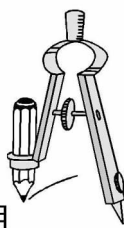


仪器
设计
与
使用



矢量风速仪的设计

涂正远,董锡杰,孙 博,赵 凯,卜坤亮,胡槟枫,袁 洁
(武汉科技大学理学院应用物理系,湖北武汉 430065)

摘 要:为了解决机械式风速仪对方向测量的局限性,使用了单向叶轮传感器的矢量三维风速仪,风速传感器采用叶轮带动空心杯电机的结构,通过单片机对三维组合单向速传感器进行采集和风速矢量合成,实现了对风的大小和方向的测量.实验结果表明:该设计在对风速矢量的二维测量上,风速大小和方向的测量均具有很高的可靠性;在对风速矢量的三维测量上,风速大小的测量值也比较精确,风速方向的测量值误差比较小.

关键词:三维风速矢量;风速大小;风速方向

中图分类号:P414.7 文献标识码:A 文章编号:1005-4642(2014)02-0016-05

1 引 言

风是影响人们生产生活的重要的气象要素之一,在工业、农业、体育等领域中都需要用到风速风向测量系统,所谓的风速风向测量系统就是指风速仪.风速仪一直是国内外气象仪器研究的热点,当前使用的风速仪种类繁多,工作原理和性能各不相同.目前应用较多的有机械式、超声声速式和热敏式风速仪.超声声速式和热敏式风速仪以其高灵敏度高精度^[1-2]而在特殊领域有着重要应用,但由于其仪器复杂、成本较高以致价格昂贵,不利于推广.机械式风速仪的结构简单,理论研究比较成熟,且具有测量精度高、测量范围广、可靠性高、价格低等优点,从测量性能、可靠性、价格等因素综合考虑,机械式风速仪更具实用性.

传统的机械式风速仪大多没有对风速方向进行测量,而即使具备一定方向测量功能的风速仪也仅限于风速矢量的二维方向测量.然而,相较于风速大小,风速方向对人的生产生活同样影响广泛,对风速方向更细致的测量也显得尤为迫切.为此设计了一种机械式风速仪——矢量风速仪,除了具备现有的机械式风速仪的优点及功能外,它还能实现对风速矢量的三维方向测量.

2 矢量风速仪的设计原理

首先根据一般叶轮式风速仪对风速方向的敏

感性^[3]提出叶轮式三维风速仪的设计概念,在保留一般机械式风速仪优点的基础上,实现对风速矢量的三维方向测量.

2.1 三维风速矢量的分解与合成

自然界中的风速是矢量,可以分解为空间中相互垂直的 3 个分矢量^[4].如图 1 所示,在三维直角坐标系中,设 i, j, k 分别表示 x, y, z 轴正方向的单位向量,并称它们为坐标系的基向量,由向量相加法则有 $v = v_x i + v_y j + v_z k$.

在实际应用中,三维风速传感器位于坐标系的 O 点,该传感器基座的 3 个方向 $+x, +y, +z$ 上各安装 1 个单向叶轮式风速传感器,分别测量这 3 个方向的风速分量大小,即 v_x, v_y, v_z ,由 v_x, v_y, v_z 合成速度矢量 $v = v_x i + v_y j + v_z k$.相应地

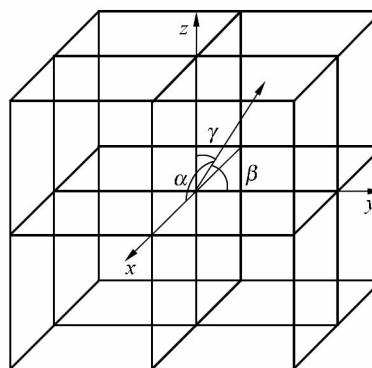


图 1 三维风速矢量的分解图

收稿日期:2013-10-31

资助项目:国家大学生创新创业训练计划(No. 201210488013)

作者简介:涂正远(1992-),男,湖北孝感人,武汉大学理学院应用物理系 2010 级本科生.

