

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005454

# 侧向仪器主屏流比和剩余电位电路 测量理论算法研究\*

郭庆明 贺飞 和丽真 杨居朋 曹景致 游占华 赵敏  
(中国石油集团测井有限公司 西安 710077)

**摘要:** 研究硬聚焦侧向仪器主屏流比和剩余电位对测井结果的影响,聚焦主屏流比和剩余电位的电路简化测量方法,借助正演方法对仪器主屏流测量电路模型进行简化,搭建主电流测试电路和屏流测量电路,并给出理论计算方法和结果分析,结果显示该方法能够在基于电路简化模型基础上给出主屏流比和剩余电位测试结果,该测试结果可以在一定程度上校正仪器正演模型的误差。继续分析该方法在主聚焦电路参数测试中的应用优势,能够对方位阵列侧向不同方位主电流测量的参数进行量化对比,保证仪器方位上的一致性,也为继续优化主聚焦电路提供了数据支撑。

**关键词:** 主屏流比;残余电位差;方位侧向;硬聚焦

**中图分类号:** TE132 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Theory and algorithm research on the ratio of main current & bucking current and rest potential circuit measurement of laterolog tool

Guo Qingming He Fei He Lizhen Yang Jupeng Cao Jingzhi You Zhanhua Zhao Min  
(China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** This paper studies the influence of the ratio of main current & bucking current and the rest potential of the hard focus lateral tool on the logging results, the circuit simplified measurement method of the the ratio of main current & bucking current and the rest potential, simplifies the circuit model of the main current & bucking current measurement of the tool with the help of the forward method, builds the main current test circuit and the bucking current measurement circuit, and gives the theoretical calculation method and the result analysis. The results show that the method can be based on the electricity simplified model, the ratio of main current & bucking current and rest potential test results are given. The test results can correct the errors of the forward model of the tool to a certain extent. The application advantages of this method in the main focus circuit parameter test are analyzed. It can quantize and compare the parameters of the main current measurement in different directions of the array azimuthal laterolog, ensure the consistency of the tool orientation, and provide the data support for the continuous optimization of the main focus circuit.

**Keywords:** the ratio of main current & bucking current; rest potential; array azimuthal laterolog; hard focus

## 0 引言

方位阵列侧向仪器<sup>[1-3]</sup>是在阵列侧向仪器<sup>[4-6]</sup>基础上增加方位电阻率测量,最早起源于20世纪90年代斯伦贝谢的双侧向仪器<sup>[7-9]</sup>上的方位电阻率测量,随后十多年来国内陆续有相关方位电阻率仪器的跟进,主要包括西安石油仪器厂的贴片壁式方位电阻率仪器、中电22所的居中方位电阻率仪器、中油测井的方位阵列侧向仪器。对于方位电阻

率、方位阵列侧向的研究文献逐渐增多,国内的石油大学(华东)、西安石油大学、长江大学等研究都从不同的方法角度上给予了论证和模拟,文献[10]中给出了电极系设计优化方法,采用不同算法优化电极系结构和尺寸,寻求最优电极系。上述电极系的最优结果并未考虑实际电路实现能力,电路的实现能力需要量化,需要测量。电路的主屏流比设计不合理会导致主电流无法满足小电流要求,屏流无法满足大电流要求,两者之比小于设计指标,使得仪器最终无

收稿日期:2020-11-29

\* 基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05019-001)、中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目(2019B-3707)资助

法实现完全聚焦,导致低阻层和高阻层测量不上去,影响仪器动态测量范围。

针对上述问题,本文简化了主电流电路和屏流聚焦<sup>[11]</sup>电路的测量模型,采用等效原理<sup>[12]</sup>搭建了各自测量电路以及主屏流比联合测量电路,研究信号特征<sup>[13]</sup>和信号提取算法<sup>[14]</sup>和小信号高分辨率处理方法<sup>[15]</sup>,通过计算给出理论计算公式和实际测量计算公式,为方位阵列侧向仪器电路性能测试提供理论支撑。

