

国产核心器件构建多通道模拟量采集系统的精度分析与设计

王 农, 雷海军, 袁 媛, 于海祥, 张明伟

(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要: 现代卫星驱动控制系统对模拟量的采集通道和采集精度的要求日益增高, 而现有技术缺乏对系统采集精度的系统研究, 导致核心器件国产化替代过程中经常出现采集精度无法满足预期的问题; 针对该问题, 对基于多通道模拟开关和开关电容模数转换器(ADC)构建的多通道模拟量采集系统的精度影响因素进行了系统研究, 分别建立了系统静态误差和动态误差分析模型, 为关键器件选型建立了理论依据, 并通过基于国产16通道模拟开关和8通道12位开关电容ADC设计的128通道模拟量采集系统进行了验证; 结果表明: 该系统的绝对测量精度优于1.6 mV, 小于ADC自身引入的误差估算值1.883 mV; 说明基于静态误差和动态误差模型建立的核心器件选型依据对设计和改进多通道模拟量采集系统的测量精度具有普遍指导意义。

关键词: 多通道模拟量采集系统; 精度分析; 静态误差; 动态误差; 开关电容ADC; 模拟开关

Accuracy Analysis and Design of Multi-Channel Analog Acquisition Systems Constructed by Domestic Key Components

Wang Nong, Lei Haijun, Yuan Yuan, Yu Haixiang, Zhang Mingwei

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: Channel numbers and measurement accuracy of analog acquisition systems are increasingly demanded in modern satellite drive and control systems. However, existing technology lacks systematic research on the acquisition accuracy of the system. As a result, acquisition accuracy often fails to meet expectation in the substitution process of domestic key components. To solve this problem, factors affecting the accuracy of the multi-channel analog acquisition system, which is based on multi-channel analog switch and switched capacitor analog-to-digital converter (ADC), are studied systematically. The analysis models of the static and dynamic error of the system are respectively build, and theoretical basis for key components selection is established, which are verified by a 128-channel analog acquisition system based on the domestic 16-channel analog switch and 8-channel 12-bit switched capacitor ADC. The results show that the absolute measurement accuracy of the system is better than 1.6 mV, which is better than the estimated error of 1.883 mV introduced by the ADC itself; and it indicates that the established criteria for key components selection based on the static and dynamic error model has general guiding significance for designing and improving the measurement accuracy of multi-channel analog acquisition systems.

Keywords: multichannel analog acquisition systems; accuracy analysis; static error; dynamic error; switched capacitor ADC; analog switch

0 引言

现代卫星驱动控制系统对模拟量的采集通道和采集精度的要求日益增高。多通道模拟量采集系统通常由模拟开关和模数转换器(ADC)等核心器件构成。目前, 国内外关于多通道模拟量采集系统的设计与验证相关文献较多^[1-9], 但讨论的重点几乎全部集中在系统组成方面, 而关于采集精度及其影响因素的系统论述几乎没有。多通道模拟量采集系统的采集精度通常由ADC输入端和参考端的模拟信号链决定, 而该部分电路通常根据厂商提供的参考电

路实现。由于缺乏对系统精度分析和核心器件选型的理论依据, 经常出现根据实际应用修改电路参数后采集精度无法满足预期的问题。

鉴于上述背景, 基于国产多通道模拟开关和开关电容ADC构建多通道模拟量采集系统, 重点对系统采集精度及其影响因素进行分析, 分别建立系统静态误差和动态误差的分析模型, 并通过试验进行验证, 为核心器件选型和国产化替代建立理论依据。

1 系统组成及原理

基于国产核心器件构建的多通道模拟量采集系统如图1所示, 包括通道切换模块、阻抗变换模块、滤波模块、AD转换模块和数字控制模块。通道切换模块由8片16通道模拟开关(MUX1-MUX8)组成, 构成128个模拟量采集通道; 阻抗变换模块由运算放大器(OP1-OP8)构成的电压

收稿日期: 2020-07-09; 修回日期: 2020-07-14。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX01013101-003)。

