doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.038

真空干燥过程中物料质量在线测量设备设计与试验

薛令阳[1]　王书茂[1]　高振江[1]　于贤龙[1]　林　海[2]　魏　青[1]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 辽宁工程技术大学电气与控制学院, 葫芦岛 125105)

摘要: 针对真空脉动干燥过程中物料质量在线获取易受到机械振动、温度变化和气流短时冲击等多重干扰,导致测量困难、测量精度不高的问题,提出了将固定料架和测量料架分离的测量方案,并选用高精度的测量器件,在经过信号滤波、温度修正和气流干扰排除等多种修正手段后,实现了温度变化范围 20 ~ 45℃、无明显外部剧烈振动、冲击时间小于 1 min 的正常进抽气条件下总量程 1 500 g、去掉料盘后有效量程 1 000 g、最大引用误差 0.1% 的物料质量在线测量。静态测试结果显示,满量程最大引用误差 0.06%,物料干燥测试结果显示,干燥终点最大引用误差 0.1%,能够清楚反映整个干燥过程中的质量变化情况和干燥速率变化情况,可为研究农产品干燥过程中物料状态变化规律和实现自动干燥工艺调控提供技术支持。

关键词: 真空干燥; 质量; 在线测量; 设备; 设计
中图分类号: TP29; S375　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)09-0326-12

On-line Measurement of Material Quality in Vacuum Drying Process

XUE Lingyang[1]　WANG Shumao[1]　GAO Zhenjiang[1]　YU Xianlong[1]　LIN Hai[2]　WEI Qing[1]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Faculty of Electrical and Control Engineering*, *Liaoning Technical University*, *Huludao* 125105, *China*)

Abstract: The change of material mass is an important parameter of material state evaluation during the drying process. Pulsed vacuum drying process is a sealed state, herein, the device of mass measurement must be installed inside the drying chamber, which leads to the measurement processing vulnerable to interference, including the mechanical vibration caused by equipment operation, temperature change caused by drying room heating, airflow interferences which with pulsating state. The multiple effects of these disturbances may cause low measurement accuracy. In order to solve this problem, a measurement plan for separating the heating plate fixed material rack and the material measuring rack was put forward. Firstly, the vibration characteristics of the rack were effectively analyzed. The minimum resonance vibration frequency was about 8 Hz, and the main resonance frequency was about 25 Hz. According to the vibration characteristic, two-order IIR digital filter were designed, which effectively solved the vibration problem. Then the drift characteristics of the sensor were measured for zero drift of the sensor caused by temperature. The correction temperature range was 20 ~ 45℃, and it was found that it can be corrected by five or six order polynomials. However, the higher calculation of higher order polynomials was not conducive to the real-time control of the whole machine. Therefore, the piecewise polynomial fitting method was adopted. The temperature stage of the piecewise fitting formula of zero drift were $y = 647\,062 - 60\,410t + 1\,403t^2$ ($20℃ \leqslant t < 21.5℃$), $y = 21\,235 - 2\,172t + 62t^2 - 0.65t^3$ ($21.5℃ \leqslant t < 43℃$), $y = -499\,406 + 23\,206t - 274.9t^2$ ($43℃ \leqslant t \leqslant 45℃$). The air turbulence in the process of inlet and outlet was not regular, which had little effect on the whole drying process. Therefore, the measured data of intake and exhaust stages were removed and replaced with linear interpolation data. In order to get the final mass data, a linear relationship between filtered and corrected sensor output and standard mass was established, and the final mass conversion formula was $m_o = 0.000\,440\,21(x - y) - 1.455\,3$. In the formula, through the static test, the measurement system of full scale maximum reference error was

收稿日期: 2018 - 03 - 19　修回日期: 2018 - 05 - 25
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0400905)和中国农业大学基本科研业务费专项资金项目(2017GX001)
作者简介: 薛令阳(1990—),男,博士生,主要从事农产品加工装备智能化控制技术研究,E-mail: ly_dreaming@163.com
通信作者: 王书茂(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事计算机测控技术研究,E-mail: wangshumao@cau.edu.cn

0.06%. The results of material drying test showed that the maximum reference error of the drying end was 0.1%. Through the data recording during drying process, it can clearly reflect the quality change and drying rate change in the whole drying process. The research result provided technical support for studying the changing rule of material status and realizing automatic drying process control in the drying process of agricultural products.

Key words: vacuum drying; mass; on-line measurement; device; design

0　引言

真空脉动干燥是一种真空状态和常压状态周期性交替变化的真空干燥技术，在真空-常压交替变化过程中实现快速干燥[1-6]。该技术在干燥过程中物料的质量状态参数与干燥过程的环境温度、真空状态、加热温度等工艺参数之间的相关关系，是研究干燥技术工艺参数与物料适应性和干燥动力学及干燥品质的重要参数，也是判定物料干燥终了的重要指标，具有重要的理论和实际应用价值[7-8]。

真空脉动干燥装置工作时大多处于真空密闭状态，由于测量系统会受到机械振动、温度变化和气流干扰等多重影响，以往干燥过程中的质量测量多采用在脉动常压阶段打开干燥箱体，将物料取出称量的离线测量方式[4,9]。这种测量方式劳动强度大，测量过程离开干燥室，物料所处环境发生变化易引起物料状态的变化从而产生较大误差，导致测量结果无法准确反映干燥过程的变化。

农产品加工中应用称量系统较多的环节是分级、包装、饮料灌装、产品检测等[10-12]。如王栋等[13-14]设计了气体射流冲击含水率在线监控系统，通过自动称量法在线测量物料含水率，但该系统测量精度较低，在干燥后期物料质量较小时存在较大误差。

本文设计质量在线测量系统，主要研究真空脉动干燥室环境下质量在线测量，其中包含称量的机械装置和控制部分的软硬件设计以及信号的滤波和校准算法设计等，以保证在整个干燥过程中质量测量的最大引用误差不大于 0.1%，为干燥过程智能化控制提供技术支持。

1　带有质量测量系统的真空脉动干燥设备

1.1　干燥系统组成

真空脉动干燥设备由干燥室、真空系统和控制系统 3 部分组成[15]。设备结构如图 1 所示。物料置于平行放置的碳晶加热板之间，通过加热板的辐射对其加热；真空系统为干燥过程提供周期性交替变化的脉动真空压力，控制系统控制并记录各项参数。其中，干燥室真空度变化范围为 0 ~ 97 kPa，加热板温度变化范围为 30 ~ 120℃。

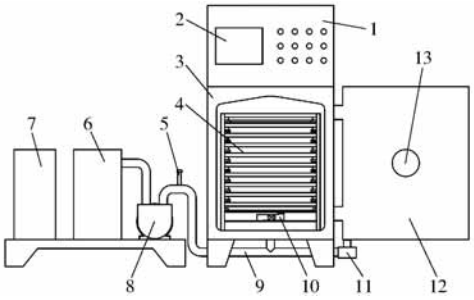

图 1　真空脉动干燥设备结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of pulsed vacuum dryer

1. 控制箱　2. 人机界面(上位机)　3. 干燥室　4. 料架　5. 真空压力传感器　6. 循环水箱　7. 冷却机　8. 水环式真空泵　9. 真空管路　10. 称量传感器　11. 电磁阀　12. 门　13. 观察窗

