

# 风洞振动校准装置研制

褚卫华<sup>1</sup> 陈权<sup>2</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所 绵阳 621000; 2. 北京东方计量测试研究所 北京 100086)

**摘要:** 针对风洞振动传感器和振动测量系统等测试特点,系统介绍了一种校准频率范围跨越低中高频性能满足风洞振动特征和测试需求的校准装置。通过仿真计算和优化设计,解决了风洞振动校准装置运动部件动力优化设计、气隙磁路优化设计、精密气膜导向设计、功率放大器设计、振动台低频失真控制等关键技术问题,校准装置研制完成后经第三方计量部门检定,性能指标和校准不确定度评定结果远高于相关技术要求,有效提升了风洞振动测量方面计量保障能力。

**关键词:** 振动量级;谐波失真;比较法校准;相频特性

**中图分类号:** TB936 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.13020

## Development of wind tunnel vibration calibration device

Chu Weihua<sup>1</sup> Chen Quan<sup>2</sup>

(1. Facility Design and Instrument Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;  
2. Beijing Orient Institute for Measurement & Test, Beijing 100086, China)

**Abstract:** For wind tunnel test characteristic such as vibration sensor and measurement system, the system introduces a calibration frequency range across the high frequency of low frequency can meet the demand of wind vibration characteristics and testing of the calibration device, the power of the moving parts, solve the optimal design, the air gap magnetic circuit optimization design, precision guide design, power amplifier design of gas film, shaking table control of key technical problems such as low frequency distortion, The evaluation results of device performance test and calibration uncertainty are far higher than the relevant technical requirements, which effectively improves the measurement support ability of wind tunnel vibration measurement.

**Keywords:** vibration level; harmonic distortion; comparison calibration; phase shift characteristic

## 0 引言

风洞是支撑飞行器进行空气动力试验、理论验证和产品设计研发,引领空气动力相关学科发展的重要基础设施,为满足大型运输机、先进战斗机、重型运载火箭等研制需求,我国先后启动多项大型风洞建设任务<sup>[1]</sup>,遇到许多新的技术难题,其中风洞振动精细化测试是其中需要解决的关键问题之一,这是因为:1)风洞在试验运行过程中承受着气动载荷、气动热、气动冲击、动力机组和机械载荷等多物理场耦合激励,导致风洞产生剧烈振动,造成风洞结构产生疲劳破坏,影响风洞的性能,振动参数成为风洞运行状态监测和健康管理的重要特征参数。2)风洞试验模型支撑系统在气动载荷激励下产生振动,直接影响试验结果,振动精确测量是主动控制等振动抑制技术的重要前提。3)对动力组件、管道系统、洞体结构、阀门系统等振动进行精确测试,才能有效分析风洞振动机理和传导过程,对振源进行定位。

为了保证风洞振动参数测量准确可靠,解决风洞振动参数量值溯源问题,在综合分析不同流速(低速、高速和高超声速)、不同驱动方式(连续式、暂冲式)和不同用途等类型风洞振动特征和测试需求基础上,研制了一套能对风洞振动传感器、振动测量系统进行系统校准的振动校准装置,主要实现的目标技术指标如下:

- 1)校准频率:2 Hz~10 kHz;
- 2)最大传感器负载:250 g;
- 3)最大位移峰峰值:10 mm;
- 4)振动台横向振动比:10% 2 Hz~1 kHz, 20% 1~10 kHz;
- 5)振动台总谐波失真度:5% 2~5 Hz, 3% 5 Hz~10 kHz。

20世纪50年代初,美国国家航天局和美国国家标准技术研究所针对军事和航空航天领域的振动传感器校准需

求,开始了 10~500 Hz 中高频段和 2~55 Hz 低频段的振动校准技术研究,并取得了显著成果<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代中期,德国物理技术研究院发明了激光干涉正弦逼近法,实现振幅和相位数据同步采集,成为振动校准的一个重要方法<sup>[3]</sup>。日本国家计量研究院(NMIJ)的加速度计校准系统频率下限 0.1 Hz,而俄罗斯早在 1996 年就已经在超低频振动计量上取得了很大的进步,低频计量范围拓展到了 0.01 Hz。同期美国 ENDEVCO 公司也推出了基于比较法的全自动振动校准系统,校准频率范围 1 Hz~5 kHz;德国思科创(SPEKTRA)公司生产的振动标准装置采用比较法校准,其下限频率为 0.2 Hz。我国在振动校准方面起步较晚,直到 20 世纪 50 年代末,浙江大学和核工业部及航天工业部合作研制出了一套名为 BZD-1 中频校准的装置,并在中频研究的基础上又成功研制了一套 2~100 Hz 低频段振动校准系统,随后中国计量科学院四川分院也研制出达到世界先进水平的低频段振动校准系统。由于不同频段的校准系统,振动特性和控制方法存在较大区别,振动校准装置研制按超低频、低频、中高频分频段方式,风洞校准装置跨越低、中高频频段,因此,现在对风洞振动传感器校准一般都采用低频、中高频校准装置分频段校准的方式,校准效率低且校准幅值、相位特性等往往也不能完全满足风洞振动传感器要求,当前没有针对风洞振动传感器的专门校准装置。为了满足风洞振动传感器校准频率特性需求,校准装置在运动部件动力优化设计、振动台量级控制与波形失真度修正、功率放大器设计等方面面临诸多新的难题。

