修井车称重系统校准装置结构设计

□行和平　王喜阳　刘文佳　肖福礼　王娜　陈杰

陕西省计量科学研究院

【摘　要】修井车广泛应用于我国油井开采领域之中，修井车吊头一端与油杆相连接，修井车自身具备称重系统，该称重系统可以对油杆的重量进行测量。修井车称重系统测量油杆的实际重量是否准确对油井安全作业十分重要，如何确保修井车上的传感器能够准确测量出钻头的实际重量，就需要对修井车上的传感器进行校准。针对上述问题，提出一种油井修井车称重系统校准装置，能够高效地对修井车称重系统进行校准。

【关键词】修井车称重系统；校准

文献标识码：A　　**文章编号：**1003-1870（2026）05-0005-04

Structural Design of Calibration Device for Workover Rig Weighing System

【Abstract】Workover rigs are widely used in the field of oil well exploitation in China. One end of the workover rig lifting head is connected with the sucker rod, and the workover rig itself is equipped with a weighing system that can measure the weight of the sucker rod. The accuracy of the workover rig weighing system in measuring the actual weight of the sucker rod is crucial for the safe operation of oil wells. To ensure that the sensors on the workover rig can accurately measure the actual weight of the drill bit, it is necessary to calibrate the sensors on the workover rig. Aiming at the above problems, a calibration device for the workover rig weighing system is proposed, which can efficiently calibrate the workover rig weighing system.

【Keywords】Workover rig weighing system; calibration

引言

目前，在我国石油工业的油井打井、修井工艺中，油杆在工作过程中的实际重量测量准确与否是关乎到安全作业的关键因素之一。根据油井深度的不同，所使用的油杆往往从几十节到上百节不等，由于起吊油杆数量较多，修井机工作载荷一般在（30~80）t区间内，修井机自身称重系统上的传感器，可以测量钢索所承受的质量值，并将其显示在车载仪表上，该传感器测量出的钢索所承受载荷值是否准确，对油井安全作业十分重要。经调研可知，处于常年“失检”状态的修井机与未知重量的油杆在配合作业时突发事故，造成人员伤亡与高昂的经济损失的案例时有发生，因此需要对油杆的实际自重进行准确测量，以避免安全事故的发生。根据调研可知，目前该领域只有通过大质量砝码对修井车上的称量系统进行标定，但此方法存在弊端：①效率低下且存在危险，难以满足实际情况下数量庞大的修井车测力传感器系统的逐一标定，即使在标定过程中，也需要起吊最少30t的砝码，存在作业危险性。②人工成本、时间成本、运输成本高，在对修井车标准称重传感器系统起吊最少30t的砝码，需要的工作人员数量较多，工作准备时间长，大吨位砝码长途运输成本高，对检测机构造成的作业成本高昂。综上所述，现有利用砝码净重法标定油井钻头修井车称重系统的方法是低效危险的，因此亟需研制一种高效、安全且运输成本低的油井修井车称重系统的标定装置，这对石油工业安全作业领域具有十分重要的意义。

在国内相关研究中，文献[1]与文献[2]提出的修井车车架强度分析是对修井车车架在不同路况、环境工况下进行了有限元分析，并未涉及修井车称重系统的校准；文献[3]提出的提高修井效率方法，只是进行了可行性探讨；文献[4]定量地分析了井架的振动模式，分别研究井架在静风载荷与脉动风载作用下的应力响应特性，并无涉及修井车称量系统的校准；文献[5]设计了一种新型修井车自动吊卡，并对吊卡关键部位进行了强度分析。综上所述，国内目前对修井车的研究大多为其受载特性的仿真分析，对修井车称重系统标定装置的研究较少。因此，设计一种修井车称量系统校准装置，能够保障油井安全作业，高效生产，同时提升计量监管效能，具有重要实践价值。

1　装置机械设计部分

本文所设计的修井车校准装置机械分为三个部分：①底座；②工装；③标准传感器。底座部分采用槽钢焊接而成，具备较高的机械结构抗压强度；工装部分采用筋板与钢板加工而成，分为上工装部分与下工装部分，这两部分工装连接处开有长条工艺孔，可根据现场具体情况对两者相对位置进行调整；底座部分与下工装部分通过焊接实现固定连接；工装部分采用筋板阵列排布焊接，提高了工装部分整体抗拉强度。标准传感器通过吊环与上工装部分的拉头部分通过销轴进行连接。修井车传感器位置如图1所示，修井车校准装置机械结构外形如图2所示，修井车校准装置机械结构俯视如图3所示。