通讯作者:董锡杰(1980-),女,黑龙江密山人,武汉科技大学理学院应用物理系讲师,博士,研究方向为材料物理.

有 $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$, $\alpha = \arccos\left(\frac{v_x}{v}\right)$, $\beta = \arccos\left(\frac{v_y}{v}\right)$, $\gamma = \arccos\left(\frac{v_z}{v}\right)$.

2.2 单向叶轮式风速仪的方向敏感性

方向敏感性^[3]是指:当测风轴与风速方向成一定角度 θ 时,所测得的风速大小与实际风速大小之比与风速矢量的大小无关而只与 θ 角有关,即在同样的风速大小下测量风速值随着 θ 角的变化而变化. 在较小的测量角下,测量风速大小与实际风速大小之比往往与 θ 角的余弦值具有一定可比性:当测量角度在 $0 \sim 30^\circ$ 时,该比值与测量角度的余弦值相当;当测量角度在 $30^\circ \sim 70^\circ$ 时,该比值与测量角度的余弦值相差较大,但仍然可以通过实验曲线对测量结果有效地修正. 这也就决定了单向叶轮式风速传感器对风速的矢量解析能力. 鉴于测量结果的修正在程序中较难实现,在设计概念的验证中假设测量值与风速值成严格的余弦关系. 即 $v_{\text{测}} = v \cos \theta$.

2.3 单向叶轮式风速传感器的原理

采用的单向叶轮式风速传感器由 1 个叶轮(即螺旋桨)与 1 个空心杯电机构成. 测风速时,风带动叶轮旋转并连动使得电机中的绕组旋转,绕组切割磁感线产生感生电压 U ,以其作为电信号由单片机完成信号采集.

2.3.1 风速与转子转速的关系

叶轮的叶片与电机轴线的夹角记为 ϕ ,根据流体动量矩原理,当流体流动冲击叶轮叶片时,流体将有力作用在叶片上,使其转动. 设叶片旋转时的平均旋转半径为 r ,叶栅的流通截面为 S ,气体流速为 v_0 ,被测流体的流量为 Q ,叶片转速为 n ,则有: $Q = \frac{2\pi r S}{\tan \phi} n$, 即^[5] $n = Q \frac{\tan \phi}{2\pi r S}$. 当叶轮的结构一定时, r, S, ϕ 为定值, $\frac{\tan \phi}{2\pi r S}$ 为常量,流量 Q 正比于叶轮的转速 n , 设常量 $\frac{\tan \phi}{2\pi r S}$ 为 C_1 . 当考虑到流体沿叶轮表面流动时的黏滞摩擦力矩、电机轴与轴承之间的摩擦力矩等有^[6]

$$n = C_1 Q - C_1 a. \quad (1)$$

式中, C_1 为流量与转速转换系数, a 为流量传感器结构、流体流态及特性等相关系数,可认为是常数. 由 $Q = S v_0$ 得 $n = \frac{v_0 \tan \phi}{2\pi r} - C_1 a$, 同理 $\frac{\tan \phi}{2\pi r}$ 为

常量,记为 C_2 , 有

$$n = C_2 v_0 - C_1 a. \quad (2)$$

根据贝茨理论^[7], 旋转的叶轮可以认为是一种激盘, 激盘是不可压缩的. 稳定时激盘上游风速为 v , 邻近处风速为 v_0 , 下游风速为 v_1 , 由贝茨理论可知:

$$v_0 = v(1 - \delta). \quad (3)$$

其中 $\delta = \frac{v - v_0}{v}$ 为速度减少率(轴向诱导因子).