作者简介: 王 农(1984-), 男, 河北辛集人, 博士, 工程师, 主要从事卫星平台精密驱动控制产品的设计与测试方向的研究。

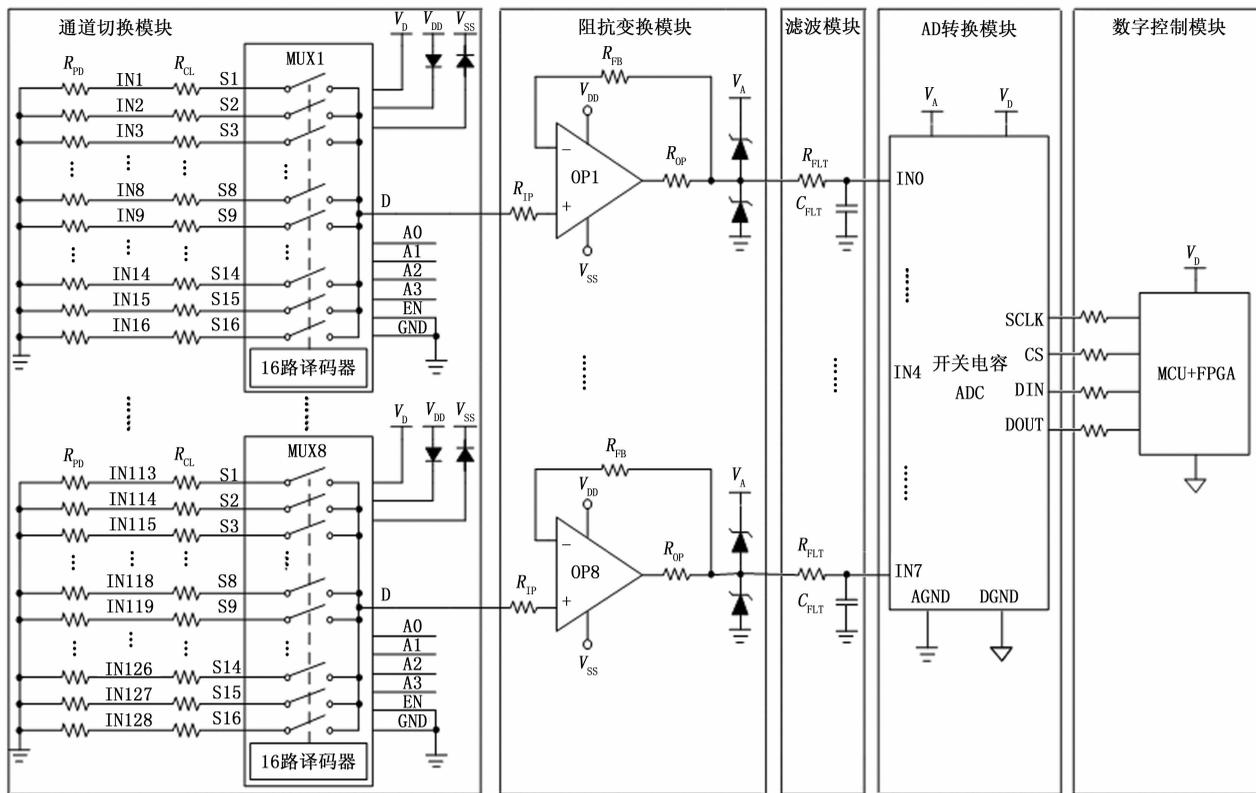


图 1 多通道模拟采集系统图

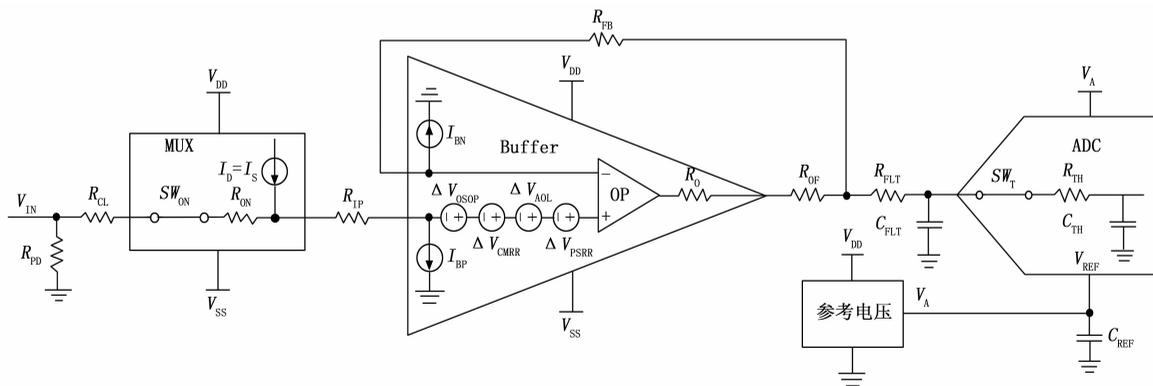


图 2 静态误差分析模型

跟随器实现, 用于对模拟开关的输出信号进行隔离, 消除模拟开关导通电阻和输入限流电阻对采集精度的影响; 滤波模块由一阶 RC 电路构成抗混叠滤波器, 其滤波电容同时作为电荷泵用于提供或吸收 AD 转换过程中产生的瞬态电流; AD 转换模块由 8 通道开关电容 ADC 实现, 完成从模拟量到数字量的转换; 数字控制模块由 FPGA 和 MCU 实现, 用于完成模拟开关通道切换和数据处理。该系统的基本工作原理与现有技术^[7-9]相比并无本质区别, 不再赘述。这里重点对采集系统的精度影响因素进行分析。

概括来讲, 多通道模拟量采集系统的精度影响因素主要包括两个: 由模拟信号链静态参数的非理想性引入的静态误差和由动态参数的非理想性引入的动态误差, 下面分

别详细论述。

2 静态误差影响因素分析

图 2 为图 1 所示系统中单个测量通道的静态误差分析模型。可见, 系统静态误差主要来源于模拟开关、电压跟随器、参考电压和 AD 转换器。通常, 认为上述误差项彼此独立且互不相关, 因此系统静态误差 δ_s 应满足:

$$\delta_s = \sqrt{\delta_{\text{MUX}}^2 + \delta_{\text{OP}}^2 + \delta_{\text{VREF}}^2 + \delta_{\text{AD}}^2} \quad (1)$$