### 1 振动校准装置总体实现方案

振动校准方法有绝对法和比较法<sup>[4]</sup>,比较法校准通过被校传感器与标准传感器比较获得被校传感器灵敏度参数<sup>[5]</sup>,校准速度快且操作简单,更适用于风洞现场,因此风洞振动校准装置选用了正弦比较法。正弦比较法校准装置原理框图如图 1,校准时标准传感器与被校准传感器“背靠背”安装在振动台上,信号发生器按设定幅值和频率产生标准正弦信号,经功率放大后驱动振动台工作<sup>[6]</sup>。

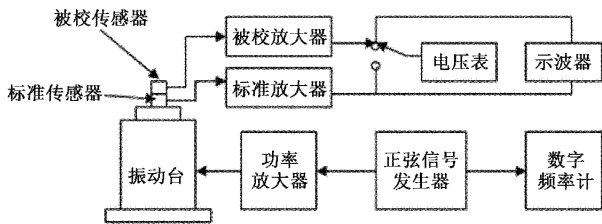


图 1 振动校准比较法系统原理

风洞振动校准装置采用电磁力驱动方式,通过给恒定磁场中的线圈通有一定交变电流产生交变激磁力来驱动振动台面产生振动<sup>[7]</sup>,具体原理如图 2。当布置于高磁感应强度空隙中的驱动线圈在经过功率放大器放大后的控制振动信号作用下,振动台就会产生目标振动波形<sup>[8-9]</sup>。研制基

于电磁振动台跨越低中高频段的风洞振动校准装置涉及运动部件动力优化设计、气隙磁路优化设计、精密气膜导向设计、功率放大器设计、振动台低频失真控制等多项关键技术。

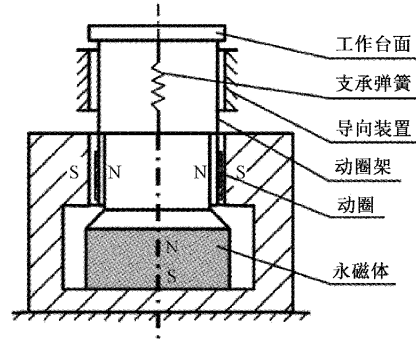


图 2 垂直向标准振动台原理图

#### 1.1 运动部件动力优化设计

运动部件的动力学特性直接关系到振动台的工作频段、运动量参数指标和输出运动波形失真度,特别是校准装置中运动部件各阶模态中的第一阶轴向固有频率决定着振动台最高工作频率,对运动部件进行正确模态计算分析直接决定着装置研制的成败。

运动部件有限元模态分析是在建立正确模态模型基础上进行数值仿真计算的过程。线性定常系统动力学运动方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \tag{1}$$

式中: $M$ 、 $C$  和  $K$  分别为运动部件的质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$  和  $u$  分别为运动部件的加速度、速度和位移向量, $F(t)$  为外载荷向量<sup>[10]</sup>。采用有限元法分析系统结构模态时, $M$ 、 $C$  和  $K$  则分别由有限单元质量矩阵  $M^e$ 、阻尼矩阵  $C^e$  和刚度矩阵  $K^e$  代替, $F(t)$  由有限单元的外载荷向量  $F^e(t)$  代替,有限元的运动方程为:

$$M^e\ddot{u} + C^e\dot{u} + K^e u = F^e(t) \tag{2}$$

式中: $M^e = \int \rho v N^T N dV$ , $\rho$  为材料密度, $N$  为形状函数; $C^e = \int \mu v N^T N dV$ , $\mu$  为单元材料的阻尼力系数; $K^e = \int B v t D B dV$ , $B$  为应变矩阵, $D$  为与材料弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$  相关的弹性系数矩阵; $F^e$  为外载荷向量, $F^e = \int N v T F_0 dV + \int N_s T F_0 dS$ , $F_0$  为单位体积力, $F_0$  为单元表面力<sup>[11]</sup>。

不考虑系统外载荷,振动台运动部件选材为金属件,且材料阻尼小,阻尼对结构自由振动频率和振型影响不大的情况下,得到的无阻尼自由振动方程为:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \tag{3}$$

由于线性系统的  $M$  和  $K$  都为常数,系统结构自由振动形式为简谐运动,则:

$$\mu_i = \varphi_i \cos \omega_i t \quad (4)$$

且自由振动时系统结构中各单元的位移量不全为零,则系统结构的自由振动频率方程为:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (5)$$

而质量矩阵  $M$  和刚度矩阵  $K$  均为  $n$  阶方阵,则式(5)是关于  $\omega^2$  的  $n$  次代数方程,系统结构的自由振动频率为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$  同时满足关系  $\omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_n$ 。

