

# 基于无线传输的助力自行车中轴力矩测量系统的设计与研究

余世刚<sup>1,2</sup>, 袁峥峥<sup>1</sup>, 尹泽明<sup>1</sup>, 胡月娥<sup>1</sup>, 朱明亮<sup>1</sup>, 赵宇<sup>1</sup>

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164;

2. 常州丁酉智能科技有限公司, 江苏 常州 213023)

**摘要:** 针对当前助力自行车力矩测量系统传感器体积较大、开发成本高、测量精度低以及中轴旋转过程中无法使用有线测量等问题, 设计了一种基于应变检测原理和无线传输技术的新型力矩测量系统; 该系统采用 XKT-412 高精度无线传输芯片及 PIC12F1822 单片机实现系统的软硬件设计, 包括硬件电路设计、信号采集、信号处理及相关数据处理算法, 且该系统体积小, 成本较低; 实验测试表明, 输出频率与施加的力矩之间存在明显的线性关系, 且实际输出频率与理论输出频率之间的误差小于 0.5%, 测量系统的输出特性符合设计要求, 具有很好的推广及实际应用价值。

**关键词:** 助力自行车; 力矩测量; 应变检测; 无线传输

## Design and Study of Mid-axis Torque Measuring System of Power Assisted Cycle Based on Wireless Transmission

She Shigang<sup>1,2</sup>, Yuan Zhengzheng<sup>1</sup>, Yin Zeming<sup>1</sup>, Hu Yuee<sup>1</sup>, Zhu Mingliang, Zhao Yu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2. Changzhou Dingyou Intelligent Technology Co., Ltd., Changzhou 213023, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of large sensor volume, high development cost, low measurement accuracy and the inability to use wired measurement in the process of rotation of the mid-axis of the current torque measurement system, a novel torque measurement system based on strain detection principle and wireless transmission technology is designed. The system uses XKT-412 wireless transmission chip and PIC12F1822 single-chip microcomputer to realize the design of hardware and software, including hardware circuit design, signal acquisition, signal processing and related data processing algorithms, and the system is small in size and low in cost. The experimental results show that there is an obvious linear relationship between the output frequency and the applied moment, and the error between the actual output frequency and the theoretical output frequency is less than 0.5%. The output features of the measurement system meet the design requirements, which has a good promotion and application value.

**Keywords:** power assisted cycle; torque measurement; strain detection; wireless transmission

## 0 引言

与传统自行车及纯电动车相比, 助力自行车在用户骑行体验、安全性、绿色环保等方面有着自身的优势, 正成为国内外研究的热点<sup>[1-3]</sup>。助力自行车通过感知人踩踏踏板的力矩大小实现对驱动电机输出功率的调节, 从而实现助力的功能。因此, 力矩测量系统是助力自行车研究的关键<sup>[4-6]</sup>。

目前用于助力自行车力矩测量系统的传感器主要有后爪钩型力矩传感器<sup>[7]</sup>、霍尔传感器<sup>[8]</sup>以及德国博世公司设计的基于磁致伸缩效应的力矩传感器<sup>[9]</sup>。爪钩型传感器由于安装在暴露的环境中, 容易受到室外环境的影响, 导

致传感器的稳定性受到影响。基于霍尔传感器的力矩感知系统通过感应磁铁的周期性经过, 输出成比例的方波信号, 从而实现对电机的控制。但由于霍尔传感器对安装精度要求较高, 且自身容易受到振动信号的影响, 导致信号漂移等问题, 降低了测量精度<sup>[10]</sup>。德国博世公司设计的基于磁致伸缩效应的力矩传感器结构简单、可靠性好, 但是开发难度大、成本太高, 目前国内市场仍不能大规模销售。

针对上述问题, 本文设计了一种基于应变检测原理和无线传输技术的助力自行车力矩测量系统。该系统具有体积小, 成本低, 工作稳定, 采集精度较高, 适应力矩传感器在密封、旋转的环境中长时间工作等优点。

