

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.12.016

# 疲劳试验机动态校准装置的研制与实验研究<sup>\*</sup>

刘玫玲<sup>1</sup>, 骆 昕<sup>2</sup>, 陈洪芳<sup>1\*</sup>, 李士帅<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 机电学院, 北京 100124; 2. 北京市计量检测科学研究院, 北京 100029)

**摘要:**针对疲劳试验机缺乏评价动态响应特性的方法和手段问题,对疲劳试验机动态校准装置进行了研究,开发了一套基于 LabVIEW 的硬件装置和可视化软件分析系统。将加速度计补偿动态惯性误差技术应用到疲劳试验机动态校准工作中,结合应变式力传感器构成了完整的测力系统;通过动态力测量基准装置,对该装置的静态特性与动态响应特性进行了评定实验,判定该系统是否能够检测到自身加速度,达到了补偿惯性误差的目的。研究表明:该系统静态、动态特性分别符合《标准测力仪检定规程》和《轴向加荷疲劳试验机检定规程》要求,该装置符合检定规程标准,能够精确地完成疲劳试验机检定与校准工作。

**关键词:**疲劳试验机;动态特性;FFT 分析;力传感器

中图分类号:TH871

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)12-1338-04

## Development and experiment on dynamic calibration device of fatigue testing machine

LIU Mei-ling<sup>1</sup>, LUO Xin<sup>2</sup>, CHEN Hong-fang<sup>1</sup>, LI Shi-shuai<sup>1</sup>

(1. Beijing University of Technology College of Mechanical Engineering & Applied Electronics Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of methods and means to evaluate the dynamic response characteristics of the fatigue tester, the dynamic calibration device of the fatigue tester was studied. A set of hardware devices and visualization software analysis systems based on LabVIEW were developed. The accelerometer-compensated dynamic inertial error technique was applied to the dynamic calibration of a fatigue tester, and a complete force-measuring system was constructed in conjunction with a strain-type force sensor. Through the dynamic force measurement reference device, the static characteristics and dynamic response characteristics of the device were evaluated to determine, whether the system can detect the self-acceleration and achieve the purpose of compensating the inertia error. The results indicate that the static and dynamic characteristics of the system are in line with the requirements of the "Standard Test Instrument Verification Rules" and "Axial Load Fatigue Tester Verification Regulations". The device meets the verification standards and can accurately complete the fatigue tester calibration.

**Key words:** fatigue testing machine; dynamic characteristics; fast Fourier transform; force sensor

## 0 引 言

疲劳试验机是测量试件疲劳极限和疲劳寿命等性能指标的材料试验机,与产品质量、工程质量和人身安全密切相关<sup>[1]</sup>。目前国内外对于疲劳试验机动态校

准装置的研究基本都是基于 ASTM E466 - 2007, ISO1099:2006、GB/T3075 - 2008 以及 HB5287 - 1996 等规程,规范中对标准测力装置的静态、动态性能的测量方法和性能指标都有明确的规定<sup>[2]</sup>。1998 年, KUMME R<sup>[3]</sup>对力传感器动态标定比较方法进行了研

收稿日期:2018-05-10

基金项目:北京市科技计划资助项目(Z171100002817007)

作者简介:刘玫玲(1996-),女,山西忻州人,主要从事测控技术与仪器方面的研究。E-mail:liumeiling1996@126.com

通信联系人:陈洪芳,女,工学博士,副教授,硕士生导师。E-mail:chf0302@126.com

究并指出:补偿动态力误差的传感器需同时具有力值测量模块和振动或加速度测量模块;2004 年,德国物理技术研究院(PTB)运动学研究部门研制出了绝对法瞬态冲击力、正弦力校准系统<sup>[4]</sup>;英国国家物理实验室(NPL)则使用比较法构建了动态力测量系统,将待测数据与标准测力计所得数进行了比较,判定动态性能指标;2009 年,FUJII Y<sup>[5]</sup>研究了冲击力、循环力及阶跃力下的动态校准方法,完善了动态力补偿理论。

目前,国内仅有北京长城计量测试技术研究所具备成熟的绝对动态力校准装置,并与德国 PTB 完成了正弦力双边比对,技术水平相当。目前在国内普遍存在只对疲劳机静态力值进行校准,而在对试样的疲劳特性测量中使用动态力值的现实问题,存在需要改进的地方。