式中, δ_{MUX} 、 δ_{OP} 、 δ_{VREF} 和 δ_{AD} 分别为模拟开关、电压跟随器、参考电压和 AD 转换器引入的静态误差, 且均为等效到 ADC 输入端的电压值。下面分别对各误差项进行详述。

2.1 模拟开关引入的静态误差

如图 2 所示, 假设输入信号 V_{IN} 的输出阻抗足够小而运

放的输入阻抗足够大, 则模拟开关引入的静态误差 δ_{MUX} 主要由输入限流电阻 R_{CL} 、导通电阻 R_{ON} 和导通漏电流 I_{D} 决定, 可表示为:

$$\delta_{\text{MUX}} = I_{\text{D}}(R_{\text{CL}} + R_{\text{ON}}) \quad (2)$$

2.2 电压跟随器引入的静态误差

电压跟随器通常由运算放大器 (简称运放) 构成, 其静态误差主要来源包括失调误差 ΔV_{OSOP} , 共模抑制比、电源抑制比和开环增益引入的误差 ΔV_{CMRR} 、 ΔV_{PSRR} 和 ΔV_{AOL} , 以及失调电流 I_{OS} 引入的误差电压 ΔV_{IOS} 。通常, 认为上述误差项彼此独立且互不相关, 则运放引入的静态误差 δ_{OP} 可表示为:

$$\delta_{\text{OP}} = \sqrt{\Delta V_{\text{OSOP}}^2 + \Delta V_{\text{CMRR}}^2 + \Delta V_{\text{PSRR}}^2 + \Delta V_{\text{AOL}}^2 + \Delta V_{\text{IOS}}^2} \quad (3)$$

