

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.12

# 基于ANSYS的离心复合校准装置桁架结构分析

秦朝俊, 刘静雅

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 在离心复合校准装置极限载荷工况下, 为确定桁架强度满足离心复合校准应用需求, 对桁架结构进行有限元分析和试验验证。利用ANSYS有限元分析软件, 设计仿真过程, 完成对该种离心转臂式桁架结构, 从结构组成、模型建立、网格划分、载荷约束设置等程序描述整个分析过程。通过分析结果云图, 确定桁架受力结果符合机械结构要求。经线加速度计校准试验测试对结构分析结果进行验证, 结果表明: 桁架的结构强度满足使用要求, 变形量与实测值接近, 结构分析结果与实际应用测试值相符合, 分析结果可靠。此桁架分析过程和验证方式可为类似桁架分析提供参考。

**关键词:** 离心复合校准装置; 桁架; 有限元分析

中图分类号: TB931

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)02-0098-07

## Analysis of truss structure of centrifugal composite calibration device based on ANSYS

QIN Chaojun, LIU Jingya

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

**Abstract:** In order to ensure that the strength of the truss meets the application requirements of centrifugal composite calibration under the ultimate load condition of the centrifugal composite calibration device, the finite element analysis and verification test process of the truss structure were studied. ANSYS finite element analysis software was used to design the simulation process to complete the centrifugal boom truss structure analysis. The whole analysis process was described from the structure composition, model establishment, grid division, load constraint setting and other programs. By analyzing the result nephogram, it is confirmed that the stress result of truss meets the requirement of mechanical structure. The results of structural analysis are verified by the calibration test of the linear accelerometer. The results show that the structural strength of the truss meets the requirements of use, the deformation is close to the measured value, the structural analysis results are in accordance with the actual application test value, and the analysis results are reliable. The process and verification method of truss analysis can provide reference for similar truss analysis.

**Key words:** centrifugal composite calibration device; truss; finite element analysis

## 0 引言

加速度计作为武器装备制导与惯性导航中的

关键传感器, 常处于较为恶劣的工作环境, 这严重影响了其量值特性, 进而影响到装备的性能<sup>[1]</sup>。长期以来, 广泛应用于校准线加速度计的精密离

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(62103389)

引用格式: 秦朝俊, 刘静雅. 基于ANSYS的离心复合校准装置桁架结构分析[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 98-104.

**Citation:** QIN C J, LIU J Y. Analysis of truss structure of centrifugal composite calibration device based on ANSYS[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(2):98-104.



心试验多为单一条件下的测试，其结果不能真实反应出每个传感器在复杂使用环境下的参数特性，以致影响使用精度。因此，为了准确反应实际工作环境中被测对象受多种环境因素作用的情况，必须建立复合环境试验装置，开展复合环境试验技术研究<sup>[3]</sup>，为提高产品可靠性打下坚实基础<sup>[2]</sup>。

国外的环境试验技术发展较早、技术成熟，可以实现高精度的复合环境模拟<sup>[4]</sup>。通过文献<sup>[5] - [6]</sup>可知，环境试验最早起源于德国，之后英、美等国家在军用器材应用过程中，发现其性能参数受复杂环境影响较大，因此逐渐重视设备的环境试验，于20世纪50年代初开始研究复合环境测试设备，并多次迭代该项技术，现已成功将其应用于航空航天等领域。美国持续不断地研究复合校准技术，构建了规格、品种齐全的环境试验室，因发现单项环境试验不能展示出在实际应用中武器装备受复杂环境因素影响出现弊端的特点，专门加大了此方面的研究投入和技术队伍建设，对关键型号任务进行复合环境试验。这些复合环境试验结果对重要装备发挥了决定性作用。而国内离心复合校准环境下，线加速度计的校准技术和方法还处于初级发展阶段，高精度复合校准装置较少。我国在20世纪60年代开始研究环境试验设备，逐渐建立起较全面的单环境测试设备，实现了单项环境项目的测试。21世纪初，我国开始对复合环境试验设备及技术进行研究。但受基础配套关键技术的困扰，多机械环境因素影响的复合环境校准技术研究工作大多停留在理论方法

