Non-Contact Torque Measurement System Based on NFC*

ZHAO Yongfeng[1,2], *WANG Yu*[1], *LAI Fuwen*[3], *WANG Wenlian*[1,2*]

(1. *Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan Shanxi* 030051, *China*; 2. *National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi* 030051, *China*; 3. 63853 *Unit of the Chinese People's Liberation Army*)

Abstract: In order to avoid the low accuracy of traditional wired and wireless torque measurement systems due to wear, as well as the inconvenience of complicated circuits and battery replacement, a passive wireless torque measurement system was demonstrated, designed and tested. The direction of the grid wire of the foil strain gauge and the bus bar of the elastic axis are 45° or 135°, and one strain gauge is pasted every 90°. A total of 4 pieces are pasted to form a full-bridge circuit, combined with NFC (Near Field Communication) The chip and antenna form a torque measurement terminal system; the read-write control terminal is used to complete energy transmission and data interaction, and the output voltage and torque can be viewed in real time on the PC terminal. The analysis of experimental data shows that the system has good sensitivity, linearity, hysteresis, repeatability and small measurement errors. The system is small and concise and does not need to install batteries, avoiding the limitations of traditional torque measurement methods.

Key words: torque measurement; passive wireless; NFC; strain gauge

EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.07.022

基于 NFC 的无源无线扭矩测量系统*

赵永峰[1,2], 王 玉[1], 赖富文[3], 王文廉[1,2*]

(1.中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2.中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;
3.中国人民解放军 63853 部队)

摘 要: 为避免传统有线和无线扭矩测量系统因磨损导致精度变低以及电路庞杂、更换电池的不便, 论证、设计和实验了一种无源无线扭矩测量系统。将箔式应变计栅丝方向与弹性轴圆柱面的母线呈 45°或 135°方向, 每隔 90°位置粘贴 1 片应变计, 共粘贴 4 片组成全桥电路, 联合 NFC(近场通信)芯片和天线构成扭矩测量终端系统; 利用读写控制端完成能量传输和数据交互, 在 PC 端实时查看输出电压及扭矩的大小。对实验数据分析表明本系统具有良好的灵敏度、线性度、迟滞性、重复性以及很小的测量误差。本系统小巧简洁且不必安装电池, 避免了传统扭矩测量方式的局限。

关键词: 扭矩测量; 无源无线; 近场通信; 应变计

中图分类号: TP212 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2021)07-0989-06

扭矩在动力学中占有举足轻重的地位, 是工业动力传递的重要参数之一, 所以扭矩的精准测量显得尤为重要。目前, 测量扭矩的方法多种多样, 大致分为有线测量和无线测量, 不论是有线还是无线测量, 都面临一些大大小小的问题。

有线测量要避免的一大难题就是弹性轴在转动的过程中导线的处理。目前的处理方式是加入一个集流环, 弹性轴转速低的情况下有较好的性能, 但是当弹性轴转速偏高时, 集流环与弹性轴之间的摩擦损耗引起接触电阻变化, 产生噪声干扰和零漂, 对信号有很大的影响, 导致采集到的数据误差较大[1]。

无线测量不论是弹性轴转速快慢, 都有很好的

项目来源: 中北大学科学研究基金项目(XJJ2016023); 山西省自然科学基金面上项目(201801D121162)
收稿日期: 2021-04-07 **修改日期**: 2021-04-28

测量精度,优于集流环式;但是目前的无线测量系统包括信号放大电路、调理电路、射频发射电路、射频接收电路、电源管理电路和调制解调电路,整个系统电路复杂,价格昂贵,检修困难[2-4]。

为了使测量系统达到更高的集成度和测量精度,采用 NFC(近场通信)技术作为无源无线扭矩测量系统的数据传输媒介。NFC 技术是由非接触式射频识别(RFID)演变而来,NFC 采用电磁耦合感应技术,电磁场频率是 13.56 MHz,读写控制端用 13.56 MHz 信号激励天线,产生磁场,通过近场耦合,将能量传递给目标,目标对磁场进行调制,将数据返回给发起设备完成通信;NFC 技术凭借其通信稳定、传输速率快、建立联系时间短、受环境影响小等优势发展迅猛,一枚 0.4 cm×0.4 cm 的 NFC 芯片已经在内部集成了微型 MCU、信号放大电路、调理电路、射频发射电路、电源管理电路和调制解调电路,此外还有能量收集功能,为外部传感器供电[5-11]。目前国内外对 NFC 多处于静态标签的研究应用,无传感器,多采用其 ISO14443A/B 协议做身份识别以及储存固定信息;本系统采用其 ISO15693 协议,连接传感器,实现动态数据传输。

