

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107286

基于GNSS的新型大气边界层探空仪^{*}

刁晨昊 王成刚 严家德 郁佳俊
(南京信息工程大学 南京 210044)

摘要: 针对传统大气边界层探空系统存在的探测性能不足、数据精度不高、作业成本昂贵、威胁航空安全等不足,设计了一种基于全球导航卫星系统(GNSS)的新型大气边界层探空仪。该仪器采用卫星导航测风技术实现对高空风速、风向的反演,采用多传感器融合技术实现对温度、湿度、气压等气象要素测量,同时可以通过外接模组实现对PM_{2.5}等大气污染物的监测。测试结果表明,探空仪在温度、湿度、风速和风向平均偏差分别为0.19℃、0.62%、0.25 m/s、0.62°,均满足高空气象探测的精度要求,可广泛应用于气象探测、城市规划以及环境评价等领域的大气边界层特性研究。

关键词: 大气边界层;卫星导航;探空仪;多传感器数据融合

中图分类号: P412.23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.35

A new atmospheric boundary layer sonde based on GNSS

Diao Chenhao Wang Chenggang Yan Jiade Yu Jiajun
(Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of traditional atmospheric boundary layer sounding system, such as insufficient detection performance, low data accuracy, high operating cost and threatening aviation safety, a new atmospheric boundary layer sounding instrument based on global navigation satellite system (GNSS) is designed. The instrument uses satellite navigation wind measurement technology to realize the inversion of wind speed and direction at high altitude, and uses multi-sensor fusion technology to realize the measurement of meteorological elements such as temperature, humidity and air pressure. At the same time, it can monitor PM_{2.5} and other air pollutants through the external module. The test results show that the average deviations of the radiosonde in temperature, humidity, wind speed and wind direction respectively are 0.19℃, 0.62%, 0.25 m/s and 0.62°, which meet the accuracy requirements of high-altitude meteorological detection. It can be widely used in the study of atmospheric boundary layer characteristics in meteorological detection, urban planning and environmental evaluation.

Keywords: atmospheric boundary layer; satellite navigation; sonde; multi-sensor data fusion

0 引言

大气边界层探测是气象、环保、军事等领域开展大气环境监测、预报以及治理等工作的重要基础^[1-2]。边界层内部的温度、湿度、风速、风向等气象要素对大气污染物的扩散、输送、稀释和转化等过程起着决定性作用。在各种环境下顺利开展探测作业,获取完整的边界层数据是开展大气环境治理和质量预报等工作的基础。

传统的大气边界层探测系统在实际应用中存在诸多局限性。气象铁塔探测高度一般不足400 m,且不可移动,只能获取本地较低边界层的数据^[3]。文献[4]设计的气象观

测无人机采用直接搭载各类气象探测设备的方式进行边界层探测,此方法使用灵活、精度高,但也存在着起降条件要求高、操控专业性强、探测最大高度仅为500 m等不足,且无人机在风速超过8 m/s时就必须停止作业^[5],从而无法保证大风等恶劣环境下探测数据时间上的连续性。同时,又因无人机体积过大或质量过重,可能会对航空安全造成影响,必须在得到相关空域申请许可后,才能开展探测工作,这也从空间上制约了此方法的应用。文献[6]设计了一种转动喇曼激光雷达用于探测边界层温度,该方法在2.5 km以下准确度高,但操作复杂且对于边界层高度大于2.5 km的温度测量需采用大口径望远镜或加大激光脉冲

收稿日期:2021-07-16

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(NSFC41505136)、南京信息工程大学国家级大学生创新创业训练项目(202010300118E)资助

能量,应用自由度也受到一定限制。目前中国气象局业务站台普遍使用的 L 波段雷达-电子探空仪测量系统主要用于 30 km 范围内的高空气象探测^[7],设备成本高、体积大,探测同样需要申请空域许可。这些传统设备在很大程度上限制了大气边界层探测与相关研究工作的开展。

