

测井绞车深度系统误差来源分析与现场校正方法研究

张华瑶

中油测井大庆分公司 川渝项目部

DOI:10.32629/jpm.v7i6.8942

[摘要] 本文旨在全面剖析测井绞车深度系统误差来源，并探索切实可行的现场校正方法，以提升测井深度数据的精确性，为石油勘探开发提供更为可靠的数据支撑。在研究过程中，综合运用理论分析、实验测试以及实际案例分析等方法，对测井绞车深度系统误差来源展开深入分析。研究发现，主要误差来源包括机械结构因素，如绞车滚筒磨损与电缆拉伸；环境因素，如温度变化与井眼条件；以及操作因素，如操作不当与参数设置不合理。基于此，提出了基于标准井段的校正方法以及实时监测与补偿校正方法。通过现场应用案例验证，这两种校正方法能够有效提高测井深度数据的准确性，对提升测井工作质量与效率具有重要意义。

[关键词] 测井绞车；深度系统；误差来源；现场校正方法

Analysis of Systematic Error Sources and Field Calibration Methods for Logging Winch Depth Systems

Zhang Huayao

Chuan-Yu Project Department, Daqing Branch of China Oil Logging Company

[Abstract] This study comprehensively examines the sources of systematic errors in logging winch depth measurements and explores practical field calibration methods to enhance the accuracy of logging data, thereby providing more reliable support for petroleum exploration and development. Through integrated application of theoretical analysis, experimental testing, and case studies, the research thoroughly investigates the primary error contributors: mechanical structural factors (e.g., winch drum wear and cable tension), environmental conditions (e.g., temperature variations and wellbore characteristics), and operational factors (e.g., improper operation procedures or inappropriate parameter settings). Based on these findings, the study proposes two calibration approaches: one based on standard well sections and another combining real-time monitoring with compensation adjustments. Field validation demonstrates that both methods significantly improve the accuracy of logging depth data, substantially enhancing the quality and efficiency of logging operations.

[Key words] logging winch; depth system; source of error; field calibration method

引言

测井绞车作为石油勘探开发中不可或缺的关键设备，其性能直接影响测井数据的采集质量与后续工程决策的科学性。在测井作业中，深度数据的准确性是确保测井资料解释可靠性的基础，同时也是评价油气藏特性、优化开发方案的重要依据。尽管测井技术在油气资源开发中发挥了重要作用，然而，随着油气资源勘探向深部地层和复杂地质条件推进，传统测井绞车深度系统在精度与稳定性方面面临严峻挑战。测井绞车深度系统在实际应用中仍存在诸多问题，尤其是深度误差对测井工作质量和效率的负面影响不容忽视。误差来源主要包括机械结构因素等，这些因素可能导致测井深度数据的偏差，进而影响射孔精度、产能评估及油气藏评价的准确性。此外，

误差的存在还可能增加测井作业的时间和成本，降低整体工作效率。因此，深入研究测井绞车深度系统的误差来源，并提出有效的校正方法，对于提升测井数据质量和工程决策的科学性具有重要意义。

1. 测井绞车深度系统误差来源分析

1.1 机械结构因素导致的误差

1.1.1 绞车滚筒磨损

绞车滚筒在长期作业过程中，由于电缆反复缠绕与摩擦，不可避免地会出现磨损现象。这种磨损会导致滚筒直径发生变化，影响深度编码器计数精度。研究表明，滚筒直径的微小变化会直接导致深度测量值与实际值之间偏差，且这种偏差随时间的累积效应显著。此外，滚筒表面不均匀磨损还会引起电缆

在缠绕过程中的摆动或滑动，进一步加剧深度测量误差。研究表明，当滚筒磨损量达到一定程度时，深度误差可高达数米，严重影响了测井资料的解释精度。

1.1.2 电缆拉伸

电缆在测井过程中主要受到张力、温度变化以及外部压力等多种因素的影响，这些因素共同作用导致电缆发生弹性或塑性变形。例如，在高张力条件下，电缆的伸长率显著增加，从而导致深度测量值偏小；而在低温环境中，电缆的刚度增加，其抗拉伸能力增强，但同时也可能因热胀冷缩效应引入额外的误差。研究表明，电缆拉伸量与深度误差之间存在非线性关系，且这种关系受到电缆材料特性及外部环境的共同制约。通过实验测定，电缆每伸长1%，可能引起深度测量误差约为0.5%至1%，这一结果强调在测井作业中对电缆拉伸进行补偿的重要性。

