

ICS 17.160

CCS A65/74

T

团体标准

T/CI 225-2023

高频底座测力天平的动力校准技术规范

Technical specifications for dynamic calibration of high-frequency
force balance

2023-12-14 发布

2023-12-14 实施

中国国际科技促进会 发布

目 次

前 言	II
引 言	III
高频底座测力天平的动力校准技术规范	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	3
5 动力校准流程	4
6 动力校准前提	4
7 信号预处理	5
8 信号解耦	6
9 模态参数识别	7
10 动力校准	9
11 动力校准质量判定	9
条文说明	11
1 前言	11
2 动力校准流程	11
3 动力校准前提	11
4 信号预处理	12
5 信号解耦	12
6 模态参数识别	12
7 动力校准	12
8 动力校准质量判定	13

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国建筑第二工程局有限公司提出。

本文件中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：中国建筑第二工程局有限公司、华南理工大学、广州大学、华南理工大学建筑设计研究院有限公司、深圳市建筑设计研究总院有限公司、科创引领（北京）国际科技中心。

本文件主要起草人：张乐乐、谢壮宁、傅继阳、余先锋、徐安、潘建荣、江毅、刘琼祥、黄俊、林师慧、易伟文、郑庆、杨翠丽。

引 言

本文件的发布机构提请注意,声明符合本文件时,可能涉及到(第4、5、6、7、8、9章)与一种高频底座力天平的动力校准方法(ZL201611234889.5)相关的一项专利的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺,他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下,就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得:

专利持有人姓名:谢壮宁,地址:广州市天河区五山路381号,电子邮箱:
znxie@scut.edu.cn。

请注意除上述专利外,本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

高频底座测力天平的动力校准技术规范

1 范围

本文件规定了风洞试验中的高频测力天平所用的六轴力/力矩传感器的规格、技术要求、动力校准的方法、校准质量判定等内容。

本文件适用于高频测力天平实验中测量信号的动力校准,解决由系统动力放大引起的信号畸变问题。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件的必不可少的条款。其中,注明日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注明日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GJB 2244A 风洞应变天平规范

GJB 7341 激波风洞测力试验方法

JGJ/T 338 建筑工程风洞试验方法标准

QJ 2798 航天飞行器炮风洞测力试验方法

3 术语和定义

3.1

高频测力天平试验 high frequency force balance(HFFB) test

用于测量超高层/高耸建筑基底气动力,是超高层建筑风洞试验的一种。试验测量的主要仪器为六轴力/力矩(Force/Torque)传感器。

3.2

天平-模型系统 balance model system(BMS)

由高频测力天平 and 试验模型共同组成的试验系统。

3.3

六轴力/力矩传感器 six-axis force/torque sensor

高频测力天平试验的核心测量设备,测量笛卡尔坐标系三个轴(x, y, z)方向输出的力和力矩值。六轴力/力矩传感器也被称为多轴力/力矩传感器,多轴测力单元, F/T 传感器,或者六轴测力单元。

表征信号的功率能量与频率的关系的物理量，常用来研究随机振动信号。

3.9

模态参数 modal parameters

模态是结构的固有振动特性，每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。

4 符号

Λ	对角特征值矩阵
\mathbf{B}	分离矩阵
\mathbf{C}_x	协方差矩阵
\mathbf{E}	特征向量矩阵
f_0	固有频率
$H_j(f)$	无因次化的频率响应函数
j	模态阶数
k_j 和 α_j	线性气动力假定公式中的待定常数
$M_x(t)$ 、 $M_y(t)$ 、 $M_z(t)$	HFFB 试验测得的基底弯矩和扭矩
$\mathbf{Q}(t)$	模态响应
$Q_x(t)$ 、 $Q_y(t)$	HFFB 试验测得的基底剪力
$\mathbf{R}(\tau)$	延时相关矩阵
$S(f)$	功率谱密度
上标 T	转置
上标-1	矩阵的逆
$\mathbf{X}_0(t)$	去均值的信号
\mathbf{V}	正交矩阵
\mathbf{W}	白化矩阵
$\bar{\mathbf{X}}$	测量信号的均值
$\mathbf{X}(t)$	混合信号，也是 HFFB 测得的基底力矩
$\mathbf{Z}(t)$	白化后信号