## 1 应变检测原理

自行车脚踏在骑行过程中由于受到脚踏作用使起连接支承载部件的中轴受到微小扭矩, 从而在中轴表面产生微小的机械形变<sup>[11]</sup>。贴于中轴表面的电阻应变片发生形变使得阻值变化, 将形变量转化为电压模拟量即可测得脚踏踏

收稿日期: 2019-06-17; 修回日期: 2019-07-05。

基金项目: 国家自然科学基金(51775410)。

作者简介: 余世刚 (1972-), 男, 辽宁昌图人, 教授, 硕士生导师, 主要从事精密测量与控制技术、通信电子设备及智能仪器仪表方向的研究。

板的力的大小。应变片的扭矩测量原理分析过程如下。

### 1) 电阻丝应变效应理论:

设某一段导体或者半导体的电阻丝阻值为  $R$ , 且  $R = \rho L/A$  ( $L$  为长度,  $A$  为横截面积,  $\rho$  为电阻率)。导体受轴向拉力, 伸长量为  $\Delta L$ , 横截面减小  $\Delta A$ , 电阻率变化量  $\Delta \rho$ , 则有:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (1)$$

圆柱形导体的横截面积  $A = \pi r^2$ ,  $r$  为圆柱半径, 因此弹性范围内金属导体纵向应变可表示为:

$$\begin{cases} \frac{\Delta L}{L} = \epsilon \\ \frac{\Delta r}{r} = -\mu \epsilon \\ \frac{\Delta \rho}{\rho} = \lambda E \epsilon \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\epsilon$  是无量纲系数,  $\mu$  是金属导体的泊松比系数,  $\lambda$  为和材料有关的压阻系数,  $E$  为弹性模量。将式 (2) 带入式 (1) 可得:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu + \lambda E)\epsilon \quad (3)$$

令  $K_1 = 1 + 2\mu + \lambda E$ , 其中  $K_1$  为常数, 称为电阻应变片的灵敏系数, 则:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_1 \epsilon \quad (4)$$

由以上公式可知, 电阻应变片阻值的相对变化量与应变变量成线性关系。

### 2) 应变与扭矩关系理论:

受到单一扭矩作用的轴, 其表面与轴线成  $45^\circ$  和  $135^\circ$  的两个方向受到的主应力最大<sup>[12]</sup>, 最大拉应力  $\sigma_1$  和最大压应力  $\sigma_2$  满足关系式  $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{\max}$ 。设应变片上的两组电阻丝分别为  $R_1$  和  $R_2$ 。则沿电阻应变片  $R_1$  和  $R_2$  的应变  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  可表示如下:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \nu \frac{\sigma_2}{E} = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu \sigma_2) \\ \epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \nu \frac{\sigma_1}{E} = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu \sigma_2) \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\nu$  表示泊松比,  $E$  表示中轴弹性模量。将  $\sigma_1 = -\sigma_2$  带入式 (5), 得到  $\epsilon_1 = -\epsilon_2$ , 即电阻应变片  $R_1$  和  $R_2$  受到的应力数值相等, 方向相反。

中轴横截面上的剪应力  $\tau$  和轴上力矩  $M$  关系为:

$$\tau = M/W_1 \quad (6)$$

$M$  为施加在中轴的力矩,  $W_1$  为轴的抗扭截面系数, 则  $\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau = M/W_1$ , 以应变片电阻  $R_1$  为例, 带入上式可得:

$$\epsilon_1 = \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{M}{W_1} \quad (7)$$

整理得:

$$M = \frac{W_1 E}{1+\nu} \epsilon_1 = A_1 \epsilon_1 \quad (8)$$

其中: 常数  $A_1 = \frac{W_1 E}{1+\nu}$ 。由金属丝的电阻应变效应可知, 金属丝的电阻变化率与应变的关系为  $\frac{\Delta R}{R} = K_1 \epsilon$ , 则:

$$M = \frac{A_1}{K_1 R} \Delta R = A_1 \Delta R \quad (9)$$

可见, 中轴所受扭矩大小与应变片阻值变量成正比, 在中轴上粘贴应变片的方式可以实现力矩的实时测量。

## 2 系统硬件设计

骑行过程中自行车中轴处于旋转状态, 因此需要解决如何给测量系统稳定的供电、力矩信号如何稳定可靠的传输等问题。针对这些问题, 本文提出了相应的解决方案, 方案包括硬件电路设计与软件设计两个部分。