### 1 硬聚焦方位阵列侧向仪器

侧向仪器聚焦模式分为硬聚焦和软聚焦(又称计算聚焦),硬聚焦是指监督电极测量到压差信号后由硬件电路直接反馈到该聚焦电极上,实现硬件电路自动聚焦;软聚焦是指根据电场叠加原理由两个非聚焦状态的电流合成为聚焦电流,直接控制输出聚焦电流。方位阵列侧向仪器采用硬聚焦模式实现主流和屏流的聚焦,具体结构如图 1 所示。

如图 1 所示主电流电极 A0 分为 6 个方位 A01、A02、A03、A04、A05、A06,相对应的主监督电极 M0 也分为 6 个方位 M01、M02、M03、M04、M05、M06,屏流电极上下对称,分别为 A1、A2、A3、A4、A5、A6 与 A1'、A2'、A3'、A4'、A5'、A6',屏流监督电极上下对称,分别为 M1、M2、M3、M4、M5 与 M1'、M2'、M3'、M4'、M5',回路电极 B,总共 34 个电极。

为了量化硬聚焦主屏流等参数指标,方便电路设计人员设计电路和测试、筛选电路,本文从方法入手,简化主屏流电路模型,进一步研究设计屏流测试电路和主流测试电路,以及结合下的主屏流测试电路,实现主屏流比的测量。

#### 1.1 主屏流电路测量简化模型

对方位阵列侧向仪器而言,仪器工作模式包括 6 种工作模式如图 2 所示,不同的工作模式对应不同的发射和接收回路电极,以模式 3 为例,该模式中,A0 为主电流,A1、A2、A3 为发射电极,A4、A5、A6、B 为等电位接收回路电极,其余模式依次类推。

对方位阵列侧向仪器工作模式继续进行地层电路简化,简化结果如图 3 所示。

其中 A0、A1、A2、A3、A4、A5、A6 对回路电极 B 的地层等效电阻分别为  $R_{A0B}$ 、 $R_{A1B}$ 、 $R_{A2B}$ 、 $R_{A3B}$ 、 $R_{A4B}$ 、 $R_{A5B}$ 、 $R_{A6B}$ ,其中  $R_{A0B}$  由于存在方位,图 3 中  $R_{A01B}$ 、 $R_{A02B}$ 、 $R_{A03B}$ 、 $R_{A04B}$ 、 $R_{A05B}$ 、 $R_{A06B}$  表示方位主电极对回路电极之间的地层等效电阻;M01、M02、M03、M04、M05、M06、A01、A02、A03、A04、A05、A06 分别为方位主电极和方位监督电极; $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R'_1$ 、 $R'_2$ 、 $R'_3$ 、 $R'_4$ 、 $R'_5$ 、 $R'_6$  分别为方位监督电极之间的地层等效电阻; $R_{A1M1}$ 、 $R_{A1A2}$ 、 $R_{A2A3}$ 、 $R_{A3A4}$ 、 $R_{A4A5}$ 、 $R_{A5A6}$  分别为电极之间的等效电阻。

图 3 是整支仪器地层等效电阻网络,不适合电路分析,需要对各模式进行单独简化。以图 2 中的模式 3 为例进行简化,简化模型如图 4 所示,A1、A2、A3 完全聚焦等电位等

