

用于核子皮带秤的弱电流放大器 和输出电路

孙金华 郑明权 王明谦 贾昌春 金寒涓 施启存 唐 轲

(中国科学技术大学 合肥 230027)

摘要 研制了弱电流放大器和输出电路, 其最大非线性误差为 $\pm 0.06\%$ 。实验证明其性能稳定可靠, 可应用于核工业仪表。

关键词 弱电流, 输出电路, 非线性误差

我们研制的核子秤采用了自制的高气压圆柱形电离室^[1]作为 γ 信号传感器, 电离室对 ^{137}Cs γ 射线灵敏度约为 $4.2 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{kg} \cdot \text{h} \cdot \text{C}^{-1}$ 。对物料进行计量时, 电离室输出电流的最大变化范围为 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ A}$, 这样弱的电流需要研制一套结构简单、体积小、便于安装、时间响应较快, 稳定可靠的弱电流放大器, 以及适于远距离传输的信号输出电路。

1 原理和组成

弱电流放大器 and 输出电路的原理如图1所示。

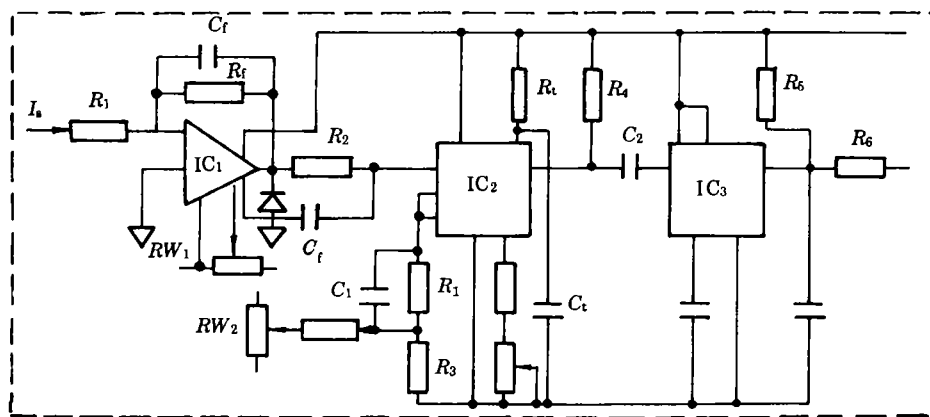


图1 弱电流放大器 and 输出电路原理图

Fig.1 Diagram of the weak current amplifier and output circuit

1.1 弱电流放大器

选用有极低的偏置电流和相当高的输入阻抗的IC₁运放组件构成了负反馈型弱电流放大器(如图1), 其灵敏度优于 10^{-12} A 。选用负反馈型弱电流放大器是考虑到这种放大电路结构简单, 响应时间短, 测量灵敏度高, R_f 值稳定性好, 输出电压稳定。本放大器选用温度系数小的金属膜电阻, 阻值为 $8.8 \times 10^8 \Omega$ 。为了提高放大器稳定性, 减小温度影响, 我们把包括

收稿日期: 1997-03-31, 修回日期: 1997-05-28

高阻在内的放大器、输出电路IC₂、IC₃放在加热恒温器里(如图1虚线所示)。且把温度控制在一定精度内。电容C_c是频率补偿电容,经调整取值约5—10pF。

设放大器的输入电流为I_s,放大器的输出电压为V₀,在忽略失调电压和噪声影响时

$$V_0 = -[R_f \cdot R_c / (R_f + R_c)] \cdot I_s$$

当R_c>>R_f时

$$V_0 = -R_f \cdot I_s \tag{1}$$

式中,R_c为电容C_f的漏电阻。当R_f=10⁹Ω时,要求R_c>10¹³Ω,故选C_f时要采用绝缘性能好的介质电容。

1.2 输出电路

由IC₂、IC₃构成输出电路。采用IC₂作为V/F变换器(图1),其特点是电路稳定性好、功耗小、成本低。其输出频率f₀与输入电压V_{in}之间的关系为

$$f_0 = 0.48R_s / (R_1 \cdot R_t \cdot C_t) \cdot V_{in} \tag{2}$$

当V_{in}为0—10V时,f₀为0—10kHz,电压在2—10V的范围内,最大非线性误差为±0.06%。由IC₃对IC₂输出频率f整形供远距离传输。

2 性能测试

2.1 弱电流放大器

2.1.1 输入电流与输出电压关系。由(1)式知,V₀正比于I_s。利用精密稳压电源输入一定电压V_{in}通过高阻R_f产生一弱电流,送入放大器的反相输入端作为I_s。此时V₀=R_fV_{in}/R_f。

我们使R_f≈R_f。这时,V₀≈V_{in}。当放大器恒温在(50±1)℃时,测量结果列于表1。表1中,V_{0标}是通过Grapher软件拟合实验点得到的公式对应值所计算的电压输出值;相对误差δ=[(V_{0标}-V₀)/V_{0标}]×100%。结果表明,I_s在3.5×10⁻⁹—1.0×10⁻⁸A变化范围内,V₀最大非线性误差为±0.03%。

