

一种压电式大扭矩测力仪设计与实验研究

任宗金,何小龙,张 军,范宏伟

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:石油钻机扭矩实时测量对保障工作安全和提高经济效益具有重要意义。针对应变式扭矩测力仪使用一段时间后精度降低问题,设计了一种压电式扭矩测力仪。其具有体积小、量程大和稳定性好等优点。首先构建了测力仪的三维模型,论述了测力仪的测量原理;然后推导了电荷放大电路输出电压与输入电荷之间的关系式,设计了高输入阻抗的电荷转换核心电路,使输入阻抗达到 $10^{14} \Omega$,并给出了无线传输电路的具体实施方案;最后对测力仪进行了静态标定,其非线性为 1.17%,重复性为 0.46%。该压电式扭矩测力仪性能指标达到了钻机扭矩实时监控的要求。

关键词:石油钻机;扭矩测力仪;压电传感器;电荷放大

中图分类号:TH823 **文献标识码:**A

Design and Experimental Study on a Piezoelectric High Torque Measuring Instrument

REN Zongjin, HE Xiaolong, ZHANG Jun, FAN Hongwei

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The real-time measurement of oil rig torque is very important to ensure the safety of work and improve the economic efficiency. In order to solve the problem that the accuracy of strain torque dynamometer is reduced after a period of time, a piezoelectric torque dynamometer is designed, which has a small size, large range and good stability, etc. Firstly, the 3D model of dynamometer is established, and the measurement principle of dynamometer is discussed, then the relationship between the output voltage and the input charge of the charge amplifying circuit is deduced, the charge transfer core circuit with high input impedance that reaches to $10^{14} \Omega$ is designed, and the concrete implementation scheme of the wireless transmission circuit is given. At last, the static calibration of dynamometer is carried out, the non-linearity is 1.17% and the repeatability is 0.46%. The performance of the piezoelectric torque dynamometer has reached the requirements of real-time monitoring of drilling torque.

Key words: drilling rig; torque dynamometer; piezoelectric sensor; charge amplification

0 引言

扭矩测力仪是石油钻井平台钻机扭矩实时测量的重要设备,它不仅能延长钻头使用寿命,提高经济效益,而且还能避免事故发生,保障人员安全。目前,钻机扭矩测力仪主要以应变式传感器为核心,但使用一段时间后会精度降低的现象,因此,本文拟设计一种以压电传感器为核心的扭矩测力仪。压电传感器以压电石英晶片为力电转换元件,其频响高,刚度大和灵敏度高等优点适合钻机扭矩动态测量^[1]。针对可旋转压电式扭矩测力仪,国内外都有相关研究。

瑞士 Kistler 公司的 9123、9124、9125 系列压电测力仪可实现多维力的无线测量,测力仪以石英晶片为核心,通过晶片剪切力与分布圆相切的原理对扭矩进行测量,但结构复杂,成本较高。刘玉香^[2]设计了一种可测量六维力的无线压电式测力仪,采用 4 个三向力压电传感器菱形分布的方式,通过力的解耦求解扭矩,但未展示实物及相关性能参数。尚永艳^[3]采用分割电极的方法,设计了一种可测量轴向力、径向力和轴向扭矩的压电式测力仪,并采用轴承作为传输介质,实现电荷信号接触式传输,但环境适应力较差。

收稿日期:2017-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675084,51475078)

作者简介:任宗金(1978-),男,山东青岛人,副教授,博士,主要从事压电测试机理领域的研究。通信作者:何小龙(1989-),男,四川广元人,硕士生,主要从事压电测试机理的研究。

本文将围绕如何设计精度高、成本低和环境适应性好的扭矩测力仪展开研究,重点解决压电传感器电荷信号的采集和处理问题,并给出了扭矩测力仪整个系统框图和具体实施方案。最后,为了检验测力仪输出性能,对其进行了静态标定实验。