硬件电路部分主要包括应变信号采集、信号放大、A/D 转换、无线供电与信号传输、稳压电源等模块, 图 1 为中轴力矩测量系统组成示意图。

力矩测量系统主要工作流程为: 1) 应变信号采集电路采集扭矩作用下应变变化所引起的微小电压变化; 2) 利用运算放大器将电压信号放大一定倍数然后传入 PIC 单片机进行模数转换, 转换后的频率数字信号通过线圈传输至外部信号处理电路; 3) 解调出力矩信号进行滤波整形处理, 将得到的方波信号进行脉宽调制产生 PWM 信号送至电机进行比例助力控制。

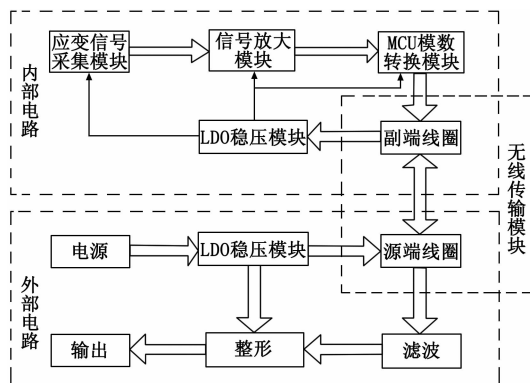


图1 中轴力矩测量系统组成

### 2.1 应变信号采集电路

将 2 个完全相同的中航系列应变片均匀粘贴在轴表面对称  $180^\circ$  的位置, 使其构成惠斯通全桥电路, 全桥电路的优点有: 1) 可以消除剪应力、弯应力、轴向应力的影响 2) 优良的温度补偿作用。本文所设计的应变信号采集电路如图 2 所示。

全桥电路中的 4 个应变片是完全相同的, 阻值为  $R$ , 且  $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$ ,  $\Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$ 。当电桥处于平衡状态时,  $R_1 R_4 = R_2 R_3$ , 电桥的输出电压为零 ( $U_0 = 0$ ); 当扭矩发生变化时, 电桥失衡, 此时电桥输出电压  $U_0$  与各桥臂电阻及电阻变化之间的关系为:

$$U_0 = E \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} =$$

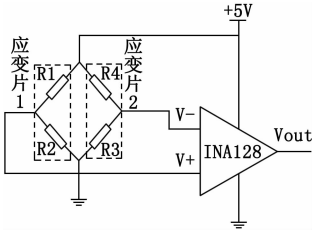


图 2 应变信号采集电路

$$E \frac{(R + \Delta R)(R + \Delta R) - (R - \Delta R)(R - \Delta R)}{(R + \Delta R + R - \Delta R)(R + \Delta R + R - \Delta R)} = E \frac{\Delta R}{R} \quad (10)$$

可见，输出电压  $U_o$  与应变片阻值改变量  $\Delta R$  成正比。因此，可通过测量电桥输出电压实现对中轴扭矩的测量。

## 2.2 内部传输电路设计

### 2.2.1 信号放大电路

INA128 芯片是力源信息技术有限公司生产的一种低功耗、高精度的通用仪表放大器。3 运放集成设计的 INA128 体积小但功能强大，不仅具有高共模抑制比、高增益、高输入阻抗的特点，而且运行低噪声、输入偏置电流低以及输入失调电压低。INA128 的内部简化电路原理图如图 3 所示。

