

# 伺服系统位置反馈采集电路误差分析

姜和泰<sup>1</sup> 张爱军<sup>1</sup> 沈欣<sup>2</sup>

(1. 中国空空导弹研究院 洛阳 471000; 2. 驻中国空空导弹研究院军事代表室 洛阳 471000)

**摘要:**针对伺服系统位置反馈采集电路硬件的筛选要求,确定采集电路对典型电压值的采集误差范围,在批量生产中尽早剔除有硬件缺陷的产品。位置反馈采集电路主要由运放跟随电路、模数转换电路、电压基准电路等模块组成。分别计算各个模块引入的最大采集理论误差,综合测试设备的测试误差得到系统对典型电压+2.5 V最大采集误差为25 LSB。最后,举例说明在电路板交付中,该筛选方法可以成功剔除硬件故障产品,测试误差范围有效,能有效地避免故障件流入后续装配工段。

**关键词:**采集电路;误差分析;TLC2578

**中图分类号:** TN792      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Error analysis of position feedback acquisition circuit in servo system

Jiang Hetai<sup>1</sup> Zhang Aijun<sup>1</sup> Shen Xin<sup>2</sup>

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China; 2. PLA's Military Representative Office in China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** As for the screen test requirement of control circuit hardware in servo system, analyses and determines the sampling error of the position feedback acquisition circuit for the typical value, in order to eliminate failure products in batch production. The position feedback acquisition circuit mainly consists of an operational amplifier follower, an A/D converter and voltage references modules. The sampling errors of the above three modules for 2.5 V are calculated respectively, combined with the error of test equipment, consequently the maximum sampling error of the hardware circuit is 25 LSB. Finally, the test error range is effective and accurate, the screen method can eliminate defective products in circuit boards delivery and avoid fault products into next section, that were illustrated by examples.

**Keywords:** acquisition circuit; error analysis; TLC2578

### 1 引言

伺服系统主要由4部分组成:控制器、伺服驱动器、电机和位置反馈装置。控制器是伺服系统的运算处理单元。电动伺服装置体积小、控制性能优,能够完成各类复杂的算法,提高控制精度和稳定性<sup>[1-3]</sup>。

位置偏角测量由电位器实现,根据偏角角度的变化电位器输出-5~+5 V的电压信号。控制电路使用模数转换器把电位器输出的模拟电压信号转换为数字信号并通过SPI接口传输给DSP。

电子产品在生产过程中,材料、工艺以及操作的差异会导致某些产品很可能会存在早期失效的隐患,为了满足产品的可靠性要求,一般要对产品进行环境应力筛选,以剔除和减少发生早期失效和达不到可靠性要求的产品。

系统、整机内部的电路板通过环境应力试验和加电试验是非常有效的筛选手段<sup>[4-5]</sup>。

因此,在伺服系统组装前需要先对控制电路板进行性能筛选,剔除不合格电路板。在确定筛选参数时需考虑元器件参数的离散性,不能将性能合格的电路板确定为故障件,也不能将不合格电路板列入合格序列。

### 2 位置反馈采集电路硬件设计

电位器输出的电压信号经RC滤波电路,基于运放的电压跟随电路后送入12位的A/D转换器TLC2578,最后将转换后的数字信号送入DSP。硬件示意如图1所示。

电位器输出的电压信号经RC滤波电路,基于运放的电压跟随电路后送入12位的A/D转换器TLC2578,最后将转换后的数字信号送入DSP。TLC2578基准电压由

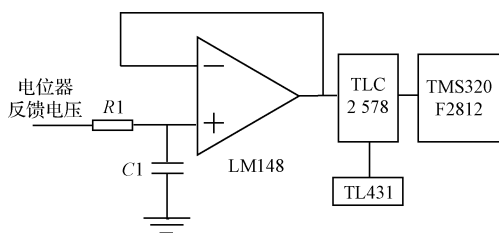


图1 位置反馈采集电路硬件示意

TL431 调理后提供,基准电路如图2所示。

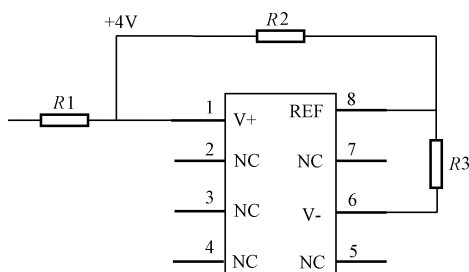


图2 基准电源电路

### 3 采样误差理论计算

当对电路板进行性能测试时,测试设备通过 D/A 转换器模拟电位器输出典型的电压值 0、2.5 V,电路板采集后输出数字量。0、2.5 V 经模数转换后的理论值分别为 2 048、2 560。以 2.5 V 为例计算量化误差范围。

