

# 高精度 A/D 转换技术在惯导系统中的应用研究

赵振涌, 袁 寰

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:** 针对惯导系统对模数转换电路的使用要求, 明确了制约 A/D 转换电路在惯导系统中应用的瓶颈是零位稳定性, 分析了 A/D 转换电路零位的影响因素, 提出了解决方法。并设计出一款 A/D 转换电路, 该电路的测试结果表明解决方法有效, 可将零位提高 2 个数量级, 与传统 V/F 转换电路相当。证明采用 A/D 转换芯片的模数转换电路能够满足惯导系统的精度要求, 同时相比 V/F、I/F 具有高采样率和高分辨率的优势, 技术指标可以满足高精度加速度测量系统等实际工程需求。

**关键词:** 高精度 A/D 转换; 零位; 采样率

**中图分类号:** TP29      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-8110 (2014) 02-0070-04

## Research on High Accuracy Analog - to - digital Convert for Inertial Navigation Systems

ZHAO Zhen - yong, YUAN Huan

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** This article found that the zero stability is the bottleneck of application of analog - to - digital convert circuits on inertial navigation systems based on application requirements, analyzed the influencing factors of the zero stability, then proposed solutions. Designed an analog - to - digital convert circuit whose test results prove the solutions, the zero turns out two orders of magnitude higher than old designs, and is as good as traditional V/F convert circuits. This result shows that analog - to - digital convert circuits which use analog - to - digital converters can satisfy the accuracy requirements of inertial navigation systems, and it has advantages than V/F、I/F convert circuits on high sampling rate and high resolution, technical indicators can fulfil systems which need high accuracy acceleration measurements.

**Key words:** High accuracy analog - to - digital convert ; Zero; Sampling rate

## 0 引言

很多惯性器件采用模拟量输出, 惯导系统需要对其进行模数转换才能得到惯性信息, 纯惯导系统是一个时间发散系统, 因此对惯性信息的绝对精度要求很高, 尤其是零位指标。随着惯导系统应用需求的发展, 对模数转换的采样率提出了越来越高的需求。传统惯导系统通常使用 V/F 或 I/F 转换电路 (以下统称 A/F 转换电路) 将惯性器件输出的电压量或电流转换为频率量, 再对频率量进行测量以得到惯性信息。A/F 转换电路在高采样率下量化噪声等问题无法解决, 高精度加速度测量系统等工程提出了使用 A/D 转换芯片进行模数转换的需求。以往使用 A/D 转换芯片的

模数转换电路 (以下简称 A/D 转换电路) 由于零位的稳定性和温度漂移特性 (其零位全温稳定性在 1mV 左右) 相比 A/F 转换电路较差, 无法应用于惯导系统, 而 A/D 转换电路在分辨率、采样率、成本和体积等方面均优于转换电路。为突破 A/D 转换电路这一瓶颈, 为惯导系统提供更好的模数转换解决方案, 本文对 A/D 转换电路的零位进行研究, 分析了零位的影响因素并提出了解决方法, 设计出一款原理样机, 该样机零位指标相比以往产品提高了 2 个数量级, 可满足常规惯导系统精度要求的同时, 提高其高采样率。

收稿日期: 2014-07-30; 修订日期: 2014-08-15。

作者简介: 赵振涌 (1974-), 男, 研究员, 主要从事电子电路设计方面的研究。E-mail: zzyat33@163.com

### 1 A/D 转换电路零位影响因素分析及解决方法

#### 1.1 A/D 转换电路零位影响因素分析

A/D 转换芯片的供电电源对模数转换有较大影响，因此要尽量提高其供电电源品质。数字信号相比模拟信号具有频率高、变化快等特点，需对其信号完整性进行特殊设计，减少对模拟信号的影响。A/D 转换芯片的采样保持电路和  $\Sigma - \Delta$  调制器等电路均与其工作时钟相关，因此使用高品质的工作时钟会提高 A/D 转换电路零位指标。A/D 转换芯片的零位对 A/D 转换电路的零位亦存在影响。

A/D 转换电路既有数字地，又有模拟地，数字地和模拟地的设计原则为：在混合信号的系统中，必须是模拟地和数字地分开设置，否则数字信号中的噪声电压会干扰模拟信号<sup>[1]</sup>。当输出模拟信号的地线和供电电源共用同一根地线时，工作电流在地线上引起的电压波动会影响模拟信号的测量，需改变 A/D 转换电路的拓扑结构提高零位指标。优秀的 PCB 设计能够降低空间辐射和 A/D 转换电路上数字信号对模拟信号的影响，A/D 转换电路的零位与 PCB 设计的优劣与较大关系。