(3)式代入(2)式得:

$$n = C_2(1 - \delta)v - C_1 a. \quad (4)$$

2.3.2 转子转速与电压的关系

采用的空心杯电机^[8]具有惯量小、效率高、控制灵敏、运行平稳等特点,并且由于其特殊的无铁心电枢结构,使得空心杯电机没有磁饱和效应. 所以空心杯电机具有很好的线性运行特性,因而它常被用来作为测速电机. 由空心杯电机的线性运行特性得:

$$U = Cn + d. \quad (5)$$

其中 C 为转速与电压的线性系数, d 为电路中的电压余量(可认为是测量电压时的仪器误差).

2.3.3 风速与电压的关系

综合式(4)~(5)有

$$U = CC_2(1 - \delta)v - CC_1 a + d, \quad (6)$$

化简得

$$U = k_1 v + k_2. \quad (7)$$

式中 $k_1 = CC_2(1 - \delta)$ 为风速与电压的线性系数, $k_2 = d - CC_1 a$ 为传感器结构参量, k_1 和 k_2 均可认为是常量, (7)式说明风速与电压成线性关系.

3 系统方案设计

3.1 系统总体设计

在叶轮式三维风速仪设计概念的基础上提出仪器的设计方案. 叶轮式三维风速仪系统总体设计如图 2 所示, 系统是由三维风速传感器、放大电路、数据采集及处理中心、数据结果显示单元和电源模块组成. 三维风速传感器实际是由 3 个单向叶轮式风速传感器互相垂直构成, 可以测得风速沿 3 个垂直方向的分量值, 经矢量合成运算, 可以得到风速大小及方向的值. 放大电路接收电压信号并将其放大抬升到单片机所能识别的阈值. 数据采集及处理中心对处理后的电压模拟信号进行采样, 将电压模拟信号转换为数字信号; 分析处理

数据结果,计算出风速大小、方向角的值并判断风级数,再传输给数据结果显示单元.数据结果显示单元将以数字形式直观地显示出相关数据.电源模块提供放大电路、数据采集及处理中心和数据结果显示单元所需的直流稳压电源.

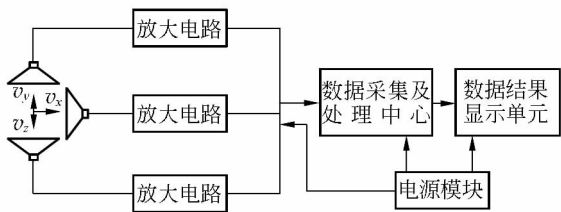


图 2 系统原理图

3.2 硬件部分

三维风速传感器是由 3 个互相垂直的单向叶轮式风速传感器相互垂直组成,其三维模型如图 3 所示.

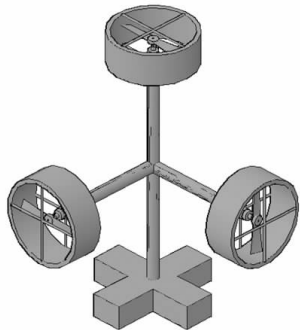


图 3 三维风速传感器模拟图

仪器部分模拟图见图 4,放大电路由多个 LM358 双运算放大器和小电阻连接而成.数据采集及处理中心由 STM32 系列 32 位单片机构成

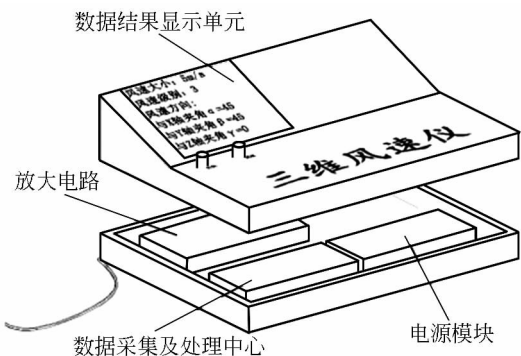


图 4 仪器部分模拟图

成.数据结果显示单元是 1 块 3.2 寸 LCD 显示屏.电源模块分别给双运算放大器和显示屏提供 $\pm 5\text{ V}$ 和 5 V 的电压.

