

Design of Ultrasonic Wind Measurement System for Wind Power Generation

Xuerao Ma Jianglong Wang Gangfei Chen

Datang Yunnan Power Generation Co., Ltd. Dianzhong New Energy Division, Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

To improve the measurement accuracy of wind speed/direction and enhance the anti-interference ability in complex environments, this study designs a three-dimensional wind measurement system based on the ultrasonic time difference method. In this paper, an orthogonal layout of ultrasonic transducer arrays is adopted, combined with the chaotic genetic particle swarm optimization algorithm to suppress noise interference. Real-time data calculation is achieved through the STM32 microcontroller, and an upper computer interaction system supporting the GEMESA protocol is developed. The experimental results show that in the wind tunnel test, the relative error of the system wind speed measurement is stable within the range of 0.8%~0.9%, which meets the accuracy requirement of $\leq 1\%$ for ultrasonic anemometers in wind power generation as stipulated in NB/T10210-2019. This system significantly reduces the signal distortion rate and the deviation in rainy and foggy environments, providing a highly reliable solution for intelligent wind measurement in wind farms.

Keywords

wind power generation; Ultrasonic wind measurement; systems design

用于风力发电的超声波测风系统设计

马学绕 王江龙 陈刚飞

大唐云南发电有限公司滇中新能源事业部, 中国·云南 昆明 650000

摘要

为提升风速/风向测量精度并增强复杂环境抗干扰能力,本研究设计了一种基于超声波时差法的三维测风系统。本文采用正交布局的超声波换能器阵列,结合混沌遗传粒子群优化算法抑制噪声干扰,通过STM32微控制器实现实时数据解算,并开发支持GEMESA协议的上位机交互系统。实验结果表明:在风洞测试中,系统风速测量相对误差稳定在0.8%~0.9%区间,符合NB/T10210—2019对风力发电超声波风速仪 $\leq 1\%$ 的精度要求。该系统将信号失真率、雨雾环境偏差显著降低,为风电场的智能化测风提供了高可靠性解决方案。

关键词

风力发电; 超声波测风; 系统设计

1 引言

在全球能源结构转型背景下,风力发电作为清洁能源的核心组成部分,其运行效率与稳定性直接依赖于精准的风速风向监测。传统机械式测风装置因机械磨损导致平均无故障时间(MTBF)不足8000小时,且存在 $\pm 3\%$ 的测量误差,严重影响风机功率曲线优化与偏航控制精度^[1]。超声波测风技术通过时差法测量原理,利用高频声波在气流中的传播特性差异实现非接触式测量,从根本上消除了机械磨损问题,可将测量精度提升至 $\pm 0.5\%$ 以内,为现代大型风电机组提供了更可靠的气象数据来源。为此,本研究以2MW级风力发电机组为应用对象,提出一种基于STM32H743与TDC-

GP21时间数字转换芯片的超声波测风系统解决方案。

2 超声波测风系统原理

2.1 基本测量原理

超声波测风系统主要由成对安装的超声波换能器、信号处理单元和计算模块组成。工作时,一对换能器交替作为发射器和接收器,分别测量超声波沿顺风方向和逆风方向的传播时间^[2]。当存在风速时,顺风方向的声波传播速度会加快(声速+风速),而逆风方向会减慢(声速-风速)。系统通过精确测量这两个方向的时间差 Δt ,结合已知的换能器间距 L ,利用公式 $V=L/2 \times (1/t_1-1/t_2)$ 计算出风速分量,其中 t_1 和 t_2 分别为顺逆风传播时间。对于三维风速测量,通常采用正交布置的三对换能器,分别测量三个方向的风速分量,再通过矢量合成得到总风速和风向。

【作者简介】马学绕(1989-),男,回族,中国云南红河州人,本科,工程师,从事新能源风电研究。

2.2 关键技术分析

2.2.1 超声波换能器驱动与信号处理

该系统核心采用压电陶瓷换能器，通过推挽式驱动电路产生 200Vpp 高压脉冲，利用变压器实现阻抗匹配（匝数比 10-15 倍）以提升声压强度^[1]。发射端采用数字信号调制技术，通过微处理器编程控制频率、相位及脉宽参数，实现了 0.1m/s 级的高精度测量。接收信号处理采用时差法计算风速，通过多普勒效应解析风向，配合自适应滤波算法消除环境干扰。特殊设计的无机械部件结构使其在 -30℃至 70℃ 环境下仍保持稳定工作。

2.2.2 噪声抑制算法

针对复杂环境噪声，系统采用希尔伯特-小波变换进行时频联合分析，通过多尺度分解有效分离风信号与高频噪

声。进一步引入混沌遗传粒子群优化（CGPSO）算法，该算法结合混沌映射的遍历性和遗传算法的选择机制，优化小波阈值函数参数，使信噪比提升 40% 以上。实测表明，该混合算法在 8 级强风条件下仍能保持测量误差控制在 $\pm 1.5\%$ 以内。

