

doi:10.16652/j.issn.1004-373x.2017.14.041

# 微伏级直流电压信号放大电路设计

闫 岩<sup>1</sup>, 行鸿彦<sup>2</sup>

(1.南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

2.南京信息工程大学 江苏省气象传感网技术工程中心, 江苏 南京 210044)

**摘 要:** 针对微伏级直流电压信号测量过程中存在信噪比低、测量精度不高和抗干扰能力差的问题,设计一种以TLC2652为核心器件的放大测量电路,实现了对5~45  $\mu\text{V}$  范围内电压信号的精准放大。电路采用低通滤波电路、陷波电路降低内部噪声与外部干扰;采用隔离电路,隔离测量端对采集端的影响;采用线性稳压芯片进行电源模块的设计,提高测量精度并降低功耗。经仿真实验验证,说明所设计的微伏级直流电压信号放大电路具有抑制共模干扰、抑制温漂、稳定性好、抗干扰性强等特点,测量精度达到0.044%。

**关键词:** 信号放大电路;放大测量电路;低通滤波电路;影响隔离

**中图分类号:** TN721+.5-34; TM930

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-373X(2017)14-0149-05

## Design of amplifying circuit for microvolt-level DC voltage signal

YAN Yan<sup>1</sup>, XING Hongyan<sup>2</sup>

(1. Collaborative Center on Forecast & Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Jiangsu Technology & Engineering Center of Meteorological Sensor Network, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In view of the facts that the low signal-to-noise ratio, poor anti-interference ability and low measurement accuracy exist in the measuring process of microvolt-level DC voltage signal, an amplifying measurement circuit taking TLC2652 as its core device is proposed in this paper to realize precision amplification of voltage signals (5~45  $\mu\text{V}$ ). The low-pass filtering circuit and band-stop circuit are adopted to reduce its internal noise and external interference. The isolation circuit is adopted to isolate the effect of the measuring end on the collection end. The linear regulating chip is used in power module design to improve the measurement accuracy and reduce power consumption. The simulation experiment result proves that the amplifying measurement circuit for microvolt-level DC voltage signal can suppress common mode interference and temperature drifting, has good stability and strong anti-interference, and its accuracy can reach to 0.044%.

**Keywords:** signal amplifying circuit; amplification measuring circuit; low-pass filtering circuit; influence isolation

## 0 引 言

信号检测是人们在当今时代获取信息的重要途径。在需要微弱信号检测的各个领域中,各种微弱的物理量信号都需要先转换成电压或电流信号之后再行放大、并进行信号检测处理,因此研究微弱信号的检测方法具有重要意义。然而,由各种微弱物理量信号转换

得到的电信号多数是微弱的直流或低频信号,如微波功率检波器输出的信号<sup>[1]</sup>。微弱信号,顾名思义信号的幅度是极其微弱的,但这不是微弱信号检测的难点所在,检测微弱直流信号的困难在于其被严重淹没于噪声信号中。在实际的电路测量系统中,微弱的直流信号更是容易受到各种直流误差的影响,特别是放大器的失调、漂移等误差的影响<sup>[1]</sup>。此外,微弱直流电压信号的检测还容易受到各种低频噪声的干扰,因此,直流微弱信号的检测困难重重。

从了解的资料来看,对微伏级直流电压信号的测量大致分为两种测量方法。一是将直流信号调制成幅值和直流信号呈比例关系的方波交流信号<sup>[2]</sup>。以避免直接放大微弱直流信号存在直流误差的影响,特别是直流放

收稿日期:2016-11-03

基金项目:国家自然科学基金(61072133);江苏省产学研联合创新资金计划(BY2013007-02);江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA460008);江苏省“六大人才高峰”计划和江苏省“信息与通信工程”优势学科资助