Φ	混合矩阵（也即振型）
ζ	阻尼比
Δf	频率间隔
τ	时延
λ_n	特征值

5 动力校准流程

5.1 高频力天平动力校准技术的整体流程如图 2 所示。

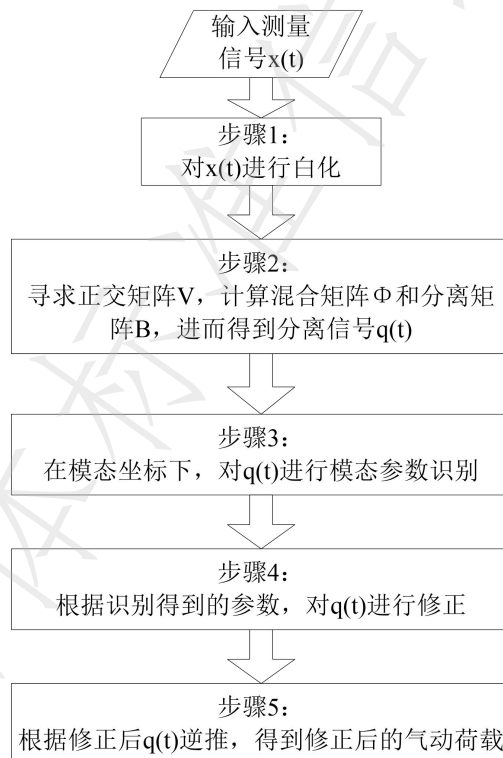


图 2 高频力天平动力校准技术的整体流程

步骤 1: 对测量信号 $x(t)$ 进行白化;

步骤 2: 寻求正交矩阵 V , 计算混合矩阵 Φ 和分离矩阵 B , 进而得到分离信号 $q(t)$;

步骤 3: 在模态坐标下, 对分离信号进行固有频率和模态阻尼比识别;

步骤 4: 根据识别得到的参数, 对分离信号进行校准;

步骤 5: 由分离信号逆推, 得到校准后的气动荷载。

6 动力校准前提

6.1 问题描述

对于线性瞬时混合系统，其盲源分离问题可表示为如下形式：

$$\mathbf{X}(t) = \Phi \mathbf{Q}(t) \quad (1)$$

式中， $\mathbf{X}(t)$ 为混合信号，在本文件中表示由 HFFB 测得的结构模型基底倾覆弯矩、扭矩。

Φ 和 $\mathbf{Q}(t)$ 分别为混合矩阵和源信号。源信号 $\mathbf{Q}(t)$ 通过混合系统得到观测信号，源信号与观测信号之间存在着某种关系。在模态分析中，混合矩阵 Φ 为振型， $\mathbf{Q}(t)$ 为模态响应。

6.2 基本假设

6.2.1 源信号 $\mathbf{Q}(t)$ 为零均值平稳随机信号矢量，各分量之间统计独立；

6.2.2 混合矩阵 Φ 列满秩可逆；

6.2.3 源信号至多仅有一路为高斯分布信号；

6.2.4 混合过程不含噪声或噪声可忽略。

6.3 适用性条件

6.3.1 BMS 的固有频率应大于 1.2 倍气动力的漩涡脱落频率。

6.3.2 在用于计算结构风荷载时，BMS 的固有频率应大于 1.2 倍换算到模型尺度的结构基阶固有频率。

7 信号预处理

7.1 信号采集

7.1.1 不宜在工况调整后立即进行信号采集，应待工况平稳后再采集。等待时间不宜少于 5 秒。

7.1.2 信号采样频率宜大于所需信号带宽的 10 倍。

7.1.3 采样时间宜大于 100s。

7.2 信号去均值

7.2.1 测量信号的均值，按式(2)计算

$$\bar{\mathbf{X}} = \text{mean}(\mathbf{X}(t)) \quad (2)$$

mean 表示取平均值。

7.2.2 去均值的测量信号，按式(3)计算

$$\mathbf{X}_0(t) = \mathbf{X}(t) - \bar{\mathbf{X}} \quad (3)$$

7.3 信号白化

7.3.1 去均值信号 $\mathbf{X}_0(t)$ 的协方差矩阵，按下式计算

$$\mathbf{C}_x = E[\mathbf{X}_0(t)\mathbf{X}_0^T(t)] \quad (4)$$

式中，上标 T 表示转置。

7.3.2 对协方差矩阵进行特征值分解，得到 \mathbf{C}_x 的单位特征向量矩阵 \mathbf{E} ，以及对角元素为 \mathbf{C}_x 特征值的对角矩阵 $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 。

