

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.02.11

# 基于离心机的低气压精密控制研究

代洁, 董雪明, 王敏林, 秦朝俊

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 针对惯性器件全量程气压灵敏度校准难题, 发明了一种可抗高离心加速度的气压箱结构, 并研制了离心-气压复合校准装置, 实现了大  $g$  值条件下惯性器件气压特性的校准。本装置设计了两种工作模式: 离心机静止时, 利用真空泵、高精度压力传感器等气压精密测控系统实现离心-气压复合校准装置的精密控压; 离心机工作时, 通过密封技术等实现离心-气压复合校准装置保压。本装置通过对安装在离心机上的试验箱内气压进行精密控制, 将高线加速度与气压环境有机结合在一起, 为加速度计提供可靠的加速度、气压复合计量校准环境。实验结果验证了所设计的气压箱结构可以实现气压范围 1 ~ 100 kPa, 气压偏差优于 10 Pa 的精密控制。

**关键词:** 气压箱; 离心-气压复合校准; 真空泵; 密封技术

**中图分类号:** TB93; V211

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2020)02-0059-05

## Precision Control of Low Air Pressure Based on Centrifuge

DAI Jie, DONG Xueming, WANG Minlin, QIN Chaojun

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of calibrating the full-range air pressure sensitivity of inertial devices, an air pressure box structure capable of resisting high centrifugal acceleration is invented, and a centrifugal-air pressure composite calibration device is developed to realize the calibration of the air pressure characteristics of inertial devices under the condition of large  $g$  value. Two working modes are designed based on the centrifugal-air pressure compound calibration device: when the centrifuge is stationary, the precise pressure control of the centrifugal-air pressure compound calibration device is realized by using precise pressure measurement and control systems such as vacuum pump and high-precision pressure sensor; when the centrifuge is working, the pressure maintaining scheme of the centrifugal-air pressure composite calibration device is realized through sealing technology and the like. Therefore, the device organically integrates high linear acceleration and air pressure environment by precisely controlling the air pressure in the experimental box installed on the centrifuge, and provides a reliable acceleration and air pressure compound metering calibration environment for the accelerometer. The experimental results verify that the designed air pressure box structure can realize precise control of the air pressure in the range of 1 kPa to 100 kPa and the air pressure deviation is better than 10 Pa.

**Key words:** air pressure chamber; centrifuge-air pressure composite calibration; vacuum pump; sealing technology

## 0 引言

惯性器件及系统大多在恶劣环境条件下工作, 环境条件严重地影响其量值特性, 从而影响装备的性能。以英美为代表的西方发达国家十分重视多物理场(包括: 加速度、温度、气压、振动等)复合条件下惯性器件校准技术的研究<sup>[1]</sup>; 通过研制多物理场复合的惯性器件校准装置, 对惯性器件实施多物理场复合条件下的校准, 可建立复杂的多因素校准模型。该多因素校准模型方程系数有十几项, 甚至几十项<sup>[2,3]</sup>。利用多因素校准模型方程可补偿使用环境条件对惯性器件的影响, 有效地提高了惯性器件的使用精度, 与标准环境条件下的校准相比, 使用精度可提高一个甚至二至三

个数量级<sup>[4]</sup>, 有非常重要的研究意义。由于惯性器件的校准精度直接影响武器系统的打击精度, 国外对此方面实行技术封锁, 不可能从国外直接引进或得到这些技术。

离心-气压复合校准装置研究的主要工作在于对加速度计多物理场复合计量校准装置的研究, 主要内容包括: 装置的总体方案设计; 系统硬件平台的设计与搭建; 设计与完善离心-气压复合试验箱; 离心-气压复合试验箱气压精密测控系统的设计与实现。

基于以上工作, 发明了一种可抗高离心加速度的气压箱结构, 研制了气压范围为 1 ~ 100 kPa、气压偏差优于 10 Pa 的离心-气压复合校准装置, 可以有效模拟海平面到 32400 m 的高度时气压环境, 国内首次实

