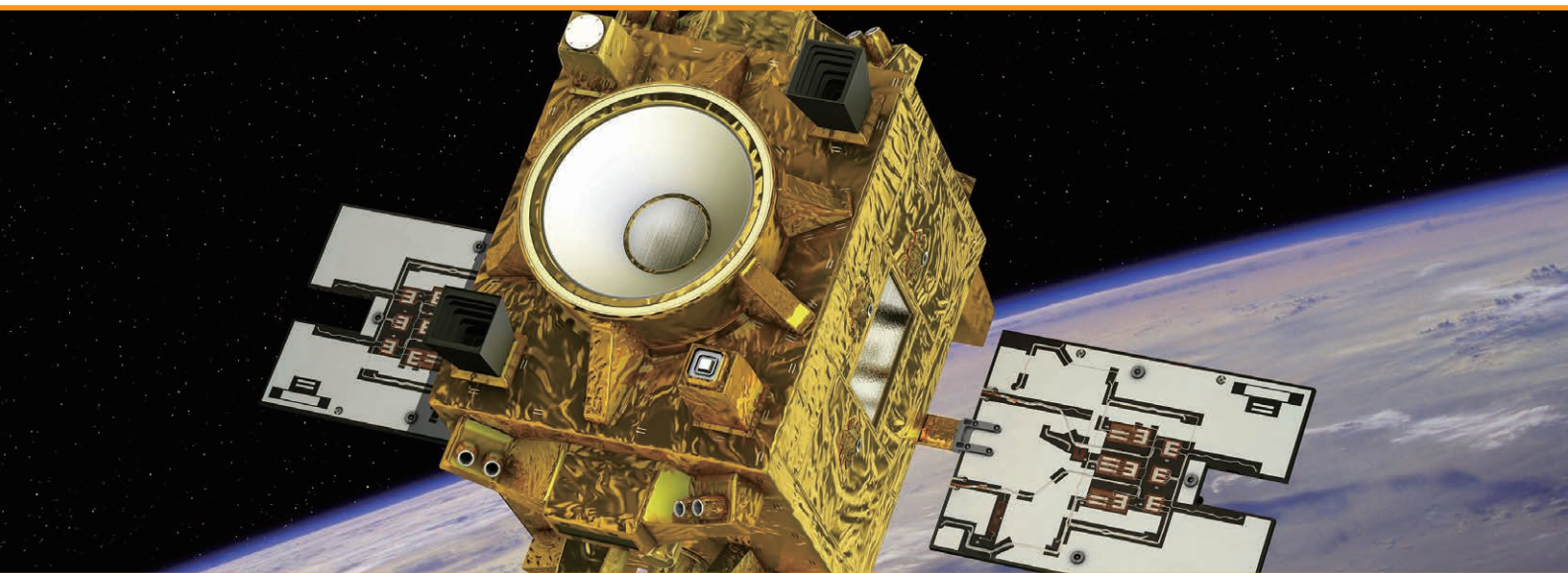


雷尼绍工业测头助力空间研究

**客户：**

德国国家计量研究院 (PTB)

行业：

科学研究与分析

挑战：

为欧盟的MICROSCOPE空间实验任务制造精度达到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 至 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的圆柱形检测质量块。

解决方案：

使用雷尼绍OMP400高精度测头进行可重复、精确的序中测量控制。

随着人类对地球上最小粒子的理论认知有了新的发展，一些物理学家现在开始对惯性和引力质量的等效原理提出质疑。为了验证这些新的猜想是否正确，位于不伦瑞克的德国国家计量研究院 (PTB) 的生产专家们开发出了圆柱形检测质量块，这些质量块的所有几何特征的加工精度均达到了 $2\text{ }\mu\text{m}$ 至 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。这一工程成就的实现，则要归功于来自Benzinger的高精度车床与来自雷尼绍的OMP400测头的有机结合。

对工程师来说，如今生产精度达到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 至 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的零件已经不是什么难事了。但是，作为PTB表面计量工作组的项目主管兼经理，Daniel Hagedorn博士发现目前的加工技术仍存在一些局限性：“我们现有的机器能够在一或两个方向上毫无困难地实现 $2\text{ }\mu\text{m}$ 至 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的定位精