基于以上设备存在的诸多不足,本文采用卫星导航测风、多传感器数据融合等技术设计了一款新型大气边界层探空仪。该探空仪测量准确性高、体积小、质量轻、成本低,作业时无需空域申请,避免了对航空安全造成威胁。一系列外场实验表明,本装置可提升边界层探测数据在时空上的连续性和完整性,促进边界层的精准探测。

1 大气边界层探测系统设计方案

大气边界层探测系统是一种用于大气边界层气象要素数据采集、检测、回传的测试系统。本文设计的新型探空仪是整个探测系统的核心组成部分。整个探测系统包括升空平台、探空仪、接收机和上位机等主要部分,如图 1 所示。

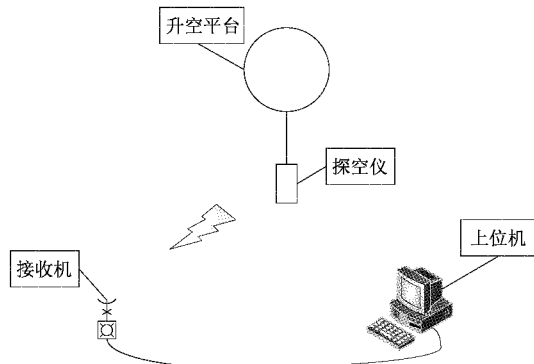


图 1 系统示意图

升空平台主要由测风小球组成,小球内充密度小于空气的气体,为探测系统的上升提供动力并控制其上升速度。

探空仪用于大气边界层气象要素的探测,主要由卫星导航模块、气象传感器、数据传输模块、污染气体模组以及数据处理模块等组成。其中全球定位系统(global positioning system, GPS)和北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)主要用于反演风速、风向以及探测高度等数据;气象传感器包括温度、湿度、气压等气象要素的传感器;数据传输模块负责探空仪与地面接收设备之间数据以及指令的远程无线传送;污染气体模组可用于监测如二氧化硫、臭氧、氮氧化物等大气污染物浓度;数据处理模块主要负责各传感器数据的采集、解析、回传以及地面控制指令的解析等任务,是探空仪的核心部件。

接收机用于高空与地面间数据、指令等的通信,是探空仪与数据综合处理平台进行数据和指令通信的枢纽。

上位机承担探测数据的处理、显示、分析、存储等工作。

2 新型探空仪系统设计

2.1 硬件设计

基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的新型大气边界层探空仪的硬件组成主要包括处理器模块、导航定位模块、数据传输模块、电源管理模块、以及各类气象传感器。整体结构框图如图 2 所示。

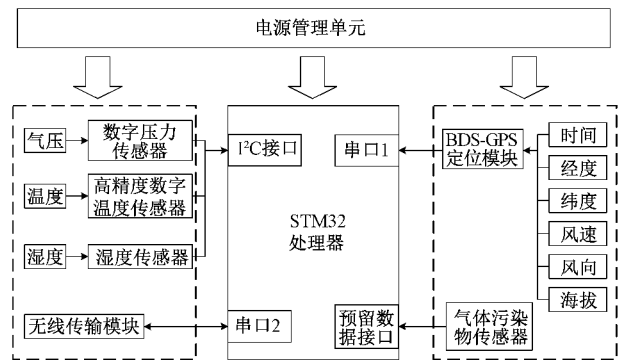


图 2 硬件电路结构框图

1) 风向、风速测量

新型探空仪采用基于 S1216F8-BD 模组的高性能双模卫星导航模块。该模块捕获灵敏度高,体积小,性能优异。主处理器 STM32F103RCT6 通过高空风反演算法将导航模块获取的数据结合经验地球物理模型函数建立基于回归分析的最小方差风速估算模型求解风向与风速^[8,9]。BDS-GPS 双模联合定位可以有效增加系统冗余,提高搜索到的卫星数量,在山区或城市等有障碍物遮挡的场景中能显著提高定位精度^[10]。

