

基于磁转速信号的自适应增益采集系统设计

张永杰¹, 马林², 董浩森¹, 康良伟¹, 边瑞卿¹, 李凯¹

(1. 中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051;

2. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 华阴 714200)

摘要: 针对线圈式磁传感器随测量转速变化所产生的电动势信号幅值线性变化的问题, 为实现此类幅值与周期动态变化信号的无失真采集, 设计了一种增益随输入信号幅值水平改变的自适应增益采集系统; 本系统以现场可编程门阵列 (FPGA) 为控制核心, 对输入信号幅值进行分析, 根据幅值分析结果控制电路增益在 $-20\sim 80$ dB 范围内自适应改变, 并记录系统当前时刻增益, 根据当前增益还原得到输入信号, 将增益信号和还原信号同步存储; 采集信号经自适应增益后输出信号幅值控制在设定范围内, 利于对动态信号中不同幅值区间信号变化细节直接观察; 通过幅值在 $20\ \mu\text{V}\sim 10\ \text{V}$ 范围内转速信号输入测试, 系统自适应增益后信号幅值控制在 $0.1\sim 4\ \text{V}$ 范围内, 实现了对动态转速信号的无失真采集, 验证了本自适应增益采集电路的性能, 在高动态幅值信号采集领域, 具有良好的应用前景。

关键词: 动生电动势; 测速; FPGA; 自适应增益; 信号采集系统

Design of Adaptive Gain Acquisition System Based on Magnetic Speed Signal

ZHANG Yongjie¹, MA Lin², DONG Haosen¹, KANG Liangwei¹, BIAN Ruiqing¹, LI Kai¹

(1. Shanxi Provincial Key Laboratory of Information Detection and Processing, North University of China,

Taiyuan 030051, China;

2. China weapon Industry Test and Research Institute, Huayin 714200, China)

Abstract: Aimed at the linear variation in the amplitude of the electromotive force signal generated by the coil magnetic sensors with the change of measuring speed, in order to realize the distortion-free acquisition of such amplitude and periodic dynamic change signals, this paper proposes an adaptive gain acquisition system with gain varying with input signal amplitude. The system takes field programmable gate array (FPGA) as a control core, analyzes the input signal amplitude, and adaptively controls the circuit gain within the range of $-20\sim 80$ dB according to the amplitude analysis result, records the current gain of the system, restores the input signal according to the current gain, and synchronously stores the gain signal and restore signal. The collected output signal amplitude with adaptive gain is controlled within the set range, the signal change details are directly observed in different amplitude ranges of dynamic signal. Through the speed signal input test within the range of $20\ \mu\text{V}\sim 10\ \text{V}$, the signal amplitude of the system with the adaptive gain is controlled within the range of $0.1\sim 4\ \text{V}$, which achieves the dynamic speed signal without distortion and verifies the performance of the adaptive gain acquisition circuit. It has a good application prospect in dynamic signal acquisition field with high amplitude.

Keywords: motional electromotive force; speed measurement; FPGA; adaptive gain; signal acquisition system

0 引言

转速测量在社会生产的各个领域具有重要意义, 比如在车辆生产和维护中转速是重要的测量以及控制对象^[1], 机床主轴等旋转设备常常需要显示转速以反映设备工作状态^[2-3], 火炮发射的弹丸也需要测量飞行过程中的转动速度以分析其稳定性^[4]。

目前对旋转物体转速测量方法主要分为外测法、内测法两种。外测法为非接触式测量, 通过光学方法或者雷达分析物体转速; 内测法是将传感器安装于被测物中, 对传

感器输出信号进行解算得到测量物的转速信息^[5]。现有应用于转速测量的传感器有磁传感器、加速度传感器、霍尔传感器、光电传感器、陀螺仪等。

线圈式地磁传感器利用其随被测物运动产生的动生电动势信号测量转速, 具有结构简单、安装方便、无累计误差等优点^[6]。目前, 已经有许多学者将地磁传感器应用于转速测量, 文献 [7] 提出了三轴正交线圈磁感应传感器, 以线圈在地磁场中做旋转运动产生反馈信号为基础测量物体旋转时的角速率, 测量范围为 $1\sim 100$ rps, 误差小于满量

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-01-23。

基金项目: 中央引导地方科技发展资金 (YDZJSX20231A025); 山西重点研发计划项目 (202202010101007); 山西省科技成果转化引导专项 (202204021301044); 山西省基础研究计划 (20210302123058)。

作者简介: 张永杰 (1998-), 男, 硕士。

通讯作者: 李凯 (1979-), 男, 副教授, 博士生导师。

引用格式: 张永杰, 马林, 董浩森, 等. 基于磁转速信号的自适应增益采集系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(3): 218-224, 231.

程的 1.8‰; 文献 [8] 提出了一种三轴“弯工型”感应线圈传感器结构, 获取传感器随弹丸运动切割磁感线时产生的感应信号, 使用自适应闭环频率跟踪测量算法实时解算弹丸转速, 消除了累计误差, 满足高速旋转弹丸转速测量要求; 文献 [9] 使用薄膜线圈式地磁传感器测量弹丸转速, 对传感器采集信号做希尔伯特变换获取包络曲线分析得到弹丸章动周期。