研究阶段，未能研制出成熟的应用装置。

针对离心复合校准装置一主多从<sup>[7]</sup>的结构特点设计了一种用于建立离心复合校准装置的桁架结构，此桁架结构具有净空间值高、承受集中载荷效率高、空间扩展性强、设计灵活等优点<sup>[8]</sup>，可作为主体旋转支撑，搭载气压箱、温度箱以及振动台，在设计的加速度量程范围内，形成复合校准装置，对加速度计进行离心-振动、离心-气压、离心-温度复合参数校准，提高加速度计在实际环境中的使用精度，并基于ANSYS有限元分析软件对桁架结构进行仿真分析及强度校核。

1 桁架组成

桁架的基本组成为上过渡板、下过渡板、横梁、支撑杆、端面过渡板，整体通过焊接的方式连接，具体参数如表1所示，其中横梁、支撑杆均为圆管型材，上、下过渡板、端面过渡板为钢板。对桁架结构的仿真进行材料属性定义设置，如表2所示。

运用SolidWorks辅助设计软件对桁架的主要部位（横梁、支撑杆件、过渡板、焊缝）构建三维实体模型，如图1所示。

表1 桁架基本组成及参数

| Tab.1 Basic composition and parameters of truss |          |                    |
|-------------------------------------------------|----------|--------------------|
| 序号                                              | 部件名称     | 参数                 |
| 1                                               | 粗钢管(横梁)  | 4根，直径60 mm，厚度5 mm  |
| 2                                               | 细钢管(支撑杆) | 28根，直径48 mm，厚度5 mm |
| 3                                               | 钢板(过渡板)  | 4块，长度不等，厚度30 mm    |

表2 材料属性定义

Tab.2 Definition of material attributes

| 编号 | 部件名称 | 材料种类 | 弹性模量/ Pa             | 泊松比  | 等效密度/( kg·cm <sup>-3</sup> ) | 许用应力/ MPa |
|----|------|------|----------------------|------|------------------------------|-----------|
| 1  | 钢管   | Q235 | 2 × 10 <sup>11</sup> | 0.28 | 7 890                        | 235       |
| 2  | 板材   | Q235 | 2 × 10 <sup>11</sup> | 0.28 | 7 890                        | 235       |
| 3  | 焊料   | 低碳钢  | 2 × 10 <sup>11</sup> | 0.28 | 7 890                        | 235       |

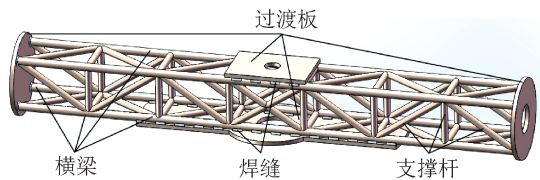


图1 桁架三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of truss

2 桁架分析

桁架是整套装置的承载部件。当电机驱动桁架旋转时，横梁、支撑杆、过渡板、焊缝为主要的受力对象。桁架径向受旋转产生的离心力作用，法向受重力及切向力的作用。因其主要构成为金

属型材, 结构强度和变形量决定了复合校准装置在任何工况下能否正常运行, 即在极限工况下将受力限制在材料的线弹性范围内<sup>[9]</sup>。

## 2.1 仿真过程设计

考虑到一些细微特征(如各种开孔、倒角)对ANSYS分析的结果几乎没有妨碍, 在确保关键部位有限元分析精度的前提下, 在SolidWorks中对虚拟样机进行必要的简化。

将桁架模型文件通过相应的格式转换导入ANSYS软件中, 由软件自动修复功能生成相对应桁架机构的虚拟样机, 实体模型即可成功呈现于ANSYS操作环境中。经过适当简化, 建立的桁架虚拟样机如图2所示。