2) 温湿度测量

温度模块和湿度模块分别采用 SHT31 和 STS31 芯片通过集成电路总线协议(inter-integrated circuit bus, I²C)与单片机通信,传感器模块的高灵敏度特性使探空仪获取的气象数据具有更高的可靠性和更好的精度指标,双平面无铅封装使得芯片小巧,易于集成。不仅如此,该芯片还具有接口简单、超低功耗、低噪声及高精度等特点,充分满足实际需求。通过将温湿度传感器焊在柔性印刷电路板上,单片机可以获取泡沫盒外的高层大气气象数据。

3) 气压测量

大气压强传感器采用 BMP180 模块,该气压测量模块经过低压电子设备优化后,具有功耗低、精度高、线性度好等特点。

BMP180 的内部结构由电子式可擦除可编程只读存储器(electrically erasable programmable read-only memory, EEPROM)的控制单元、模数转换器和压阻传感器组成。EEPROM 内预先存储可用于补偿温漂和调整传感器参数的校准数据,压阻传感器提供气压的未补偿值经过 EEPROM 的偏移补偿,温度依赖性显著降低,具有极高的

准确性与稳定性^[11]。

4) 预留污染气体数据接口

探空仪主板背部预留一组扩展接口可用于挂载污染气体检测模组。模组内置高精度电化学传感器, 可用来检测包含臭氧、二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物、PM_{2.5}等多种污染性气体浓度, 通过检测电路将气体浓度信号转化为数字信号。传感器内部自带的高精度放大器和温度补偿电路使得测出的数据更加精确可靠。

直接挂载气体检测模组不仅解决了低空空气污染物无法直接测量的难题, 还可以长时间、连续性测量污染物的空间分布, 为污染过程中的边界层垂直和水平特征分析提供了准确的数据, 具备较好的研究价值与现实意义^[12]。

5) 远程数据传输

远距离(long range, LoRa)无线数据传输模块选用E22-400T30S模组与单片机进行串口通信。LoRa远程调制解调器的射频芯片SX1278抗干扰性极强, 可靠性高, 可以实现超长距离的无线扩频通信。得益于扩频通信技术的发展, 模块的灵敏度超过-148 dBm。高达+20 dBm输出功率使探空仪在实际测试应用中不需要中继装置及复杂的通信基础设施, 数据传输的垂直高度达到5 km以上, 水平距离超过了10 km, 完全满足需求。相较于传统远程传输设计方案, LoRa调制技术在抗阻塞和选择方面解决了远距离、抗干扰和低功耗无法兼容的问题^[13]。

单片机将传感器实时监测到的数据经过编码、调制后通过无线数据传输模块将数据打包发送至地面接收装置。

6) 电源管理

为了满足高空低温环境下探空仪正常作业需求, 新型探空仪采用3节1.2 V镍氢电池串联供电, 3.6 V的输入电压经高效率低纹波DC-DC稳压芯片QX2304L33F稳压至3.3 V后为核心处理器、BMP180气压传感器、气象要素传感器、无线数据传输模块以及卫星定位模块等供电, 电源电路如图3所示。

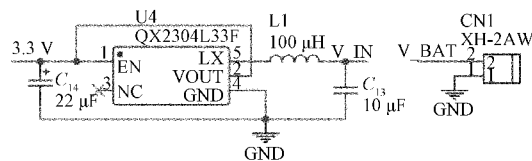


图3 3.3 V电源电路

根据功耗测试结果显示, 探空仪在发射状态下最大电流为527 mA, 最大功耗为1.881 W。镍氢电池容量约为2 000 mAh, 理论供电时长至少为3.79 h, 充分满足探测作业需求。

