

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.01

# 挠性连接件在多分量力校准装置中的应用

秦海峰, 王丽, 刘思博

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 主要对挠性连接件的结构功能特点进行了介绍, 说明了挠性连接件在多分量力组合校准装置中的应用和作用机理。多分量力组合校准装置和被校传感器受力后产生的变形必然会引起装置和被校传感器相对位置的变化, 从而影响多分量力的准确度, 挠性连接件的作用主要是克服这一影响。同时, 本文还对装置中采用的挠性连接件的技术设计、应用效果以及试验验证情况进行了介绍及分析。

**关键词:** 挠性连接件; 多分量力; 机械设计; 结构仿真分析; 试验验证

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2019)02-0001-05

## Application of Flexible Coupling in Multi-component Force Calibration Device

QIN Haifeng, WANG Li, LIU Sibao

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

**Abstract:** The article introduces the structural and functional characteristics of flexible coupling, and explains their application and mechanism in multi-component force calibration device. The deformation of the multi-component force calibration device and the sensor under test caused by the force changes the relative position of the device and the sensor, and thus affects the accuracy of the multi-component force. The function of the flexible coupling is mainly to overcome the effect. The article introduces the technique design, application effect and validate examination of the flexible couplings used in the multi-component force calibration device.

**Key words:** flexible coupling; multi-component force; mechanical design; structural simulation analysis; validate examination

## 0 引言

近些年来, 多分量力测量仪器的应用和校准需求日益增多, 为解决多分量力测量仪器的校准和溯源问题, 新研制了多分量力校准装置, 该装置可在一定范围内进行三个力值与力矩分量的任意组合校准<sup>[1]</sup>。该装置采用多个加载器同步全方位加载的工作方式, 并在各个加载器处均串接了高准确度力传感器用于指示和控制标准力值。为保证校准装置自身各分量载荷在施加过程中的准确性, 减少校准装置对被校准的多分量力传感器产生的耦合效应, 须设计可靠的结构形式, 专用的挠性连接件即是有效手段之一。

## 1 挠性连接与刚性连接件

挠性连接与“刚性连接”是相对而言的, “刚性连接”是常见的连接方式<sup>[2]</sup>, 被连接的结构件之间不得有位移, 理论上可实现力或力矩等载荷的完全传递。刚性连接结构简单、成本低廉, 大多数的紧固中都是这样的连接, 在载荷平稳、转速稳定、能保证被联两轴轴线相对偏移极小的情况下, 也可选用刚性接件。

“挠性连接”中, 被连接的结构件之间既有约束或传递动力的关系, 又可以有一定程度的相对位移。挠性连接件具有补偿被连接两个轴轴线相对偏移的能力, 不仅具有缓冲减震性能, 还可以按局限的方向传递静态载荷或动力。

## 2 挠性连接件在多分量力组合校准装置中的应用

多分量力测量传感器一般能同时测量两个或两个以上力与扭矩分量, 由于测量原理和结构组成特点, 各分量之间的耦合效应是必然存在的。多分量力校准装置的目的是准确校准多分量力测量传感器, 包括耦合误差在内的综合计量特性, 因此装置本身所加各个分量载荷必须准确、稳定且应尽量避免各分量之间的影响。

在多分量力组合校准装置设计过程中, 为减小变形对各分量力和力矩不确定度引入的影响, 保证整体结构具有足够大的刚度且严格控制受力变形量, 对装置整体机械结构进行了结构仿真和优化设计。但在实际加载过程中, 不可避免会发生装置的变形, 同时被

校传感器在承受载荷时也会有不同程度的变形, 这些都会引起加载轴线的偏移或偏转, 因此该装置还在各个加载器与标准力传感器连接处设计串接了合适结构的挠性结构件<sup>[3]</sup>, 其连接方式如图1所示。利用挠性连接轴线位置偏移功能, 有效降低了因装置结构受力扭转等变形引入耦合误差而产生的不确定度影响量。