现了惯性器件的大  $g$  值下气压灵敏度校准，实现了惯性器件全量程内的气压灵敏度校准。

### 1 离心-气压复合校准装置结构

离心-气压复合校准装置主要由离心转台、气压试验箱、控制系统组成，整体结构如图 1 所示。

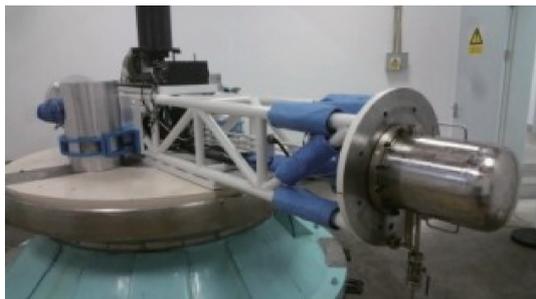


图 1 离心-气压复合校准装置

#### 1.1 工作原理

当离心机处于静止状态时，连通地面气压控制设备与试验箱，控制气压达到给定值，离心机旋转前，关闭试验箱的气路管线，拆除与地面设备连接部分，如图 2 所示。

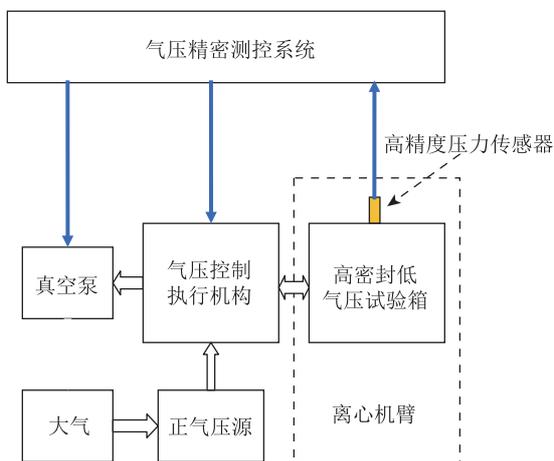


图 2 装置组成及原理图

#### 1.2 装置组成及作用

装置由高气密性低气压试验箱、气压控制执行机构、气压精密测控系统、高精度压力传感器和真空泵 5 部分组成。

高气密性低气压试验箱为加速度计提供安装和校准环境，真空泵提供负气压源，气压精密测控单元通过试验箱气压的高精度测量及对气压控制执行机构的协调控制，使高气密性低气压试验箱内气压最终精确达到

设定值。

#### 1.2.1 气压执行机构

通过设计合理的气路结构和选择恰当的执行元件，实现了对气压试验箱内气压的精密控制，使各个执行机构按照一定的步骤动作，并解决了气路结构与气压试验箱连接密封性及可拆卸性等问题。

##### 1) 气路原理

本装置采用大气环境作为正气压源，实现 1 ~ 100 kPa 的压力控制范围；采用真空发生装置实现真空环境。气路结构流程图如图 3 所示。

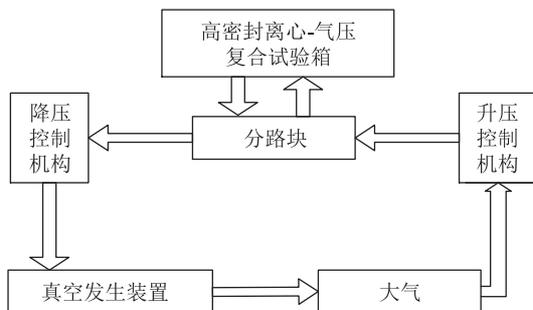


图 3 气路结构流程图

从图 3 中可以看出，气路分为两路控制：一路通过真空发生装置和降压控制机构实现试验箱内低气压调节；另一路通过升压控制机构实现试验箱内升压调节，从而保证控制阀的方向与气流方向一致。试验箱通过法兰安装固定在离心机机臂上，手动真空球阀通过法兰一端与气压试验箱连接，另一端安装一个快速插接头，此接头不仅有利于气路密封，也方便与地面气路控制装置连接和拆卸。

离心机未工作时，对试验箱内的气压进行降压或升压两种处理。降压时，需要利用真空泵对试验箱进行抽气来实现，控制降压阀 1 和 2 的通断来开闭降压气路通道，然后通过协调控制粗调阀和精调阀来实现气体流量调节，从而实现试验箱内气压降压控制；升压时，选择大气作为正气压源对试验箱进行充气，控制升压阀 1 和 2 的通断来开闭升压气路通道，然后通过协调控制粗调阀和精调阀来实现气体流量调节，从而实现试验箱内气压升压控制。试验箱内气压生成原理如图 4 所示。

离心机旋转前，打开手动真空球阀，通过以上过程使气压箱内气压达到设定值，然后关闭手动真空球阀，拆除地面气路装置与离心机上试验箱的气路连接，从而实现在离心机工作状态下，气压试验箱能够提供目标气压环境，供加速度计校准。

