能引起磁芯中磁感应强度的显著变化。若在探头的激励绕组中通以交变激励电流，其大小应使激励磁场的峰值 H_m 足以使磁芯在每半周期内深度饱和。当外磁场 $H=0$ 时，由于磁芯中的磁通量仅由激励电流产生，而激励绕组的绕法是左、右半芯产生的瞬时磁通方向相反幅度相等，所以在任意时刻于信号绕组上的感应电压互相抵消。当外磁场 $H \neq 0$ 时，将使左（或右）半芯的磁通量增加，使右（或左）半芯的磁通量减少，所以磁芯在半个周期内提前饱和。在另外半个周期内推迟饱和，也就是出现了磁通量变化的速率差。这种不对称波形将在频域上出现谐波。两个半芯的偶次谐波成份在信号绕组中叠加，其中二次谐波的幅度最大，且与外场磁场 H 在一定范围内成正比，而相位则与外磁场 H 相反。在理论上奇次谐波成份会全部抵消。这样只要测量二次谐波的幅度就可以得到磁芯轴向的磁通量数值^[2,3]。

2.2 加速度传感器

加速度计的结构如图 2 所示。这是一个测量重力加速度的传感器。在一个密闭管上缠绕两个相同且对称的反向串联的线圈。管子内有一个可以沿着管子自由地做轴向运动的圆柱型磁铁。磁铁的周围是铁磁流体，这是一种悬浮着很细的铁磁微粒的液体。铁磁流体的作用是作为润滑介质确保磁铁沿轴向的自由移动并使磁铁与管子保持同轴。线圈中通以电流使磁铁轴向偏离中间位置时会成正比的受到电磁力的反作用，因此磁铁的偏移距离与作用在它上面的力成正比。传感器通过一个中心抽头的变压器。并用一个方波信号来激励。当重力加到传感器上磁铁偏离中间位置时，会使变压器的两部分线圈电感改变而造成电压差。检测电压的大小就可以知道重力加速度在传感器轴向的分量了。

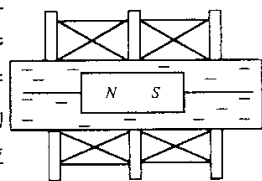


图 2 加速度传感器

2.3 方向检测原理

得到方位信息的常规方法是测得飞行器运动方向的磁通量与重力加速度，分别与当地的地磁与重力加速度做比较，通过余弦关系得到飞行器运动方向的方位角与倾斜角。比如：

$$\theta = \cos^{-1}(g_{\text{prob}}/kmg)$$

G_{prob} 是飞行器主轴（这里假设飞行器运动在主轴方向，下同）方向重力加速度， k 是根据各地不同的重力大小而定的比例系数， m 是质量， g 是标准重力加速度。但由于下列的一些原因，这个测量方法有很大的局限性：

- (1) 单一的余弦曲线在小角度时的分辨率下降。
- (2) 传感器比例系数会随着温度变化。
- (3) 单个传感器的测量误差较大，且计算中需要当地的重力加速度（测方向角时为当地地磁强度）不够方便。

在文献[4]中曾提出过一种在角度大于 60° 时利用反余弦函数，角度小于 60° 时利用反正弦函数的解决方法，但在提高测量精度的同时也造成了计算的不连续性并给分析系统测量特性带来了不小的麻烦。因此基于以上这些问题，本文采用了两个改进措施：

- (1) 使用了正交排列三个加速度传感器与三个磁通门传感器，组合利用其测量数据得到方位角与倾斜角，既解决了单一余弦曲线的分辨率问题又利用了误差平均原理减小了测量误差。
- (2) 利用一个温度传感器进行温度误差补偿。

至此，姿态测量将以下述方式实时进行：

倾斜角通过加速度传感器测量，首先建立一个以飞行器为参考的坐标系。在飞行器与运动方向垂直的横截面上定义一个方向为 X 向，在飞行器与 X 向垂直的方向定义为 Y 向，飞行器的运动方向定义为 Z 向。

Z 向。重力加速度在此坐标系中可以表示如图 3。加速度与 V_z 所成的角就是倾斜角。三个重力加速度计分别装置在飞行器的 X 、 Y 、 Z 轴方向。从图 3 中可以得到:

$$R = \sqrt{(kmg \cos \Phi \sin \theta)^2 + (kmg \sin \Phi \sin \theta)^2} = kmg \sin \theta,$$

$$V_z = kmg \cos \theta, \text{ 所以, } \tan \theta = R/V_z,$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\sqrt{V_x^2 + V_y^2} / V_z \right);$$

V_x 、 V_y 、 V_z 是 X 、 Y 、 Z 方向的重力加速度分量。

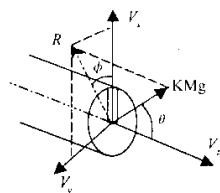


图 3 飞行器坐标系

方位角通过磁通门传感器测量。地球磁场的磁极方向和地理的南北方向是不一致的,因此测量的基准地磁方向不在地球子午线方向。这里实际利用的基准是当地地磁磁通量在子午线方向的分量,其基准方向就是地理北极。三个磁通门传感器也安装在 X 、 Y 、 Z 方向,但在 XY 向的磁通量正方向应与重力加速度正方向相反。利用 $\theta_1 = \tan^{-1} \left(\sqrt{B_x^2 + B_y^2} / B_z \right)$ 可以得到运动方向与子午所成的角度 θ_1 。这个角在三维空间中与方位角 φ 有唯一的映射关系: $\varphi = \cos^{-1} (\cos \theta_1 / \sin \theta)$, 这样就得到了方位角。