表1 (50±1)℃温度状态下放大器的线性
Table 1 The linearity under (50±1)℃

V _{in} /V	V ₀ /V	V _{0标} /V	δ/%	V _{in} /V	V ₀ /V	V _{0标} /V	δ/%
2.004	1.972	1.972	-0.01	6.004	5.881	5.882	0.01
2.502	2.462	2.459	-0.1	6.505	6.371	6.371	0
3.004	2.950	2.949	-0.03	7.005	6.860	6.860	0
3.504	3.438	3.438	0	7.504	7.349	7.348	-0.01
4.005	3.927	3.928	0.02	8.005	7.837	7.838	0.01
4.504	4.415	4.415	0.01	8.504	8.326	8.325	-0.01
5.005	4.905	4.905	0	9.005	8.815	8.815	0
5.504	5.393	5.393	0	10.005	9.793	9.793	0

2.1.2 电路灵敏度。电路所能测量的最小电流受零点摆动和漂移的限制,对于R_f=8.8×10⁸Ω的金属膜电阻,当弱电流放大器与SJG-9电离室连接使用时,测得的V₀<1mV,相应的电流为10⁻¹²A。当放大器输入端悬空状态时,测量观察24h,测得V₀为3.3—3.6mV,则相应的输出电流约4×10⁻¹²A。这时我们确定弱电流放大器的灵敏度约4×10⁻¹²A。

2.1.3 响应时间。响应时间t_测的计算公式^[2]为

$$t_{测} = 5R_f C \tag{3}$$

式中, R_f 是 $8.8 \times 10^8 \Omega$ 的高阻; C 是高阻两端的分布电容, 一般不大于 5pF 。把这些值代入(3)式得 $t_{\text{测}} = 2.2 \times 10^{-2}\text{s}$ 。

运输皮带速度为 1.7m/s , 物料通过电离室的时间约 0.1s , 满足动态连续测量要求。

2.2 V/F 变换器的线性测量

从 V/F 变换器输入端输入一可变的电压 V_{in} ($1.590\text{--}10.006\text{V}$), 由定标器(上海原子核研究所生产)记录输出端的相应脉冲频率 f , 测得结果如表2所示。通过计算可知, 在 $2\text{--}10\text{V}$ 范围内计数率的非线性误差为 $\pm 0.04\%$ 。

表2 输出电路的线性
Table 2 Linearity of the output circuit

V_{in}/V	f/s^{-1}	$f_{\text{拟合}}/\text{s}^{-1}$	$\delta/\%$	V_{in}/V	f/s^{-1}	$f_{\text{拟合}}/\text{s}^{-1}$	$\delta/\%$
1.590	1574	1575	0.04	6.005	6006	6006	0
2.007	1993	1993	0.01	6.505	6507	6508	0.01
2.508	2496	2496	0	7.005	7009	7010	0.01
2.908	2998	2998	-0.01	7.500	7506	7506	0.01
3.509	3501	3501	-0.01	8.007	8015	8015	0
4.003	3996	3996	-0.01	8.510	8519	8520	0.01
4.500	4495	4495	0.01	9.004	9015	9016	0.01
5.001	5000	4998	-0.04	9.503	9516	9517	0.01
5.502	5502	5501	-0.02	10.006	10024	10022	-0.02

2.3 输出系统的线性测试

把弱电流放大器和输出电路连在一起放入加热恒温器中, 将温度控制在 $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$, 从弱电流放大器输入端输入电流 I_s , 测量放大器的输出电压 V_0 、 V/F 变换器的频率 f , 并分别计算出相对误差列于表3(整个测量方法同前)。结果表明 V_0 的误差为 $\pm 0.02\%$, 而整个输出系统输出计数率的最大非线性误差为 $\pm 0.06\%$ 。

表3 输出系统的线性
Table 3 Linearity of the output system

V_{in}/V	V_0/V	$V_{0\text{拟合}}/\text{V}$	$\delta/\%$	f/s^{-1}	$f_{\text{拟合}}/\text{s}^{-1}$	$\delta/\%$
1.500	1.481	1.481	0	1490	1488	0.1
2.002	1.972	1.972	-0.01	1985	1984	-0.05
2.501	2.460	2.460	-0.02	2478	2476	-0.06
3.002	2.949	2.949	0.01	2972	2971	-0.03
3.501	3.437	3.437	0.01	3464	3464	-0.01
4.001	3.926	3.926	0	3957	3957	0
4.501	4.415	4.415	-0.01	4450	4451	0.01
5.002	4.904	4.904	0.01	4944	4945	0.02
5.501	5.393	5.393	-0.01	5437	5438	0.01
6.002	5.882	5.882	0	5930	5932	0.04
6.501	6.370	6.370	0	6423	6425	0.03
7.001	6.858	6.859	0.01	6915	6918	0.05
7.501	7.347	7.347	0.01	7410	7412	0.02
8.001	7.836	7.836	0	7903	7905	0.03
8.501	8.325	8.325	0	8399	8399	0
9.001	8.814	8.814	0	8893	8892	-0.01
9.501	9.303	9.302	-0.01	9389	9386	0.03
10.002	9.792	9.792	0	9885	9881	-0.04