按照上述分析,采用动力学软件对振动台运动部分进行模态分析,将物理场参照模型设置为 Mechanical,网格划分方法设置为 Automatic,综合考虑系统计算结果精度和计算速度,在动力学软件计算配置中将 Relevance Center 和 Span Angle Center 都设置为 Fine, Smoothing 设置为 High,最终运动部件网格划分模型如图3所示。

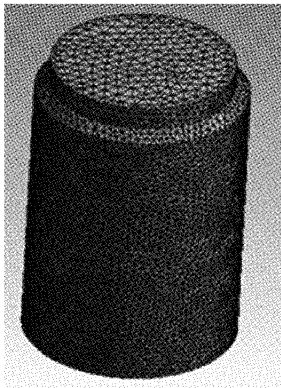


图3 振动台运动部件网格模型

运动部件一阶共振频率越高,动圈的力更容易传递到台面上产生加速度,另外,当一阶共振频率为振动校准装置最高工作频率3倍以内时,激励波形的低阶次谐波可能会与运动部件的一阶共振频率相重合,造成谐波频率放大,导致严重的波形失真,为了保证垂直振动台的良好性能,需要在对模态做出合理分析的基础上,提高其一阶共振频率。将模型设置为自由约束,分析动圈的前30阶模态,选择总变形为分析对象,经反复优化和迭代计算后,最终计算得到的运动部件各阶模态频率值如表1。从表1中可以看出前6阶模态为动圈的刚体模态,分别对应6个刚体自由度,对应的频率值均接近于0。综合分析各阶模态对应的振型图,在第16阶模态也就是31060 Hz处找到与动圈工作方向一致的模态,具体如图4。风洞振动校准系统实际工作频率上限要求为20000 Hz,因此动圈优化设计结果满足要求。

### 1.2 气隙磁路优化设计

振动校准系统单磁路结构可分为四部分:永磁体部分(I区)、长气隙部分(II区)、与长气隙相对的内磁轭和外磁轭部分(III区)、内磁轭和外磁轭其他部分(IV区)。将II区和III区沿气隙长度方向均分成  $N$  份,由于气隙磁感应强度上下分布对称,对图5所示单磁路结构的上半部分建立集总参数模型,进行长气隙中磁感应强度分布情况分析。

表1 运动部件各阶模态频率值

振型	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型	频率/Hz
1	0	11	27 668	21	39 778
2	0	12	27 668	22	39 779
3	$4.5912 \times 10^{-3}$	13	28 541	23	42 467
4	$6.3912 \times 10^{-3}$	14	29 257	24	42 468
5	$7.3242 \times 10^{-3}$	15	29 258	25	46 607
6	$8.4806 \times 10^{-3}$	16	31 060	26	46 608
7	14 001	17	35 237	27	50 049
8	14 001	18	35 238	28	50 049
9	22 360	19	39 099	29	50 922
10	22 361	20	39 100	30	54 677

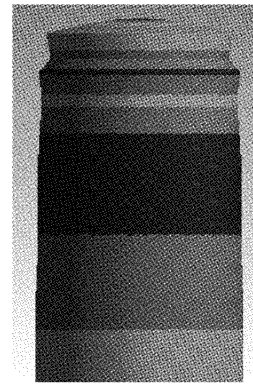


图4 运动部件第16阶模态( $f=31060$  Hz)

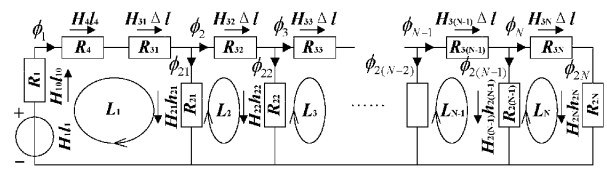


图5 单磁路结构集总参数模型

设  $I$  为 II 区和 III 区长度,  $h_{2i}$  ( $i=1, 2, \dots, N-1, N$ ) 为 II 区第  $i$  份厚度,  $\Delta I = I/N$  为 III 区各份长度。永磁体可等效为磁动势  $H_1 l_1$  与磁阻  $R_1$  的串联,其中,磁阻  $R_1$  上的磁势差为  $H_{10} l_{10}$ 。  $R_4, R_{2i}$  和  $R_{3i}$  分别为 IV 区、II 区第  $i$  份和 III 区第  $i$  份的磁阻,  $H_1 l_1, H_2 h_{2i}$  和  $H_{3i} \Delta I$  分别为对应磁阻两端的磁势差。由于 II 区和 III 区是均匀细分,因此  $R_{2i} = R_{2(i+1)}, R_{3i} = R_{3(i+1)}$  ( $i=1, 2, \dots, N-1$ )。根据基尔霍夫第二定律,可得:

$$\begin{cases} H_1 l_1 = H_{10} l_{10} + H_4 l_4 + H_{21} h_{21} \\ H_{21} h_{21} = H_{32} \Delta I + H_{22} h_{22} \\ H_{22} h_{22} = H_{33} \Delta I + H_{23} h_{23} \\ \dots \\ H_{2(N-2)} h_{2(N-2)} = H_{3(N-1)} \Delta I + H_{2(N-1)} h_{2(N-1)} \\ H_{2(N-1)} h_{2(N-1)} = H_{3N} \Delta I + H_{2N} h_{2N} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $H_{3i} \Delta I$  和  $H_{2i} h_{2i}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 具有相同的符号,假设  $H_{3i} \Delta I$  和  $H_{2i} h_{2i}$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 均大于0,则:

$$H_{21}h_{21} > H_{22}h_{22} > H_{23}h_{23} > \dots > H_{2(N-1)}h_{2(N-1)} > H_{2N}h_{2N}. \quad (7)$$