由于线圈传感器被测物转速变化范围大以及受环境磁场变化影响, 导致传感器输出电信号幅值跨度较大, 短时间内会从微弱信号变化为大电压信号^[10], 对采集系统的可采集信号范围提出了挑战, 要求对大信号能够无失真采集的同时微弱信号的细节信号也可以保留。可采集信号电压范围是衡量信号采集系统的一个重要指标^[11], 当输入传感器信号超出采集范围时, 将导致探测目标的关键信息无法被采集^[12]。直接使用 ADC 对传感器信号进行采集, 由于信号动态范围大, 对 ADC 的量程、分辨率要求极高, 可能会造成微弱信号部分信息丢失。将信号放大后再用 ADC 进行采集, 可以降低对分辨率的要求^[13], 但随着传感器信号幅值继续增大, 运算放大器输出放大信号会被削波或者超出 ADC 采集范围^[14], 需要设计一种能够随着输入电压值变化动态改变增益的采集电路^[15]。

针对高动态幅值变化信号的采集现有方式主要包括自动增益控制 (AGC) 电路^[16]和程控放大电路^[17-18]。AGC 电路通过检测被测信号强弱产生电压反馈信号控制可变增益放大器增益形成闭环控制系统, 使输出信号幅值保持稳定^[19-20], 但是损失了信号原本的幅值特性, 且输入信号动态范围较小^[21]。程控放大技术通过切换增益, 将放大后信号控制在合适幅度。文献 [22] 设计了一种微弱信号检测系统, 信号通过级联程控放大器并滤波后输入锁相放大器, 成功实现了对纳伏级信号的采集; 文献 [23] 设计了一种程控中频放大电路, 使用 FPGA 控制模拟开关改变运算放大器反馈电阻实现放大器增益倍数改变, 线性度与精确度良好。文献 [24] FPGA 根据按键输入控制数字电位器 MCP41010 数字量改变, 从而控制压控放大芯片 AD603 的增益倍数改变, 实现了对电压峰峰值为 50 mV~10 V 输入信号的有效采集; 文献 [25] 针对传统放大电路手动调节方式的缺点, 提出四级级联放大电路其中有三级放大电路为固定 20 dB 增益电路并起到减少信号输入噪声引入和提高抗干扰能力, 第 3 级放大电路采用两篇 HMC960 级联构成, 使用单片机控制 HMC960 实现 0~40 dB 程控放大, 总体实现 20~60 dB 程控无失真放大。

本文设计了一种针对高动态幅值范围转速信号的信号采集系统, 通过 FPGA 对高速 ADC 采集信号进行幅值分析, 并控制前处理模块对幅值过高信号进行衰减, 实现对微弱信号和高幅值信号自适应增益调节, 无需依靠手动调节增益, 处理后的信号幅值控制在设定范围内, 并在 FPGA 片上实现对增益信号的还原运算, 将数据保存后通过网口传输至上位机, 可以满足频率在 0~10 kHz 和幅值在 10 μV

~16 V 范围内转速信号的采集需求。

1 转速测量原理

线圈随旋转物体运动时, 在磁场中做周期运动, 线圈通过磁通量随线圈转动循环变化, 根据电磁感应定理, 线圈将产生周期动生电动势。如图 1 所示, 由于线圈轴线与周围空间磁场方向存在夹角, 线圈转动瞬时感应电动势表达式为:

$$E = \frac{dq}{dt} = \frac{d(NBS \cos \epsilon)}{dt} = -\mu N H S \sin \epsilon \frac{d\epsilon}{dt} \quad (1)$$

式 (1) 中, N 为线圈匝数, μ 为线圈转轴的磁导率, H 为线圈所处位置空间磁场强度, S 为线圈截面积, ϵ 为线圈轴线与周围空间磁场矢量方向的夹角。由公式 (1) 可以看出线圈动生电动势信号波形为正弦波, 线圈转速与动生电动势信号频率一致, 信号幅值与转动速度和环境磁场强度成正比。

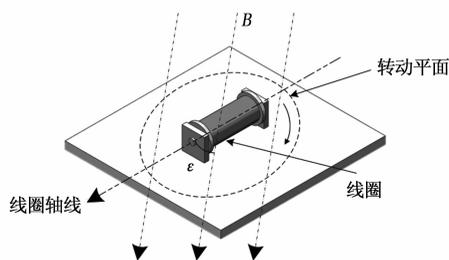


图 1 线圈空间磁场示意图

本设计针对线圈在不同转速和环境下产生的感应信号幅值范围变化大, 使用单一放大倍数难以采集在不同状态下完整动生电动势信号, 设计了一种基于 FPGA 的自适应增益采集系统, 可对频率在 10 kHz 以下幅值在 10 μV~16 V 范围内动态正弦波信号实现无失真采集。

2 系统硬件设计

图 2 展示了自适应增益采集系统的总体结构图, 由信号前处理模块、自适应增益模块和 FPGA 信号处理单元三部分组成。本系统可以对带宽在 0~10 kHz 之间, 幅值在 10 μV~16 V 范围内波动的动态信号实现 -20~80 dB 自适应增益, 自适应增益后信号幅值控制在 $A_L \sim A_H$ 伏之间, 并将增益后信号去增益还原得到实际传感器信号, 增益信号和还原信号存储在 NAND Flash 中。增益信号利于对高动态信号中不同幅值区间信号变化细节直接观察, 还原信号用来观察信号总体变化趋势和波动幅度。

2.1 信号前处理模块

信号前处理模块由信号幅值检测电路和衰减电路构成, 作用为将采集系统的输入信号幅值上限由 4 V 扩展至 16 V。本模块对输入信号幅值进行实时监测, 当信号幅值超过 4 V, FPGA 控制模拟电子开关使输入信号流经衰减电路后进入自适应增益模块。

信号幅值检测电路由两个高速电压比较器构成, 将输入信号电压与 ±4 V 进行比较, 将电压比较器的比较结果电平通过场效应管反相输出将电平限制在 0 V 和 3.3 V 以适