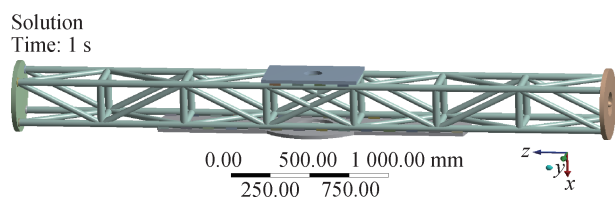


图2 桁架虚拟样机

Fig.2 Truss virtual prototype

在进行网格划分之前, 需要定义单元类型。根据桁架结构特性, 网格划分选择SOLID186单元, 其具有任意的空间各向异性、单元支持塑性、超弹性、蠕变、应力钢化、大变形和大应变能力, 可采用混合模式模拟几乎不可压缩弹塑材料和完全不可压缩超弹性材料<sup>[10]</sup>。

针对桁架结构特点, 用自由划分和扫略划分相结合的方式形成有限元网格。不同部位采用不同的网格, 在应力集中的地方划分为较为密集的网格, 以便准确反应变化规律。焊缝受力关键部位, 网格划分质量必须高, 这样才不会引起局部

误差。结构的其他部位, 网格划分的数量和疏密程度可适当降低, 有利于降低计算规模, 提高计算效率<sup>[11]</sup>。桁架划分单元总数为731 535, 节点总数为1 676 756。

此桁架中的每个部件之间的链接采用焊接方式, 在三维模型中由焊接实体直接体现。施加载荷过程中, 默认焊接牢固, 焊缝应力小于其屈服强度, 零件及焊料之间不会发生滑动或分离。桁架各部件接触区间设置为绑定, 不允许有相对挪移或者断开。相连接的部分、接触的长度和面积均保持不变, 对桁架采用的绑定接触用线性求解。

当桁架旋转时, 端面上的气压箱(质量为18.6 kg)、温控箱(质量为26.0 kg)及振动台(质量为23.5 kg)在离心力作用下, 使径向方向的横梁件受到拉伸作用。在复合校准装置运行到加速度最大20 g( $g$ 为重力加速度)时, 其承受的负载将达到5200 N的离心力, 在此工况下, 容易导致桁架结构发生较大变形, 或者达到材料的最大屈服强度而造成结构损坏。