假设  $\Phi_i (i=1, 2, \dots, N)$  为经过 III 区第  $i$  份的磁通, 根据基尔霍夫第一定律, 可得:

$$\varphi_i = \varphi_{i+1} + \varphi_{2i} \quad (8)$$

式中:  $\Phi_{2i}$  为经过 II 区第  $i$  份的磁通。  $\Phi_{i+1}$  和  $\Phi_{2i} (i=1, 2, \dots, N)$  具有相同的符号, 且一般情况下均大于 0, 由式(8)得  $\Phi_i > \Phi_{i+1} (i=1, 2, \dots, N-1)$ 。由于  $R_{3i} = R_{3(i+1)} (i=1, 2, \dots, N-1)$ , 并考虑到欧姆定律, 可得:

$$H_{3i} \Delta l > H_{3(i+1)} \Delta l, (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (9)$$

根据式(10), 可得:

$$H_{2i}h_{2i} - H_{2(i+1)}h_{2(i+1)} > H_{2(i+1)}h_{2(i-1)} - H_{2(i+2)}h_{2(i+2)} \quad (10)$$

$(i = 1, 2, 3, \dots, N-2)$

假设气隙的厚度是均匀的, 即  $h_{21} = h_{22} = \dots = h_{2(N-1)} = h_{2N}$ , II 区第  $i$  份的磁感应强度  $B_{2i} (i=1, 2, \dots, N)$  和对应的磁场强度  $H_{2i} (i=1, 2, \dots, N)$  的关系可表示为:

$$B_{2i} = \mu H_{2i} \quad (11)$$

式中:  $\mu$  为空气的磁导率。由式(11)和(12)可得:

$$B_{21} > B_{22} > \dots > B_{2(N-1)} > B_{2N} \quad (12)$$

$$B_{2i} - B_{2(i+1)} > B_{2(i+1)} - B_{2(i+2)}, (i = 1, 2, \dots, N-2) \quad (13)$$

由此可知, 长气隙中的磁感应强度及其变化率在长度方向随着与永磁体距离的增大而减小, 导致长气隙中磁感应强度分布的不均匀。

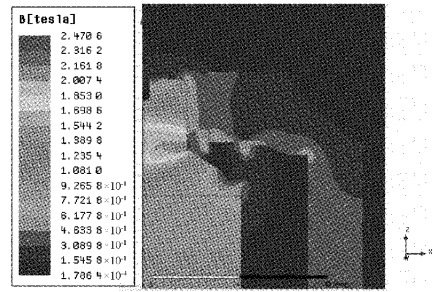
采用软件 COMSOL Multiphysics 进行多物理场建模与磁场有限元计算, 具体步骤如下: 1) 设定物理场, 选择“磁场(mf)”模式作为磁场稳态求解类型。2) 建立几何模型。由于有限元仿真是针对封闭区域, 因此需要在磁铁外部添加空气域。3) 设置分析条件。根据磁路结构中各单元材料设置材料属性, 除在材料属性节点下导入 B-H 表单之外, 在“磁场(mef)”节点下选择“安培定律”, 域为磁铁区域。由于磁铁的磁导率, 空气域的外轮廓线认为与磁场线迹线重合, 并设为磁位的参考点。4) 网格划分。5) 选择“稳态”求解模式, 求解计算。计算过程中改变磁路结构和磁隙宽度, 进行优化设计, 得到均匀和强的气隙磁场, 图 6 为振动台磁路系统仿真结果, 由空气域计算结果可以得到在气隙中的磁感应强度。

### 1.3 精密气膜导向设计

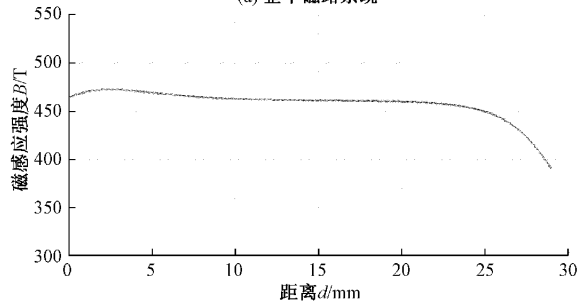
为满足振动校准平台跨低中高频运动要求, 风洞振动校准装置选用了技术成熟和承载能力强的简单孔式节流器型气浮导轨, 原理如图 7 所示, 图中  $d$  为节流孔直径,  $h$  为气膜厚度,  $d_1$  和  $h_1$  为气腔直径和气腔深度。为保证节流孔为气路中最小横截面处, 需要满足以下条件:

$$\frac{\pi d^2}{4} < \pi d_1 h, \frac{\pi d^2}{4} < \pi d (h + h_1) \quad (14)$$

$$d_1 > \frac{d^2}{4h}, h_1 > \frac{d}{4} - h \quad (15)$$



(a) 整个磁路系统



(b) 空气域磁感应强度

图 6 气隙磁路中的磁感应强度分布

气浮导轨的节流面积为  $(\pi d^2)/4$ , 气腔直径直接影响着气浮导轨承载能力和稳定性, 增大  $d_1$  能提高导轨的承载能力但同时会降低其稳定性。实际工程中, 气容比  $\lambda$ , 也就是气膜总体积与压力腔的比值, 是影响导轨性能的重要设计参数, 当  $\lambda > 15\%$  时, 很容易产生自激振荡, 因此, 必须合理设计气腔, 才能同时保证气浮导轨的承载力和稳定性。

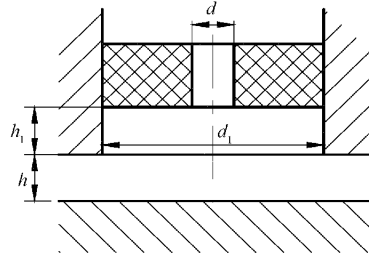


图 7 简单孔式节流器型气浮导轨

对单节流孔气浮导轨建立的二维简化模型如图 8, 在滑台与导轨之间气膜层中, 沿  $x$  方向的速度分量  $u$  比沿  $y$  方向的气流速度分量  $v$  大得多, 且空气密度小, 气体粘性系数  $\eta$  不随气膜厚度发生改变, 因此小雷诺数条件下的气体运动方程为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

考虑到边界条件  $y=0, u=0$  及  $y=h_0, u=0$ , 则:

$$u = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dx} y(y - h_0) \quad (17)$$

气膜单位时间内向外流动的质量流量为:

$$m_{\alpha} = \int_0^{h_0} \rho \mu dy \quad (18)$$

式中:  $\rho$  为点  $(x, y)$  处的气体密度, 则可得:

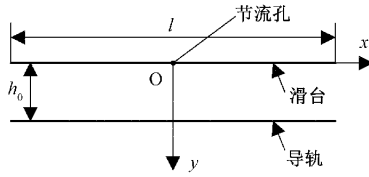


图8 气浮导轨理论模型

$$m_{ot} = -\frac{\rho h_0^3}{12\eta} \frac{dp}{dx} \quad (19)$$

将气体变化视为等温过程,考虑到边界条件  $x=0$ ,  $p=p_{ori}$  ( $p_{ori}$  为节流孔出口压力),  $p=p_{air}$ , 气浮导轨压力分布和质量流量可表示为:

$$p^2 = p_{ori}^2 - \frac{2(p_{ori}^2 - p_{air}^2)}{l} \cdot |x| \quad (20)$$

$$m_{tot} = 2m_{ot} = \frac{(p_{ori}^2 - p_{air}^2)\rho_{air}h_0^3}{6\eta p_{air}l} \quad (21)$$

其中,  $p_{air}$  和  $\rho_{air}$  分别为大气压力和密度。

对于稳态气浮导轨模型,经节流孔流入气膜的气体质量应等于经气膜向外流出的气体质量。对于小孔节流,由于气体流经小孔的时间很短,将此过程视为绝热过程,则由流体动力学可知,单位时间内气体流经小孔的质量流量为:

$$m_{in} = AP_{in}\phi\sqrt{\frac{2\rho_{air}}{p_{air}}} \quad (22)$$

式中:  $A$  为节流孔面积,  $A=(\pi d^2)/4$ ,  $d$  为节流孔直径,  $\phi$  表示真实流量与理论流量差别常数,在润滑介质为空气的条件下,取  $\phi=0.8$ ,  $P_{in}$  为节流小孔入口压力,即气源压力,  $\phi$  为流量函数,其表达式为:

$$\phi = \begin{cases} \left[ \frac{k}{2} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], & \frac{p_{ori}}{p_{in}} \leq \beta_k \\ \left\{ \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_{ori}}{p_{in}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{ori}}{p_{in}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, & \frac{p_{ori}}{p_{in}} \geq \beta_k \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $k$  为气体的比定压热容与比定容热容之比,对于空气,  $k=1.408$ ,  $\beta_k$  为临界压力比,在空气润滑条件下,取  $\beta_k=0.528$ 。根据质量守恒定律  $m_{in}=m_{tot}$  可得:

$$p_{ori}^2 = \frac{Ap_{in}\phi\sqrt{2\rho_{air}}}{h_0^3} + p_{air}^2 \quad (24)$$

