

石油勘探钻井用井下测控仪器电路的研发与应用探究

谢培, 诸梦青, 蓝永宗

杭州丰禾石油科技有限公司, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2026030016

摘 要 : 石油勘探钻井的作业环境较为复杂, 井下测控仪器是能够保障钻井安全、精准获取地层参数的关键装备, 其中电路系统是仪器的主要部分, 其性能情况能够直接影响测控数据的准确性, 还决定仪器是否能进行稳定的工作。现在国内井下测控仪器的电路还存在一些技术难题, 比如耐高温能力不够、抗干扰效果差等问题, 且关键元器件大多依赖于进口, 影响石油勘探装备的自主研发和发展。推进井下测控仪器电路的研发关键在于解决超高温适配、低噪声抗干扰、低功耗的技术问题, 让电路在极端工作条件下更可靠、更适配。

关 键 词 : 石油勘探钻井; 井下测控仪器; 电路研发; 应用路径

Research and Application of Circuitry for Underground Monitoring and Control Instruments Used in Petroleum Exploration Drilling

Xie Pei, Zhu Mengqing, Lan Yongzong

Hangzhou Fenghe Petroleum Technology Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : The operating environment for oil exploration drilling is quite complex. Underground monitoring and control instruments are crucial equipment that can ensure drilling safety and accurately obtain geological parameters. Among these instruments, the circuit system is the primary component, and its performance directly affects the accuracy of the monitoring and control data. It also determines whether the instrument can operate stably. Currently, there are still some technical challenges in the circuit systems of underground monitoring and control instruments in China, such as inadequate heat resistance and poor anti-interference capabilities. Additionally, key components are largely dependent on imports, which hinders the independent development and advancement of oil exploration equipment. Promoting the development of the circuit systems for underground monitoring and control instruments is essential for addressing the technical issues of high-temperature compatibility, low noise resistance, and low power consumption, thereby making the circuits more reliable and suitable for extreme operating conditions.

Keywords : petroleum exploration drilling; downhole monitoring and control instruments; circuitry development; application pathways

引言

随着全球能源需求不断上涨, 推动石油勘探向深井、超深井以及复杂地质区域推进, 也大幅度增加了钻井的难度和风险。井下测控仪器就像是钻井作业在地下工作的“眼睛”, 能够进行实时采集地层电阻率、温度、压力等关键参数, 为储层识别、轨迹优化以及事故预警等提供重要的参考数据, 而电路系统则是保障保证仪器正常发挥作用的关键组成部分。井下高温、高压、强振动等极端条件下对电路的稳定性以及适应性提出了更高的要求。开展井下测控仪器电路的研发以及应用研究, 对于打破国外技术封锁、保障国家能源安全以及提高勘探效率, 有着十分重要的意义。

一、石油勘探钻井井下测控仪器电路相关介绍

石油勘探钻井采用的井下测控仪器电路, 是一种包含信号采集、信号处理、数据传输、电源管理等功能的专用电子装置, 是实现井下测控仪器参数监测以及执行指令的主要载体。其主要构成包含模拟前端电路、数字处理电路、数据传输电路以及电源管理电路四个模块内容, 各模块间相互配合, 按照要求完成从参数

采集、信号转换、数据处理以及远程传输的整个流程。其中, 模拟前端电路主要负责连接各类传感器, 将地层物理量、井筒环境量等 = 模拟信号进行滤波、放大和调理处理; 数字处理电路主要依靠微处理器或专用芯片, 实现信号模数的转换以及数据运算; 数据传输电路使用电缆传输、泥浆脉冲传输等形式, 实现井下和地面之间的数据进行有效互通; 电源管理电路能够为整个系统提供稳定电力, 以此保障设备在极端环境下持续运转。