大器失调电压的影响,还可以避免外部工频干扰等低频噪声的影响。在各种直流调制技术中,应用最广泛的就是通过场效应管的开关特性来作为调制器。通过一定频率的控制信号控制场效应管栅极电压的极性来控制场效应管的通断,以达到调制直流信号的目的<sup>[1]</sup>。但存在的问题是:在调制过程中会产生斩波失调电压、调制尖峰信号等。场效应管作为电子开关的同时也存在开关管损耗。实际应用中模拟开关的这种理想效果是不可能达到的,场效应管开关在作为调制器时,无论有无输入信号,只要存在调制信号,模拟开关的输出端都会产生瞬态的尖峰电压,而且还会引起输出信号漂移,从而造成测量结果不精确。二是利用特低噪声、特低漂移的高精度直流放大器对微弱直流信号进行测量。如市面上的高精度直流放大器输出电压能达到伏级,可以给数据采集和处理,但存在的问题是,价格昂贵,不能广泛应用于实践研究。

为了解决微弱直流电压信号测量易受噪声干扰、测量精度不高、抗干扰能力差的问题,设计微伏级信号放大电路时,采用高精度仪表运算放大器 TLC2652 进行信号的精准放大,以提高测量精度;采用四阶低通滤波电路、双 T 型带阻滤波电路来减小内部噪声与外部干扰;采用高精度模拟信号隔离电路,隔离测量端对采集端的影响;采用低噪声、高效率的电源芯片及线性稳压芯片进行电源模块的设计,以提高测量精度并降低功耗。

## 1 设计思路

微伏级直流电压信号,首先要通过放大才能被后端电路所采集。然而,后端采集电路的电压工作范围一般在伏级,因此放大电路的放大倍数应该设置的很大。但实现较高的放大倍数必须要进行多级放大才可实现,因为输入的直流微弱信号和噪声是叠加在一起的,一般比噪声小很多,如果输入级放大倍数设置过大,微弱直流电压信号在被放大的同时,噪声信号同样也会被放大,造成后续很难去除噪声<sup>[3]</sup>。但随着放大级数的增多,势必也带来很多杂波,此外,微弱直流信号的测量易受到各种低频噪声的干扰,及各种直流误差的影响,如放大器中的失调电压、温漂等。工频干扰也是一种低频噪声,这种干扰电信号进入电子检测系统会严重影响微弱信号检测的准确性。

因此,针对输入信号为微伏级直流电压信号,测量过程中存在信噪比低、测量精度不高、抗干扰能力差的问题,设计了微伏级直流电压信号放大电路。系统主要由高精度仪表放大电路、低通滤波电路、陷波电路及高精度隔离电路组成。微伏级直流电压信号采用屏蔽电

缆送进高精度仪表放大电路进行初步放大后,首先进行低通滤波,再输入到中间级放大电路进行主要放大,而后进行高频噪声和市电 50 Hz 降噪处理,以及通过高精度模拟信号隔离电路隔离测量端对采集端的影响,实现输入、输出和电源间的相互隔离。应用低噪声、高效率的电源芯片及线性稳压芯片进行电源模块的设计,以提高测量精度并降低功耗。经实验测量,系统可以实现对 5~45  $\mu\text{V}$  范围内电压信号的精准放大,放大输出电压范围为 0.25~2.25 V,完全可以满足后级采集电路的需要,且能够达到 0.044% 的精度。此外,该电路还具有抗共模干扰、抑制温漂、稳定性好、抗干扰性强等特点。微伏级电压信号放大电路系统方框图如图 1 所示。

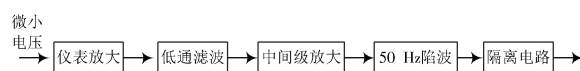


图1 系统方框图

## 2 信号放大电路

信号放大电路采用初级放大和中间级放大两级放大形式。传感器采样输出的直流电压信号经屏蔽电缆输入到初级放大电路,因此需要检测的直流电压信号微弱且含有大量杂波。从而要求选用的运算放大器具有以下特点:低失调电压、低温度漂移的高性能差动放大电路,以克服温漂;选用开环增益较大的运放,而单级放大器的闭环增益不可过大,这会大大减小增益误差,从而提高检测信号的精度。

