

惯性定向装置计算机控制系统设计与实现^①

耿向华, 陈婉

郑州旅游职业学院 信息工程系, 郑州 450009

摘要: 针对惯性定向装置计算机控制系统的准确控制和快速解算, 搭建了一个全新的计算机控制系统. 以飞思卡尔 16 位单片机 MC9S12XEP100 为主控芯片, 辅以不同功能的硬件电路和软件算法, 实现了惯性定向装置的信号采集、串口通讯、故障检测和误差补偿. 同时建立了加速度计和陀螺仪的数学模型来分析惯性定向装置可能存在的误差, 并从原理出发提出了相应的补偿和标定方法. 理论分析和实验结果证明, 该惯性定向装置的单点重复性好、寻北精度高、寻北时间较短, 满足精确快速寻北的要求.

关键词: 惯性定向装置; 陀螺; 误差分析; 单片机; 系统标定

中图分类号: TP273+.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)01-0142-06

惯性技术的出现及其应用为研制自主的、精密的方向指示仪器提供了可能. 惯性导航技术是现代信息化战争中确保武器系统快速、机动、准确打击的重要保障技术之一. 惯性导航系统具有数据更新频率高、短期精度高和稳定性好等优点^[1]. 对导航算法的研究一直是惯性导航领域的研究热点, 在此过程中涌现出了一大批富有创造性的成果, 而对于初始对准技术、误差建模与抑制技术领域的研究也正逐步深入. 我国的惯性技术研究始于 50 年代, 经历了从技术引进和对国外的惯性元件、仪表的仿制, 到改型提高和创新开发过程^[2]. 近年来, 惯导系统正得到越来越广泛的应用. 随着惯性技术的发展, 以陀螺仪为主要元件的惯性定向装置的精度不断提高, 反应速度越来越快, 研制和开发快速、准确定向的寻北仪具有非常重要的意义.

1 惯性定向技术

1.1 惯性定向装置

惯性定向装置是一种高精度的定向设备, 由于精度和速度的要求, 在惯性定向装置的研制中, 提高寻北精度和缩短寻北时间是两个主要目标, 利用不同的寻北方案和消减误差是提高寻北精度和缩短寻北时间的行之有效的办法^[3].

本文的研究对象为某型号的惯性定向装置. 其中如何精确快速地测量出加速度计敏感比力和地球自转角速度在载体坐标系的投影是解决问题的关键, 常用的寻北方案有: 1) 单位置法. 该寻北方案原理简单、速度快, 但由于加速度计和陀螺仪存在误差, 陀螺仪常值漂移的影响无法忽视, 因此该寻北方案精度低, 不适合于工程使用. 2) 二位置法. 二位置寻北法可以克服常值漂移, 但无法消除的误差包括陀螺漂移中的趋势项漂移部分、增益系数误差、非正交误差、基座干扰误差和转位装置的常值误差. 3) 三位置法. 三位置寻北方案同时消除了常值漂移和漂移趋势的一次项误差, 但转位误差、陀螺仪测量轴不正交误差、陀螺仪漂移误差、陀螺仪比例因子误差以及姿态误差等其他误差项仍没有消除, 需要使用误差补偿技术进行消

① 收稿日期: 2015-06-05

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究项目(132300410485).

作者简介: 耿向华(1976-), 女, 河南扶沟人, 讲师, 主要从事计算机网络、网络安全研究.

除, 此外还有多位置寻北方案, 如四位置法等. 其主要原理与二位置法和三位置法相似, 但是将大大增加了寻北的时间, 不适合于快速寻北, 因此本系统采用了寻北精度较高且比较快速的三位置寻北方案.

1.2 惯性定向装置误差分析

所有的寻北系统, 无论是平台式还是捷联式, 建立静态误差数学模型对分析各因素的误差是必不可少的^[4]. 通过研究误差模型, 提出解决方案, 并通过标定的方法对系统中的误差进行补偿. 该误差模型一般具有三元二次多项式的结构形式. 研究静态误差是研究其他误差的基础, 只有保证无干扰情况下的寻北精度, 研究恶劣环境下外界扰动误差才有意义. 本文主要从石英挠性加速度计和动力调协陀螺内部结构特点出发, 建立正确合理的数学模型来分析静态误差.