式中, 各误差项均为等效到运放输入端的误差电压。其中, ΔV_{OSOP} 、 ΔV_{CMRR} 、 ΔV_{PSRR} 和 ΔV_{AOL} 可根据运放数据手册相关数值计算得到。

图 2 中, 若有 $(R_{\text{CL}} + R_{\text{ON}} + R_{\text{IP}}) = R_{\text{FB}}$, 其中 R_{CL} 和 R_{ON} 分别为模拟开关输入限流电阻和导通电阻; R_{IP} 为运放输入限流电阻; R_{FB} 为运放偏置电流补偿电阻, 则运放正向和负向偏置电流 I_{BP} 和 I_{BN} 的影响可以忽略。又知偏置电流和失调电流 I_{OS} 近似满足 $(I_{\text{BP}} - I_{\text{BN}}) = I_{\text{OS}}$, 则运放失调电流引入的误差电压 ΔV_{IOS} 可表示为:

$$\Delta V_{\text{IOS}} = I_{\text{OS}}(R_{\text{CL}} + R_{\text{ON}} + R_{\text{IP}}) \quad (4)$$

2.3 参考电压引入的静态误差

图 2 中, 参考电压 V_{REF} 为 AD 转换器提供电压参考, 其误差将直接传递到 AD 转换器的输出码值。参考电压引入的静态误差主要来源于初始精度误差 ΔV_{REF1} 、温度系数误差 ΔV_{REFT} 以及电源调整率和负载调整率引入的误差 ΔV_{REFS} 和 ΔV_{REFL} 。通常, 上述误差项彼此独立且互不相关, 则参考电压引入的静态误差 δ_{VREF} 可表示为:

$$\delta_{\text{VREF}} = \sqrt{\Delta V_{\text{REF1}}^2 + \Delta V_{\text{REFT}}^2 + \Delta V_{\text{REFS}}^2 + \Delta V_{\text{REFL}}^2} \quad (5)$$

式中, 各误差项的具体数值可根据参考电压数据手册相关数据计算得到。

2.4 AD 转换器引入的静态误差

若 AD 转换器输入端和参考端模拟信号链引入的误差可以忽略, 则系统精度将取决于 AD 转换器自身误差。AD 转换器的静态误差主要来源于积分非线性误差 ΔV_{ADINL} 、微分非线性误差 ΔV_{ADDNL} 、失调误差 ΔV_{ADOS} 和满量程误差 ΔV_{ADFS} 。若认为上述误差项彼此独立且互不相关, 则 AD 转换器引入的静态误差 δ_{AD} 可写为:

$$\delta_{\text{AD}} = \sqrt{\Delta V_{\text{ADINL}}^2 + \Delta V_{\text{ADDNL}}^2 + \Delta V_{\text{ADOS}}^2 + \Delta V_{\text{ADFS}}^2} \quad (6)$$

式中, 各误差项的具体数值可根据 AD 转换器数据手册相关数据进行计算。

3 动态误差影响因素分析

概括来讲, 系统动态误差主要取决于 ADC 采样阶段输入信号的建立精度和转换阶段参考信号的建立精度。

3.1 输入信号的建立时间和建立精度

图 3 所示为模拟开关从切换通道后到 ADC 启动采样前

的动态误差分析模型。可见, ADC 输入信号的建立精度主要取决于前端模拟信号链的建立时间, 主要影响因素包括: 模拟开关的建立时间 t_{MUX} 、电压跟随器的建立时间 t_{OP} 和抗混叠滤波器的建立时间 t_{FLT} 。通常, 认为上述建立时间彼此独立且互不相关, 因此输入信号的建立时间 t_{SIG} 可表示为:

$$t_{\text{SIG}} = \sqrt{t_{\text{MUX}}^2 + t_{\text{OP}}^2 + t_{\text{FLT}}^2} \quad (7)$$