在底板底部施加固定约束, 约束所有移动自由度。左右圆形端板中心处各增加26 kg等效质量点, 在整体结构上施加离心力惯性载荷, 如图3所示。

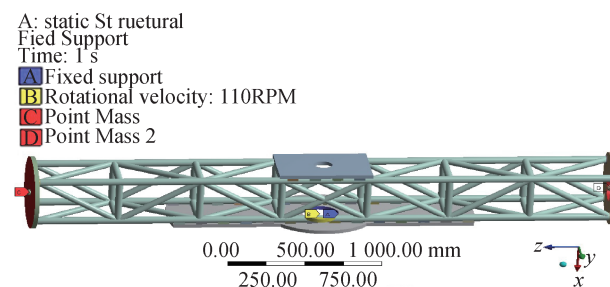


图3 载荷和约束

Fig.3 Loads and constraints

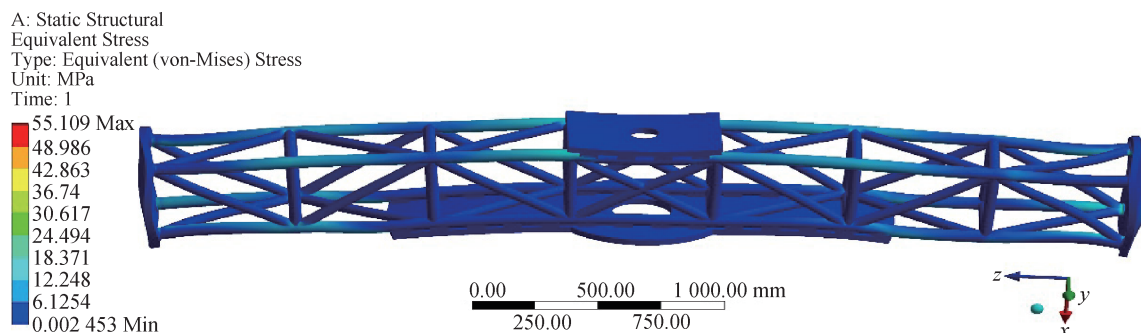


图4 桁架整体静强度等效应力云图

Fig.4 Equivalent stress nephogram of the whole static strength of truss

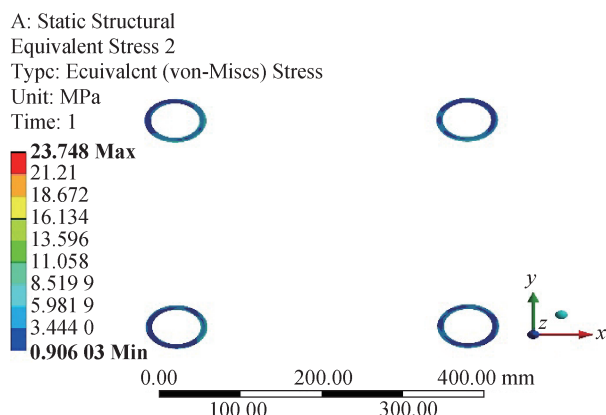


图5 圆板焊缝处静强度等效应力云图

Fig.5 Equivalent stress nephogram of static strength  
at weld of round plate

通过对桁架结构几何模型的建立、材料属性的定义、整体结构的网格划分、接触条件和载荷约束设置及有限元软件的仿真分析,得到桁架整体静强度等效应力云图(如图4)、圆过渡板焊缝静强度等效应力云图(如图5)、平过渡板焊缝处

静强度等效应力云图(如图6)和整体结构变形云图(如图7)。

## 2.2 分析结果

从图4、图5和图6可知,桁架在极限负载值下,桁架结构、圆板焊缝和平板焊缝受到的等效应力最大值分别为55.109, 23.748, 55.109 MPa,远小于表2所列材料的许用应力极限值235 MPa<sup>[12]</sup>,结构满足整套复合装置的使用强度和刚度要求。虽然可将目前桁架结构部件优化为更轻型的钢材,但考虑日后需要在此设备基础上开展其他离心复合试验,加载更为重型的设备,暂不对钢材进行轻量优化。

桁架跟随离心机旋转,在同一转速 $\omega$ 下,距桁架旋转中心越远,即旋转半径 $r$ 越大的情况下,根据公式 $a = r\omega^2$ 可知,远端的离心加速度越大,所承受的离心力越大,桁架两端面的变形量也逐渐增加。当离心机正常工作的加速度达到20 g时,图8

