

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416559

基于微型数据采集器的一体化天平研制及应用^{*}

谢飞^{1,2} 蒙泽威^{1,2} 许晓斌^{1,2}

(1. 中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所 绵阳 621000; 2. 飞行器流体物理全国重点实验室 绵阳 621000)

摘要: 针对传统应变天平模拟信号传输方式存在抗干扰能力弱、传输距离短、线缆复杂等问题,开展了基于微型高精度数据采集器的一体化数字天平研制及应用。通过将微型高精度数据采集器嵌入测力天平,并且在微型高精度数据采集器中集成具有浮点运算能力的微控制单元,结合天平静态校准公式实现了天平实际力/力矩的实时解算和输出,并且实现了天平测量信号由模拟方式传输向数字方式传输的转变,提高测试系统的抗干扰能力。通过风洞内抗干扰测试表明,在常规高超声速风洞较为复杂的电磁环境下一体化天平信号传输几乎零干扰;通过开展高超升力体标模风洞试验验证表明,一体化天平试验重复性好(精度高),数据规律与常规天平测量结果一致,轴向力系数、法向力系数和俯仰力矩系数最大偏差分别为2.1%、1.8%和3.6%。

关键词: 应变天平;微型数据采集器;风洞试验;气动力;信号传输

中图分类号: TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Study and application of integrated balance based on micro data collector

Xie Fei^{1,2} Meng Zewei^{1,2} Xu Xiaobin^{1,2}(1. Hypervelocity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;
2. National Key Laboratory of Aerospace Physics in Fluids, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the problems of weak anti-interference ability, short transmission distance and complex cable in the traditional analog signal transmission mode of strain balance, an integrated digital balance based on micro high-precision data collector was developed and applied. By embedding the micro high-precision data collector into the strain balance and integrating the microcontroller unit (MCU) with floating-point operation ability in the micro high-precision integrated data collector, the real-time calculation and output of the actual force/torque of the balance were realized by combining the static calibration formula of the balance, and the transformation of the measurement signal of the balance from analog mode to digital mode was realized, thus improving the anti-interference ability of the test system. The anti-interference test in the wind tunnel showed that the signal transmission of the integrated balance was almost zero interference in the complex electromagnetic environment of the conventional hypersonic wind tunnel; the wind tunnel test of high lifting body model showed that the integrated balance test has good repeatability (high precision), and the data rules were consistent with the measured results of conventional balance. The maximum deviations of axial force coefficient, normal force coefficient and pitching moment coefficient were 2.1%, 1.8% and 3.6%, respectively.

Keywords: strain balance; microcontroller unit; wind tunnel test; aerodynamic force; signal transmission

0 引言

风洞天平是风洞试验的核心测力装置,可直接测量作用于试验模型上的气动载荷^[1-3]。风洞内部测试环境复杂,风洞天平受到力学、光学、电学、电磁学等多方面的干扰混叠。为了提高天平的抗干扰能力,采取了多种抗干扰措施,如采用双绞通信线、增添屏蔽层、接地、对称供电等。这些

措施对提高测量线路的抗干扰能力有一定的作用,但仍无法改变“弱”模拟信号在风洞强电磁环境下经过长距离传输的本质^[4-5]。尤其在小攻角、侧滑角的试验状态下,天平的电压信号输出不足0.5 mV,加之存在用于模型机构控制的大功率交流电机等的电磁场干扰,以及天平外引线在振动环境下自身切割磁力线等原因,这种小量毫伏级直流电压信号非常容易受到干扰,很难实现天平小量电压输出的精

收稿日期:2024-07-29

^{*} 基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFA0405700)资助

准测量。另外,现有风洞天平的信号传输方式需要风洞从业者仔细梳理导线,各个环节的仔细程度和注意事项较多,对风洞从业者的用户体验而言也较差。

由于天平腔体空间受限,测量信号通道数量较多,且风洞应变天平外形结构复杂、形式多样,导致当前风洞应变天平测量电路普遍未采用数字信号传输技术,因而在测量线路中传输的都是“弱”的模拟电压信号。模拟信号传输方式具有抗干扰能力弱、线缆复杂、具有噪声积累、技术实现难度小等特点。而数字信号传输方式具有抗干扰能力强、无噪声积累、微型集成化、算法复杂等特点。对比模拟信号传输,数字信号传输的优异性非常明显。采用数字信号传输形式来代替模拟信号传输形式是一种可靠且高效的处理方法,可以增强天平信号的抗干扰能力、满足长距离传输的需要,同时减少了风洞从业者对天平线缆的梳理和核对匹配过程。