本文将研制高准确度的疲劳试验机动态校准装置,并在此基础上进一步研究其静态、动态特性。按照目前国内外通用的绝对法测量原理,基于 LabVIEW,设计疲劳试验机动态校准系统,以完成力学信号的实时采集、传输、转换与分析。

## 1 检测与校准原理

### 1.1 静态检测、校准原理

使用标准力法检测测力仪静态性能,在力标准机上分别对力传感器进行拉、压两个方向的校准;对动态校准装置的进回程差、示值误差、内插误差各与标准范围进行比对,判定装置静态准确度等级。

### 1.2 动态检测、校准原理

对振动加速度进行动态测量。将待测传感器固定在标准振动平台上,作动器带动平台进行额定幅值与频率的纯正弦运动,分析加速度计的时域、频域指标<sup>[6]</sup>。

校准装置动态特性和惯性力的存在是产生结果不确定度的主要分量<sup>[7]</sup>。当动态力误差超出允许范围时,需要进行修正。在 ASTM E467 - 08 (R2014)<sup>[8]</sup>和文献<sup>[9]</sup>中,分析并给出了惯性负荷修正公式,使用加速度计法计算惯性力影响量为:

$$F_i = \frac{W \cdot \alpha}{g} \quad (1)$$

式中:W—惯性重物的重量;g—重力加速度; $\alpha$ —惯性重物的加速度,使用显示的最大加速度。

由式(1)可得:为减小动态惯性力影响量,应尽量减少小等效惯性重物质量<sup>[10]</sup>。

在纯正弦运动过程中,以向上振动阶段为例,传感

器受力情况如图 1 所示。

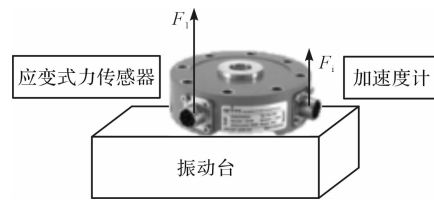


图 1 纯正运动中传感器受力情况

结合公式(1) 可得传感器动态平衡方程为:

$$F = F_1 + \frac{W \cdot \alpha}{g} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ —加速度计所测加速度大小; $F_1$ —应变式力传感器所测受力大,振动台振动过程中实际施加的力值 F 为两者之和,向下振动时同理。

通过上述方法,在纯正弦运动中实现了惯性力补偿。

## 2 装置研制

### 2.1 硬件设计

系统采用模块化设计,由于实心圆柱式力传感器的动态特性最优<sup>[11]</sup>,所以使用德国 GTM DR - F 系列力传感器,可对兆牛范围内的加速度力补偿进行准确测量。

应变式力传感器和加速度计信号由传感器采集至 NI 模块,再经 DAQ 嵌入式平台输入 LabVIEW 软件对数据进行分析,将结果显示在屏幕上,其中各项参数也可由上位机更改。

### 2.2 软件设计

软件由静态力测量和动态加速度测量两个模块组成,子模块分类及其作用如图 2 所示。

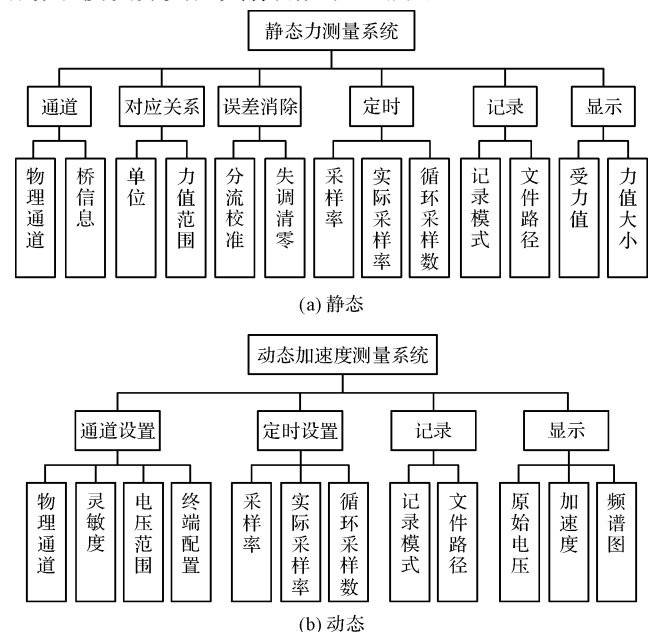


图 2 上位机静、动态力测量软件结构

该系统具有参数输入、对应关系设置、定时设置、记录设置、显示设计等结构,以满足不同的情况需要。NI 模块将传感器接收到的力值和加速度信号传输到上位机进行对比分析与显示;上位机数据处理软件由 LabVIEW 编程,实现电压信号多种算法对比分析、图像化显示及数据备案保存作用。