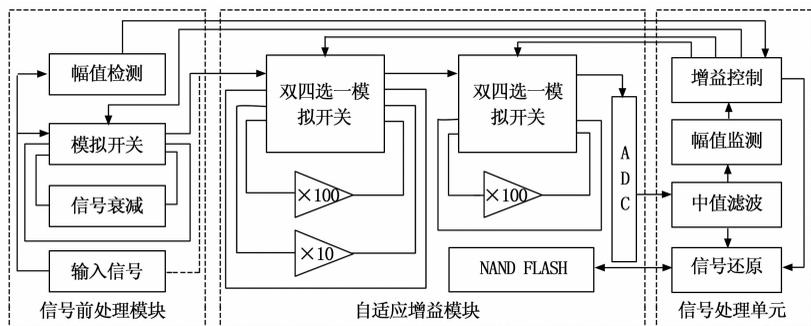


图 2 系统总体结构图

代表自适应增益模块输出信号幅值下限阈值，使 $10\ \mu\text{V}\sim 4\ \text{V}$ 范围内变化幅值的输入信号经自适应增益后控制在 $A_L\sim A_H$ 伏范围内， α 为 A_H 与 A_L 的比值。通过公式 (2) 计算可知取值范围为 $\alpha\geq 10$ ，即 A_H 至少为 A_L 的 10 倍以上。

$$\begin{cases} V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times 10^k & (k = 0, 1, 2, 3, 4) \\ 10^{-5} \leq V_{\text{in}} \leq A_H \\ A_L \leq V_{\text{out}} \leq A_H \\ 0 < A_L < A_H < 5 \\ A_L = \frac{A_H}{\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

应 FPGA 输入要求，FPGA 对场效应管输出信号电平进行监测，判断输入信号电压值的绝对值是否大于 4 V；信号衰减电路由二选一模拟开关 ADG419 和高精度电阻分压电路构成，若输入信号幅值高于 4 V 则对其进行 10 倍衰减。当输入信号微弱时，为防止引入干扰，信号可直接进入自适应增益模块。

2.2 自适应增益模块

FPGA 使用 ADC 芯片对自适应增益模块放大后的输出信号进行采集，要求自适应增益模块输出信号在 ADC 电压量程内尽可能大，以充分利用 ADC 的量程范围提高信号采集精度。本系统输入信号为幅值、频率变化的信号，FPGA 根据采样放大信号电压值控制放大倍数的切换使本模块输出信号幅值控制在 $A_L\sim A_H$ 伏之间。

自适应增益模块由两级可变增益电路级联构成，每级可变增益电路由模拟开关和不同增益的放大电路组成，切换模拟开关选通端通道实现改变放大倍数，模拟电子开关选用 ADG409，ADG409 为双四选一模拟电子开关具有低的导通电阻，通道切换时间仅为 120 纳秒。本设计输入周期信号频率上限为 10 kHz，模拟开关通道切换时间小于 $1\ \mu\text{s}$ ，本系统采样率为 100 kSPS，满足本设计采样需求。由于模拟开关切换通道先断开后闭合的特性，本模块采用切换不同运放电路改变增益，相比于改变运放电路反馈电阻改变增益，避免了使运算放大器处于开环状态增益过高导致电路损坏。

第一级可变增益电路增益可选 0 dB、20 dB、40 dB，第二级可变增益电路可选 0 dB、40 dB，两级可变增益电路级联实现 0~80 dB 增益切换。可变增益电路中增益电路为同相比例放大电路，由于本系统设计输入信号最小幅度为 $10\ \mu\text{V}$ ，要求运算放大器噪声要远小于最小输入信号的幅值。本系统运算放大器选用低功耗双运放芯片 MAX44248，该芯片增益带宽积为 1 MHz，具有轨到轨输出特性，噪声为 $50\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，可对微伏级大小的微弱信号进行放大，满足本系统设计要求。

本设计 A_H 与 A_L 取值及比例关系可由公式 (2) 计算得出。式 (2) 中 V_{in} 代表自适应增益模块的输入信号幅值， V_{out} 代表经自适应增益控制后自适应增益模块的输出信号幅值， A_H 代表自适应增益模块输出信号幅值上限阈值， A_L

由于 A_H 取值受可变增益电路的电源电压 5 V 限制，为防止放大信号削顶失真，设置 A_H 为 4， A_L 为 $4/\alpha$ 。当 α 取值接近 10 时，信号幅值在 A_L 或 A_H 附近波动会导致增益循环跳变，提高 α 取值可以为系统引入滞回特性，增强系统的抗干扰能力。

2.3 数据采集存储模块设计

数据采集电路是整个设计中不可或缺的要害，采集精度直接影响到系统性能，本系统选用 16 位分辨率模数转换芯片 ADS8681，自适应增益模块供电电压为 $\pm 5\ \text{V}$ ，ADC 电压采集范围设置为 $-5.12\sim +5.12\ \text{V}$ ，可完美实现放大信号的采集；ADC 设置采样速率为 100 kSPS，设定输入信号频率上限为 10 kHz，满足奈奎斯特采样定理。

本系统使用 NAND Flash 芯片对采集系统处理后数据进行存储，型号为镁光公司生产的 MT29F64G08CBAA，存储容量为 64 Gb，满足采集系统大容量存储需求，并且系统掉电后数据不丢失，以便后期将数据读取到上位机中。

3 片上程序设计

3.1 总体介绍

本系统信号处理单元为 FPGA，使用 Verilog HDL 语言进行程序编写，信号处理单元中包括中值滤波、幅值监测、增益控制、信号还原、信号存储、ADC 控制模块，系统总体工作信号处理流程如图 3 所示。