因此,设计电路时采用高精度斩波稳零运算放大器 TLC2652,具有优异的直流特性,失调电压及其漂移、低频噪声、电源电压变化、共模电压等对运算放大器的影响被降低到了最小<sup>[4]</sup>。Multisum 中的具体设计电路如图 2 所示。

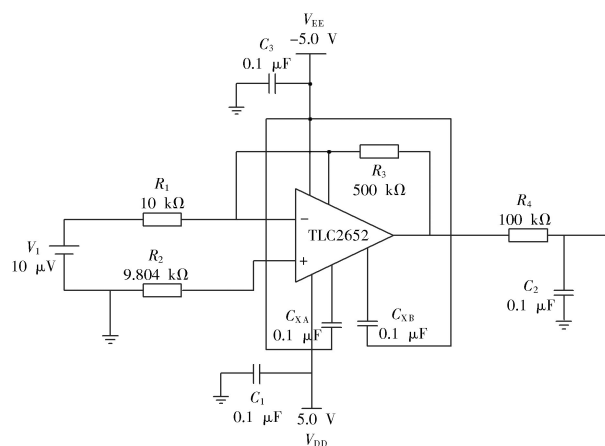


图2 放大电路

运算放大器 TLC2652 的增益由输入电阻  $R_1$  和反馈

电阻  $R_3$  决定,计算公式为:

$$U_o = -\frac{R_3}{R_1} U_i \quad (1)$$

设计时输入电阻  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ , 反馈电阻  $R_3 = 500 \text{ k}\Omega$ , 电路增益为 50。电路中为确保运算放大器输入级差分放大电路的对称性, 设置补偿电阻  $R_2$ , 其值为输入端接地时, 反相输入端总等效电阻。电路中  $C_{XA}$ ,  $C_{XB}$  使用绝缘电阻很高的优质电容器, 可选择的容量范围为  $0.1 \sim 1 \mu\text{F}$  之间。放大倍数的设置, 要考虑到初级放大电路中存在有用信号和噪声一起输入的问题, 如果初级放大电路的增益设置较大, 信号和噪声将被同时放大, 在这种情况下, 若噪声幅值较大, 无疑会降低电路信噪比(信噪比是指电子系统中信号和噪声的比值), 不利于对信号的进一步去噪处理。另外, 为确保运算放大器的精度, 负反馈电阻的精度要很高, 同时电路的闭环增益不能设置的太大; 保证印制板较高的质量, 以避免印制板表面存在的漏电流问题<sup>[4]</sup>。为此, 可在印制板上设置保护环。高精度仪表放大器在放大微弱直流信号时, 通常可在输出端加一低通滤波电路, 以滤除输出电压中的交流分量来减小交流干扰, 使电压输出更加稳定。中间级放大电路, 设置在四阶低通滤波电路之后, 主要目的是实现放大模块较大的放大倍数。

### 3 滤波电路

因为需要检测的微伏级直流电压信号非常微弱且含有大量杂波, 测量回路、仪表放大电路和相关器件的固有噪声以及外界的干扰噪声通常比被检测目标信号的幅值大很多, 有用信号和噪声在经仪表放大电路后将被同时放大。此外, 电路结构的不合理设计也会引入噪声干扰, 所以, 仅对信号进行放大是测量不出微伏级这样微小信号的<sup>[5]</sup>。电路中为了更好地提取出有用信号, 设计了滤波模块来有效地抑制噪声。

#### 3.1 低通滤波电路

针对电路系统的内部噪声以及外部系统的干扰多为交流信号, 设计四阶巴特沃斯型有源低通滤波电路对输入级放大电路的输出电压信号进行处理, 以抑制放大的噪声信号。设置低通滤波电路的截止频率为  $20 \text{ Hz}$ , 选用单片集成运算放大器 OP200, 具体器件参数设置及电路设计如图 3 所示。图 4 为电路在 Multisum 中仿真的幅频特性。

