

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415580

精密机械同轴扫描开关研制*

杨轩鲈¹ 钱璐帅¹ 富雅琼¹ 徐红伟¹ 王磊²

(1. 中国计量大学机电工程学院 杭州 310018; 2. 中国科学院电工研究所 北京 101408)

摘要: 在精密电测领域,鲜有面向交流自动测试系统的专用同轴扫描开关。针对于此,设计了一种4线制-15通道全同轴扫描开关装置。该装置以步进电机精密运动控制为基础,拖动快插式同轴线组件做X-Y双向定位运动,实现同轴测量通道的可靠自动切换。通过自主设计柔性对接机构,消除因运动失准导致的通道对接误差及不可逆物理损伤风险。通过分析通道热电势、泄漏阻抗、寄生电容、感性耦合电势等寄生参数的产生机理,明确了影响扫描开关电气设计的关键设计参数,进而提出针对性优化设计方法。测试结果表明,所研制扫描开关装置的通道热电势小于±50 nV,通道对地泄漏阻抗达到 $10^{14} \Omega$ 量级,通道间寄生电容小于 $1 \times 10^{-5} \text{ pF}$,通道间的感性耦合系数小于 $1.2 \times 10^{-10} \text{ H}$ 。

关键词: 扫描开关;热电势;泄漏阻抗;寄生电容;感性耦合电势

中图分类号: TH71; TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

Development of precise mechanical coaxial scanner

Yang Xuanlu¹ Qian Lushuai¹ Fu Yaqiong¹ Xu Hongwei¹ Wang Lei²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Institute of Electrical Engineering, China Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

Abstract: In the field of precision electrical measurement, there are few special coaxial scanner for AC automatic test systems. Aiming at this, a 4-wire-15 channel all-coaxial scanner device is designed. The device is based on the precision motion control of the stepper motor, and drags the fast-plug-in coaxial axis component to do X-Y bidirectional positioning motion, realizing the reliable automatic switching of the coaxial measurement channel. By independently designing the flexible docking mechanism, the risk of channel docking error and irreversible physical damage caused by movement misalignment are eliminated. By analyzing the generation mechanism of parasitic parameters such as channel thermal electromotive force, leakage impedance, parasitic capacitance and inductive coupling potential, the key design parameters affecting the electrical characteristics of scanner are defined, and then the targeted optimization design method is proposed. The test results demonstrate that the thermal electromotive force in the scanner channel is less than $\pm 50 \text{ nV}$, the leakage impedance of the channel to the ground reaches $10^{14} \Omega$, and the parasitic capacitance between the channels is less than $1 \times 10^{-5} \text{ pF}$, additionally, the inductive coupling coefficient between channels is less than $1.2 \times 10^{-10} \text{ H}$.

Keywords: scanner; thermal potential; leakage impedance; parasitic capacitance; inductive coupling potential

0 引言

为完成精密电测领域中工作量大、重复性高的批量化测试与校准任务,计量工作者们基于多通道扫描的理念,研制了作为精密测量辅助装置的扫描开关。扫描开关可将任意一个输入端的信号转接至公共输出端,在电路中实现一对多的通道切换,故扫描开关被广泛用于构建精密电学、热学等自动测量系统^[1-4]。

在早期,科研人员普遍使用电机控制波段开关旋转以改变触点接触逻辑,制成初期的扫描开关用于固态电池标准测试等直流应用场合。然而,因波段开关触点磨损及摩擦热量所引起的通道热电势变化,易直接影响测试系统的精度。随着低热电势继电器技术的发展,继电器逐步取代波段开关^[5-7]。在国内外,杭州翰维电子科技、美国 Data Proof、加拿大 Guildline、Measurement International 等企业均研制了功能及性能参数迥异的继电器型直流扫描开关。

收稿日期:2024-03-05

* 基金项目:国家重点研发计划基础科研条件与重大科学仪器设备研发专项(2022YFF0708600)、国家自然科学基金(52307021)项目资助

其中,通道热电势和通道泄漏阻抗为关注的主要技术参数。为此,常采用低热电势材料制作继电器触点。同时,通过优化 PCB 爬电距离设计、增大器件电气间隙、设置等位保护线等方法以提高扫描开关通道对地泄漏阻抗量级。目前,继电器型扫描开关通道热电势的典型值不超过 $\pm 50 \text{ nV}$,通道对地的泄漏阻抗超过 $10^{14} \Omega$ 量级。在交流测试领域,日本国家计量院(national metrology institute of Japan, NMIJ)率先采用电机控制同轴电缆通断的方式,实现全同轴交流型扫描开关的研制,可用于精密电压、高阻抗以及电容等的校准测试^[8]。文中对通道寄生电势及泄漏阻抗进行了测试评估,但未述及通道间寄生电容、感性耦合系数等对交流测试结果敏感的参数。美国 Agilent 公司虽推出 N1810/1/2 三种型号的同轴多选模块产品,但其内部仍采用继电器原理实现通道切换,无法满足全同轴测量需求。

