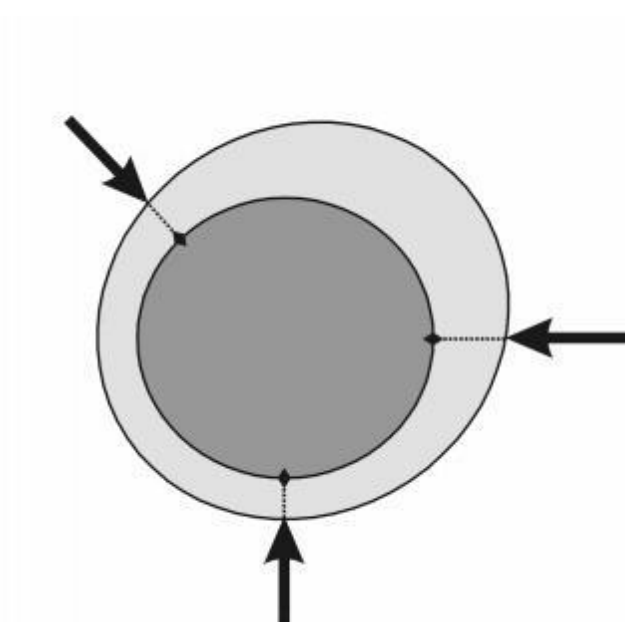


涂层厚度测量

——涂层测厚仪

基于磁感应和涡流原理的无损检测



需知事项及特殊测量案例信息

涂层测厚仪系列:

Surfix[®]、Surfix[®] S、Surfix[®] EX、Surfix[®] SX、
Surfix[®] Pro S及Pocket-Surfix[®]、Surfix[®] easy和油漆检查

德国科隆 PHYNIX 有限责任公司

作者: Dipl. Ing. Hans F. Nix

2026年第一期更新



老款

Surfix® Pro S , 顶级涂层厚度测量仪
配备可更换探头



SURFIX PRO X-FN1.5

新款



老款

Surfix® 、 Surfix® S 、 Surfix® EX 、 Surfix® SX
通用涂层厚度测量仪
配备有外部组合探头
其工作原理依据磁感应和电涡流进行操作



SURFIX SX-FN1.5

新款



老款

Pocket-Surfix® , 便携式涂层厚度测量仪
兼具实用尺寸与完整功能范围



新款



老款

Surfix® easy I , 一款简易型涂层厚度测量仪
操作简便、测量量程范围广



新款



PaintCheck , 具有 PHYNIX 质量的
油漆层厚度测量仪



PHYNIX 
SENSORTECHNIK

德国PHYNIX涂层测厚仪
表面测量精密科技
源于专家，用于专家

PHYNIX – 德国制造

我们的仪器全部产自德国，且全部按照最高质量要求生产。

所以我们的仪器 提供精确的测量结果，
很长的使用寿命及多样化的选择。



www.phynix.com

BY EXPERTS FOR EXPERTS
COATING THICKNESS MEASUREMENT · CROSS HATCH CUTTING

前言

本文献包含关于使用磁感应和电涡流原理测量涂层厚度的重要建议，以及您可应用在所提及的Surfix[®]涂层测厚仪上的特殊说明和实用技巧。

该文献包含了适用于所有采用上述技术的测量仪器的通用有效规定，以及关于Surfix[®]测厚仪理想使用的额外特殊提示。如果能够阅读并理解相应的使用手册中的内容，将是一个很大的优势。

在不同章节中重复说明某些操作步骤是不可避免的，尤其是在校准方面。作者特别强调，要实现Surfix[®]测量仪的广泛通用性，关键在于确保其校准的准确无误。然而，大多数涉及Surfix[®]仪器的应用场景都属于标准情况，无需单独进行校准。各章节内容大多独立成章，这样读者可以跳过不感兴趣的章节，也不会影响整体理解。

关于作者：

Dipl. Ing. Hans F. Nix工程师拥有工程学博士学位，主修电气工程，四十余年来专注于涂层测厚仪研发及客户咨询。他已就涂层测厚技术及相关领域（如表面粗糙度测量与孔隙检测）发表百余场专题演讲。