#### 3.2 陷波电路

陷波电路也即带阻滤波电路, 主要用来减少工频干扰。通常使用的各种仪器的供电电源都为市电或者经市电转换得到, 而市电的频率为  $50 \text{ Hz}$ 。这样测量电路

中就会串入工频, 产生工频干扰, 严重时会导致电路无法接收信号<sup>[6]</sup>。电路中采用经典的双 T 型带阻滤波电路, 其中要求电阻  $R$  和电容  $C$  有较高的精度, 以保证带阻滤波电路的中心频率正好在  $50 \text{ Hz}$  处。图 5 为陷波电路结构原理图。

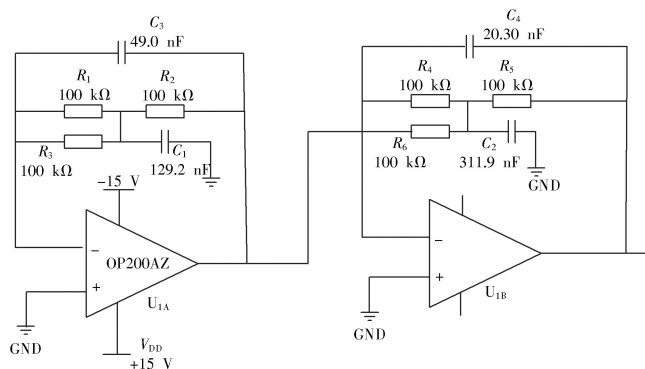


图3 低通滤波电路



图4 滤波电路幅频特性

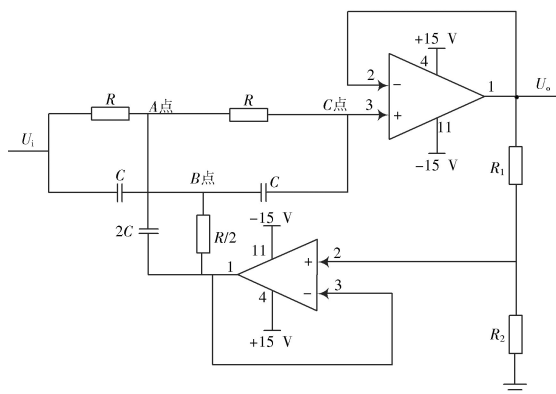


图5 陷波电路原理图

对于 A 点求节点电流方程有:

$$(U_i - u_A)sc + (U_o - u_A)sc + (mU_o - u_A)2n = 0 \quad (2)$$

B 点求节点电流方程有:

$$(U_i - u_B)sc + (U_o - u_B)n + (mU_o - u_B)sc = 0 \quad (3)$$

C 点求节点电流方程有:

$$(u_A - U_o)sc + (u_B - U_o)n = 0 \quad (4)$$

$$\text{式中: } m = \frac{R_2}{R_1 + R_2}; n = \frac{1}{R}。$$

由式(2)~式(4)可得电路的传递函数:



$$G(s) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{n^2 + s^2 c^2}{n^2 + s^2 n^2 + 4(1-m)sn/c} = \frac{s^2 + (n/c)^2}{s^2 + (n/c)^2 + 4(1-m)sn/c} \quad (5)$$

此时,令  $s = j\omega$ , 得:

$$G(j\omega) = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - j4(1-m)\omega_0\omega} \quad (6)$$