2.2 软件设计

软件程序设计考虑以MDK Keil5作为开发平台并选择C语言作为编程语言。程序流程如图4所示。

从图4可以看出, 在首次上电后探空仪会进行模块初始化操作, 系统进入自检状态, 若发生故障会向接收设备发

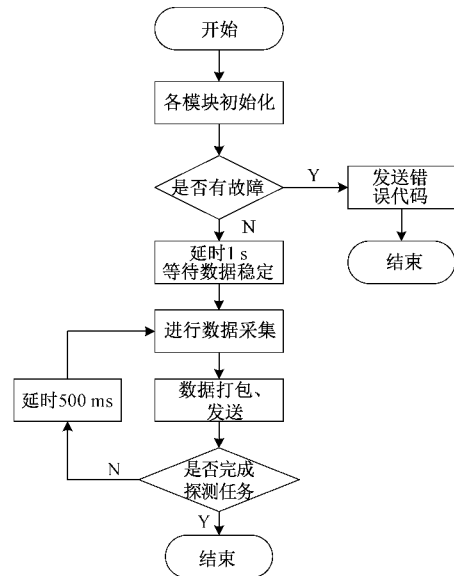


图4 程序流程

送设定好的故障代码方便操作人员判断原因并及时解决问题。在确认外设没有异常后, 系统即可进入数据采集模式进行探测作业。当探空仪接收到来自地面发送的任务完成指令或到达设定的探测高度上限后, 结束任务。

1) 数据采集

如图5所示, 在此模式下代码可以分为BDS-GPS定位模块数据采集、电压数据采集、温湿度数据采集、气压数据采集、污染气体浓度数据采集。

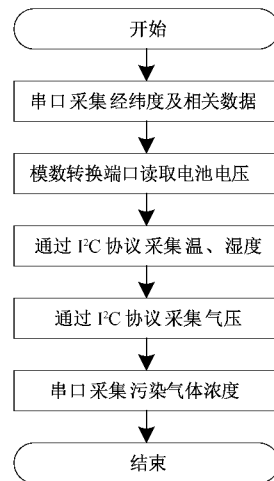


图5 数据探测流程

温湿度以及气压传感器均采用I²C通信协议, 硬件资源耗费少, 端口重复利用率高。其中温湿度传感器设定地址为0X44, 气压传感器设定的地址为0XF4。

由于温湿度芯片在进行测量时易受太阳辐射的影响产生随机误差, 测量数据需使用如下公式进行线性化处理将原始值转换为物理比例。

相对湿度换算公式(以%为单位):

$$RH = 100 \times \frac{S_{RH}}{2^{16} - 1} \quad (1)$$

温度转换公式(以℃为单位):

$$T[^\circ\text{C}] = -45 + 175 \times \frac{S_T}{2^{16} - 1} \quad (2)$$

S_{RH} 和 S_T 分别表示湿度和温度的原始传感器输出,当 S_{RH} 和 S_T 以十进制数表示的时候,这些公式才能正确计算。

2) 数据打包、发送

单片机将传感器采集到的数据以时间、海拔、风速、风向、温度、湿度、气压、污染物浓度以及经纬度的顺序打包通过 LoRa 无线数据传输模块发送至地面接收装置。同时为了提高数据的可靠性,在打包过程中加入奇偶校验并将 0XAA 为数据开始帧,0XFF 为数据结束帧。上位机接收界面如图 6 所示。

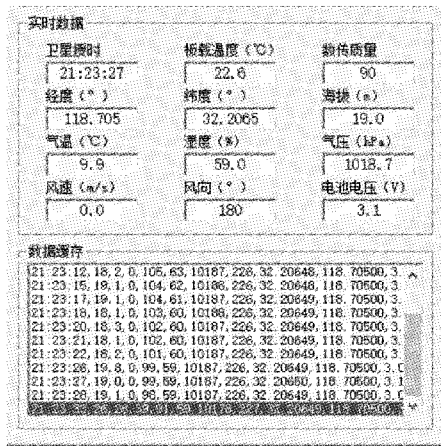


图 6 上位机接收界面

3 测试分析

3.1 性能测试

为了验证新型探空仪的测量精度和稳定性达到探测要求,对比实验严格遵守世界气象组织制定的同球施放对比规范^[14],以德国 GRAW 公司的 DFM-09 型无线电探空仪为参考标准,对探空仪进行室外实验并记录,测试结果如图 7 所示。