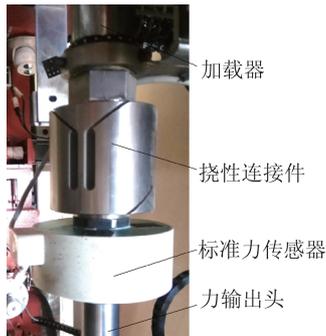


图1 挠性连接件的连接方式

挠性结构件的特点是在轴线方向刚度很大, 可完整传递轴向力, 而在侧向刚度很小, 可在标准力值输出端和被校力传感器受力端轴线不重合时, 通过解耦件自身的侧向位移实现轴向力值的平行传递, 从而克服附加弯矩的产生。

### 3 挠性连接件在多分量力组合校准装置中的作用机理

当多分量力组合校准装置和被校传感器受力后产生的变形必然会引起装置和被校传感器相对位置的变化, 这种变化将从两个方面影响多分量力的准确度, 因此, 校准装置中挠性连接件的作用也主要是克服这两个方面造成的影响。

首先, 装置每个加载方向上均配套了感受轴向力的高准确度力传感器作为力值标准, 此类传感器在受力轴线与其敏感轴线不重合, 即受到侧向力和附加弯矩作用时会引起信号的变化, 从而导致标准力值的不准确, 克服这种影响是挠性连接件在装置中的一项重要作用; 其次, 装置的不同加载轴线之间相对位置的准确性决定了力矩分量的准确性, 然而, 各种变形将使力矩力臂发生变化, 从而产生量值误差, 克服由于变形引起的力臂准确性的影响是挠性连接件在装置中的另一项重要作用。

在装置的各个加载器与标准力传感器连接处串接合适结构的挠性结构件, 以在小位移范围内实现变形跟踪功能, 使施力轴线和受力轴线保持平行, 从而克服寄生分量对标准力传感器的影响; 同时使受力轴线

与专用加载工装上的受力轴线保持一致, 从而保证加力位置和力臂的准确性, 使校准装置输出的标准力和扭矩能够准确地施加到被测仪器上。其具体工作机理如图2所示。

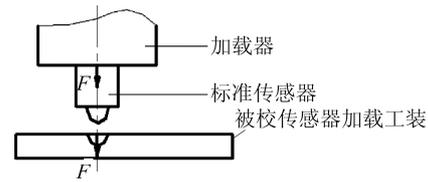


图2 正常传力状态

图2指的是正常工作状态下标准力传感器的工作状态, 受力为轴向力, 被校传感器上承受的力与标准传感器输出力均为垂直方向且大小相等。

由于装置受力变形或被校传感器安装位置与标准传感器有偏差时, 被校工装受力位置与标准传感器加力头产生偏离, 此时受力状态如图3所示, 标准传感器和被校传感器均会承受一定的侧向力, 由于标准传感器对侧向力的敏感程度以及输出特性无法溯源, 所以此影响应尽可能避免。

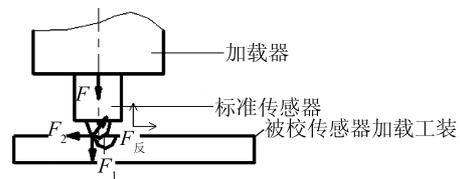


图3 加力点与受力位置有偏离时的状态

当在加载器和标准传感器之间增加挠性连接件时, 如图4所示, 挠性连接件将起到平移加力轴线, 适应加载工装的作用。平移后, 标准传感器的力值与被校传感器承受的力值大小和方向均一致, 避免了侧向力对二者的影响。当进行多分量力加载时, 加载位置主要由被校传感器加载工装的加载位置决定, 因此标准传感器加力点的平移也不会影响力臂的准确度。

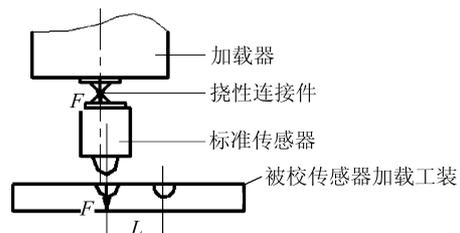


图4 增加挠性连接件时的受力状态

### 4 专用挠性连接件的设计

按照应用场合的不同, 挠性连接件的结构可以是

多种多样的。考虑到在多分量力校准装置中承载力的方向和大小、变形的大小和方向等因素，为不同加载器设计了一系列专用的挠性连接件，以轴向力为 25 kN 的挠性连接件为例，其外形如图 5 所示。