加速度计的输出误差对寻北精度的影响不大, 只要其精度达到 $1.0 \times 10^{-4} \text{g}$, 其引起的寻北误差就可忽略不计, 因此只考虑加速度计的比例因子误差和零偏误差即可.

陀螺仪误差是影响惯性定向装置精度的主要误差源之一^[5]. 陀螺仪误差包括陀螺漂移和刻度因子误差, 陀螺漂移可分为常值漂移、随机漂移及其它各种干扰信号引起的漂移. 二位置法和三位置法寻北可消除陀螺仪常值漂移的影响, 而陀螺仪的刻度因子、与比力有关的漂移等误差却没有消除. 陀螺仪的误差与各轴的比力的一次项和二次项有关, 一般为三元二次多项式的结构. 以陀螺仪 X 轴为例, 建立陀螺仪的数学模型为:

$$\omega_o = \omega_i + D_0 + D_x a_x + D_y a_y + D_z a_z + D_{xx} a_x^2 + D_{zz} a_z^2 + D_{xz} a_x a_z + D_{xy} a_x a_y + D_{yz} a_y a_z \tag{1}$$

式中: ω_i, ω_o 分别为输入、输出角速度; a_x, a_y, a_z 分别为沿 X, Y, Z 轴的比力; D_0 为常值漂移; D_x, D_y, D_z 为与比力一次项成正比的漂移系数; D_{xx}, D_{zz} 为与比力二次项成正比的漂移系数; D_{xy}, D_{xz}, D_{yz} 为与比力乘积项成正比的漂移系数.

由于二位置法和三位置法都是转三次位, 寻北原理是一样的. 因此以二位置法为例分析各误差, 该分析同样适用于三位置法. 为了讨论简单起见, 只考虑姿态角为零的情况. 由于加工精度的限制, 转位角度不可能正好是 180° , 由此将导致地球自转角速度在位置 2 测量轴上的投影出现偏差.

由于工艺原因, 陀螺仪的两根测量轴可能不完全正交, 由此将导致地球自转角速度在 X 轴上的投影 $\omega_{x(1)}, \omega_{x(2)}$ 与真值出现偏差. 寻北解算所用的陀螺仪数学模型(1) 式中, 将常值漂移 D_0 视为常量, 但实际上, 由于陀螺仪工作温度的变化、轴承摩擦力矩的变化等原因使得 D_0 随时间变化. 由于陀螺仪比例因子的标定值不准确, 陀螺仪工作温度的变化或轴承摩擦力矩的变化等原因, 可能导致陀螺仪比例因子出现误差, 从而导致航向角误差.

2 系统的硬件设计

惯性定向装置作为车载定位定向导航系统中的重要组成部分, 用于在载体静止的工作条件下自动完成北向基准和载体姿态角的测量, 为系统提供初始方位角, 其系统结构图如图 1 所示.

寻北计算机控制板在寻北过程中担任 4 路 PWM 信号的采集、数字滤波、姿态矩阵的解算、与导航计算机通讯的任务. 其中 MC9S12XEP100 作为核心处理器, 实现寻北算法和收发控制指令. 导航计算机的控制指令和寻北结果通过串口 RS232 进行传输.

根据技术总体对型号选型的产品需求和任务技术要求, 选用主控芯片 MC9S12XEP100. 该单片机可以满足二位置导航解算时的运算要求, 能够适应多种条件下的寻北需求. 同时该单片机的中断源比较丰富, 可扩展性比较强, 便于今后的扩