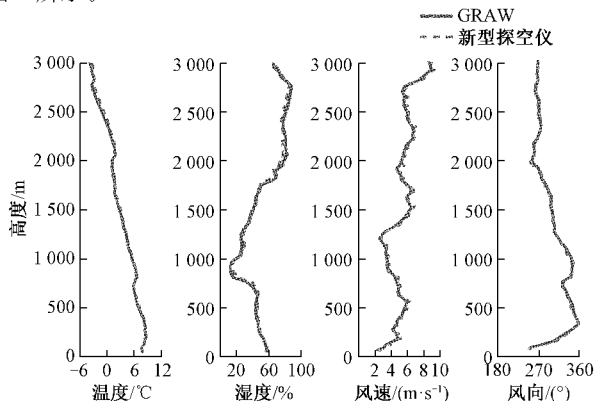


图 7 同球对比结果

根据拉依达准则剔除探测数据中的异常值后^[15],统计结果如表 1 所示。

表 1 探空仪对比测试统计结果

气象要素	平均偏差	精度要求(地面至 100 hPa)
温度/℃	0.19	≤0.5
湿度/%	0.62	≤5
风速/(m·s ⁻¹)	0.25	≤1
风向/(°)	0.62	≤5

表 1 对于探空仪测量精度和稳定性结果显示,本探空仪在温度、相对湿度等方面均满足中国气象局在《常规高空气象探测规范》中规定的精度要求^[16]。

3.2 外场探测

将本文设计的探空仪通过升空平台进行外场探测。在某次夏季外场探测作业中,地面接收端上位机软件显示的实验数据如图 8 所示。

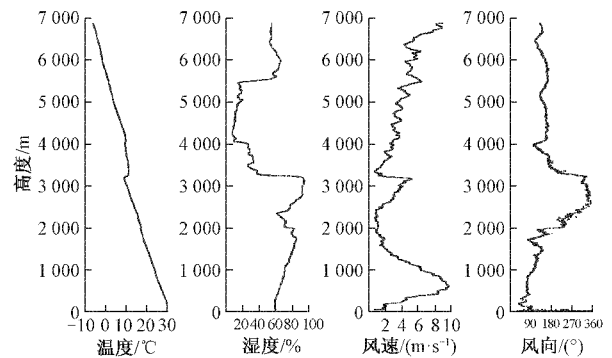


图 8 测试数据廓线

本次测试探测高度超过 6 500 m,在 3 200~3 400 m 高度附近有明显的逆温现象,该处逆温率达到 1.137 5 ℃/hm。同时此处有一个明显的急流结构,在风速上有一个极大值,一般来说急流结构出现在边界层顶的高度上^[17],对边界层湍流也有影响,在边界层急流出现的部位,湿度、风速都出现了极大值,在风向上呈现出变化幅度大的明显现象,这和逆温有密切的关系。逆温层内大气层结十分稳定,由热力因素引起的对流和湍流被削弱,故该层上下的垂直通量输送受到了强烈的抑制。逆温层上方存在大气超低湿现象,3 500~5 500 m 高度内相对湿度骤降,最低处甚至不到 10%。尽管逆温层下方的相对湿度达到了 90% 以上,但由于受到了逆温层结的阻隔,水汽难以向上层传输,同时上干下湿的结构配合逆温亦使得虚位温骤升,令该处的层结更为稳定,而进一步加剧了这种通量阻隔现象,形成了一种逆温稳定层结配合超低湿现象的正反馈的机制。

从图 8 中还能看出,稳定层上空流场趋势较为稳定,风速随温度在高度上的线性分布近似线性增加,风向稳定在偏南风。而在逆温层出现的部位,则可以观测到一次典型的低空急流现象,急流发生高度大约在 500 m 处,风速达

到 9.54 m/s。测试是日落以后进行的,尽管地面余温使得近地面层结尚未稳定,可能在高空温度上保留一些白天边界层的特征,但对流作用已经被削减,夜间边界层结构也开始建立。在 3 000 m 高度以下,风向从偏东风顺时针旋转至偏西风,风速自地面随高度增加至急流发生高度,呈现典型的埃克曼螺旋线,而由于上空逆温处风场处于静稳状态,风速上升至急流高度后又开始降低,出现典型的夜间低空急流现象。