1.2　控制系统组成及功能

真空脉动干燥设备控制系统如图 2 所示，由上位机、温度控制模块、IO 模块和质量测量系统组成。其中上位机采用威纶通公司的 MT8101iE 人机界面为控制核心部件，在满足控制功能的同时具有较好的经济性，上位机负责人机交互、数据计算、指令控制、数据存储、MODBUS 总线维护等工作，上位机与各模块之间采用 3 条 RS485 总线通信[16]。温度控制模块通过采集各个加热板上温度传感器数据结合上位机指令调节碳晶加热板的温度，实现对干燥过程中温度的控制。IO 模块负责采集真空压力和物料温度，并且结合上位机指令负责控制外部设备中真空泵和电磁阀的工作。另外，本文增加了质量测量模块，其中称量传感器负责采集质量信号，由信号变换模块将信号放大处理和 A/D 转换，并实时与上位机通信，负载温度传感器负责采集负载传感器自身温度，用于后续温度补偿。

2　测量方案设计

GB 5009.3—2016 中物料含水率的测量要求物料在初始质量为 2 ~ 10 g 时，测量分度值 0.1 mg，干燥终点两次测量结果质量变化小于 2 mg，即测量精度应大于 0.1%[17]。该标准要求的测量精度是在实验室静态环境下测得的结果，测量过程对环境有特殊要求，而要在干燥过程中多重干扰条件下实现同等测量精度难度极大，因此为尽量满足含水率的测量标准，综合考虑干燥试验的需求，本文测量系统

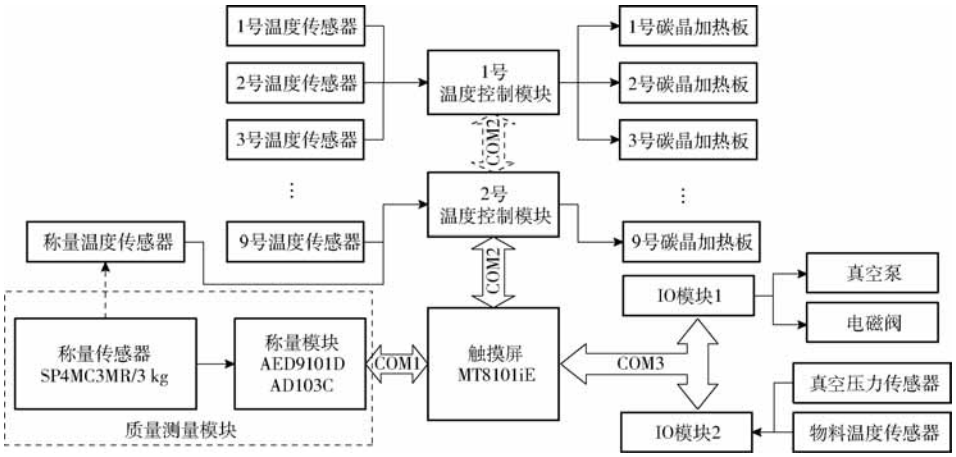

图 2 控制系统原理框图

Fig. 2 Schematic diagram of control system

设计总量程不小于 1 500 g,去掉料盘后有效量程不小于 1 000 g,测量分度值 0.1 g,最大引用误差不大于 0.1%。

2.1 物料托架设计

碳晶红外加热板式的真空脉动干燥设备为多层干燥,加热板尺寸为 300 mm × 500 mm,试验装置中单层物料装载量为 200 ~ 500 g,1 000 g 装载量需装载 2 ~ 5 层。为保证足够的辐射热量,干燥装置中层间距为 55 mm,在 55 mm 的间距中包含加热板、加热板固定横梁、料盘和物料,因此实际操作空间狭小。然而包含加热板的料架质量远大于物料质量,直接测量整个料架会严重影响测量精度。因此本文将加热板固定架与物料托架分离,使测量系统直接测量物料从而减少不必要的精度损失。物料托架直接连接测量传感器,并支撑物料料盘,与加热板固定架不直接接触。首先,为尽量减小除物料外的附件质量,以提高有效测量精度,物料托架的质量应尽量减小。为保证物料托架稳定性和耐用性,采用 10 mm × 10 mm × 1 mm 规格的不锈钢方管设计了如图 3a 所示的料架结构。其中底部支撑座平行方管与传感器固定,传感器固定在不锈钢板基座上,以减小测量过程中的振动;另外,支撑料盘使用 4 个焊接在竖杆上的短柱,料盘选择 300 mm × 450 mm 不锈钢网状盘,以减小托架的质量。具体安装位置和安装方式如图 3b 和图 3c 所示。

2.2 关键部件选型及安装方式

测量传感器是整个质量测量系统的核心元件,质量的测量实际为被测物体在重力作用下对传感器压力或拉力的测量。悬臂梁式压力传感器有着较高的测量精度、较好的温度系数和较低的形变量,因此结合物料托架的结构和测量范围要求,本文选用量程为 3 kg 的单点式双孔悬臂梁压力传感器进行质量测量,传感器为 Hottinger Baldwin Measurements (HBM)公司生产的 SP4MC3MR/3 kg。为方便与干燥设备控制系统整合,除传感器外,还选用了该公司的带 RS485 总线的信号调理模块 AED9101D 和 AD103C 构成整个质量测量系统。

由于压力传感器会受到温度变化的影响,为进行温度补偿,需实时测量压力传感器自身温度。本文选用德州仪器(TI)公司的 LM75 型数字式温度传感器进行测量,该模块具有 I^2C 数字信号输出,测量范围 -45 ~ 125℃,测量精度 0.125℃,完全满足压力传感器温度测量要求。

压力传感器和温度传感器的安装位置如图 4 所

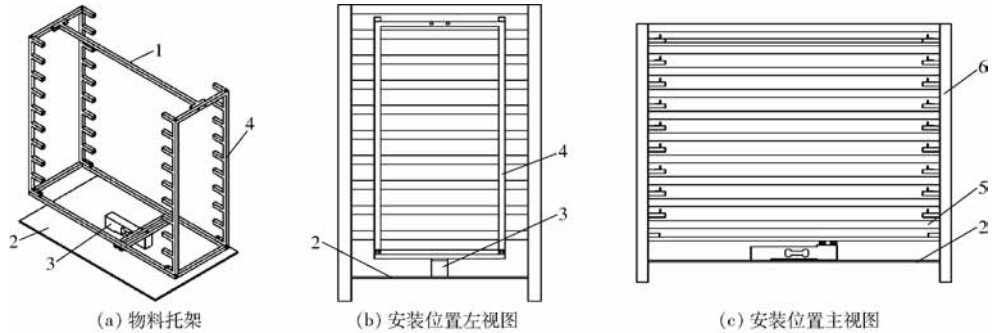

图 3 物料托架及安装位置

Fig. 3 Material bracket and position of assembly

1. 顶部横梁 2. 传感器基座 3. 压力传感器 4. 料盘支架 5. 隔热板 6. 加热板固定架

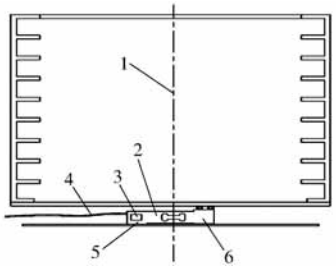

图 4　传感器安装位置

Fig. 4　Installation location of sensor

1. 中心线　2. 压力传感器　3. 温度传感器粘贴位置　4. 线束
5. 压力传感器固定端　6. 压力传感器受力端

示，压力传感器中心面与测量料架中心面重合，使测量时重心恰好通过传感器中心。温度传感器粘贴在压力传感器固定端位置，在保证能够测得压力传感器温度的同时有效避免温度传感器粘贴和线束受力对测量结果的影响。