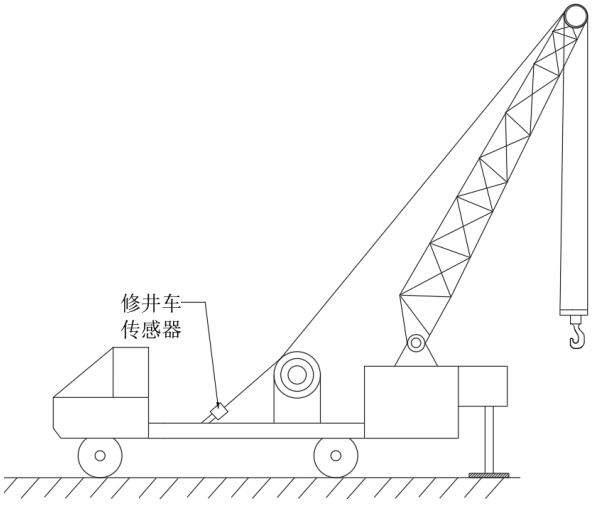


图1　修井车校准装置机械结构主视示意图

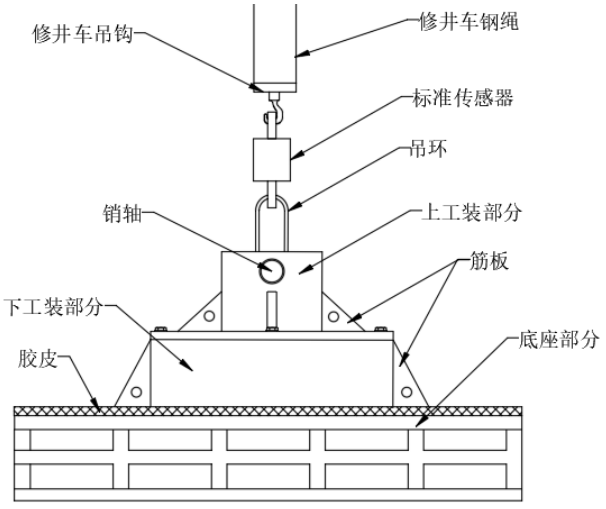


图2　修井车校准装置机械结构外形示意图

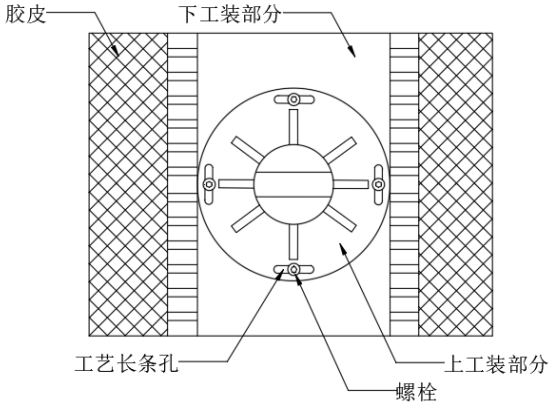


图3　修井车校准装置机械结构俯视示意图

2　工作原理

本研究所设计的修井车校准装置需两辆修井车配合完成校准工作。修井车的车体末端都配置有液压支撑面，修井车日常工作时该液压支撑面与地面接触，为修井车提供工作支点。现将两辆修井车的液压支撑面放置在校准装置两端的胶皮面上，此处采用胶皮面，是为了避免金属面在大载荷的作用下直接接触，防止金属面之间产生磨损。其工作原理如图4 所示。