#### 1.2 解决方法

##### 1.2.1 A/D 转换芯片供电电源设计

A/D 转换芯片使用 TI 公司的 ADS1258，其供电电源抑制比典型值为 85db，A/D 转换电路对 A/D 转换芯片的供电电源进行了针对性设计。

ADS1258 使用  $\pm 2.5V$  电源供电，其设计实现如图 1 所示。电源转换芯片选择输出特性较好的 LDO，其中 +2.5V 电源由 LT1761 产生，-2.5V 电源由 LT1964 产生。LT1761 最大输出电流 100mA，输入电压范围 1.8V ~ 20V，输出电压噪声较低，值为 20uVRMS。LT1964 最大输出电流 200mA，输入电压范围 -20V ~ -1.22V，输出电压噪声较低，值为 30uVRMS。LDO 输入端之前串联的电阻与其后的电容构成良好的低通滤波器，可有效抑制电源纹波和噪声。

##### 1.2.2 A/D 转换电路数字信号信号完整性设计

A/D 转换电路在所有数字信号上采用源端串接的方式保证信号完整性，避免数字信号的抖动、串扰、振铃、下冲和过冲<sup>[2]</sup>，从而减少对模拟部分性能的影响，降低 A/D 转换电路的采样

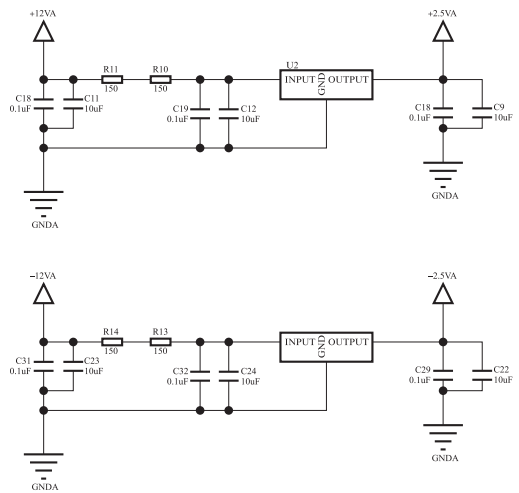


图 1 ±2.5V 供电电源电路

Fig. 1 The  $\pm 2.5V$  power supply circuits

噪声。

##### 1.2.3 A/D 转换芯片工作时钟设计

工作时钟影响 A/D 转换精度的指标主要为相位噪声和温度漂移特性。A/D 转换电路选择 RA-KON 公司的温补晶振 510699 - 20MHz，该晶振价格合理、供货渠道通畅，全温度范围内输出频率温度稳定度为  $\pm 0.3 \times 10^{-6}$ ，相位噪声典型值如表 1 所示，是一款性价比较高的温补晶振。

表 1 相位噪声典型值

Tab. 1 The typical value of phase noise

| 频率     | 相位噪声典型值    |
|--------|------------|
| 1Hz    | -64dBc/Hz  |
| 10Hz   | -93dBc/Hz  |
| 100Hz  | -121dBc/Hz |
| 1kHz   | -144dBc/Hz |
| 10kHz  | -152dBc/Hz |
| 100kHz | -155dBc/Hz |
| 1MHz   | -156dBc/Hz |

##### 1.2.4 A/D 转换芯片零位消除

A/D 转换电路使用 CHOPPING ON 技术消除 A/D 转换芯片零位影响，其实现原理如图 2 所示。A/D 转换芯片对同一通道连续采样 2 次，2 次采样的输入信号相位相反，连续 2 次采样结果的差值即为输入测量结果的两倍。使用 CHOPPING ON 技术可以有效消除 A/D 转换芯片的零位误差，提高 A/D 转换电路零位指标。

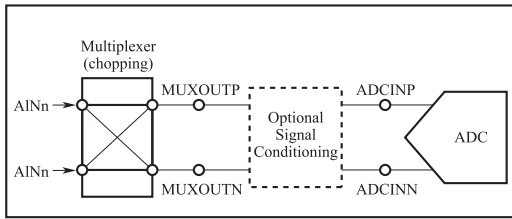


图2 CHOPPING ON 实现原理图

Fig. 2 The scheme of CHOPPING ON

### 1.2.5 接地设计

在A/D转换电路中，将数字地和模拟地分开，使用单点接地方式连接数字地和模拟地。单点接地点选取在模拟部分和数字部分之间，A/D转换芯片所有控制信号分布在单点接地点两侧，并尽量紧凑以减小数字部分回流面积。