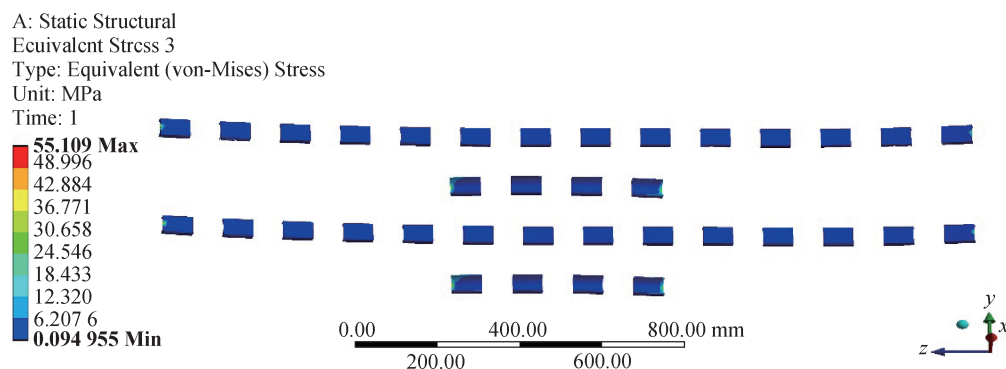


图6 平板焊缝处静强度等效应力云图

Fig6 Equivalent stress nephogram of static strength at plate weld

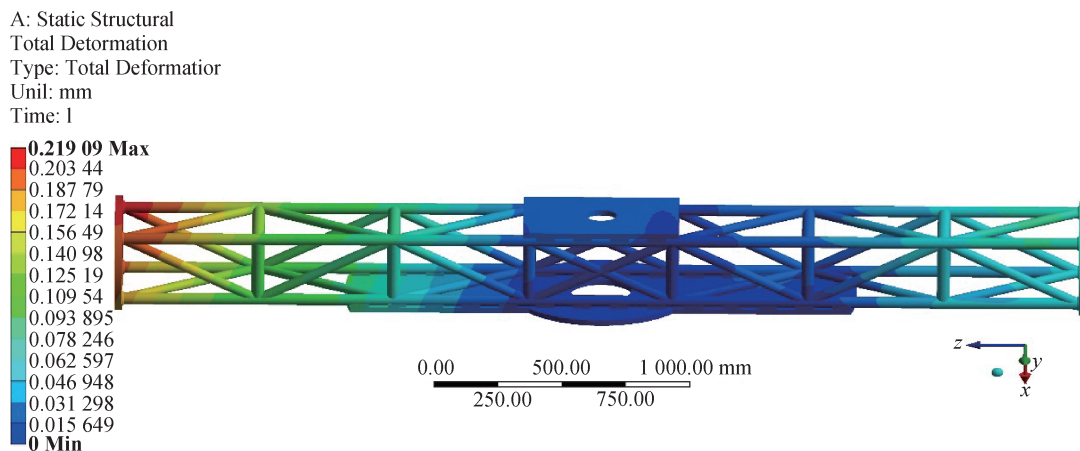


图7 整体结构变形云图

Fig.7 Cloud map of overall structure deformation

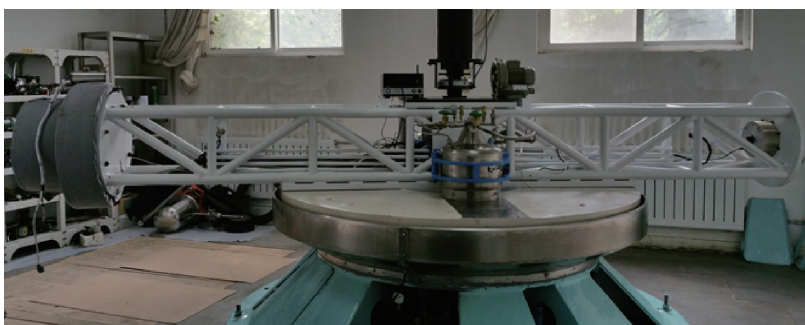


图8 离心复合校准装置

Fig. 8 Centrifugal composite calibration device

显示桁架整体变形最大为0.219 09 mm, 发生在端部法兰盘的位置。有限元软件分析后的变形云图对选择复合校准装置的有效半径和测量半径动态变化量具有一定的参考价值。

### 3 试验验证

如图8所示, 运用离心复合校准装置对仿真结果进行试验验证。按分析设置的负载, 桁架两端分别挂载温箱和配重。依据线加速度计的精密离心机校准规范JJF 1116-2004<sup>[13]</sup>要求, 在0 g~20 g量程范围内设置10个加速度校准序列, 力矩电机驱动桁架旋转。由微位移传感器采集每个加速度点下桁架径向的半径动态变化量。测试数据如表3和图9所示。