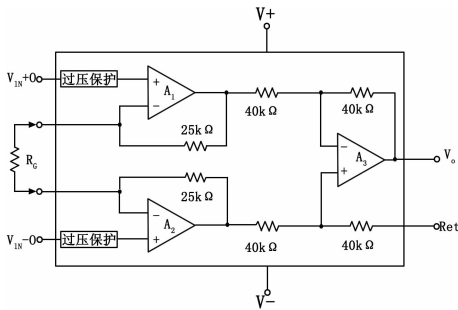


图 3 INA128 内部简化电路

INA128 芯片提供了工业标准的增益等式，在引脚 1 和 8 之间的外部增益电阻  $R_G$  可实现从 1~10 000 范围内的增益选择，且在高增益条件下反馈电流输入电路同样可提供宽带宽。电路放大倍数的计算公式如下：

$$G(\text{放大倍数}) = 1 + \frac{50\text{k}\Omega}{R_G} \quad (11)$$

式中，50 kΩ 为内部反馈电阻  $A_1$  和  $A_2$  的和，两个片内金属薄膜电阻值利用激光进行微调至绝对精度。

本文基于 INA128 芯片所设计的满足运放需求的差分运放电路外部电阻  $R_G$  选用的封装尺寸为 0603，阻值大小为 270 Ω，故电路放大增益  $G$  为：

$$G = 1 + \frac{50\text{K}\Omega}{R_G} = 1 + \frac{50\text{K}}{270} = 186 \quad (12)$$

### 2.2.2 无线传输与供电电路设计

根据电磁感应原理，利用同一组线圈进行耦合，使由外而内供电与力矩信号由内而外传输同时进行，同时解决了无线供电与信号传输的问题。而线圈传输需要将内部采

集放大的电压信号转换为数字信号才能进行无线传输。数字信号无线传输方式具有更好的抗噪声能力，不仅可以控制传输过程产生的误差，方便用于集成电路，减小系统体积，还能避免摩擦发热、延长芯片使用寿命。

首先利用无线供电线圈的副端将内部数字信号发送出去，在源端接收到信号后，根据供电与力矩信号频率的不同利用滤波整形电路将信号解调出来，从而完成信号的无线传输。传输原理如图 4。

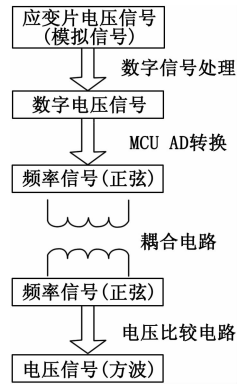


图 4 力矩信号传输原理

无线传输模块选用芯科泰公司开发的 XKT-412 与 XKT-335 芯片。该无线传输芯片采用高频大功率集成电路，体积小输出功率强大。用于收发信号配套的线圈体积和尺寸小、成本低，且能够在较高频率范围内使用。XKT-412 利用电磁能量转换原理，实现配合接收部分做能量转换及电路实时监控的功能，所需外部电路配合元件极少，电路设计简单，具有高精度高稳定性高可靠性的特点。

### 2.2.3 力矩信号 V-F 转换

本文选用 PIC12F 系列单片机，其内部的 8 位 A/D 转换模块可以实现模拟信号/数字信号的转变功能。同时该单片机对数字信号进行编程处理传送给无线收发器，信号通过无线收发器以纯数字形式完成输送。

## 2.3 力矩信号外部传送原理

内部经调制后的信号经由线圈耦合进行传输，外部电路经过低通滤波，解调出力矩信号波形，经整形后形成规律的方波信号传输至电机，进行电机功率控制。

### 2.3.1 滤波电路模块

外部线圈接收到内部传输的数字信号后，通过在无线模块 XKT-412 芯片的引脚 5 与地之间连接一个并联组成的 10 Ω 电阻 R28、R29，从而引出包括 50 kHz 左右的高频电流信号和内部线圈产生的约为 60 Hz 的力矩信号，因此接下来需要使用低通滤波，过滤供电产生的高频干扰信号，留下低频力矩信号。图 5 为滤波电路。