风洞天平实现数字信号传输需要内置微型数据采集器,当前天平与微型数据采集器一体化模式目前还处于发展阶段,公开文献中相关案例还相对较少。然而,在“智能测力传感器”领域,目前国内外已经实现了在传感器内置集成电子设备,通过板载电子设备将模拟信号转换为数字信号,内部连接到传感器的应变计中,外部直接引出板载电子设备的多种接口直接与计算机进行数据交换^[6-8]。例如 24 位 4 kHz 的 AD(analog-to-digital converter)芯片、带浮点运算的 MCU(microcontroller unit,MCU)已在机器人力觉传感器等六分量力/力矩传感器行业应用多年,其稳定性和精度都得到了广泛认可^[9]。

由于应变天平本质上属于测力传感器,如能采用上述数据传输方式便能消除了昂贵的外部电源、多通道数据采集仪器等,而且对于单个或多个天平的风洞试验,则大幅度增加了试验的便利性。对此,Burns 等^[10]开发了板载电子设备和无线遥测系统,以便于从旋转天平中获取数据。板载电子设备最多可容纳 12 个惠斯登电桥、4 个压力传感器桥路、24 个应变片、10 个温度和 7 个健康监测电压的需求,并且可以做到实时同步采样,采用 24 位模/数转换器,直接向风洞数据采集系统无线传输数字天平信号。Bidgood 等^[11-12]则针对于改型的天平使用集成电路来提供应变计的桥路激励,放大天平信号,并增加温度补偿功能,成功实现集成电路在天平内小型空间中的嵌入,并增加了多项功能,满足风洞天平的试验需求。

国内在风洞天平与微型高精度集成电路一体化模式上也进行了探索。Liu 等^[13]为满足风洞天平数据采集的需要,设计了基于微处理器的风洞天平应变信号数据采集系统。理论分析和实测表明,该数据采集系统具有很高的分辨率,并实现数据加密、无线传输等多种功能,为风洞天平应变信号的数据采集提供了新的解决方案。此外,针对特定使用场景,国内李勇等^[14-15]分别对五分量天平、六分量复合式结构应变天平等展开了研制,天平静态校准综合校准

精度优于 0.21%,满足国军标相关技术指标。

综合国内外的研究情况,目前六分量“数字天平”的发展已经在行业内萌芽,但是对数字天平的抗干扰能力以及测量的精准和准度等方面尚未与常规天平开展详细的对比分析。随着航空航天飞行器的气动性能设计要求不断提高,对风洞试验数据精度要求也逐步提高,进而需要风洞天平有更高的测试精度和抗干扰能力。因此,开展适应于风洞天平的数字信号传输技术,研制六分量“数字天平”,实现风洞应变天平+微型高精度数据采集器一体化设计目标,实现天平测量信号由模拟方式传输向数字方式传输的转变,进一步提高风洞天平测试系统的抗干扰能力十分必要。

1 一体化数字天平研制方法

为了在常规六分量杆式天平中完成数据的 A/D 转换、数据解算和数据存储等,需要在狭窄的天平结构空间内实现高精度的多通道微小电压采集。此采集器需具备每通道不低于 24 位的采集分辨率,为 6 个应变桥路提供稳定电源并采集桥路输出电压(电压小于 2 mV/V)。此外,采集器还能将采集到的电压经过天平静态校准公式的迭代运算,以 480 Hz 的数据刷新率进行输出,以满足多种后端设备的适配。微型高精度集成数据采集器可采用矩形、方形或者其他异形结构进行设计,集成信号调理电路、A/D 转换电路、数据解算等模块,将应变片的桥路模拟输出转换为便于解算和传输的数字信号,配合高速采集和多次迭代等技术使输出数据精度和速度达到或优于传统天平数据采集系统的水平。总体方案原理框如图 1 所示。

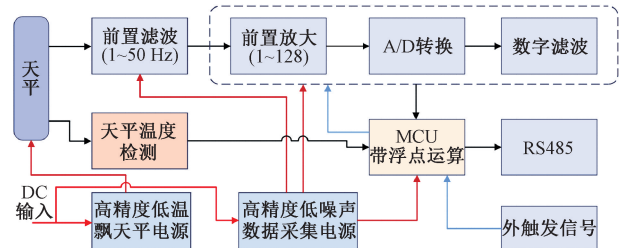


图 1 天平总体设计方案

Fig. 1 Overall design scheme of balance

风洞应变天平采用应变片进行组桥,桥路输出信号在 ± 20 mV 范围内,对此信号采集前需要进行放大、跟随等调理过程。传统采集设备一般采用多级运放的形式完成调理。但天平内部体积狭小,微型集成电路需要在很有限的空间内对微小信号进行 50 倍以上的放大,并保证调理精度。采集到的电压信号必须在天平静态校准公式基础上经过参数可变的迭代解耦运算才能得到模型的“被测载荷”结果。因此对处理器的运算能力要求高,必须通过软硬件方面的多种方式,深度提高采集卡运算效率。应变桥路的高精度供电和采集要求整个电路供电稳定,但稳定的供电需