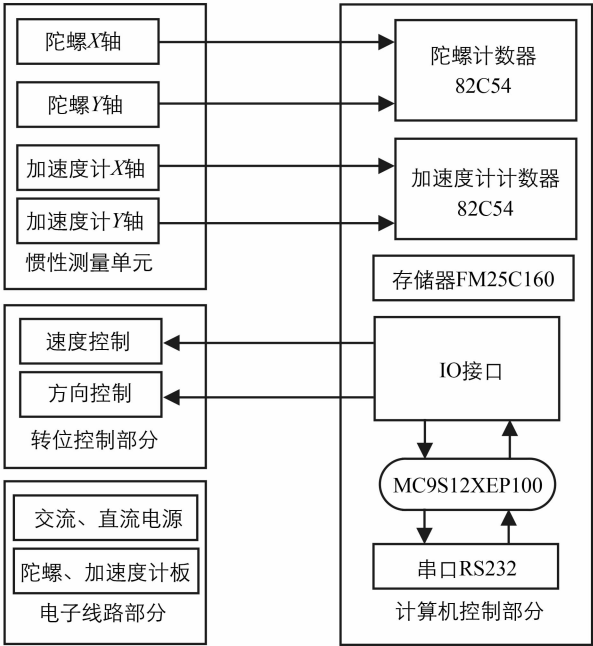


图 1 惯性定向装置的系统结构图

展开发。

HCS12 单片机内置脉冲捕捉和计数模块 ECT, 可以实现对脉冲计数的功能。为了更加有效的实现计数功能, 在系统中加入 2 片 82C54 计数芯片。由这两个芯片独立地对陀螺和加速度计的 4 路脉冲信号进行计数, 这样既可以提高主程序的运行效率, 又保证了计数的准确性。而且 82C54 易于操作和控制, 读取计数值方便。

FM25C160 非常适用于需要快速存储数据和长久保存数据的场合, 该系统需要使用该芯片存储和读取传感器参数表和航向角非线性参数表。由于该芯片可以克服 EEPROM 由于其读写周期长而可能会引起的数据丢失, 因此可以很好适用于本系统。

该系统采用串口 RS-232 进行数据通讯。为实现采用 +5V 供电的 TTL 和 CMOS 通信接口电路能与 RS-232C 标准接口的连接, 必须进行串口输入、输出信号的电平转换。MAX232A 内部具有双充电泵电压变换器, 把 +5 V 变换成 ±10 V, 作为驱动器的电源, 具有两路发送器及两路接收器, 有效地提高了串口的驱动和带载能力。

接口电路主要负责与外部的输入输出, 因此需要保证其稳定性和带载能力, 以确保外电路发生故障时, 不会使主控芯片的输入输出端口遭到破坏。由于本计算机控制系统的对外接口都是单向的, 因此该总线收发器通过控制信号收发方向的方式有效地阻止干扰信号的传输。它比传统的反向器具有更高的噪声容限。

惯性定向装置在正常工作时可能由于这些干扰的影响造成状态的不稳定, 严重时甚至会造成系统崩溃, 因此, 合理的系统抗干扰设计十分重要。本系统采用软件和硬件相结合的抗干扰设计。由于噪声一般都是高频信号, 因此可以将 LC 和 RC 低通滤波器接入输入输出通道上, 这样可以大大削弱外界各类干扰。另外, 系统采用了三态输入输出总线收发器, 它将外界信号与微处理器隔离, 既可以起到过压保护的作用又可以达到滤波的效果, 从而完成输入输出接口的抗干扰。由于惯性定向装置金属外壳有很好的屏蔽作用, 因此只需要把本计算机控制板插入到惯性定向装置中就可以将本系统的所有器件包围, 达到很好的屏蔽效果。

3 系统的软件设计

寻北计算机控制板的硬件是实现寻北的基础, 而程序与算法则是实现寻北流程的关键与核心。根据软件设计原则和软件功能需求分析, 按功能划分为: 初始化、主控、通讯和数据采集处理 4 个主要模块, 再将这 4 个主要模块进行层次细化^[6]。

为了使系统最终脱离仿真器独立运行, 必须将输出文件存储到 FLASH 中, 单片机在复位之后, 自动运行固化在指定地址空间内的程序, 执行程序引导装载功能。上电运行后, 存储在 FLASH 内的程序拷贝到内部 RAM 中运行, 然后对各个传感器进行自检, 如果自检信息正常, 接收导航计算机发送的初始经纬度信息并且回报, 确认信息正确后进入三位置寻北和导航解算, 最后将寻北结果发送给导航计算机, 以备后期数据分析。