度，但对于我们的检测质量块，我们需要在整个三维空间达到这一高精度——不仅是在每个具体位置，还包括各个平面、圆柱表面和角度”。

PTB受委托为法国国家空间研究中心 (CNES) 生产十个圆柱形检测质量块，这些质量块将用在CNES发射的一颗名为MICROSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence) 的300 kg重的小卫星上。CNES将与包括欧洲航天局在内的其他合作伙伴一起，利用MICROSCOPE卫星检验等效原理的普适性。这些质量块每个大约长80 mm；较大圆柱的外径为70 mm，而较小圆柱的外径只有35 mm。

这些圆柱采用铂铑合金 (PtRh10) 和钛铝钒合金 (TiAl4V6) 制成，以同心方式放入差分加速度计内用于

正如我们所计划的那样，我们能够对所有几何特征实现 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 的加工精度。这种高精度加工产生的结果，可能会对科学家们是否需要重新思考公认的物理学定律带来重大影响。雷尼绍OMP400测头的精度与可靠性是我们成功的一个关键因素。

德国国家计量研究院 (德国)



富有成效的项目团队（从左至右）：来自PTB科学仪器设计部的Stephan Metschke、Daniel Hagedorn博士和Heinz-Peter Heyne，来自雷尼绍的区域销售经理Shahram Essam

检测。这种配置可确保两个圆柱的惯性矩位于同一轴上。PtRh10圆柱作为参照，然后对由不同材料制成的其他圆柱进行加速度测量实验，以验证在测量精度达10-15 μm 时惯性和引力质量的等效原理是否依然成立。

在单一、不间断制程中完成从坯件到成品的全过程制造

按照要求的精度水平制造检测质量块是一个巨大的挑战。在生产开始之前，工程师们首先需要对执行该任务的刀具进行优化。如果采用传统刀具，在对铂铑合金工件进行表面加工时，特别容易出现磨粒磨损现象，这将导致零件的表面光滑度无法达到预期要求。为此，工程师们选择了经特殊耐蚀处理的金刚石刀具；试制结果证明，这类刀具能够可靠地加工出高光滑度的零件表面，其精度优于0.2 μm 。

然而，PTB的科学仪器设计团队的成员Heinz-Peter Heyne和Stephan Metschke很快又意识到，只有不间断地一次性完成整个制造过程（不能中途取下和重新固定工件），精度水平才能达到最初的设计要求。因此，他们选择在Benzinger的高精度TNI Preciline车床上加工这些空心圆柱。在每个质量块加工完成后，他们又在将其从车床上取下之前测量了各个关键位置的尺寸，结果发现，尽管采用了高精度夹具装置且团队的操作非常谨慎，但是在重复加工的过程中仍出现了最高达0.01 mm的明显偏差。

为了使整个制程的精度达到所要求的水平，PTB的专家们需要将高精度测量功能直接集成到加工过程中，这样做的主要目的，则是消除当分别确定加工过程和测量过程的起始位置时，相互之间可能会产生的不确定性和不准确性。为此，Hagedorn博士测试了来自不同供应商的多套工业测量解决方案。

他重点比较和评估了测量结果的精度和重复性。“我们的结论是，唯一能够满足这些标准的解决方案是像雷尼绍OMP400这样的高精度测头，”他总结道。

OMP400测头经验证可实现1 μm 的精度

OMP400测头采用基于应变片技术的测量系统。该测头能够对最轻微的触发力作出反应，其测量精度不受测针复位力的影响；同时它最大限度地消除了测量时常见的滞后现象——能够轻松实现小于5 μm 的精度。特殊的测量程序可防止由于测头过快地接触表面而产生不准确的数据。如果软件检测到因测头振动所引起的干扰，它将命令测头停止接触工件或不会记录测量值。正如Heinz-Peter Heyne所了解的那样，只有在以适当的速度接近测量位置时，测头才能获得可靠的测量结果。通过将这项技术与其他几种测量方法相结合，他能够可靠地将测头的测量重复精度保持在1 μm 的范围内。