式 (7) 中, 模拟开关的建立时间 t_{MUX} 主要包括通道切换时间和寄生参数引起的延迟时间, 即:

$$t_{\text{MUX}} = t_{\text{MUXSW}} + t_{\text{MUXRC}} \quad (8)$$

式中, t_{MUXSW} 为通道切换时间; t_{MUXRC} 为导通电容 C_{ON} 、导通电阻 R_{ON} 和限流电阻 R_{CL} 引入的延迟时间, 可表示为:

$$t_{\text{MUXRC}} = K_{\text{NBIT}}(R_{\text{CL}} + R_{\text{ON}})C_{\text{ON}} \quad (9)$$

式中, K_{NBIT} 为一阶 RC 电路达到 N 位建立精度的时间常数系数, 可表示为:

$$K_{\text{NBIT}} = \ln(2^N) \quad (10)$$

式 (7) 中, 电压跟随器的建立时间可根据运放的压摆率 SR_{OP} 进行估算:

$$t_{\text{OP}} = \frac{V_{\text{IN}}}{SR_{\text{OP}}} \quad (11)$$

抗混叠滤波器的建立时间 t_{FLT} 可表示为:

$$t_{\text{FLT}} = K_{\text{NBIT}}R_{\text{FLT}}C_{\text{FLT}} \quad (12)$$

式中, R_{FLT} 和 C_{FLT} 分别为滤波电阻和滤波电容。

要保证 ADC 启动采样前输入信号具有 N 位的建立精度, 模拟开关切换通道后的延迟时间 t_{D} 应满足:

$$t_{\text{D}} \geq t_{\text{SIG}} \quad (13)$$

此外, 如图 3 所示, ADC 开始采样瞬间, 即内部开关 SW_{T} 闭合瞬间, 滤波电容 C_{FLT} 和跟随器同时对采样保持电容 C_{TH} 充电, ADC 输入端电压出现反冲。要保证采样结束时输入信号再次达到 N 位建立精度, 要求抗混叠滤波器的时间常数 τ_{FLT} 与 ADC 的采样时间 t_{ACQ} 满足如下关系式^[10]:

$$\tau_{\text{FLT}} = R_{\text{FLT}}C_{\text{FLT}} < \frac{4}{\sqrt{17}} \cdot \frac{t_{\text{ACQ}}}{\ln\left(\frac{2^N}{20}\right)} \quad (14)$$

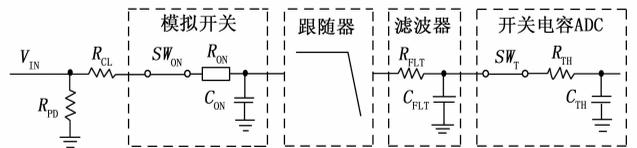


图 3 动态误差分析模型

式 (14) 推导过程中, 假设跟随器的 -3 dB 带宽大于抗混叠滤波器的 4 倍, 且滤波电容 C_{FLT} 与采样保持电容 C_{TH} 之间的关系满足 $10 C_{\text{TH}} < C_{\text{FLT}} < 30 C_{\text{TH}}$ 。

然而, 在宇航产品设计中, 受元器件选用限制, 上述假设经常难以满足。在此情况下, 提出一个经验法则, 即在满足系统采样速率和可靠性设计的前提下, 滤波电容 C_{FLT} 的取值应尽可能大, 但要保证前级跟随器具有足够的相位裕度。

3.2 参考信号的建立时间和建立精度

与 ADC 输入端负载特性类似, 参考端负载特性也呈动

态阻抗。ADC 转换阶段, 内部切换开关以转换时钟频率对各权值电容进行切换, 因而需要参考电压对各权值电容进行快速充放电以保证建立精度。为了提高参考电压对瞬态电流的驱动和吸收能力, 通常在其输出端设置电荷缓冲电容, 用于在 ADC 转换阶段迅速提供或吸收参考端瞬态电流。要保证 ADC 转换阶段参考信号的建立精度达到 N 位, 缓冲电容 C_{REF} 应满足如下关系式^[10]:

$$C_{\text{REF}} > \frac{2^N I_{\text{REF}} t_{\text{CON}}}{V_{\text{REF}}} \quad (15)$$

