

基于单线振动台的角振动试验系统研究

董智远, 李旭, 师钰, 李飞飞, 孙东乐

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)

摘要: **目的** 考核陀螺类产品在角振动环境下的适应性。**方法** 开发基于单线振动台的角振动试验系统, 该系统以线角转换原理为依据, 设计铰接机械结构, 将线振动台的平动自由度转换为转动自由度。以角振动控制原理为依据, 设计控制流程, 实现闭环控制。**结果** 开展了角定频试验和角扫频试验, 对系统的控制效果进行了验证。对比了线参数控制和角参数控制 2 种方法, 结果表明, 角参数控制法具有更高的控制精度。由于闭环控制的作用, 角参数控制法可通过驱动电压的调整直接影响角参数值, 从而抵消了部分由于系统连接、解耦或振动引入的误差。**结论** 该角振动试验系统解决了双台角振动旋转半径受限、线能力受限等问题, 克服了摇摆台频带过窄的问题, 为角振动试验提供一种新的实施方法。

关键词: 角振动试验; 线角转换; 闭环控制; 振动台; 定频; 扫频

中图分类号: TJ01

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)03-0049-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.007

Angular Vibration Test System Based on Single Line Vibration Table

DONG Zhiyuan, LI Xu, SHI Yu, LI Feifei, SUN Dongle

(Aerospace Science & Industry Defense Technology Research and Test Center, Beijing 100854, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the adaptability of gyro products in the environment of angular vibration. An angular vibration test system based on a single line vibration table was developed. Based on the principle of line angle conversion, an articulated mechanical structure was designed to convert the translational freedom of the line vibration table into rotational freedom. Based on the principle of angular vibration control, the control flow was designed and the closed-loop control was realized. An angular constant frequency test and an angular sweep frequency test were carried out to verify the control effect of the system. The two methods of line parameter control and angle parameter control were compared. The result showed that the angle parameter control method had higher control precision. Because of the closed-loop control, the angle parameter control method could directly affect the angle parameter value through the adjustment of the drive voltage, so as to offset part of the error introduced by the system connection, decoupling or vibration. The angular vibration test system solves the problems of limited rotation radius and limited line capacity, overcomes the problem of too narrow frequency band of the swing table, and provides a new method for the angular vibration test.

KEY WORDS: angular vibration test; line angle conversion; closed-loop control; vibration table; fixed frequency; sweep frequency

收稿日期: 2023-10-09; 修订日期: 2024-02-07

Received: 2023-10-09; Revised: 2024-02-07

引文格式: 董智远, 李旭, 师钰, 等. 基于单线振动台的角振动试验系统研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 49-54.

DONG Zhi-yuan, LI Xu, SHI Yu, et al. Angular Vibration Test System Based on Single Line Vibration Table[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 49-54.

为考核航天器的环境适应性,需配套相应的地面试验设备。其中,陀螺类产品需完成角振动试验,研究其在角振动环境下的动态性能,测试其在干扰下的输出误差。目前角振动试验能够通过角振动台^[1-5]、摇摆台^[6-10]和双线振动台 3 种设备来实现。摇摆台如图 1 所示,由液压系统提供动力,具有刚度好、承载强、精度好等优点,但存在着频带带宽过窄等缺点^[10-12]。双线振动台如图 2 所示,带宽充足,载质量大,但受台体最小间距的影响,旋转半径较大,线速度等指标容易达到振动台极限,从而影响角振动性能指标,且整个系统搭建、调试过程复杂,影响试验效率。角振动台能够有效解决旋转半径问题,频带带宽较摇摆台也更有优势,是目前实施角振动试验的主流设备。