针对上述问题,本文研制了可同时面向交、直流测试系统的机械型全同轴扫描开关。该同轴扫描开关采用步进电机牵引同轴线做通道切换动作,保证测量通道为全同轴结构的同时,实现扫描开关的基本扫描功能。为提高通道切换的可靠性,消除因运动定位偏差引起的不可逆物理损伤,自主设计了一种端子柔性对接运动机构。进一步地,通过对扫描开关寄生参数的产生机理进行分析,提出针对性的电气优化设计方法,进而抑制扫描开关寄生参数对精密测试系统测量精度的影响。

1 扫描开关的结构与运动设计

如图 1 所示,本文设计的同轴机械扫描开关整体为标准 3U 尺寸。15 个卡扣配合型连接器(bayonet nut connector, BNC)型输入通道组与 1 个 BNC 型公共输出通道组均布局在机箱前面板,可由按键或程控命令两种方式实现通道切换控制。单一通道组被配置为四线制形式,以满足四端对器件测试需求。



图 1 全同轴机械扫描开关实物图

为实现扫描开关全同轴通道的自由切换,优化设计了 X-Y 双向柔性运动机构,其由公共快插端子、X 向定位机构和 Y 向对接机构共同组成。与普通 BNC 端子相比,公共快插端子不存在锁紧用的卡榫结构,从而使得端子能够快速对接与移除。X 向定位机构以齿轮齿条传动组输出线性驱动力,负责拖动公共快插端子至目标输入通道,并利用光

栅式位移传感器反馈作为定位依据;Y 向对接机构则由丝杠滑台模组作为驱动部件^[9],负责将公共快插端子推入或移出输入通道,并由 2 个光电开关限定运动位置。

受齿轮齿条运动误差、位移传感器精度以及控制系统延时等因素影响,快插端子和输入通道不一定能完全对准,从而导致对接失败。针对该问题,如图 2 所示,在 X 向上设计了柔性导向机构。其中,柔性导向机构具备导向定位和弹性复位两种功能^[10]。公共快插端子在锥形导向的作用下,产生侧向位移以顺利滑入输入端通道内。当公共快插端子退出通道后,在 X 向弹簧力的作用下实现复位,从而达到柔性对接的目的。

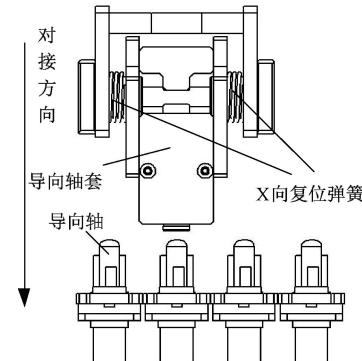


图 2 X 向导向结构示意图

X 向柔性对接机构的最大允许定位误差是 $\pm 1.2 \text{ mm}$ 。若定位误差超出该容限范围,则继续 Y 向的对接动作会损坏对接端子,造成不可逆损伤。针对该问题,在 Y 向上设计了如图 3 所示的柔性溃缩复位机构。Y 向弹簧通过溃缩动作,将快插端子在对接过程中所受到的推力转化为弹力,为接头间的硬性接触做柔性缓冲。

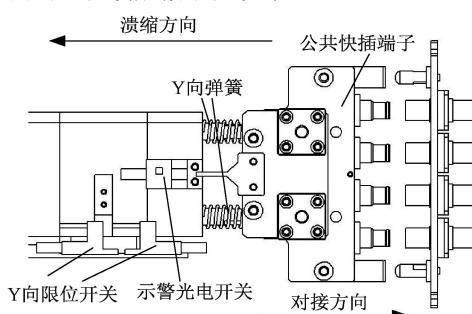


图 3 Y 向柔性溃缩复位机构示意图

Y 向弹簧既要保证提供足够的推力将快插端子推入输入端并锁死,也要保证有一定量的溃缩,实现柔性缓冲保护功能。经由压力计测试表明,推头正常进入通道所需的推力不超过 40 N,对应 Y 向弹簧的最大溃缩量为 6 mm。因此,若溃缩量超过 7.5 mm 则视为定位失效,通过触发光电开关以执行复位动作。根据胡克定律,选用的每根 Y 向弹簧的劲度系数应大于 3 333 N/m,否则 Y 向弹簧无法实现上述功能。基于此,选用弹簧钢制成弹簧,其剪切模量 G