1.2 环境因素导致的误差

1.2.1 温度变化

一方面，电缆在井下环境中因温度变化而发生热胀冷缩现象，这种现象会导致电缆长度发生变化，从而影响深度测量精度。另一方面，电子设备在极端温度条件下的性能漂移也会对深度测量结果产生不利影响。例如，深度编码器及传感器在高温或低温环境下的输出信号可能存在一定程度的偏差，这种偏差会直接反映在深度测量数据中。通过理论分析与实验数据验证，温度每变化10℃，电缆长度的变化率约为0.0001至0.0003，对应的深度误差可达数厘米至数米不等。此外，温度变化还会影响测井绞车机械部件的运转效率，如滚筒与电缆之间的摩擦力变化，进一步加剧深度测量误差。

1.2.2 井眼条件

在井斜较大井段，电缆由于重力作用易发生偏移，导致深度测量值偏离实际值；而在井径变化频繁的井段，电缆与井壁之间的摩擦力变化会进一步加剧深度误差。此外，井内流体的性质，如密度、粘度等，也会对电缆运动状态产生影响，从而间接影响深度测量精度。研究表明，复杂井眼条件下，深度误差可能高达数米甚至更多，这对测井资料的解释及后续工程决策造成严重影响。

1.3 操作因素导致的误差

1.3.1 操作不当

在实际作业中，因操作人员不规范操作引起的深度测量误差较为常见。例如，起下速度控制不当会导致电缆在井内发生剧烈振动或滑动，从而影响深度编码器的计数精度；仪器下放位置不准确则可能导致深度测量值与实际值之间存在系统性偏差。此外，操作人员在数据采集过程中未能严格按照操作规程执行，也可能引入人为误差。例如，未及时调整深度校正参数或忽视环境因素的影响，均会进一步加剧深度测量误差。研究表明，规范操作可显著降低此类误差的发生率，从而提高测井数据的质量与可靠性。

1.3.2 参数设置不合理

测量精度参数、补偿参数等的设置不当会直接影响深度数据的准确性。实际作业中，若未根据具体井况合理调整这些参数，可能导致深度测量值与实际值之间存在较大偏差。研究表明，参数设置不当可能引起的深度误差可高达数米，特别是在复杂井况下，这种误差的影响更为显著。此外，不同测井设备之间的参数兼容性问题也可能导致深度测量误差的累积。通过

实例分析发现，采用基于大数据分析的参数优化方法，可有效减少因参数设置不合理引起的误差，从而提高深度测量精度。

2. 现场校正方法研究

2.1 基于标准井段的校正方法

2.1.1 标准井段的选择与建立

标准井段作为测井深度校正的基础，其选择与建立需遵循严格的原则以确保校正结果的可靠性。首先，标准井段应选择在地层结构稳定、地层特征清晰且不受外界干扰的区域，以确保其深度基准的准确性。其次，标准井段的长度应根据测井绞车的工作范围及深度测量精度要求确定，通常建议选择不少于100米的连续井段作为标准井段。此外，标准井段的建立还需结合相关行业规范，明确标定深度参考点的位置及误差范围。

标准井段在深度校正中的作用主要体现在两个方面：一是为测井深度数据提供绝对参考，二是通过多次测量验证深度系统的稳定性。研究表明，在复杂井况下，标准井段应用能够显著降低因环境因素或设备老化引起的深度误差，其校正效果已在实际应用中得到广泛验证。

2.1.2 校正流程与数据处理

主要包括数据采集、对比分析、误差计算与校正四个关键步骤。在数据采集阶段，需利用高精度的测井仪器在标准井段内获取深度数据，并将其与标准井段的已知深度值进行记录。此过程中，应确保数据采集设备的稳定性和采样频率的一致性，以避免额外误差的引入。随后，在对比分析阶段，将采集到的深度数据与标准井段的参考深度值进行逐点对比，绘制深度误差曲线以直观反映深度偏差的变化趋势。