图 1 摇摆台模型
Fig.1 Rocking table model



图 2 双线振动台模型
Fig.2 Two-wire vibration table model

角振动台的研发经历了由理论模型到工程应用的过程。20 世纪麻省理工学院就已经研发了早期的角振动台。1980 年 Systron-Donner 公司研制出了一款可以产生一定带宽和振幅信号的角振动台,用于为惯性系统提供相关的性能测试^[13]。20 世纪 90 年代,美国 Contraves-Goerz 研制出了单轴角振动台,该试验设备可以承受 91 kg 的负载,具有较好的负载能力^[14]。2007 年,在德国物理研究院的技术方案基础上,韩国设计了一款中高频电磁激振器^[15]。2009 年,美国实验室介绍了一款高频五轴角振动台,用于美国先进飞行器的性能测试^[16]。2012 年,瑞士 ACUTRONIC 研制出了一款高频角振动台,用于设备级产品的动态测试^[17]。目前,角振动台正向宽频带、高性能方向研究发展。

在我国关于角振动台的研究起步较晚,但这些年来也取得了一系列良好的科研成果^[18-21]。刘鹏等^[22]开发了高频角振动台,研究了角振动台力学模型电机转矩与电机转速之间的传递函数。刘爱东等^[14]研制出

高精度角振动基准装置,该装置推动了角振动检测和校准技术的发展。唐波等^[23]对宽频带电磁式角振动校准系统的研究进展进行了综述。赵剑波等^[24]对随机角振动控制系统进行了研究,解决了随机角振动的实现问题。

从实际情况来看,角振动试验系统在国外有着良好的硬件设施,但在国内则多对于其控制技术进行研究,亟待研发相关试验系统。本研究以线角转换原理和角振动控制原理为依据,设计了铰接结构,搭建了角振动试验系统。在此系统的基础上,开展了角速度定频试验和角速度扫频试验,对试验结果及系统控制方法进行总结分析,为角振动试验的实施提供了新的实现路径。具体研究路线如图 3 所示。

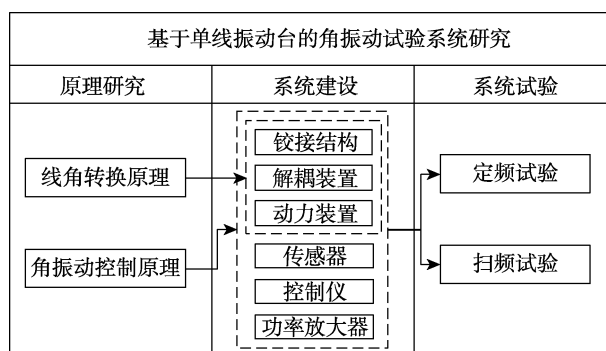


图 3 基于单线振动台的角振动试验系统研究
Fig.3 Research on angular vibration test system based on single line vibration table

1 研究原理

设计基于线振动台的角振动试验系统,需要从两方面原理考虑:一方面为线角转换关系;另一方面为角振动产生后如何实现闭环控制。

1.1 线角转换原理

以角速度计算方法为例,角度及角加速度的计算方法同理。用 θ 表示角速度, r 表示旋转半径,它们具有式(1)所示关系。

$$v = \theta r \quad (1)$$

线角转换关系如图 4 所示。

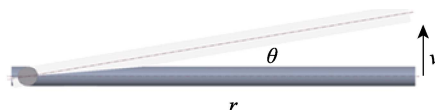


图 4 线角转换关系
Fig.4 Line angle conversion diagram

除线角转换关系外,当试验条件为角速度等参数时,还需根据条件参数评估线振动台各项能力是否达到极限指标。因此,要建立最大位移、线速度、线加速度之间的关系,正弦振动曲线如图 5 所示。