3　干扰分析与补偿方法

针对干燥机结构分析可知，测量结果受到干扰的因素主要有：①振动干扰。由于压力传感器单点固定，多层式物料托架质心远高于传感器测量水平面，导致整体处于不稳定平衡状态，在外界环境存在轻微干扰时会产生周期性简谐振动[18]，并且存在一定的规律性，可以通过滤波方式将振动干扰信号滤除。②温度干扰。由于干燥过程中不同干燥参数的设置，加热板处于不同工作温度，使干燥室内温度随时间发生变化，负载传感器自身温度也随之改变，温度变化会引起传感器特性变化，进而影响测量结果，可以通过测量其中变化规律进行补偿。③气流扰动。在真空状态和常压状态的切换过程中，干燥室处于进气或抽气状态，此时有快速的气流流动，气流从不同方向作用于压力传感器、物料托架和物料，使原有平衡状态被打破，由此对测量结果产生较明显干扰，干扰影响会由于不同物料的装载和干燥过程中的变化呈现明显差异。④气压变化。真空状态和常压状态时干燥室内气压差异悬殊，由于空气浮力的作用会导致测量结果有轻微差异，该差异会随着装载量和干燥进程而变化。

3.1　振动干扰的测量、分析和消除

由于压力传感器的安装方式导致其对振动干扰极为敏感，轻微环境振动和设备自身运转振动都会引起传感器示数大幅周期性波动，无法获取稳定测量结果。传感器示数的波动呈现一定规律，但该规律会受到载荷、传感器温度、干燥室气压的影响。因此可以通过采集不同状态下的传感器输出信号分析振动规律，得到干扰信号的频率分布，通过设计合适的滤波算法将其消除[18]。

3.1.1　测量方法

频率分布测量时考虑载荷、温度、气压 3 个因素的作用，每个因素只考虑测量条件的最小和最大两个极端状态水平，即载荷空载 0 g 和满载 1 500 g，温度 20℃和 50℃，气压真空和常压。三因素二水平共有 $2^3=8$ 种组合，对这 8 种组合下的传感器输出信号分别以 1 200 Hz 采样频率连续读取 8 192 个结果，每个组合独立测量 10 次，然后对每次读取结果分别通过快速傅里叶变换(FFT)得到其频谱数据，通过分析频域特性，找到共振频率[19]。

3.1.2　结果分析

测量结果如图 5 ~ 12 所示(共 8 组)。由于时域图 10 次测量数据相互重叠无法有效区分，文中只给出其中一次。频域图为全部 10 次测量结果的频谱，从测量次数坐标可以看出每一次的频谱曲线。由时域图可以发现，不同状态下的波动幅度存在明显差异，如图 5a 波动范围在 -6 ~ 7 之间，而图 6a 波动范围在 3 530 ~ 3 610 之间。由频域图可以发现，不同状态下的共振频率存在明显差异，共振频率主要集中在 12、25、48、55、75 Hz 左右，最多时可同时存在 5 个共振频率(图 9b)，最少时存在 1 个主要共振频率 25 Hz(图 6b)，其中在空载、真空状态下的波形最复杂(图 9、11)。

对比载荷因素下的两个水平状态时域图和频域图可以看出，满载和空载状态存在明显差异，满载状态时共振频率几乎全部集中在 25 Hz，另外还存在 8 Hz 和48 Hz 的不明显共振频率。由此可得随着负载的增加频率向 25 Hz 集中，其他频率影响减弱。

对比温度因素下的两个水平状态时域图和频域图可以看出，温度的变化会影响波形复杂度，随着温度升高各个共振频率都得到加强，50℃的波形复杂度明显高于 20℃。

对比压力因素下的两个水平状态时域图和频域图可以看出，压力状态的变化会影响个别频率，真空状态下大于 40 Hz 的共振频率明显增强，这是由真空状态下真空泵持续运转引起箱体振动造成的。

综上分析可知，载荷、温度和压力因素均会对测量系统的振动特性产生影响，不同因素水平状态下的共振频率主要集中在 12 ~ 60 Hz，但在最大负载情况下最小共振频率会从 12 Hz 转移到 8 Hz 左右，系统的主要共振频率集中在 25 Hz 左右。为保证在线测量能准确测量零至满载时的全部情况，在滤波时应将频率大于 8 Hz 的信号全部滤除。

3.1.3　滤波算法设计

由图 5 ~ 12 中的时域图可以看出，实际信号为

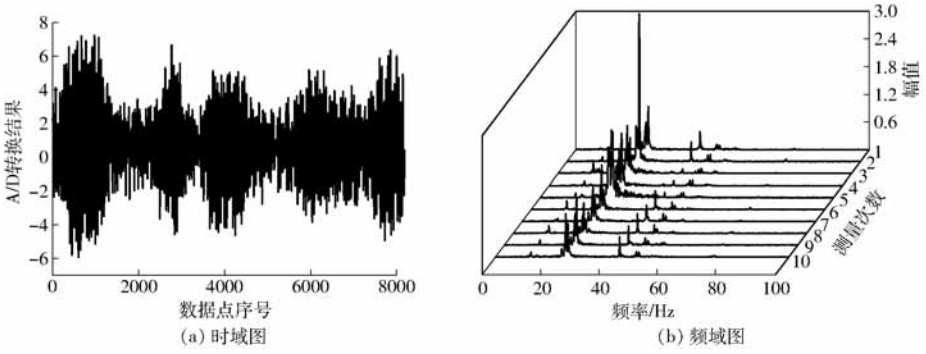

图 5 空载、20℃、常压状态下信号时域图和频域图

Fig. 5 Time domain diagram and frequency domain diagram of signal in no load, 20℃ and normal pressure states

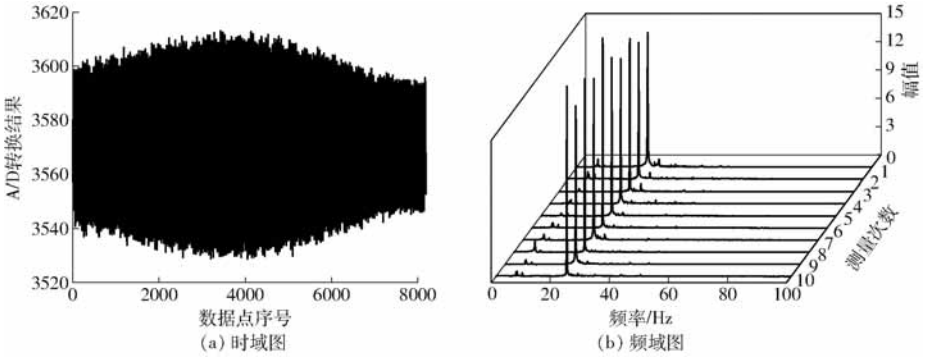

图 6 满载、20℃、常压状态下信号时域图和频域图

Fig. 6 Time domain diagram and frequency domain diagram of signal in full load, 20℃ and normal pressure states

