doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2019.06.12

高准确度刚度测量仪结构优化设计

郭萃堃
（中国航空工业集团公司金城南京机电液压工程研究中心，江苏 南京 211106）

摘　要：针对高准确度小变形弹性元件的刚度测量需求，以锥形弹性垫圈弹性试验为例，分析了目前国内通用刚度测量仪在测量高准确度小变形弹性元件刚度时存在的问题，通过分析与试验验证，得出在设计高准确度刚度测量仪时，应避免选用悬臂梁式施力机构和悬臂梁式力值测量器的观点，提出力值测量器和位移测量器分别采用柱式力传感器和激光位移传感器，施力机构采用双立柱的高准确度刚度测量仪设计方案。

关键词：刚度测量仪；弹性元件；小变形
中图分类号：TB93　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674－5795(2019)06－0061－06

Structural Optimization Design of Stiffness Measuring Instrument with High Accuracy

GUO Cuikun
(AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China)

Abstract: Aiming at the stiffness measurement requirements of elastic elements with high accuracy and small deformation, and taking the elastic test of tapered elastic washers as an example, this paper has analyzed the problems existing in the domestic universal stiffness measuring instruments when measuring elastic elements with high accuracy and small deformation. Through analysis, experimental verification and discussion of the selection of the displacement measuring device, we have concluded that when designing the stiffness measuring instrument with high accuracy, the cantilever beam loading mechanism and the cantilever beam load measuring device should be avoided. It is proposed that for a stiffness measuring instrument with high accuracy design scheme, the load measuring device adopts the column force sensor and the displacement measuring device adopts the laser displacement sensor, and the force applying mechanism adopts a double column type.

Key words: stiffness measuring instrument; elastic component; small deformation

0　引言

刚度是指结构和构件在外力作用下抵抗变形(弯曲、拉伸、压缩等)的能力[1]。刚度值可作为零件加工的参考和评判工件性能的依据，是实际工程中极为重要的参数之一。随着科技的发展及对外合作的日益增多，目前通用测量设备的技术状态已不能适应伺服阀中弹簧管、反馈杆等变形量为微米级的高准确度小变形弹性元件的刚度测量需求。以锥形弹性垫圈的弹性试验为例，GB/T 94.4－2017[2]《弹性垫圈技术条件锥形弹性垫圈》中规定：锥形弹性垫圈产生20 μm位移后的残余弹力应达到规定的数值。即弹性试验需测量锥形弹性垫圈所受力值大小与其变形量的关系，也可理解为需测量锥形弹性垫圈的刚度。目前国内通用刚度测量仪由于测量器的分辨力不足、结构布置不适用于小变形测量等原因，不能满足锥形弹性垫圈20 μm变形量的测量需求，故科研生产中亟需能准确测量高准确度小变形的专用刚度测量仪。针对高准确度小变形弹性元件的刚度测量需求，分析目前设备不能准确测量弹性元件小变形的具体原因，对专用刚度测量仪中的结构布置与部件设计进行研究。

1　刚度测量仪力值参数测量问题分析及优化设计

弹簧试验机是进行刚度测试的设备之一，其测量系统普遍采用电阻应变式力传感器作为力值测量器，例如图1中的弹簧试验机采用的悬臂梁式力传感器就是一种电阻应变式力传感器。电阻应变式力传感器在受力时，其弹性敏感元件受力产生变形，同时附着在它上面的电阻应变片也产生变形。电阻应变片的变形表现为电阻值的变化，通过计算可得到被测力值的大小。