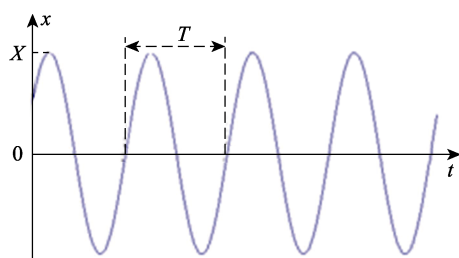


图 5 正弦振动的时域曲线

Fig.5 Time domain curve of sinusoidal vibration

定义正弦振动的角频率为 ω , 振动幅值为 X , 相位为 α , 在任意时刻的振动瞬时值可表示为:

$$x(t) = X \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

振动频率 f 为:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

以 X 表示位移幅值, V 表示速度幅值, A 表示加速度幅值, 有式 (4) 关系成立:

$$A = \omega V = \omega^2 X \quad (4)$$

联立式 (1) ~ (4), 从角振动试验条件能够计算出所需的线振动试验能力, 初步评估线振动台是否能完成此项试验。

1.2 角振动控制原理

在角振动产生之后, 需对角振动试验系统进行闭环控制。线振动台控制方式多为线参数控制。在低频条件下, 系统中的部件可以看作刚体, 理想状态下, 线参数和角参数存在转换关系, 采用线参数对振动台进行控制时可得到相应的角参数。当振动频率增高时, 系统自身振动会给试验引入较大误差, 因此采用角参数直接进行闭环控制, 通过调整驱动对系统的误差进行补偿, 达到的效果更好。角振动控制原理如图 6 所示。在正弦定频或扫频的过程中, 发生一个正弦波输出, 激励被试品, 检测控制信号中的幅值, 比较参考谱与控制谱的差值。根据两谱之间的差值, 调整驱动电压信号以实现角振动的闭环控制。

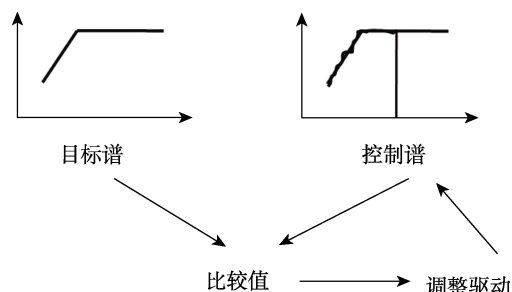


图 6 角振动控制原理

Fig.6 Schematic diagram of angular vibration control

2 角振动试验系统

角振动试验系统分为角振动试验装置和角振动控制系统 2 个部分, 其中角振动试验装置用于实现

线角转换, 角振动控制系统用于实现整个系统的闭环控制。

2.1 角振动试验装置

角振动试验装置主要包含三角支架、升降杆、连接杆、台面、静压球头等结构, 如图 7 所示。其中三角支架及升降杆起到固定作用, 连接杆与升降杆之间为铰接关系, 使平动自由度转换为转动自由度, 台面用于承载被试品。当线振动台提供动力时, 静压球头可实现解耦功能, 防止装置卡顿, 有利于闭环控制的实现。

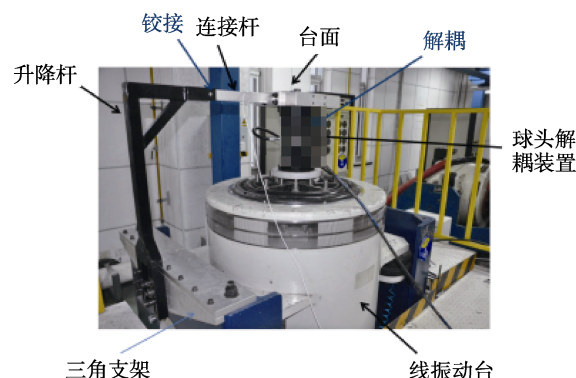


图 7 角振动试验装置

Fig.7 Angular vibration test device

2.2 角振动控制系统

角振动闭环控制系统由控制、激励和信号采集处理 3 部分组成。其中, 控制部分为振动控制仪, 发出驱动信号传输给功率放大器。激励部分包括功率放大器和振动台, 功率放大器将控制仪发出的驱动信号进行放大, 输出能量给振动台, 使其按照相应的控制谱进行振动完成激励。信号采集部分为六自由度传感器, 将被试品上产生的角速度信号进行采集, 并处理成为控制仪所需要的信号, 传回控制仪。闭环控制流程如图 8 所示。