7.3.3 白化矩阵 \mathbf{W} 按下式计算

$$\mathbf{W} = \mathbf{\Lambda}^{-1/2} \mathbf{E}^T \quad (5)$$

7.3.4 白化后信号由白化矩阵 \mathbf{W} 和测量信号 $\mathbf{X}_0(t)$ 求得，按下式计算

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{W}\mathbf{X}_0(t) \quad (6)$$

8 信号解耦

8.1 校准后信号的协方差 $\mathbf{R}_z(\tau)$ ，按下式计算

$$\mathbf{R}_z(\tau) = E[\mathbf{Z}(t)\mathbf{Z}^T(t+\tau)] \quad (7)$$

式中， τ 表示时延。

8.2 对 $\mathbf{R}_z(\tau)$ 进行联合对角化逼近，得到模态响应 $\mathbf{Q}(t)$ 的协方差和正交矩阵，按下式计算

$$\mathbf{R}_Q(\tau) = \mathbf{V}^T \mathbf{R}_z(\tau) \mathbf{V} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{R}_Q(\tau)$ 为模态响应的协方差矩阵；

\mathbf{V} 为正交矩阵。

该方法利用非对角化元素平方和最小作为衡量标准，不断调整 Given 旋转角度，对

$\mathbf{R}_z(\tau)$ 进行联合对角化逼近，直至满足控制条件为止。

8.3 结构振型由白化矩阵和正交矩阵求得，按下式计算

$$\Phi = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{V} \quad (9)$$

式中，上标-1 表示矩阵的逆；

8.4 分离矩阵为结构振型的逆，按下式计算

$$\mathbf{B} = \Phi^{-1} = \mathbf{V}^T \mathbf{W} \quad (10)$$

式中， \mathbf{B} 表示分离矩阵。

8.5 模态响应由分离矩阵和测量信号求得，按下式计算

$$\mathbf{Q}(t) = \mathbf{B}\mathbf{X}_0(t) \quad (11)$$

9 模态参数识别

9.1 在模态坐标下，模态响应和模态激励的功率谱密度的关系为

$$S_{Q_j}(f) = |H_j(f)|^2 S_{Q_{r,j}}(f) \quad (12)$$

式中， $S_{Q_j}(f)$ 为第 j 阶模态响应 $Q_j(t)$ 的功率谱密度；

$S_{Q_{r,j}}(f)$ 为第 j 阶模态气动力 $Q_{r,j}(t)$ 的功率谱密度；

$H_j(f)$ 为第 j 阶模态的无因次化频率响应函数。

9.2 模态响应 $Q_j(t)$ 和模态气动力 $Q_{r,j}(t)$ 有相同的量纲。

9.3 无因次化频率响应函数按下式计算

$$H_j(f) = \left(1 - \left(\frac{f}{f_{0,j}} \right)^2 + 2\zeta_j \frac{f}{f_{0,j}} \mathbf{i} \right)^{-1} \quad (13)$$

式中， $f_{0,j}$ 和 ζ_j 分别为第 j 阶模态的固有频率和阻尼比。

9.4 模态气动力的功率谱密度为

$$S_{Q_{r,j}}(f) = \frac{S_{Q_j}(f)}{|H_j(f)|^2} \quad (14)$$

9.5 根据模态响应的功率谱密度采用局部拟合方法识别出相应的 $f_{0,j}$ 和 ζ_j 。

9.6 模态气动力通常在固有频率附近和频率的指数幂成正比,也就是说双对数坐标下固有频率附近的模态气动力与频率成线性关系。

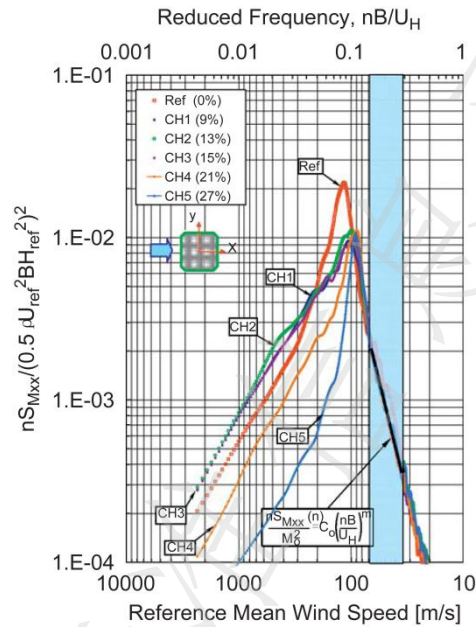


图 3 HFFB 试验的典型 PSD 曲线^[1]

[1] Tse K T, Hitchcock P A, Kwok K C S, et al. Economic perspectives of aerodynamic treatments of square tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 2009, 97(97): 455-467.