为 77 GPa, 线径 d 为 1.2 mm, 直径 D 为 9.4 mm, 有效圈数 n 为 6。代入式(1)所示的弹簧劲度系数计算公式可知, 所选弹簧的劲度系数约为 4 005 N/m, 满足应用需求。

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad (1)$$

由于整个推头仅由两根直径为 8 mm 的钢杆进行支撑, 因此推头在重力作用下可能造成垂向位移, 影响通道对接准确性。已知推头的总重为约 3 N, 对该结构进行仿真受力分析, 得到的位移云图如图 4 所示。可见推头端部在重力影响下的垂向位移仅有 μm 量级, 对通道切换的影响可忽略不计。

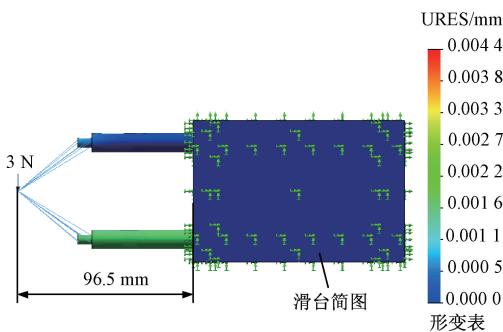


图 4 支撑钢杆受力仿真计算结果

2 扫描开关引入的寄生参数及应对措施

同轴扫描开关可作为测量辅助装置, 用于提高精密测量系统的测量效率, 并降低因频繁手工接线引入的测量误差。但是, 对于精密测量系统而言, 扫描开关本身也可能是潜在的误差源。其中, 1) 通道热电势、2) 泄漏阻抗、3) 寄生电容、4) 通道间感性耦合电势为主要误差源。

2.1 通道热电势

根据塞贝克效应可知, 通道热电势由接触电势和温差电势 2 部分构成^[11]。其中, 接触电势是由构成同轴通道回路内的导体材质不一致所引起的, 而温差电势则与通道回路途径非均匀温度场有关。在四线制通道组内, 电压通道组内存在的热电势将会在四线制电阻、标准电压等测量系统中, 直接引入测量误差。

在扫描开关内部, 步进电机驱动器、线性电源等热源被单独隔离, 并由风扇经独立风道进行强制散热。因此, 通道中各部件所处温度基本相等, 故不特别考虑温差电势。而回路中的潜在接触电势来源, 已在图 5 中标注。其中, 源(1)和(4)由线缆组件与面板端子之间对接接触引起; (2)和(3)则由线缆组件自身因素引起, 如线缆型号、芯线装接方式等。在已选定法兰式母转母 BNC 接头及快插接头的前提下, 通道中的热电势主要与使用的同轴线缆有关^[12]。因此, 以 Agilent-34420A 型数字纳伏计作为测量仪表, 并利用图 6 所示的差值法测试不同线组条件下的通道热电势值^[13], 结果如表 1 所示。对比发现, 宜选用 RG316

标准线组, 此条件下通道热电势最小。

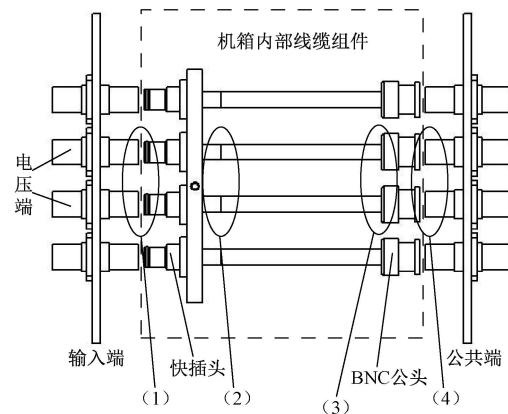
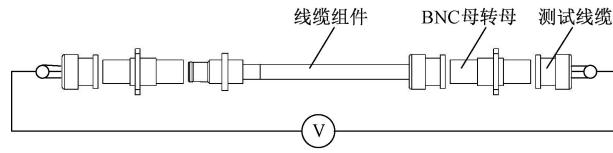
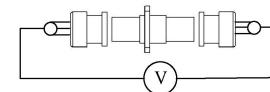


图 5 同轴扫描开关路径中的接触热电势示意图



(a) 同轴线热电势直接测量接线原理图



(b) 仪表短接原理图

图 6 同轴线热电势测量法原理图

表 1 备选同轴线组件芯线热电势测量结果

规格	被测件编号	热电势/nV
RG316	#1	15.7
	#2	15.5
RG223	#1	29.0
	#2	30.6
RG142	#1	-24.5
	#2	-26.5