3 系统硬件设计

3.1 核心器件选型

3.1.1 STM32/FGPA 微控制器性能对比

在核心器件选型中，本文优先选用了 STM32 与 FPGA 两种微控制器，其中，STM32G4 系列新增数学加速器可提升风速算法效率，FPGA 在超声波驱动时序精度上具有不可替代性，以上两种控制器性能对比结果如表 1 所示。

表 1 STM32 与 FPGA 两种微控制器性能对比结果

对比维度	STM32 微控制器	FPGA
处理架构	ARMCortex-M4 内核	可编程逻辑单元并行计算架构
核心性能	主频 170-180MHz 46 单周期乘法指令 16 位 ADC 采样	延迟低至纳秒级 支持多通道并行处理
信号处理能力	适合实时数据融合与协议栈处理	高速算法实现（如 FFT、数字滤波）
外设集成	丰富接口（UART/SPI/I2C）	需外部扩展通信模块
开发复杂度	基于 C 语言生态，开发周期短	需硬件描述语言（Verilog/VHDL）

3.1.2 高灵敏度超声波传感器参数设计

在设计高灵敏度超声波传感器参数时，需做好以下几点：①频率选择：典型工作频率 40-200kHz，低频（40kHz）穿透性强但分辨率较低，高频（200kHz）可提升测风精度但易受大气衰减影响。②灵敏度优化。采用差分接收电路设计，信噪比需 $> 60\text{dB}$ ，配合 STM32 的 12 位 ADC 实现 0.1m/s 风速分辨率。③环境适应性。传感器需具备 IP67 防护等级，工作温度范围 -30℃~70℃，以应对风力发电场恶劣环境。④功耗控制。选用脉冲式驱动模式，峰值电流 $\leq 50\text{mA}$ ，与 STM32 的低功耗模式（睡眠电流 $2\mu\text{A}$ ）协同降低系统能耗。

3.2 模块化架构

本文系统采用三层分布式架构：传感层以四通道超声波换能器阵列为核心，通过时差法测量三维风速风向；处理层搭载 32 位 ARMCortex-M7 微控制器，集成 FFT 算法加速器实现 0.01m/s 分辨率；通信层配置双 CAN 总线接口，支持 GEMESA、Modbus 等工业协议。各模块通过标准 RJ45 接口互连，满足 IP67 防护等级，适应 -40℃~85℃ 工作环境。

3.2.1 发射/接收电路优化

发射电路采用 MAX14808 驱动器配合中心频率 40kHz 的压电陶瓷换能器，通过可编程 DDS 芯片生成 7 周期猝发波，发射功率动态可调（10-100Vpp）以适应不同大气衰减。接收链路设计三级信号调理：前置放大器采用 AD8421 实现 80dB 增益，带通滤波器（38-42kHz）抑制环境噪声，最后经 24 位 $\Sigma-\Delta$ ADC 采样。创新性引入温度补偿电路，通过

DS18B20 实时校准声速，使风速测量误差 $\leq \pm 0.1\text{m/s}$ 。

3.2.2 通信规约转换模块

基于 STM32H743 的双协议栈架构，硬件集成隔离型 CAN 收发器（ISO1050）和 RS-485 接口（ADM2587E）。软件层面实现 GEMESA 协议与 IEC61400-25 标准的映射转换，具体设计注意事项如下：①数据帧重组：将原始风速数据包（包含时间戳、质量控制位）转换为 GEMESA 要求的 32 位浮点格式。②同步机制：采用 PTPv2 协议实现与风机主控系统的 μs 级时间同步。③故障诊断：内置 BIST 自检功能，可上报传感器断线、通信超时等 16 类故障代码模块通过 EMC4 级测试，在 50m 电缆传输场景下误码率 $< 10^{-8}$ 。

4 系统软件设计

4.1 实时数据处理流程

在风力发电领域，超声波测风系统通过无机械磨损的时差法测量技术，实现了对风速风向的高精度动态监测，其实时数据处理流程如下：

①数据采集层。系统通过超声波传感器阵列（通常配置 4 个正交探头）发射 40~200kHz 脉冲信号，接收端采用 TDC-GP2 高精度时间测量芯片记录声波飞行时间差，分辨率可达 0.1ns。ADS7864 多通道 ADC 同步采集环境温度湿度补偿参数，采样率不低于 500kS/s 以应对湍流波动。

②预处理阶段。原始数据首先进行滑动平均滤波（窗口宽度 50ms）消除高频噪声，随后通过塔影修正算法补

偿测风塔结构对气流的扰动。对于异常值（如瞬时风速 > 50m/s），触发直接替换机制调用备用传感器数据，要求相关系数 $R^2 \geq 0.95$ 。FPGA 实时计算三维风速矢量，采用双频信号交叉验证降低多路径效应误差。

③核心算法处理。基于时差法的风速计算引入温湿度补偿系数：

$v=(L/2 \Delta t) * (1+0.0167 * T-0.0011 * RH) / L$ 为探头间距，T 为温度 (°C)，RH 为相对湿度

风向解算采用最小二乘法拟合各探头数据，角度分辨率 0.1° 。每 200ms 生成一组带时间戳的测量值。

④数据分发与存储。处理结果通过 RS422 接口传输至 SCADA 系统，同时写入环形缓冲区（深度 $\geq 1h$ ）。历史服务器采用 pSpace 时序数据库实现秒级压缩存储，实时服务器双机热备切换时间 < 50ms。WEB 服务层提供 RESTful API 供风功率预测模型调用。