基于 NFC 的无源无线扭矩测量系统采用经典的应变式扭矩测量法,将箔式应变计栅丝方向与弹性轴圆柱面的母线呈 45°或 135°方向,每隔 90°位置粘贴 1 片应变计,共粘贴 4 片组成全桥电路,当弹性轴受扭时,应变计产生形变,应变计电阻的变化通过电桥输出与外加扭矩成正比的电压信号,通过计算便可得到外加扭矩的大小;应变式扭矩测量法电路设计简单、测量精度高,一直在广泛使用[12-14]。

1 系统设计

1.1 系统工作原理

图 1 描绘了基于 NFC 的无源无线扭矩测量终端的工作原理。一共分为五个部分,包括 NFC 天线、NFC 芯片(RF430FRL152H,ISO15693 协议),调

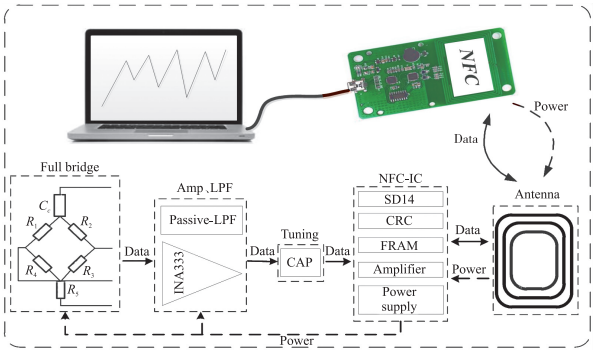


图 1 NFC 无源无线扭矩测量系统原理图

谐匹配电路、滤波放大电路以及全桥采集电路。将读写控制系统的天线靠近测量终端的天线,通过电磁耦合,终端系统被激活,经过极短暂的时间后两者建立连接完成;读写控制器通过空中编程的方式发送指令给测量终端,启用内部 14-Bit Sigma-Delta ADC(SD14)、16-bit CRC、2KB-FRAM、Amplifier 以及 Power Supply System(包括能量收集功能);当转动弹性轴,恒流源式全桥采集电路采集输出电压,采集到的电压信号经放大滤波后由 SD14(VREF = 0.9 V)将数据转换成数字量存在 FRAM 中,读写系统通过向终端发送循环读取指令来访问 FRAM 中的数据,并将数据发送给 PC 端进行数据直观反映。

1.2 NFC 系统设计

NFC 系统是整个系统的核心,因此先设计完整的 NFC 系统来保证通信的稳定性。

图 2 是 NFC 系统电路图,除了 NFC 芯片及其外围电路外还有放大滤波电路。系统使用二阶放大电路,第一阶是 NFC 芯片内部提供最大 8 倍的放大电路,第二阶放大电路采用超低功耗低噪声精密仪表放大器 INA333,该芯片最大偏移电压 25 μV,工作电压 1.8 V,静态电流 50 μA,最大增益 1 000,轨到轨输出,能保证出色的精度。

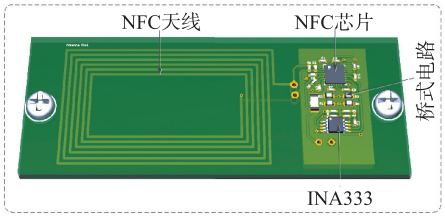


图 2 NFC 系统电路图

1.3 NFC 天线设计

NFC 工作在 13.56 MHz,属于 HF 波段,需要使用线圈环路天线。线圈天线最重要的参数是其等效电感值,为了更好的匹配电容,其值通常在 0.5 μH~3.0 μH 之间。在设计天线之前通常先规划好预设计天线的形状、尺寸、线宽和圈数等,利用经验公式计算出等效电感值,再利用 HFSS 软件仿真,之后设计出实际天线用矢量网络分析仪测量实际电感值。