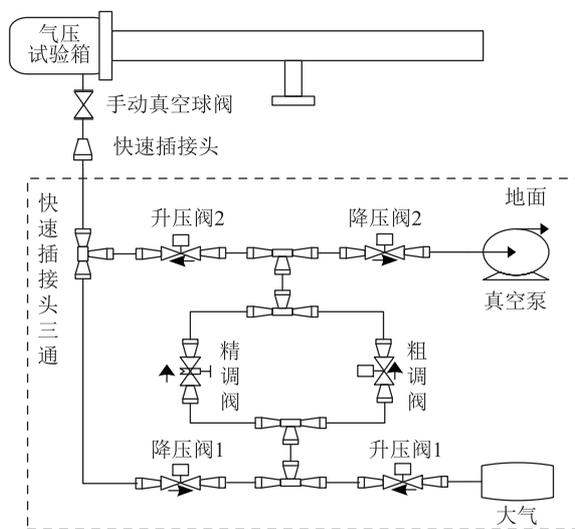


图4 试验箱气压生成原理图

## 2) 气路元器件选择

气路元器件的选择对实现高密封气压试验箱内气压的精密控制至关重要,从图4中可以看出气路控制执行机构主要包括真空泵、升压阀、降压阀、粗调阀、精调阀。

### ① 真空泵

真空泵是产生负压的一种新型、高效、清洁的气源发生装置,本系统使用油润滑旋片式真空泵,这种真空泵是利用泵腔内活塞做旋转运动,将气体吸入、压缩并排除,以达到抽气目的,其最大的特点是当进口端气体压腔大于一定阈值时,抽气速率(体积流量)是一个定值。考虑到本系统目标气压范围为1~100 kPa,选用真空泵的流量为20 m<sup>3</sup>/h,极限真空为200 Pa<sup>[5]</sup>,可满足要求。

### ② 升、降压阀及粗调阀

本系统统一选用直动电磁阀,控制电压为24 VDC,通径为4 mm。直动电磁阀用于压力控制与调节场合,控制简单,流量比较大,可提高控制效率。由于这种电磁阀通电后,阀门开度保持不变,类似孔板流量计,一般可以认为流过电磁阀的流量与电磁阀前后的压差的平方成正比<sup>[6]</sup>。即

$$Q = a \sqrt{|p_1 - p_2|} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为流过阀的体积流量;  $p_1$  为阀前压力;  $p_2$  为阀后压力;  $a$  为比例常数,对于气体一定、结构一定的电磁阀,其值变化不大。

从式(1)中可以看出,当阀门前后压差一定时,通过阀门的气体流量也就一定。对于直动电磁阀,在加

电时其阀门开度基本按线性急速增大,到完全开度的时间极短,通常小于10 ms,而关闭时间相对长一些,因此当通过阀的气体流量较大时,需要考虑由于阀门开启和关闭的延时而导致气体过冲的问题。

### ③ 精调阀

为实现对高密封气压试验箱内气压小范围的精确控制,要求精调阀在小范围内能连续、准确地控制流量的大小,从而控制气压试验箱内气压的大小。本系统选用比例电磁调节阀作为精调阀,这种调节阀本质上可看作一个局部阻力可变的元件,根据能量守恒定理,当流过调节阀的流体为不可压缩流体时,可得到流量方程为<sup>[7-9]</sup>

$$Q = \frac{NA}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} \quad (2)$$

式中:  $N$  为常数,当流速和管道直径确定时,  $N$  固定不变;  $A$  为阀连接管的截面积;  $\xi$  为阀的阻力系数,与阀结构形式、流体性质及阀的开度有关;  $\rho$  为介质密度。

当阀口径、阀两端压差一定时,通过控制比例电磁调节阀两端的电压大小,改变阀芯行程(开度)来改变流通截面积,从而改变阻力系数,调节流入或流出试验箱的气体流量,以实现气压压力控制。本系统选用进口的高精度PSV-2比例电磁调节阀,通径为1.02 mm,最大气体流量为13 L/min,调节电压选用0~12 V,利用幅值为12 V的PWM信号通过一阶滤波电路RC实现D/A变换,通过改变PWM的占空比,改变输出的模拟电压值,从而控制比例电磁阀的开度。