1.1　刚度测量仪自身变形对测量结果的影响

电阻应变式力传感器的测量原理决定了其变形是不可避免的，可通过测量相应力值下力传感器的变形

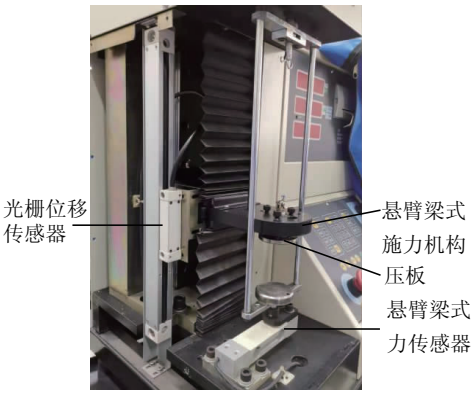

图 1　某型弹簧试验机(刚度测量仪)结构图

量，对位移测量结果进行修正。在力 F 的作用下，横梁的位移量为 x，测得力传感器的变形量为 ξ，则被测件的变形量 $\varepsilon = x - \xi$，被测件的刚度值为

$$K = F/\varepsilon = F/(x - \xi) \tag{1}$$

除测量原理导致的电阻应变式力传感器发生明显变形以外，由于刚度测量仪的其他结构与部件均尽量选择弹性模量较大的材料，以减小刚度测量仪弹性变形，故在实际试验中，刚度测量仪的其他结构与部件不会产生明显的弯曲变形。但由于装配间隙的影响或部件受力后发生弹性变形等不可避免的原因，在测量过程中刚度测量仪自身也会发生变形，因此仅对力值测量器的变形量进行修正是不足够的，还需对刚度测量结果进行适当的补偿。GB/T 94.4 附录 B 中给出了对弹性试验测量装置的变形进行适当补偿的措施，分别测得总特性曲线与测量装置特性曲线，两者相减得到弹性垫圈的特性曲线。

通过对刚度测量仪的变形进行适当补偿，可尽量减小刚度测量仪自身变形对测量结果的影响，但前提应是在测量弹性元件时，刚度测量仪虽有微量变形，但与弹性元件接触的压板必须始终保持平行，否则将导致弹性元件在测量时的受力状态与其在工作中的受力状态不一致，这种差异造成的影响是补偿修正难以解决的。

1.1.1　有限元分析

为了研究悬臂梁式施力机构和力值测量器受力发生变形对压板与底板平行度的影响，本文对其进行了有限元分析。首先使用 NX 系统建立施力机构和力值测量器模型并进行装配，然后在高级仿真中通过约束命令将横梁与压板联结，划分网格并输入材料特性后，分别在压板和底板上施加作用力进行仿真求解，结果如图 2 所示。

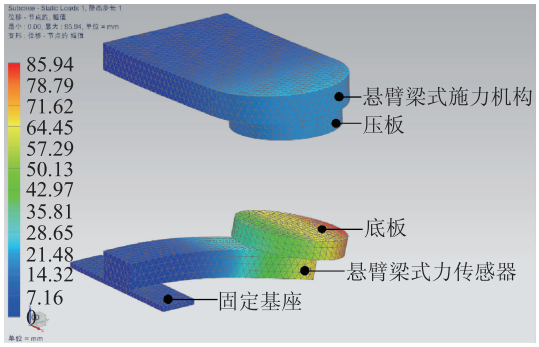

图 2　受力分析位移云图

从图 2 中可以看出，在被测件的反作用力作用下，施力机构和力传感器均有弯曲的趋势，相对于施力机构，力传感器因其材料及结构的原因会有更大幅度的弯曲趋势。

1.1.2　试验验证

选用最大试验力分别为 100 N 和 50 N 的两台刚度测量仪和最大试验力为 100 N 的双立柱施力机构试验装置，分别验证悬臂梁式力传感器、悬臂梁式施力机构、双立柱施力机构与柱式力传感器的受力变形对压板倾斜状态的影响，刚度测量仪与试验装置简图如图 3 所示。试验时，在压板中心分别模拟施加力值为刚度测量仪或试验装置最大试验力 20%，50%，80% 的力，力的方向垂直向上，测量出压板或施力机构不同测量点的相应位移变化量。