式中, N 为 ADC 的分辨率; I_{REF} 为参考端平均电流; t_{CON} 为 ADC 转换时间; V_{REF} 为参考电压。

4 实验结果与分析

4.1 系统设计

图 1 所示系统选用的核心器件及相关参数^[11-12] 如表 1 所示。

表 1 系统选用的核心器件及相关参数

参数名称	参数符号	数值	单位
国产 16 通道模拟开关(MUX1~MUX8)			
导通电阻	R_{ON}	375	Ω
导通电容	C_{CON}	40	pF
导通漏电流	I_{D}	10	nA
运放 OP07(OP1~OP8)			
失调电压	δV_{OSOP}	0.06	mV
失调电流	I_{OS}	0.8	nA
共模抑制比	/	120	dB
电源抑制比	/	7	$\mu\text{V}/\text{V}$
开环增益	/	400	V/mV
压摆率	SR_{OP}	0.3	$\text{V}/\mu\text{s}$
国产 12 位开关电容 ADC(U1)			
积分非线性	/	0.5	LSB
微分非线性	/	0.7	LSB
失调误差	/	1	LSB
满量程误差	/	0.8	LSB
采样时间	t_{ACQ}	3	SCLK
转换时间	t_{CON}	13	SCLK
时钟频率	/	16	MHz
参考电压 AD584(U2)			
初始精度	ΔV_{REF1}	0.5	mV
温度系数	/	15	ppm/ $^{\circ}\text{C}$
电源调整率	/	0.005	%/V
负载调整率	/	20	ppm/mA

除参考电压 V_{REF} 的初始精度 (0.5 mV) 为实际校准值外, 表中数据均来源于器件手册典型值。此外, 图 1 中 $R_{\text{CL}} = R_{\text{IP}} = R_{\text{OP}} = 1 \text{ k}$ 是为兼顾系统可靠性增加的必需器件; 抗混叠滤波器参数为 $R_{\text{FLT}} = 200 \Omega$, $C_{\text{FLT}} = 100 \text{ nF}$; 参考端缓冲电容 $C_{\text{REF}} = 4.7 \mu\text{F}$; AD584 设计为 5 V 输出, 最大瞬态电流约为 5 mA; 模拟开关和运放共用 12 V 供电 ($V_{\text{DD}} = +12 \text{ V}$, $V_{\text{SS}} = -12 \text{ V}$), 最大变化量为 0.5 V; 环境温度最大变化量约为 5°C 。需要说明的是, 该设计将抗混叠滤波器的时间常数

设计为较大值 ($20 \mu\text{s}$), 是因为前级跟随器的单位增益带宽较小, 典型值 0.6 MHz, 不满足式 (14) 的假设条件。因此, 只能通过增大滤波电容 C_{FLT} 以降低采样期间 ADC 输入端的反冲电压来保证采样期间输入信号的建立精度。

4.2 静态误差估算

对表 1 所示相关数据进行单位统一和数值换算后, 可得系统静态误差如表 2 所示。

表 2 系统静态误差估算

误差项	符号	数值/mV	计算依据
模拟开关	δ_{MUX}	0.014	式(2)
电压跟随器	δ_{OP}	0.062	式(3)
失调电压误差	ΔV_{OSOP}	0.060	表 1
共模抑制比误差	ΔV_{CMRR}	0.005	表 1
电源抑制比误差	ΔV_{PSRR}	0.004	表 1
开环增益误差	ΔV_{AOL}	0.013	表 1
失调电流误差	ΔV_{IOS}	0.002	式(4)
参考电压	δV_{REF}	0.810	式(5)
初始精度误差	ΔV_{REF1}	0.500	表 1
温度系数误差	ΔV_{REFT}	0.375	表 1
电源效应误差	ΔV_{REFP}	0.125	表 1
负载效应误差	ΔV_{REFL}	0.500	表 1
ADC	δ_{AD}	1.883	式(6)
积分非线性误差	ΔV_{INL}	0.610	表 1
微分非线性误差	ΔV_{DNL}	0.854	表 1
失调误差	ΔV_{OSAD}	1.221	表 1
满量程误差	ΔV_{FS}	0.977	表 1
总静态误差	δ_{s}	2.05	式(1)