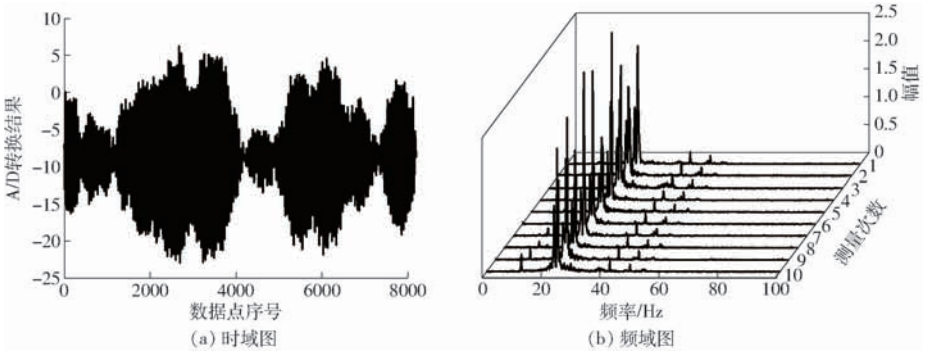

图 7 空载、50℃、常压状态下信号时域图和频域图

Fig. 7 Time domain diagram and frequency domain diagram of signal in no load, 50℃ and normal pressure states

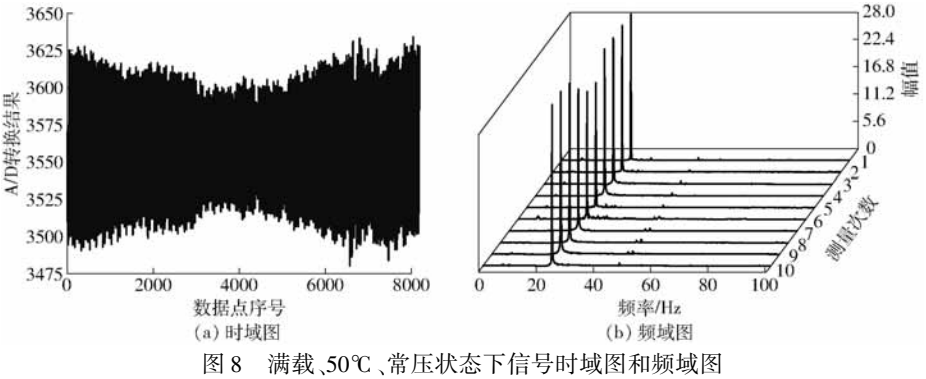

图 8 满载、50℃、常压状态下信号时域图和频域图

Fig. 8 Time domain diagram and frequency domain diagram of signal in full load, 50℃ and normal pressure states

直流信号和交流信号的叠加。在一个滤波采样周期中,质量的变化可以忽略不计,所以质量信号视为传感器输出信号的直流分量,干扰信号视为交流分量。理想状态的滤波只保留直流分量滤除全部交流分量,但实际中并不存在该理想状态滤波器。常见的数字低通滤波器有有限长冲击响应(FIR)低通滤波器和无限长冲击响应(IIR)低通滤波器,这两种滤波器均可以实现较好的低通滤波,

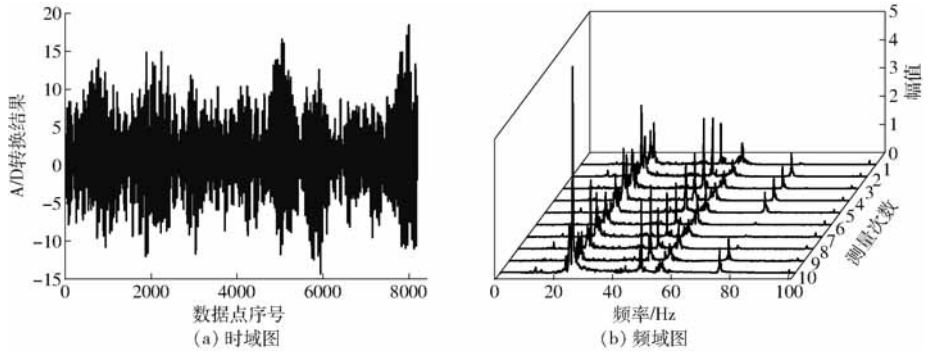

图 9　空载、20℃、真空状态下信号时域图和频域图

Fig. 9　Signal time domain diagram and frequency domain diagram of no load, 20℃ and vacuum pressure states

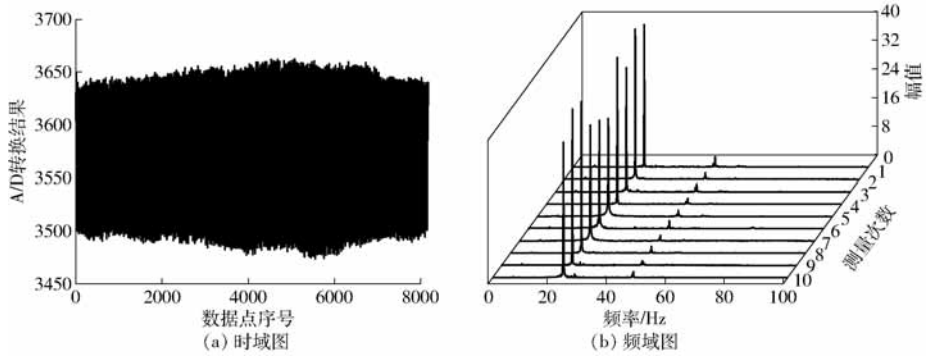

图 10　满载、20℃、真空状态下信号时域图和频域图

Fig. 10　Signal time domain diagram and frequency domain diagram of full load, 20℃ and vacuum pressure states

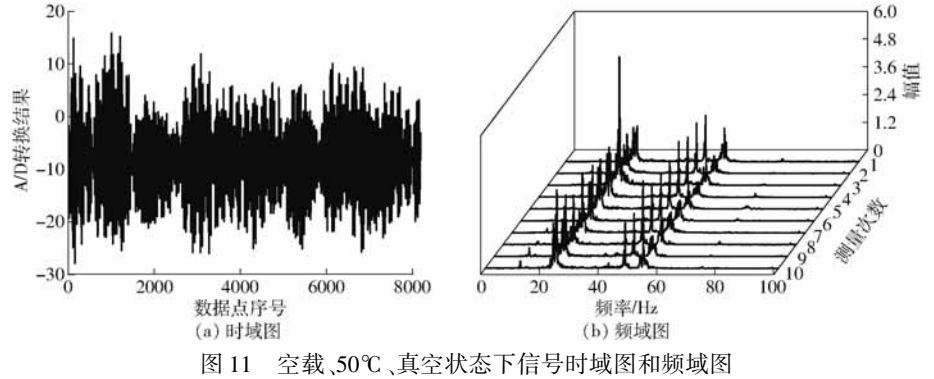

图 11　空载、50℃、真空状态下信号时域图和频域图

Fig. 11　Signal time domain diagram and frequency domain diagram of no load, 50℃ and vacuum pressure states

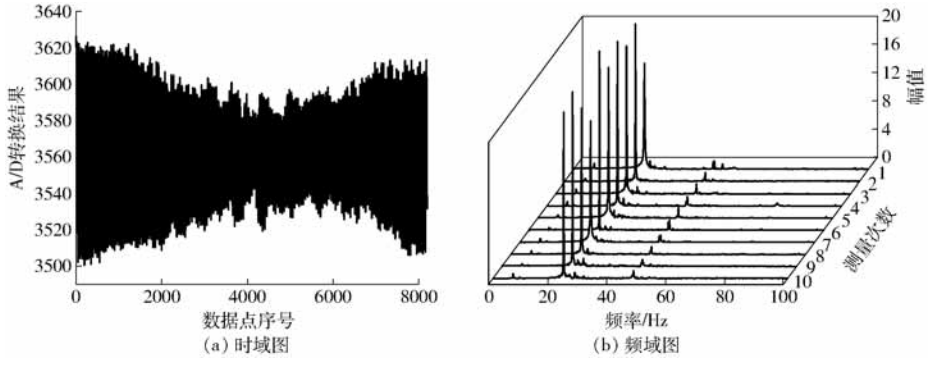

图 12　满载、50℃、真空状态下信号时域图和频域图

Fig. 12　Signal time domain diagram and frequency domain diagram of full load, 50℃ and vacuum pressure states