要对电源进行多次稳压处理,故会增加电路体积和散热,为了实现稳定供电,需要研究高集成度低散热的供电方法。由于后端使用设备千差万别,采用不同的通信模式,这就要求电路设计中单独预留空间并设计不同的通信芯片,还需要考虑处理器与通信芯片之间的数据交换问题,保证不同的通信芯片可以与处理器完美对接。

如图 1 所示,嵌入式微型高精度数据采集器主要包括:1)电源处理部分,负责为采集器提供高质量的电源,分为高精度低噪声天平电源、高精度低噪声数据采集电源;2)信号调理部分,负责完成天平信号的滤波、信号放大(AD 芯片

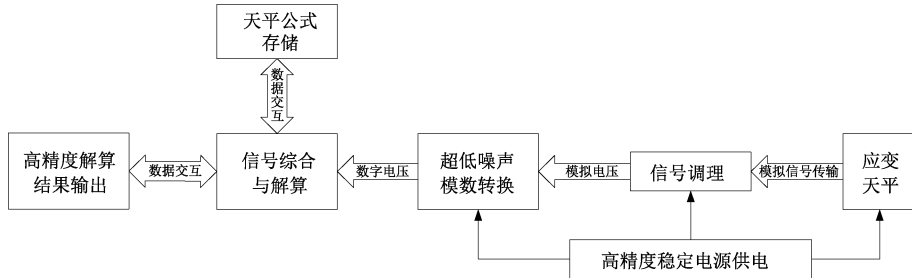


图 2 微型高精度数据采集器技术原理图

Fig. 2 Technical schematic diagram of micro high-precision data collector

在微型高精度集成数据采集器上增加具有浮点运算能力的 MCU,并可预先嵌入天平的静态校准公式,同时预留后期修改天平公式的接口,在风洞测力试验过程中,一体化天平可以将原始的电压信号同步处理为六分量力/力矩进行实时输出(输出速率与通道采样率一致,延时小于 2 ms)。

另外,一体化天平无需传输模拟信号的外引线,可将微型高精度集成数据采集器与天平本体一同进行温度补偿试验,直接将温度补偿结果固化进入采集器中。其具体实现方法是一体化天平的电桥桥路先依据常规方式采用温敏电阻丝做温度补偿,之后实测不同温度下的天平信号输出,记录并建立“温度-信号输出数据库”,将该数据库存储于 MCU 中。在风洞测力试验过程中,可通过嵌入式集成电路上的温度传感器和天平体上典型点位的多个温度传感器实时测量当前天平所处环境的温度,并根据实测结果自行查数据库并进行不同温度下的信号输出修正,从而获得更为精准的气动力测量结果。

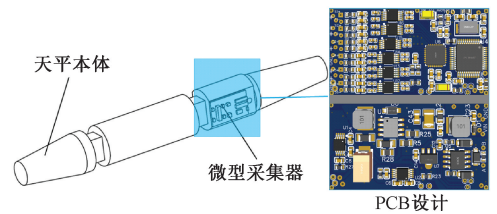
根据以上设计思路及方案,图 3 展示了设计出的一体化天平设计图及实物照片,实现了应变天平+嵌入式微型高精度数据采集器一体化设计的目标,可实现天平测量信号由模拟方式传输向数字方式传输的转变,为进一步测试一体化天平的性能,下一步将分别对一体化天平性能测试、一体化天平的应用效果展开分析。

2 一体化数字天平性能测试

图 4 给出了微型高精度数据采集器的数据采集流程示意图,其主要功能包括:1)上电初始化模块,完成单片机时钟、接口等初始化;2)外设初始化模块,完成 AD 芯片、

带);3)嵌入式微处理器(MCU)部分,负责完成数据采集控制、数据处理、信号传输及天平温度检测;4)数据输出接口部分,完成 MCU 与数据采集计算机的通讯接口。

微型高精度集成数据采集器的设计要求具有精度高、集成度高、运算速度快、采样速率高、可变参数等多种特征。在狭窄的天平结构空间内,不但需要完成 6 个通道电压信号高速高精度采集,还需要实现 6 路高精度供电。这就要求电路具有很高的集成度,同时为了保证分辨率和精度,需要采用高可靠性高分辨率超低噪声的模数转换器。其技术原理框图如图 2 所示。