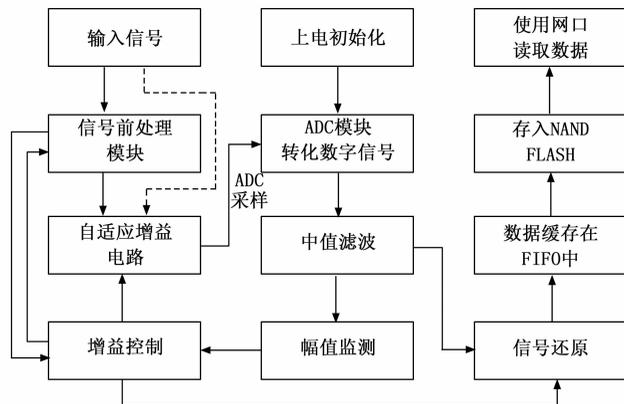


图 3 系统总体工作流程图

系统上电初始化，系统初始增益初始设置为 0 dB，等待 ADS8681 和 Nand Flash 驱动完成。初始化完成后，ADC

对自适应增益电路输出模拟信号进行采集, ADC 完成单次采样输出的 16 位数字信号更新时, ADC 控制模块输出有效标志信号作为后续模块输入信号有效的使能信号, 利用 FPGA 高速并行信号处理能力, 在 ADC 两次采样间隔时间内对完成数字信号的分析处理。

中值滤波模块对 ADC 转化数字信号进行滤波, 幅值监测模块分析滤波后数字信号, 判断增益后信号的幅值水平, 增益控制模块控制模拟电子开关 5 位组合控制信号改变增益, 根据幅值分析结果调节系统增益。在幅值监测的同时, 信号还原模块根据当前增益, 对输出数字信号还原运算, 进行加减法、乘法和移位运算得到信号放大前的实际大小, 实现对未放大输入信号的获取, 并将采集到的放大信号值和还原后的数值在 FIFO 单元缓存后写入 NAND Flash 中。数据采集结束后, 通过网口将 NAND Flash 中的存储数据读取到 PC 上位机。

3.2 自适应增益程控设计

幅值监测和增益控制模块实现本系统的自适应增益控制, 对接受到的数字信号进行分析, 发挥 FPGA 并行处理优势, 同时控制信号前处理模块和自适应增益模块的增益变化。

信号前处理模块增益控制处理流程如图 4 (a) 所示, FPGA 对信号前处理模块场效应管的输出电平 M 进行监测, M 高电平时表示此刻输入传感器信号电压值的绝对值高于 4 V, 反之则表示此刻输入传感器信号电压值的绝对值低于 4 V。FPGA 检测到 M 出现高电平, 则代表识别到此刻输入信号幅值高于 4 V, 立即控制前处理模块对输入信号 -20 dB 衰减; 由于输入信号为类正弦波信号, 在信号幅值大于 4 V 状态下, 信号周期中某些时刻仍然存在电压值的绝对值小于 4 V 的情况, 为准确识别输入信号幅值小于 4 V 的状态, 需要引入计数器单元, 通过时钟计数判断输入信号幅值持续小于 4 V 的时间, 若 M 为低电平持续时间大于 δ 秒, 则判定输入信号幅值小于 4 V, 控制前处理模块切换至无衰减状态或保持在无衰减状态。

自适应增益模块的增益控制处理流程如图 4 (b) 所示, FPGA 幅值监测模块对中值滤波后数字信号等效电压值进行分析, 实现对输入信号经信号调理电路后幅值的判断, 增益控制模块根据幅值检测结果动态调节增益, 使自适应增益电路输出信号幅值保持在 $A_L \sim A_H$ 伏范围内。具体实现流程如下, 幅值监测模块将中值滤波后数字信号等效电压值分别与 $\pm A_H$ 和 $\pm A_L$ 进行比较, 识别信号状态。当数字信号等效电压值大于 A_H 或小于 $-A_H$, 识别到当前增益过高, 控制电路增益降低 20 dB; 对增益过低状态的识别同样需要引入计数器单元, 当数字信号等效电压值大于 $-A_L$ 且小于 A_L 的持续时长超过 δ 秒, 识别到当前增益过低, 控制