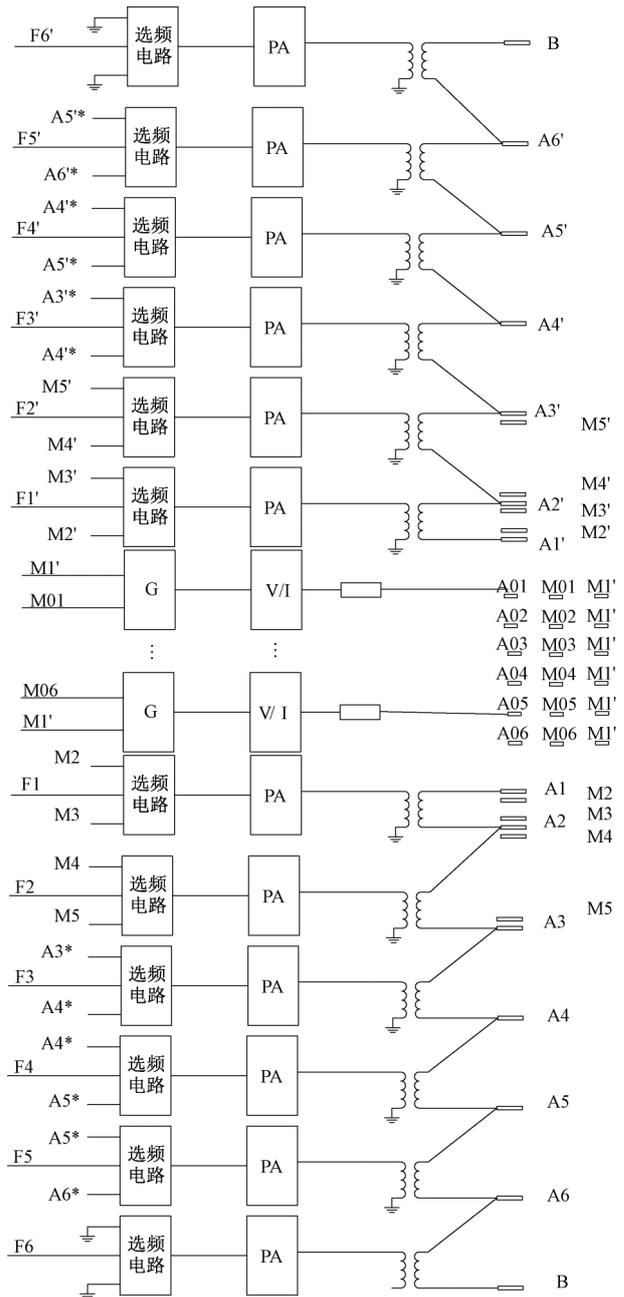


图 1 方位阵列侧向仪器电路结构

效为发射电极 A1,回路电极 A4、A5、A6、B 等电位,等效为回路电极 B, $R_{A0B}$ 、 $R_{A1B}$ 、 $R_{A1A0}$  分别为 A0 电极、A1 电极、A1 与 A0 电极地层等效电阻,该电阻值考虑井眼大小、泥浆、地层电阻率大小后的综合等效电阻。在实际地层模型中,A0 的接地电阻  $R_0$  等于主电流流过路径中各部分电阻之和,即: $R_0 = R + R_m + R_{mc} + R_i + R_t + R_u$ ,其中  $R$  为 A0 和钻井液的接触电阻; $R_m$  为主电流  $I_0$  流过钻井液的体电阻; $R_{mc}$  为  $I_0$  流过的泥饼电阻; $R_i$  为  $I_0$  流过侵入带地层的电阻; $R_t$  为  $I_0$  流过原状地层的电阻; $R_u$  为  $I_0$  返回到 B 电极的回路电阻;实际简化模型时,由于钻井液电阻率低,且钻