(a) 微型采集器及 PCB 设计
(a) Micro collector and PCB design



(b) 一体化天平实物图
(b) Physical photo of integrated balance

图 3 一体化天平示意图及实物照片

Fig. 3 Schematic diagram and physical photo of integrated balance

RS485 通讯等初始化;3)参数配置模块,完成滤波、放大倍数、采样率、采样长度等采集参数的配置;4)天平参数修改,完成天平公式、温度修正参数、校准参数等的写入与保存。

另外,编写配套的上位机程序,方便实现系统调试及功能、性能测试测试,主要有两个模块,数据接收模块和天平参数修改模块。数据接收模块完成采集数据的接收、保存、显示。天平参数模块可实现对温度修正参数、计算公式参数等进行修改,上位机负责将这些参数以采集器需要的格式发送过去,并保存在采集器中。

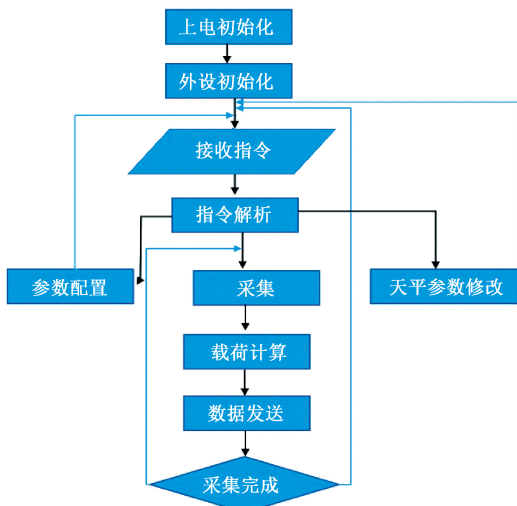


图 4 数据采集流程

Fig. 4 Data acquisition process

在使用之前,需要对微型高精度数据采集器开展性能测试,主要包括线性度测试、干扰输出、稳定性测试、采样频率、运行功率、电磁兼容检测等。这些参数指标严重影响天平测量的精度,为了避免或减少异常数据的出现,需要对每个指标开展测试^[16]。下面主要给出干扰输出测试和稳定性测试结果。

2.1 干扰输出测试

输入信号设置为 -5.9556 mV/V ,总共取 1 200 个采样点,放大倍数为 1,6 个通道测试结果如图 5 所示。

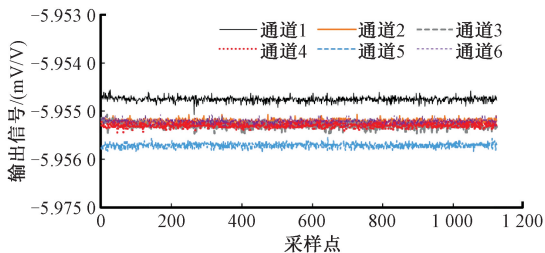


图 5 各通道输出信号随采样点波动

Fig. 5 The output signal of each channel fluctuates with the sampling point

由图可知,各个通道虽然输出信号略有区别,其中通道 1 和通道 5 差异最大,但两者差值小于 0.001 mV/V 。分析各通道波动可知,其干扰输出变化幅度不大,经统计,各通道均方根值均小于 $0.05\text{ }\mu\text{V}$,即高精度数据采集器干扰输出指标优于 $0.05\text{ }\mu\text{V/V}$ 。

2.2 稳定性测试

测试条件为先预热 30 min,在自然环境(实验室无恒温,温度范围约 $9\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$),给定一个信号,连续测试约 1 天,总共采集数据 24 000 个。测试中分别输入 0.5 mV 、 2 mV 、 5 mV 信号进行采集,计算方差及最大值-最小值。其中输入 0.502 mV 信号,内部放大倍数 128 倍,通道 1 波

形如图 6 所示。

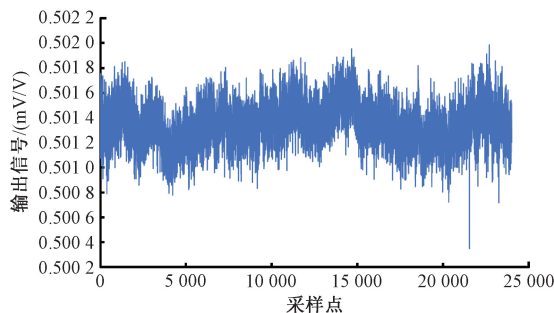


图 6 通道 1 输出信号随采样点波动

Fig. 6 The output signal of channel 1 fluctuates with the sampling point

由图 6 可知,连续测试 1 天条件下,通道 1 输出信号受干扰影响,输出信号最大 0.5020 mV/V ,最小为 0.5003 mV/V ,其最大波动为 0.0017 mV/V ,即稳定性测试结果表明,在 0.5020 mV 输入情况下,微型高精度数据采集器 24 h 波动幅度均优于 $1.7\text{ }\mu\text{V/V}$ 。