式中,  $\omega_0 = 1/(RC)$ 。当  $\omega = \omega_0$  时,  $G(j\omega) = 0$ , 此时能滤除  $f_0 = 1/(2\pi RC)$  的频率, 但对其他频率,  $G(j\omega)$  约为 1, 能很好地使其他频率信号通过。令  $G(j\omega) = 0.707$  得到两个截止频率为

$$f_H = f_0 \left[ \sqrt{1 + 4(1-m)^2} + 2(1-m) \right] \quad (7)$$

$$f_L = f_0 \left[ \sqrt{1 + 4(1-m)^2} - 2(1-m) \right] \quad (8)$$

此时可以得到陷波器的带宽  $B\omega$  和其  $Q$  值:

$$B\omega = f_H - f_L = 4(1-m)f_0 \quad (9)$$

$$Q = \frac{f_0}{f_H - f_L} = \frac{1}{4(1-m)} \quad (10)$$

由此可以得出结论: 为了使设计的陷波电路性能最佳, 也即满足窄带滤波效果和高  $Q$  值,  $m$  应接近 1 取值。

设计电路时采用增益调节电位器, 使其在 50 Hz 处衰减效果最好。经计算  $R_1 = R_2 = 2R_3 = 31.8 \text{ k}\Omega$ ,  $C = C_1 = C_2 = \frac{1}{2}C_3 = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$ ;  $R_4$  为增益带宽调节电位器。图 6 为具体设计电路, 图 7 为 50 Hz 陷波电路在 Multisim 中仿真的幅频特性图。

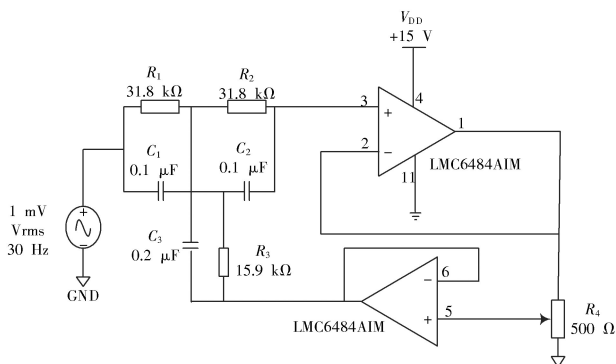


图6 陷波电路

#### 4 隔离电路

在微伏级直流电压信号放大测量过程中, 抗干扰是一个不可避免的问题。若不通过信号隔离, 测量系统就会引入各种电磁干扰。目标信号中混入干扰信号, 不但会降低测量的准确度, 而且尖峰电磁脉冲会对后端采集电路造成一定破坏。因此, 针对微弱直流电压信号测量存在的干扰问题, 设计了隔离电路。



图7 陷波电路幅频特性

发光二极管和光敏三极管的伏安特性使光电耦合器件非线性失真十分严重, 一般只用来隔离数字信号, 而不能简单应用到对模拟信号的隔离。因此, 模拟信号的隔离相对复杂的多, 一方面要求其达到隔离效果, 另一方面又要求最大限度地使模拟信号不失真, 也就是能确保模拟信号的线性传输<sup>[7]</sup>。有源隔离模块 T6550D/S 内部采用电磁隔离技术, 精度达到 13~14 位, 具有良好的线性度及优良的温漂与时漂性能<sup>[8]</sup>, 能够实现输入/输出和电源间的相互隔离, 非常适合高精度信号隔离测量。电路接口如图 8 所示。