### 3 校准装置实验研究及结果分析

#### 3.1 静态特性校准

由于每个传感器的灵敏度和说明书给定值有所偏差,在正式使用之前,需对其灵敏度进行校准。使用负荷为按照 JJG 632 - 2005《动态力传感器检定规程》<sup>[12]</sup>与 JJG144 - 2007《标准测力仪检定规程》<sup>[13]</sup>所规定的 5 点测量法,在 50 kN 力标准机上分别对待测传感器施加 5 kN、10 kN、20 kN、30 kN、50 kN 压力。

静态特性校准实验装置如图 3 所示。

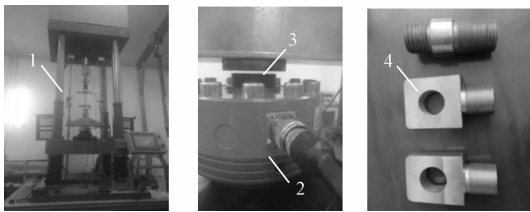


图 3 静态特性校准实验装置

1—力标准机;2—DR-F 系列传感器;3—压块;4—拉力钩

本研究使用 Grapher 软件进行多点修正,修正后的直线参数如表 1 所示。

表 1 多点修正直线参数

测量力值/kN	斜率 $k$	截距 $b$ /kN
5	1.000 29	5.001
10	1.001 52	10.015
20	1.001 54	20.031
30	1.001 39	30.032
50	1.001 60	50.080

由表 1 结果可得:斜率  $K$  平均值 1.001,截距与所测负荷的商的平均值为 1.001,以上两项的和为传感器标准灵敏度 2.002 mV/V,静态灵敏度为 0.04 mV/kN。

本研究使用修正后的传感器标准灵敏度重复拉、压实验,记录校准装置输出的数据。

按照《标准测力仪检定规程》中所示方法计算重复性、示值误差、进回程差,结果如表 2 所示。

由表 2 数据可得:疲劳试验机动态校准装置满足

0.3 级标准测力仪的技术指标,符合《标准测力仪检定规程》要求。

表 2 不同负荷下力校准试验结果

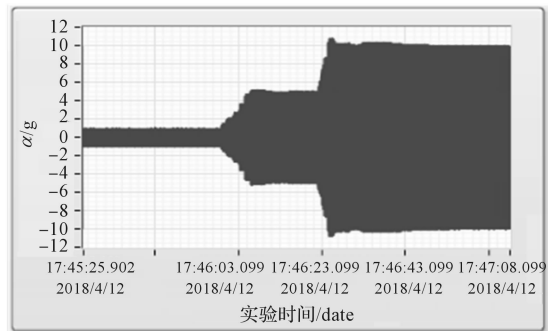
静态指标	负荷/kN					标准 0.3 级
	5	10	20	30	50	
重复性 /(%)	0.020	0.075	0.149	0.047	0.093	0.3
示值误差 /(%)	0.24	0.05	0.1	0.001	0.03	0.3
进回程差 /(%)	-0.08	0.01	0	0.032		0.9
静态灵敏度/ (mV · kN <sup>-1</sup> )	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	

#### 3.2 动态特性校准

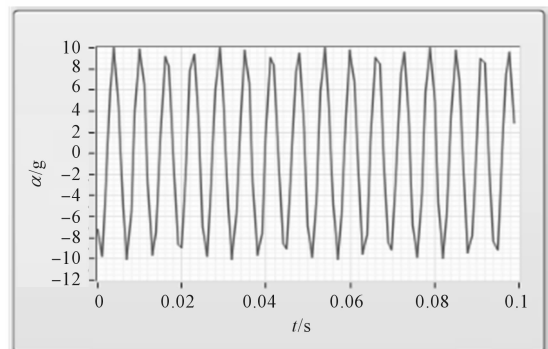
依据文献[14]中的实验方法,本研究将疲劳试验机动态校准装置中的传感器置于标准电动振动平面上,标准振动平台带动传感器做固定加速度值与振动频率的纯正弦运动。利用采集卡对传感器信号进行连续采集,并与施加激励对比。