2.3 微型高精度数据采集器技术指标

经过前面参数设计以及性能测试,本文微型高精度数据采集器主要技术指标如表 1 所示。

表 1 微型高精度数据采集器技术指标

Table 1 Technical index of micro high-precision data collector

技术内容	技术指标
外形尺寸(含外壳、接口)	25 mm×45 mm×8 mm (预留标准焊点接口)
使用温度范围	$-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
测量通道数	6
每通道最高采样率	500 Hz
采样分辨率	24 位/通道
调理放大倍数	1~128 倍(可调)
低通滤波频率	1~50(可调)
采集器精度(非线性度)	$\leq 0.03\%$
天平桥路电压	5 V DC
电磁干扰输出	$\leq 0.2\text{ }\mu\text{V/V}$
运行功率	$\geq 0.5\text{ W}$
输出线缆	四芯,直径小于 6 mm
电磁兼容试验通过等级	满足 GB/T 17626.4 电磁兼容检测中信号 2 级以上 A 级

3 一体化数字天平应用分析

3.1 一体化天平静态校准结果

一体化天平研制完成后,在高超声速风洞天平静态校准系统上开展静态校准性能测试实验,测试实验依据

GJB2244A-2011《风洞应变天平规范》开展。天平静态校准 结果如表 2 所示。

表 2 一体化天平静态校准结果

Table 2 Static calibration results of integrated balance

	Y	M_z	Z	M_y	X	M_x
设计载荷/(N, N·m)	3 000	400	400	50	400	30
校准载荷/(kg, kg·m)	160	12.8	50	1.92	36	2
桥臂阻值/ Ω	700	700	1 000	1 000	1 000	700
电桥类型	双	双	双	双	单	单
供桥电压/V	5	5	5	5	5	5
综合加载重复性/%FS	0.007	0.012	0.013	0.021	0.013	0.038
综合加载误差/%FS	0.041	0.032	0.050	0.116	0.311	0.093

根据校准结果可知,综合加载重复性最大偏差为 0.038%FS(M_x 方向分量),最小偏差为,0.007%FS(Y 方向分量);综合加载最大误差为 0.311%FS(X 方向分量),综合加载最小误差为 0.032%FS(M_z 方向分量),以上误差校准结果表明性能指标除轴向力分量满足 GJB 2244A-2011《风洞应变天平规范》合格指标要求外,其余分量到达先进指标要求。

3.2 一体化天平抗干扰测试

在高超声速风洞试验段内,一体化天平开展了干扰测试,主要是针对洞内模型机构运动、上电干扰等情况下的抗干扰测试,并与常规天平(使用风洞配套的高精度数据采集系统采集信号)开展了对比,测试结果如图 7 和 8 所示。

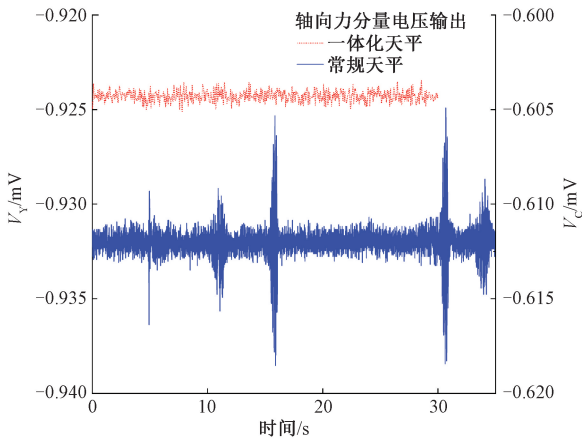


图 7 两种天平抗干扰测试 1

Fig. 7 Anti-interference test 1 of two kinds of balances

图 7 为天平带模型条件下整个测力系统处于静止状态,然后在测试时间内进行模型机构 β 、 γ 电机上电和去电操作,其中一体化天平电压输出以 V_Y 表示、常规天平电压输出以 V_C 表示。从图中可以看出在整个测试时间内一体化天平 V_Y 输出曲线几乎无变化,不受模型机构上电和去电干扰;而常规天平 V_C 输出曲线出现明显的干扰信号,最大干扰量 13 μv 。