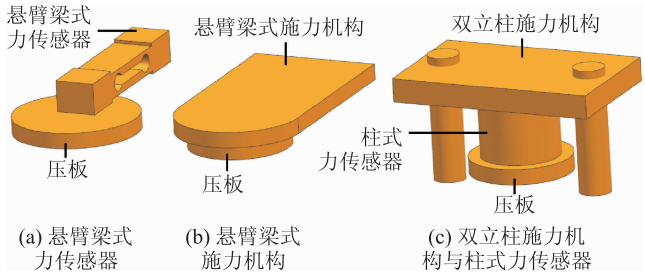

图 3　三种刚度测量仪与试验装置简图

1)试验一：悬臂梁式力传感器下压板前、后端位移量测量

选用最大试验力为 100 N 的刚度测量仪，其力值测量器为悬臂梁式力传感器，如图 3(a)所示，压板位于悬臂梁式力传感器的下方，直径为 98 mm，通过测量压板前、后端(前端指远离刚度测量仪的一端，后端指靠近刚度测量仪的一端，下同)的位移量判断悬臂梁式力传感器受力时的弯曲状态，测量结果如图 4 所示。

根据图 4 可以看出，在大小相等的加载力作用下，

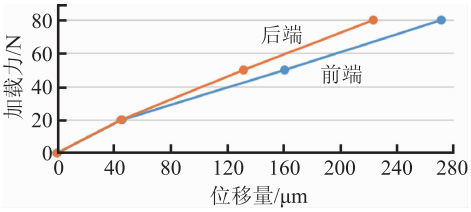

图 4　100 N 悬臂梁式力传感器下压板前、后端位移量散点图

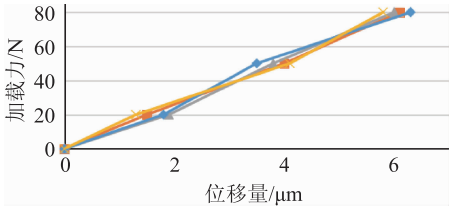

图 6　100 N 柱式力传感器下压板四周位移量散点图

压板前端比压板后端位移量更大；随着加载力的增大，压板前、后端位移量也增大，且压板前端位移变化率大于压板后端位移变化率；当加载力为力传感器最大试验力的 80% 时，压板前、后端位移量相差 48 μm，表明悬臂梁式力传感器受力弯曲会造成压板倾斜。

2)试验二：悬臂梁式施力机构前、后端位移量测量

选用最大试验力为 50 N 的刚度测量仪，其结构图如图 1 所示。试验关键部件简图如图 3(b)所示，压板位于悬臂梁式施力机构的下方，通过测量悬臂梁式施力机构前、后端(相距 98 mm)的位移量判断悬臂梁式施力机构受力时的弯曲状态，测量结果如图 5 所示。

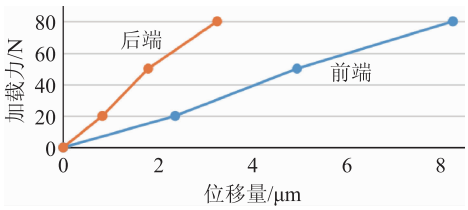

图 5　悬臂梁式施力机构前、后端位移量散点图

与试验一中悬臂梁式力传感器下方压板前、后端的位移量相比，试验二中悬臂梁式施力机构的前、后端位移量较小，在加载力达到最大试验力的 80% 时，悬臂梁式施力机构的前、后端位移量相差 5.5 μm，虽远小于试验一中悬臂梁式力传感器的变形量，但仍会在一定程度上造成压板倾斜。

3)试验三：100 N 柱式力传感器下压板四周位移量测量

选用双立柱施力机构试验装置，其最大试验力为 100 N，力值测量器为柱式力传感器，如图 3(c)所示，Φ98 mm 的压板位于柱式力传感器的下方，通过测量压板圆周上前、后、左、右四个测量点的位移量，判断双立柱施力机构与柱式力传感器受力时的变形状态，测量结果如图 6 所示。

双立柱施力机构试验装置使用柱式力传感器作为力值测量器时，压板四周测量点位移量基本一致，在同一加载力作用下各测量点的位移量相差不超过 1 μm；当加载力为力传感器最大试验力的 80% 时，压板最大位移量为 6.3 μm。以上数据表明柱式力传感器与双立柱施力机构配合能较好地保证压板的平行状态。