预设一块矩形天线,如图 3 所示:匝数 $N=6$、平均宽度 $w=37$ mm、平均高度 $h=19$ mm、轨迹宽度 $a=0.5$ mm、真空磁导率 $\mu_0=4\times10^{-7}$ H/m、校正因子 $p=1.8$,根据经验公式:

$$L=\frac{N^p\mu 0}{\pi}\left[-2(w+h)+2\sqrt{h^2+w^2}-h\ln\left(\frac{h+\sqrt{h^2+w^2}}{w}\right)h\times\ln\left(\frac{h+\sqrt{h^2+w^2}}{w}\right)-w\ln\left(\frac{w+\sqrt{h^2+w^2}}{h}\right)+h\ln\frac{2h}{a}+w\ln\frac{2w}{a}\right.\quad(1)$$

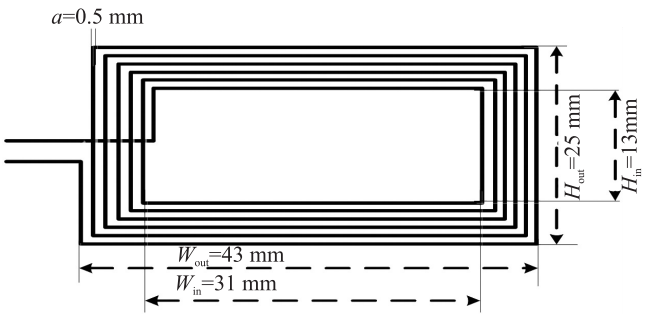


图 3　矩形天线

计算出等效电感值 $L_{est}=1.776\ \mu H$,符合设计要求。

图 4 为 HFSS 对预设天线的阻抗仿真图,13.56 MHz 频率下的阻抗值为:$Z=(1.436\ 2+j151.563\ 4)\Omega$,计算出仿真天线的电感值为:$L_{sim}=1.779\ \mu H$,可以发现 L_{sim} 和 L_{est} 相差非常小。

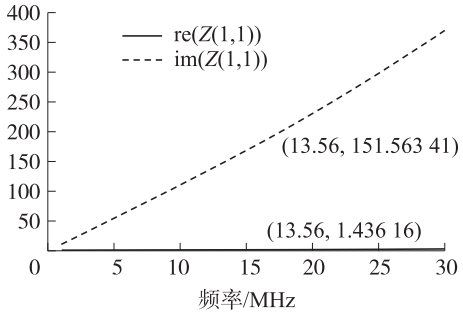


图 4　天线仿真阻抗值

按照预设天线尺寸做成实际的 PCB 天线,如图 5 所示,使用矢量网络分析仪测量实际天线,Smith 圆图在光标‘1’对应 13.56 MHz 的电感值为 $L_{real}=1.840\ \mu H$,与 L_{est}、L_{sim} 均相差很小;Smith 圆图在光标‘2’对应天线的自谐振点,频率为 70.156 MHz,可推出天线的寄生电容 $C_{Para}=2.797$ pF,已知 NFC 芯片的输入电容为 $C_{in}=35$ pF,由公式:

$$C_{RES(total)}=\frac{1}{(2\pi\times13.56\ \text{MHz})^2L_{real}} \tag{2}$$

$$C_{RES}=C_{RES(total)}-C_{in}-C_{Para} \tag{3}$$

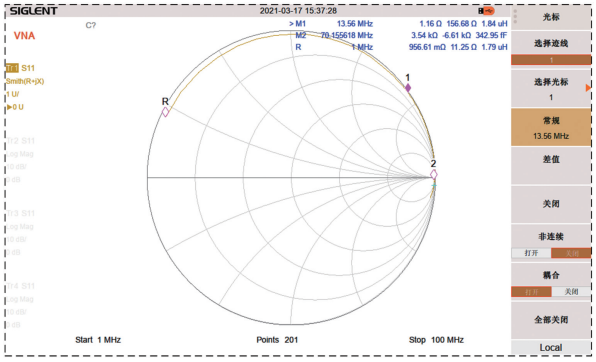


图 5　矢量网络分析仪实测的 Smith 圆图

计算出需要匹配的谐振电容为 $C_{RES}=37.072$ pF,以此构建谐振匹配电路。

1.4　应变系统设计

应变系统包括弹性轴和应变计。

选取一截直径 20 mm、长 30 cm 的 45#实心钢柱作为弹性轴,根据公式:

$$W_P=\frac{\pi D^3}{16} \tag{4}$$

$$\tau_{max}=\frac{M}{W_P}\leqslant[\hat{\sigma}] \tag{5}$$

$$[\hat{\sigma}]=\frac{\delta0.2}{\sqrt{3}\times n_s} \tag{6}$$

计算出所选弹性轴可承受最大安全扭矩为 $M=161\ N\cdot m$。(D 为弹性轴的直径、W_p 为轴截面的抗扭模数、M 为轴上扭矩、$[\hat{\sigma}]$ 为最大许用应力、τ_{max} 为轴截面上的最大剪应力、$\delta0.2$ 为屈服强度、n_s 为安全系数取 2)

弹性轴受扭发生应变时,横截面会受到剪应力,这个力在轴中心处为零,在轴表面最大,因此如何粘贴应变计变得很重要。如图 6 所示,将阻值为 1 kΩ 的箔式应变计栅丝方向与弹性轴圆柱面的母线呈 45°或 135°方向,每隔 90°位置粘贴 1 片应变计,共粘贴 4 片组成全桥电路;此全桥电路有温度补偿功能,可消除导线的温度影响,可消除弯曲应变,可消除压缩(拉伸)应变,输出精度是桥式单臂电路的 4 倍。根据广义胡克定律:

$$\begin{cases}\varepsilon_1=\dfrac{1}{E}(\sigma_1-\mu\sigma_2)\\ \varepsilon_2=\dfrac{1}{E}(\sigma_2-\mu\sigma_1)\\ \varepsilon_3=\dfrac{1}{E}(\sigma_3-\mu\sigma_4)\\ \varepsilon_4=\dfrac{1}{E}(\sigma_4-\mu\sigma_3)\end{cases} \tag{7}$$

式中:$\sigma_1=\tau_{max}$、$\varepsilon_1=\varepsilon_3=-\varepsilon_2=-\varepsilon_4$ 得到剪应力和应变

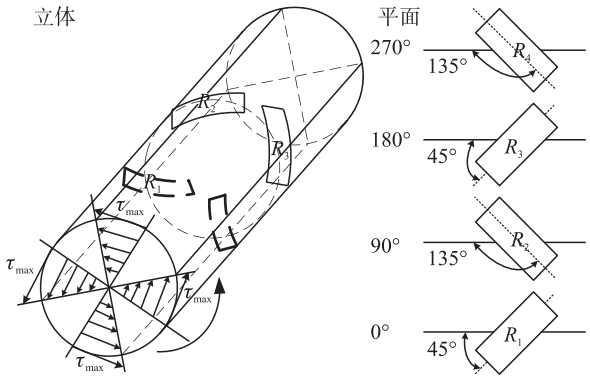


图 6　应变计粘贴图

的关系：

$$\varepsilon=\frac{\sigma}{E}(1+\mu) \tag{8}$$

结合公式：

$$\tau_{\max}=\frac{M}{W_P} \tag{9}$$

$$\frac{\Delta R}{R}=K_S\varepsilon \tag{10}$$

推出扭矩与电阻变化量的关系：

$$M=\frac{W_P E}{(1+\mu)K_S R}\Delta R \tag{11}$$

令 $C_0=\frac{W_P E}{(1+\mu)K_S R}$，得到扭矩与应变计电阻变化量的线性关系：

$$M=C_0\Delta R \tag{12}$$

式中：E 为弹性轴的弹性模量、μ 为弹性轴的泊松比，可知扭矩可以通过应变计电阻的变化来测量。

2 系统标定

首先要对终端系统进行实验标定，根据应变计的测量原理可知其有效性对静态和动态负载都相同，所以采用静态试验标定法。如图 7 所示将弹性轴的一端固定防止自由旋转，使用一根质量均匀臂杆固定在弹性轴的一端，并使臂杆呈水平状态，臂杆下挂精准砝码，通过外加机械构件发生转动产生可控扭矩，施加扭矩包括臂杆长度与砝码重力的向量积以及臂杆自身重力产生的扭矩，通过增加/减少砝码来增加/减少所施扭矩，利用读写控制端实时读取输出电压的值，记录所施加扭矩大小及其对应的输出电压值。