TLC2578 是一款可编程的 8 通道 12 位的 A/D 转换器,最高采样率达到 200 KSPS,并且提供了与外部 DSP 连接的 SPI 接口,能在最大 25 MHz 的时钟频率下工作,为与 DSP 进行高速通信提供了非常便利的条件<sup>[6]</sup>。其内部电阻衰减网络如图 3 所示。 $V_{REFP}$  为基准电压, $V_{REFM}$  为模拟地, $V_{sam}$  为衰减后输出电压。

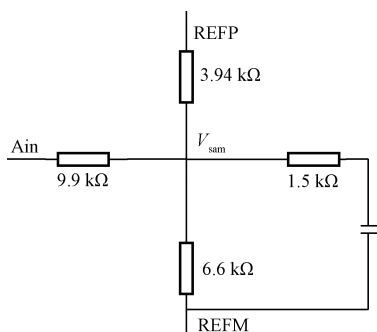


图3 TLC2578 输入衰减网络<sup>[2]</sup>

由图 3 可知,衰减输出电压  $V_{sam}$ <sup>[7]</sup> 为:

$$V_{sam} = \left( \frac{V_{ain}}{9.9} + \frac{V_{REFP}}{3.94} + \frac{V_{REFM}}{6.6} \right) / \left( \frac{1}{9.9} + \frac{1}{3.94} + \frac{1}{6.6} \right) \quad (1)$$

其转换量化为<sup>[8]</sup>:

$$D_{out} = \left( \frac{V_{sam}}{V_{REFP}} \right) \times 2^n \quad (2)$$

位置反馈采集电路采样误差主要由运放跟随电路引入误差  $E_{OP}$ ,电压基准 TL431 引入误差  $E_{REFP}$ ,模数转换器综合量化误差  $E_C$ ,测试设备输出电压值引入误差  $E_V$ 。

#### 3.1 运放跟随电路引入采样误差

运算放大器的引入误差主要包括:输入失调误差、运放输出噪声以及运放的摆率等<sup>[9-10]</sup>。运放的输出噪声和摆率引入误差极小可忽略不计。主要统计运放的输入失调误差。输入失调误差包括输入失调电流引入误差和输入偏置电压误差。LM148 输入失调电流  $I_B$  最大为 100 nA,最大输入偏置电压为 5 mV,当运算放大器用于电压跟随电路时,其引入的输出误差近似取值失调电压。带入式(1)、(2)换算成采样误差  $E_{OP}$ 得:

$$E_{OP} = \left( \frac{V_{ain}}{9.9} + \frac{4}{3.94} \right) / \left( \frac{1}{9.9} + \frac{1}{3.94} + \frac{1}{6.6} \right) \times \frac{1}{4} \times 2^{12} - \frac{4}{3.94} / \left( \frac{1}{9.9} + \frac{1}{3.94} + \frac{1}{6.6} \right) \times \frac{1}{4} \times 2^{12} = 1.02 \quad (3)$$

运放跟随电路引入误差小于 2 LSB。

#### 3.2 基准电源引入采样误差

基准源 TL431B 的 2.5 V 输出误差为 5%。电阻  $R_3$ ,  $R_4$  误差为 0.1%。基准源调理后输出为:

$$V_o = 2.5 \times \frac{R_2}{R_3} \quad (4)$$

考虑极限误差,代入式(4), $V_o$  最大为输出为:

$$V_{omax} = 2.5 \times (1+5\%) \times \frac{R_2 \times (1+0.1\%)}{R_3 \times (1-0.1\%)} \quad (5)$$