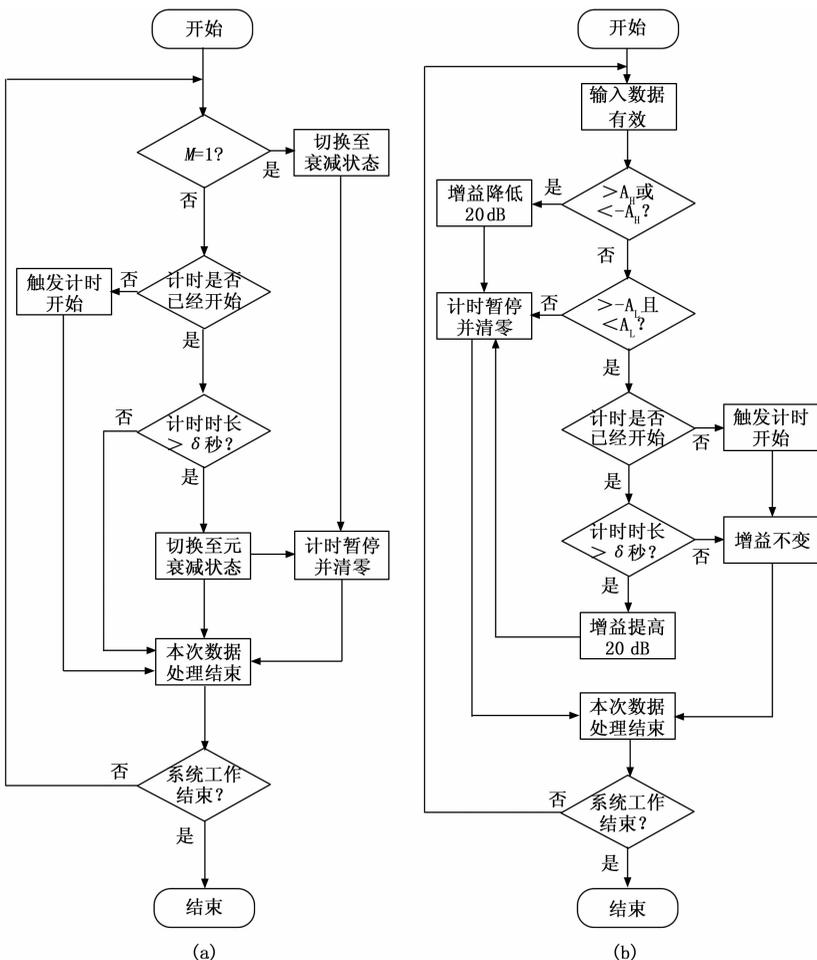


图 4 自适应增益控制流程图

电路增益增加 20 dB。

3.3 自适应增益模块参数调节

δ 为本系统增益过低时增益提高的响应时间。对于非周期信号, δ 取值可以很小; 对于周期信号, 为从放大信号中观察信号特征, 信号幅值稳定时增益也应该处于稳定状态, δ 取值应大于周期时长。当 δ 取值过小会导致系统增益循环改变, 信号波形如图 5 (a) 所示情况, 当 δ 取值大于信号周期, 信号波形如图 5 (b) 所示, 放大信号保持了原本的信号特征。

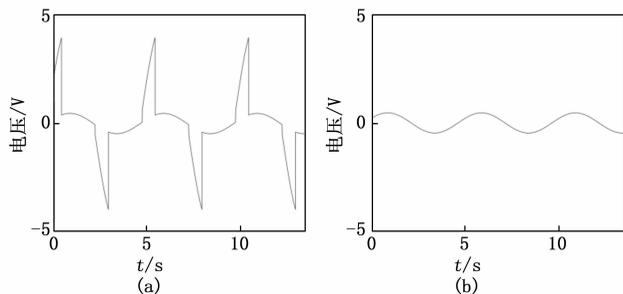


图 5 增益振荡信号波形

$$t = (\arcsin \frac{10A_L}{A_H}) / (\pi f) = (\arcsin \frac{10}{\alpha}) / (\pi f) \quad (3)$$

但是 δ 过大会导致信号幅度突然减小时，增益提高响应速度慢，影响采集精度。当已知输入信号特征时， δ 取值可以进一步降低，比如输入信号为频率大于 f 且幅值稳定的正弦波信号， δ 取值大于 t 即可避免系统增益循环跳变， t 通过公式 (3) 计算得到，相比于 $1/f$ 有效减小。取 α 为 40 时，图 5 所示信号的最小 δ 值通过公式 (3) 计算为 0.42 秒，远小于信号周期值 5 秒。

3.4 中值滤波模块设计

由于对传感器信号进行采集、传输过程中会引入噪声，使用 FPGA 片上中值滤波对数据进行实时处理可以有效将异常数据滤除，提高信号的信噪比。中值滤波模块对 ADC 本次采样和前 8 次采样的数字信号值进行缓存，使用快速中值算法模块对这 9 个数据进行排序，获取其中中位数作为本次的输出结果，从输入数据有效到完成中值滤波仅需 4 个时钟即可完成，满足本系统数据实时处理的需求。

中值滤波模块 RTL 视图如图 6 所示，当 en 使能信号有效表示 ADC 转换数据完成，此时将输入信号 data_in 存入 cache 模块；out_en 信号有效代表中值滤波模块本次滤波完成，后续模块在 out_en 有效时对滤波处理后数据进行读取；valid 信号有效代表 cache 模块是否完成缓存 9 个有效数据，缓存完成 9 个有效数据之前，中值模块输出结果直接为输入信号，在完成 9 个有效数据缓存后输出数据为中值滤波后的结果。

4 试验验证

4.1 试验装置介绍

转速信号采集试验装置如图 7 所示，伺服电机可设置

转速范围为 0~6.7 rps，高速转台可设置转速范围为 5~100 rps，将传感器安装于采集系统，分别使用伺服电机和高速转台进行低转速和高转速实验产生转速信号，使用本系统进行信号采集。为兼顾低转速和高转速的传感器信号采集，本系统 A_L 设置为 0.1 伏， δ 设置为 0.1 秒。

将自适应增益采集电路输入端短接，零输入状态下采集系统噪声如图 8 所示，系统零输入电压噪声幅值小于 $7 \mu V$ 。

4.2 伺服电机转速信号采集

手动调节伺服电机转速从 1 rps 开始逐渐增大至 6.67 rps 然后再逐渐减小至 1 rps，采集到自适应放大信号如图 9 (a) 所示，还原实际大小转速信号如图 9 (b) 所示。感应信号频率与电机转动频率同步，幅值与转速成正比，解算传感器时间转速曲线如图 9 (c) 所示，与设定实际转速一致。

伺服电机初始转速为 1 rps，此时放大采集信号幅值为 1.9 V，当前增益为 80 dB；随着转速的提高，在第 11.34 秒时放大采集信号幅值首次超过 4 伏，此时增益由 80 dB 自动降至 60 dB，增益变化时刻还原解算信号波形未发生失真；在后续时间采集的放大信号，由于信号幅值保持在 0.1~4 V 范围内，增益未发生改变。