1.1.3　试验结论

由试验一和试验二中压板的前、后端位移数据可以看出，随着加载力的增大，压板前、后端位移变化率之差增大，这将导致压板和底板的轴线与被测件轴线不平行。虽然在宏观上压板和底板仍与被测件紧密接触，但悬臂梁式的施力机构和力值测量器微米级的变形会使压板和底板具有倾斜趋势，这将导致被测件的表面受力不均，在此情况下被测件的受力状态与其在工作中的受力状态会存在明显差异。以锥形弹性垫圈为例，在工作中，弹性垫圈受螺母平行下压的作用力；在进行弹性试验时，压板和底板有倾斜的趋势，使得弹性垫圈表面受力不均，即使在试验后利用弹性特性曲线对测量装置的变形进行补偿，得出的试验结果也会与真值存在一定的差异，不能准确反映弹性垫圈的技术性能。

1.2　刚度测量仪力值参数测量方案优化设计

由上述试验可知，在设计高准确度刚度测量仪时，应避免选用悬臂梁式的施力机构和力值测量器，以避免因其受力弯曲形变量较大影响测量结果的准确度。建议高准确度刚度测量仪在设计时采用试验三中的柱式力传感器，柱式力传感器上下表面均为圆面，通过螺纹连接保证与压板的同轴度，配合双立柱施力机构，可实现被测件表面均匀受力，从最大程度上保证被测件的受力状态与其工作中的受力状态一致，提高刚度测量仪测量结果的准确度。

2　刚度测量仪位移参数测量问题分析及优化设计

刚度测量仪能否准确测量弹性元件小变形还与位移测量器相关。GB/T 94.4 对装置中位移测量器的描述为“千分表、感应位移测量器，或其他位移测量仪器”，下面依据锥形弹性垫圈弹性试验的技术要求，分

析千分表是否适用于测量锥形弹性垫圈的变形量，并以此为例对高准确度小变形弹性元件的刚度测量实验中位移测量器的选型进行探究。

2.1　千分表的适用性及误差分析

刚度是零件所受力值与对应变形量的比值，被测弹性元件的变形量越小，对刚度测量仪的位移测量器分辨力要求越高。GB/T 94.4 要求，“千分表、感应位移传感器，或其他位移测量仪器仅可有重复误差，任何部位测量，40 μm 测量范围内测量误差不超过 1 μm”。国家计量检定规程 JJG 34 – 2008[3]《指示表》对千分表的计量性能要求作出规定：如表 1 所示，分度值为 0.001 mm(1 μm)的指针式指示表在任意 50 μm 的最大允许误差为 2 μm；分辨力为 0.001 mm(1 μm)的数显式指示表在任意 20 μm 的最大允许误差为 2 μm，即无论是指针式还是数显式的千分表都不能满足弹性试验中“任何部位测量，40 μm 测量范围内测量误差不超过 1 μm”的技术要求。

表 1　指针式与数显式指示表的最大允许误差与最大测量力

类型	分度值/mm	分辨力/mm	测量范围上限 S/mm	最大允许误差	最大测量力/N
指针式	0.001	/	$S\leqslant 1$	任意 50 μm 内 2 μm	1.5
数显式	/	0.001	$S\leqslant 1$	任意 20 μm 内 2 μm	2.0

另外，若如图 7 中 GB/T 94.4 附录 A 测量装置所示，采用千分表作为位移测量器，其测头与力值测量器通过压板相互作用，试验时力值测量器不但受到锥形弹性垫圈的反作用力，还会受到千分表的测量力作用。当规格为 4 mm 的锥形弹性垫圈的最小残余弹力为 1.4 kN 时，千分表的测量力将对力值测量结果造成约 0.14% 的误差影响。

综上，位移测量方面，千分表的最大允许误差不能满足 GB/T 94.4 中弹性试验的技术要求；力值测量方面，力值测量器的测量结果会受千分表测量力的影响，故千分表并不适用于测量锥形弹性垫圈的变形量。

2.2　位移测量器的选型

考虑到位移测量器与测量机构(如压板)的直接接触可能会影响力值测量的准确度，在进行位移测量器选型时，应尽量选择与测量机构无接触的非接触式位移测量器。与接触式位移测量器相比，非接触式位移测量器具有对被测物的材料(硬度)无要求、测量速度快、易于安装等优点[4]。因此接触式位移测量器不是高准确度小变形弹性元件刚度测量仪的最佳选择，应优选非接触式位移测量器。

