

文章编号: 1672-2892(2010)05-0573-04

## 高精密度、高稳定度的应变计测量差动放大电路

江孝国, 杨兴林, 李洪, 文龙, 石金水, 张开志, 李劲, 王远

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 针对微应变片的高精密度、高线性度、高稳定度及较高增益的测量要求, 采用仪用放大器 AD625 为核心器件, 通过将精密匹配的电阻对安装于器件的恒温位置的巧妙设计, 尽可能地消除电路中存在的共模电压, 由于电路布局使匹配电阻的温度变化基本一致, 也极大地降低了温度漂移的影响, 从而获得了一种适用于微应变计测量的高性能差动放大电路, 其增益的线性度达到约 0.01% 的水平, 共模抑止比达到 129 dB。

**关键词:** 仪用放大器; 共模抑止比; 增益线性度; 增益误差

**中图分类号:** TN492; TP212.1

**文献标识码:** A

## Design of high precision and high stability differential amplifying circuit for a special strain gauge

JIANG Xiao-guo, YANG Xing-lin, LI Hong, WEN Long, SHI Jin-shui, ZHANG Kai-zhi, LI Jing, WANG Yuan  
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The requirements for micro stress measurement of strain gauge are high precision, high linearity, high stability and high gain. One kind of differential amplifier circuit with excellent performance was designed. Some skillful techniques were adopted to avoid common voltage in the circuit and to reduce the temperature drift. The gain linearity is about 0.01%, and its Common-Mode Rejection Ratio(CMRR) is about 129 dB under work conditions.

**Key words:** instrument amplifier; Common-Mode Rejection Ratio(CMRR); gain linearity; gain error

微小信号的差动放大技术是一项难度大、要求高的信号放大技术, 不仅涉及信号的放大, 而且涉及到信号放大的稳定性(包括时漂、温漂等)及精密度要求。在电桥、热电偶、RTD传感器和医疗仪器中的小信号放大技术中, 信号中存在较大的共模信号(但有效信号往往很小, 一般为mV量级甚至 $\mu$ V量级), 要求放大线路的漂移极小, 放大倍数却极大, 常规的信号放大技术无法对此进行处理, 而信号的差动放大技术由于其具有抑止共模信号而仅仅放大差模信号、增益较高的特点, 被应用于小信号放大技术中, 微应变计的信号放大及处理就属于这种情况。

微应变计是风洞力学天平的测量装置<sup>[1]</sup>, 主要由应变片构成的测量电桥来完成力学天平受力状况的测量。在风洞试验前的一项关键工作是对天平的受力状态进行标定, 通过标定可以获得天平的应变情况与受力的对应关系, 从而获得模型在吹风试验状态下的各种情况, 为试验模型的研制提供实验数据。天平的标定工作要求精密度及线性度高、漂移低, 往往要求达到相应标准的先进指标。而天平的工作环境复杂, 并且一台天平的信号放大需要多路信号处理线路, 但模型内部空间有限, 需要将这些线路集中安装在较小的空间内, 现有的标准高精密度测量设备或板卡无法在现场使用, 需要根据实验模型等情况进行具体研制; 另外, 由于天平安装在模型上, 与数据采集系统的距离相当远, 对其供电电源及信号传输的要求较高, 所以研制天平标定用的差动信号放大技术是一项难度较大的工作。本文分析了现有的各种集成仪用放大器、斩波放大器的性能后, 发现仪用放大器AD625<sup>[2]</sup>基本满足要求。AD625虽然具有优异的综合性能, 但并不表示实际的差动放大器就完全可以达到测量要求, 只有进一步在线路设计上提高共模抑止能力, 降低温度漂移, 才可能在高要求的情况下符合实际应用。针对高精密度、高稳定度的应变计测量要求, 根据实验环境的情况, 本文设计了相应的高稳定度的供桥电源、适合远距离传输信号的具有远端采样功能的高精密度信号差动放大器。

## 1 力学天平应变计的微小信号测量电路设计及考虑

根据现场环境测量条件(信号远距离传输,多路应变计的现场供电要求高),设计出的测量电路原理见图1。

AD625仪用放大器是ADI公司推出的一种性能优良的仪用放大器,由于器件是经过激光调整并且是在同一片半导体上刻蚀的,各部分电路具有相同的温度系数、漂移特性等,内部电路的匹配程度非常好,因此可以提供非常优良的器件性能。它的性能特点是:放大倍率可以达到1~10 000倍,适用于小信号的放大;增益的误差低至0.02%,增益的温度系数低至5 ppm/°C,增益的非线性低至0.01%,在目标增益下的共模抑制比约为130 dB;其输入偏置电压的温度漂移小于0.25  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ,输出偏置电压漂移小于15  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ;典型的输入噪声为4 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。在动态响应方面,其单位增益带宽达到25 MHz,是同类型仪用放大器中较高的。即使在工作增益的状态下,其带宽也接近100 kHz的水平,满足天平的动态应用要求,因此非常适合力学天平的测量及应用。图1中,AD625的典型差动放大倍率为:

$$A_v = (2R_f / R_G) + 1 \quad (1)$$

式中  $R_f, R_G$  为决定增益的反馈电阻。由于噪声及线路稳定性的原因,决定增益的电阻阻值最好选择生产商推荐范围内的阻值,  $R_f$  一般选择20 k $\Omega$ 左右,热噪声小的电阻。

图1中的应变计电桥是由8片阻值为350  $\Omega$ 的应变片按照一定规律排布的,以满足应变片自身的温度补偿和获得最大输出(高灵敏度)的要求<sup>[3]</sup>,关于电桥的测量原理及为了保证测量准确的各种补偿措施在此不作阐述,可以参考相关文献[4-5]。为了保证测量电桥工作的稳定,一个重要的关键点是供电电源的设计。由于测量现场远离供电电源,需要通过约几十米的电线将电源引入天平测量电桥,电线上微弱的干扰将会产生显著不良影响,因此在电桥一端设计了一个采用正、负对称形式的精密跟踪电源以达到在本地对电桥进行供电的目的,起到稳定供电和消除电源波动产生不良影响2个方面的作用,进一步降低电桥输出信号中的共模成分。精密跟踪电源中采用了AD587作为基准参考电压,具有极高的稳定性能,温度漂移达到5 ppm/°C,进一步提高了测量的精确度。这种设计方式及实际布局的特点极大地缩短了电桥、工作电源、仪用放大器间的距离,尤其是电桥与仪用放大器间距离的缩短,极大地降低了最易受到干扰的引线噪声,解决了前级引线过长带来的问题。如果不采取这样的措施,利用长线进行直接的单线供电,则供电电源要采用四线制结构才能够避免电源引线的影响<sup>[6]</sup>,这将导致供电电源变得很复杂。

针对输出信号远距离的测量问题,必须采用远端取样测量技术<sup>[2]</sup>,这通常也是仪用放大器必须提供的一种功能,AD625提供了这种功能,如图1所示。采用这种测量方式后,可以避免较长的传输线电阻对测量结果的影响,提高测量的精密程度。

## 2 测量电路性能的关键点设计及分析

测量电路的增益线性度及 CMRR 是高性能差动放大器的 2 个主要指标,线路的设计需要围绕这 2 个主要指标进行。

由式(1)可以得到:

$$\Delta A_v / A_v = \frac{2R_f / R_G (\Delta R_f / R_f - \Delta R_G / R_G)}{1 + \frac{2R_f}{R_G}} \quad (2)$$

因此,增益的线性度直接由  $R_f, R_G$  的匹配程度决定。由式(2)可知,想要得到万分之一的线性度,电阻的匹配度应在相同的水平上。对于温度漂移问题,首先应选用温度系数小且尽量一致、采用同种材料做成的电阻,以保证温度漂移方向及大小尽量一致。在这种情况下由式(1)及式(2)可知,温度漂移对增益产生的影响将相互抵消,从而极大地降低了温度漂移的不良影响。实际工作中,发现 AD625 会明显发热,并在电路板上产生温度分布,造

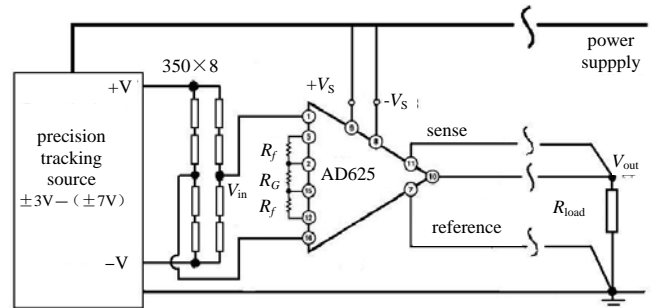


Fig.1 Measure electric circuit principle for the balance based on resistance strain gage

图1 力学天平应变计测量电路原理示意

成不同位置的元器件处于不同的温度环境,加剧了温度的影响。如果能够利用AD625的发热效果使局部位置的温度保持一定的稳定与均衡,使 $R_f, R_G$ 处于相同的温度环境,反而可以达到抑止温度漂移的目的。基于这种设计思路,将相应的电阻布局在可以利用AD625热量的位置,在线路预热一定时间后,可以达到温度的相对平衡,对抑止温度漂移起到一定作用,这种设计方法在改进的线路设计中采用,证明是有效的。如图2所示, $R_{f1}, R_{f2}$ (即 $R_f$ )并排置于AD625腹部, $R_g$ (即 $R_G$ )横放于 $R_{f1}, R_{f2}$ 两端,这样达到温度均衡的效果最好。