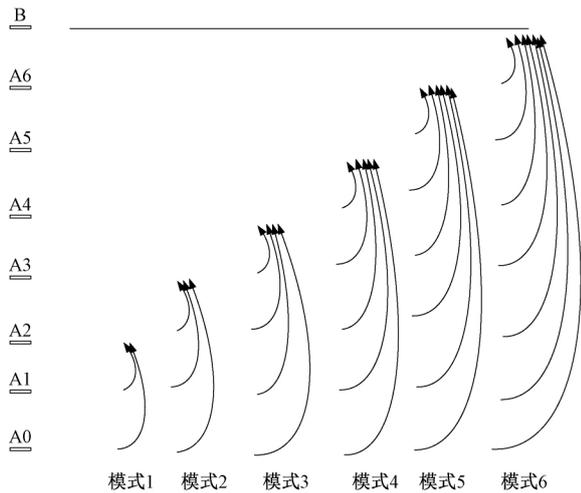


图 2 6 种模式下发射与回路模型

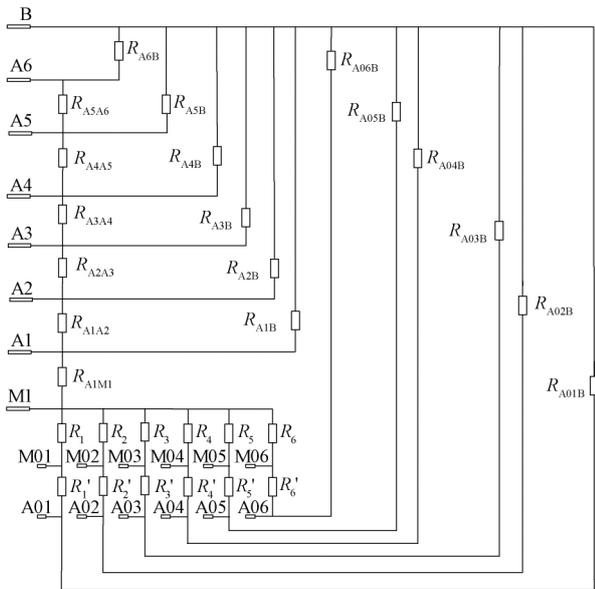


图 3 方位阵列侧向地层等效电阻

井液、泥饼路径短,所以  $R_m$ 、 $R_{mc}$ 、 $R_u$  相对于  $R_t$  和  $R_i$  可以忽略,  $R_i$  由于侵入泥浆,相对于  $R_t$  也可以忽略。图 4 中  $R_{A0B}$  为  $R_t$ ,  $R_{A1A0}$  为 A0 和 A1 之间的等效电阻。

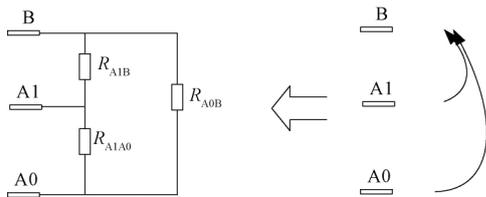


图 4 6 种模式简化发射与回路等效模型

6 种工作模式完成电路模型等效简化后,实现了主电流和屏流的结合,需要进一步对主电流和屏流电路进行电路结构简化和测量电路简化,主聚焦电流简化模型如图 5 所示。

图 5 中  $I_{A0A1}$  为漏电流,理想聚焦过程中近似为 0,实际

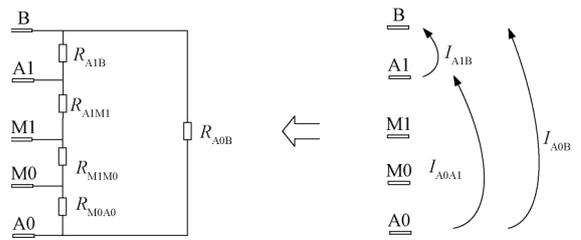


图 5 主聚焦电流简化模型

聚焦过程正是因为不等于 0 才有了主聚焦存在的意义,主聚焦为有差聚焦,漏电流导致的 M0、M1 之间的压差作为主聚焦的驱动信号;  $I_{A0B}$  为主电流到回路电极的电流;  $I_{A1B}$  为屏流到回路电极的电流。在图 5 简化模型基础上,为了使得主聚焦有差聚焦更好的聚焦,把 A1 接地,使得参考点接近有差信号,提高主聚焦精度,可以得到主电流电路参数测试方法原理如图 6 所示;同理可以得到屏流电路参数测试原理如图 7 所示。