⑤质量控制闭环。动态校验模块持续比对超声波与激光测风仪数据，偏差超阈值（风速 $\pm 0.5m/s$ 或风向 $\pm 5^\circ$ ）时自动触发传感器校准流程。数据有效性标记遵循 IEC61400-12 标准。

4.2 上位机功能开发

第一，动态监测模块：基于 THS1206 芯片采集 22 通道数据（含 8 路交流电压 / 电流），采用波束成形算法抑制噪声干扰，实现三维风速风向动态显示。第二，智能预警系统：建立风速预测模型，当检测到超限风速（> 25m/s）或异常设备倾斜时，通过继电器触发安全停机机制。第三，数据管理：采用 SQLite 数据库存储历史数据，支持按时间范围生成 CSV 格式报表，并集成 5G 模块实现云端同步。

5 实验验证

5.1 测试平台搭建

在本次实验中，选用低速回流式风洞（LWT-1000）作为基准环境，配备可编程风速控制器（0-30m/s 连续可调）。测试系统由三个关键模块构成：①被测系统：安装于风洞中心截面的超声波测风阵列（3 组换能器呈 120° 分布）。②参照系统：英国 GillWindMasterPro 三维超声风速仪（精度 $\pm 1\%FS$ ）。③干扰模拟装置：雨雾发生器（模拟 5~20mm/h 降水）和电磁干扰源（10~100MHz 扫频）。整个测试流程遵循 IEC61400-12-1 标准，每个风速点采集 300 组数据，采样间隔 100ms。硬件平台采用 Xilinx Artix-7 FPGA 实现实时信号处理，上位机通过 LabVIEW 记录原始数据。

5.2 性能指标分析

5.2.1 系统测量精度验证

系统测量精度验证结果如表 2 所示，从表 2 中的数据可以获得以下几个结论：①误差分布特性。绝对误差随风速增大呈线性增长，但相对误差稳定在 0.8%~0.9% 区间，符合 NB/T10210—2019 对风力发电超声波风速仪 $\leq 1\%$ 的精度

要求；5m/s 低风速段误差仅 0.04m/s，优于矿用传感器同工况 $\pm 0.1m/s$ 的指标。②技术优势体现。20m/s 高风速下误差 0.18m/s，较机械式设备（典型误差 2m/s）提升 91% 测量精度；全量程相对误差波动 < 0.1%，证明 FPGA 时序控制算法有效抑制了温漂影响。

表 2 系统测量精度验证结果

标定风速 (m/s)	本系统测量值 (m/s)	绝对误差 (m/s)	相对误差 (%)
5.0	4.96	0.04	0.8
10.0	9.91	0.09	0.9
15.0	15.12	0.12	0.8
20.0	20.18	0.18	0.9

5.2.2 系统抗干扰性能验证

将机械式设备设置为参照系统，对比参照系统与本文系统之间抗干扰性能差异性。对比结果如表 2 所示，从表 3 中的数据可以看出：①电磁干扰表现。本系统采用 FPGA 硬件滤波 + 混沌遗传算法优化，将信号失真率控制在 0.3% 以内，显著低于机械式传感器因金属部件感应产生的 5% 失真。②雨雾环境影响。超声波测量不受水滴附着影响，雨雾偏差仅 0.15m/s，而机械叶轮因结冰导致摩擦系数变化，误差可达 2m/s。

表 3 不同系统抗干扰性能对比结果

测试条件	本文系统指标	机械式设备指标	性能提升幅度
电磁干扰失真率	< 0.3%	> 5%	94% ↓
雨雾环境偏差	$\leq 0.15m/s$	2m/s (叶轮结冰)	92.5% ↓

6 结语

本研究设计的超声波测风系统通过时差法三维测风模型，结合混沌遗传粒子群优化算法，实现了 0.08m/s 的测量精度。硬件上采用 STM32H743+FPGA 混合架构，支持 GEMESA 协议转换，在风洞测试中，系统风速测量相对误差稳定在 0.8%~0.9% 区间，符合 NB/T10210—2019 对风力发电超声波风速仪 $\leq 1\%$ 的精度要求。同时，与机械式设备相比，该系统将信号失真率、雨雾环境偏差显著降低，分别控制在 0.3%、0.15m/s 以内。总之，该系统可有效降低风速测量误差、信号失真率和雨雾环境偏差，符合风电场的智能化测风实际应用需求。

参考文献

- [1] 王宇峰,裴科伟,于会勇.用于风力发电的超声波测风系统设计[J].风机技术,2022(4):53-55.
- [2] 李研达,薛琦.风力发电机的高精密风速检测系统设计[J].仪表技术与传感器,2023(12):67-71.
- [3] 陈伟,张有为.2D型超声波测风仪在风力发电机上应用的分析[J].仪器仪表用户,2024,23(8):90-92,89.