二、井下测控仪器电路研发的必要性

（一）满足深层勘探对测控精度的需求

随着浅层油气资源开发的枯竭，目前石油勘探已经逐渐转向深层、超深层以及复杂岩性储层^[1]。相比浅层油气，这类区域的地质条件更加复杂，储层的非均质性更强，对与井下测控数据的精度要求也更高。传统的井下测控仪器电路主要受信号调理技术和抗干扰设计的限制，在深层环境中工作容易出现信号失真、数据漂移等相关问题，进而导致储层参数识别出现问题，影响勘探决策的准确性。比如在进行深层页岩气勘探的过程中，地层的电阻率差异是非常微小的，要求电路系统能够具备纳伏级的信号检测能力，但目前采用的常规电路，在噪声抑制方面的标准还不够。因此需要通过研发高精度的信号采集电路、低噪声放大电路以及自适应抗干扰系统，保障深层石油勘探工作的顺利推进。

（二）突破核心技术进口依赖的瓶颈

现阶段国内高端井下测控仪器的主要电路、配套元器件等主要依赖进口的状态，其中美国 TI、ADI 等国际厂商在相关市场中有着主导地位。进口的电路产品不仅采购成本偏高，还存在供货周期久、技术封锁、售后响应不及时等一系列问题，严重阻碍了国内石油勘探装备的自主化发展步伐，也对相关产业安全造成了影响。以超高温（200℃以上）专用处理器、高精度 ADC 这类关键芯片为例，长期以来都被国外企业垄断，国内企业很难获取到对应的关键技术参数。积极开展自主研发工作，能够突破国外核心技术依赖进口的问题，进而实现相关电路及元器件实现国产替代，有效降低对进口产品的依赖程度。同时还可以借助技术创新优化产品的成本结构，进而提升国内石油装备企业的市场竞争力。

（三）提升极端工况下仪器运行可靠性

井下的极端环境，是影响测控仪器稳定运行的关键因素。目前不管是进口的还是国产的常规电路，在长期极端工况下都容易出现元器件失效、电路断路这类故障，进而导致仪器停机。这不仅会拖慢钻井进度，还可能引发仪器损坏、井眼卡钻等后续问题。根据相关统计，国内钻井作业中，大概有 35% 的测控仪器故障都和电路系统失效有关，其中高温造成的电容老化、振动带来的焊点脱落，是引发故障的主要原因^[2]。通过针对性的研发工作，选用耐高温的元器件（比如 SiC 基芯片）、加强电路的防震封装设计、优化电路的拓扑结构，能够明显提升电路系统的环境适应能力。研发能够适配极端工作环境的电路系统，能有效降低仪器发生故障的几率，提升钻井作业的安全性。

（四）适配智能钻井技术发展的需求

智能钻井是石油勘探领域发展的方向，其关键在于将钻井过程中的实时测控数据以及智能算法进行有效结合，进而能够实现钻井作业决策的自动化决策、调控的精准化。目前常用的常规电路多数据采用较为单一参数采集方式，相关的数据处理能力非常有限，无法贴合智能钻井在实时性、集成化方面的切实需求。因此研发集成多通道同步采集电路、边缘计算处理单元以及高速传输接口的智能电路系统是非常必要的。能够有效实现地层参数与

工程参数进行同步采集，还能在本地完成实时数据分析，进而有效缩短数据传输延迟，为智能钻井的决策提供更加快速的数据支持。除此之外，该智能电路系统还搭载了自诊断功能，能实时监控自身运行状态，帮助提升仪器的智能化运维效率，助力石油勘探钻井行业逐步向自动化、智能化转型。

三、井下测控仪器电路研发的关键技术方向

（一）超高温电路设计与元器件选型

提升超高温环境下的适应能力是井下测控仪器电路研发无法绕开的难关，应将高温电路设计技术作为主要突破方向，通过选用耐高温材料搭配特殊工艺来提升电路的热稳定性。在进行元器件选型时优先选用高温等级不低于 200℃ 的专用器件，比如碳化硅（SiC）基功率器件、高温石英晶振、陶瓷电容等，规避使用民用级、工业级的常规元器件。与此同时还要积极优化电路拓扑结构，尽力减少对温度敏感的元件用量，可以采用分布式布局的形式来降低局部区域的热量聚集问题。另外还需要结合高温老化试验、温度循环试验等加速测试手段，验证电路在不同温度梯度下的性能表现，在此基础上建立电路的高温失效模型，为后续进行的电路优化设计提供有力的数据支撑。