使用本系统对伺服电机 1/6 rps 时传感器信号进行采集，图 10 (a) 为的采集信号，信号幅值为 $44 \mu V$ ，周期为 6 秒，与设定转动周期一致。对信号进行低通滤波处理，滤波结果如图 10 (b) 所示，由于伺服电机转动不连续平稳，采集信号中具有 10 Hz 谐波，使得采集信号波形不平滑。

4.3 高速转台转速信号采集

设置高速转台转速分别为 5、10、15、30、50、60 rps

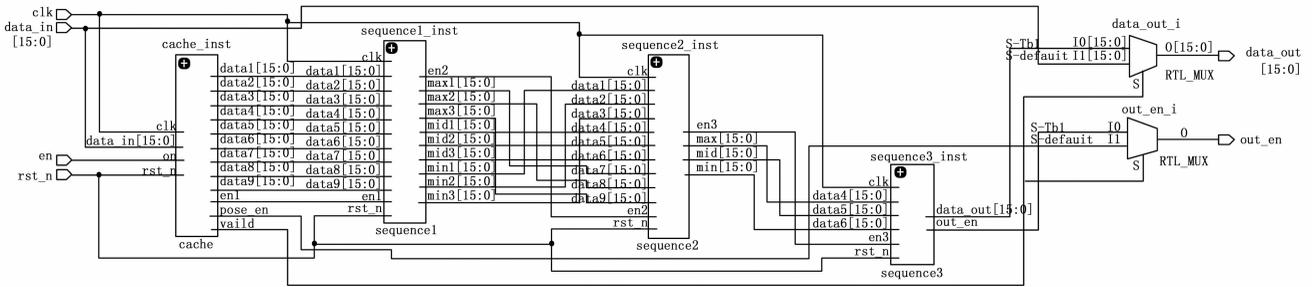


图 6 中值滤波 RTL 视图

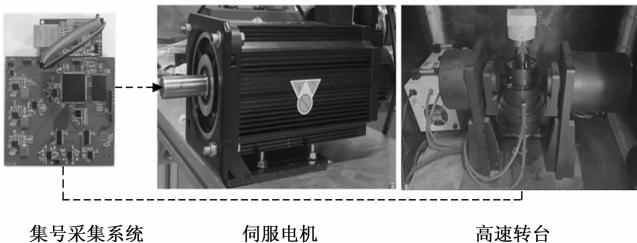


图 7 转速信号采集试验图

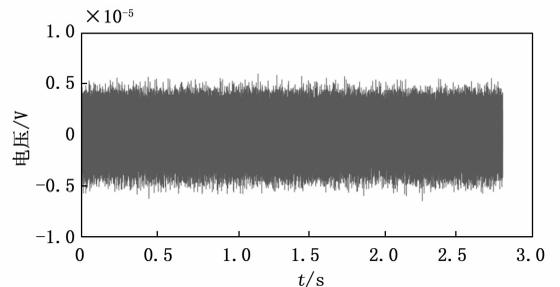


图 8 系统零输入噪声

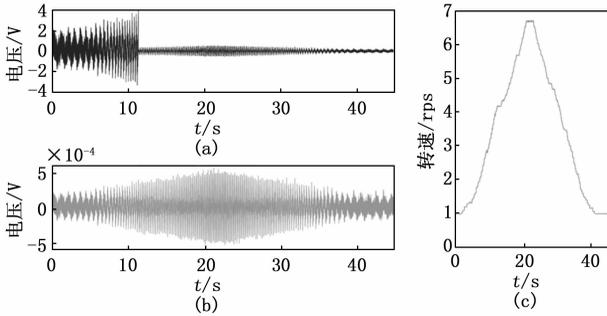


图9 伺服电机转速信号

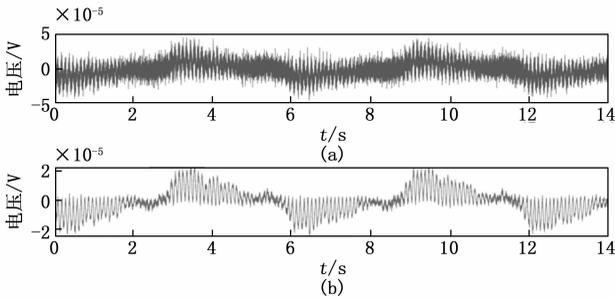


图10 伺服电机 1/6 rps 转速信号

对线圈动生电动势信号进行采集, 并对采集数据进行频谱分析, 频谱分析结果集中频率与设置转台转速相一致, 波形如图 11 所示。

控制高速转台转速 0-10-30-50-30-10-0 rps 变化, 采集放大信号如图 12 (a) 所示。系统增益随着输入信号幅度水平改变, 增益变化波形如图 12 (b) 所示, 图 12 (a) 箭头所指局部信号放大图显示了增益变化时刻的信号波形细节。转台静止时, 采集传感器信号噪声幅值为 20 μV , 此时系统增益为 80 dB; 当转台速度由 0~10 rps 转速提升过程中放大信号电压值小于 -4 V 时, 增益由 80 dB 降至 60 dB; 在 10~30 rps 转速提升过程中放大信号幅值再次超过 4 V, 增益由 60 dB 降至 40 dB; 从第 39.1 秒开始信号幅值持续小于 0.1 V, 第 39.2 秒增益由 40 dB 提高至 60 dB; 增益提高后第 41.3 秒信号幅值再次持续小于 0.1 V, 第 41.4 秒增益由 60 dB 提高至 80 dB。