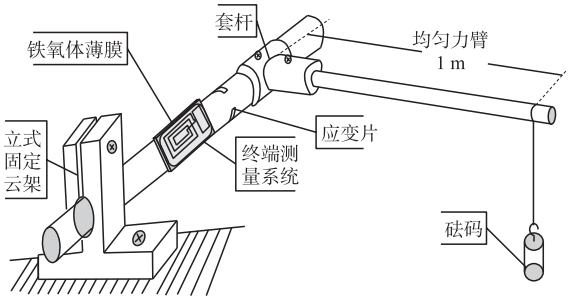


图 7 静态标定示意图

为了保证测量终端系统能与读写控制端实时保持稳定通信，用吸波材料（铁氧体膜）来减小金属的涡流效应。NFC 系统与读写控制端的最大感应距离是 10.5 cm，最大稳定通信距离是 9.5 cm；当与弹性轴和桥式电路组成测量终端后，如图 8，测量系统 PCB 与读写控制端最大稳定通信距离是 4.5 cm。

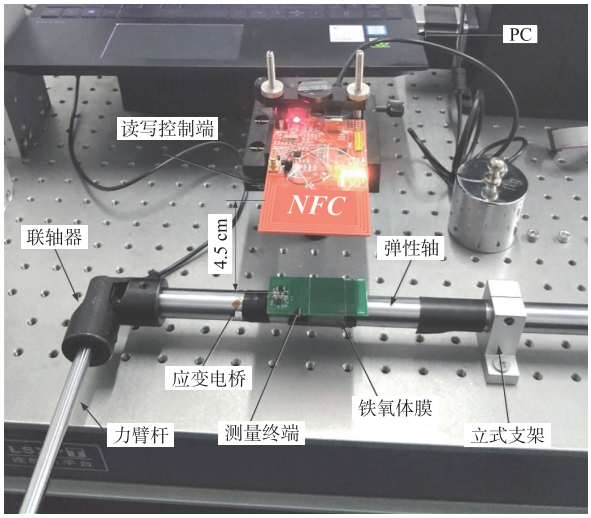


图 8 标定实验照片

3 实验与数据分析

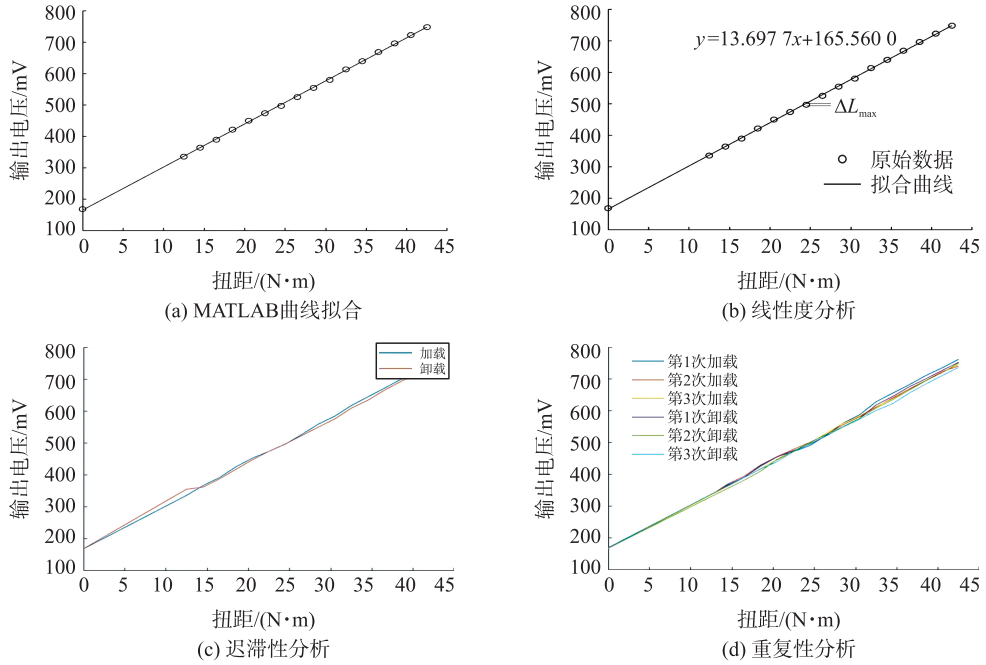
采用直径 10 mm、长 100 cm 的 45 号钢柱作为均匀力臂杠杆，力臂杠杆自身重力产生的扭矩要计算在内（12.5 N·m）。测试时，通过增加砝码的个数实现扭矩的加载，通过相反过程来实现扭矩的卸载，以 200 g 的砝码为间隔进行 15 个点的标定（量程 42.5 N·m）。从读写控制端记录对应的输出电压值，重复三次实验，将每个标定点的实验数据取平均值[15-16]。实验数据如表 1。