### 2.3.2 外部比较电路

电压比较器是一种常用的集成电路。它可用于 V/F 变换电路、A/D 变换电路、振荡器及压控振荡器电路、过零检测电路等。

本次设计采用的比较器为 LM258，LM258 由两个独立

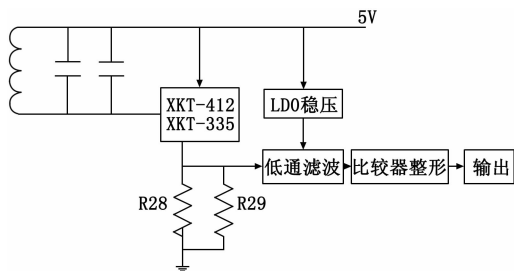


图 5 滤波电路

的高增益运算放大器组成, 用来完成滤波后信号波形的整形与放大。LM258 的主要特点有: 1) 可在单电源或双电源条件下工作; 2) 电源的电流消耗大小与电源电压无关; 3) 一个封装内有两个经内部补偿的运算放大器; 4) 逻辑电路匹配; 5) 功耗小; 6) 频率范围宽。应用范围有变频放大器、DC 增益部件和其他常规运放电路。其功能框图与管脚如下:

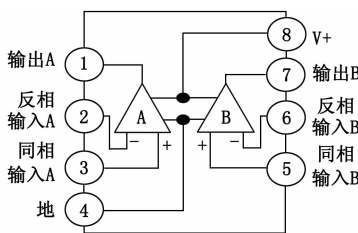


图 6 功能框图

经由滤波整形后的力矩信号为平整的方波信号, 该方波信号可传输至电机进行相应的比例助力控制。

### 2.4 稳压电源电路设计

传感器电路工作过程中需要提供稳定的电源, 而锂电池供电电压为 36 V, 电路工作电压通常为 5 V, 因此需要进行降压处理。

本次稳压电路设计采用 LDO 稳压芯片 MIC5205 - YM5, 它是一款高效的线性稳压器, 输出噪声极低, 具有极低压差和极低的接地电流。MIC5205 的管脚 4 - BYP 是旁路参考端, 连接至芯片内部参考电压, 在管脚 4 与接地端之间接一个容值为 470pF 电容可以降低内部参考电压, 从而明显降低输出噪声。其典型应用电路图如图 7 所示。

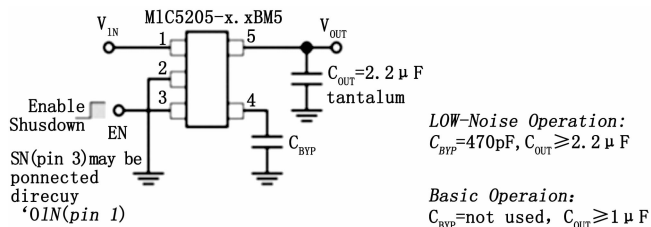


图 7 MIC-5205 典型应用电路图

## 3 系统软件设计

系统软件设计的主要功能是实时获取应变信号采集电路输出的微小电压, 并将该微小电压模拟量转换为对应的频率数字量, 再进行无线传输。本次设计选用 PIC 系列

PIC12F1822 单片机实现这一功能。

### 3.1 PIC12F1822 芯片介绍

PIC 单片机 (Peripheral Interface Controller) 是一种能够开发和控制外围设备的集成电路 (IC), 其中的 12F 系列为采用 nanoWatt XLP 技术的 8/14 引脚闪存单片机, 具有体积小, 输入输出接口简单, 低功耗等优点。

PIC12F1822 单片机的指令长度为 12 位, 高性能 RISC CPU 指令简洁, 学习者仅需掌握 49 条指令。其自带自动现场保护的中断功能, 灵活的 32 MHz 的振荡器结构出厂精度为  $\pm 1\%$ 。

该芯片的正常工作电压为 1.8~5.5 V, 正常工作环境温度为  $-40\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 储存状态温度  $-65\sim +150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 在软件控制下可实现芯片自编程。外设特性主要有: 具有 7 个 I/O 引脚和一个输入的引脚, Timer0 的 8 位定时器/计数器带有 8 位预分频器, Timer1 为增强型, 且带有 16 位定时器和专用低功耗 32 kHz 振荡器, 采用外部门控输入, Timer2 的 8 位定时器/计数器包括 8 位的周期寄存器、预分频器及后分频器, 通用同步/异步收发器为增强型等。芯片基本特性与参数满足本文的设计要求。