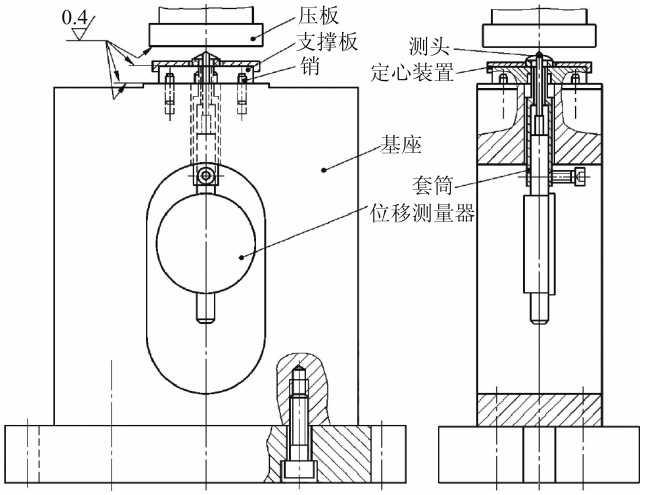

图 7　GB/T 94.4 附录 A 测量装置示例[2]

目前常用于小位移测量的非接触式位移测量器主要有电容式、电涡流式、激光式、超声波式、霍尔式位移传感器。电容式位移传感器的测量准确度较高，且灵敏度高、稳定性好[5]，但对于测量环境的要求也较高，要求测量环境洁净、干燥，否则传感器探头和被测物体之间的物质介电常数的变化会影响测量结果。电涡流位移传感器体积小，动态响应好，能够在恶劣条件下工作[6]，但其应用条件是要求被测物必须为导体，通用性不佳。霍尔位移传感器[7]测量易受外界磁场影响，在进行测量装置结构布置时需使其远离电线，不便于刚度测量仪的结构设计及实际应用。激光式和超声波式位移传感器的测量原理相似，均是利用激光回波原理，实现位移的测量，激光式位移传感器比超声波式位移传感器测量准确度更高，但易受外界杂光干扰，可通过安装防光罩阻挡外界杂光，保障其稳定可靠工作。

通过对各式传感器的测量原理及使用要求进行比较，最终考虑采用激光位移传感器。激光位移传感器是一种非接触式的高准确度位移测量仪器，其分辨力可达 0.1 μm，满足弹性试验的技术要求，可精确测量物体的变形量，具有结构简单、测量准确度高、抗干扰能力强、测量速度快等优点，被广泛应用于较小距离的精密测量。

2.3　位移测量器布置设计

为了准确测量出弹性元件的小变形，在刚度测量

仪结构布置设计时应充分考虑刚度测量仪与位移测量器的配合，以达到最优的使用效果。下面以锥形弹性垫圈弹性试验的测量装置为例，分析采用激光位移传感器作为位移测量器时的结构布置设计。

2.3.1 基座中心孔尺寸选择

从实用性方面考虑，该装置应满足不同规格的锥形弹性垫圈的测量需求。按照 GB/T 956.3—2017[8]《锥形弹性垫圈》中对锥形弹性垫圈型式尺寸的规定，在试验中选择规格最小的锥形弹性垫圈，其内径 d_1 = 4.30 mm，外径 d_2 = 9 mm。为了适应小规格弹性元件的刚度测量，测量装置基座上的中心孔直径应尽量减小。较小的基座中心孔直径能够提高测量装置的整体刚度，避免基座受力变形引入测量误差。

2.3.2 安装可调节激光位移传感器初始位置的高度调节装置

GB/T 94.4 弹性试验中规格最小的锥形弹性垫圈高度 h = 0.5 mm，规格最大的锥形弹性垫圈高度 h = 9.2 mm，不同规格的锥形弹性垫圈高度相差较大，为使激光位移传感器在一定范围内适应各规格弹性元件的测量，可在激光位移传感器下方设置一高度调节装置以调节其初始位置，使激光位移传感器的测量范围涵盖弹性元件的压缩量，如图 7 所示。高度调节装置可采用成本较低的普通螺纹副加锁紧装置，是较为经济的选择；如有必要也可采用伺服电机加滚珠丝杠以实现自动精准调节。