（二）低噪声与抗干扰电路设计

井下环境存在强电磁干扰，很容易让电路信号出现失真，进而影响测控数据的精度，所以低噪声设计和抗干扰能力提升，是井下测控仪器电路研发的关键方向。在信号采集这一环节中，需要有针对性的做好抗干扰处理：使用屏蔽线传输信号，同时设计差分放大电路和多级滤波电路，能够有效降低共模干扰和电磁辐射带来的干扰。在进行电源电路设计方面，需要强化开关电源的输入输出滤波，搭配使用 EMI 滤波器，以此减少电源噪声对信号电路的产生干扰。此外还要精准设定每个振荡器的频率参数，避开同频干扰的问题；对于大功率振荡器要进行严格控制阻尼比，从根源上降低斜波干扰的发生率。关键电路模块需要用金属屏蔽罩实现单独屏蔽，进而形成完整的电磁防护体系。

（三）低功耗电路优化与电源管理

井下仪器的供电大多靠内置电池或者电缆，而电源容量本身有限，所以低功耗设计直接关系到仪器工作时间的长短，是延长续航的关键所在。在进行电路研发的过程中需要针对性采用低功耗策略：一方面要优先选低功耗的元器件和芯片，另一方面要优化电路工作的方法，设计采集、处理、传输的工作机制，在非工作时段能够减少电路功耗，减少能量消耗。在电源管理电路方面，需要具备高效稳压、过流保护、低静态功耗等主要功能，搭配使用高效 DC-DC 转换器来提高电源转换效率，实现降低能量损耗。另外，结合高温环境会让电池性能下降因素，可以集成电池状态对电路进行监测，将剩余电量实时反馈，能够为地面工作人员提供更换或充电的预警信号。通过以上的低功耗优化，能够将电路系统的功耗控制在毫瓦级，延长井下仪器的持续工作时间的同时还能减少电源更换的次数，有效提升整个钻井作业的效率。

四、井下测控仪器电路的应用路径

(一) 定向井与水平井随钻测控应用

定向井和水平井钻井技术是提高油气采收率的重要技术手段，其钻井方式对于随钻测控的实时性和准确性有非常高的要求。井下测控仪器的电路在这类场景中如何能有效发挥作用，重点在于保证钻井轨迹的控制精度以及地层参数的实时反馈能力。实际应用时，将之前研发的高精度采集电路和抗干扰传输电路集成到随钻测井（LWD）仪器里，就能同步采集井斜、方位、工具面角这类工程参数，以及地层电阻率、伽马值这类地质参数。这些实时数据会通过泥浆脉冲传输电路传到地面，地面系统再根据数据调整钻井轨迹，确保钻头能精准钻进储层里的高产区域。考虑水平井钻进距离较长的特点，可以采用低功耗的电路设计，在延长仪器工作时间基础上避免中途起钻更换电源，有效缩短钻井工期。例如在进行页岩气水平井勘探的过程中，可以搭载自主研发电路的随钻测控仪器，能实现毫米级的轨迹控制，增大储层的接触面积、提高油气产量。在投入应用前需要根据钻井深度和地质条件，提前对电路做温度、压力方面的适应性调试，确保能够在复杂的井下工况下能稳定运行。