本次探测获得了较好的数据,较详细地刻画了大气边界层的结构特征,可满足大气边界层探测需求。

4 结 论

本文设计的基于 GNSS 的新型大气边界层探空仪在设计结构上摒弃了传统测风技术,引入卫星导航技术实现高空风的反演,多传感器数据融合确保了探测数据的可靠性,达到边界层探测要求,有效解决了传统探测方法成本高、精度低、灵活性差等问题。从外场测试的数据分析来看,本探空仪详细地刻画逆温层、低湿区、低空急流等大气边界层的特征,可满足大气边界层探测需求,达到了预期目的,在气象环保等领域具有很好的应用前景。为满足台风天气等恶劣环境下对于大气立体综合探测的需求,未来将引入 LoRa 广播功能进行多球协同探测等方面的深入研究。

致 谢

本文涉及的探空仪同球对比实验由南京信息工程大学大气物理学院博士生赏益、硕士生王玉祥和黄鑫协助完成,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 车军辉,赵平,史茜,等. 大气边界层研究进展[J]. 地球物理学报,2021,64(3):735-751.
- [2] 王成刚,魏夏璐,严家德,等. 气象探测环境等级评估方法及应用[J]. 应用气象学报,2019,30(1):117-128.
- [3] 张宏昇,张小曳,李倩惠,等. 大气边界层高度确定及应用研究进展[J]. 气象学报,2020,78(3):522-536.
- [4] 胡鹏,伍光胜,孙伟忠,等. 多要素气象观测无人机系统的设计与应用[J]. 计算机测量与控制,2019,27(4):139-142,148.
- [5] 侯天浩,行鸿彦,刘洋. 多旋翼无人机在气象探测中的

现状与展望[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(10):7-15.

- [6] 刘玉丽. 探测边界层大气温度的转动喇曼激光雷达[J]. 激光技术,2018,42(4):541-544.
- [7] 郝民,田伟红,龚建东. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究[J]. 气象,2014,40(2):158-165.
- [8] 金双根,张勤耘,钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景[J]. 测绘学报,2017,46(10):1389-1398.
- [9] 杨菊花,李文元,陈光武,等. 引入滑模观测器的 GPS/INS 组合导航滤波方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):78-86.
- [10] 张常亮,方国强,刘一谦. 基于北斗卫星的气象信息传输流程研究与设计[J]. 电子测量技术,2020,43(16):41-45.
- [11] 任勇峰,李晋涛,李辉景,等. 一种温度补偿的压力测量电路设计[J]. 国外电子测量技术,2020,39(12):86-89.
- [12] 黄俊,廖碧婷,王春林,等. 新型垂直探测资料在污染天气分析中的应用[J]. 中国环境科学,2019,39(1):92-105.
- [13] 田光普. 自动气象站无线通信技术的应用研究[J]. 电子测量技术,2021,44(7):154-158.
- [14] 李柏,李伟. 阳江第八届国际探空系统比对试验综述[J]. 气象科技进展,2011,1(3):6-13.
- [15] 李常春,常克昊,刘禹杉. 几种异常值判别准则在气象计量数据处理中的应用[J]. 电子测量技术,2020,43(23):68-72.
- [16] 中国气象局. 常规高空气象观测业务规范[M]. 北京:气象出版社,2010:2.
- [17] 乔梁,张强,岳平,等. 由非季风区向季风区过渡过程中大气边界层结构的变化分析[J]. 大气科学,2019,43(2):251-265.

作者简介

刁晨昊,在读本科,主要研究方向为仪器仪表的嵌入式开发及其测试技术。

E-mail: Diaochenhao@163.com

严家德(通信作者),硕士,高级实验师,主要从事大气探测技术及仪器方向的研究。

E-mail: yanjd@nuist.edu.cn