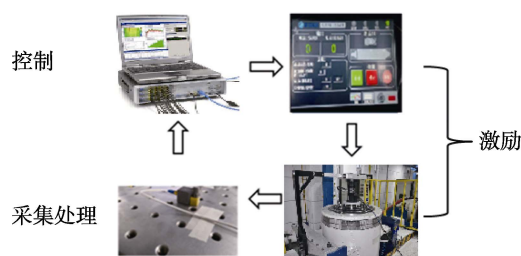


图 8 角振动控制流程

Fig.8 Flow chart of angular vibration control

3 试验分析

分别开展角速度定频和角速度扫频 2 项试验, 通过控制谱与参考谱进行对比, 验证角振动试验系统的

控制效果。试验过程中转臂的旋转半径长为 0.5 m。

3.1 角速度定频试验

设置参考谱为 10 Hz、1g，试验控制谱结果如图 9 所示。参考谱设定的加速度值为 1g，根据式(1)~(4)计算对应的角速度，为 17.89°，测量出的角速度为 11.11°，实际振动过程中存在着一定的转换误差。设置参考谱为 10 Hz，增加加速度数值至 5g（间隔 0.5g）得到的数据统计（结果保留两位小数）见表 1。

分析表 1 可知，在线加速度控制的情况下，线加速度控制值与参考值的误差极小。转换成的参考角速度值与测量角速度值存在一定误差，且随着振动量级的增大，误差的差值没有较大的波动。分析误差产生的原因为，系统结构件为非刚体，除了刚体运动产生的值之外，还存在着振动等因素产生的值。考虑到由于系统本身非刚体以及其他解耦、连接装置引入的误差，选择角速度直接控制进行试验，参考谱设定为

10 Hz、50(°)/s，试验控制谱结果如图 10 所示。分析图 10 可知，角速度控制值为 50.37 (°)/s，与参考值 50 (°)/s 的误差为 0.37 (°)/s，从定频控制的现象来看，直接采用角速度进行闭环控制的效果良好。

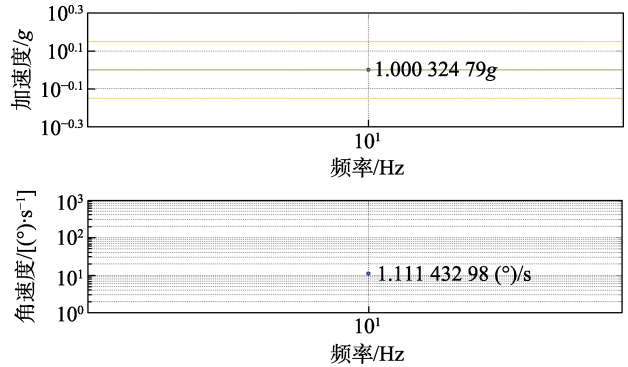


图 9 10 Hz、1 g 定频控制谱
Fig.9 10 Hz, 1 g fixed frequency control spectrum

表 1 定频控制统计
Tab.1 Statistical table of fixed frequency control

序号	参考加速度/g	控制加速度/g	误差加速度/g	参考角速度/[(°)·s ⁻¹]	测量角速度/[(°)·s ⁻¹]	误差角速度/[(°)·s ⁻¹]
1	1	1	0	17.89	11.11	6.78
2	1.5	1.5	0	26.84	18.54	8.3
3	2	2	0	35.78	38.02	2.24
4	2.5	2.54	0.04	44.73	50.59	5.86
5	3	3.03	0.03	53.67	59.65	5.98
6	3.5	3.49	0.01	62.62	64.02	1.4
7	4	4.01	0.01	71.57	71.95	0.38
8	4.5	4.5	0	80.51	80.37	0.14
9	5	5.03	0.03	89.46	86.66	2.8