2.2 泄漏阻抗

当扫描开关通道对参考地或通道间的阻抗不够时, 会存在泄漏电流, 这对高阻测量的影响尤其显著。在全同轴通道中, 芯线与皮线之间, 以及皮线与机壳之间的泄漏为主要路径。其中, 前者由线材类型本身所决定, 后者则与如图 7 所注的具体因素有关^[14-15]: 1) 爬电距离 a , 2) 爬电距离 b , 3) 绝缘垫材料, 4) 安装螺钉材料。

为评估不同泄漏路径的影响, 选用 ZG-90 高阻计, 在 1 000 V 的高压^[16]下对不同条件下的泄漏阻抗进行直接测量, 具体如下:

1) 爬电距离 a 。在保持绝缘垫材质选用聚乳酸 (polylactic acid, PLA), 绝缘螺钉材质选用聚碳酸酯 (polycarbonate, PC) 的条件下, 改变距离值 a , 结果如表 2

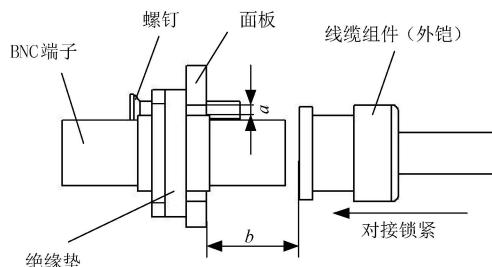


图 7 同轴通道对地泄漏路径示意图

所示。当 $a \geq 1 \text{ mm}$ 时, 泄漏阻抗量级不再变化。该结论与文献中的结论数据相吻合。

表 2 不同爬电距离泄漏阻抗测量结果

(垫入 PLA 垫片)爬电距离/mm		
0.5	1	1.5
$7.1 \times 10^{10} \Omega$	$4.2 \times 10^{12} \Omega$	$2.5 \times 10^{12} \Omega$

2)垫片材料。在保证爬电距离 b 满足 $\geq 1 \text{ mm}$ 条件下, 垫片厚度最多为 3 mm。因此, 在该厚度下, 采用图 8 所示的测量方法测试不同材质垫片的影响, 包括: PLA、热塑性聚氨酯弹性体(thermoplastic urethane, TPU)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)。结果如表 3 所示。对比发现, 当选用 ABS 的 3D 打印耗材制作绝缘垫片, 通道泄漏阻抗的量级最大。

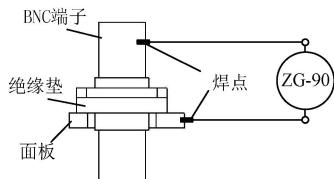


图 8 泄漏阻抗测试原理图

表 3 备选耗材泄漏阻抗测量结果

材质泄漏阻抗/Ω		
PLA	TPU	ABS
5.6×10^{12}	2.9×10^{11}	6.0×10^{15}

3)螺钉材料。在保证爬电距离 a 和 b 均 $\geq 1 \text{ mm}$, 且采用 ABS 耗材制作垫片的条件下, 测试 PC 和尼龙两种材料制成螺钉的影响。结果如表 4 所示, 发现选用 PC 制螺钉的泄漏阻抗的量级远高于尼龙制螺钉。

表 4 螺钉泄漏阻抗测量结果

规格	被测件编号	泄漏阻抗/Ω
尼龙螺钉	# 1	9.2×10^{12}
	# 2	1.1×10^{13}
PC 螺钉	# 1	2.8×10^{15}
	# 2	5.2×10^{15}

2.3 寄生电容

同轴通道芯线间存在的寄生电容以两种形式影响着测试精度: 1) 交流信号通过寄生电容向系统外泄漏, 造成测试信号的损耗, 2) 通道间寄生电容并联在待测阻抗的两端, 直接干扰测试结果。

扫描开关中, 同轴通道按图 9 所示的平行方式进行铺设。不同通道芯线之间形成平行极板, 其寄生电容值由平行间距 D 决定。根据电容的特性可知, 平行间距与电容值呈反比例关系。针对该问题, 依照 RG316 线缆组件的尺寸参数设计了平行间距在 5~45 mm 的电容仿真计算。Maxwell 仿真模型以及仿真结果如图 10 所示, 平行间距按照每 1 mm 的步距进行拓展。根据图 10(b)所示的仿真结果可知, 间距达到 20 mm 以上时, 寄生电容值趋于平稳。故可认定平行间距在 20 mm 以上, 平行间距的增大对寄生电容值影响不明显, 结合机箱、同轴组件的实际安装尺寸, 设定同轴通道的芯线间距为 20 mm。