9.7 根据双对数坐标下的显现关系假定模态气动力的功率谱密度为

$$S_{Q_r,j}(f) = k_j f^{\alpha_j} \quad (15)$$

其中, k_j 和 α_j 为常数。当 $\alpha_i = 0$ 时 $S_{Q_i}(f)$ 将退化成白噪声形式。

9.8 对模态气动力的功率谱密度取对数, 得到下式

$$\ln k_j f^{\alpha_j} = \ln \frac{S_{Q_j}(f)}{|H_j(f)|^2} \quad (16)$$

9.9 对于给定的离散功率谱密度 $S_{Q_j}(f)$, 计算残差公式如下式

$$\delta(f_j, \zeta_j, \alpha_j, k_j) = \sum_{l=n_1}^{n_2} \left(\ln k_j (l\Delta f)^{\alpha_j} - \ln \frac{S_{Q_j}(l\Delta f)}{|H_j(l\Delta f)|^2} \right)^2 \quad (17)$$

式中， Δf 为谱线频率间隔； $(n_1\Delta f, n_2\Delta f)$ 为参加拟合的频率范围。

9.10 通过循环迭代求出残差最小值，及其对应的 $f_{0,j}$ 、 ζ_j 、 α_j 和 k_j 。

10 动力校准

10.1 零均值信号 $\mathbf{X}_0(t)$ 为 HFFB 方法所测得的倾覆气动弯矩、扭矩和剪力，写成：

$$\mathbf{X}_0(t) = [M_x(t) \quad M_y(t) \quad M_z(t)]^T \quad (18)$$

10.2 模态响应的功率谱密度，按下式计算

$$\mathbf{S}_Q(f) = \mathbf{B}\mathbf{S}_x(f)\mathbf{B}^T \quad (19)$$

式中， $\mathbf{S}_Q(f)$ 表示模态响应的功率谱密度；

$\mathbf{S}_x(f)$ 表示零均值信号的功率谱密度。

10.3 对模态响应功率谱密度进行校准，按下式计算

$$\mathbf{S}_{Q_r}(f) = \mathbf{H}^{-1}(f)\mathbf{S}_Q(f)(\mathbf{H}^{-1}(f))^H \quad (20)$$

式中， $\mathbf{S}_{Q_r}(f)$ 表示校准后模态响应功率谱密度；

$\mathbf{H}(f)$ 为各模态坐标的频率响应函数 $H_j(f)$ 构成的复对角矩阵

上标 H 表示共轭转置。

10.4 校准后的模型基底气动力的功率谱密度矩阵，按下式计算

$$\mathbf{S}_x(f) = \Phi\mathbf{S}_{Q_r}(f)\Phi^T \quad (21)$$

式中， $\mathbf{S}_x(f)$ 校准后的模型基底气动力的功率谱密度矩阵，它是进一步计算超高层建筑风致响应的重要依据。

11 动力校准质量判定

11.1 动力校准的效果判定主要通过校准后信号的功率谱密度判断。

11.2 将功率谱密度分为两部分，分别是气动力频段和动力放大频段。

11.3 气动力频段中校准后信号的功率谱密度应与原测量信号完全重合。

11.4 动力放大频段中校准后信号的功率谱密度在双对数坐标下呈直线或近似直线状态。

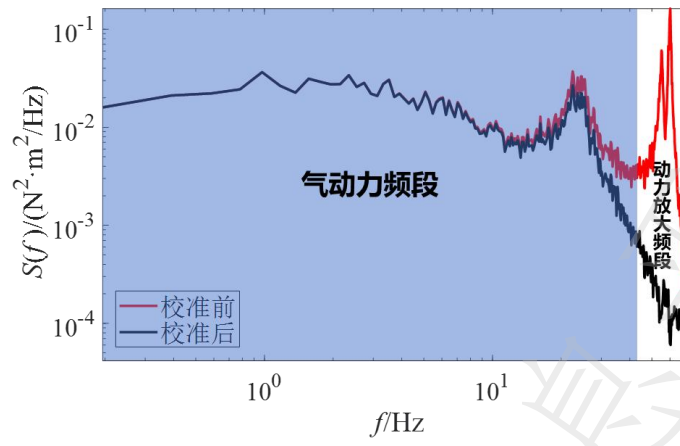


图4 信号不同频段示意图

条文说明

本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

1 前言

1.1 高频测力天平(HFFB)试验被广泛应用于高层建筑的动风荷载和风振响应的风洞试验研究。通常 HFFB 出厂时会提供一个用于实现测量电压信号向物理量转换的解耦矩阵,该矩阵是采用静力校准获取的,实际上它只能实现天平静态分量的静了解耦而不能完全实现由天平模型系统(BMS)的产生的动力信号分量的解耦,从而无法有效地对由 BMS 共振抖振所引起的动态畸变信号进行校准。