表3 测试数据

Tab.3 Test data

| 序号 | 加速度/g | 半径动态变化量/mm |
|----|-------|------------|
| 1  | 0     | 0.0        |
| 2  | 1     | 10.8       |
| 3  | 3     | 31.9       |
| 4  | 5     | 52.3       |
| 5  | 7     | 73.2       |
| 6  | 10    | 104.5      |
| 7  | 12    | 125.4      |
| 8  | 15    | 157.2      |
| 9  | 18    | 188.5      |
| 10 | 20    | 209.4      |

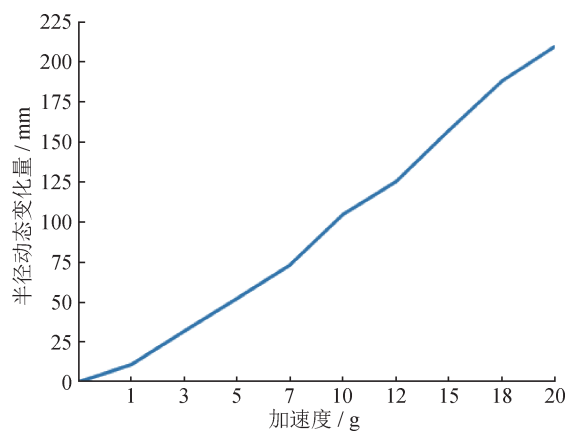


图9 测试数据

Fig.9 Test data

由表3和图9可知, 在极限加速度时, 桁架结构发生最大变形, 半径 $r$ 动态变化量为最大值 $r_d$ , 根据加速度 $a=(r+r_d)\omega^2$ 公式可以看出, 半径动态变化量越大, 加速度增加量越多, 故选择在极限 $g$ 值下对比仿真结果与测试数据更具有代表性。在加速度为20 g时, 半径动态变化量为209  $\mu\text{m}$ , 仿真模拟显示桁架结构变形最大值为219  $\mu\text{m}$ , 偏差仅为10  $\mu\text{m}$ , 说明该仿真分析符合桁架的实际应用情况, 具有真实的参考价值。存在偏差的原因: ①实际旋转过程中, 桁架并非只沿离心力方向发生形变, 有垂直于转臂方向的力使桁架向上发生弯曲变形; ②仿真分析中的型材参数均为理想状态, 而实际应用中往往有一定的差异化; ③仿真分析时默认杆件之间是固定连接的, 而桁架实际是焊接连接, 连接方式不同导致误差的存在。

经过试验验证可知, 桁架及焊缝强度满足设计使用要求, 在极限负载工况环境下, 焊缝未发生疲劳失效。

## 4 结论

针对桁架在离心复合校准装置应用过程中的规定载荷要求,以桁架为分析对象,借助 ANSYS 软件进行有限元分析,通过设计仿真过程,得到应力和变形云图,成功实现桁架结构的静力学理论分析。为确保仿真分析的准确性,进行了试验验证,将测试数据和仿真结果进行对比,为基于 ANSYS 仿真的桁架结构分析提供了数据支撑。对比数据可知仿真结果与测试数据存在微小偏差,今后将对仿真过程进行深入研究,优化仿真过程,进行相关试验验证,实现更好的桁架结构模拟,进一步提高仿真结果的准确性。

桁架结构的有效实现,使惯性产品可在离心-振动、离心-气压、离心-温度条件下进行量值校准。继而可开展高  $g$  值下加速度计的温度灵敏度、气压灵敏度校准、离心复合校准方法及加速度计整流误差校准方法<sup>[14]</sup>等研究。为真实环境下惯性器件的误差补偿奠定基础,提高惯性器件和惯性系统的使用精度<sup>[15]</sup>,进而提高武器装备的性能。