在三维风速矢量的作用下,每个单向叶轮式风速传感器产生约 100 mV 的电压信号(有正负之分),经放大电路放大并抬升到 $0\sim 3\text{ V}$ 后由单片机渐次完成信号采集(其时间间隔很短,大概为 1 ms ,可认为信号是同步采集的),再经过模数转换后得到数字信号,通过风速电压拟合曲线计算出风速的 3 个分量 v_x, v_y, v_z ,根据程序中的矢量计算算法算得风速的大小 v 和方向角 α, β, γ ,然后判断风级并通过 LCD 显示屏显示出来.

3.3 软件部分

软件部分采用 C 语言进行开发.程序流程如图 5 所示.设计原理是利用单片机依次对 x, y, z 轴放大后的模拟信号进行采集,每个轴的模拟信号采集 50 次,相邻 2 次采集的时间间隔为 $2\ \mu\text{s}$;延时至 1 s 时,通过矢量计算算法得出风速大小及角度值;通过风级判断后控制显示屏显示相关量值.

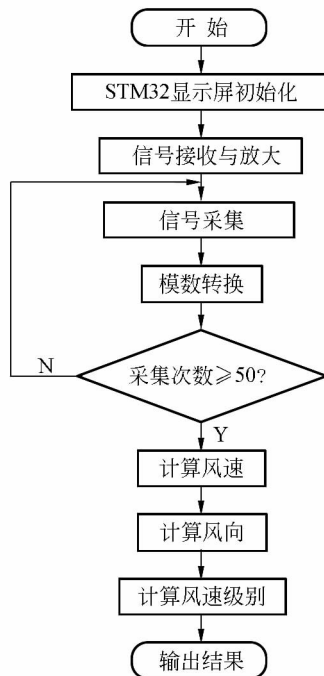


图 5 程序流程图

4 测试过程与结果分析

为了验证该设计概念,在方案设计的基础上完成了仪器的制作,并通过了如下实验验证.

4.1 x, y, z 轴上单个传感器的精度分析

本设计的精度首先依赖于每个单向叶轮式风速传感器的精度. 为此,先通过实验比较每个传感器单独测得的值(实测风速)与市面上精度较高的风速仪所测得的值(标准风速),图 6 给出了标准速度大小和实测速度大小的对比关系,表 1 给出了相关系数 R^2 和线性拟合系数 a, b ,拟合曲线方程为:

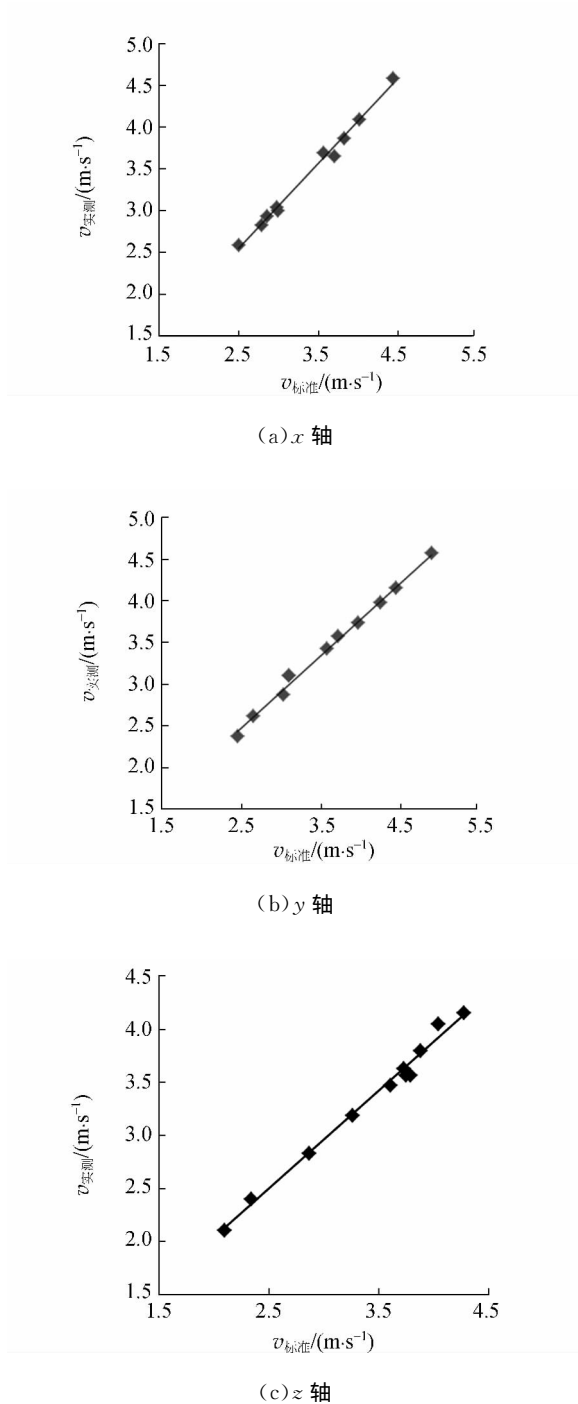


图 6 各轴标准风速大小与实测风速大小的拟合曲线

$$v_{\text{实测}} = av_{\text{标准}} + b. \tag{8}$$

由图 6 可见,实测值与标准值符合得非常好,拟合曲线接近于 $y=x$,相关系数都大于 0.99. 通过比较实测值与标准值发现每个单向叶轮式风速传感器的误差率基本在 5% 以下,即每个单向叶轮式风速传感器的精度是可靠的.

表 1 测量结果的线性拟合系数 a, b 和相关系数 R^2

轴向	a	b	R^2
x	0.974 0	0.070 2	0.992 4
y	0.960 8	0.178 8	0.993 2
z	0.949 8	0.148 4	0.990 6

4.2 实际工作时仪器的可靠性分析

在各轴测量精度可靠的前提下,进一步验证仪器在一般测量条件下的性能,考虑到三轴同时测量时的误差可能较大,先让 x 轴和 y 轴上的传感器同时测量(通过调整风向使 z 轴上叶轮保持静止),此时可认为风矢量平行于 xOy 平面. 再通过调整风向使 α 角的标准角度为 45° ,测量并记录实测角度、标准速度、实测速度,改变风速大小重复上述过程,得到 5 组数据(如图 7 所示);调整风向使 α 角的标准角度为 30° ,重复上述过程,得到另外 5 组数据. 风速方向及大小的数据分析如图 8 所示.

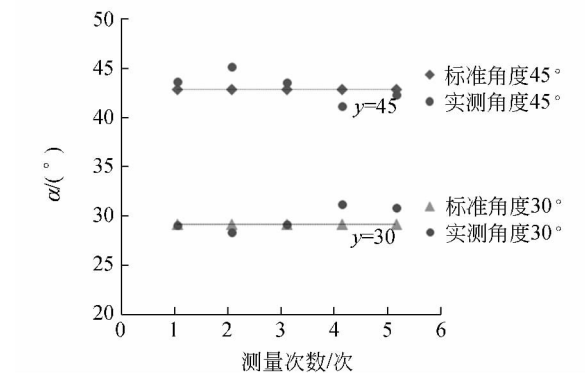


图 7 两轴测量时角度与测量次数关系

实际测得的方向角 α 的波动范围小于 5° , α 为 30° 和 45° 时的标准风速和实测风速的相关系数均大于 0.97. 实验证明该设计对于风速矢量的二维测量是可靠的,仪器基本能替代其他能进行风速矢量二维测量的机械式风速仪.