图 10 10 Hz、50(°)/s 定频控制谱
Fig.10 10Hz, 50(°)/s fixed frequency control spectrum

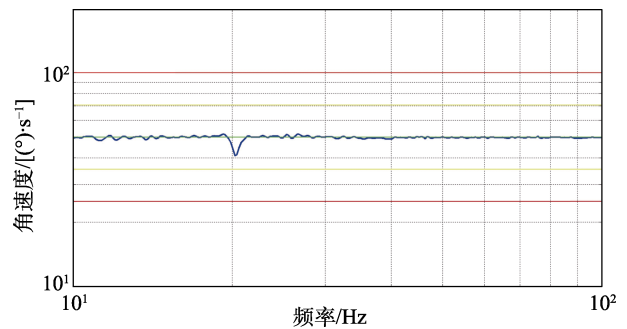


图 11 扫频控制谱
Fig.11 Sweep frequency control spectrum

3.2 角速度扫频试验

为研究试验系统在各个频段的控制效果开展角速度扫频试验，设置试验参数为 10~100 Hz、50 (°)/s，扫描速率为 2 Oct/min。试验控制谱结果如图 11 所示。从扫频的控制结果可知，除了在 20 Hz 左右出现了小范围波动外，其余频段控制结果良好。分析原因为，闭环控制系统通过驱动电压的调整抵消了部分自身

振动产生的误差，在 20 Hz 附近的频率系统振动超出了驱动电压所能控制的范围。

4 结论

研究以线角转换原理为依据，设计了角振动试验装置，搭建角振动闭环控制系统。开展了角速度定频和角速度扫频 2 项振动试验，结果表明：

1)角振动试验装置能够将线振动转化为角振动,该装置可有效地完成角振动试验。

2)通过线加速度进行控制,监测出的角速度与理论角速度存在一定的偏差,分析原因为系统自身的连接、解耦、振动等原因引入的误差。采用角速度直接进行控制可有效改善该问题。

3)通过角速度扫频振动分析可知,该装置在10~100 Hz内有着良好的控制效果,仅在一些特定的频段上存在控制波动现象。

参考文献:

- [1] 张玉鑫. 角振动台复合控制方法与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
ZHANG Y X. Composite Control Method and Experimental Study of Angular Vibration Table[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [2] 童鹏飞. 三轴角振动台结构与控制系统设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
Tong Peng-fei. Three-Axis Angular Vibration Table Structure and Control System Design Research[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2021.
- [3] 徐世强. 三轴角振动台控制系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
XU S Q. Design and Research on Triaxial Angular Vibration Table Control System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [4] 刘亚杰, 张立中. 微位移角振动台柔性铰链静动力学分析[J]. 工业技术创新, 2015, 2(5): 483-487.
LIU Y J, ZHANG L Z. The Static and Dynamic Analysis of the Flexure Hinge of the Micro Displacement Single Vibrator[J]. Industrial Technology Innovation, 2015, 2(5): 483-487.
- [5] 肖磊. 角振动台控制系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
XIAO L. Research and Design on Angle-Vibration Tables Control System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [6] 冯璐璐, 张维, 高洁, 等. 大惯性摇摆台建模与半实物仿真[J]. 机械与电子, 2021, 39(5): 40-45.
FENG L L, ZHANG W, GAO J, et al. Modeling and Hardware-in-the-Loop Simulation of Rolling Cabin with Large Inertia[J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(5): 40-45.
- [7] 杜家坤, 刘彬. 一种多用途的单轴倾角摇摆台的设计与实现[J]. 航空精密制造技术, 2022, 58(2): 19-22.
DU J K, LIU B. Design and Implementation of Multi-Purpose Single Axis Swing Table[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2022, 58(2): 19-22.
- [8] 时阳阳, 刘士宾, 王克楠. 三自由度摇摆台方案设计及仿真分析[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(12): 79-81.
SHI Y Y, LIU S B, WANG K N. Scheme Design and Simulation Analysis of Three-Degree-of-Freedom Swing Table[J]. China Water Transport, 2019, 19(12): 79-81.
- [9] 李崔盟. 面向路谱复现的六自由度摇摆台设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
LI C M. Design and Experimental Study of Six-Degree-of-Freedom Swing Platform for Road Spectrum Reproduction[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [10] 李晓琳, 严侠. 基于倾斜摇摆台的摇摆控制方法研究及控制系统设计[J]. 环境技术, 2018, 36(6): 106-110.
LI X L, YAN X. Swaying Control Method Study and Control System Design Based on Tilting and Swaying Bench[J]. Environmental Technology, 2018, 36(6): 106-110.
- [11] 邓广大. 大负载三自由度摇摆台控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
DENG G D. Control System Design of 3-DOF Large Load Testing Table[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [12] 石英托. 大惯性试验台摇摆角测量及控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
SHI Y T. Big Inertia Test Rig Swing Angle Measurement and Control Research[D]. Wuhan: Huazhong university of science and technology, 2020.
- [13] WHITALL J. A Rotary Vibrator for the Calibration of Angular Motion Transducers[R]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1975.
- [14] 刘爱东, 于梅, 何闻. 角振动测量方法的研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(12): 216-219.
LIU A D, YU M, HE W. A Study of an Angle Vibration Measuring Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(12): 216-219.
- [15] 沈亮, 方滨. 某 SUV 车方向盘角振动的分析[J]. 汽车实用技术, 2018(5): 26-27.
SHEN L, FANG B. Vibration Analysis of the Steering Wheel Angle of a SUV Vehicle[J]. Automobile Applied Technology, 2018(5): 26-27.
- [16] EWING C. The AGWT at the Air Research Laboratory Directorate[C]// Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. [s. l.]: AIAA, 2009.
- [17] MORRIS H, PETERS R, MERRITT P. A Precision Inertial Angular Vibration Measuring System[J]. Shock Vibration Information Center Shock Vibration Bulletin, 1980, 50: 54-61.
- [18] 王伟雄, 陶敏尔. 双轴角振动台控制方案的实现[J]. 中国惯性技术学报, 1992(2): 68-71.
WANG W X, TAO M E. The Realization for the Control Plan of the Double-Axis Angle Vibration Table[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1992(2): 68-71.
- [19] 彭军, 何群, 薛景锋, 等. 低频标准角振动台[J]. 计测技术, 2005, 25(6): 46-48.
PENG J, HE Q, XUE J F, et al. Low Frequency Standard Angular Exciter[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 2005, 25(6): 46-48.
- [20] 郎需英. 精密角振动台的试验研究[J]. 航空精密机械工程, 1986, 22(4): 7-14.

- LANG X Y. Experimental Study on Precision Angular Vibration Table[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1986, 22(4): 7-14.
- [21] 彭志宽. 三轴精密角振动台控制问题探讨[J]. 中国惯性技术学报, 1998, 6(1): 47-50.
- PENG Z K. Discussion on Control of Three-Axis Precision Angle Shaking Table[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1998, 6(1): 47-50.
- [22] 刘鹏, 姜文婷. 高频角振动实验台的系统设计与研究[J]. 电子世界, 2020(21): 138-139.
- LIU P, JIANG W T. System Design and Research of High-Frequency Angular Vibration Experimental Platform[J]. Electronics World, 2020(21): 138-139.
- [23] 唐波, 何闻, 刘爱东. 宽频带电磁式角振动校准系统研究进展[J]. 计量学报, 2021, 42(10): 1328-1334.
- TANG B, HE W, LIU A D. Research Progress on Broadband Electromagnetic Angular Vibration Calibration System[J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(10): 1328-1334.
- [24] 赵剑波, 彭军. 随机角振动控制系统研究[J]. 计测技术, 2017, 37(6): 20-24.
- ZHAO J B, PENG J. Research on the Random Angular Vibration Control System[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(6): 20-24.