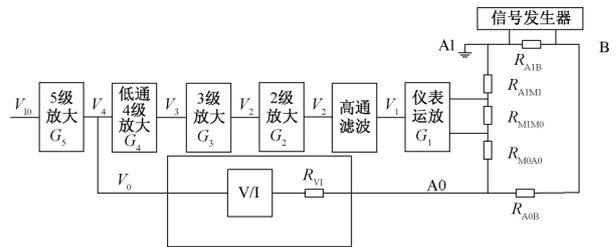


图 6 主电流电路参数测试方法原理

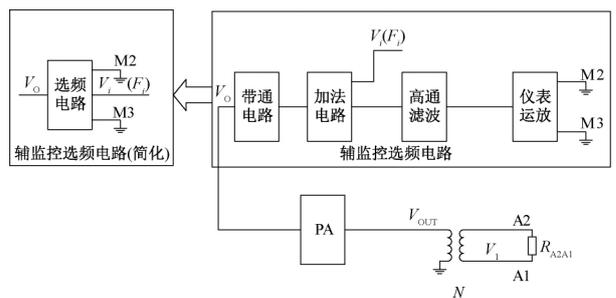


图 7 屏流电路参数测试原理

对主电流测量原理和屏流测量原理合并后实现主屏流同时测量原理,如图 8 所示。

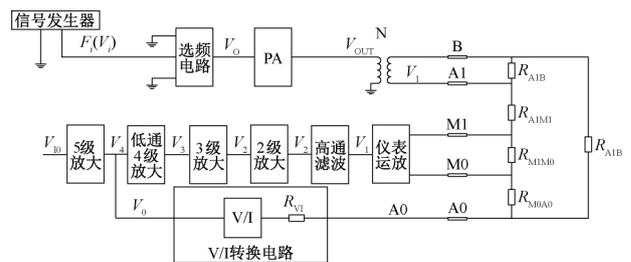


图 8 主屏流测量原理

在图 8 简化模型中,完全模拟硬聚焦仪器工作模式,屏

流主动,主流被动,从屏流端输入信号,测量主屏流电路参数,计算过程如下。

主聚焦测量参数:

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot G_4 \quad (1)$$

$$K = \frac{\text{闭环后的 } V_4}{\text{开环后的 } V_4} \cdot 100\% = \frac{\text{闭环后的 } V_{M1M0}}{\text{开环后的 } V_{M1M0}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$K_{V1} = V_o / I_o = R_{V1} \quad (3)$$

其中,  $G$  为主聚焦开环放大倍数;  $K$  为主聚焦电路的闭环系数;  $K_{V1}$  为主聚焦转换系数。

屏流聚焦测量参数:

$$K_V = V_1 / V_i = \frac{V_{OUT}}{N \cdot V_i} \quad (4)$$

$$I_{A1} = \frac{V_1}{R_{A2A1}} \quad (5)$$

$$K_{A0A1} = \frac{I_{A0}}{I_{A1}} = \frac{V_{A0B} / R_{A0B}}{V_1 / R_{A1B}} \quad (6)$$

式(4)~(6)是基于假设主流和屏流完全聚焦情况,其中  $K_V$  为屏流电压系数,  $I_{A1}$  为屏流大小,  $R_{A0B}$ 、 $R_{A1B}$  为正演综合电阻率,  $V_{A0B}$ 、 $V_1$  为 A0、A1 端对回路电极 B 的电位差;  $K_{A0A1}$  为主屏流比;  $N$  为屏流变压器匝数比。

$$K_{M1M0} = \frac{V_{M1} - V_{M0}}{V_{M0}} \cdot 100\% = \frac{V_{M1M0}}{V_{M0}} \cdot 100\% \quad (7)$$

$K_{M1M0}$  为实际测试过程残余电位差,以比例形式定义残余电位差,区别后文中的剩余电位。

$$I_{M1M0} = \frac{V_{M1M0}}{R_{M1M0}} \quad (8)$$

$$I_{A1} = \frac{V_1}{R_{A1B}} = \frac{V_{OUT}}{N \cdot R_{A1B}} \leq \frac{24}{N \cdot R_{A1B}} \quad (9)$$

$$I_{A0} = I_{A1} \cdot K_{A0A1} \leq \frac{24 \cdot K_{A0A1}}{N \cdot R_{A1B}} \quad (10)$$

$$V_{M1M0} = I_{M0M1} \cdot R_{M1M0} \quad (11)$$

$$V_{M1M0} \geq 0.1 \mu V \quad (12)$$

其中  $K_{A0A1}$  为各模式下的主屏流比,不同模式对应不同的主屏流比,该值在仪器电极系统设计完成后是确定的,  $R_{A1B}$  在不同模式、不同井眼、不同泥浆、不同地层条件下通过正演模型可以确定,仪器电路调试可以更改的参数包括  $N$ 、 $R_{V1}$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ ,上述限制条件下合理选择  $N$ 、 $R_{V1}$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$  才能够满足仪器设计指标要求。