### 3.2 V-F 转换主程序设计

单片机处理外接模拟量时需要一个转换电路, 一般称为 ADC (模拟-数字转换器)。ADC 的重要参数有精度和分辨率。PIC12F1822 采用 10 位分辨率, 最多 8 路通道, 带有正负参考电压选择的 5 位轨到轨电阻式 DAC。参考电压模块具有 1.024 V、2.048 V 和 4.096 V 的输出电压的固定参考电压 (fixed voltage reference, FVR), 主程序设置正参考电压为 4.096 V。图 8 为主程序流程图。

#### 1) 初始化设置。

```
void Delay(unsigned loop) //延迟 Delay()副程序,以 MCU 主
频计算时间进行 200 次的延迟,16Mhz/200=80Khz=12.5us 延迟
{
    u8 i; //Delay()内部副程式定义的 i 参数
    while(loop--){
        CLRWDT();
        for(i=0; i<200; i++){
        }
    }
}
```

#### 2) 参数定义。

```
define O_PPG RA2 //pulse 输出端口, 对应 PIC12F1822
晶片第 5 脚位
define I_EN_CAL RA1 //触发校正的外部端口定义, 对
应 PIC12F1822 晶片第 6 脚位
define C_TIMER0_CNT 220 // pulse high 输出高
define C_AD_LEFT 3//定义读取电压讯号的 AD 端口,
定义为 AN3, 对应电路图的 PIC12F1822 晶片第 3 脚位 RA4
define C_V_BASE (u16)((1024/4.096) * 0.65)
// 1024/4.096 * 0.65=163
define C_MAX_HZ (f32)(450.0f)
```

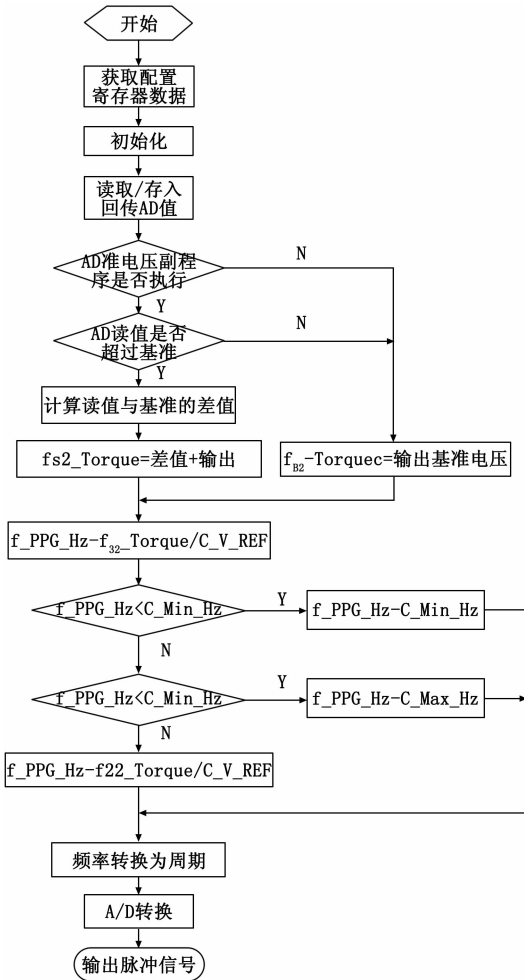


图 8 主程序流程图

```
// 450 Hz ( 4.5V)
define C_MIN_HZ (f32) (50.0f)
// 50 Hz ( 0.5V)
define C_V_REF (f32)(1024/409.6)
// 10bit/Ref (Ref = 4.096V)
```

### 4 系统实验测试

力矩测量系统研制完成后,需要对软硬件功能进行测试。关键性能测试结果如下。

#### 1) 外部电路滤波整形功能测试:

图 9~11 为外部信号接收处理电路得到的波形图。图 9 表示将黄色的混合信号中的高频信号过滤,只保留 64.94 Hz 的低频信号;图 10,11 表示先将低频信号反向放大,接着经过 LM258 比较器进行整形,再反向放大为平整的方波信号。从图中可以看出,波形处理效果较好,满足测试系统的要求。

#### 2) 力矩输出结果标定:

本文使用台式虎口钳对传感器所在中轴进行固定,稳压电源对力矩传感器进行 5 V 供电,使用 4 级精度且扭力范围在 10~110 Nm 的高精度扭力扳手对中轴进行加载,测量系