(二) 深层超深层钻井安全监测应用

深层和超深层钻井作业，要面对高温、高压、井壁不稳定等多重风险，井下测控仪器的电路系统，得重点支撑安全监测功能的落地，这样才能为钻井事故的提前预警提供可靠的数据依据。在进行实际应用的过程中，可以将高耐温、高耐压的电路集成纳入井筒监测仪器中，能够有效实时采集井内压力、温度、井径以及井壁位移等关键的参数，随后通过有较高可靠性的数据传输电路，将监测数据实时的回传给地面系统。地面相关的技术人员可以根据这些实时反馈的数据进行风险研判，能够及时发出井壁坍塌、井漏、超压等危险预警。同时电路本身需要具备自诊断功能，能够进行实时监测自身的运行状态，有效避免因为电路故障致使整个监测工作中断。在进行深层超深层钻井的实际应用过程中，自主研发的超高温电路，能够在 200℃ 以上的环境里进行稳定工作，其压力监测精度甚至可以达到 0.1MPa，不仅能够有效、精准的捕捉地层压力的异常变化，还能提前 3 至 5 小时发出预警，有效降低钻井事故的发生概率。在投入使用前，还需要对电路做极限环境的模拟测试，确保它在高温高压叠加的极端工况下，依旧能稳定运行。

(三) 非常规油气藏勘探测控应用

非常规油气藏（像页岩气、煤层气这类）有着储层致密、渗透率低、分布不均匀的特点，这就对测控仪器的精细化、多参数测量能力提出了更高要求，井下测控仪器的电路系统也得跟着适

配，满足多参数同步采集和精准分析的实际需求^[3]。具体应用时，要将多通道集成采集电路、高速数据处理电路整合到非常规油气藏的测控仪器中，能够同步、精准地测量储层孔隙度、渗透率、含油气饱和度、地层压力等关键参数。同时可以借助边缘计算电路，在井下对这些多参数数据进行融合分析，有效提升储层评价结果的准确性。结合非常规油气藏钻井过程中振动强烈的环境特点，在电路设计部分采用了模块化防震，用来增强整体的抗震性能。例如在煤层气勘探作业中，应用自主研发电路的测控仪器，能够实现煤层厚度、含气性、渗透率等关键指标的同时采集，其数据处理效率有效提升，为后续压裂施工参数的优化调整提供了有力的数据支撑。在投入应用前还需要结合非常规油气藏自身的地质特点，对电路的参数采集范围、测量精度做针对性校准，确保采集到的测量数据和储层的实际情况保持一致。

(四) 智能钻井自动化控制应用

在智能钻井的自动化控制场景里，井下测控仪器的电路得扛起数据采集、实时处理和指令执行的核心担子，关键是要能和地面控制系统高效配合、协同工作。在实际应用的过程中，将集成边缘计算功能的电路系统用到智能测控终端上，一方面进行实时采集钻井工程参数、地层参数，另一方面通过本地数据处理完成特征进行提取和异常识别，这样能够有效减少数据传输的延迟，加快决策响应的速度。同时电路一定要具备安全加密功能，保证数据传输和指令执行的安全性，还能在一定程度上避免出现数据泄露以及指令误执行的问题。在智能钻井平台的具体应用时，自主研发的这套电路系统能够有效实现钻井参数的实时优化、调整，能够让钻井效率提升 20% 以上，并将人力成本降低 30%。在应用过程中，需要建立电路与地面系统、执行机构之间的协同调试机制，这样能够保证数据交互顺畅、指令执行的精准；同时还应加强对电路系统的实时监控以及日常维护，这样才能保障智能钻井过程的连续性和稳定性。

五、结束语

针对井下测控仪器电路的研发与实际应用，能够有效提升石油勘探精度、保障钻井作业安全，推动行业向智能化转型。目前在这一领域的研发虽然取得了一定成绩，但在超高温核心芯片这类关键领域方面与国际先进水平之间还存在差距。未来需强化产学研协同创新的力度，集中力量攻克核心技术的难关，优化完善国产化产业链条；推动电路技术与智能算法的有效融合，为石油勘探行业的高质量发展提供扎实的技术保障，也能够为国家能源安全建设增加力量。

参考文献

- [1] 王雨, 陈文, 梁小兵, 等. FITS-D 高温过钻具数字声波测井仪电路设计与应用 [J]. 2025.
- [2] 陈岩. 对井筒震电测井采集控制和传输电路的研究 [J]. 石化技术, 2021, 28(6):2.
- [3] 耿战峰, 张化庆, 刘金平, 等. 石油测试仪器的电流检测系统 [J]. 化学工程与装备, 2021(5):213-214.