### 1.2.6 A/D转换电路拓扑结构设计

为解决信号地和供电地共用导致的零位测量误差，将信号地和供电地分开。A/D转换电路中采用图3所示拓扑结构，模拟信号在输入点就近接一只0.1 $\mu$ F的滤波电容，信号地在测量端（A/D转换芯片差分输入负管脚）接地。ADS1258输入阻抗较高（典型值65k $\Omega$ ），信号线上流过的电流为 $\mu$ A级，可降低其传输损耗对零位的影响。

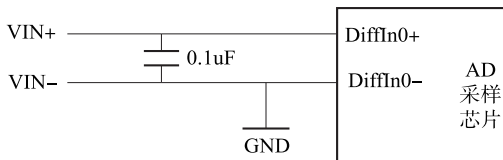


图3 信号地连接方式

Fig. 3 The way of connecting signal ground

### 1.2.7 A/D转换电路PCB设计

模拟信号易被数字信号干扰，因此A/D转换电路在PCB设计时采取多层设计，模拟信号走线层上下均使用模拟地平面对信号进行保护。PCB采用8层板设计，模拟信号使用第1、3层，第2、4层铺模拟地保护第1、3层的模拟信号（顶层设计有屏蔽罩，第1层模拟信号使用屏蔽罩和第2层模拟地平面保护），第5层铺空网表平面，第7层走数字信号。第5层为反射屏蔽层，用于屏蔽第7层数字信号的干扰。第5层平面网表通常在模拟地和空网表之间选择，A/D转换电路不选择模拟地的原因为数字信号的变化会造成该层的波动，影

响模拟地。屏蔽层表面对电磁波的反射作用对电磁波的场强具有衰减作用，不同屏蔽层材料在不同频率能达到的屏蔽效果如表2所示<sup>[3]</sup>。从表2可以看出，生产PCB的原料铜具有很好的反射能力，因此反射屏蔽层的设计可以提高A/D转换电路的零位指标。

表2 不同屏蔽层材料在不同频率能达到的屏蔽效果

Tab. 2 Different shield effects of different materials under different frequencies

| 屏蔽层材料 | 频率/Hz           | 反射损耗/dB |    |     |
|-------|-----------------|---------|----|-----|
|       |                 | 电场      | 磁场 | 远场  |
| 铜     | 10              | 312     | -  | 158 |
|       | 10 <sup>4</sup> | 222     | 35 | 128 |
|       | 10 <sup>7</sup> | 132     | 65 | 98  |
| 钢     | 10              | 272     | -  | 118 |
|       | 10 <sup>4</sup> | 182     | -  | 88  |
|       | 10 <sup>7</sup> | 95      | 28 | 61  |

注：“-”表示反射损耗很小，有关的近似公式无效。

## 2 A/D转换电路零位实测结果

使用上述方法优化后的A/D转换电路零位全温度范围内测试结果如图4、图5所示。图4是不用CHOPPING ON技术的测试结果，比以往产品零位温漂指标提高了一个数量级以上，采用CHOPPING ON技术以后，零位温漂指标又提高了接近一个数量级。最终测试结果比以往产品的零位温漂指标提高了两个数量级，效果显著。

本次设计的A/D转换电路的模拟量输入范围为-2.048V ~ +2.048V，零位全温范围内漂移小于6 $\mu$ V（三套样机最大不超过6 $\mu$ V），零位漂移与测量范围比值为 $1.46 \times 10^{-6}$ ；V/F或I/F零位指标一般为 $\pm 0.5$ Hz，满量程输出为240kHz或256kHz，零位漂移与测量范围比值为 $1.9 \times 10^{-6}$ 。可见，本次设计的A/D转换电路零位指标已经与V/F或I/F持平，针对零位改进采取的措施效果显著。

## 3 A/D转换电路的综合性能和温度标定潜力

为验证A/D转换电路的综合性能指标，进行了温度摸底试验和温度标定工作。输入0.5V时标定前和标定后的数据如图6、图7所示。从图6可以看出，A/D转换电路的温度特性曲线近似为一条二次曲线（三个样机的温度特性曲线趋势完全