本系统使用异步串口 SCI 与导航计算机通讯, 使用同步串口 SPI 与存储器 FM25C160 通讯。初始化设置主要包括了 CRC 校验表初始化、计数器的初始化、存储器的初始化和看门狗的初始化。系统的外部振荡器选用了 16MHz 的晶振芯片, 需要将系统总线的频率提升到 80 MHz, 这样既可以满足运算和通讯的性能要求而且又可以保证系统的稳定性。通过配置锁相环 PLL4 的相应寄存器可以实现对主频的设定。主控模块主要包括主控程序, 硬件控制管理程序和寻北解算模块。根据寻北协议和寻北流程, 本系统的主要功能是寻北, 由于寻北流程是由几个状态组成, 相应的状态和流程如图 3 所示。

系统采用了状态机的方式, 将各部分子程序以任务函数的方式进行调用。该寻北流程分为 7 个状态。每个状态都在发送不同的值, 并且会等待一个命令到来以进入下一个状态, 如果没有收到相应的命令则维持原状态。

系统使用串口 0, 在初始化时将波特率设置为 9 600 bps, 8 个数据位, 1 个停止位和无奇偶校验位, 发

送和接收缓冲区为 600 字节. 系统采用中断式的串口收发, 当接收缓冲区满时进入串口接收中断, 处理接收到的串口数据; 当发送缓冲区满时进入串口发送中断, 将数据组包发送. 由于 HCS12 单片机的串口中断号只有 1 个, 因此需要在进入串口中断后判断是接收中断还是发送中断. 当串口的状态变化时产生串口中断, 读取发送数据寄存器的空标志位 TDRE 和接收数据寄存器的标志位 RDRF, 判断是发送中断还是接收中断, 当 RDRF 位为 1 时为接收中断, TDRE 为 1 时为发送中断.

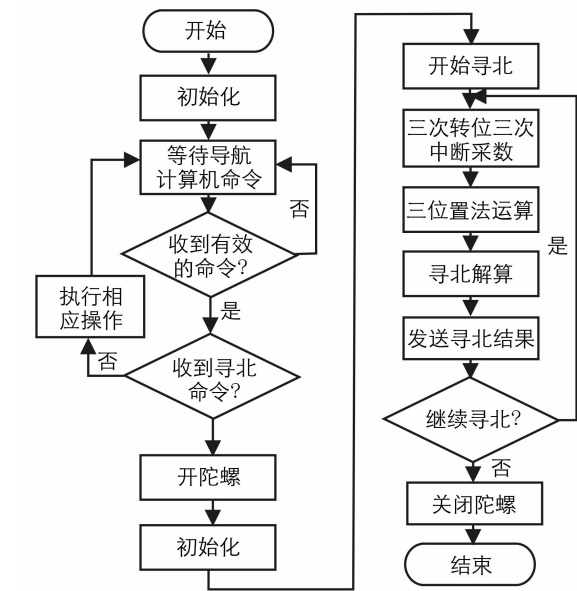


图 2 软件流程图

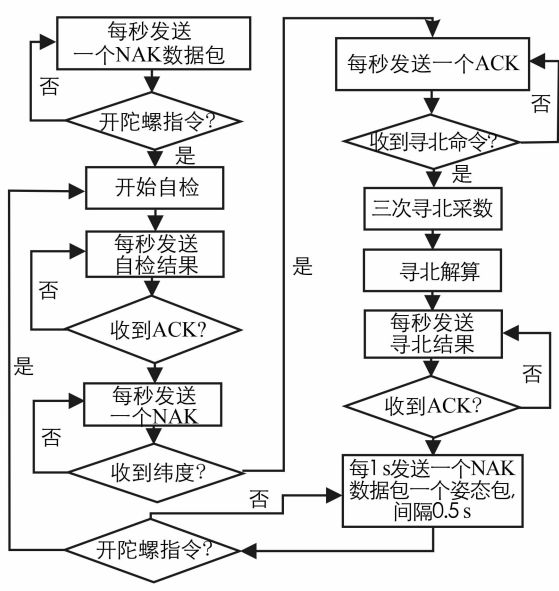


图 3 寻北流程图

4 装置标定与寻北试验

为保证惯性元件和系统的正常工作, 惯性元件和惯导系统出厂之前必须通过标定以确定基本的误差数学模型参数^[7]. 陀螺仪标定的任务就是通过实验测出比例因子 k_g 、零偏 z_g 和陀螺漂移 ω_d . 此外, 由于工艺原因, 陀螺仪的两根测量轴可能不完全正交. 因此, 还需要标定测量轴之间的不正交误差角.