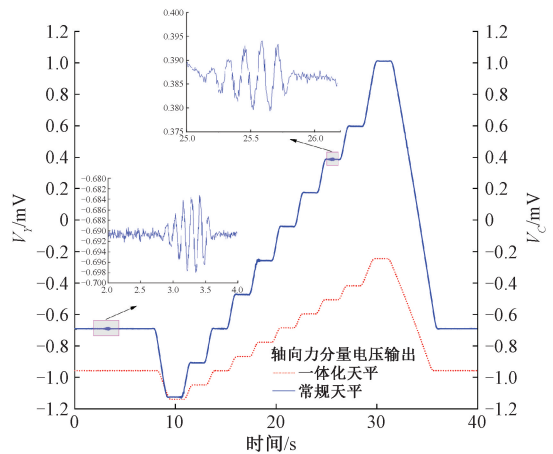


图 8 两种天平抗干扰测试 2

Fig. 8 Anti-interference test 2 of two kinds of balances

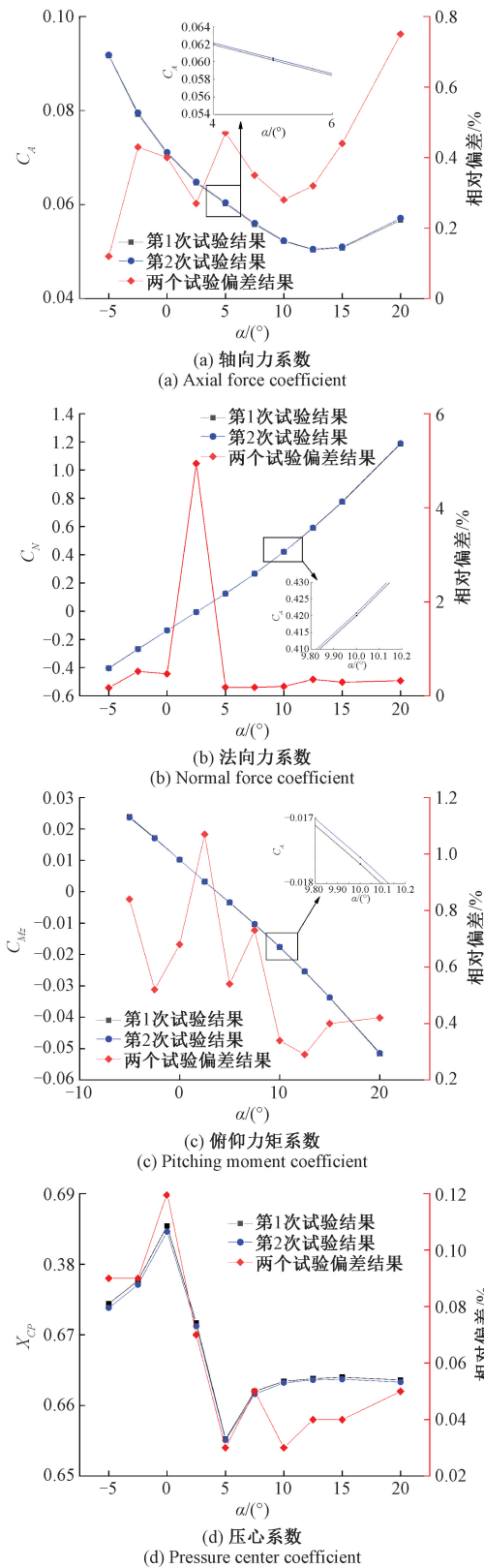
图 8 为天平带模型条件下整个测力系统预走攻角运动状态,且模型机构 β 、 γ 电机处于上电状态条件的测试结果。从图中可以看出在整个测试时间内一体化天平 V_Y 输出曲线几乎无干扰波动情况;而常规天平 V_C 输出曲线在走攻角前和某一攻角位置处出现两次明显的干扰信号,最大干扰量 15 μv 。

3.3 一体化天平标模试验结果

在高超声速风洞中使用升力体标模开展了一体化天平验证试验,升力体标模试验模型尺寸为:长 1 220 mm、宽 470 mm、高 210 mm。具体状态为:试验马赫数 $M=6$ 、攻角范围 $\alpha=-5^\circ\sim 20^\circ$ 、单位雷诺数 1.20×10^7 。

图 9 给出了一体化天平在高超声速风洞中两次升力体标模试验结果,从图中可以看出两次试验的相对偏差(两次试验差值除以对应攻角两次试验系数平均值的绝对百分比)除 $\alpha=2.5^\circ$ 时 C_N 绝对量值接近零除外,其余状态各分量重复性偏差均小于 1.1%,表明一体化天平试验的重复性较好。