测头将记录的测量数据以光学方式（即无需电缆）传输至车床工作区域内的接收器。车床数控系统通过接口接收该信息，将其用于控制和调整正在进行的测量过

程。此外，PTB团队还开发了一套特殊软件，能够让他们将测量结果同时传输到一台服务器中，以便对数据进行评估和存档。

PTB的专家们使用了一系列复杂的验证过程来检验OMP400测头和高精度车床组合的最终加工效果。在加工了多个轮廓后，他们在机床和坐标测量机上分别测量了结果。同时，他们还使用测头在加工机床上测量了经过标定的参考工件，并在外部坐标测量机上也测量了该工件。团队将所有的测量结果进行比较以获取补偿数据，当车床加工轮廓时，以及在工作区域内使用OMP400执行测量时，这些数据可用于更新该高精度车床的数控系统。

通过将多个工件的机内测量结果与来自坐标测量机的测量结果进行比较可以证明，如果按照此种方式对测头进行标定，并将补偿数据应用到车床加工顺序中的测量过程中（原位、序中测量），则可实现1 μm 以内的测量精度。

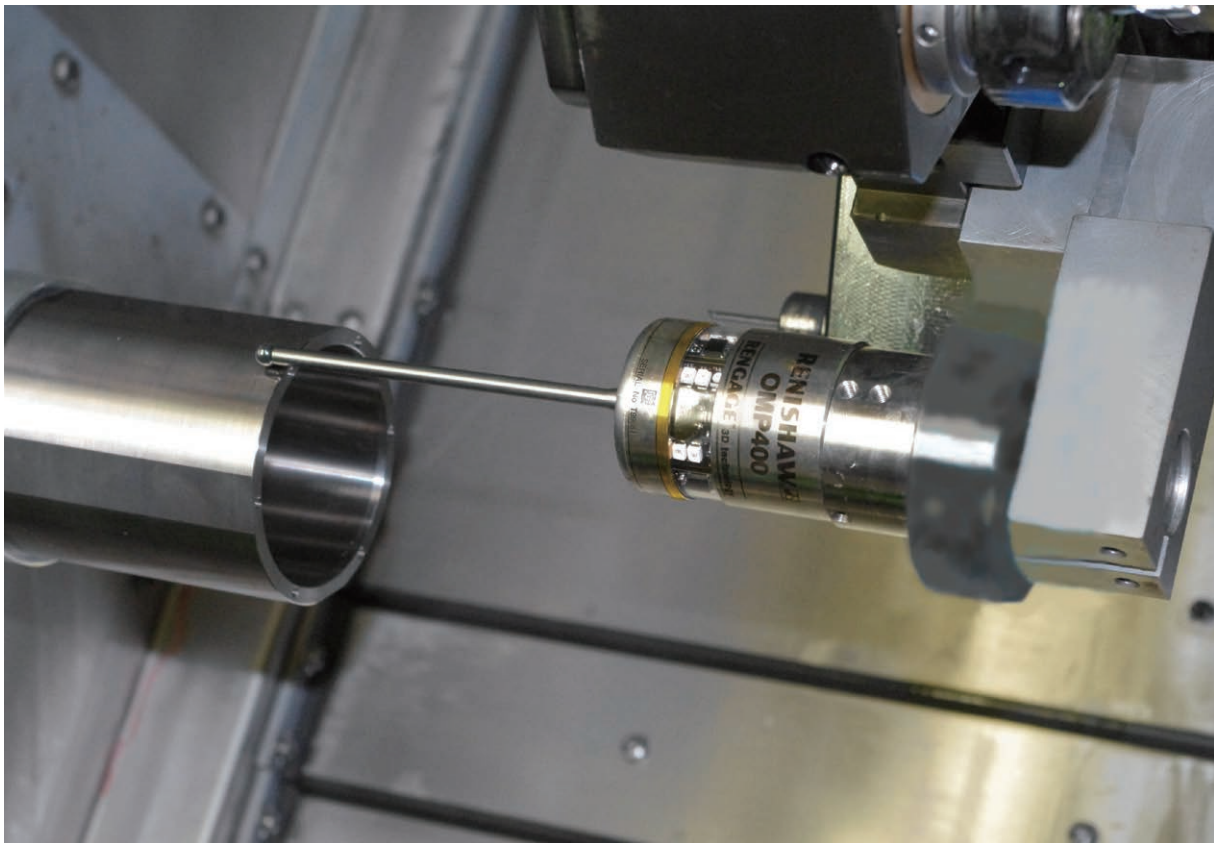
为了测量圆度和直径，对于每个质量块，测头记录了超过三十个圆周测量点的数据。对于圆柱度，也按照类似模式进行测量，即在整个圆柱长度上取五组圆