当惯性定向装置在水平面内旋转时, 陀螺仪的输出按航向角的正弦变化. 根据航向角与陀螺仪输出的对应关系, 可以检查陀螺仪测量轴的方向是否与定义的方向相符合, 并可以确定比例因子符号. 根据航向角的大致值及航向角所在象限与陀螺仪输出的正负对应关系, 确定陀螺仪比例因子的正负号. 当 $\gamma = 0$ 时将惯性定向装置绕 X 轴转动, 或者当 $\theta = 0$ 时将惯性定向装置绕 Y 轴转动, 均不改变航向角. 因此在以上两种情况下可以先使用四位置法求出当 $\theta = \gamma = 0$ 时的航向角和比例因子, 然后再分别求出漂移项系数.

根据陀螺的标定方法^[8], 在 4 个位置进行寻北, 分别求出 4 个位置的航向角和陀螺仪 X 轴、Y 轴输出值. 将求出的航向角转换为角度值, 对 X 轴、Y 轴采集到的脉冲数求均值可以得到表 1.

表 1 陀螺仪输出数据表

寻北角度/ $^{\circ}$	X 轴采样数据	Y 轴采样数据
79.3 $^{\circ}$	3 078.7	3 152.0
169.3 $^{\circ}$	3 191.8	3 084.4
259.3 $^{\circ}$	3 111.9	2 988.6
349.4 $^{\circ}$	2 998.8	3 056.3

将上表中的数据画成折线图如图 4 所示, 其中以采样数据为纵坐标, 航向角为横坐标. X 轴为 0 $^{\circ}$ 相位的正弦波, 而 Y 轴为 180 $^{\circ}$ 相位的余弦波, 因此 X、Y 轴的比例因子都为负, 且不需要交叉.

将标定参数写入存储器中, 计算机控制板寻北解算时会自动调用该参数. 将写入标定参数的计算机控制板装入惯性定向装置中, 并固定到转台上. 使用辅助调平设备将平台设置为水平, 使用辅助指北设备将

初始位置对准北向, 每 30° 转动 1 个位置, 每个位置连续寻北 3 次, 最后转回到初始位置. 转动转台 3 圈, 做 3 次该实验并记录 3 次实验的寻北数据(航向角).

由于转台的相对转动角度非常准确, 因此本系统采用归一化寻北值的方法来验证标定结果是否正确, 寻北结果是否精确. 归一化处理就是将其他每个位置寻北值的均值归一到到某个位置, 本次处理将其归一到 0° 位置, 并求出 3 次实验所得寻北值的中间误差. 为验证单点的重复性, 在每个位置对 9 次寻北值求中间误差, 归一化之后的寻北值和每个位置的中间误差如表 2 所示, 其中 $1\text{ mil}=0.06^{\circ}$.

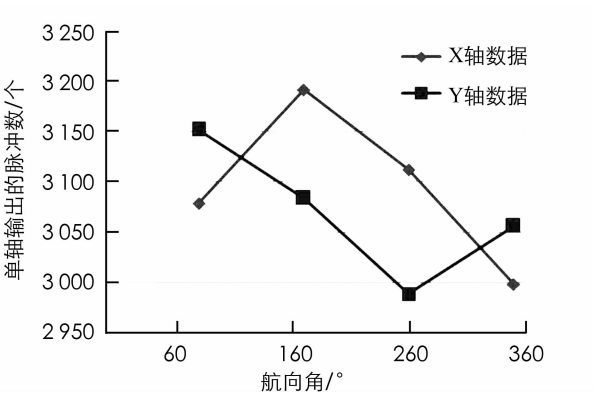


图 4 陀螺仪输出数据与航向角关系图

表 2 归一化的寻北值

转台读数	第一次实验数据/mil	第二次实验数据/mil	第三次实验数据/mil	中间误差/mil
0°	5932.9	5932.6	5932.2	0.24
30°	431	430.2	431.2	0.36
60°	929.8	929.9	929.4	0.18
90°	1 430.5	1 430.1	1 430.8	0.24
120°	1 931.2	1 933.5	1 931.2	0.90
150°	2 433.2	2 433.2	2 433	0.08
180°	2 932.9	2 932	2 932.7	0.32
210°	3 432	3 432.2	3 431.9	0.10
240°	3 931.4	3 932.1	3 931	0.38
270°	4 432.9	4 433.3	4 433	0.14
300°	4 935	4 933.6	4 935	0.55
330°	5 434.8	5 434.8	5 434.9	0.04
360°	5 932.8	5 932.7	5 932.9	0.07