进一步分析三轴同时测量时的误差. 通过调

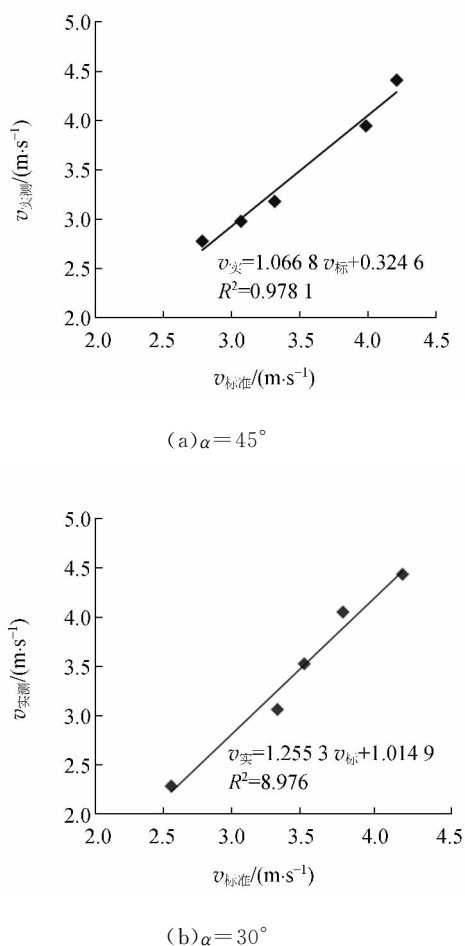


图 8 两轴测量时的风速方向及大小的数据分析

整风向使三轴同时工作时 α, β, γ 角的标准角度分别为 $60^\circ, 60^\circ, 45^\circ$, 通过改变速度大小得到 5 组数据(如图 9 所示), 实验数据及分析如表 2 所示.

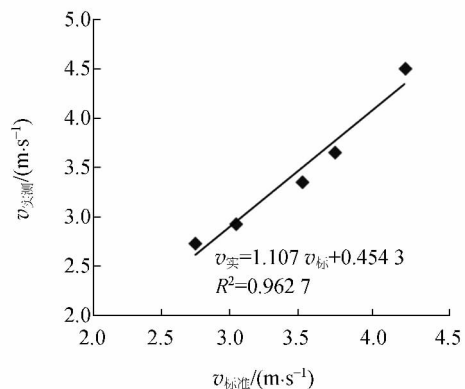


图 9 三轴测量时速度大小拟合曲线

表 2 三轴测量时速度方向数据分析

$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	E_{α}	E_{β}	E_{γ}
58.40	63.30	40.76	0.026 7	0.055 0	0.094 2
57.62	63.74	43.80	0.039 7	0.062 3	0.026 7
60.04	61.32	52.52	0.000 7	0.022 0	0.167 1
61.06	64.84	41.34	0.017 7	0.080 7	0.081 3
64.12	62.28	41.96	0.068 7	0.038 0	0.067 6

由表 2 可知, 角度误差率都比较小, 而速度大小的相关系数 R^2 大于 0.96, 由于在单向叶轮式风速仪的方向敏感性问题上了近似处理, 以及实验条件及仪器的制作成本有限, 该结果是比较令人满意的. 该实验结果基本说明该设计能够用于风速矢量的三维测量.

5 结束语

在对单向叶轮式风速传感器的空气动力学性质分析的基础上提出了三维风速矢量测量的概念, 又以此概念为基础设计了矢量风速仪. 以验证该概念的可行性为目的完成了仪器的制作, 通过一系列实验测量分析, 得知该设计不仅具备市场上现有的机械式风速仪对风速大小及风速矢量二维方向的测量能力, 还被证明是可以用于风速矢量的三维测量的.