Dipl. Ing. Hans F. Nix工程师是德国科隆 PHYNIX 有限责任公司（PHYNIX GmbH & Co. KG）的创始人，该公司专注于涂层测厚仪的研发与生产，以及表面检测设备的销售业务。

2012年3月，科隆

© 2012 PHYNIX 有限责任公司版权所有

受版权保护的材料。任何形式的内容复制或再利用，即使仅使用部分内容，也均需获得 PHYNIX GmbH&Co. KG（有限责任公司）的明确许可。

德国PHYNIX涂层测厚仪
表面测量仪器及其他
每一种应用都能找到合适的仪器



仪器

- + 客户友好
- + 直观的用户提示
- + 超高的测量精度
- + 内部电子监控
- + 多语言操作界面

行业

- + 汽车
- + 造船和铁路
- + 航天和航空
- + 化工
- + 铝材加工
- + 镀锌和阳极处理
- + 粉末涂料
- + 技术检验机构
- + 实验室和研发机构

配件

- + 特殊测量任务的解决方案
- + 测量小物件使用的支架
- + 可追溯的测量标准
- + 电脑连接
- + 测量高温表面的探头帽

产品组合一览



- Surfex® Pro X, SX/EX**
- + 高分辨率 彩屏显示
 - + 蓝牙
 - + 超大数据存储

专业型仪器，
适于各种应用



- Pocket-Surfex® X**
- + 数据存储
 - + USB 2.0
 - + 背光LED显示屏

紧凑型设计，
功能多样



- Surfex® easy X**
- + 在线统计
 - + 校准功能
 - + 背光LED显示屏

小巧如手机，
灵活操作

涂料厚度测量百科全书

基于磁感应法和涡流法的涂层厚度无损检测

需知事项及特殊测量案例信息

使用Surfix[®]涂层测厚仪测量时的特殊功能





	Surfex® Pro X	Surfex® SX	Surfex® EX	Pocket-Surfex® X	Surfex® easy X HR
型号	分体, 可更换探头	分体, 可更换探头	外置固定探头	内置探头	内置或者外置, 固定探头
测量范围 铁基	30 mm	30 mm	1,5 mm	1,5 mm	3,0 mm
测量范围 非铁基	3,0 mm	3,0 mm	1,5 mm	1,5 mm	3,0 mm
精确度	± (0,7µm + 1% 读数)	± (0,7µm + 1% 读数)	± (1µm + 1% 读数)	± (1µm + 1% 读数)	2µm or 2% 读数
硬质金属探头	*	*	*	*	*
工厂校准	*	*	*	*	*
校准方法	两膜片校准, 单膜片校准, 零校准, CTC	单膜片校准, 零校准	单膜片校准, 零校准	单膜片校准, 零校准	零校准
膜片校准	*	*	*	*	-
校准存储	*	-	-	-	-
统计	*	*	*	*	*
零补偿	*	*	*	*	-
边界值	*	*	*	*	-
数据存储	最多 100.000 读数	最多 2.000 读数	最多 2.000 读数	最多 80 读数	-
数据传输	蓝牙/USB	USB	USB	USB	-
菜单	*	*	*	*	-
背光显示	*	*	*	*	*
连续测量	*	-	-	-	-
耐溶剂探头	*	*	*	*	*
最大表面温度	300 °C	300 °C	300 °C	60 °C	60 °C
可选探头	*	*	-	-	-
包括PC软件	*	*	*	*	-

技术参数	FN 0.2	FN 1.5	FN 1.5/90° (for pipes and tubes)	FN 3.5 F 3.5	F 10
测量范围	0-200 µm 铁基和非铁基	0-1,500 µm 铁基和非铁基	0-1,500 µm	0-3,500 µm (F) 0-3,000 µm (N)	0-10 mm
精确度	出厂校准	+/- 2.5 µm or 2.5 % 取更大值	+/- 3 µm or 3 % 取更大值	+/- 5 µm or 3 % 取更大值	+/- 10 µm or 3 % 取更大值
	零校准	+/- (0.7 µm + 1.5 %)	+/- (1 µm + 2 %)	+/- (2 µm + 2 %)	+/- (5 µm + 2 %)
	膜片校准	+/- (0.7 µm + 1.0 %)	+/- (1 µm + 1 %)	+/- (1 µm + 1 %)	+/- (2 µm + 1 %)
工作温度	0 °C to 60 °C				
尺寸	Ø 14 mm x 83 mm		8 mm x 12 mm x 180 mm	Ø 25 mm x 47 mm	Ø 25 mm x 47 mm
重量	70 g		85 g	105 g	85 g