### 1.2.2 气压精密测控

气压精密测控系统的作用是:在离心机未工作状态下将试验箱压力控制到设定值;在离心机工作状态下进行保压监测。测控原理如图5所示。

首先,通过测控单元给定压力设定值,在控制的过程中,采用硅谐振压力传感器检测试验箱内的压力值,传感器的输出信号经过调理与采集送入测控单元中心,形成压力反馈,然后根据一定的控制策略产生控制信号,该控制信号经过设备驱动作用到压力执行机构上,用来控制执行机构中阀门的开度以调节试验箱内气体的压力值,最终使试验箱的压力值达到设定值,然后关闭真空手动球阀,断开与试验箱的气路连接,进入保压监测阶段。离心机与地面电路通过滑环转接,保证离心机工作时,能对试验箱内气压进行监测。

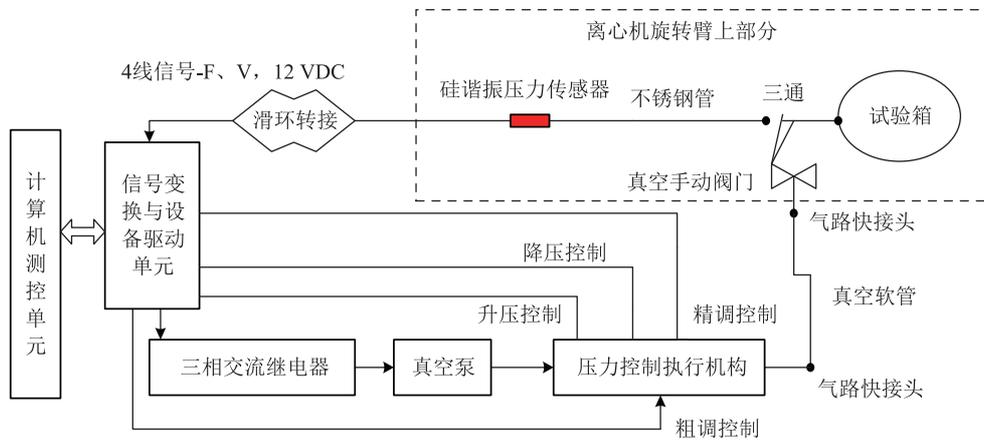


图5 气压精密测控原理图

系统硬件配置如图6所示，配置包括测量部分与信号调理与驱动部分。测量气体压力选择硅谐振式压力传感器，该传感器以频率量输出，具有测试精度高、带有温度补偿的优点，是测量气体绝对压力的传感器；

信号的调理与驱动部分主要分为信号放大模块、频率测量模块、DO/PWM发生模块、V/F变换模块、设备驱动模块以及D/A变换模块。

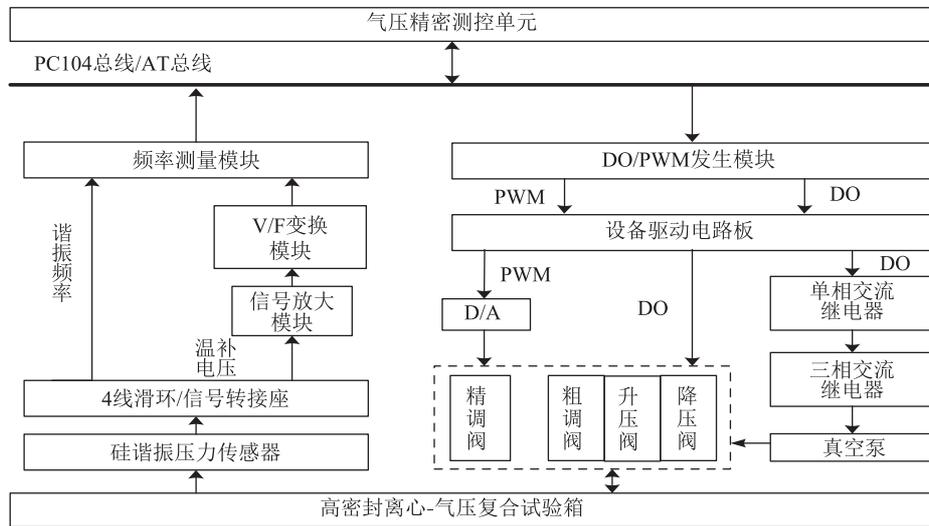


图6 气压精密测控系统硬件配置

## 2 实施效果

根据离心-气压复合校准装置气压控制范围1~100 kPa及加速度范围1g~20g，设定6个压力控制目标工作点：1, 5, 20, 40, 60, 100 kPa，在每个压力工作点下，使精密离心机在1g, 10g, 20g三个加速度点下运转，然后在每个加速度点下测量和记录10 min时的压力输出值。限于篇幅，这里选取了气压测量范围的上下限的控制曲线和气压偏差的测量曲线进行说明，如图7~图10所示。