参考文献:

- [1] 张自嘉, 葛志鑫. 移动式超声波风速风向测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2011(10): 69-70, 75.
- [2] 戴克中, 李伟. 热敏电阻式风速表[J]. 传感器技术, 1996(6): 54-56.
- [3] 李亮亮, 王东, 杨志刚, 等. 叶轮式风速计方向敏感性风洞试验与数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2008, 17(4): 30-35.
- [4] 陈进, 王惠龄, 夏峰, 等. 三维风速传感器研制[J]. 微计算机信息, 2010, 26(4-1): 18-19, 31.
- [5] 张淳. 速度式流量计螺旋叶轮的设计和制造[J]. 辽宁工学院学报, 2003, 23(5): 41-43.
- [6] 王学永. 风力发电机叶片设计及三维建模[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [7] 张青雷, 卞光祥, 郭井宽. 风力发电机组空气动力学建模与应用[J]. 上海电机学院学报, 2009, 12(4): 336-341.
- [8] 罗玲, 刘景林, 罗兵. 空心杯电机电磁阻力矩特性的实验研究[J]. 微特电机, 2008(4): 1-2.

(下转第 24 页)

表 1 内扫法测量 DPPH 的朗德因子实验数据

f/MHz	磁场方向	I/A				
		1	2	3	4	5
24.36	向上	0.126	0.126	0.127	0.126	0.127
	向下	0.302	0.301	0.302	0.301	0.302
25.34	向上	0.143	0.142	0.142	0.143	0.143
	向下	0.298	0.298	0.299	0.299	0.298
26.42	向上	0.161	0.161	0.160	0.160	0.161
	向下	0.313	0.312	0.312	0.312	0.313

5 结束语

通过设计制作边限振荡器,提高了共振频率,在一定程度上减小了地磁场的影响,提高了信噪比,获得了较佳的共振信号.结合制作的磁场装置,完成了仪器的改装.上述结果表明,改装后的

实验仪可以较好地满足教学大纲对 NMR 和 ESR 2 个实验的要求,丰富了磁共振实验的内容.

参考文献:

- [1] 周辉,魏德祥.小型核磁共振仪的研制与实验结果[J].物理实验,1983,3(5):223-225.
- [2] 刘春光.近代物理实验[M].长春:东北师范大学出版社,2008:146.
- [3] 韩笑,肖鸿飞,林欣悦.物理实验教程[M].北京:科学技术文献出版社,2009:109-113.
- [4] 杨振兰,孙仁和.电子自旋共振实验中地磁影响的消除[J].黑龙江大学自然科学学报,1988(4):85-86,71.
- [5] 房德慧,张彼得,郑小利,等.用于 NQR, NMR 和 ESR 的 JFET 边限振荡器[J].大学物理,1994,13(9):28-30.

Transform a nuclear magnetic resonator to an electron spin resonator

WANG Bai-nian^{1,2}, SHI Lin-lin³

(1. Normal College, Shenyang University, Shenyang 110044, China;

2. Key Laboratory of Functional Materials and Chemical Technology, Shenyang 110044, China;

3. Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The experimental process to transform a HZ811 nuclear magnetic resonator to an electron spin resonator was introduced. The permanent magnet on the HZ811 nuclear magnetic resonator was replaced by a solenoid with specific power source. The frequency range of margin oscillator was also changed. The magnetic field intensity changed from 0.4 T to 0.000 5 T, corresponding a change of frequency range from 12~18 MHz to 21~31 MHz, which could meet the requirements of electron spin resonance experiment.

Key words: NMR; ESR; margin oscillator

[责任编辑:尹冬梅]

(上接第 20 页)

Design of 3D vector anemometer

TU Zheng-yuan, DONG Xi-jie, SUN Bo, ZHAO Kai, BO Kun-liang, HU Bing-feng, YUAN Jie
(Department of Applied Physics, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: To overcome the limitations of direction measurement in common mechanical anemometer, a 3D vector anemometer with unidirectional impeller wind velocity sensor was designed. The wind velocity sensor used impeller driving coreless motor. Using single chip computer to collect and analyze the data from the wind velocity sensor, the wind velocity and direction could be measured. The experimental results showed that our device had a high precision.

Key words: 3D vector anemometer; wind velocity; wind direction

[责任编辑:尹冬梅]