表 1 实验数据（输出电压）

理论标准扭矩/(N·m)	输出电压/mV			加载与卸载均值之差/mV
	加载均值	卸载均值	总均值	
12.5	336.0	335.5	335.8	0.3
14.5	366.7	361.9	364.3	2.4
16.5	391.6	387.7	389.6	1.9
18.5	425.5	417.7	421.6	3.9
20.5	452.6	447.5	450.0	2.5
22.5	473.8	473.9	473.8	0.1
24.5	496.7	497.2	497.0	0.2
26.5	526.9	523.5	525.2	1.7
28.5	559.1	549.7	554.4	4.7
30.5	584.2	575.5	579.8	4.3
32.5	617.3	609.1	613.2	4.1
34.5	644.4	633.7	639.1	5.4
36.5	671.3	665.1	668.2	3.1
38.5	699.2	692.5	695.9	3.4
40.5	725.8	718.6	722.2	3.6
42.5	749.0	746.1	747.5	2.9

将三次实验输出电压的‘总均值’输入 MATLAB 作为纵坐标，将理论标准扭矩作为横坐标，如图 9(a)

所示,利用最小二乘法得到扭矩和输出电压值的拟合特性曲线为:$y=13.697\ 7x+165.560\ 0$,x 表示扭矩,y 表示输出电压值。将输出电压根据拟合曲线转化为扭矩,转化结果如表 2。



(a) MATLAB曲线拟合　(b) 线性度分析　(c) 迟滞性分析　(d) 重复性分析

图 9

表 2　实验数据(测量扭矩)

理论标准扭矩/(N·m)	测量扭矩(N·m)			加载与卸载均值之差/(N·m)
	加载均值	卸载均值	总均值	
12.5	12.44	12.41	12.42	0.04
14.5	14.68	14.33	14.51	0.35
16.5	16.50	16.21	16.36	0.28
18.5	18.97	18.41	18.69	0.57
20.5	20.95	20.58	20.77	0.37
22.5	22.50	22.51	22.50	0.01
24.5	24.18	24.21	24.19	0.03
26.5	26.38	26.13	26.26	0.25
28.5	28.73	28.04	28.38	0.69
30.5	30.56	29.93	30.24	0.64
32.5	32.98	32.38	32.68	0.60
34.5	34.96	34.18	34.57	0.78
36.5	36.92	36.47	36.70	0.45
38.5	38.96	38.47	38.72	0.49
40.5	40.90	40.37	40.64	0.53
42.5	42.59	42.38	42.49	0.21

分析、计算和评估扭矩测量系统的各项指标如下:

①灵敏度:$K_S=\dfrac{\Delta y}{\Delta x}=13.697\ 7\ \mathrm{mV(N\cdot m)^{-1}}$;

②线性度:$E_L=\left(\dfrac{\Delta L_{\max}}{y_{\mathrm{FS}}}\right)\times 100\%=0.729\%$;

③迟滞性:$E_H=\pm\left(\dfrac{\Delta H_{\max}}{2y_{\mathrm{FS}}}\right)\times 100\%=0.918\%$;