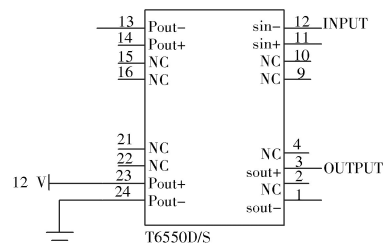


图8 T6550D/S 接口电路

#### 5 电源模块设计

可设计市电和锂电池为采集系统提供工作电源。市场上常见的开关电源装置可实现将 220 V 交流电转换为 12 V 直流电输出, 采用 18650 锂电池组供电时, 输出电压也为 12 V 左右。为了使信号放大电路得到稳定、噪声小的电压, 选用低噪声、高效率电源芯片 LTC3621。通过开关型稳压芯片 LTC3621 将 12 V 降压得到 5.5 V。LTC3621 是一款高效率单片式降压型开关稳压电源芯片, 其开关频率为 1 MHz, 并具有  $\pm 40\%$  的同步范围。稳压器具有超低的静态电流, 并可在宽输出电压范围内实现高效率。该降压型稳压器在输入电压为 2.7~17 V 的范围内工作, 输出电流高达 1 A 的同时提供一个介于 0.6 V 和  $V_{in}$  之间的可调输出电压<sup>[9]</sup>。开关电源的高转换效率和线性电源的低噪声确保测量系统的低功耗和测量精度。LTC3621 的输出公式为:  $V_o = 0.6(1 + R_1/R_2)$ 。LTC1763 为极低输入/输出压差 (300 mV) 和极低静态电流 (30  $\mu\text{A}$ ) 的线性调压器, 将 5.5 V 稳压得到 5 V 输出电压。另外, 通过 DC\_DC 开关稳压器 LTC1983, 可以得到 -5 V 的输出电压。5 V 电