可见, 系统静态误差估算值约为 2.05 mV, 主要来自 ADC 自身失调误差 (1.221 mV)。上述结果表明, 该系统中模拟开关、跟随器、参考电压及其外围电路的选型和设计合理, 引入的静态误差基本可以忽略。

4.3 动态误差估算

根据表 1 所示相关数据, 可得 ADC 输入最坏情况下 (相邻通道间的最大压差为 5 V) 的建立时间约为 167.19 μs , 如表 3 所示。因此, 根据式 (13), 将模拟开关切换通道后的延迟时间设计为 256 μs , 理论上可以保证 ADC 开始采样时输入信号的建立精度达到 12 位分辨率 (1.221 mV)。

表 3 建立时间估算(建立精度为 12 位分辨率)

误差项	符号	数值/ μs	计算依据
模拟开关	t_{MUX}	1.57	式(8)
通道切换时间	t_{MUXSW}	1.50	表 1
寄生参数时间	t_{MUXRC}	0.46	式(9)
跟随器	t_{OP}	16.67	式(11)
滤波器	t_{FLT}	166.36	式(12)
总建立时间	t_{SIG}	167.19	式(7)

由式 (15) 可知, 缓冲电容 C_{REF} 的最小值应为 3.33 μF , 实际设计值为 4.7 μF , 理论上可以保证 ADC 参考信号的建

立精度达到 12 位分辨率 (1.221 mV)。

4.4 试验验证

随机选取模拟量采集系统的 2 个通道进行测试, 结果如表 4 所示。

表 4 随机选取两个通道的实测结果

设置值 /mV	Ch1 采集值 /mV	Ch1 误差 /mV	Ch33 采集值 /mV	Ch33 误差 /mV
1 000	1 000.20	0.20	999.22	-0.78
2 000	1 998.40	-1.60	2 000.88	0.88
3 000	2 999.60	-0.40	3 000.10	0.10
4 000	3 998.80	-1.20	4 001.54	1.54
4 980	4 980.23	0.23	4 980.23	0.23

试验过程中, 与被测通道相邻的两个通道均设为 0 V 以模拟最坏工况。表中各设置值 (被测信号) 由 6 位半直流电压发生器 ADCMT 6166 的 10 V 量程输出, 各设置值由 7 位半万用表 Keysight 34470A 进行监测, 实测各设置值的绝对精度优于 0.2 mV, 小于 12 位 ADC 分辨率 (1.221 mV) 的 1/3, 因此表中数据未考虑该误差的影响。表中, Ch1 采集值和 Ch33 采集值为采集系统的第 1 和第 33 通道的实际测量值; Ch1 误差和 Ch33 误差为各实测值相对于设置值的绝对误差。

表 4 表明, 被测通道满量程内的最大误差绝对值约为 1.60 mV (Ch1 设置值为 2 000 mV 时, 采集值为 1998.40 mV), 该结果略小于表 2 所示的系统总静态误差估算值 2.05 mV, 说明抗混叠滤波器参数设计合理, 且 ADC 采样和转换期间未引入明显的动态误差, 这与 3.1 和 3.2 所述的预期结果相符。实测最大误差值 1.60 mV 小于理论估算值 2.05 mV, 原因很可能是估算时采用的数据均为器件参数典型值, 而系统实际使用的器件参数优于手册典型值。