并且 FIR 滤波器结构简单，求解方便。但是在同样滤波效果的前提下，FIR 滤波器的阶数要远高于 IIR，即 FIR 滤波器的计算量远大于 IIR 滤波器[20-22]。为减小控制器的计算量，并提高滤波器的滤波效果，本文选择 IIR 滤波器进行滤波，滤波器基本差分方程[20]为

$$Y(n)=\sum_{i=0}^{N}a_iX(n-i)+\sum_{i=1}^{N}b_iY(n-i) \quad (1)$$

式中 $X(n-i)$——滤波前序列

$Y(n)$——滤波后序列

a_i、b_i——待求解加权系数

N——滤波器阶数

n——数据序号

选择巴特沃斯低通滤波器进行间接设计,选取干扰波形最复杂的空载、50℃、真空状态下的测量结果为测试序列对滤波器进行测试,求解流程如图13所示。

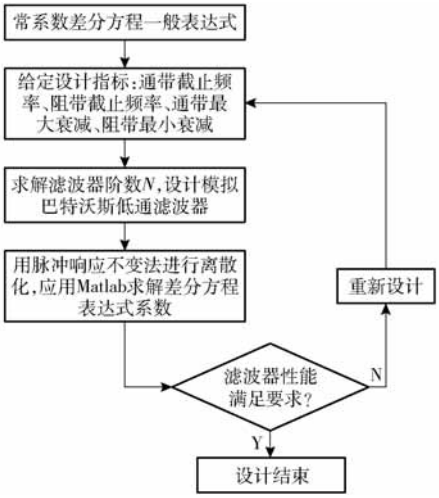

图 13 滤波器设计流程

Fig. 13 Design ideas of filter

设计要求为:采样频率 1 200 Hz,通带截止频率 0.125 Hz,阻带截止频率 8 Hz,通带最大衰减 1 dB,阻带最小衰减 60 dB。滤波器阶数 N 满足公式[21]

$$\left(\frac{\Omega_p}{\Omega_s}\right)^N=\sqrt{\frac{10^{0.1\alpha_p-1}}{10^{0.1\alpha_s-1}}} \quad (2)$$

式中 Ω_p——通带截止频率

Ω_s——阻带截止频率

α_p——通带最大衰减系数

α_s——阻带最小衰减系数

将设计要求代入式(2)得 $N=1.823\,4$,故取滤波器阶数为二阶,即 $N=2$。由 Matlab 中 butter 函数求解得式(1)中序列各加权系数为:$a_0=0.000\,000\,107\,04$、$a_1=0.000\,000\,214\,09$、$a_2=0.000\,000\,107\,04$、$b_1=-1.999\,1$、$b_2=0.999\,1$。

求得各加权系数后,即可由式(1)对原始序列进行滤波运算,为测试该滤波器能否达到设计要求,应用测试序列对滤波器性能进行测试,测试结果如图 14 所示。由图 14 可知,滤波器的响应时间约为 9 s,虽然单从响应时间来看数值较大,但与长达十几小时的整个干燥过程相比可以忽略;由图 14 可得,直流分量放大倍数约为 1,频率 8 Hz 以上的波形全部滤掉,故滤波器满足实际使用需求。

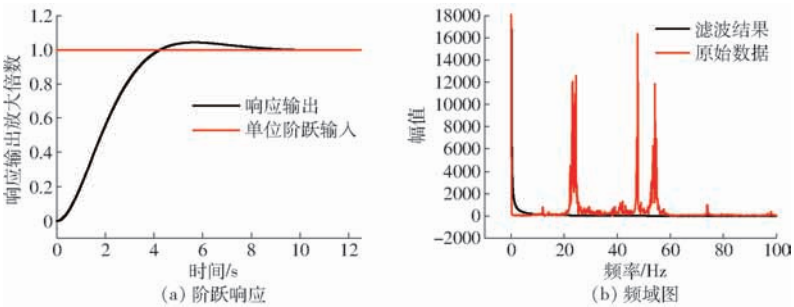

图 14 滤波器测试结果

Fig. 14 Filter test results

在滤波器设计完成后,对上文所有三因素二水平 8 种组合状态的测量数据进行了滤波测试,测试结果表明该滤波算法可以有效滤除所有干扰信号,其中空载、20℃、常压状态下的滤波效果如图 15 所

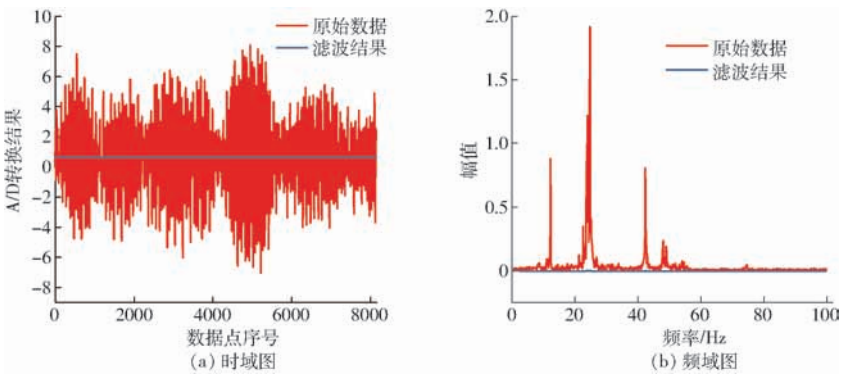

图 15 滤波效果对比

Fig. 15 Contrast of filtering effect

示。滤波后传感器输出示数稳定，响应时间满足测量要求，为后续温度修正提供了基础。

3.2　温度干扰测量、分析和补偿

3.2.1　影响规律分析

在滤除振动干扰后压力传感器输出稳定测量结果，但在负载不变条件下温度发生变化时输出数值会随之变化，导致测量结果不准确。为确定温度影响规律，分别对传感器在 20、30、40℃ 3 个温度点进行加载测量，加载质量为 0、190、381、571、671、771、…、1 571 g，得到 3 个温度下的传感器加载输出结果如图 16 所示。由图可得，传感器在 3 个温度点的加载输出规律一致，但随着温度升高传感器零点向下漂移，即温度变化不影响传感器输出特性，仅会导致传感器零点漂移，此为传感器固有特性，与物料变化情况无关。