计算得 4.023 V。同理,计算最小输出为 3.983 V。

将误差较大的  $V_{omax}$  代入式(1),则衰减输出电压为:

$$V_1 = \left( \frac{V_{ain}}{9.9} + \frac{V_{omax}}{3.94} + \frac{V_{REFM}}{6.6} \right) / \left( \frac{1}{9.9} + \frac{1}{3.94} + \frac{1}{6.6} \right) \quad (6)$$

基准电源为 4 V 时,代入式(1),则衰减输出电压为:

$$V_2 = \left( \frac{V_{ain}}{9.9} + \frac{V_{REFP}}{3.94} + \frac{V_{REFM}}{6.6} \right) / \left( \frac{1}{9.9} + \frac{1}{3.94} + \frac{1}{6.6} \right) \quad (7)$$

代入式(2)计算量化 A/D 误差得:

$$E_{REFP} = \left| \left( \frac{V_1}{V_{omax}} - \frac{V_2}{V_{REFP}} \right) \times 2^{12} \right| = 2.92 \quad (8)$$

电压基准引入的量化误差小于 3 LSB。

#### 3.3 A/D 采样误差

TLC2578 型 8 路 12 位 A/D 转换器,内部电路采用典型电压分布结构作为内部逐次逼近 A/D 内核,其转换误差是以下误差综合表现的结果:电阻匹配网络引入误差、满度误差、零点误差、积分误差、微分误差。器件的最大转换误差为各种误差绝对值之和。

##### 3.3.1 衰减电阻匹配导致误差

器件模数转换器内部衰减网络如图 3 所示。电阻的最大误差为 0.1%。

考虑衰减电阻误差对  $V_{\text{sam}}$  造成的最大偏差。采样电压为 2.5 V, 基准为 4 V。代入式(1)得:

$$\Delta V_{\text{sam1}} = \left( \frac{V_{\text{ain}}}{9.9 \times (1+0.1\%)} + \frac{V_{\text{REFP}}}{3.94 \times (1+0.1\%)} \right) / \left( \frac{1}{9.9 \times (1+0.1\%)} + \frac{1}{3.94 \times (1+0.1\%)} + \frac{1}{6.6 \times (1-0.1\%)} \right) - \left( \frac{V_{\text{ain}}}{9.9} + \frac{V_{\text{REFP}}}{3.94} \right) / \left( \frac{1}{9.9} + \frac{1}{3.94} + \frac{1}{6.6} \right) = 0.0015 \text{ V} \quad (9)$$

$$\Delta V_{\text{sam2}} = \left( \frac{V_{\text{ain}}}{9.9 \times (1-0.1\%)} + \frac{V_{\text{REFP}}}{3.94 \times (1-0.1\%)} \right) / \left( \frac{1}{9.9 \times (1-0.1\%)} + \frac{1}{3.94 \times (1-0.1\%)} + \frac{1}{6.6 \times (1+0.1\%)} \right) - \left( \frac{V_{\text{ain}}}{9.9} + \frac{V_{\text{REFP}}}{3.94} \right) / \left( \frac{1}{9.9} + \frac{1}{3.94} + \frac{1}{6.6} \right) = 0.0015 \text{ V} \quad (10)$$

代入式(2), 计算得量化误差小于 2 LSB。

### 3.3.2 满度误差、零点误差引入量化误差

TLC2578 正满度误差 EFS+ 为  $\pm 0.61\%$ , 负满度误差 EFS- 为  $\pm 0.79\%$ , 零点误差 EZ 为  $\pm 0.36\%$ 。

取满度误差的偏差极限值与零点误差拟合一条直线。计算 A/D 转换的最大误差。

取最大负满度误差点  $(-10+20 \times 0.79\%, 0)$ , 零点误差  $(0-20 \times 0.36\%, 2048)$  得:

$$y = \frac{2048}{0-20 \times 0.36\% + 10-20 \times 0.79\%} \times (x + 10 - 20 \times 0.79\%) \quad (11)$$

输入 2.5 V 时,  $y=2587$ 。与 2.5 V 输入理论数字量 2560 相比误差为 17 LSB。

### 3.4 测试设备输出电压引入误差

测试设备输出的标准测试电压 2.5 V 由采集卡输出电压最大误差为 2 mV。代入式(1)、(2), 引入的 A/D 采集误差小于 1 LSB。

因此, 位置反馈采集电路综合误差最大值应将运放跟随电路引入采样误差、基准电源引入误差、A/D 采样误差以及测试设备输出电压引入误差相加得到最大采样误差, 计算得小于 25 LSB。因此, 对位置反馈采集电路 2.5 V 电压误差可以确定为  $\pm 25$  LSB。误差在此范围内确认硬件无缺陷。