1.2 本规范引入二阶盲辨识(SOBI)技术完成对耦合测量信号的解耦,利用动力学原理消除 BMS 的动力放大作用实现对测量信号的动力校准。

2 动力校准流程

2.1 高频天平动力校准方法是在对耦合信号进行有效分离的基础上,对由分离得到的独立成分分量,结合气动力特征并采用曲线拟合方法逐一对天平-模型系统的固有频率和模态阻尼比进行识别,进而校准并消除模态耦合系统的动力放大作用,最终获得真实的气动荷载谱。

2.2 高频天平动力校准方法所用的原始信号源为通过高频力天平(HFFB)直接测量的建筑结构基底力/力矩(包含风与结构相互作用影响),可最大程度地提高参数识别和相应 HFFB 动态信号校准的可靠性,为原型高层建筑风致响应的准确估算奠定重要的基础。

2.3 高频力天平空载时的固有频率就非常高。

2.4 开展高频力天平试验时需在高频力天平上连接试验模型,构成天平-模型系统(Balance Model System, BMS)。然而, BMS 的固有频率远低于高频力天平空载时的固有频率, BMS 固有频率会对建筑结构气动力的测量产生很大影响,应对试验测量的力/力矩信号进行动力校准。

2.5 BMS 质量较力天平本身要大,故 BMS 固有频率会迅速降低

3 动力校准前提

3.1 动力校准前提是本规范方法的假设条件，该假设条件都是模态分解理论可接受的。

3.2 适用性条件对 BMS 的固有频率提出进一步的限定，确保校准的可靠性；和 JGJ/T 338-2014《建筑工程风洞试验方法标准》的 5.2.3 不同，本规程是的技术是跨共振区的信号校准，校准后的可用频带要比 JGJ/T 338-2014 的宽，故只对用于结构变形和承载力计算的 BMS 固有频率进行和 JGJ/T 338-2014 一致的限定，对用于短回归期的结构适度验算则不再做进一步的要求。

4 信号预处理

4.1 在进行信号解耦之前对信号进行预处理，预处理会使后续的解耦过程变得更加顺利。

4.2 最常见的预处理过程有两个：一是去除信号的均值，另一个是信号白化。

5 信号解耦

5.1 盲源分离就是在源信号和传输信道未知的情况下，根据信号的统计特性以及物理力学特性，仅仅通过观测信号分离出源信号的过程。

5.2 本规范将盲源分离中的二阶盲辨识（Second Order Blind Identification, SOBI）方法引入到耦合系统的解耦问题中，得到系统的模态响应和结构振型。

6 模态参数识别

6.1 动力信号畸变主要由 BMS 的动力放大作用引起，与系统的模态参数紧密相关。鉴于此，有效的模态参数识别是动力校准的必要步骤。

6.2 本规范采用考虑结构气动力特征的曲线拟合方法对解耦后的模态信号进行参数识别。

7 动力校准

7.1 动力校准章节是利用前述章节信号解耦得到的模态信号和参数识别得到的结构动力特性对模态信号进行校准，然后利用识别的结构振型重构校准后的测量信号。

7.2 信号去均值是从测量信号中减去均值向量，使得源信号成为零均值向量。这意味着分离后得到的源信号的估计 $\mathbf{Q}(t)$ 也是零均值的。在模态分析中，可将源信号分解为平均值和脉

动值进行计算，脉动值也是零均值的。

7.3 信号白化的目的是为了去除各个方向源信号的二阶相关性，并不能保证使白化后的信号之间二阶统计独立。白化矩阵的求解，主要通过特征分解法求得。

8 动力校准质量判定

8.1 基于真实气动力特性直观判断动力校准后的信号质量。

8.2 动力校准质量的高低直接决定了结构气动力测量的真实性，进而影响原型高层建筑风致响应分析的准确性。