在误差计算阶段，采用最小二乘法对深度误差曲线进行拟合，得出深度误差的数学表达式。具体而言，假设测井深度为 D_m ，标准井段深度为 D_s ，则深度误差 ΔD 可表示为：

$$\Delta D = D_m - D_s$$

通过对多组数据点的误差计算，可进一步求得平均深度误差 $\bar{\Delta D}$ 及标准差 $\sigma_{\Delta D}$ ，以评估深度误差的分布特性。最后，在校正阶段，利用误差计算结果对测井深度数据进行修正。修正公式为：

$$D_{corrected} = D_m - \bar{\Delta D}$$

其中， $D_{corrected}$ 为校正后的测井深度值。通过上述数据处理流程，可有效消除系统误差，提高测井深度数据的准确性。实际应用表明，该方法在不同井况下均表现出良好的适用性与可靠性。

2.2 实时监测与补偿校正方法

2.2.1 实时监测技术

在传感器技术方面，主要采用编码器、张力传感器及温度传感器等多种设备对关键参数进行实时监测。此外，数据采集系统作为实时监测技术的核心组件，负责将各类传感器采集到的数据进行整合与传输，确保监测数据的实时性与完整性。实时监测数据的获取方式通常采用分布式架构，如现代测井绞车普遍配备的工业以太网技术能够实现高速数据传输，确保监测数据的时效性与可靠性。同时，为应对复杂井况下的信号干扰问题，部分系统还引入冗余设计，通过多通道数据传输提高系统的抗干扰能力。这些技术手段的结合，为实时监测与补偿校正提供了坚实的技术保障。

2.2.2 补偿校正模型

基于实时监测数据，可以构建补偿校正模型以实现

绞车深度系统误差的动态校正。该模型主要包括三个核心参数: 电缆拉伸补偿系数 K_s 、温度漂移补偿系数 K_T 以及井眼条件校正因子 K_H 。其中, 电缆拉伸补偿系数 K_s 用于描述电缆在张力作用下的伸长量对深度测量的影响, 其计算公式为:

$$K_s = \frac{\Delta L}{L_0} \times \frac{1}{T}$$

其中, ΔL 为电缆伸长量, L_0 为电缆初始长度, T 为电缆张力。

温度漂移补偿系数 K_T 则用于校正因环境温度变化引起深度误差, 其表达式为: $K_T = \alpha \times \Delta T$

其中, α 为电缆热膨胀系数, ΔT 为温度变化量。井眼条件校正因子 K_H 则综合考虑井斜、井径变化及井内流体性质对深度测量的影响, 其具体取值可通过实验或数值模拟确定。

通过实例验证, 该补偿校正模型在不同井况下均表现出较高的准确性与适用性。如在某口斜井的测井作业中, 应用该模型后深度误差从校正前的 $\pm 0.5\%$ 降低至 $\pm 0.1\%$, 显著提升了测井数据的质量。此外, 模型还具备较强的适应性, 能够根据实时监测数据动态调整补偿参数, 从而在不同工况下保持较高的校正精度。

3. 现场应用案例分析

3.1 井况介绍

该案例选取井设计井深为 3500 米, 实际完钻井深为 3487 米, 最大井斜角为 23° , 平均井径变化范围为 215 毫米至 245 毫米。该井的地层结构复杂, 主要包括泥岩、砂岩和页岩互层, 其中页岩层厚度较大且分布不均。在测井过程中, 由于井眼条件较差, 钻井液性能不稳定, 导致测井仪器在部分井段出现卡钻现象, 严重影响测井作业的连续性和数据质量。此外, 该井所处区域地层压力系数较高, 井底温度达到 120°C , 进一步增加测井深度系统误差的风险。这些复杂的井况条件对测井绞车深度系统的精度提出了严峻挑战, 尤其是在高温、高压及井斜较大的井段, 深度测量误差显著增加。

3.2 误差来源分析

首先, 机械结构因素导致的误差主要表现为绞车滚筒磨损和电缆拉伸。由于该井井深较大, 绞车滚筒在长时间运行后表面出现明显磨损, 导致电缆缠绕不均匀, 进而引发深度测量误差。实验数据显示, 井深超过 3000 米井段, 滚筒磨损引起的深度误差可达 ± 0.5 米。此外, 电缆在井下受到张力和温度变化的影响, 发生显著拉伸变形。根据相关研究, 电缆拉伸量与张力呈线性关系, 而在高温环境下, 拉伸量进一步增大, 最终导致深度测量误差累积至 ± 1.2 米。