④重复性:$E_R=\pm\left(\dfrac{\Delta R_{\max}}{y_{\mathrm{FS}}}\right)\times 100\%=0.829\%$;

⑤测量误差:$E_\varepsilon=\sqrt{E_L^2+E_H^2+E_R^2}=0.014$。

用 MATLAB 分别描绘实验数据的线性度、迟滞性和重复性如图 9(b)、9(c)和 9(d)通过分析和计算可知此测量系统各项性能指标均符合规范,不仅结构和选材得当,而且具有高测量精度。

4　结论

本文通过对目前扭矩测量系统的研究分析和总结,提出了基于 NFC 的无源无线扭矩测量系统,通过对系统的构建设计、仿真调试、实验和数据分析验证了系统的可行性。本系统通过 NFC 技术作为扭矩测量的媒介,在保证数据通信稳定和快速的前提下不仅避免了传统有线扭矩测量系统磨损带来的较大误差,而且因其高度集成化在电路结构上优于一般的无线扭矩测量系统。基于 NFC 的无源无线扭矩测量系统不仅无线,而且无源,在某些特殊环境中可以长期使用,解决更换电池的不便。

参考文献:

[1]　张晓强. 应变式高准确度动态扭矩测量仪的研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2003.

[2]　陈绍鹏,李旭珂,常英丽. 基于铁基纳米晶合金的非接触扭矩传感器[J]. 自动化与仪器仪表,2020,246(4):39-42.

[3]　Dong Ying Ju,Kazuaki Tabata. Development of Non Contact Torque Sensor Applied to Wind Generator[J]. Advanced Materials Research,2013,651(1):976-980.

[4]　唐建. 扭矩无线测量系统的设计与研究[D]. 重庆:西南石油

大学,2013.

[5] 王纪彬,王文廉.NFC 无源体温测量系统[J]. 传感技术学报,2019,32(8):1271-1275.

[6] 张帆,王文廉. 基于智能手机的无源胎动监测系统[J]. 传感技术学报,2020,33(10):1509-1515.

[7] Kordzadeh Atefeh,Holzmann Dominik,Binder Alfred. Miniaturized On-Chip NFC Antenna Versus Screen-Printed Antenna for the Flexible Disposable Sensor Strips[J]. Internet of Things,2020,1(2):309-319.

[8] Boada M,Lazaro A,Villarino R. Battery_Less Soil Moisture Measurement System Based On a NFC Device With Energy Harvesting Capability[J]. IEEE Sensors Journal,2018,18(13):5541-5549.

[9] Mayukh Bhattacharyya,Waldemar Gruenwald,Dirk Jansen. Design of a Programmable Passive SoC for Biomedical Applications Using RFID ISO 15693/NFC5 Interface[J]. Journal of Low Power Electronics and Applications,2018,8(1):3.

[10] DeHennis Andrew,Getzlaff Stefan,Grice David. An NFC-Enabled CMOS IC for a Wireless Fully Implantable Glucose Sensor[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics,2016,20(1):18-28.

[11] Coskun V,Ozdenizci B,Ok K.A Survey on Near Field Communication(NFC)Technology[J]. Wireless Personal Communications,2013,71(3):2259-2264.

[12] 廖丽媛. 基于应变式扭矩传感器的测量系统的设计[D]. 上海:东华大学,2013.

[13] 吴召剑. 基于 FPGA 和 STM32 的电机动静态扭矩测试系统的研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2016.

[14] 李志鹏,杨传英,邵宪友. 基于 CAN 总线对应变式扭矩传感器的零点校正[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016,30(1):89-92,116.

[15] 禹精达. 传动轴扭矩测量技术及精度分析[D]. 太原:中北大学,2012.

[16] 张奇,牛廉政,范亚南. 机器人关节扭矩测试传感器的设计[J]. 传感技术学报,2020,33(4):506-510.

赵永峰(1993—),男,硕士研究生,研究方向为动态测试与智能仪器,1154702391@qq.com;

王文廉(1978—),男,博士,中北大学仪器与电子学院副教授,研究方向为半导体功率器件、智能仪器和动态测试等相关研究,wangwenlian@nuc.edu.cn。