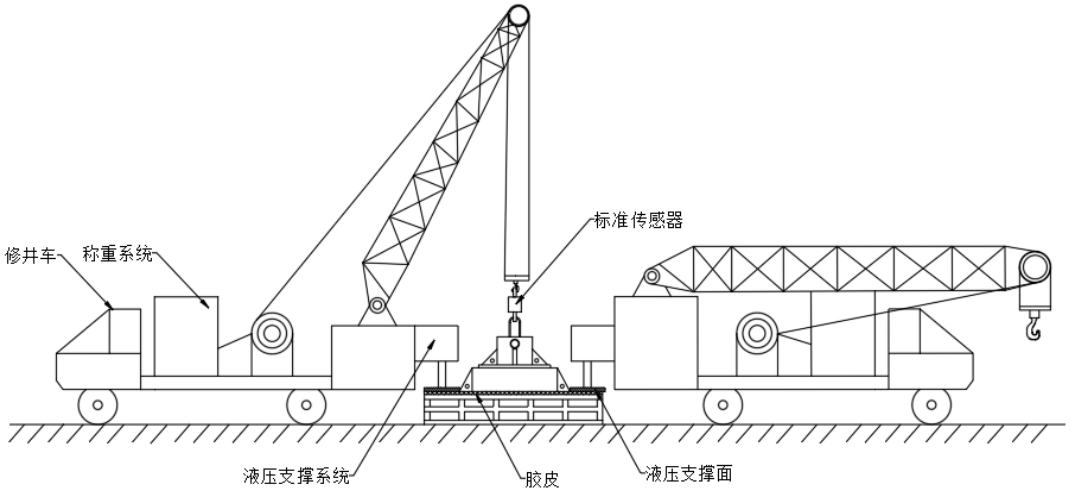


图4　修井车校准装置工作原理示意图

由图4 可知，两辆修井车的液压支撑面压住校准装置的两端，使其稳定固定在地面上，然后将待检修井车的井架升起，将其吊钩与标准传感器相连接，再通过吊环连接标准传感器及校准装置，待校修井车提升吊钩，标准传感器受载后，由其独立数显仪表输出标准载荷示值，待校修井车称重系统则通过车载仪表输出被测载荷示值，二者显示终端相互独立、数据采集链路完全分离。校准人员依托标准传感器的标准示值与修井车车载称重仪表示值进行比对修正，进而完成修井车称重系统的校准工作。

3　机械结构力学模型分析计算及装置不确定度分析

针对 30~80t 拉伸载荷的受力需求，为装置各核心部件建立力学模型，开展强度与刚度校核。

3.1　力学模型

载荷形式：轴向拉伸载荷，最大载荷

$$F_{max}=80\ t=8\times10^{5}\ \mathrm{N}$$

材料属性：核心结构采用Q235 钢材，屈服强度 σ_s=235 MPa，弹性模量 $E=2.06\times10^{5}$ MPa，安全系数取n=1.5，许用应力 $[\sigma]=\sigma_s/n\approx156.7$ MPa。

3.2　各部件力学分析与计算

（1）底座部分（槽钢焊接结构）：简化为简支梁受均布载荷，取底座跨距L=2 m，采用4 根10# 槽钢并行焊接。单根10# 槽钢参数：截面模量W=39.7 cm^3，惯性矩I=198.3 cm^4

总截面模量：

$$W_{总}=4\times39.7\times10^{-6}\ \mathrm{m}^3=1.588\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3$$

总惯性矩：

$$I_{总}=4\times198.3\times10^{-8}\ \mathrm{m}^4=7.932\times10^{-6}\ \mathrm{m}^4$$

强度校核：

$$M_{max}=(F_{max}\times L)/8=(8\times10^{5}\times2)/8=2\times10^{5}\ \mathrm{Nm}$$

$$\sigma=M_{max}/W_{总}=(2\times10^{5})/(1.588\times10^{-4})\approx12.6\ \mathrm{MPa}$$

结论：$\sigma<[\sigma]$，强度满足要求。

刚度校核：底座结构简化为简支梁受均布载荷模型，假设总载荷F_{max} 均匀分布在底座跨距L 上，均布载荷集度$q=F_{max}/L$。根据材料力学中简支梁受均布载荷的最大挠度经典公式。

$$\delta=\frac{5qL^4}{384EI}\qquad(1)$$

将$q=F_{max}/L$ 带入至公式（1）中，有：

$$\delta=\frac{5qL^4}{384EI}=\frac{5F_{max}L^3}{384EI}=\frac{5\times8\times10^5\times2^3}{384\times2.06\times10^{11}\times7.932\times10^{-6}}\approx0.025\text{mm}$$