3 弱电流放大器和输出电路的温度效应

使¹³⁷Cs源与电离室相对固定,打开电源,使仪器开始工作。待仪器稳定后,在室温下($T=20^{\circ}\text{C}$)由定标器连续记录输出脉冲频率,连续记录15个值取平均,得 $\overline{N}=4715\text{s}^{-1}$ 。当达到平衡温度 $T_2=(45\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 时,再连续记录15次取其平均,得 $\overline{N}_2=4749\text{s}^{-1}$ 。则温度每变化1 $^{\circ}\text{C}$ 计数的相对变化 $\delta_{\text{实}}=0.3\%$ 。

4 称量线性度

把弱电流放大器和输出电路同SJG-9电离室相连,输出信号接入核子秤主机,进行线性度检定。在有效称量范围内,累计示值与模拟负荷面密度的非线性误差,检定时不大于0.5%。测量方法是依次插入读数 M_i 相当于最大量程 M_{max} 的25%、38%、50%、63%、75%、88%、100%的模拟负荷片,分别开皮带机各3次,每次运行4min,记录累计示值 W_{oi} ,其相对误差 $\delta_m=(W_i-W_{oi})/W_{oi}$ 应不大于0.5%(W_i 为标准物料量),测量数据和处理结果列于表4。

表4 称量线性度检定测试数据和处理结果
Table 4 Verification of linearity with the simulated loads

测量序号 Run No.	$(M_i/M_{\text{max}})/\%$	$M_i/\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	W_i/t	W_{oi}/t	$(W_i-W_{oi})/\text{t}$	$\delta_m/\%$
1	25	1.872	4.3613	4.3718	-0.1045	0.239
2	38	2.808	6.5281	6.5407	-0.0126	0.192
3	50	3.744	8.7141	8.7096	0.0045	0.051
4	63	4.689	10.8940	10.8785	0.0155	0.143
5	75	5.616	13.0771	13.0475	0.0296	0.227
6	88	6.552	15.2182	15.2164	0.0018	0.012
7	100	7.488	17.3568	17.3853	-0.0285	0.016

由表4可见, $W_{oi}=2.31722M_i+3.30007\times 10^{-2}$, $\delta_m\leq 0.24\%$, 线性度合格。

5 实物计量误差检定

实物在现场条件下用日常输送的物料进行综合检定。用5—7t煤以45%—65%流量连续通过皮带输送机,记录 $W_{oi}(t)$ 。要求检定误差 $\leq 0.5\%$,结果列于表5。

表5 现场实物检定测试数据和处理结果
Table 5 Verification of linearity on the spot

测量次数 Run No.	$(M_i/M_{\text{max}})/\%$	W_i/t	W_{oi}/t	$\delta_m/\%$
1	~65	7.158	7.144	-0.20
2	~60	6.050	6.040	-0.17
3	~65	7.514	7.508	-0.08
4	~45	5.369	5.349	-0.07
5	~50	6.245	6.220	-0.40

由表5可见,结果符合技术要求($\delta_m\leq 0.5\%$)。

6 结论

(1) 测试结果表明:弱电流放大器的 I_s 在 $3.5 \times 10^{-9} - 1.0 \times 10^{-8} \text{ A}$ 范围内变化, V_0 非线性变化为 $\pm 0.03\%$ 。 V/F 变换器在输入电压从2V变化到10V时, 最大非线性误差为 $\pm 0.04\%$;这个系统的输出最大非线性误差在 $\pm 0.06\%$, 完全可以满足核工业仪表测量精度的要求。

(2) 该系统的检定误差优于0.5%, 符合国家有关标准中关于线性度^[3]和实物计量误差检定^[4]的规定。大量的应用表明本电路稳定可靠, 可以应用于核子称仪表。

(3) 实验表明, 我们选择的高阻具有正温度系数, 而放大器和 V/F 变换器具有负温度系数, 因此对电路进行温度实验时, 这个系统的温度系数相互补偿而有所减小。初步测得温度系数为0.03%。

致谢 本工作得到申建军同志的帮助, 表示感谢。

参 考 文 献

- 1 王明谦, 施启存, 孙金华. 核技术, 1993, 16(1):19-23
- 2 清华大学工程物理系主编. 射线仪器电子学. 北京:原子能出版社, 1978. 252
- 3 中华人民共和国核行业标准(EJ/T 784-793)
- 4 中华人民共和国国家计量检定规程(JJG 811-893)

A weak current amplifier and output circuit used in nuclear weighing scales

SUN Jinhua ZHENG Mingquan WANG Mingqian JIA Changchun
JIN Hanjuan SHI Qicun TANG Ke

(University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract

A weak current amplifier and output circuit with a maximum nonlinear error of $\pm 0.06\%$ has been developed. Experiments show that it can work stably and therefore be used in nuclear industrial instruments.

Key words Weak current, Output circuit, Nonlinear error