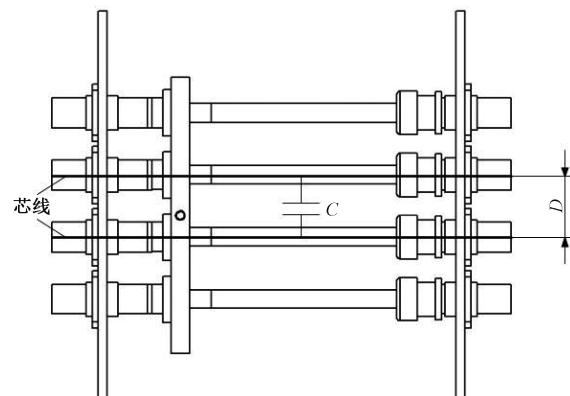
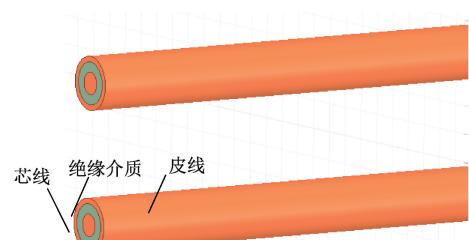


图 9 同轴通道铺设间距示意图



(a) 寄生电容仿真模型示意图

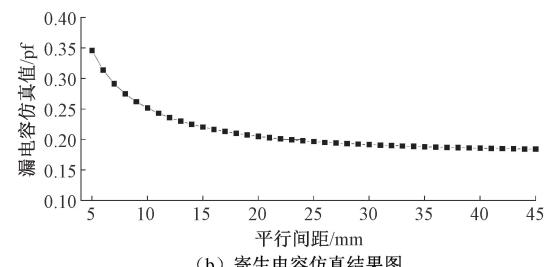


图 10 同轴通道寄生电容仿真结果

2.4 感性耦合电势

如图 11 所示,根据法拉第电磁感应定律,扫描开关的电流端环路通入交变电流 I 时,可形成交变磁场源。电压端回路在交变磁场源的作用下将感生出寄生在环路中的感性耦合电势,直接影响测试精度。

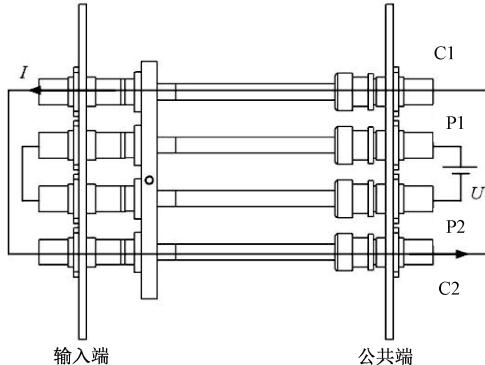


图 11 感性耦合电势的形成与影响示意图

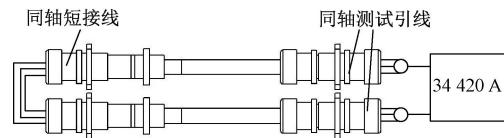
针对该问题,常用的解决方法是利用电磁感应原理,在同轴皮线上引入反向电流,以抵消芯线电流产生的磁场。在扫描开关设计上,未针对这一问题做特殊设计,仅通过物理实验测试相关技术指标。

3 扫描开关电气参数测试与分析

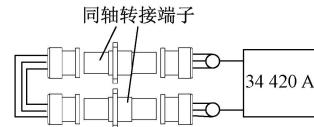
为客观评估扫描开关同轴通道的参数,针对 1) 通道热电势,2) 泄漏阻抗,3) 寄生电容,4) 感性耦合电势 4 个参数指标分别设计了对应的物理实验,并针对测试结果做出相关分析与评价。

3.1 通道热电势测试

针对通道热电势问题,采用如图 12 所示的差值法:图 12(a)所测结果减去图 12(b)所测结果即为扫描开关电压端通道热电势值。测量了扫描开关电压端回路中的热电势,结果如图 13 所示。扫描开关每个通道的热电势均保持在 ± 50 nV 以内,与国际领先的直流继电器型扫描开关的性能保持同等水平。根据图 13 可知,扫描开关公共端的线缆在接入不同输入端后,热电势存在波动的现象。分析认为,引起该现象的主要原因有 1) 输入端子本身存在个体差异,2) 因定位存在误差,快插端子并不能实现与输入端子的完美对接,故造成端子之间的接触条件不同。上述测量结果,与 NMJJ 的 ± 5 nV 的通道热电势测量结果相比要大很多,主要原因在于测量方法不同。当采用 NMJJ 的同等测量方法,即:热电势的测量时间上每 72 s 为一个周期,如图 14 所示,通过从正的平均值里减去虚拟负测量值的平均电压噪声来计算热电势。每个通道的测量 25 个周期,即 30 min,获得 25 组数据。采用 NMJJ 的测量方法得到的结果如图 15 所示,通道热电势均保持在 ± 5 nV 以内,与 NMJJ 的结论相一致。