图 4 为模拟开关切换通道后输入信号的波形图。其中, Ch1 为模拟开关地址 A0 信号, Ch2 为 ADC 输入端信号 (抗混叠滤波器输出端信号)。可见, 模拟开关切换通道后, 输入信号由 0 V 上升到 5 V 的建立时间约为 172 μs , 与表 3 所示的理论估算值 167.19 μs 非常吻合。该结果同时表明将通道切换后的延迟时间设为 256 μs 满足理论要求值并具有足够的设计裕量, 从而保证系统在宽温度范围或其它恶劣环境中工作时具有足够的可靠性。

最后, 需要说明的是, 理论上可以采用软件校准的方法提高系统测量精度, 但对于具有上百个通道的测量系统来讲该方法并不实用。从表 2 可以看出, 当 ADC 器件确定后, 进一步提高系统测量精度的方法是选用初始精度更高、而温度系数和负载调整率更低的参考电压。

5 结束语

针对核心器件国产化替代过程中多通道模拟量采集系统的精度设计缺乏理论依据的问题, 对基于多通道模拟开关和开关电容 ADC 构建的多通道模拟量采集系统的精度影响因素进行了系统研究, 分别建立了系统静态误差和动态

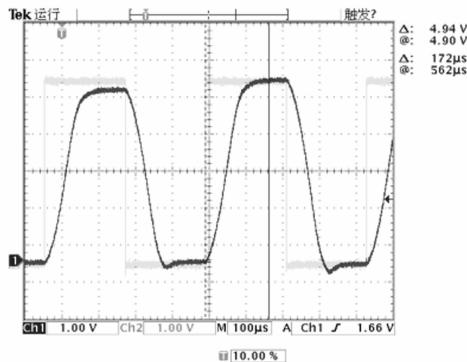


图 4 模拟开关切换通道后输入信号的波形图

误差的分析模型, 为关键器件选型建立了理论依据。研究表明: 系统精度影响因素包括静态误差和动态误差。其中, 静态误差主要由 ADC 输入端和参考端的模拟信号链决定, 主要来源于模拟开关、跟随器、参考电压和 ADC 自身静态参数的非理想性; 动态误差主要由 ADC 采样阶段输入信号的建立精度和转换阶段参考信号的建立精度决定。上述结论分别通过了理论和试验验证, 对设计或改进多通道模拟量采集系统的测量精度具有普遍指导意义。

参考文献:

- [1] 陆建荣, 单梁, 汪静, 等. 基于 ARM 的分布式多通道数据采集仪 [J]. 计算机工程与科学, 2015, 37 (5): 1031-1036.
- [2] Xie Y N, Zhang Z J. Design of multi-channel data acquisition system based on LabVIEW and NI PXI-5105 [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015, 6 (1): 7-12.
- [3] 张鹏, 任勇峰, 李辉景. 基于 FPGA 的多路 ICP 数据采集装置的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (8): 2301-2303.
- [4] 陈健伟, 陈鸿, 王晋祺, 等. 高可靠性多通道模拟信号采集存储系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2019 (3): 114-118.
- [5] 范君健, 吴国东, 王志军, 等. 基于 FPGA+STM32 的多通道数据采集系统设计 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38 (12): 281-286.
- [6] 韩宾, 易志强, 江虹, 等. 一种高精度多通道实时数据采集系统设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2019 (9): 42-45.
- [7] 牟雪蛟, 虞先国, 邢启阳, 等. 多路并行 ADS1282 实时地震数据采集内核驱动设计 [J]. 测控技术, 2019, 38 (2): 142-145.
- [8] 甄国涌, 张传民, 齐蕾, 等. 一种 182 路传感器数据采集电路的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4147-4149.
- [9] 许乔, 殷志刚, 周艳玲. 声纳水下多通道数据采集模块设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 219-222.
- [10] Kumar V, Ordonez R. 16-Bit, 400-kSPS, Four-Channel MUX data acquisition system for high-Voltage Inputs Reference Design [R]. Texas Instruments Inc, 2016.
- [11] Analog Devices. Datasheet of AD584 [Z]. Analog Devices Inc., 2012.
- [12] Analog Devices. Datasheet of OP07 [Z]. Analog Devices Inc., 2011.