由于器件内部电阻经过激光调整,阻值及温漂的匹配程度非常高,其CMRR性能主要由外部增益电阻 $R_f$ 的匹配程度决定。当电阻阻值失配时,即使失配程度不大,也将会严重影响到其CMRR性能<sup>[7]</sup>,失配达到1%时,典型的CMMR降低为48 dB左右。因此,要达到100 dB以上的CMMR能力,电阻的匹配程度应高于0.05%。另一方面,在电路设计时注意采取措施减少器件对地的泄露,否则CMRR指标就会降低,尤其在工作频率增高时。图2中,针对输入管脚1和16,除了直接将信号通过电线连接到输入管脚上,还采取了一定的屏蔽措施,进一步确保隔断对其的泄露通道。

电阻阻值的高精密度匹配同时也是为了满足多路差动放大器调试的简便性及放大倍数的一致性要求。

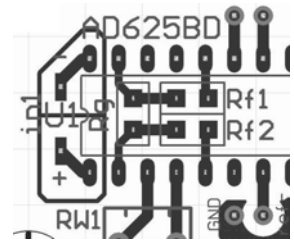


Fig.2 Electric circuit pat display  
图2 线路布局的局部示意图

### 3 性能测试及结果分析

调试时使用的测量电路主要参数为: $R_f$ 的阻值为19.675 k $\Omega$ ,  $R_G$ 的阻值为121.48  $\Omega$ ,增益设计为325倍, $R_f$ 的匹配程度达到0.05%以下,电阻的温度系数约为50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

图3为针对微小信号的差动放大电路部分的标定工作原理:首先,将电桥部分脱离AD625;然后,在 $V_{in}$ 端用标准源Datron 4708施加多个稳定的微小电压,并用纳伏表Keithly 2182监测输入端电压信号,对AD625输出的放大信号则用高精密度数字表Fluke 8508A进行测量。测量结果及线性拟合处理结果见图4,由处理结果可以获知微小信号的差动放大增益为325.08倍,线性度约为0.013%,线路的偏置约-7 mV,确保了天平标定的精确性。

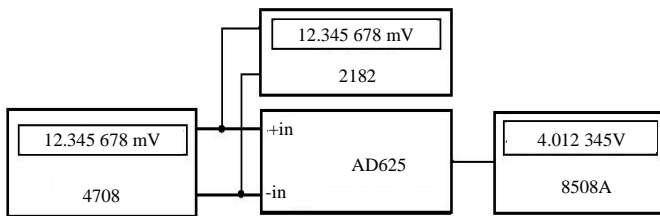


Fig.3 Linearity measure principle for the difference amplifier gain  
图3 差动放大器增益的线性度测量原理

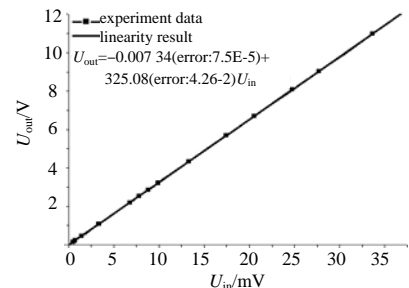


Fig.4 Measure results of the gain and linearity  
图4 增益及线性度测量结果

按照上述改进设计的思路,重新设计该放大器线路: $R_f$ 阻值选为19.600 k $\Omega$ ,  $R_G$ 的阻值选为158.00  $\Omega$ ,增益设计为249.1倍。采用隔离方法将输入端围住,减少输入端与其他元件间的泄露;在布局上,将决定增益的3个电阻尽量靠近,并放置在AD625的腹部以获得同样的温度漂移特性;同时采用了精密度为0.02%(实际测量结果)、温度系数为5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 的电阻。图5是抽样线路的测量结果,增益为249.15,增益的线性度约在0.001%左右,线路的偏置约为37.46 mV。

实际中使用的电阻阻值精密度在0.02%以内,这样做虽然增加了一定的成本,但保证了设计的多路精密差动放大器增益值的一致性,达到了较高的水平,测量结果显示在249.05~249.15的范围,其线性度典型值在0.01%左右,高的约0.001%,不仅获得了性能上的满足,而且也极大地减轻了调试的工作量,达到了较好的费效比。