求出 3 次实验所得寻北数据的中间误差, 第一次为 0.96 mil, 第二次为 0.89 mil, 第三次为 0.85 mil, 在每次实验每个位置 3 次寻北数据的中间误差都小于 1 mil. 数据表明, 本系统的寻北精度在 1 mil 内, 单点重复性很好, 且在每个位置 3 次连续寻北的时间为 6 分 20 秒左右, 因此满足精确快速寻北的要求.

5 结 论

本文设计了一个准确控制和快速解算的惯性定向装置计算机控制系统, 用于控制惯性定向装置寻北, 采集加速度计和陀螺仪信号以及寻北解算. 采用三位置法作为寻北方案, 消除了陀螺的常值误差和漂移趋势一次项的影响. 选用合适的硬件搭建电路并制作电路板, 选用了专用的开发器和编译环境进行了软件的开发和调试. 最后对该系统进行工程化处理, 使其能够用于实际的惯性定向装置型号产品. 通过寻北实验, 证明安装了该计算机控制板的某型号惯性定向装置的寻北精度和寻北时间满足工程上精确快速寻北的要求. 然而, 该系统没有考虑外界扰动的情况, 在实际的车载应用环境中车体的震动、人的走动等外界干扰都会影响到寻北结果. 因此如何克服环境干扰的影响是今后课题研究的主要方向.

参考文献:

[1] 徐 赞, 孙 磊. 基于 FPGA 的光纤陀螺信号采集处理卡设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(10): 2839—2841.
[2] 熊蔚明, 程 鑫, 叶云裳, 等. 空间惯性定向姿态卫星数传链路设计 [J]. 空间科学学报, 2014, 34(4): 483—488.
[3] 王立冬, 刘 军, 鲁 军. 多位置寻北误差与陀螺数据采样时间的关系 [J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(3): 286—289.
[4] 魏静波, 刘 昆, 吴锦杰. 惯性定向三轴稳定卫星姿态自适应滑模控制 [J]. 控制与决策, 2013, 28(8): 1231—1234, 1241.

[5] 白俊卿, 张 科, 卫育新. ARMA 模型在光纤陀螺惯导系统寻北中的应用 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(8): 42—44.

[6] 翟红生, 于海鹏. 基于时间同步的 WSNs 声音定位系统研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(7): 156—161.

[7] 方光辉, 胡金星, 周廷刚, 等. 基于 GIS 的三维数字城市基础平台原型系统设计与实现 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(12): 139—144.

[8] 孙 枫, 孙 伟. 基于双轴转位机构的光纤陀螺标定方法 [J]. 控制与决策, 2011, 26(3): 346—350.

On Design of Computer Control System in Inertial Directional Device

GENG Xiang-hua, CHEN Wan

Department of Information Engineering, Zhengzhou Tourism College, Zhengzhou 450009, China

Abstract: According to the accurate control of the computer control system of inertial orientation device and quick solution, a new computer control system has been set up in this paper. With the Freescale16 MCU MC9S12XEP100 as the main control chip and the different functions of the hardware circuit and software algorithm, inertial navigation device signal acquisition, serial communication, fault detection and error compensation have been realized. At the same time the mathematical model of accelerometer and gyroscope has been established to analyze the errors of inertia and directional device. Then, the corresponding compensation and calibration method have been put forward from the perspective of the principle. Theoretical analysis and experimental results show that the inertial orientation device of single point repeatability, north seeking high precision north seeking time is short, to meet the precise requirements of the rapid north seeking.

Key words: north seeker; top; error analysis; Freescale MCU; system calibration

责任编辑 陈绍兰
实习编辑 包 颖