基本，常规

1. 我们采用何种单位进行涂层厚度测量？

公制计量

以英寸为单位的测量

语法和术语

关于单位“ μm ”的实际比较

在世界大部分地区，物理长度（当然包括涂层厚度）通常都是使用公制单位测量，即米(m)、厘米 (cm)、毫米 (mm) 和微米 (μm)。

$$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

$$1 \text{ mm} = 1000 \mu\text{m}$$

μm 的计量单位是微米micrometer (不是mu或micron)

以英寸为单位的测量

美国通常不使用公制单位，而是以英寸作为标准计量单位。

$$1 \text{ inch} = 25.4 \text{ mm}$$

$$1 \text{ inch} = 1000 \text{ mils}$$

$$1 \text{ mil} = 1000 \mu\text{inch} = 25.4 \mu\text{m}$$

$$1 \mu\text{m} = 0.03937 \text{ mils}$$

日常生活中的实际应用实例：

剃须刀片的厚度约为 $100 \mu\text{m}$ 。

一根人类头发的直径约为 $50 \mu\text{m}$ 。

蜘蛛网的丝线直径约为 $5 \mu\text{m}$ 。

2. 哪些涂层与基材的组合能够通过磁性与涡流原理进行测量？

磁性原理

涡流原理

双用途探头

DIN/ISO/ASTM——法规

油漆、珐琅及电镀涂层的典型涂层厚度

适用于采用磁感应和涡流模式工作的涂层厚度测量仪的典型应用领域

磁性原理存在于标有 F 和 FN 的型号中，如 Surfix® FN。（F= 铁磁性）

我们采用磁性原理（更准确地说是磁感应原理），对铁和钢（即铁磁性基材）进行无损涂层厚度测量。涂层必须是非磁性的，例如清漆、油漆、珐琅、塑料、玻璃、铝、铅、铬、铜、黄铜、锌、锡等。

注：大多数涂层材料为非磁性，但以下情况除外

- 电解沉积镍涂层
- 含铁或氧化铁的涂层，例如云母铁矿
- 含钴涂层，如碳化钨涂层

上述三种涂层类型除特定条件外，均无法通过采用磁性原理的Surfix®涂层测厚仪进行测试。

涡流原理存在于标有 N 和 FN 的型号中，例如Surfix® easy I-FN（N=非铁磁性）

我们采用涡流原理对非磁性金属基材上的涂层厚度进行无损测量。

可采用涡流原理测量的常规有色金属基材包括：

铝、铝合金、铅、青铜、铜、黄铜、锌、压铸锌、锡以及防锈弱磁性钢。

被测试的涂层必须具有电绝缘性；例如清漆、油漆、搪瓷、塑料、玻璃、阳极氧化涂层和陶瓷。

双用途探头

具有FN标识的仪器型号（如Pocket-Surfix® FN）的双用途探头可在两种工作模式下进行测量。当您将探头置于涂层表面时，仪器会自动识别基材类型，激活对应测量模式并在显示屏上显示此信息。若显示“Ferr”则表明测厚仪采用磁性原理工

作；若显示“Non-Ferr”则表示测厚仪处于涡流模式运行。

使用标准几何图形（标准应用）时，您无需具备任何关于材料的特定先前知识，该测厚仪始终会显示正确的值。

当然，对于几何尺寸小于标准模型的测试样品，您可以使用双用途探头进行测量，但您必须首先记得在必要的测量模式下校准量具（→操作说明，测量对象的几何尺寸对厚度测量的影响）