还原传感器信号如图 12 (c) 所示, 测得转速信号幅值范围为 20~10 600 μV 。对传感器信号进行频域分析, 分析结果如图 12 (d) 所示, 信号频率集中在 10、30、50 Hz。根据传感器信号时间频率特性解算时间转速曲线如图 12 (e) 所示, 前 38 秒转速与设定转速相同, 但是 38 秒后高速转台转速失控, 转速未能稳定在 10 rps, 在第 42 秒时高速转台停止旋转, 分析结果与实际转速一致。

控制伺服电机和高速转台使用本测

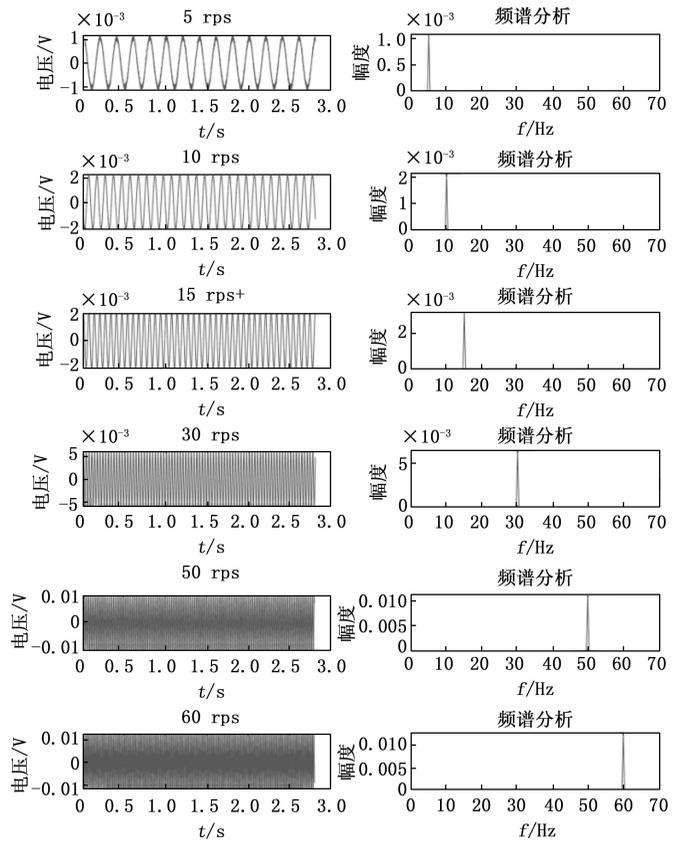


图11 不同转速下信号波形与频谱分析

速装置对不同转速下动生电动势幅值进行测量并统计, 幅值随转速变化折线图如图 13 所示, 从图中可以看出在同一设备上动生电动势幅值与转速为一次函数关系。

图 13 中箭头所指局部放大图, 可以发现伺服电机和高速转台都处于 5 rps 时, 动生电动势信号幅值尽管频率相同

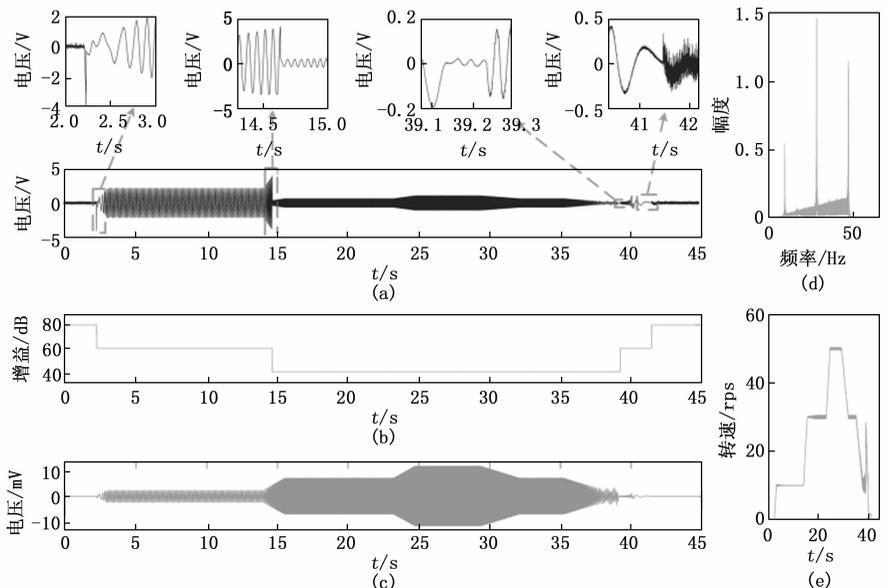


图12 高速转台采集信号

但是幅值不同,高速转台环境下信号幅值为伺服电机的 2.6 倍。分别使用磁通门传感器对伺服电机和高速转台工作状态下测速装置位置环境磁场进行测量。伺服电机环境磁场为 56 850 nT,高速转台环境磁场为 148 759 nT,相同转速下,环境磁场大小比值与动生电动势幅值比一致。