其次, 环境因素对深度测量精度的影响同样不可忽视。该井井底温度较高, 导致电缆热胀冷缩现象明显, 进而影响深度信号的传输精度。理论分析表明, 温度每变化 10°C , 电缆长度变化约 0.1% , 在 120°C 的高温环境下, 深度误差可达 ± 0.8 米。同时, 井眼条件复杂, 如井斜和井径变化较大, 导致测井仪器在井下的运动轨迹不规则, 进一步加剧深度测量误差。特别是在井斜角大于 20° 的井段, 深度误差显著增加至 ± 1.5 米。

最后, 操作因素也对深度测量产生了一定影响。由于该井测井作业时间较长, 操作人员疲劳导致起下速度控制不当, 仪

器下放位置不准确, 进而引发深度误差。此外, 测井绞车深度系统的参数设置不合理, 如未根据实际井况调整补偿参数, 也导致深度测量误差的累积。

3.3 校正方法应用与效果

针对上述误差来源, 现场采用基于标准井段的校正方法和实时监测与补偿校正方法相结合的方案。首先, 在选择标准井段时, 选取井深 1000 米至 1500 米之间的稳定地层作为参考井段, 该井段地层均匀、井眼条件良好, 且不受高温高压影响。通过在该井段进行多次数据采集和对比分析, 建立深度校正模型, 并利用最小二乘法计算误差修正系数。校正后的数据显示, 在标准井段内, 深度测量误差从 ± 1.2 米降低至 ± 0.2 米, 校正效果显著。

其次, 在实时监测与补偿校正方面, 引入高精度传感器和数据采集系统, 实时监测绞车滚筒的转速、电缆张力及井底温度等关键参数。基于实时监测数据, 建立了动态补偿校正模型, 通过调整深度测量参数有效减少了误差累积。例如, 在高温井段, 通过温度补偿算法将深度误差从 ± 0.8 米降低至 ± 0.3 米; 在井斜较大的井段, 通过引入井斜校正因子, 将深度误差从 ± 1.5 米降低至 ± 0.5 米。校正后的测井曲线与地质编录结果高度吻合, 验证了校正方法的有效性。通过综合运用多种校正方法, 该井的深度测量精度得到了显著提升, 为后续测井资料解释和地质评价提供了可靠的数据支持。

4. 结论与认识

(1) 本文全面分析了测井绞车深度系统的误差来源, 并将其归纳为机械结构因素、环境因素和操作因素三大类; 基于上述误差来源分析, 提出了两种切实可行的现场校正方法, 这两种方法在实际应用中表现出良好的有效性与适用性, 特别是在复杂井况下显著提升了测井深度数据的准确性。

(2) 测井绞车深度系统误差来源分析与现场校正方法研究为石油勘探开发提供了更为可靠的测井深度数据支持, 对提升测井资料解释精度及后续工程决策的科学性具有重要意义。

(3) 随着人工智能、大数据等新兴技术快速发展, 其在测井绞车深度校正中的应用前景广阔; 新型材料与智能传感技术的应用也可能为测井绞车深度系统的设计与校正带来革命性突破。因此, 建议未来研究重点关注这些前沿技术在测井领域的应用潜力, 以推动测井绞车深度校正技术的持续进步与发展。

[参考文献]

- [1]汪清浩;胡鹏;王家跃.测井技术在矿产勘查中的应用及校正方法研究[J].世界有色金属,2024,(7):181-183.
- [2]钱志军.测井数据深度校正方法探析[J].石化技术,2023,30(12):53-55.
- [3]张鹏.无电缆测井深度测量方法改进与应用[J].石化技术,2022,29(3):126-127.
- [4]许磊;刘晓斌.电缆测井智能深度监测系统设计与[J].石油管材与仪器,2023,9(2):22-24.
- [5]曹敬春;樊玉芳;毕世锋;张红霞.测井深度误差原因及自动化校正方法研究[J].国外测井技术,2014,(3):54-55.
- [6]郝郁娜.分析测井深度误差原因及自动化校正方法[J].中小企业管理与科技,2015,(25):106-106.