DIN/ISO/ASTM——规范

Surfix®型号符合厚度测量的特殊国际标准。

磁性法： DIN EN ISO 2808，DIN EN ISO 2178，DIN 50981
 (旧标准)，DIN 50982，ASTM B499

涡流法： DIN EN ISO 2808，DIN EN ISO 2360，DIN 50984
 (旧标准) ASTM D1400

测量技术基本术语：DIN 1319 第1和第3部分

油漆、珐琅和电镀涂层——典型涂层厚度

油漆涂层的厚度变化范围很大。例如，在汽车行业，底漆的厚度从10µm起。典型的防腐蚀保护层厚度在70至120 µm之间。更密集的防腐蚀保护层厚度约为500至800µm，在特殊情况下可达2mm。

*** 在有色金属基底上与有色金属的相互作用:**

使用涡流法和 Surfix[®] Pro S、Surfix[®]、Surfix[®] S、Surfix[®] EX、Surfix[®] SX 和

Pocket-Surfix[®] 涂层测厚仪，可以对以下涂层与基材组合进行测量:

- 铜上镀铬 最大镀层厚 40 μm

- 铝上镀铬 最大镀层厚 40 μm

- 铜上镀锡 最大镀层厚 40 μm

备注：上述材料组合需使用特别标记的校准箔片。

**** 铁磁基底上的铁磁层:**

通常而言，采用磁感应法时上述层和基底的组合仅在极少数情况下可行。若要实现用户指定的应用方法，必须进行专门的仪器校准以确保成功。

要准确测量电解沉积镍层，需要对单个样品进行校准。具体操作是使用同一镍槽中制备的镀镍参考片。由于该流程操作繁琐且通常仅适用于单一镍槽，目前全球范围内尚无便携式镍测量仪器能达到足够精度。

典型涂层材料

(1) 绝缘层	(2) 有色金属层	(3) 铁磁层
油漆、清漆、塑料 搪瓷、阳极氧化层、陶瓷	铅、青铜、铬、铜、黄铜 非电镀镍（含磷量超过10%） 锌、锌镍合金（镍含量低于13%）、锡	铁云母层电解镍

典型基体材料

(4) 绝缘基体	(5) 有色金属基体	(6) 铁磁性基体
环氧树脂、玻璃、木材、陶瓷、塑料	铝、铅、青铜、铜、黄铜、钛 奥氏体钢（极弱或无磁性） 锌	建筑用钢（St33-St60 或 C15-C45） 奥氏体钢，具有铁磁性

需额外处理方可测量：特殊基质层组合：

- 钢基体上镀锌再涂漆（多层体系）
- 铜底镀铬或铝底镀铬：请参考图表下的第1项
- 铜上镀锡：请参考图表下的第一条备注（****）
- 钢上的铁云母层（铁磁性）

以下指标无法通过Surfix®产品进行测量

- 钢基材、非铁金属基材（如黄铜）或绝缘基材（如塑料）上的电解镍层
- 绝缘基材（如涂料）上的绝缘层（如涂料）
- 非铁金属基材上的非铁金属层（例外情况请参考第一条备注（****））
- 绝缘基底（如环氧树脂）上的有色金属层（如铜）