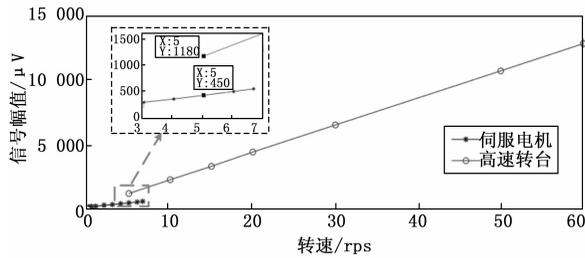


图 13 转速信号幅值折线图

4.4 示波器信号采集

使用信号发生器产生频率为 100 Hz 的正弦波信号,以 0.05 V 为步进控制幅值由 0.05 V 递增至 10 V 后,再由 10 V 递减至 0.05 V,模拟更高转速下传感器信号,使用本系统对其进行采集。自适应增益后采集信号如图 14 (a) 所示,增益变化如图 14 (b) 所示,图 14 (a) 箭头所指局部信号放大图显示了增益变化时刻的信号波形,增益变化时刻信号未发生失真。还原信号波形如图 14 (c) 所示,与设置信号发生器生成波形一致。

4.5 实验结果分析

本系统分别对磁转速传感器在不同转速状态下的输出信号进行了采集,将系统存储数据读出到上位机后,对实验采集数据绘图进行分析。自适应增益后的数据绘图波形表现为在不同时间区间增益不同,信号幅值控制在了 0.1~4 V 范围内,实现了不同幅值区间传感器信号无需对幅值放大即可观察波形变化细节;去增益还原数据绘图波形变化连续,从幅值变化趋势中可以直观的看出转速变化规律,与原理分析一致。本系统成功实现了对输入信号幅值状态的识别,FPGA 根据识别结果动态调节系统电路增益,控制 ADC 输入电压幅值在 0.1~4 V 范围内,并在片上实现了对自适应增益后的电压值去除增益,计算出了除以放大倍数后实际输入传感器信号的真实值大小。

传感器输出信号绘图波形特征为类正弦波,通过提取数据时频信息与实验时实际设置转速对比,发现转速信号频率与传感器单位时间内转动圈数相同;在同一磁场环境下,转速信号幅值与转速大小成正比例关系;不同磁场环境下,相同转速下传感器输出信号幅值与磁场强度成正比例关系。实验分析结果与原理分析推导结论一致,验证了磁传感器测量转速的可行性和正确性。

5 结束语

本文设计了一种以 FPGA 为控制核心的自适应增益采集系统,对高幅值范围内的转速信号进行采集。本系统经过对转速传感器和信号发生器生成动态幅值信号采集实验,

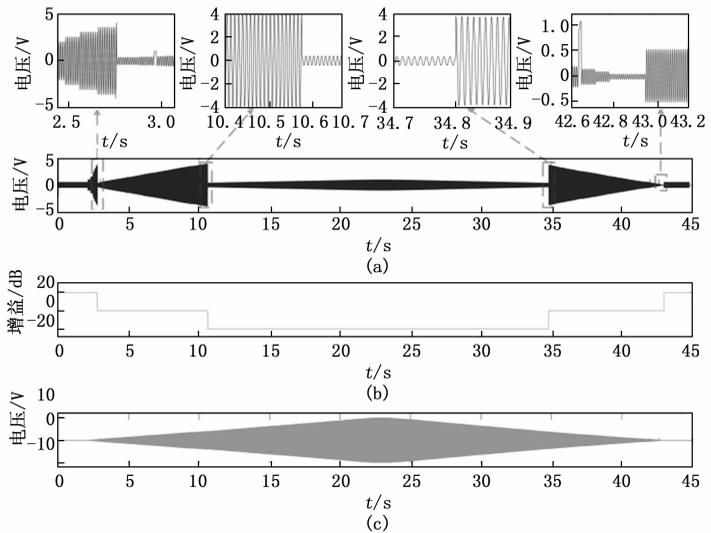


图 14 信号发生器信号测试

幅值在 $20 \mu\text{V} \sim 10 \text{V}$ 范围内波动的信号经自适应增益采集系统后,放大信号幅值控制在了 0.1~4 V,并根据采集信号增益还原得到实际输入信号,还原信号解算转速信息与实际设置输入一致,验证了采集信号的正确性,且信号无明显失真,实现了对高幅值范围内动生电动势信号的采集。

参考文献:

- [1] QIAO W, LU D. A Survey on Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (10): 6536-6545.
- [2] 王玉东. 涡扇发动机熄火故障在线检测方法 [J]. 航空动力学报, 2021, 36 (7): 1406-1416.
- [3] 崔佳斌,李聪波,曹华军,等. 基于 SOM-Kmeans 的机床能效等级评价方法 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (7): 295-306.
- [4] 吴潇璞,王亮宽,周加水,等. 弹丸旋转速度对侵彻运动靶板影响 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44 (10): 230-235.
- [5] 尚剑宇,邓志红,付梦印,等. 制导炮弹转速测量技术研究进展与展望 [J]. 自动化学报, 2016, 42 (11): 1620-1629.
- [6] 段偲丽,管雪元,李文胜. 基于磁传感器的炮弹姿态测量解算 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (2): 31-36.
- [7] KAI L, YUAN L, YAN H. An EM Induction Hi-Speed Rotation Angular Rate Sensor [J]. Sensors, 2017, 17 (3): 610.
- [8] 李剑,武丹,韩焱. 基于交流励磁的高载体转速测量传感器 [J]. 探测与控制学报, 2017, 39 (4): 39-42.
- [9] 杨文,于文松,裴东兴,等. 弹载弹丸参数测试技术的研究 [J]. 电子器件, 2016, 39 (3): 667-670.
- [10] 徐超,马瑶瑶,黄玉玲,等. 基于反相积分峰值检测法的高频信号 AGC 系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2023 (1): 65-69, 77.
- [11] 滕云田,胡星星,王喜珍,等. 用多通道 AD 分级采集扩展地震数据采集器的动态范围 [J]. 地球物理学报, 2016, 59 (4): 1435-1445.

(下转第 231 页)