至此,式(22)、(23)和(24)实现了气浮导轨的模型建立与特性求解。

利用 MATLAB 计算软件建立上述理论模型进行数值仿真计算,气浮导轨参数为  $l=0.08$  m,  $h_0=1 \times 10^{-5}$  m,  $d=2 \times 10^{-4}$  m,  $p_{air}=1 \times 10^5$  Pa,  $p_{in}=3 \times 10^5$  Pa,  $\rho_{air}=1.21$  kg/m<sup>3</sup>,  $\eta=1.84 \times 10^{-5}$  Pa·s, 计算结果表明节流孔出口压力是  $p_{ori}=1.521 \times 10^5$  Pa, 导轨气膜压力分布仿真计算结果如图9,可见对于均匀气膜,节流孔两边压力对称分布,滑台在气浮导轨的支撑下沿垂直于气膜厚度方向运动。

为分析气膜厚度对气浮导轨的性能影响,计算气膜厚

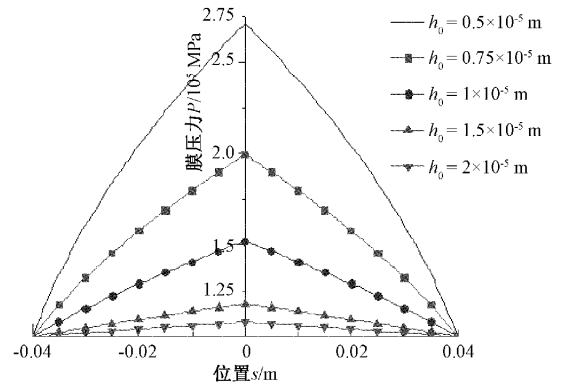


图9 均匀气膜压力分布

度  $h_0$  在  $1 \sim 50$   $\mu$ m 范围内变化对应的气膜压力分布及节流孔出口压力变化情况,计算结果如图10,计算结果表明:在气膜厚度逐步降低的条件下,气体出流阻力逐步增大,流量逐步下降,节流孔两端压降逐步减小,节流孔出口压力  $p_{ori}$  和气膜各点压力也随之增大。计算结果还表明这种变化关系是非线性的。当气膜厚度较大或较小时,  $p_{ori}$  变化缓慢,在  $0.4 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-5}$  m 范围,  $p_{ori}$  变化明显。

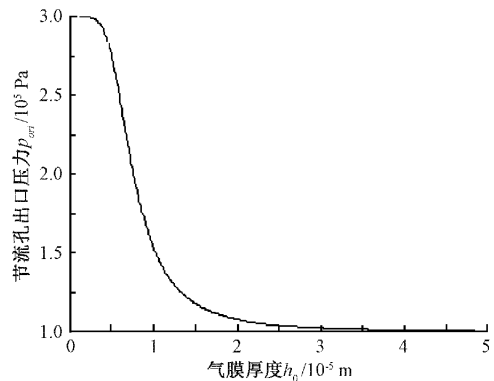


图10 节流孔出口压力随气膜厚度的变化曲线

#### 1.4 功率放大器设计与低频失真控制

由于振动台低频输出加速度小,功率放大器必须满足低噪声、低漂移及直流输出要求,同时,为了保证振动台输出波形低失真,减小功放电流输出时的直流漂移,采用了直接耦合并加电压负反馈电路的 OCL 功率放大器设计技术,功率放大器原理如图11所示,选用的功率放大器谐波失真度小于  $0.1\%$ 。

为克服振动台自身的频响曲线非线性特性问题,校准装置采用标准传感器反馈信号来闭环调整振动台的激励值,实现所需的振动控制<sup>[12]</sup>。振动量级控制采用指数逼近方式,根据当前值和目标值的关系,使信号按照指数规律变化到目标值,达到节省时间避免冲击目的<sup>[13]</sup>。指数式目标电压修正通过测定当前电压信号幅值  $A_d$  并根据设定电压目标值  $A_0$ , 给定某一合适的时间常数  $a$ , 使信号按照:

$$[A_0 - (A_0 - A_d)e^{-t/a}] \sin \omega t = [A_0(1 - e^{-t/a})] \sin \omega t \quad (25)$$

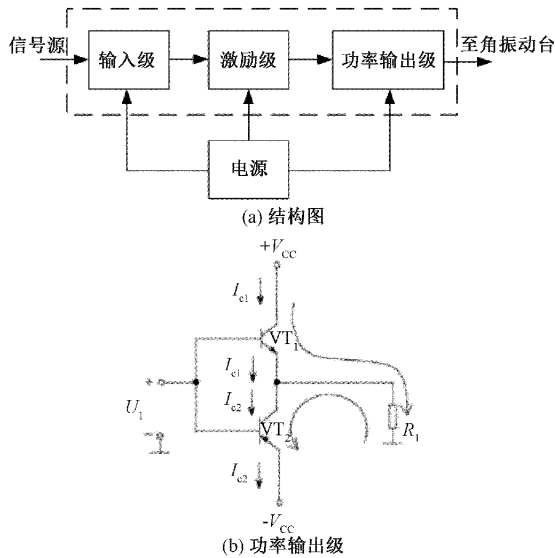


图 11 功率放大器的工作原理

进行变化;当  $t/a > 5$  时,信号  $A_d = 0.9934A_0$  时满足测量条件。比例因子是用于计算当前频率下激励信号幅值与加速度信号幅值之间的关系,可以把设定的加速度幅值转化为输入的电压幅值,实现加速度值的反馈控制,保证加速度值的稳定<sup>[14]</sup>。适当调整时间常数  $a$  可以调整信号调整的速度进一步提高振级调整的速度,其中初始目标量级需要事先测定计算。