3. 该探头的构建方式及其工作原理是什么？

单用途与双用途探头（F、N及FN探头）

1 配备独立探头与集成探头的仪器差异

若您曾研读过涂层厚度测量的技术文献，便会知晓钢制材料的测量可采用多种磁性原理。此处所称‘磁性原理’实为统称，具体指以下任一原理：

- 磁性粘附原理
- 永磁测量原理（亦称静磁原理）
- 磁感应法（Surfix®涂层测厚仪）

对于采用磁感应原理的测量（Surfix[®] SX-F1.5型号），我们使用一个包含铁芯和激励线圈或激励绕组的探头。

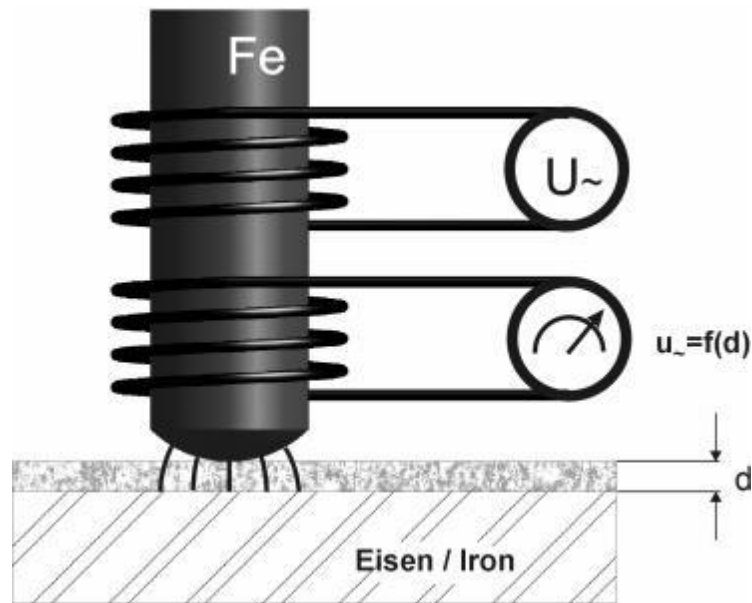


图1 磁感应法探头

当低频交流电通过励磁线圈时，会在铁芯磁极周围的空气空间中产生交变磁场。若将其中一个磁极靠近另一个铁质物体（本例中为铁基底），磁场强度会增强，并在测量线圈中产生相应电压。磁极与铁基底的距离越近，电压值就越高。若将铁芯（即测量探头）置于涂层表面，即可通过检测线圈电压来计算探头与铁基底之间的距离。该数据经电子处理后，会以涂层厚度的数字形式显示在显示屏上。

对于采用涡流原理的测量（Surfix® SX-N1.5型），我们通常使用不含铁芯的空气芯线圈探头。高频交流电通过线圈流动，从而在线圈周围产生一个电磁交流场。

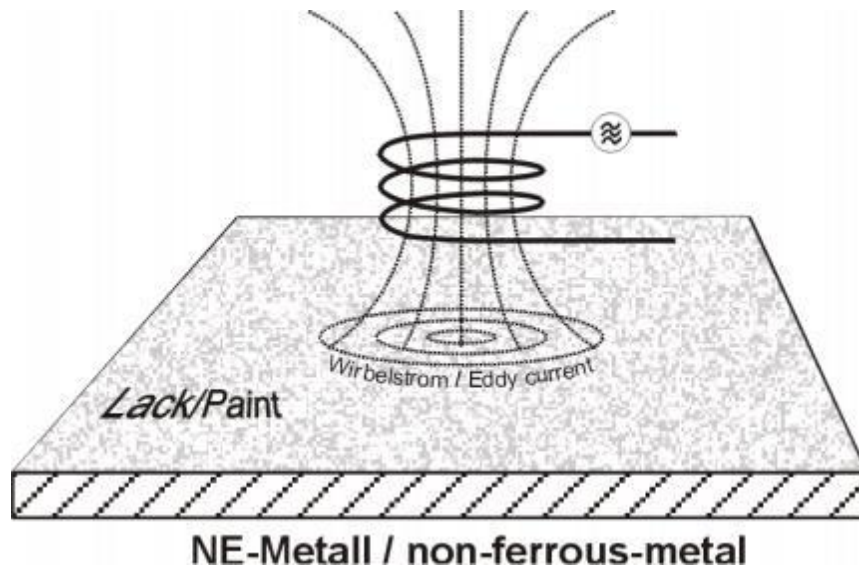


图2 按涡流法工作的探头

当线圈产生的交流磁场靠近有色金属物体（本例为非铁磁性金属基底）时，会在金属表面形成交变电流——即所谓的涡流。这种涡流会反过来产生方向相反的电磁交变场，从而削弱原始磁场。由于这种相互作用，线圈的电感（电气特性）会发生变化。若将探头（即磁极）置于涂层表面，即可通过测量线圈电感来计算探头与非铁磁性金属基底之间的距离。该数据经电子处理后，会以涂层厚度的数字形式显示在显示屏上。

在双用途探头（如Model Surfix® SX-FN1.5）中，两个线圈系统均位于测量探头前端。当探头接触被测物体时，两个线圈产生的交变磁场（低频与高频交变磁场）会共同发挥作用。通过微处理器自动处理两个线圈测量信号，确保无论被测物体是铁质还是有色金属，层厚数据都能准确显示。