## 参考文献

- [1] 代洁,董雪明,王敏林,等. 基于离心机的低气压精密控制研究[J]. 计测技术, 2020, 40 (2): 59-63.  
DAI J, DONG X M, WANG M L, et al. Research on precise control of low pressure based on centrifuge[J]. Metrolology & Measurement Technology, 2020, 40 (2): 59-63. (in Chinese)
- [2] 方兵,沈润杰,何闻,等. 航天器元件多参数综合可靠性环境试验研究综述[J]. 中国机械工程, 2009, 20 (22): 2766-2771.  
FANG B, SHEN R J, HE W, et al. A review of environmental tests on multi-parameter integrated reliability of spacecraft components [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(22): 2766-2771. (in Chinese)
- [3] 董雪明. 复合环境试验技术研究进展[J]. 计量技术, 2014 (8): 39-42.  
DONG X M. Research progress of composite environment test technology [J]. Measurement Technique, 2014 (8): 39-42. (in Chinese)
- [4] 董雪明,熊磊,龙祖洪,等. 多参数复合校准技术研究进展[J]. 测控技术, 2014, 33: 526-530.  
DONG X M, XIONG L, LONG Z H, et al. Research progress of multi-parameter composite calibration technology [J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33: 526-530. (in Chinese)
- [5] 向旭. 高线加速度与振动复合试验环境控制系统的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2002.  
XIANG K. Research on environment control system of high line acceleration and vibration compound test [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2002. (in Chinese)
- [6] 何阳,蒋春梅,张建全. 振动离心复合试验系统发展概述[J]. 装备环境工程, 2016, 13 (6): 95-103.  
HENG Y, JIANG C M, ZHANG J Q. Development overview of vibration centrifugal compound test system [J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13 (6): 95-103. (in Chinese)
- [7] 张海军. 高线加速度下热与振动复合环境试验装置控制系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
ZHANG H J. Research on control system of thermal and vibration compound environment test device under high line acceleration [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [8] 王丁丁,李伟,罗玉祥,等. 航天器大型空间桁架结构变形监测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 1-6.  
WANG D D, LI W, LUO Y X, et al. Study on deformation detection method of large space truss structure of spacecraft [J]. Computer Measurement and Control, 2022, 30 (1): 1-6. (in Chinese)
- [9] 杨天玲,朱道林,张海波,等. 基于 ANSYS 的自动扶梯桁架结构分析及实验研究[J]. 机电工程, 2021, 38: 1641-1646.  
YANG T L, ZHU D L, ZHANG H B, et al. Analysis and experimental study of escalator truss structure based on ansys [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38: 1641-1646. (in Chinese)
- [10] 程志华. 回转窑热—结构分析及分体式滚圈设计[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.  
CHENG Z H. Thermal structure analysis and split roller design of rotary Kiln [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] 李国栋. 基于 ANSYS 的自动扶梯桁架结构优化设计[D]. 江苏: 江苏大学, 2017.  
LI G D. Optimization design of escalator truss structure based on ansys [D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2017.

(in Chinese)

- [12] 杨绿峰, 宋沙沙, 刘嘉达仁. 钢桁架结构稳定性与两层强度优化设计研究[J]. 工程力学, 2020, 37: 207-217.

YANG L F, SONG S S, LIU J D R. Study on steel truss structure stability and two-layer strength optimization design [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37: 207-217.

(in Chinese)

- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 线加速度计的精密离心机校准规范: JJF 1116-2004[S]. 北京: 中国质检出版社, 2004.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Precision centrifuge calibration specification for linear accelerometers: JJF 1116-2004[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2004. (in Chinese)

- [14] 陈启山, 董雪明. 基于单一振动加速度的整流误差校准[J]. 工程与试验, 2020, 60 (3): 50-53.

CHEN Q S, DONG X M. Rectification error calibration based on single vibration acceleration [J]. Engineering & Test, 2020, 60 (3) : 50-53. (in Chinese)

- [15] IEEE SA. IEEE Recommended practice for precision centrifuge testing of linear accelerometers: IEEE Std 836-2009[S]. IEEE, 2009.

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 秦朝俊 (1990—), 男, 北京人, 工程师, 从事惯性器件校准技术研究工作。