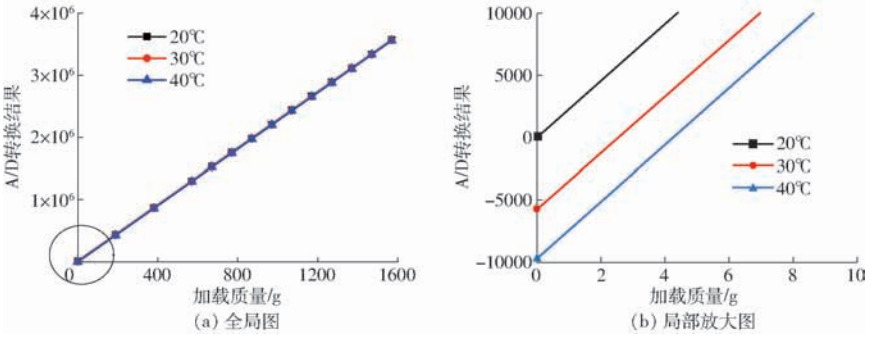

图 16　传感器不同温度加载输出结果

Fig. 16　Sensor loading output at different temperatures

3.2.2　测量方法

为定量测量传感器随温度变化的零点漂移规律，在空载条件下对传感器进行升温和降温试验，记录传感器在不同温度下的输出结果。在正常的干燥过程中压力传感器自身温度变化范围为 30 ~ 40℃，温度变化过程极其缓慢，最大升温幅度约为 5℃/h，在此过程中可以认为传感器不同位置温度相同，传感器温度测量点（图 4 中温度传感器粘贴位置）可以反映整个传感器的温度。另外由于干燥过程始终处于加热状态，几乎不会出现传感器降温情况。然而为充分考虑极端情况本文将测试温度扩展为 20 ~ 45℃，并且分别测量升温和降温规律。测量方法为：首先密闭干燥室，关闭真空泵、电磁阀、冷却机等其他外设；然后设置所有加热板温度为 90℃ 持续加热，使压力传感器在加热板作用下缓慢升温，待温度从 20℃ 升到 45℃ 时完成一次升温过程；最后，关闭加热板使压力传感器自然冷却至 20℃ 完成一次降温过程。整个测量过程中温度和压力传感器测量结果每隔 2 s 记录一次。

3.2.3　结果分析和拟合

压力传感器自身温度随时间变化如图 17a 所示，由于测量过程模拟实际干燥过程始终密闭干燥室，因此升温和降温过程极其缓慢，一次升降温循环约 14 h。由于升温和降温过程缓慢，压力传感器在两个过程中表现出的规律几乎相同，即温度滞回性可以忽略不计。因此，在 20 ~ 45℃ 范围内，间隔 0.125℃ 分别求得对应温度下的升温过程和降温过程传感器输出值的平均值，作为该温度下的传感器输出结果，绘制成如图 17b 所示的关系曲线。

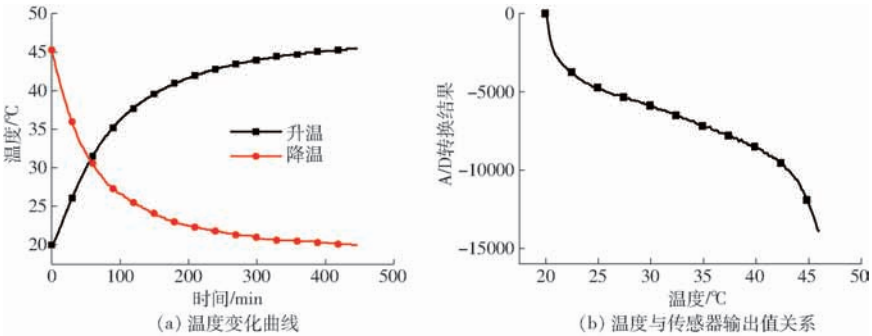

图 17　温度对测量结果的影响

Fig. 17　Measurement results of temperature influence

由图 17b 可知，温度对传感器输出值的影响并非简单的线性关系，为求得温度修正公式，分别对该曲线进行了二阶至六阶多项式建模，得到如图 18 所示的拟合结果。通过拟合曲线发现二阶

多项式拟合效果最差,三阶和四阶多项式拟合效果优于二阶多项式,五阶和六阶多项式拟合效果最优,但是三阶和四阶多项式在低温和高温段的拟合误差较大,而五、六阶多项式拟合计算量较大,进行单精度浮点运算时可能会存在较大误差,而双精度浮点运算对处理器要求较高,不利于整机控制的实时性。但通过分析曲线发现该曲线明显呈现出 3 个变化趋势:减速下降、匀速下降和加速下降,因此提出将曲线进行分段拟合,通过降低拟合多项式次数实现减小计算复杂度的目的。为找到分段端点,求得传感器输出值对温度的一阶差分序列,得到如图 19 所示的差分序列曲线,通过差分曲线发现该曲线存在两个明显的拐点,说明原始序列在该拐点处变化趋势有明显改变,因此选择在拐点处对原始序列进行分段,得到分段区间为[20℃,21.5℃)、[21.5℃,43℃)、[43℃,45℃]。在各分段区间内分别对原始序列进行拟合,得到如图 20 所示的拟合结果。

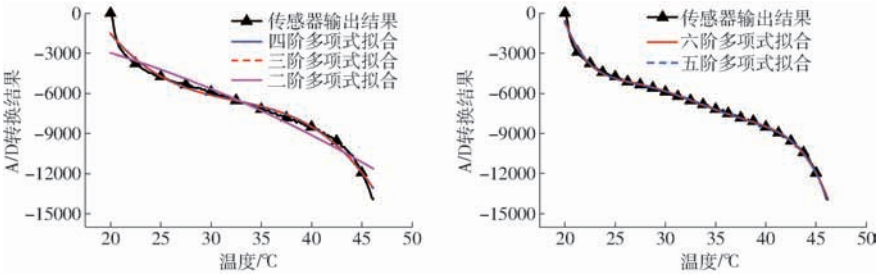

图 18 空载条件下温度对测量结果影响曲线与拟合情况

Fig. 18 Influence curve and fitting condition of temperature on measurement results under unloaded condition

各温度段拟合公式为

$$y=\begin{cases}647\,062-60\,410t+1\,403t^2 & (20℃\leqslant t<21.5℃)\\ 21\,235-2\,172t+62t^2-0.65t^3 & (21.5℃\leqslant t<43℃)\\ -499\,406+23\,206t-274.9t^2 & (43℃\leqslant t\leqslant 45℃)\end{cases} \tag{3}$$

式中 t——温度,℃

其中,在 20 ~ 21.5℃拟合公式的决定系数 R^2 = 0.988,21.5 ~ 43℃拟合时发现二阶拟合结果在首尾端存在较大误差,因此采用三阶函数拟合,拟合决定系数 R^2 = 0.998,43 ~ 45℃拟合函数的决定系数 R^2 = 0.999。各拟合段的 R^2 均大于 0.98,并且所有传感器输出的残差小于 250(与空载时不同温度段输出值相比,可以忽略),由此可得各阶段拟合公式均可以实现很好的拟合效果,可以对温度漂移进行修正。