通过对比较准装置输出信号和标准量之间的对应关系,判定疲劳试验机动态校准装置是否能够准确测量出振动信号的特性。

施加加速度大小为 10 g,振动频率为 160 Hz 的激励时,动态振动实验结果如图 4 所示。



(a) “加速度-实验时间”结果



(b) “加速度-时间”结果

图 4 动态振动实验结果

实验结果显示:在施加加速度为 10 g,施加频率为 160 Hz 的情况下,实测加速度大小为 10.04 g,在 0.1 s 内有 16 个完整周期,实测频率为 160 Hz。

由此可得:在试验机工作频率范围内,疲劳试验机动态校准装置的频率响应的变化不超过  $\pm 0.1$  dB ( $\pm 1\%$ ),符合 JJG 556 - 2011《轴向加荷疲劳试验机检定规程》<sup>[15]</sup>要求,测量结果真实可信。

## 4 结束语

本文设计了一种基于 LabVIEW 的疲劳试验机动态校准装置,它能现场采集和实时处理力学信号,并通过上位机实时显示信号分析结果,并保存信号处理的结果;此外,针对这套装置的静态特性和动态特性进行了校准研究,并通过加速度计法补偿惯性负荷,减小惯性力误差,提高系统测量准确度。

测试实验表明:该实时处理能力强,界面显示清晰直观,能够定性的分析疲劳试验机的动态特性,系统采集精度高,主要技术指标达到国际先进水平;对疲劳试验机工作状态的诊断有实际指导意义,具有工程应用价值。

### 参考文献 (References):

- [1] 胡 刚,杨宗英. 轴向加荷疲劳试验机动态力校准的研究[J]. 计量学报,2012,33(4):294-298.
- [2] 张 力. 激光干涉法进行正弦力校准研究[J]. 计量学报,2005,26(4):337-342.
- [3] KUMME R. Investigation of the comparison method for dynamic calibration of force transducers [J]. *Measurement*, 1998(23):239-245.
- [4] 孙 桥,于 梅. 冲击及瞬态冲击力绝对法校准技术的研究现状[J]. 计量测试与检定,2005,15(1):12-15.
- [5] FUJII Y. Toward dynamic force calibration [J]. *Measurement*, 2009,42(7):1039-1044.
- [6] 张 伟,张 跃,张智敏,等. 应变式力传感器动态特性研究及动态补偿[J]. 计量学报,2012,33(1):35-38.
- [7] 胡 刚,孟 峰,张 伟,等. 轴向加荷疲劳试验机动态力校准装置的性能研究与应用[J]. 检定与校准 2017(12):65-70.
- [8] ASTM E467-08(2014). Standard practice for verification of constant amplitude dynamic forces in an axial fatiguer testing system[S]. West Conshohocken:ASTM International,2014.
- [9] 胡 刚,杨宗英. 基于振动分析的单轴疲劳试验机动态力误差的研究与试验[J]. 船舶工程,2012,34(S2):73-76.
- [10] 倪守忠,曾利民. 轴向加荷疲劳试验机动态力修正办法分析[J]. 计量学报,2014,35(4):360-362.
- [11] 张 伟. 基于 LabVIEW 的应变式力传感器动态特性及动态测量平台的研究[D]. 北京:中国计量科学研究院,2010.
- [12] JJG 632 - 2005. 动态力传感器检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2005.
- [13] JJG144 - 2007. 标准测力仪检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2007.
- [14] 曾利民,倪守忠,蒋晓波,等. 正弦力校准和计量溯源研究[J]. 检定与校准,2014(7):42-45.
- [15] JJG 556 - 2011. 轴向加力疲劳试验机检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2011.

[编辑:张 豪]

### 本文引用格式:

刘玫玲,骆 昕,陈洪芳,等. 疲劳试验机动态校准装置的研制与实验研究[J]. 机电工程,2018,35(12):1338 - 1341.

LIU Mei-ling, LUO Xin, CHEN Hong-fang, et al. Development and experiment on dynamic calibration device of fatigue testing machine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(12):1338 - 1341.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>