压通过集成电路 DU1PO-05D15 可以产生  $\pm 15\text{ V}$  的电压输出。

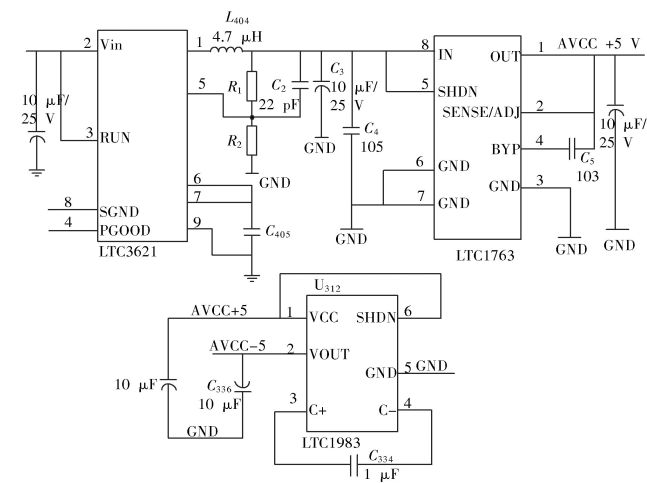


图 9 电源模块设计

6 实验验证

本实验是基于微伏级直流电压信号放大电路系统中的初级放大电路、低通滤波电路、中间级放大电路及陷波电路进行仿真实验的。仿真电路如图 10 所示。

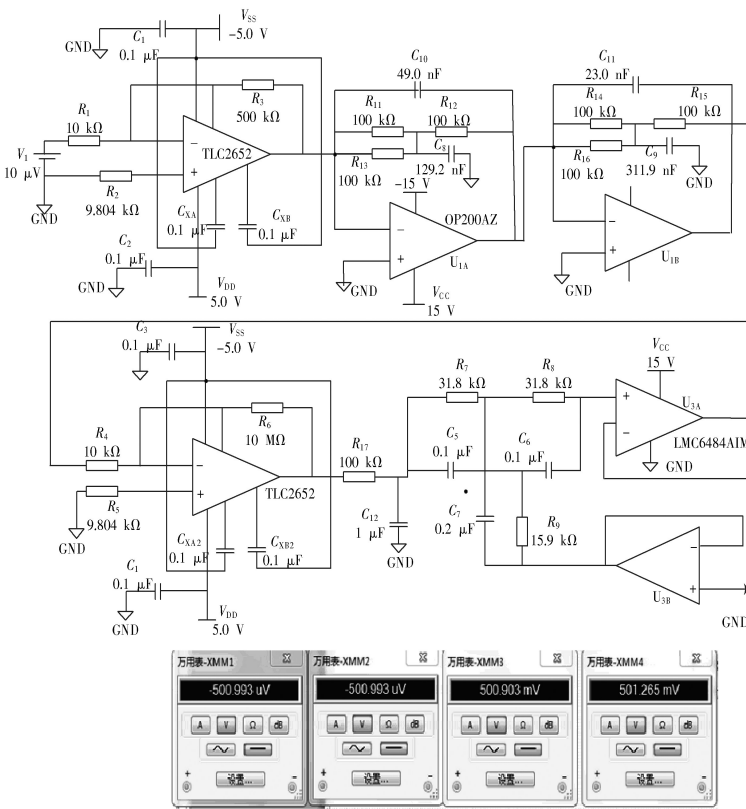


图 10 仿真电路

仿真结果数据如表 1 所示。仿真电路中的万用表显示值分别是电压信号通过各个模块后的值。由测量

结果数据可得出,系统可以实现对  $5\sim 45\text{ }\mu\text{V}$  直流电压信号的精准放大(放大倍数为 50 000),且测量放大电路能达到 0.044% 的精度。绝对误差的定义为测量的实际值与被测量的理想真值之差,相对误差为绝对误差与被测量的理想真值之比<sup>[10]</sup>,根据系统测试数据计算得到该组数据的平均相对误差为 0.15%。

表 1 系统仿真数据				
测试点 / $\mu\text{V}$	理论值 /V	仿真测试值 /V	绝对误差 /mV	相对误差 /%
5	0.25	0.251 288	1.288	0.515 2
10	0.5	0.501 265	1.265	0.253
15	0.75	0.751 242	1.242	0.165 6
20	1	1.001	1	0.1
25	1.25	1.251	1	0.08
30	1.5	1.501	1	0.067
35	1.75	1.751	1	0.057
40	2	2.001	1	0.05
45	2.25	2.251	1	0.044

7 结 论

基于高精度仪表放大电路、滤波电路及隔离电路设计了微伏级直流电压信号放大电路,实现了对输入  $5\sim 45\text{ }\mu\text{V}$  的直流电压信号的精准放大,放大信号输出范围为  $0.25\sim 2.25\text{ V}$ ,完全满足后级采集电路的需要。此外,电路采用低静态电流、低输入/输出压差的线性稳压芯片进行电源模块的设计,提高了测量精度并降低功耗。经仿真实验验证,该微伏级直流电压信号放大电路能够达到 0.044% 的精度,测试数据的平均相对误差达到 0.15%。电路具有抗共模干扰、抑制温漂、稳定性好、抗干扰性强等特点。因此该信号放大电路可广泛应用于对稳定度、测量精度要求较高的模拟信号采集电路中。

注:本文通讯作者为行鸿彦。

参 考 文 献

[1] 梁培艳.微弱直流电压信号检测[D].成都:电子科技大学,2013.

[2] 冯长磊,年夫顺,冷朋,等.微伏级直流信号检测技术[J].仪表技术与传感器,2011(3):95-97.

[3] 侯俊钦,吴小培,杨一军.微伏信号放大系统设计[J].计算机技术与发展,2007(10):198-201.

[4] 周云艳.弱信号放大电路的设计[J].山西电子技术,2011(6):11-13.

[5] 赵勇,郭亮,成永红.微弱直流信号测量电路设计[J].高压电器,2008(4):356-358.

(下转第 157 页)

定,得到工件的CAD输出视觉图像结果如图2所示。



图2 原始的工件的CAD输出视觉图像

采用本文方法进行中值滤波降噪预处理,然后提取工件的边缘轮廓特征和Harris角点检测,得到特征提取结果如图3所示。

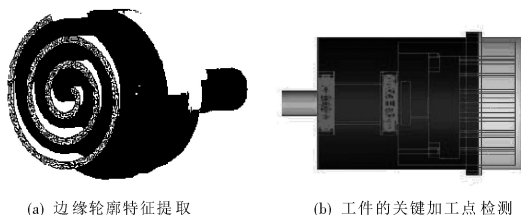


图3 工业设计工件的视觉表达分析

从图3可见,采用本文方法对工业设计工件进行边缘轮廓特征检测,能有效实现对工件的关键加工特征点的提取和评价,采用Harris角点检测方法对工件的关键加工点进行定位检测和合理性评估。图4为采用不同方法进行工业设计合理性评价的输出SNR对比结果,从图4分析得知,采用本文方法进行工业设计合理性评价的输出信噪比较高,说明准确性较好。