图 10 给出了一体化天平升力体标模试验结果与常规天平升力体标模试验结果对比曲线,从图中可以看出一体化天平试验结果纵向气动力/力矩系数随攻角变化曲线规



误差、试验雷诺数差异等原因,两者间存在一定的偏差,相对偏差(两者差值除以攻角范围内系数最大绝对值)最大值:轴向力系数 C_A 为 2.1%、法向力系数 C_N 为 1.8%、俯仰力矩系数 C_{Mz} 为 3.6%。

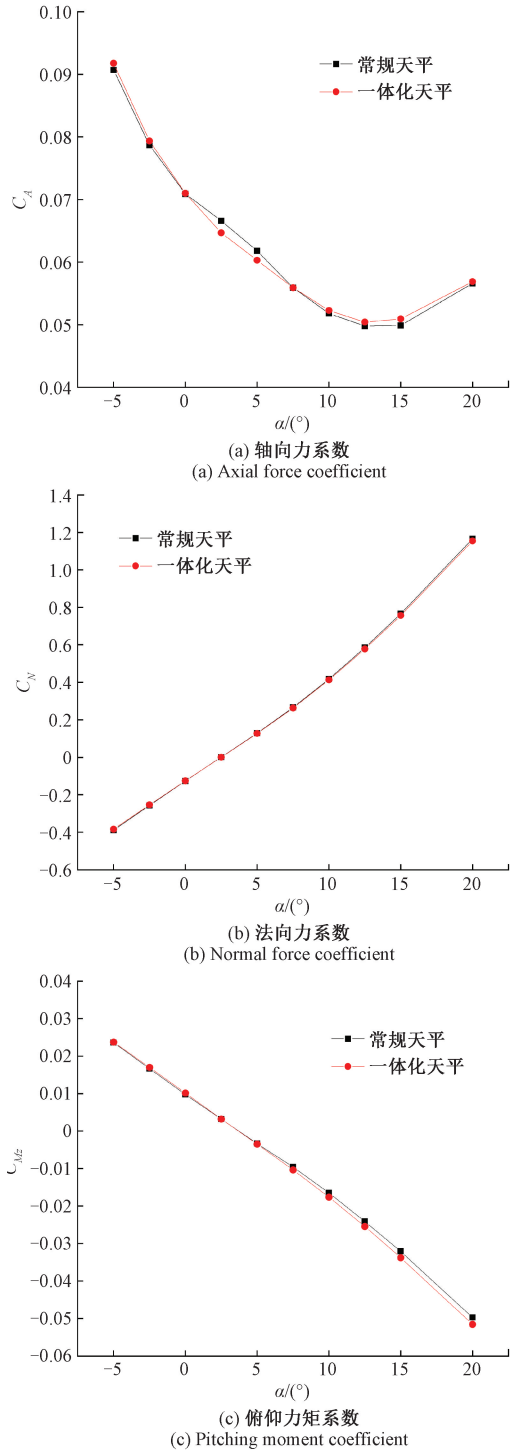


图 9 一体化天平重复性试验结果对比

Fig. 9 Comparisons of repeatability test of integrated balance

律与常规天平一致,数据规律一致,但由于测力天平测量

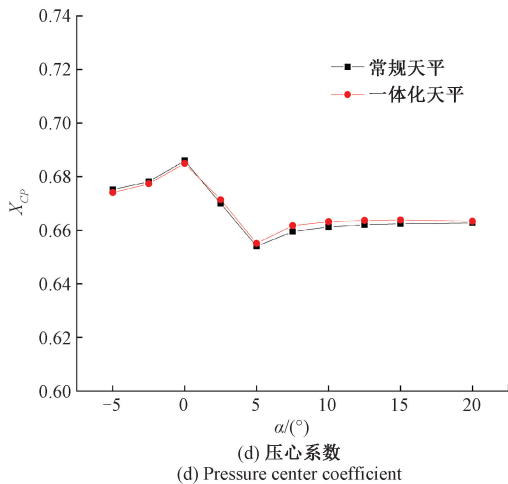


图 10 一体化天平试验结果准确度对比

Fig. 10 Accuracy comparisons of test results of integrated balance

4 结 论

针对传统应变天平模拟信号传输方式存在抗干扰能力弱、传输距离短、线缆复杂等问题,开展了基于微型高精度数据采集器的一体化数字天平研制及应用。通过将微型高精度数据采集器嵌入测力天平,并且在微型高精度数据采集器中集成具有浮点运算能力的微控制单元,结合天平静态校准公式实现了天平实际力/力矩的实时解算和输出,并且实现了天平测量信号由模拟方式传输向数字方式传输的转变。一体化天平静态校准结果表明除轴向力分量满足 GJB 2244A-2011《风洞应变天平规范》合格指标要求外,其余分量均到达先进指标要求。通过风洞内抗干扰测试表明,在常规高超声速风洞较为复杂的电磁环境下一体化天平信号传输几乎零干扰。通过开展高超升力体标模风洞试验验证表明,一体化天平试验重复性好(精度高),数据规律与常规天平测量结果一致,轴向力系数、法向力系数和俯仰力矩系数最大偏差分别为 2.1%、1.8%和 3.6%。