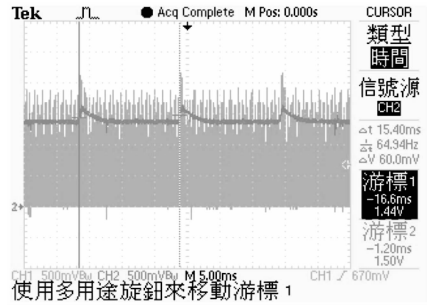


图 9 过滤高频信号保留低频信号

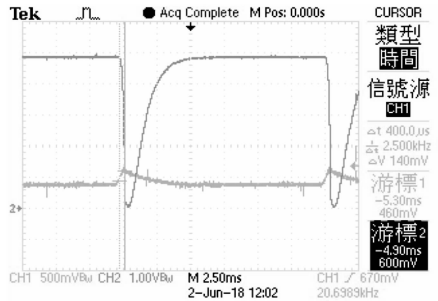


图 10 低频信号反向及放大

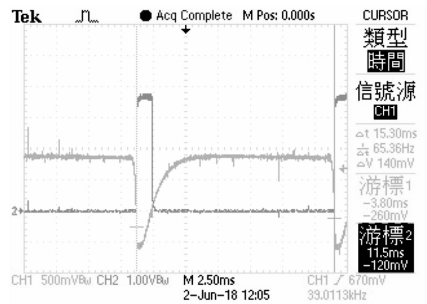


图 11 LM258 比较后反向

统的输出频率。实验数据如表 1 所示。

表 1 力矩测量结果

输入电压/mV	理论输出频率/Hz	实际输出频率/Hz	相对误差/%
10	69.717 990 73	69.497 2	0.3167
20	73.781 680 01	73.971 9	0.257 8
30	77.848 273 71	77.578 7	0.346 3
40	81.916 854 39	81.752 2	0.201 0
50	85.991 916 76	86.234 9	0.282 6
60	90.069 804 1	90.367 1	0.330 1
70	94.148 660 74	94.481 2	0.353 2
80	98.236 652 09	98.655 4	0.426 3
85	100.280 786 2	100.613 6	0.331 9

由表 1 测试数据可知,理论输出频率与实际输出频率的相对误差低于 0.5%,精度满足设计要求。

#### 3) 力矩信号输入输出线性拟合分析:

图 12 表明实际输出频率与加载的力矩具有良好的线性关系,拟合度较好,该力矩测量系统测量效果符合预期。

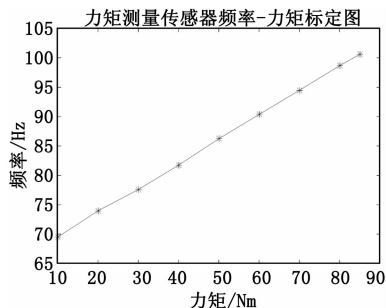


图 12 力矩测量传感器频率—力矩标定图

## 5 结束语

本文针对现有的助力自行车力矩测量传感器成本高、传感器安装空间局促以及无法在中轴旋转过程中进行有线供电与信号传输的问题, 通过将应变检测技术和无线传输技术结合, 设计了一种新型的助力自行车中轴力矩测量系统。经过理论分析、软硬件设计及实验测试, 结果表明本文设计的基于应变检测技术和无线传输技术的力矩测量系统具有结构简单、体积小、成本低、工作稳定、测量精度高的优点, 能够实现助力自行车在复杂工作环境下力矩的测量, 具有较好的市场空间和实际应用价值。

### 参考文献:

[1] 桑迪. 为何动力辅助系统 (PAS) 难于在国内市场推广 [J].