CMRR是此类放大器的一个主要指标,表达了对共模信号的抑止能力。在上述测量基础上,将图3中AD625的2个输入端短接并接到4708的输出上,在较高的电压水平上(但不要超过器件在工作状态下可以承受的极限如8.5 V,以防仅用放大器前级输出阻塞)设置4708的输出,用8508A测量输入电压,2182测量输出电压,通过处理可以获得差动放大器对共模电压信号的放大倍率,约为 $1.11 \times 10^{-4}$ 倍,因此CMRR约为129 dB。图6为测量结果,从测量结果来分析,其CMMR性能具有分段特性,并不具有良好的线性关系:在共模电压低的一段(如1 V~3 V),其CMRR较高,提示使用者可以考虑将测量目标设计在这样的共模范围内;但当共模电压接近极限时,CMRR能力开始下降,需要注意。

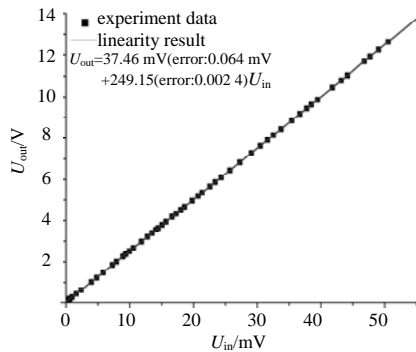


Fig.5 Measure result of the gain and linearity for the improved circuit  
图5 改进后的增益及线性度测量结果

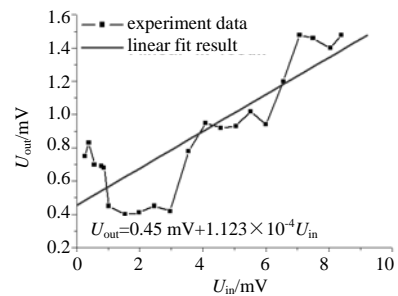


Fig.6 Measure result of CMMR  
图6 CMRR测量结果

在实际使用中,测量电桥的供电采用了输出对称的精密跟踪电源,使得实际施加在AD625输入端上的共模电压相当小,可以认为不存在,从而该项产生的影响可以忽略,这也是在设计时有意考虑的措施。

#### 4 结论

针对力学天平输出信号的放大处理高要求,设计了相应的高精密密度、高稳定度的差动放大线路。通过采用高性能的器件、巧妙设计的线路布局、选择匹配度较高而温度系数很小的电阻等措施,最终降低了温度漂移的影响,获得了高稳定度、增益一致性很好的多路差动放大器,增益的线性度最终达到了0.013%,共模抑止比达到129 dB,满足了天平信号的放大及标定要求。

**致谢:** 对中国工程物理研究院计测中心的王晓敏、贾桂华、邓国荣、周悦在本线路的精密测试中提供的帮助表示衷心的感谢!

#### 参考文献:

- [1] 彭超,史玉杰. XX型火箭助飞鱼雷雷箭分离高速风洞试验测力天平研制[J]. 实验流体力学, 2006,20(2):82-84.
- [2] ANALOG devices. Programmable Gain Instrumentation Amplifier AD625[DB/OL]. (2009-11-01). <http://www.analog.com/>.
- [3] 姚裕,吴洪涛,张召明. 并联天平设计、制造及标定[J]. 机械科学与技术, 2007,26(3):362-365.
- [4] 刘彬,陈先良. 一种高精密度应力测量电路的实现[J]. 自动化与仪表, 2000,15(3):5-18.
- [5] 夏伯雄,杨均青. 温度补偿系统使测量仪器更精确[J]. 国外电子测量技术, 2005,24(9):6-7.
- [6] 毛显辉. 称重传感器和应变计的信调节[J]. 衡器, 2001,30(4):41-43.
- [7] 李江华,谢红,于蕾. 仪表放大器技术初探与应用[J]. 应用科技, 2001,9(28):10-12.

#### 作者简介:



江孝国(1968-),男,四川省泸州市人,研究员,主要研究方向为 CCD 测量系统及数据采集系统设计、图像处理、超高速图像捕获系统及其时间分辨测量系统 .email:j\_xg\_caep@sina.com.

杨兴林(1969-),男,四川省北川县人,高级工程师,从事加速器测控技术研究.

李洪(1969-),男,四川省绵阳市人,副研究员,主要研究方向为精密机械设计.

石金水(1964-),男,安徽省安庆市人,研究员,主要研究方向为核技术及应用.

李劲(1973-),男,云南省楚雄市人,副研究员,主要研究方向为核技术及应用.

王远(1965-),男,江苏省无锡市人,高级工程师,主要从事加速器束参数测量及测控技术研究.

文龙(1969-),男,四川省绵阳市人,副研究员,主要研究方向为精密机械设计.

张开志(1970-),男,四川省广汉市人,研究员,主要研究方向为核技术及应用.