(a) 电压端热电势直接测量接线原理图



(b) 仪表-短接线热电势测量接线原理图

图 12 扫描开关热电势差值测量法原理图

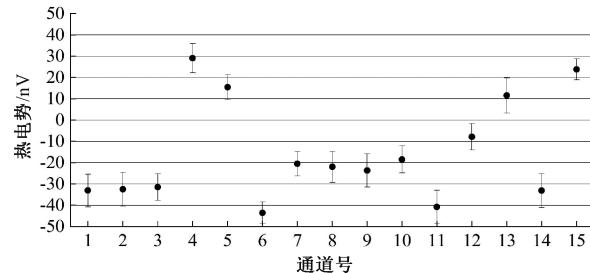


图 13 扫描开关通道热电势测量结果

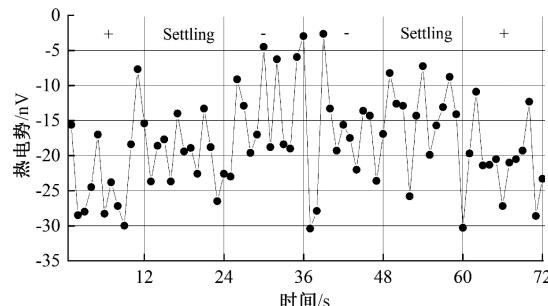


图 14 一个测量周期的热电势测量结果(CH10)

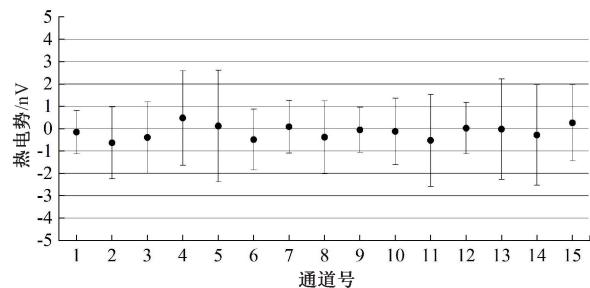


图 15 通道热电势测量结果

3.2 泄漏绝缘阻抗测试

同轴通道由型号 RG316 的线缆组件构成,面板端子采用 PC 螺钉固定安装在机壳上,两者之间垫入采用 ABS 耗材制成 3 mm 厚的绝缘垫片。在该条件下,分别抽检 3 个通道,对芯皮、皮地之间的阻抗进行测试。结果如表 5、6 所示,即泄漏阻抗均能达到 $10^{14} \Omega$ 量级。

表5 同轴通道芯皮线间绝缘阻抗测量结果

编号	四线通道芯皮间绝缘阻抗/Ω			
	C1	P1	P2	C2
1	4.1×10^{14}	3.7×10^{14}	2.0×10^{14}	3.1×10^{14}
8	1.9×10^{14}	1.9×10^{14}	1.9×10^{14}	1.9×10^{14}
15	1.8×10^{14}	1.5×10^{14}	1.5×10^{14}	1.7×10^{14}

表6 同轴通道皮地间绝缘阻抗测量结果

编号	四线通道皮地间绝缘阻抗/Ω			
	C1	P1	P2	C2
1	2.9×10^{14}	1.2×10^{14}	1.7×10^{14}	3.2×10^{14}
8	3.7×10^{14}	3.6×10^{14}	3.3×10^{14}	4.2×10^{14}
15	2.8×10^{14}	1.7×10^{14}	3.3×10^{14}	2.5×10^{14}

3.3 寄生电容评估测试

在进行寄生电容测量实验中,为保证扫描开关在实际应用时的全同轴条件,如图16所示,利用屏蔽帽对扫描开关对外接口做电磁屏蔽处理。

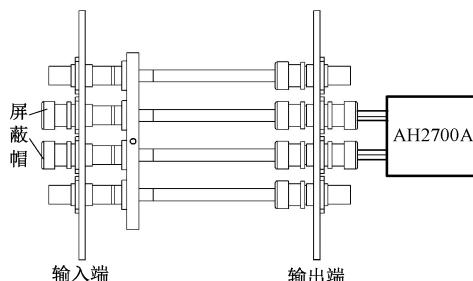


图16 同轴通道寄生电容测试原理图

在使用屏蔽帽的前提下,采用AH2700A作为测试仪表,直接连接两个相邻的同轴通道。在500 Hz、1 kHz、10 kHz以及20 kHz的条件下(AH2700A可提供频率范围在0~20 kHz),同轴通道间的寄生电容测量结果如图17所示。