2.3.3 安装压板延长杆

若不考虑基座的阻挡，为了使激光位移传感器的显示值为压板位移量即弹性元件压缩量，激光位移传感器的采集点应位于压板下端的中心。但由于受基座中心孔尺寸的限制，激光位移传感器的工作线路会被基座阻挡，无法将压板下端的中心点作为位移采集点。为保证激光位移传感器的显示值尽量接近弹性元件的被压缩量真值，可在压板下方以螺纹连接的方式安装压板延长杆，如图 8 所示，激光位移传感器的位移采集点位于延长杆下端的中心。延长杆与被测件无接触，当压板向下移动时，弹性元件被压缩，延长杆与压板同步向下移动，延长杆位移量与弹性元件被压缩量相等。

2.3.4 使用螺钉联结支承板与基座

GB/T 94.4 推荐的测量装置使用了四个圆柱销，由于圆柱销只有定位作用，缺少将支承板和基座紧密连接的预紧力，支承板和基座之间容易产生间隙，测量时容易收到气膜或灰尘的影响。建议将圆柱销换成螺钉，以确保支承板与基座可靠联接，避免支撑板和基座间的间隙对测量结果造成影响。

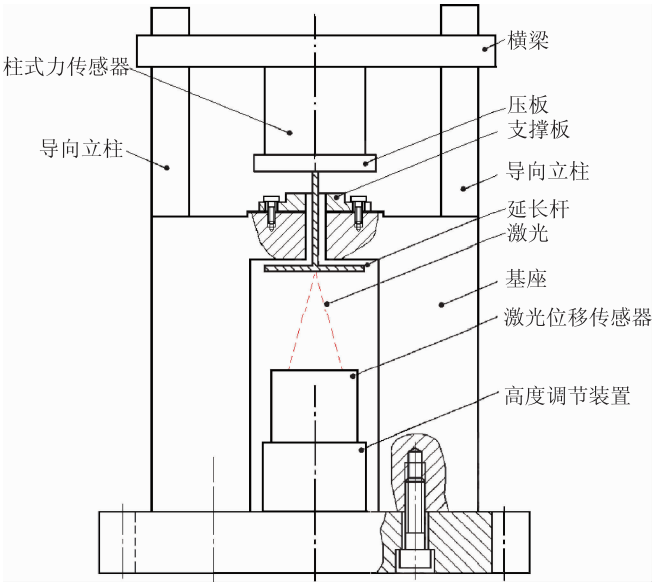

图 8　高准确度刚度测量仪结构设计示意图

2.3.5 安装可防尘、挡光的外罩

考虑到激光位移传感器的缺点为易受外界杂光干扰，在设计刚度测量仪时应考虑在刚度测量仪外侧安装起防尘、挡光作用的外罩，避免空气中灰尘及外界杂光影响激光位移传感器工作。

3　结论

针对目前国内的通用刚度测量设备由于部件结构设计不适用于变形量为微米级的小变形弹性元件刚度测量，以及在测量小变形时位移测量器的分辨力不足的问题，提出高准确度刚度测量仪优化设计方案：

1）在设计高准确度刚度测量仪时，应避免选用悬臂梁式的施力机构和力值测量器，以防其受力变形使被测件的受力状态与其在工作中的受力状态不一致，可选用柱式力传感器作为测量器，配合双立柱施力机构实现力值测量。

2）GB/T 94.4 推荐的千分表的分辨力不能满足锥形弹性垫圈弹性试验中的技术要求，应采用具有较高分辨力的非接触式位移测量器，如激光位移传感器，配合高度调整装置与压板延长杆等部件，以满足高准确度小变形弹性元件的刚度测试需求。

参 考 文 献

[1] 屈本宁，张曙红．工程力学(第二版)[M]．北京：科学出版社，2016.