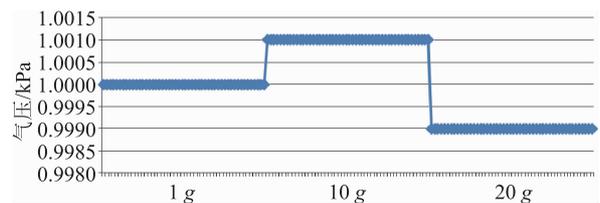


图7 1 kPa控制曲线

选取每一个加速度下气压偏差最大值作为该加速度点下的气压偏差，在加速度范围为1g~20g和气压范围为1~100 kPa内实验结果数据统计如表1所示。

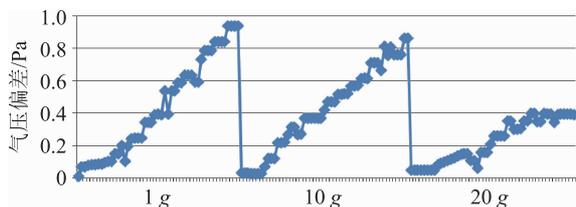


图8 1 kPa 时气压偏差测量曲线

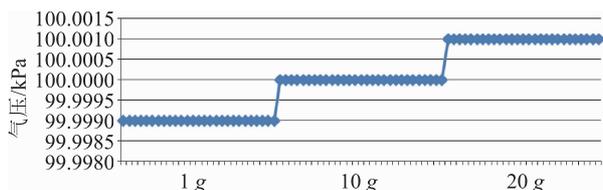


图9 100 kPa 控制曲线

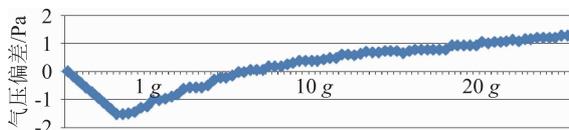


图10 100 kPa 时气压偏差测量曲线

表1 实验结果数据统计

设定 气压/kPa	气压偏差/Pa		
	加速度 1 g 时	加速度 10 g 时	加速度 20 g 时
1	0.96	0.86	0.40
5	1.40	-1.26	-0.77
20	1.43	-0.60	0.80
40	-1.44	1.20	1.30
60	-1.70	0.77	1.45
100	-1.51	0.69	1.28

从表1中可以看出,在加速度全量程范围和气压全量程范围内,离心-气压复合校准装置最大气压偏差为-1.7 Pa,达到了气压偏差优于10 Pa的设计要求,能够开展加速度计的离心-气压复合校准。

### 3 结论

提出并实现了一种可抗高离心加速度的气压箱结构,研制了气压范围1~100 kPa、气压偏差优于10 Pa的离心-气压复合校准装置,可以有效模拟海平面到32400 m的高度下的气压环境,在国内首次实现了惯性器件的大g值下气压灵敏度校准。实验结果证明了所设计气压箱精密控制系统的有效性。

### 参考文献

- [1] SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] Burrows C R, Webb C R. Simulation of an On-Off Pneumatic Servomechanism [J]. Pro. Ins. Mech. Engrs, 1967, 182 (1): 29.
- [3] Burrows C R, Webb C R. Further Study of a Low-Pressure On-Off Pneumatic Servomechanism [J]. Pro. Inst. Mech. Engrs, 1969, 184(45): 849-858.
- [4] 王祖温. 日本气动技术的现状及发展[J]. 液压与气动, 1993(4): 3-6.
- [5] 赵彤. 从SMC看世界气动技术发展(上)[J]. 液压与气动, 1993(2): 3-7.
- [6] Bulow Ralf. Three Inventors-Scenes from Early German Computing History [J]. Annals of the History of Computing, IEEE, 1990, 12(2): 109-126.
- [7] Wang J, Pu J, Moore P, et al. Modeling Study and Servo-control of Air Motor Systems [J]. International Journal of Control, 1998, 71(3): 459-476.
- [8] Wang J, Pu J, Moore P, et al. Accurate Positioning Control of Servo-pneumatic Actuator Systems: An Application to Food Packaging [J]. Control Engineering Practice, 1999, 7(6): 699-706.

收稿日期: 2020-01-10

### 作者简介

代洁(1967-),女,工程师,主要研究方向为惯性器件校准技术研究。