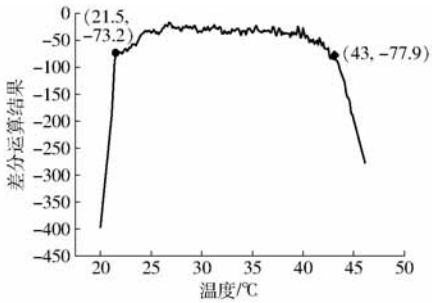

图 19 差分曲线和拐点

Fig. 19 Difference curve and inflection point

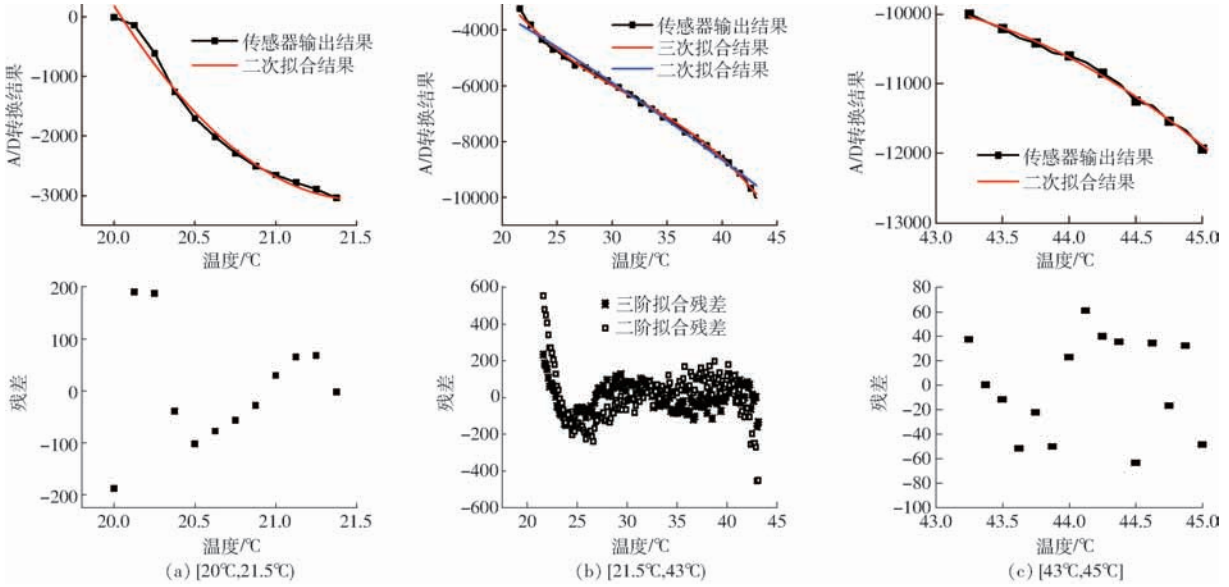

图 20 各温度段拟合结果及残差

Fig. 20 Fitting results of each temperature section and residual

3.3　气流扰动和气压变化影响

干燥室在进气和抽气过程时，强烈的气流冲击会对测量结果产生很大的干扰，试验测量发现进抽气冲击时间小于 1 min，干扰过程无明显规律，通过方程拟合的形式进行修正无法实现较高的拟合精度。虽然进气和抽气过程有较明显的干燥速率变化[14]，但由于压力切换过程时间较短，占整个干燥过程的 1/15 ~ 1/20，实际质量的变化并不明显[22]，因此本文研究中不考虑压力切换过程的质量实时变化规律，仅测量切换过程起始和结束点的质量数值。实际测量过程中将进气和抽气过程数据去掉后用线性插值数据代替。

实际测量中发现在滤除振动干扰信号后气压变化影响很小，几乎可以忽略不计，而且在不同干燥阶段影响大小不同，修正时可能会出现过拟合现象，因此本文不考虑气压变化影响。

4　质量拟合公式

在对传感器输出结果进行滤波和修正处理后，得到相对稳定的示数，但该示数并非最终需要的质量值，要想得到最终质量需对该示数与实际质量之间建立回归方程，通过回归方程建立对应关系进行变换。为得到回归方程，在温度基点 20℃ 环境下进行了 3 次加载-减载测试，标准质量采用适量直径为 0.4 ~ 0.6 mm 的玻璃珠放置在玻璃培养皿中由 JA31002 型电子天平（上海舜宇恒平科学仪器有限公司，量程 3 000 g，精度 0.01 g）称量得到。测试结果如表 1 所示。

表 1　传感器载荷测试结果

Tab.1　Sensor load test results

标准质量/	传感器输出结果						平均值
g	加载 1	减载 1	加载 2	减载 2	加载 3	减载 3	
0	34	210	68	192	55	230	131.5
190	430 353	430 370	430 333	430 366	430 325	430 351	430 349.7
381	851 805	851 870	851 781	851 878	851 792	851 880	851 834.3
571	1 295 771	1 295 955	1 295 736	1 295 902	1 295 750	1 295 916	1 295 838
771	1 749 599	1 749 771	1 749 558	1 749 731	1 749 564	1 749 767	1 749 665
971	2 203 402	2 203 659	2 203 343	2 203 602	2 203 470	2 203 615	2 203 515
1 171	2 657 310	2 657 418	2 657 234	2 657 383	2 657 293	2 657 404	2 657 340
1 371	3 111 185	3 111 223	3 111 140	3 111 181	3 111 144	3 111 195	3 111 178
1 571	3 565 035	3 565 030	3 564 990	3 565 027	3 565 009	3 565 013	3 565 351

分析表 1 数据可得，传感器在空载时输出结果小于温度修正拟合残差值，并且与有负载时的输出结果相比可以忽略不计。传感器输出结果与质量之间呈线性关系，可得到线性回归方程为

$$m = 0.000\,440\,21x - 1.455\,3 \tag{4}$$

式中　x——传感器振动滤波后输出值

m ——质量，g

其中，拟合方程决定系数 $R^2 = 0.999\,99$。

式(4)为在 20℃ 状态下未加温度修正的质量，要想得到不同温度下的最终测量结果需对该公式添加温度修正参数，即由式(3)和式(4)可得最终质量拟合公式为

$$m_o = 0.000\,440\,21(x - y) - 1.455\,3 \tag{5}$$

式中　m_o——校准后的输出质量

由式(5)可得，质量测量的最终结果由传感器振动滤波后的输出值和不同温度状态下的温度修正参数共同计算得出。

5　试验验证

5.1　测量精度试验测试

为有效验证质量测量系统在不同温度和载荷下的测量精度，选取验证温度点为 20、30、40℃；测试载荷尽量避开传感器线性拟合测试点，选取 0、571（3 个料盘的质量）、671、871、1 071、1 271、1 471 g。测试时在不同温度点进行 3 次加载-减载试验，取 3 次平均值为测试结果，以最大引用误差为评价依据，具体测试结果如表 2 所示。测试结果显示在 20 ~ 40℃ 范围内，静态条件下系统测量最大引用误差为 0.06%，测量精度满足干燥过程中质量监测的需要。

表 2　不同温度和载荷下的测量结果

Tab.2　Measurement results at different temperatures and loads

标准质量/	测量结果/g			引用误差/
g	20℃	30℃	40℃	%
0	0.1	−0.1	−0.1	−0.01
571	571.1	571.1	571.3	0.03
671	671.1	671.3	671.2	0.03
871	871.1	871.4	871.3	0.04
1 071	1 071.1	1 071.6	1 071.2	0.06
1 271	1 271.1	1 271.6	1 271.4	0.06
1 471	1 471.1	1 471.6	1 471.3	0.06

5.2 物料干燥试验测试

为验证在动态过程中系统测量结果能否反映物料质量变化情况,使用初始质量为 1 000 g、尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm 的茯苓块进行干燥过程质量测量测试,设置脉动比为真空时间 15 min、常压时间 4 min,加热板温度 65℃,连续干燥 500 min,每隔 2 s 记录一次物料质量、干燥室压力和压力传感器自身温度。干燥结束后取出样品,使用 JA31002 型电子天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司,量程3 000 g,精度 0.01 g)测量最终质量,与在线测量结果对比相差 1.0 g,即最大引用误差 0.1%。质量记录结果如图 21 所示,由图可见在不同温度和脉动干扰条件下,在线质量测量结果输出稳定变化,可以清楚反映整个干燥过程中的质量变化情况和干燥过程中不同状态下的干燥速率变化情况。