在上述测量计算过程中,主电流聚焦电路参数设计和测量电路网络的选取是需要特定的测量简化模型才能准确覆盖不同地层电阻率范围,需要对主电流聚焦电路进行进一步研究。

### 1.2 主电流聚焦电路影响因素分析及优化

本文进一步对图 6 进行负反馈电路等效转换,可以等效为电压串联负反馈,其结构如图 9 所示。

$G$  为开环增益,  $F$  为反馈系数,简化到图 6 中,则:

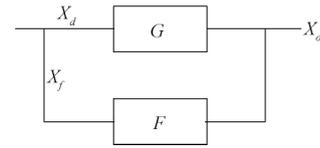


图 9 主聚焦电路负反馈等效结构

$$F = \frac{X_f}{X_o} = \frac{R_{M1M0}}{R_{A1M1} + R_{M1M0} + R_{M0A0}} \cdot \frac{(R_{A1M1} + R_{M1M0} + R_{M0A0}) \cdot (R_{A0B} + R_n)}{(R_{A1M1} + R_{M1M0} + R_{M0A0}) + (R_{A0B} + R_n)} \cdot \frac{V_o}{R_{V1}} \cdot \frac{1}{V_o} \quad (13)$$

$$G_f = \frac{G}{1 + G \cdot F} = \frac{G}{1 + G \cdot \frac{R_{M1M0}}{R_{A1M1} + R_{M1M0} + R_{M0A0}} \cdot \frac{(R_{A1M1} + R_{M1M0} + R_{M0A0}) \cdot (R_{A0B} + R_n)}{(R_{A1M1} + R_{M1M0} + R_{M0A0}) + (R_{A0B} + R_n)} \cdot \frac{1}{R_{V1}}} \quad (14)$$

其中  $R_n$  为信号发生器输出电阻,等价于图中的  $R_{A1B}$ ,  $V_o$  为图 6 中测点的电压。

从式(14)中可以得到闭环增益  $G_f$ ,实际测量时必须以某一地层模型为对象,以  $R_{A1M1} = R_{M1M0} = R_{M0A0} = 1$ ,根据实际地层假设  $R_{A0B}$  远大于  $R_n$ ,且远大于 3,简化公式后得到:

$$G_f \approx \frac{G}{1 + G \cdot \frac{(R_{A0B} + R_n)}{3 + (R_{A0B} + R_n)} \cdot \frac{1}{R_{V1}}} \approx \frac{G}{1 + G \cdot \frac{R_{A0B}}{3 + R_{A0B}} \cdot \frac{1}{R_{V1}}} \approx \frac{G}{1 + G/R_{V1}} = \frac{G}{R_{V1} + G} \cdot R_{V1} \quad (15)$$

选取  $R_{V1}$  为 200、470、1 000 为测试条件,调整开环放大倍数进行数值分析,测试结果如表 1 所示。表 1 中转换系数(固定值)、开环增益(实际测量计算值)、闭环增益(实际测量计算值)、闭环系数(实际测量计算值)分别对应上述公式中的  $R_{V1}$ 、 $G$ 、 $G_f$ 、 $K$ 。

表 1 不同转换系数对应闭环参数结果

转换系数	开环增益	闭环增益	闭环系数
200	46 812 558 70	198 862 928 3	99.575 193 21
470	46 862 495 29	466 246 105 9	99.005 076 23
1 000	46 862 495 29	986 386 292 8	97.895 147 74

固定转换系数,调整开环增益,对闭环增益和闭环系数进行对比分析,如表 2 所示。表 2 中开环增益(实际测量计算值)、转换系数、闭环增益(实际测量计算值)、闭环系数(实际测量计算值)分别对应上述公式中的  $G$ 、 $R_{V1}$ 、 $G_f$ 、 $K$ 。