## 4 试验结果与分析

对某批次交付的 7 套电路板进行测试, 记录电路板 0、2.5 V, 常温、高温、低温采集的数字量。在同一个温度下对一块电路板连续采集 10 次统计采集数字量的范围。

表 1 中 2# 电路板在测试中采样电路对 +2.5 和 0 V 电压采样值最小为 0, 产品异常。经排查运算放大器 LM148 一通道输入管脚漏焊, 运放该通道输出接近运放负供电电压, 导致 A/D 采集异常。通过筛选有效的剔除了故障件。

表 1 测试结果统计表

电路板编号	试验条件	电位器为 +2.5 V 时, 4 个通道 A/D 采样值 (理论值 2560)	电位器为 0 V 时, 4 个通道 A/D 采样值 (理论值 2048)
1	常温	2561~2562	2048~2050
	高温	2562~2563	2048~2049
	低温	2565~2569	2048~2051
2	常温	0~2562	0~2049
	高温	—	—
	低温	—	—
3	常温	2561	2050
	高温	2561	2049
	低温	2566	2051~2052
4	常温	2561~2562	2050~2051
	高温	2560~2561	2049~2050
	低温	2563~2564	2050~2052
5	常温	2559~2563	2047~2049
	高温	2560~2561	2047~2048
	低温	2563~2565	2048~2050
6	常温	2462~2564	2047~2048
	高温	2560~2561	2047~2048
	低温	2563~2566	2048~2050
7	常温	2560~2561	2048~2050
	高温	2560~2561	2047~2049
	低温	2565~2566	2049~2051

## 5 结 论

本文主要针对伺服系统控制电路板的性能筛选测试,对位置反馈采集电路的采集误差进行了深入的分析。对运放跟随电路引入误差、A/D的输入基准电源引入误差、A/D自身的采样误差和测试设备引入误差分别进行了最大采集误差的分析计算。最后,在交付电路板中随机抽取了7块电路板,统计常温、低温和高温下位置反馈采集电路对2.5,0 V的采样值。统计结果表明,同一块电路板的采样一致性较好,筛选试验能有效的剔除故障件。因此,位置反馈采集电路最大误差范围确定为 $\pm 25$  LSB能有效剔除不符合要求的产品。

### 参 考 文 献

- [1] 彭科容,何卫国. 基于无刷直流电机一体化设计的舵面电磁锁制系统设计[J]. 微电机, 2015, 48(5): 95-97.
- [2] 张立文,刘鑫,张淑梅,等. 全数字化无刷直流电机伺服控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5): 34-38.
- [3] 郭丹蕊,林晓焕,单星,等. 基于DSP的无刷直流电机控制系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 98-101.
- [4] 狄宋珍. 军用电子产品筛选方法的优化[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2002(1): 54-57.

- [5] 钟强晖,张志华,李大伟. 基于性能退化的电子产品筛选试验设计[J]. 电子学报, 2013, 41(9): 1788-1793.
- [6] 周朋朔,王自强,周余,等. 基于S3C2410和Linux2.6的无线网络数据采集终端[J]. 电子测量技术, 2008, 31(1): 169-172.
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. TLC3574, TLC3578, TLC2574, TLC2578 5-V ANALOG, 3-/5-VDIGITAL, 14-/12-BIT, 200-KSPS, 4-/8-CHANNELSERIAL ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTERS WITH  $\pm 10$  V INPUTS[Z]. 2000-2003. <http://www.ti.com.cn/product/cn/TLC3574/Technicaldocuments>.
- [8] 闫石. 数字电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社, 1984.
- [9] 王学亮,李佩玥,郑楠,等. 运放对压电陶瓷驱动电路系统精度影响的研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 33-36.
- [10] 李文强,黄刚,杨录. 大量程全自动阻抗测量仪研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 859-865.

### 作 者 简 介

姜和泰, 1981年出生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为伺服系统测试技术, 制导与控制。  
E-mail: jht2002303@163.com