## 5 结 语

本文研究了工业设计的视觉表达合理性评价问题,提出一种基于视觉表达和图像分析的工业设计合理性评估方法。以涡旋叶轮工件为例,采用数字扫描成像技术进行工业设计工件的视觉成像采集,对采集的工业设计工件视觉图像进行中值滤波降噪预处理;然后提取工件的边缘轮廓特征,采用Harris角点检测方法对工件的关键加工点进行定位检测和合理性评估。测试结果表

明,采用该方法进行工业工件设计,对设计的合理性评估的准确性能更好,评价指标更明确,具有一定的应用价值。

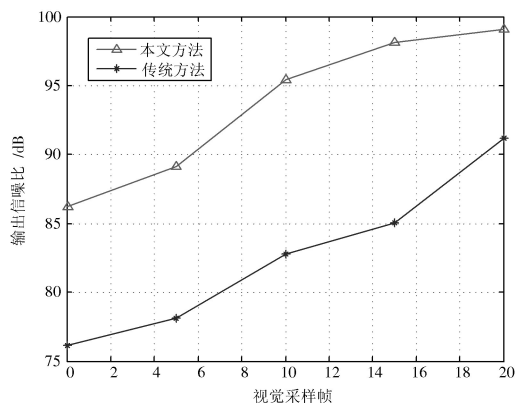


图4 工业设计合理性评价性能对比

## 参 考 文 献

- [1] XIA K, WU Y, REN X, et al. Research in clustering algorithm for diseases analysis [J]. Journal of networks, 2013, 8 (7): 1632-1639.
- [2] ZHANG Q, ZHU Q Y, ZHANI M F, et al. Dynamic service placement in geographically distributed clouds [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2013, 31(12): 762-772.
- [3] 于国瑞.服装流行要素识别与品牌服装设计[J].纺织学报, 2004, 25(1): 126-128.
- [4] MERNIK M, LIU S H, KARABOGA M D, et al. On clarifying misconceptions when comparing variants of the artificial bee colony algorithm by offering a new implementation [J]. Information sciences, 2015, 291(10): 115-127.
- [5] 刘正先,陈丽英.亚声速半开式离心叶轮叶顶间隙的流动特征[J].航空动力学报, 2012, 27(4): 937-945.
- [6] 陈新.一种基于计算机仿真的机械零件精度加工模拟技术[J].科技通报, 2013, 29(3): 169-171.
- [7] 肖军,赵远扬,王乐.基于HLLC格式的径向叶轮叶顶间隙流场分析[J].机械工程学报, 2013, 49(18): 167-176.

作者简介:佟 喆(1991—),女,河北秦皇岛人,硕士。研究方向为工业设计、标识设计。

(上接第153页)

- [6] 蒋亚超,杨勇,李兴东,等.三种双T网络陷波电路分析与比较[J].电子技术, 2011(1): 70-72.
- [7] 叶克江.基于光电耦合器的线性隔离方法及电路[J].现代电子技术, 2011, 34(3): 188-190.
- [8] 张立军,黄扬明.几种模拟信号隔离器件实测性能比较[J].仪表

技术, 2013(12): 45-48.

- [9] 徐伟,行鸿彦.自动气象站采集器的温度通道检定仪[J].仪表技术与传感器, 2014(10): 40-43.
- [10] 甄国勇,储俊.一种小信号放大测量电路的设计[J].电测与仪表, 2015(4): 96-100.

作者简介:闫 岩(1990—),女,江苏徐州人,硕士研究生。研究方向为信号检测与处理。

行鸿彦(1962—),男,山西新绛人,教授,博士生导师,博士研究生。研究方向为智能化气象仪器的设计、计量技术与标准、智能化电子测量技术与探测仪器的研究设计等。