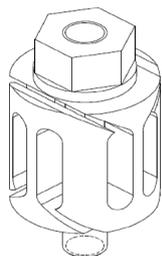
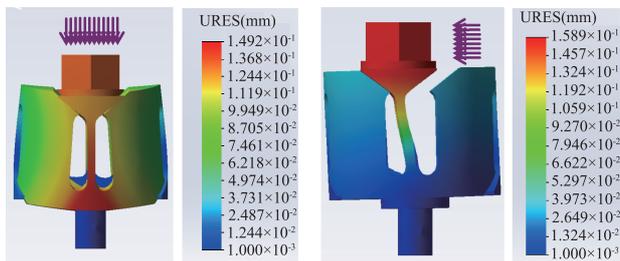


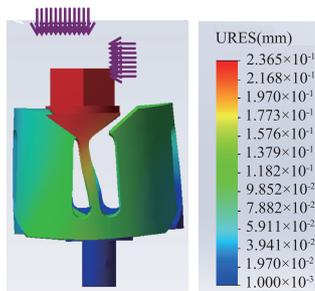
图 5 25 kN 挠性连接件的结构外形

在设计过程中对其结构变形进行了受力仿真分析。该挠性结构件的材料采用 60Si2Mn 弹簧钢，其材料参数为：弹性模量 206 GPa，泊松比 0.29，密度 7850 kg/m<sup>3</sup>，拉压强度 1274 MPa。弹簧钢具有很大的弹性极限，因此在计算过程中，把材料近似当作理想线弹性材料处理<sup>[4]</sup>。

当单独施加 25 kN 轴向压力时，该挠性结构件最大应力为 530.65 MPa，最大位移为 0.15 mm，其受力变形情况如图 6(a) 所示；当单独施加 100 N 侧向推力时，最大应力为 37.42 MPa，最大位移为 0.16 mm，其受力变形情况如图 6(b) 所示；当同步施加 25 kN 轴向力和 100 N 侧向力时，最大应力为 525.46 MPa，最大



(a) 施加 25 kN 轴向压力时 (b) 施加 100 N 侧向推力时



(c) 同步施加 25 kN 轴向力和 100 N 侧向力时

图 6 挠性连接件的受力变形仿真分析

位移为 0.24 mm，其受力变形情况如图 6(c) 所示。可见该挠性结构件的承载能力在轴向与侧向的差异，并且可知该结构件可以良好的实现其轴向压力传递和侧向变形随动跟踪功能。

### 5 应用试验效果

多分量力的组合试验一般是根据需要先对力加载试验项目进行选择、排序，设计校准程式，然后按照先单分量再多分量的顺序逐次开展验证试验。按照《JJF(军工)20-2012 多分量测力仪校准规范》<sup>[5]</sup>，可进行的分量组合情况相当复杂和繁琐，为方便起见，将通过一个简单的试验对挠性连接件的实际应用效果进行验证，如表 1 所示。

表 1 分量组合情况

分量	影响量	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
主分量	$F_x$	-	+	+	+	+	+
	$F_y$	+	-	+	+	+	+
	$F_z$	+	+	-	+	+	+
	$M_x$	+	+	+	-	+	+
	$M_y$	+	+	+	+	-	+
	$M_z$	+	+	+	+	+	-

注：①表中“+”表示可实现组合，“-”表示不可实现组合。

②对于某一个主分量可根据需要选择一个或多个影响量同时加载，进行组合校准。

③主分量是指在校准过程中任意选定一个分量，或根据一定的原则（如用户要求、某一分量在使用中较为重要或较易受到其他分量的影响等）选定的一个分量，用来校准其他分量对这一分量的影响。

选取一只由四个变形量较大的复合梁式传感器构成的十字形组合式多分量力传感器进行试验，传感器的结构外形如图 7 所示。该传感器被设计用于同时测量两个方向的力，两方向力的测量范围上限均为 2 kN。传感器有四个弹性受力体，四个弹性体的输出信号端分别连接一台负荷测量仪表，其读数单位为 mV/V。

首先将传感器安装在传统的单轴向力标准装置（10 kN 力标准机）上分别进行两个方向的力值加载试验，然后将其安装在多分量力校准装置上进行单轴向加力试验和两个方向同步加力试验。传感器在多分量力校准装置上进行试验时，将其一端固定安装在多分量力校准装置的工作台上，如图 8 所示，针对传感器最大变形位置对应的通道 3 的示值测量结果进行测量分析。