1 扭矩测力仪设计

扭矩测力仪测量原理图如图 1 所示。两个压电传感器竖直安装在下槽块内壁两侧,两颗预紧螺栓分别穿过下槽块和压电传感器,旋入上凸块螺纹孔,对压电传感器进行预紧。测力仪通过上、下转接盘分别连接在钻机动力轴和负载传动轴之间,工作时上凸块与下槽块产生相对运动,从而挤压或拉伸传感器产生实时电荷信号。根据力 $\times$ 力臂的原理,只要测得两压电传感器的所受力值,便可求出钻机工作时输出力矩,其公式为

$$T = \pm (F_1 + F_2) \frac{D}{2} \quad (1)$$

式中: T 为所测扭矩; F_1, F_2 分别为压电传感器 1、2 所测力大小; D 为两压电传感器轴向间距。

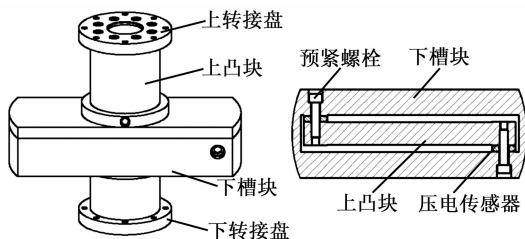


图 1 扭矩测力仪测量原理图

扭矩测力仪系统框图如图 2 所示。发送端由压电传感器、电荷放大电路、无线发送电路和稳压电源 1 构成。由于压电传感器输出的是电荷信号,故在无线发送前必须先经过电荷放大电路进行电荷-电压转换。接收端由无线接收电路和稳压电源 2 构成,完成对接收数据的处理和显示。

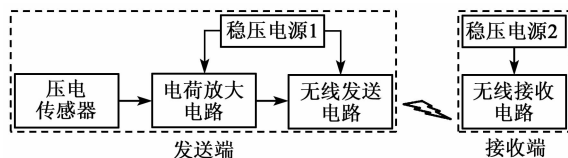


图 2 扭矩测力仪系统框图

1.1 电荷放大电路

扭矩测力仪在体积上有所限制,而现有满足使用要求的通用电荷放大器功能冗杂,体积较大,难以集成到测力仪中。因此,设计一款体积小、性能高的电荷放大电路很有必要,这也是扭矩测力仪设计亟

待解决的关键问题。

压电传感器接入电荷放大电路原理图如图 3 所示。输入电阻 R_i 是压电传感器绝缘漏电阻 R_a 、连接电缆绝缘电阻 R_c 和运算放大器输入电阻 R_d 的并联电阻;输入电容 C_i 是压电传感器等效电容 C_a 、连接电缆分布电容 C_c 和运算放大器输入电容 C_d 的并联电容; R_f 为放大电路反馈电阻, C_f 为放大电路反馈电容。

$$R_i = R_a // R_c // R_d \quad (2)$$

$$C_i = C_a // C_c // C_d \quad (3)$$

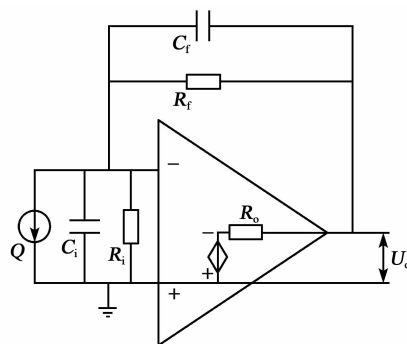


图 3 压电传感器接入电荷放大电路原理图

由密勒效应和模拟电路知识可知,输出电压 $\dot{U}_o$ 为

$$\dot{U}_o = -A \frac{j\omega \dot{Q}}{\left(\frac{1}{R_f} + j\omega C_f\right)(1+A) + \frac{1}{R_i} + j\omega C_i} \quad (4)$$

式中: $\dot{Q}$ 为输入电荷; A 为运算放大器开环放大倍数。

当 A 足够大时, C_i 可以忽略;当 R_f 和 R_i 足够大时, R_f^{-1} 和 R_i^{-1} 亦可忽略。此时,放大器输出电压 U_o 为

$$U_o = -\frac{Q}{C_f} \quad (5)$$

由式(5)可知,输出电压只与 Q, C_f 有关,并成正比关系^[4]。放大电路要求等效输入总阻抗很高,常见的运算放大器很难达到。因此,本文采用双 P 沟道场效应管 3N165 接入电荷输入端,它不仅输入阻抗高,且噪声小,动态范围大。电荷转换核心电路原理图如图 4 所示,设计制作完成的电荷放大电路成品输入阻抗高达 $10^{14} \Omega$,电压灵敏度为 0.1 mV/N ,下限截止频率小于 10^{-4} Hz ,上限截止频率为 3 kHz ,测量范围为 $-10^5 \sim +10^5 \text{ N}$ 。由式(1)可知,