故其挠度0.025mm远小于跨距的1/1000（2mm），刚度满足要求。

（2）工装部分受力模型：上工装承受轴向拉力，简化为轴向受拉杆件；下工装承受压应力，简化为轴向受压杆件。

强度校核：工装核心受力板厚度取t=50 mm，宽度b=300 mm，截面面积A=t × b=0.05 × 0.3=0.015 m^2 拉伸应力$\sigma=F_{max}$/A=8 × 10^5/0.015 ≈53.3 MPa 小于许用应力156.7 MPa，强度满足要求。

刚度校核：工装高度H=1m，轴向变形ΔL=（$F_{max}\times H$）/（$E\times A$）=（8 × 10^5 × 1）/（2.06 × 10^{11} × 0.015）≈0.026 mm 变形量极小，刚度满足要求。

（3）连接件（销轴、螺栓）受力模型：销轴承受剪切力，螺栓承受拉伸力。

强度校核：销轴直径取d=70mm，剪切面面积$A_{剪}$=（πd^2）/4 ≈3.848 × 10^{-3} m^2。

剪切应力$\tau=F_{max}/A_{剪}$=（8 × 10^5）/（3.848 × 10^{-3}）≈103.97 MPa。Q235钢材许用剪切应力[τ] ≈120 MPa，此时剪切应力τ ≈103.97 MPa ＜[τ]，满足安全要求。

取M42高强度螺栓为连接紧固件，其抗拉强度σ_b ≥800MPa，上、下工装部分取4个M42高强度螺栓为连接件，则每个螺栓所承受的最大载荷为$F=F_{max}$/4=（8 × 10^5）/4=2 × 10^5N，M42螺栓应力截面积标准值为1121mm^2，其抗拉应力$\sigma=F/A$=（2 × 10^5）/1121 ≈178.4MPa ＜σ_b，故M42螺栓作为连接件强度满足要求。

3.3 修井车校准系统准确度等级

校准装置的准确度等级需比被校对象高3个等级，以保证校准结果的可靠性。根据SY/T 7075–2016《石油钻修井指重表校准方法》可知，石油钻修井重量记录仪系统在使用中的最大允许误差为±3.0%FS，本校准装置核心标准传感器可选用0.1级标准拉力传感器，故满足要求。

3.4 校准装置的不确定度分析

校准装置的不确定度分量主要由标准传感器的示值化整误差与重复性误差引起的不确定度分量组成。示值的化整误差区间半宽度为d/2，服从矩形分布，其标准不确定度为：

$$u(d)=d/(2\sqrt{3}) \quad (2)$$

式中：d——标准传感器的分度值，单位为t或kg。

重复性的标准不确定度可用极差法计算：

$$u(I_{rep})=R/C \quad (3)$$

式中：R——极差，单位为t或kg；

C——极差系数。

故校准装置的标准不确定度u_c可表示为：

$$u_c=\sqrt{u^2(d)+u^2(I_{rep})} \quad (4)$$

4 结语

本文所设计的修井车称重系统校准装置结构简单可靠、便于运输、成本低廉、现场组装快速，能够适应油井户外恶劣的工作环境且工作效率较高。检测机构仅需定期对标准传感器进行标定即可，可对修井车称量系统进行满量程校准。该装置的应用将填补修井机称量系统校准能力欠缺的技术空白，对油井安全作业具有十分重要的意义。

参考文献

[1] 安绍敏. 基于多路况的沙漠修井车车架强度分析[J]. 石油矿场机械 2014,(04):45−47.

[2] 李博超. 修井车车架有限元分析及其研究[M]. 沈阳工业大学学报，2010.12.30.

[3] 孙文鹏. 一种提高修井效率方法的探讨[J]. 内蒙古石油化工.2012, (3):39−45 .

[4] 李勇. 油田修井作业多功能井架随机动态响应特性研究[J]. 企业科技与发展, 2022, (09):76−80 .

[5] 金嘉琦. 基于workbench的修井作业车吊卡有限元分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2014, (03):286−290 .

作者简介

行和平（1981—），男，陕西西安人，学士，工程师。研究方向：质量计量检测与研究。