图7 十字形多分量力传感器结构外形



图8 多分量力加载试验现场安装图

首先对在不同校准装置上进行的单轴向加力试验的测量结果进行比较,其各项技术参数分析结果如表2所示,可见其结果一致性优于0.1%,重复性和直线性等其它性能指标的测量结果也基本一致。

通过多分量力校准装置的两个加载器对传感器两个垂直方向的受力端进行加力试验,观察对各通道力值输出结果的影响,从而考察由于传感器变形导致受力轴线偏移而产生的力值控制。表3所示为Z向力对应的测量通道3在不同力值测量点的示值测量结果以及在同步施加X方向不同力值作用时的示值测量结果的分析结果。可见试验过程中当X向的力值不超过Z向最大力值(2 kN)的50%(1 kN)时,其对Z向力值示值产生的耦合误差不超过±0.1%,而两个分量同时施加1.5 kN时,其耦合误差为0.15%。经测量,在变形最大的最后一个测量状态时,传感器通道3对应的沿Z方向的变形为1.026 mm,X方向的变形为1.922 mm。

表2 传感器在不同校准装置上进行单轴向加力的测量结果

标准装置	10 kN 静重式力标准机			多分量力校准装置				
	Z 向力/kN	通道3 示值 / (mV · V <sup>-1</sup> )	重复性/%	线性性/% FS	通道3 示值 / (mV · V <sup>-1</sup> )	重复性/%	线性性/% FS	结果一致性/%
	0.5	0.4963	0.040	-0.023	0.4962	0.000	-0.009	-0.02
	1.0	0.9930	0.040	-0.020	0.9927	0.010	-0.004	-0.03
	1.5	1.4898	0.027	-0.013	1.4890	0.003	-0.011	-0.06
	2.0	1.9867	0.030	0.000	1.9856	0.003	0.000	-0.06

表3 双轴向加力试验传感器测量结果

Z 向力 /kN	X 向力 /kN	通道3 示值 / (mV · V <sup>-1</sup> )	耦合误差 / (mV · V <sup>-1</sup> )	耦合误差/%
0.5	0.0	0.4960	—	—
0.5	0.2	0.4956	-0.0004	-0.08
1.0	0.0	0.9927	—	—
1.0	0.2	0.9927	0.0000	0.00
1.0	0.5	0.9933	0.0005	0.06
1.5	0.0	1.4890	—	—
1.5	0.5	1.4896	0.0006	0.05
1.5	1.0	1.4898	0.0008	0.06
1.5	1.5	1.4912	0.0022	0.15

耦合误差是多分量力传感器的设计制造难点,通常要达到优于1%的水平是很困难的。而以上耦合误差

的各项测量结果均比较理想,这个结果是传感器本身的结构耦合误差与校准装置的结构耦合以及控制误差综合影响的结果。由此可见多分量力的整体工作状态良好,单分量加力和多分量力同步加力时力值复现准确,在侧向位移达到1.9 mm时,装置各项工作状态均正常,量值准确稳定,这也充分证明了挠性连接件在多分量力校准装置中实现了良好的设计功能,达到了满意的效果。

## 6 结束语

多分量力测量仪器的校准是一项重要性、复杂性和难度都较大的工作,因此如何准确并方便的实现也是研究的方向和重点。由于在校准装置中采用了合适结构的挠性连接件,不仅保证了各分量力的准确度,减少了装置自身各分量之间的耦合效应<sup>[6]</sup>,提高了装

置长期使用的可靠性和稳定性，同时也使装置可以方便的应用于不同结构特点、变形特点的各类型多分量力测量仪器的校准工作。挠性连接件应用试验的验证结果也非常满意，因此可以说在多分量力的实现和应用中挠性连接件起到了重要的作用。

参考文献

[1] 秦海峰. 多分量力的测试与校准技术介绍[J]. 计测技术, 2015(3): 14-18.

[2] 齐美胜, 温纪宏, 陈国明, 等. 隔水管挠性接头弹性体刚度特性分析[J]. 石油机械, 2014, 42(8): 71-74.

[3] 杨期江, 李伟光, 赵学智, 等. 挠性支承可倾瓦轴承完整动力学建模及分析[J]. 噪声与振动控制, 2017, 37(6): 7-11.