[2] GB/T 94.4—2017 弹性垫圈技术条件锥形弹性垫圈[S]. 北京：中国标准出版社，2017.
[3] JJG 34—2008 指示表(指针式、数显式)检定规程[S]. 北京：中国质检出版社，2017.
[4] 申卫兵. 基于无位置无刷直流电机为动力的新型定位总成的研究[D]. 西安：西安石油大学，2013.
[5] 周文祥. 单极式高频响电容位移传感器关键技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.
[6] 汪明. 磁悬浮式人工心脏中的电涡流位移传感器优化设计[D]. 苏州：苏州大学，2016.
[7] 俞云强. 传感器与检测技术[M]. 北京：高等教育出版社，2013.
[8] GB/T 956.3—2017 锥形弹性垫圈[S]. 北京：中国标准出版社，2017.

收稿日期：2019－09－02；**修回日期**：2019－09－11

作 者 简 介

郭萃堃(1995－)，女，广东江门人，中国航空研究院 609 研究所在读硕士研究生，研究方向为力学计量与测试。

(广告)

欢迎订阅《化学分析计量》

邮发代号 24－138

《化学分析计量》为国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物，双月刊，大 16 开本，单月 20 日出版。国际刊号：ISSN 1008－6145，国内刊号：CN37－1315/O6。《化学分析计量》是中国科技核心期刊、美国《化学文摘》(CA)千种表收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊，中国石油和化工行业优秀期刊、中国兵器工业优秀期刊、山东省优秀期刊。您可通过邮局或银行汇款向《化学分析计量》杂志社办理订阅手续，欲订阅过刊或合订本、合订本光盘的读者直接向杂志社订阅。

地址：山东省济南市 108 信箱杂志社 邮编：250031 电话：(0531)85878132，85878224，85878148

E－mail：anameter@126.com 投稿网址：www.cam1992.net

《化学分析计量》2019 年第 6 期目次

标准物质

液相色谱－同位素稀释质谱法测定婴幼儿配方奶粉中黄曲霉毒素 M_1

尿沉渣白细胞标准物质研制

分析测试

惰性熔融－红外吸收/热导法测定高铍铍铝合金中氧氮

不同底气中微量 CO，CO_2 和 CH_4 的定量分析

基于电感耦合等离子体高纯镁基氧化物中共存元素光谱特征

分光光度法测定工业水中的酚酞碱度

超高效液相色谱－串联质谱法测定食用肉制品中游离谷氨酸及其盐

微波消解－电感耦合等离子体质谱法同时测定垃圾渗滤液中 8 种生物毒性元素

电感耦合等离子体质谱法同时测定药用辅料山梨醇中的铅和镍

高效阴离子交换色谱－脉冲安培法测定生态养护抑菌凝胶中的褐藻寡糖

电感耦合等离子体原子发射光谱法同时测定不锈钢中的 11 种元素

顶空－气相色谱法测定水中 7 种苯系物

超高效液相色谱－串联质谱法测定食用油中 16 种真菌毒素

电感耦合等离子体质谱法测定苦瓜药材中 16 种无机元素

高效液相色谱法快速测定七叶神安片中的人参皂苷 Rb3

高效液相色谱法测定 3－甲氧基－4－羟基苄胺盐酸盐

气相色谱－质谱法测定轨道交通塑料产品中 18 种有害物质

QuEChERS－气相色谱法测定地表水中氯丹和硫丹

气相分子吸收光谱法快速测定土壤中亚硝酸盐氮

火焰原子吸收分光光度法测定铅精矿中高含量银

超声辅助浸提－紫外分光光度法测定酸枣中黄酮

流动注射在线分析法检测海水中氨氮

UGPLC－Q－TOF－MS 法快速检测牛奶中 21 种磺胺类药物

气相色谱法测定工业废气中氯化氰

天然气中硫化氢测定结果的精密度

仪器设备

酶联免疫法草甘膦自动检测仪的研制

用于光催化还原 CO_2 产物分析的色谱分离系统设计

计量技术

石油产品酸值测定仪校准方法

综述

锗化学分析技术研究进展

气相色谱－串联质谱技术在环境监测中的应用进展

电感耦合等离子体发射光谱法测定高纯稀散金属中杂质元素研究进展