2 实验

为了检验扭矩测力仪的输出性能,需要对其进行静态标定。如图 7 所示,将扭矩测力仪下端固定在三向力标定工作台上,根据力×力臂的原理,设置相同力臂,在侧向两端同时加载等间距阶梯力,模拟钻机的扭矩输出。采集电荷放大电路的输出电压大小,对其非线性和重复性进行校准。

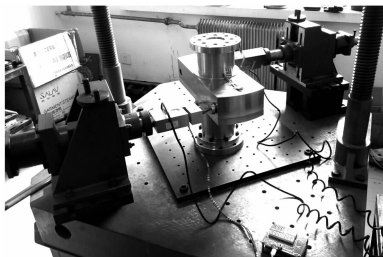


图 7 扭矩测力仪静态标定现场图

测力仪标定实验数据如表 1 所示,扭矩标定曲线如图 8 所示。

表 1 测力仪标定实验数据

扭矩/ (N·m)	电荷放大电路输出电压/mV					非线性/%	重复性/%
	1	2	3	平均值	理论值		
0	15	10	10	12	-26		
800	386	386	386	386	382		
1 600	781	776	771	776	790		
2 400	1 182	1 176	1 172	1 177	1 198		
3 200	1 592	1 582	1 577	1 584	1 605	1.17	0.46
4 000	2 002	1 992	1 987	1 994	2 013		
4 800	2 417	2 412	2 407	2 412	2 421		
5 600	2 842	2 842	2 832	2 839	2 829		
6 400	3 267	3 267	3 267	3 267	3 237		

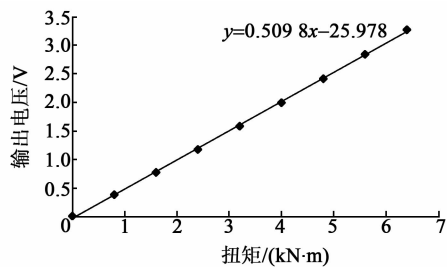


图 8 扭矩标定曲线图

由表 1 可知,扭矩测力仪非线性为 1.17%,重复性为 0.46%,达到钻机扭矩测量各项技术指标。

3 结束语

本文设计了一种以压电传感器为核心的大扭矩无线测力仪,测力仪空间尺寸为 $\varnothing 400\text{ mm}\times 375\text{ mm}$,扭矩测量最大值达到 $6\,400\text{ N}\cdot\text{m}$,非线性为 1.17%,重复性为 0.46%。

通过对电荷放大电路放大原理进行研究,确立了输入阻抗是影响放大电路输出稳定性的重要因素。采用将 3N165 场效应管接入电荷输入端的方法,使放大电路输入阻抗高至 $10^{14}\,\Omega$,达到压电石英力传感器的使用要求。同时,给出了扭矩测力仪整个系统框图和具体实施方案,设计了无线发送和无线接收相关电路。采用无线蓝牙进行数据传输,不仅功耗低,且稳定可靠。

参考文献:

[1] 高长银,赵辉,马龙梅,等.电荷放大器对石英传感器动态特性的影响[J].压电与声光,2006,28(6):654-656.
GAO Changyin, ZHAO Hui, MA Longmei, et al. Influence of charge amplifier on dynamic characteristics of quartz sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2006, 28(6): 654-656.

[2] 刘玉香.切削力测量系统传感器设计[D].沈阳:沈阳理工大学,2012.

[3] 尚永艳.刀柄式压电切削测力仪研究[D].大连:大连理工大学,2014.

[4] 刘俊,刘京诚,李敏.准静态电荷放大器的研究[J].压电与声光,2007,29(2):156-157.
LIU Jun, LIU Jingcheng, LI Min. Research on the quasi-static charge amplifier [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(2): 156-157.

[5] 张德龙.基于蓝牙 4.0 的无线扭矩测量分析[J].电子测试,2013(15):79-80.
ZHANG Delong. Research on bluetooth 4.0-based wireless torque measurement[J]. Electronic Test, 2013 (15): 79-80.

[6] 白云飞.12 位 A/D 转换器 AD574A 应用研究[J].机械工程与自动化,2012(2):188-190.
BAI Yunfen. Application research on AD574A 12-bit A/D converter[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2012(2): 188-190.