[4] Qin Haifeng, Liu Yonglu, Zhao Weiyu, et al. The Structure Design of The Calibration Device for Multi-component Force and Torque[J]. IMEKO XXII World Conference Belfast, 2018.

[5] 国家质量监督总局, JJF(军工)20-2012 多分量测力仪校准规范[S]. 2012.

[6] 秦海峰, 王丽, 刘永录. 一种推力球轴承用保持器: 201711325446.1[P]. 2017.

收稿日期: 2018-12-20

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0205002)

作者简介



秦海峰(1975-), 高级工程师, 研究领域包括力值、扭矩、多分量力专业的静态/动态/综合计量测试技术。任全国力值硬度重力计量专业委员会委员, 全国试验机标准化委员会副秘书长, 全国机械振动、冲击与状态检测标准化技术委员会委员, 国家计量标准一级考评员、国防计量标准主

考人。

1997年毕业于吉林大学, 同年到中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所工作至今。主持承担了国家质量基础项目、国防技术基础项目以及民机科研项目等十余项, 在“小力值标准研制”、“多分量力校准装置研制”、“测功装置现场校准技术研究”、“正弦动态力校准技术研究”等领域取得了10余项国家发明专利, 获得集团和省部级科技进步奖多项。负责完成制、修订国家计量检定规程、规范及国防军工计量技术规范十余项, 发表科技论文20余篇, 参与编写技术著作3部。



山东省计量科学研究院国家黄金钻石制品质检中心项目荣获该省科技进步奖二等奖

近日, 山东省科学技术奖励大会在济南市召开, 山东省计量科学研究院国家黄金钻石制品质检中心的珠宝首饰检测关键技术及产业开发项目荣获该省科技进步奖二等奖。

据了解, 珠宝首饰检测关键技术及产业开发项目对钻石、泰山玉等多种珠宝首饰的检测做了系统研究。首次研制开发了测量镶嵌钻石比例的仪器; 研究了钻石颜色测试方法并开发了测量设备; 研究了钻石比例溯源方法, 研制了标准切工样品。创新性地采用计量溯源体系和现代技术取代了传统主观评估法, 确保结果客观准确; 制定了全球首个合成钻石鉴定分级标准, 起草了钻石鉴定、分级和成品评价等系列标准。该项目还首次定义了“泰山玉”玉种并纳入了国家玉石标准体系, 研制了“泰山玉”标准样品, 起草了“泰山玉”地方标准, 促成了泰山玉大产业的形成和发展。开发了多种具有便捷存贮、查询、统计等数据处理功能的珠宝首饰检测系统, 极大提高了效率和数据溯源性, 满足了快速发展的市场需求。强大的技术实力和科研成果支撑行业强劲发展, 促成了珠宝首饰大产业集群。本项目发表论文150篇, 获授权发明专利9项和实用新型专利14项, 软件著作权5项, 出版专著3部, 制定了20项标准, 为珠宝鉴定和品质评价提供了坚实技术支持。

近年来, 国家黄金钻石质检中心围绕检测技术热点难点新疑点下大功夫、逐一突破, 取得了丰富的研究成果, 开发了有自主知识产权的钻石切工比例仪、智能灰吹炉等设备, 创新性地完成10多项研究项目, 在钻石、泰山玉、黄金、彩色宝石等多领域已获得多项发明专利, 获得原质检总局优秀论文一等奖以及山东省计算机优秀成果奖、山东省软科学奖、中国宝玉石行业协会科学技术奖(6项), 也锻造出了一支经验丰富、技术精湛的专业技术队伍, 中心有多名全国首饰标委会委员、全国黄金标委会委员、全国珠宝玉石标委会委员, 并设有山东省黄金珠宝标准化技术委员会。

国家黄金钻石质检中心积极在全国行业平台进行技术分享, 其中包括泰山玉产地特征及检测方法、高纯金测试技术、合成钻石检测技术等, 及时将研究成果以论文、会议研讨等形式公开发表, 10多年来, 国家黄金钻石制品质检中心发表中英文论文近200篇, 其中包括SCI、EI国际著名索引数据库收录期刊以及中文核心期刊论文几十篇, 有力地促进了珠宝产业供给侧结构性改革和新旧动能转换进程。

(摘自 计量测控)