(上接第 47 页)

对比表 2 和表 4 可以看出, 底事件  $q_7$  (单个飞行员失常) 的概率重要度和关键重要度已经大幅度下降, 说明飞行员失常事件的发生对顶事件飞机遭遇非法控制的影响非常小。

因此, 通过改进驾驶舱门控制逻辑, 大幅度降低了飞行员失常对飞机飞行安全的危害程度, 保障了公众的飞行安全。

## 5 结束语

1) 本文针对民用飞机现有驾驶舱门控制逻辑无法防止蓄意坠机事件发生的问题, 飞机驾驶舱遭遇非法控制的顶事件, 构建了故障树模型;

2) 通过对故障树的定量和定性分析, 查找出飞机遭遇非法控制的具体薄弱环节, 即劫机者携带武器通过机场安检、单个飞行员失常、离开驾驶舱无法进入驾驶舱, 并提出了针对性的建议措施;

3) 针对飞行员离开驾驶舱后存在无法进入被锁驾驶舱的重大驾驶舱门控制逻辑缺陷, 对驾驶舱控制权限进行了优化分配, 提出了改进的驾驶舱门控制流程和逻辑。

4) 改进后的故障树分析结果表明, 飞行员失常事件的发生对顶事件飞机遭遇非法控制的影响非常小, 飞行安全性得到了提升。

中国自行车, 2016 (10): 70-73.

- [2] 曹艺龄. 基于动力的助力自行车人机交互专利技术综述 [J]. 科技经济导刊, 2018, 26 (24): 60.
- [3] Spagnol P, Corno M, Mura R, et al. Self-sustaining strategy for a hybrid electric bike [A]. American Control Conference. IEEE, 2013: 3479-3484.
- [4] 张凯. 助力自行车力矩传感器设计和控制算法设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [5] 张永祥, 明廷锋, 张帅. 应变扭矩的测量不确定度分析 [J]. 测试技术学报, 2018, 32 (3): 185-190.
- [6] 张夏栋, 李云飞, 贾俊铖, 等. 一种智能助力车力矩感测系统设计及实现 [J]. 现代电子技术, 2016, 39 (20): 44-48.
- [7] 蔡华林. 基于扭矩传感器的助力自行车中置系统的设计与开发 [D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [8] 夏静满, 肖国强, 韩鹏, 等. 基于霍尔元件的电动车力矩传感系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2015 (4): 81-82.
- [9] 文西芹, 张永忠, 宁晓明. 逆磁致伸缩效应扭矩传感器的历史、现状、趋势 [J]. 传感器世界, 2012, 8 (2): 23-26.
- [10] 江铭波, 阎旭东, 徐国旺. 霍尔效应及霍尔元件在物理量测量中的应用 [J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26 (2): 142-144.
- [11] 陈国顺. 试验设计在传感器工艺创新中的应用研究 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (1): 22-25.
- [12] 胡德福. 应变式扭矩传感器的设计技术 [J]. 船舶工程, 2011, 4 (33): 96-99.

### 参考文献:

- [1] 刘文成. 民用运输类飞机驾驶舱门适航要求及验证 [J]. 民用飞机设计与研究, 2018 (1): 6-9.
- [2] 王哲, 孙巍, 孙熙. 民用飞机驾驶舱门设计研究 [J]. 航空标准化与质量, 2018 (4): 50-53.
- [3] 严立浩. 民用飞机舱门传感器设计分析 [J]. 山东工业技术, 2017 (15): 104.
- [4] 程海龙. 民用飞机驾驶舱门控制系统简析 [J]. 科技视界, 2017 (13): 40+49.
- [5] 安琳琳, 汪洋. 基于功能危险性评估的民用飞机驾驶舱门设计探讨 [J]. 民用飞机设计与研究, 2015 (1): 53-57.
- [6] 严立浩. 基于适航条款的民用客机舱门危险等级划分研究 [A]. 中国航空学会. 探索 创新 交流——第六届中国航空学会青年科技论坛文集 (下册) [C]. 中国航空学会: 中国航空学会, 2014: 5.
- [7] 道格拉斯·卡莱利, 成磊. 加强飞机安全保障——空中客车增强型驾驶舱门及其他相关安全系统简介 [J]. 航空维修与工程, 2003 (4): 33-35.
- [8] 邵成猛. 基于故障树的盾构机液压缸推进无力故障的可靠性分析 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2017 (34): 116-120.
- [9] 孙健. 太阳翼驱动机构动态故障树分析 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.