表 2 不同开环增益对应闭环参数结果

开环增益	转换系数	闭环增益	闭环系数
15 148 573 46	200	198 862 928 3	98.687 249 80
46 812 558 70	200	198 862 928 3	99.575 193 21

随机选取几组测量数据对方位侧向6个方位进行一致性测试和对比分析,6个方位闭环增益一致性误差小于1%,如表3所示。表3中转换系数、闭环增益(实际测量计算值)分别对应上述公式中的 $R_{v1}$ 、 $G_f$ ,其中一致性误差是闭环增益均值的误差值。

表3 不同方位主聚焦电路一致性测试结果

转换系数	闭环增益	一致性误差
1 000	986.386 292 8	-0.183 630 847
1 000	987.024 922 1	-0.119 005 399
1 000	986.604 361 4	-0.161 563 621
1 000	986.666 666 7	-0.155 258 699
1 000	996.370 716 5	0.826 732 868
1 000	986.152 648 0	-0.207 274 304

在式(15)基础上,实际测试应用过程中,开环增益远大于转换系数 $R_{v1}$ ,进一步简化公式为:

$$G_f \approx \frac{G}{R_{v1} + G} \cdot R_{v1} \approx R_{v1} \quad (16)$$

式(16)从表1~3中得到了验证。

### 1.3 硬聚焦仪器的主屏流电路设计约束条件分析

进一步对硬聚焦电路设计的约束条件进行理论分析,可以很好地指导仪器设计,从图7中可以得出屏流约束条件:

$$I_{A1} = \frac{V_1}{R_{A1B}} = \frac{V_{OUT}}{N \cdot R_{A1B}} \leq \frac{24}{N \cdot R_{A2A1}}$$

其中 $N$ 是确定的, $R_{A2A1}$ 在某一地层模型中是确定的, $V_{OUT}$ 受限于屏流供电电压最大值,给定 $R_{A2A1}$ 最小值地层等效模型值,两者之比作为屏流最大值的约束条件 $I_{1max}$ 。

仪器主屏流比是确定的,可以通过 $I_{1max}$ 得到主电流在该屏流对应的主电流最大值 $I_{0flmax}$ ,该最大值应该能够满足图6中电阻模型中的最小电阻网络,对应最小地层电阻率。换言之,屏流最大、地层电阻率最小时对应仪器测量的极限主电流最大值。

主聚焦电路其他约束条件还包括转换系数 $R_{v1}$ 、闭环增益 $G_f$ 、开环增益 $G$ 三个参数之间的互相约束,转换系数越大闭环增益越大、主电流越小;开环增益越大,闭环增益越大。电路增益越大,越容易震荡,电路的平衡条件越脆弱。

式(11)可以求取剩余电位 $V_{M1M0}$ ,但是实际测量过程中并不可行,很容易引入误差,因为 $I_{M0M1}$ 很小,测量和计算误差比较大,所以引入可行的测量公式:

$$V_{M1M0} = I_{M0M1} \cdot R_{M1M0} = \frac{V_0}{G_f} \quad (17)$$

式(17)中 $V_0$ 值和 $G_f$ 值比较大, $V_0$ 可以通过高精度万用表直接测量得到, $G_f$ 可以通过式(14)准确得到,剩余电位的测量准确度和计算准确度大大提高,可以方便的求取

剩余电位,该剩余电位、结合闭环增益决定了仪器所能达到的主电流聚焦精度。

同理,为了减少小信号测量带来的较大的测量误差,主电流公式为了准确测量得到,把式(10)引入 $V_0$ 值,得到测量计算公式(18),其中 $R_{v1}$ 已经固化到电路中,为转换系数。

$$I_{A0} = I_{A1} \cdot K_{A0A1} = \frac{V_0}{R_{v1}} \quad (18)$$

式(18)、(9)代入式(6)可以求得高精度的主屏流比公式:

$$K_{A0A1} = V_0 \cdot R_{A1B} / (V_1 \cdot R_{v1}) \quad (19)$$

式(19)是实际可行的电路理论简化公式,由于主电流很小,屏流相对于主流较大,其中根据不同的地层特性 $R_{A1B}$ 是理论计算值, $R_{v1}$ 作为仪器内部的调节电阻,实际测量过程中 $R_{v1}$ 越大,主电流越小,屏流比越大,主屏流比越小。