需要注意的是,上面三个式子都有可能存在分母极小甚至等于零的情况,在数学上会使误差变大或使算式无意义。但是只要在编程中加以适当的措施,比如提高计算精度、临界判别与采用合适的编译程序,就能够使程序在这种临界情况下也能得出正确的结果。这个系统中使用了 VC 作编译器,能够很好地解决分母为零的情况。还需要考虑的是空间 8 个象限中的三角函数的正负问题,因为反三角函数只在相应的 180° 内有定义。编程时要注意它们的转换。

3 实验数据

在实验中对使用三个传感器的方案与普通单传感器方案做了比较。单传感器方案的数据直接用 Z 轴上的测得的信号计算得到。实验结果见图 4。实验结果中明显地显示出单传感器方案的角度较小误差偏大,而利用文中论述的三传感器方案测得的数据具有更小的误差且误差基本恒定。

4 总结

这个系统组合利用了重力加速度计与磁通门磁强计实现了飞行器空间姿态的测量并可以以此为基础实现飞行器的

惯性导航。每一个参数使用三个传感器测量,可以避免对方向敏感的传感器在不同方向时的灵敏度下降而影响测量精度的问题,也可以在一定程度上起到误差平均的作用而减小测量误差。这个测量系统在实验中的效果是令人满意的。

在美国最新研制的“战场微型侦察飞机”中,从已经解密的资料与图片可以看到它也采用了类似的安装方式的三个磁强计与三个重力加速度计。虽然其具体工作方式仍属机密,但我们估计它也采用了类似的测量原理。这样看来这种姿态测量方法应该是有巨大的实用意义的。

参 考 文 献:

- [1] Janicke Jack M. Second harmonic flux-gate sensors and magnetometers[J]. Sensor Review 1998, 18(4): 225—229.
- [2] 秦葆璐, 吴天彪. 磁通门式磁力梯度仪与磁场梯度测量[M]. 北京: 地质出版社, 1985. 29—37.
- [3] 孙学孚, 陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 1—21.
- [4] 狄勤本, 张绍槐. 旋转导向钻井系统测量技术研究[J]. 钻井技术, 1998(6): 50—53.

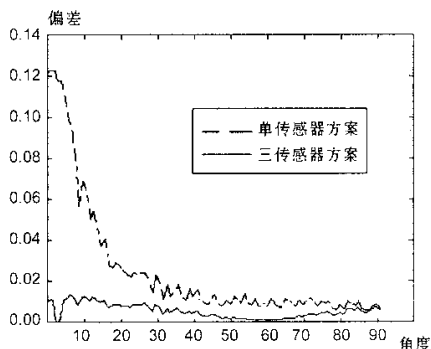


图 4 实验数据

算机上均可完成设计和仿真。

CPLD 器件采用 ALTERA 公司的 EPM7064LC44—7 器件。它具有通过 JTAG 接口实现在线可编程的特点,用户可以反复使用。芯片内部的逻辑密度 5 000 个可用门,引脚与引脚的延迟为 5 ns。最高速度为 178 MHz。典型封装为 PLCC44。

2.2 软件设计

本设计采用 VHDL 语言进行软件设计和仿真。VHDL 语言是为电路设计工程师准备的硬件设计语言。其设计流程和设计方法使用起来很方便。

本设计在仿真的时候,考虑多种意外的干扰情况,结果显示接口电路的原理是可行和正确的。

3 结束语

本文针对具体的应用背景设计了电子安全系统的接口电路,并且采用 CPLD 技术进行集成。结果表明,该设计的原理是可行和正确的,并且系统体积小、成本低。

参 考 文 献:

[1] 何光林. 电子安全系统专用集成电路的工程实现(硕士学位论文)[D]. 北京:北京理工大学,2000.
[2] 李世义. 全电子安全系统设计原则[J]. 探测与控制学报(原现代引信),1992(1):12—31.
[3] 党瑞荣. 全电子直列式保险装置(博士学位论文)[D]. 南京:南京理工大学,1997.

Interface Circuit Design of Electronic Safe and Arming Based on CPLD

HE Guang-lin, CHEN Ke-shan, LI Shi-yi

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081,China)

Abstract: This paper adopts CPLD(Complex programmable Logic Device) to design the interface circuit of electronic safe and arming(ESA) of fuze according to the application background of the fuze of some missile. It can solve the problem of small volume, low cost of the safe and arming of fuze, furthermore it has the specialty of anti-jamming.

Key words:fuze; electronic safe and arming; interface circuit

~~~~~  
(上接第 22 页)

A Novel Method for Attitude Detection and Navigation of Aircraft

LI Lei-yuan, LI Han-jun, SHI Wen-kang

(Department of Instrumentation Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** This article introduces a system utilizing accelerometers and flux-gates to detect aircraft attitude in space, therefore realizing the navigation of the aircraft. Instead of using one sensor to measure the direction, this system uses three perpendicularly mounted sensors to measure one direction so as to avoid the sensibility loss on small angle. Through experiment, this method is proved to be effective.

**Key words:**magnetic flux-gate; direction sensing; space locating