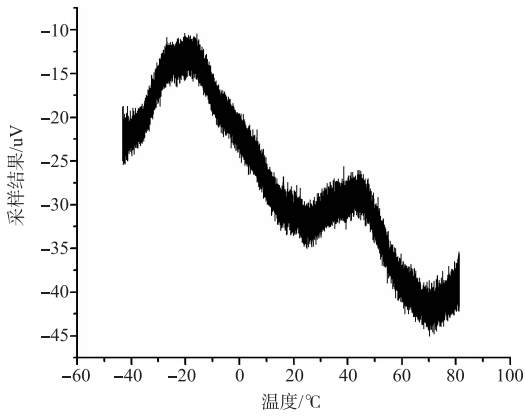


图 4 未使用 CHOPPING ON 时零位全温度范围内测试结果

Fig. 4 The zero drift over temperature when CHOPPING OFF

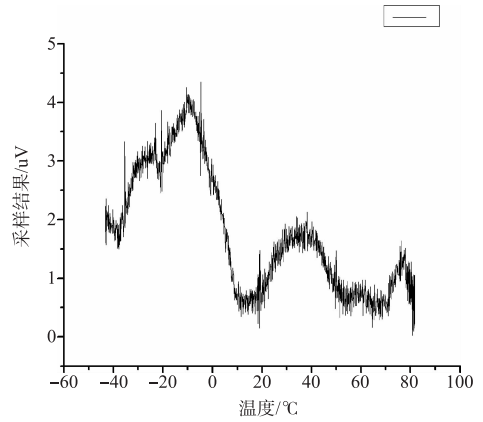


图 6 标定前测试数据

Fig. 6 The test results before calibration

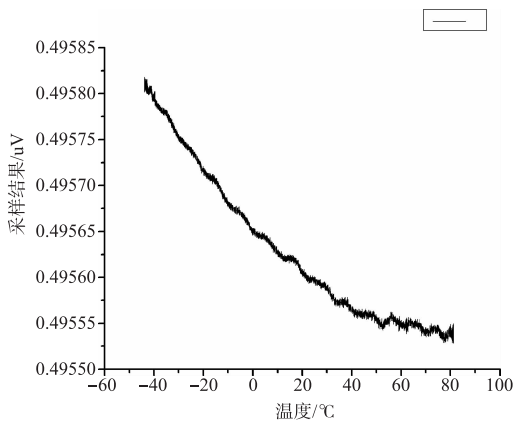


图 5 使用 CHOPPING ON 时零位全温度范围内测试结果

Fig. 5 The zero drift over temperature when CHOPPING ON

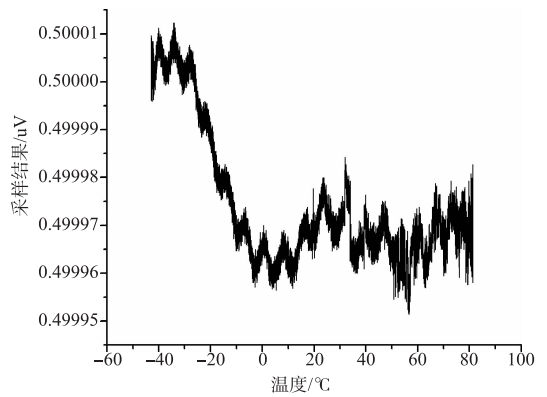


图 7 标定后测试数据

Fig. 7 The test results after calibration

一致), 具有良好的标定潜力, 标定时只需利用  $-45^{\circ}\text{C}$ 、常温和  $+80^{\circ}\text{C}$  三个温度点下的测试数据进行标定, 全温度范围内即可达到  $\pm 50\mu\text{V}$  的精度。相比 A/F 转换电路的标定, 具有标定温度点少和标定方法简单 (只需数字标定) 的优点。

### 4 结论

本文详细论述了一种高精度 A/D 转换技术的实现, 着重分析了 A/D 转换电路零位的影响因素及解决方法, 并完成了设计实现。电路的测试结果表明解决方法效果显著, 与以往 A/D 转换电路相比, 可将零位指标提高 2 个数量级, 全温范围达到  $6\mu\text{V}$  水平, 与惯导系统传统采用的 A/F 转换电路零位指标相当, 可以满足常规惯导系统精度要求。并对其它性能指标进行了摸底测试, 结果表明 A/D 转换电路具有很好的补偿特性和补偿效果。

因此, A/D 转换电路解决了零位指标这一瓶颈以后, 为其打开了在惯导系统上的应用之门, 同时与 A/F 转换电路相比, A/D 转换电路在通频带、采样率、分辨率、体积、功耗、成本、可补偿性等方面具有天然的优势, 可解决目前部分系统急需的高采样率问题。

### 参考文献

[1] 纪宗南. 集成 A/D 转换器应用技术和实用线路 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009, (1): 27.  
 [2] ADS1258 Data Sheet (TI): 16.  
 [3] 高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012, (2): 14.