## 2 结 论

上述电路简化设计和测试电路参数是基于电路等效原理进行的等效简化,测试电阻网络是基于电极系的地层模型而建立,测试结果具有可重复性,结论具有说服力,具体结论总结如下:

- 1)在反馈网络确定的情况下,提高开环增益可以提高闭环增益、闭环系数、反馈系数。
- 2)提高转换系数可以提高闭环系数、反馈系数。
- 3)在满足一定条件下,闭环增益主要取决于转换系数,成正比例关系。
- 4)按照上述公式可以测量得到不同地层电阻率模型下的主屏流比,该测量得到的主屏流比可以与设计好的主屏流比进行核对,若无法满足设计的主屏流比,则会出现低阻、高阻无法准确测量。

5)图6简化模型中A1电极可以接地,这样设计简化模型的好处是使得M1、M0压差信号共模噪声变小,利于平衡系统工作稳定,减少震荡,该结论用于指导仪器A1与接地的关系。

6)侧向仪器主电流聚焦电路各种各样,主要包括采用变压器模式进行硬聚焦和本文所示聚焦模式。该方法思路可适用于所有硬聚焦侧向仪器,为了提高剩余电位小信号测量准确性,采用测量与小信号有确定比例系数的大信号测量点进行测量,通过计算换算出剩余电位。

### 参考文献

- [1] 高建申,孙建孟,于其蛟,等.新型贴片式阵列方位侧向测井数值模拟与响应特性[J].地球物理学报,2016,59(3):1131-1142.
- [2] 邓少贵,袁习勇,王正楷,等.裂缝性地层方位侧向测井响应数值模拟[J].地球物理学报,2018,61(8):351-361.
- [3] 孙明礼,杨隼.阵列方位侧向测井仪器的数值模拟研

- 究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2010, 7(2): 45-49.
- [4] 司兆伟, 邓少贵, 林发武, 等. 泥浆侵入各向异性地层阵列侧向测井响应数值模拟[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(1): 200-209.
- [5] 袁超, 李潮流, 周灿灿. 各向异性地层阵列侧向电阻率响应仿真模拟及应用[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 81-89.
- [6] 陈海贵, 高秦群. 数值合成聚焦在阵列侧向仪器中应用[J]. 声学及电子工程, 2017, 134(2): 46-49.
- [7] 童茂松. 高分辨率(0.2 m)数字聚焦双侧向测井仪信号测量电路设计[J]. 石油工业计算机应用, 2019, 27(Z1): 49-52.
- [8] 童茂松, 张加举, 丁柱. 0.2 m 高分辨率双侧向测井仪器信号幅度仿真[J]. 石油管材与仪器, 2019, 6(4): 25-28.
- [9] 郁爱霞, 周齐志. 一种高分辨率侧向测井仪的设计[J]. 声学及电子工程, 2020, 137(2): 39-42.
- [10] 高建申. 阵列方位侧向测井基础研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- [11] 陆利冬, 曹永刚, 郑慧峰. 基于球壳聚焦阵列的超声成像检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 40(4): 61-68.
- [12] 陈诚, 刘丁, 张宏儒. 等效电路分析法在声波探雷谐振模型研究中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 874-879.
- [13] 边海龙, 苏义脑, 李永威. 基于时延差分的连续波随钻测量信号提取算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 669-675.
- [14] 石欣, 朱家庆, 秦鹏杰. 基于改进能量核的下肢表面肌电信号特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 121-128.
- [15] 孙会娇, 代煜, 张建勋. 直流电源激励下的电路高分辨率应变信号处理[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 184-190.

#### 作者简介

郭庆明, 硕士, 二级工程师, 从事于测井仪器研发。

E-mail: zycjguoqm@cnpc.com.cn