为了消除振动台谐波失真,采用了“基于频率响应函数的谐波陷波法”进行振动台失真抑制,控制框图如图 12,在测定校准系统的频率响应函数的条件下,对采集的标准加速度传感器信号进行 FFT 傅立叶变换后获到其基波和谐波成分,依据这些谐波实际特性进行反馈补偿控制,实现谐波失真抑制,从而避免了谐波陷波法中谐波成分相移测量过程,避免正反馈现象的出现,极大提高系统的稳定度。单次对多个谐波分量进行补偿,也有效提高了系统的运行效率<sup>[15-16]</sup>。

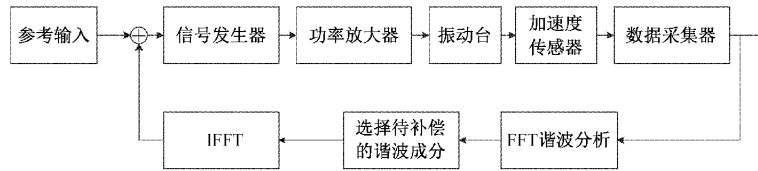


图 12 基于频率响应函数的谐波陷波法控制框图

## 2 测试结果

### 2.1 技术指标测试

根据 JJG 298-2015 标准振动台检定规程对风洞振动

传感器校准装置频率范围、最大加速度、横向振动比等技术指标进行测试,测试结果如表 2 所示。测试结果表明,风洞振动校准装置的技术指标完全满足风洞实际应用要求。

表 2 振动校准装置技术指标测试结果

技术指标	指标要求
校准频率范围	0.5 Hz~10 kHz
最高谐振扫描频率	不小于 20 kHz
幅值综合不确定度( $k=2$ )	1.0% 2 Hz~1 kHz;
	1.2% 1~5 kHz;
	1.5% 5~10 kHz。
相移综合不确定度( $k=2$ )	1.0° 2 Hz~1 kHz;
	1.2° 1~5 kHz;
	1.5° 5~10 kHz。
校准系统重复性	低于 5 kHz 重复性 0.17%;高于 5 kHz 重复性 0.2%。
振动台最大加速度	1. 空载时大于 50g; 2. 被校传感器 200 g;在频率 80 Hz~10 kHz 范围,加速度幅值大于 20 g; 3. 被校传感器为 15 g;在频率 80 Hz~10 kHz 范围,加速度幅值大于 40 g;
功率放大器总谐波失真度	4. 振动台最小全频输出带载加速度幅值小于 0.5 g。 0.09%
振动台总谐波失真度	3.2% 2~5 Hz;
振动台最大位移峰值	1.6% 5 Hz~10 kHz。 10 mm
振动台最大横向振动比	4.29% 2 Hz~1 kHz; 8.21% 1 kHz~10 kHz。

## 2.2 测量不确定度评定

依据国家军用标准 GJB3756-1999《测定不确定度的表示及评定》、国家技术规范 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》和 ISO《测量不确定度表示指南》(1993)的要求与规定,进行风洞振动传感器校准装置灵敏度幅值测量不确定度和灵敏度相移测量不确定度评定<sup>[17]</sup>。

### 1) 振动校准装置灵敏度幅值测量不确定度

振动校准装置对加速度灵敏度进行测量时评定的不确定度主要来源包括标准加速度计、控制系统测量电压比、信号调节器放大系数比、传感器横向运动、电路噪声、传感器安装、电缆、被测件负载、加速度非线性、测量重复性等,最后合成的标准不确定度如表 3,扩展不确定度如表 4。

表 3 加速度灵敏度幅值测量结果的合成标准不确定度

频率范围/Hz	合成不确定度/%
0.5~2(传感器质量 190 g)	0.53
2~10(传感器质量 190 g)	0.52
10~160(传感器质量 190 g)	0.52
160(传感器质量 190 g)	0.30
160~1 000(传感器质量 190 g)	0.52
1 000~5 000(传感器质量 190 g)	0.60
5 000~10 000(传感器质量 45 g)	0.74
10 000~20 000(传感器质量 45 g)	1.17

表 4 加速度灵敏度幅值测量结果的扩展不确定度

频率范围/Hz	扩展不确定度 ( $k=2$ )/%
0.5~2(传感器质量 190 g)	1.1
2~10(传感器质量 190 g)	1.0
10~160(传感器质量 190 g)	1.0
160(传感器质量 190 g)	0.6
160~1 000(传感器质量 190 g)	1.0
1 000~5 000(传感器质量 190 g)	1.2
5 000~10 000(传感器质量 45 g)	1.5
10 000~20 000(传感器质量 45 g)	2.3