周测量结果。而测量圆柱正面的六个球状压痕则最具挑战性，在将圆柱放入差分加速度计中时，这些压痕可用作支承点。压痕的最大直径仅为1.2 mm，为此Heinz-Peter Heyne专门使用了一款测球直径仅为0.3 mm的特殊硅基陶瓷测针。

对多个加工步骤进行迭代以实现 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的精度

在生产了多个用于试验和比较的样件后，Heinz-Peter Heyne利用迭代过程以Pt-Rh和TiAl4V6为材料制造出最终的检测质量块。他首先在高精度车床上分多个制程完成工件的粗加工，此时工件外径的尺寸超出规格约0.01 mm。接下来，在使用OMP400测头采集和记录测量结果后，他将工件加工成最终尺寸。Hagedorn博士自豪地宣布，该方法首次尝试就获得了成功：“正如我们所计划的那样，我们能够对所有几何特征实现 $\pm 1 \mu\text{m}$ 的加工精度。

雷尼绍OMP400测头的精度与可靠性是我们成功的一个关键因素。鉴于我们的铂铑合金原材料的成本就需数万欧元，我们对这一结果感到非常满意，”他总结道。



OMP400测头使用特殊的测量程序来测量检测质量块内外表面的圆度和圆柱度

等效原理

早在1636年，自然科学家伽利略 (Galileo Galilei) 就宣称，惯性质量和引力质量始终相等。这一理论几乎成为至今依然适用的所有物理学理论的基础，包括爱因斯坦的相对论。

该理论指出，引力场对物体施加的作用，无法与加速运动产生的效果区分开来。或者简单来说，在真空环境（消除空气阻力的影响）中，一块铅和一根羽毛从开始加速起直到落地所用的时间是相同的。

然而，对地球上最小粒子的最新研究结果表明，如果在足够高的精度下观测（尺度小于 10^{-12} μm），则等效原理可能不再适用。欧盟的MICROSCOPE空间实验任务的目的便是澄清这些问题。在远离“地球”干扰的外层空间，将两个已知其确切尺寸且由不同密度的材料制成的质量块抛入零重力、高真空的太空环境中。高精度加速度计将测量它们的相对运动。位于不伦瑞克的PTB为这次实验制造了圆柱形质量块。

由于制造过程具有极高的精度——圆柱体所有相邻表面的尺寸、均匀度、（共）圆柱度、平行度以及倾斜度的精度均可达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 至 $2\text{ }\mu\text{m}$ ——因此质量块的尺寸精度可确定达到 $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ 。结果便是太空实验室的物理学家们能够在这些极高的精度水平上测量不同圆柱体对加速力的反应，如果他们能够观察到差异，那么这一实验必定会在固体物理学领域引发一场思想革命。



用于在MICROSCOPE卫星上执行实验任务的测量圆柱制造精度达 $1\text{ }\mu\text{m}$

详情请访问 www.renishaw.com.cn/ptb

雷尼绍（上海）贸易有限公司
中国上海市静安区江场三路288号
18幢楼1楼
200436

T +86 21 6180 6416
F +86 21 6180 6418
E shanghai@renishaw.com
www.renishaw.com.cn

如需查询全球联系方式，请访问 www.renishaw.com.cn/contact



扫描关注雷尼绍官方微信

RENISHAW已尽力确保发布之日此文档的内容准确无误，但对其内容不做任何担保或陈述。RENISHAW不承担任何由本文档中的不准确之处以及无论什么原因所引发的问题的相关责任。

©2017 Renishaw plc. 版权所有。

Renishaw保留更改产品规格的权利，恕不另行通知。

RENISHAW标识中使用的**RENISHAW**和测头图案为Renishaw plc在英国及其他国家或地区的注册商标。

apply innovation及Renishaw其他产品和技术的名称与标识为Renishaw plc或其子公司的商标。

本文档中使用的所有其他品牌名称和名称均为其各自所有者的商品名、商标或注册商标。



H - 5650 - 3424 - 01

文档编号: H-5650-3424-01-A

发布: 2017.11