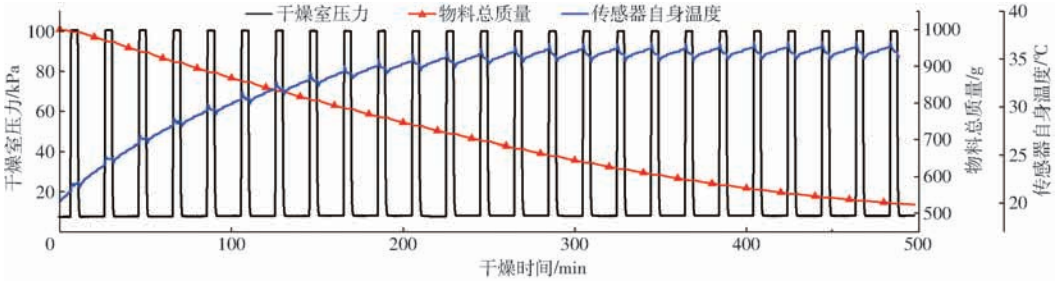

图 21 物料干燥试验质量在线测量结果

Fig. 21 On-line measurement results of material drying test

6 结论

(1)通过设计独立测量料架和选用高精度的压力传感器,在经过振动滤波、温度修正和气流扰动处理后,实现了在振动、温度变化和气流短时冲击干扰等多重扰动影响下的物料质量在线测量,测量总量程 1 500 g,去掉料盘后有效量程 1 000 g,在传感器温度 20 ~45℃、无明显外部剧烈振动、冲击时间小于 1 min 的正常进抽气条件下,测量系统最大引用误差 0.1%,并且测量结果在不同干扰影响下输出稳定,可以清楚反映整个干燥过程中的质量变化情况和不同状态下的干燥速率变化情况,满足了干燥过程中物料质量的测量要求。

(2)质量的测量过程会受到来自外界环境和设备本身的振动干扰,干扰振动呈现不同的共振频率,应用二阶无限长度冲击响应低通数字滤波器进行滤波,可以有效滤除测量系统的振动干扰。

(3)质量的测量结果会由于干燥室温度变化导致零点漂移,漂移量与温度呈高次函数关系,直接用高次函数拟合计算量较大,通过差分运算寻找拐点进行分段拟合,可以在大幅减小拟合计算量的前提下保证拟合精度,进而保证整机系统的控制实时性。

(4)质量在线测量方案具有较大的安装灵活性,可应用于大多数干燥设备,为研究农产品干燥过程中物料状态变化规律,进而为保证农产品干燥品质、实现节能减损提供技术支持。

参 考 文 献

1 WANG J, LAW C L, NEMA P K, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 224: 129 – 138.

2 XIE L, MUJUMDAR A S, FANG X M, et al. Far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR – PVD) of wolfberry (*Lycium barbarum* L.): effects on drying kinetics and quality attributes[J]. Food and Bioproducts Processing, 2017, 102: 320 – 331.

3 谢龙. 枸杞真空脉动干燥特性及干燥品质的研究[D]. 北京:中国农业大学,2017.
XIE Long. The drying characteristics and drying quality of wolfberry undergoing pulsed vacuum drying[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

4 钱婧雅,张茜,王军,等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(17):259 – 265.
QIAN Jingya, ZHANG Qian, WANG Jun, et al. Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 259 – 265. (in Chinese)

5 方小明,张晓琳,王军,等. 荷花粉真空脉动干燥特性和干燥品质[J]. 农业工程学报,2016,32(10):287 – 295.
FANG Xiaoming, ZHANG Xiaolin, WANG Jun, et al. Vacuum plused drying characteristics and quality of lotus pollen[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 287 – 295. (in Chinese)

6 白竣文,周存山,蔡健荣,等. 南瓜片真空脉动干燥特性及含水率预测[J]. 农业工程学报,2017,33(17):290 – 297.
BAI Junwen, ZHOU Cunshan, CAI Jianrong, et al. Vacuum pulse drying characteristics and moisture content prediction of pumpkin slices[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 290 – 297. (in Chinese)

7 ZHANG M, CHEN H Z, MUJUMDAR A S, et al. Recent developments in high-quality drying with energy-saving characteristic for fresh foods[J]. Drying Technology, 2015,33(13): 1590 – 1600.
8 SU Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Recent developments in smart drying technology[J]. Drying Technology, 2015, 33(3): 260 – 276.
9 高振江,吴定伟,张树阁,等. 滚筒式真空脉动干燥机设计[J]. 农业机械学报,2010,41(3):113 – 116,127.
GAO Zhenjiang, WU Dingwei, ZHANG Shuge, et al. Design of pulsed vacuum drum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 113 – 116,127. (in Chinese)
10 刘坦. 实时在线分拣和称重系统研究[D]. 上海:上海海洋大学,2013.
LIU Tan. Research on real-time online sorting and weighing system[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2013. (in Chinese)
11 张小超,胡小安,张银桥,等. 联合收获机粮食产量分布信息获取技术[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):173 – 176.
ZHANG Xiaochao, HU Xiaoan, ZHANG Yinqiao, et al. Yield distribution information measurement for grain combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):173 – 176. (in Chinese)
12 殷水忠. 果粒饮料盒中袋灌装机的设计及关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2017.
YIN Shuizhong. Design and key technology research of bag filling machine in fruit juice beverage box[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Techinology, 2017. (in Chinese)
13 王栋,林海,肖红伟,等. 气体射流冲击干燥含水率在线监控系统设计[J]. 农业工程学报,2014,30(19):316 – 324.
WANG Dong, LIN Hai, XIAO Hongwei, et al. Design of online monitoring system for material moisture content in air-impingement drying process[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 316 – 324. (in Chinese)
14 王栋. 基于多参数监控的真空脉动干燥过程研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.
WANG Dong. Study on optimization of sectional pulsed vacuum drying process based on multi-parameter monitoring[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
15 张卫鹏,肖红伟,郑志安,等. 基于碳纤维红外板加热的干燥装备设计与试验[J]. 农业工程学报,2016, 32(17):242 – 251.
ZHANG Weipeng, XIAO Hongwei, ZHENG Zhian, et al. Design and experiment of vacuum pulsed drying equipment based on carbon fiber infrared heating plate[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(17): 242 – 251. (in Chinese)
16 王栋,林海,姚雪东,等. 基于 Modbus 协议的干燥控制系统设计[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2012,30(1):110 – 115.
WANG Dong, LIN Hai, YAO Xuedong, et al. Design of the drying control system based on Modbus protocol[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2012, 30(1): 110 – 115. (in Chinese)
17 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB5009.3—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
18 BOSCHETTI G, CARACCIOLO R, RICHIEDEI D, et al. Model-based dynamic compensation of load cell response in weighing machines affected by environmental vibrations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 34(1 – 2): 116 – 130.
19 费恩曼. 费恩曼物理学讲义:第一卷[M]. 郑永令,等,译. 上海:上海科技出版公司, 2013.
20 米特拉 S K. 数字信号处理:上册[M]. 孙洪,等,译. 北京:电子工业出版社, 2006.
21 俞一彪, 孙兵. 数字信号处理——理论与应用[M]. 南京:东南大学出版社, 2005.
22 白竣文. 无核白葡萄干燥动力学及防褐变机理研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
BAI Junwen. Drying kinetics and anti-browning mechanism of Thompson seedless grapes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)