### 2) 振动校准装置灵敏度相移测量不确定度

振动校准装置对加速度灵敏度进行测量时评定的不确定度主要来源包括标准加速度计、控制系统测量电压比、信号调节器放大系数比、传感器横向运动、电路噪声、传感器安装、电缆、被测件负载、加速度非线性、测量重复性等,最后灵敏度相移测量合成的标准不确定度如表 5,扩展不确定度如表 6。

表 5 加速度灵敏度相移测量结果的合成标准不确定度

频率范围/Hz	合成不确定度/(°)
0.5~160(传感器质量 190 g)	0.49
160(传感器质量 190 g)	0.30
160~1 000(传感器质量 190 g)	0.49
1 000~5 000(传感器质量 190 g)	0.59
5 000~10 000(传感器质量 45 g)	0.70
10 000~20 000(传感器质量 45 g)	1.18

表 6 加速度灵敏度相移测量结果的扩展不确定度

频率范围/Hz	扩展不确定度/(°) ( $k=2$ )
0.5~160(传感器质量 190 g)	1.0
160(传感器质量 190 g)	0.6
160~1 000(传感器质量 190 g)	1.0
1 000~5 000(传感器质量 190 g)	1.2
5 000~10 000(传感器质量 45 g)	1.4
10 000~20 000(传感器质量 45 g)	2.4

## 3 结 论

本文在综合分析风洞振动传感器校准装置总体需求的基础上,给出了一种基于电磁振动台跨越低中高频段的风洞振动校准装置总体设计方案,通过对振动校准装置运动部件模态分析和优化设计,将运动部件一阶共振频率提高到校准装置最高工作频率 3 倍以上,从而减小波形失真,提高了动圈力到校准台面的传递效率。采用单磁路结构建立集总参数模型对气隙磁路优化设计,保证了气隙磁场均匀和强度。针对风洞振动校准装置选用的简单孔式节流器型气浮导轨,详细分析了气膜厚度等参数对气浮导轨的性能影响,并给出不同气膜厚度下气膜压力分布与节流孔出口压力变化关系。另外,对功率放大器设计、振动台低频失真控制等多项关键技术给出了解决方法,最后对风洞振动传感器校准装置进行了性能测试,结果表明,风洞振动传感器校准装置校准频率范围、最大位移值、负载能力、失真度、横向运动比等主要技术指标高于相关要求,满足风洞振动传感器校准技术要求。

## 参考文献

- [1] 陈振华,廖文林,聂旭涛,等. 风洞结构振动的基础研究综述[J]. 中国科学基金,2017,29(3):437-441.
- [2] 雷彦华. 低频振动校准系统的关键技术研究是实现[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2009.
- [3] 毛云峰. 飞机振动传感器校准装置的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [4] 杨明,蔡晨光,刘志华,等. 基于外差激光干涉法的三轴向振动绝对校准方法研究[J]. 计量学报,2018,39(2):201-206.

- [5] 方超,章兵,黄勇,等.比较法振动传感器自动校准系统的研究[J].信息化技术与控制,2020,30(2):58-59.
- [6] GB/T 20485.21-2007 振动与冲击传感器校准方法 第 21 部分:振动比较法校准[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [7] 王春宇.超低频标准振动台相关设计理论及运动控制技术的研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [8] 刘振风,付茂岳,刘敬敏.微振动传感器校准技术研究[J].航天器环境工程,2015,32(6):652-655.
- [9] 匙庆磊.低频标准振动台系统和振动校准技术研究[J].国际地震动态,2015(4):40-41.
- [10] 刘长剑.基于亚奈奎斯特采用的带宽信号频谱感知技术研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [11] 王得刚,李朝峰,李鹤,等.基于 HyperMesh 的车身模态分析[J].机械制造,2008,39(6):4-6.
- [12] 宋锡文,董业鹏,杨世飞,等.基于 FPGA 的振动信号处理参数寻优试验研究[J].电子测量与仪器学报,20021,35(2):101-108.
- [13] 张坤,武科迪,苏宇锋,等.基于分段线性系统的宽频振动能量收集器[J].电子测量与仪器学报,2020,34(9):140-145.
- [14] 张攀,杨帆,王平,等.扣件胶垫刚度频变的车辆—轨道耦合时变随机振动扩展分析[J].工程力学,2016,39(12):232-240.
- [15] 马平昌,李红,林淡,等.流致振动差压式测振装置的研究[J].仪器仪表学报,2020,41(1):170-177.
- [16] 冯维超.基于机载振动监测系统的直升机飞行状态识别方法[J].国外电子测量技术,2020,39(7):133-136.
- [17] 高涛,李猛.比较法振动标准装置准确度相关技术研究[J].计量与测试技术,2017,30(1):44-46.

### 作者简介

褚卫华,博士,研究员,主要从事风洞控制与测量技术方面的研究。

E-mail: nudt\_cwh123@163.com。

顾正华,硕士,副研究员,主要从事气动测量方面的研究。

E-mail: gujun811@163.com