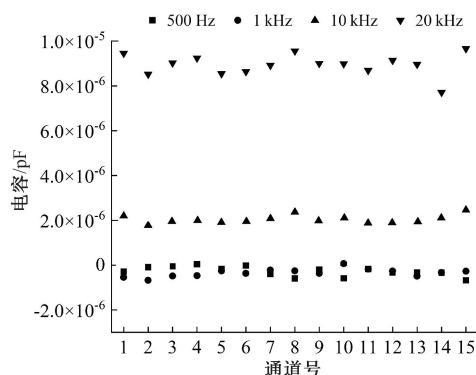


图17 同轴通道寄生电容测量结果

根据测试结果可知,同轴通道之间确存在寄生电容,在AH2700A所能提供的频率范围内,寄生电容不超过

1×10^{-5} pF。且通道间的寄生电容值随通入通道的信号频率的升高而增大。分析认为:如图18所示,寄生电容C与测试引线自身寄生电感L串联形成的阻抗Z,其表达式如式(2)所示。式(2)中频率升高时,阻抗Z的分母减小,对应测得的等效电容值增大,与实验结果相符。

$$\begin{cases} \frac{1}{2\pi f C_0} = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = j\left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}\right) \\ Z = \frac{C}{1 - \omega^2 LC} = \frac{C}{1 - (2\pi f)^2 LC} \end{cases} \quad (2)$$

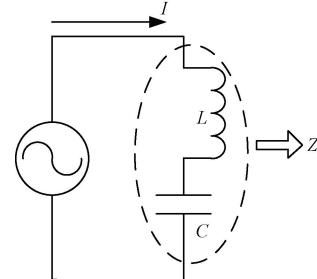


图18 寄生电容模型分析示意图

3.4 感性耦合电势评估测试

由2.4节可知,感应耦合电势与是否存在皮线电流有关,因此分别设计了如图19、20两种测量方法。其中,图20所示的方法在同轴皮线上通入了反向电流。

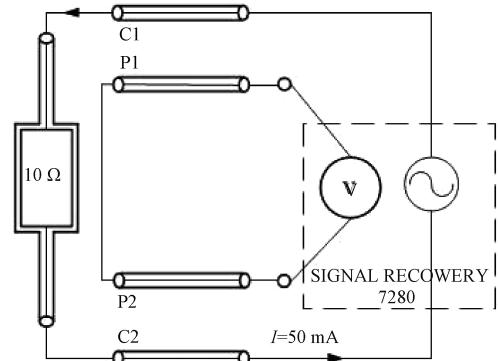


图19 感生耦合电势测量法1原理图

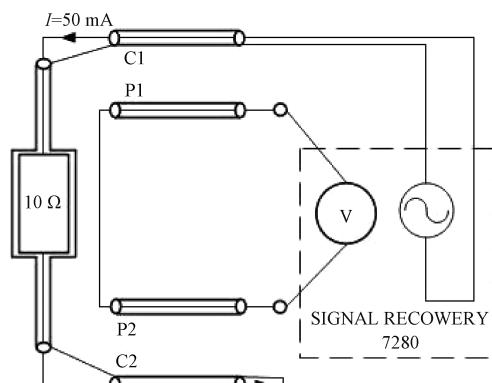


图20 感生耦合电势测量法2原理图

在扫描开关的电流端通入幅值为 0.5 V 的交流信号,施加在 10Ω 负载上,对应交流电流幅值为 50 mA。此条件下,采用 7280 锁相放大器^[17]测量扫描开关电压端的感应电势值,结果如图 21 所示。其中,图 21 的图例中的 1、2 分别对应图 19、20 的测量方法。由测试结果可知,当在同轴通道的皮线上通入反向电流后,通道间的耦合电势被明显抑制。另外,随着电流频率升高,感应电势也在呈比例的升高。经分析,感生电动势与电流之间的关系如式(3)所示,在电流端通入的电流的模型如式(4)所示。则联合式(3)和(4)可知,随着电流频率的增加,感生电势的值也逐步增加,与实验现象相符。将电流模型与电动势的测量结果代入式(3)中,可分别计算得出两种测试方法下,感性耦合系数 M_1 和 M_2 的值分别为 1.2×10^{-9} H, 1.2×10^{-10} H。