参考文献

[1] 战培国. 国外风洞天平技术研究进展[J]. 飞航导弹, 2018, 10: 1-6.
ZHAN P G. Research progress of wind tunnel balance technology abroad[J]. Aerodynamic Missile, 2018, 10: 1-6.

[2] 苗磊, 马涛, 徐志伟, 等. 热力耦合作用下的风洞应变天平校准技术[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 153-162.
MIAO L, MA T, XU ZH W, et al. The calibration technology of wind tunnel strain-gage balance under the action of thermo-mechanical coupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 153-162.

[3] 苗磊, 贺中, 赵忠良, 等. 某飞行器大攻角通气测力试验装置研制与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(2): 150-157.
MIAO L, HE ZH, ZHAO ZH L, et al. Development and application of air input and force measurement test device under the condition of high angles of attack for aircraft[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(2): 150-157.

[4] 谭茂. 基于相关原理的风洞天平弱信号检测系统设计[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
TAN M. Weak signal detection system for wind tunnel balance based on correlation theory [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.

[5] 阎成, 邓晓曼, 贾霜, 等. 提升风洞测力数据采集系统电磁兼容能力初步研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(9): 28-36.
YAN CH, DENG X M, JIA SH, et al. A preliminary study on improving EMC capability for force measurement data acquisition system in wind tunnel[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(9): 28-36.

[6] 陈尧森. 基于嵌入式的高精度力学传感器设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
CHEN Y S. High precision force sensor design and implementation based on embedded system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

[7] 胡紫阳, 何广平, 张忠海, 等. 用于扑翼飞行器气动测试的三维力传感器研究与实验[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 15-22.
HU Z Y, HE G P, ZHANG ZH H, et al. Research and experiment of the three-dimensional force sensor for aerodynamic testing of flapping wing vehicles[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 15-22.

[8] 姚建涛, 陈俊涛, 陈新博, 等. 可嵌入式多维柔性力/位传感器[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 184-192.
YAO J T, CHEN J T, CHEN X B, et al. Embedded flexible multi-dimensional displacement and force sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 184-192.

[9] 谢政. 压电式六维力测量仪数据采集系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
XIE ZH. Research on data acquisition system of piezoelectric six-axis force measuring instrument[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.

[10] BURNS D E, WILLIAMS Q L, PHILLIPS B D, et al. Review of potential wind tunnel balance

- technologies[R]. NASA Glenn Research Center, 2016.
- [11] BIDGOOD P M. Development of the HARMS-2b balance[C]. 6th International Symposium on Strain Gauged Balances, 2008: 1-12.
- [12] BIDGOOD P M. On the application of analogue signal integrated circuits in a refurbished side wall balance[C]. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2015.
- [13] LIU W, LIU J X, QIAO L Y, et al. Design of strain signal data acquisition system for wind tunnel balance based on Zynq[C]. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2021: 2-7.
- [14] 李勇, 郭举光, 赵晓光, 等. 五分量短舱内阻测力天平的研制[J]. 电子测量技术, 2022, 45(22): 82-86.
LI Y, GUO J G, ZHAO X G, et al. The study of five components nacelle internal flow resistance force balance [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(22): 82-86.
- [15] 马涛, 王树民, 潘华焯, 等. 六分量大阻力复合式结构天平研制与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(12): 198-205.
- MA T, WANG SH M, PAN H Y, et al. Development of a six-component large axial force strain gauge balance based on complex structure[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(12): 198-205.
- [16] 战慧强, 张琦, 梅家宁, 等. 低速增压风洞测力试验异常数据检测专家系统设计研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(6): 123-130.
ZHAN H Q, ZHANG Q, MEI J N, et al. Design and research on expert system for abnormal data detection in low-speed pressurized wind tunnel force test [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(6): 123-130.

作者简介

谢飞,正高级工程师,主要研究方向为高超声速风洞试验技术。

E-mail:1780266182@qq.com

蒙泽威(通信作者),工程师,主要研究方向为高超声速风洞气动设计及气动力测量技术。

E-mail:mengzw94@163.com