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = M \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

$$I = 0.05 \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (4)$$

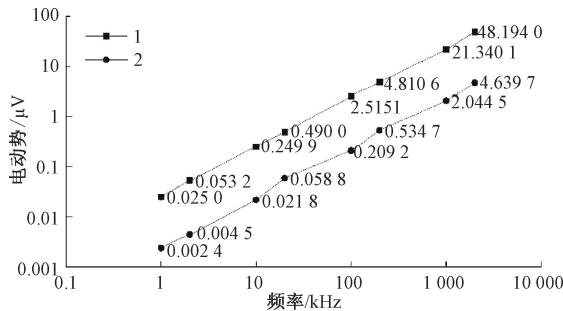


图 21 感性耦合电势测量结果

4 结 论

本文研制了一种多通道全同轴扫描开关。该装置基于机械结构拖动同轴线实现同轴通道切换功能,采用光栅位移传感器来提高通道间对接的精度。设计了柔性保护对接机构,提高通道对接的可靠性,并消除了装置内部不可逆物理损伤的风险。为能客观评估该扫描开关的性能,针对通道热电势、泄漏阻抗、寄生电容以及感性耦合电势 4 个方面设计了物理实验对扫描开关进行了测试。结果表明,通道热电势小于 ± 50 nV; 泄漏阻抗可达到 10^{14} Ω 量级; 20 kHz 频率范围内同轴通道间的寄生电容值不超过 1×10^{-5} pF; 感性耦合系数小于 1.2×10^{-10} H。

参考文献

- [1] 曹敏, 毕志周, 李波, 等. 基于 3458A 及 160B 扫描开关的数据采集统计系统设计[J]. 电子器件, 2013, 36(3): 371-376.
- [2] 陈雄姿, 龙辛, 戴建利, 等. 自动测试系统中矩阵开关的设计与实现[J]. 机械工程与自动化, 2015, (2): 165-167.
- [3] 张雨, 王钢, 裴君妍. 多通道切换式阵列一致性测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 169-174.
- [4] 韩志鑫, 何川, 赵晶, 等. 基于温度自动测量系统的扫描开关校准方法研究[J]. 计量科学与技术, 2023, 67(7): 18-24, 10.
- [5] QIAN L, FU Y, LI Z, et al. A multichannel array-driven scanner with low thermal EMF [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6): 1456-1462.
- [6] 郝松, 金月红, 燕鸣. 多通道程控开关的设计与实现[J]. 轻工标准与质量, 2018, (1): 80-81, 85.
- [7] 裴锐. 热工低热电势转换开关的设计与应用[J]. 电子科学技术, 2015, 2(2): 219-223.
- [8] OE T, DOMAE A, SAKAMOTO N, et al. Evaluation of automatic coaxial mechanical scanners for precise resistance and capacitance measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(6): 1560-1565.
- [9] 孙波, 孙怀远, 杨丽英. 步进电机驱动螺杆分装运行特性的分析研究[J]. 机电信息, 2016(17): 24-29.
- [10] 李冠军, 郭庆升, 李茂春, 等. 导向机构对四悬浮架中低速磁浮车辆运行影响研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 101-105.
- [11] 王磊, 李克文, 朱昱昊, 等. 三种热电效应的相互关系研究及应用进展[J]. 现代地质, 2023(1): 1-21.
- [12] 吕光明. 直流比较仪电桥测量标准电阻时消除寄生电势影响方法的研究[J]. 木工机床, 2019(3): 13-16.
- [13] 廖芳芳, 向友洪, 付玉, 等. 热工测量仪表在线计量低热电势校准回路设计[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(5): 71-75.
- [14] 孙轩, 王伯燕, 谢淑丽, 等. 电气间隙与爬电距离试验能力验证探讨[J]. 家电科技, 2022(1): 745-747.
- [15] 周媛. PCB 板电气间隙与爬电距离测量方法研究[J]. 电子质量, 2019(5): 15-17, 21.
- [16] 周晨, 胡社教, 沙伟, 等. 电动汽车绝缘电阻有源检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5): 409-414.
- [17] 李昌, 周松斌. 基于数字锁相放大器的电涡流位移传感器[J]. 电子器件, 2022, 45(2): 445-449.

作者简介

杨轩辕, 硕士研究生, 主要研究方向为精密电磁测量。
E-mail: 1260612843@qq.com

钱璐帅(通信作者), 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为精密电磁测量。

E-mail: qianlushuai@126.com