配备独立探头与集成探头的仪器差异

涂层测厚仪的主要区别是什么

Surfix® Pro S、Surfix® SX、Surfix® E、Pocket-Surfix®、Surfix® easy and PaintCheck

功能	Surfix® Pro S	Surfix® SX	Surfix®E	Pocket-Surfix®	Surfix®easy	PaintCheck
测量范围	0 ... 200 µm 0 ... 1.5mm 0 ... 3.5mm 0 ... 10mm	0 ... 200 µm 0 ... 1.5mm 0 ... 3.5mm 0 ... 10mm	0 ... 1.5mm	0 ... 1.5mm	0 ... 3.5mm	0 ... 2mm
带有可拆卸 独立探头	•	•			• (S型)	
带外部固定探头			•		• (E型)	
带集成探头				•	• (I型)	•
数据存储器接口	•	•	•	•		
统计量	•	•	•	•	•	
连续测量	•					

测量探头可为通过电缆（约1米长）与仪器连接的独立探头，或集成于仪器内部的探头。

分体式：如果要进行一系列测量，那么配备独立探头的仪器最为合适（Surfix® E、Surfix® SX、Surfix® Pro S以及Surfix® easy S型和E型）。与集成探头的仪器相比，独立探头的实际操作（尤其是对小型零件或难以触及的零件进行测量时）更具人体工学优势。

整体式：这些仪器尺寸明显更小（Pocket-Surfix®、Surfix® easy I、PaintCheck），可挂在颈部或放在外套口袋里。探头和测量仪器构成一个完整的单元，设计用于随机测量、大面积测量或移动应用。

4. 使用探头时需注意的事项

对于何种材料以及涂层厚度应使用何种探头？

与探针配合使用

探头精确定位时的电子监测

测量尖端位置偏低

测量尖端耐磨性

使用磨损的测量头诊断测量误差

使用探头导向装置

对于何种材料以及涂层厚度应使用何种探头？

首要选择是基材类型：F型探头用于铁和钢，N型探头用于非铁金属（铝、锡、黄铜等），FN型探头则同时适用于铁、钢及有色金属的测量。

第二个选择涉及探头的测量范围。许多专家认为，应选择测量范围较大的探头，因为这样既能测量薄层也能测量厚层。如果薄层和厚层的读数精度并非至关重要的话，那么这种观点就是合理的。然而，由于在所有测量程序中测量精度几乎总是至关重要因素，因此在选择探头时，必须考虑到所要测量的层厚度，从而确定可实现的测量精度。

示例：测量范围为10mm且起始区域测量不确定度为 $\pm 5\mu\text{m}$ 的探头F10，厚度为 $20\mu\text{m}$ 的层可以通过该探头进行测量，其测量误差可能达到 $\pm 25\%$ 。然而，适用于厚度最大 $200\mu\text{m}$ 薄层且起始区域测量不确定度为 $\pm 0.7\mu\text{m}$ 的探头FN0.2，测量相同涂层的误差仅为 $\pm 3.5\%$ 。

为实现最佳测量效果，我们提供了测量范围分别为0.2mm、0.5mm、1.5mm、3.5mm和10mm等的探头。

与探针配合使用

使用Surfix®主机上的探头时，应遵守以下要点：

1. 使用干布或酒精浸湿的布清洁测量尖端及探头。若存在任何污垢或灰尘，它们将被计入测量数据，导致最终读数不准确。

2. 该探头配有塑料接触环，可使探头尖端牢固且垂直地置于测试样本上。若需测试曲面（例如圆柱形部件），可利用接触环上的V形槽将探头稳固且垂直地放置在圆柱体的曲面之上。

3. 在听到哔哔声提示音之前，请勿提起探头/测量仪。每次测量后，探头/测量仪需抬升约2厘米。

4. 再次施加探头前请等待约半秒。若未观察到新读数或无信号，则说明等待时间不足。

5. 若需测试小型元件，建议使用PHYNIX探头导引装置或微型探头。

6. 若拧下标准探头前端的黑色塑料接触环，即可接触到弹簧固定的传感元件。该元件是测厚仪的核心部件，结构坚固，可在恶劣条件下使用，但切勿强行扭转或用力将其按入探头外壳以抵住限位装置。

探头精确定位时的电子监测

若探头在准确放置于涂层表面时移动，或者在接触探头时表面非常柔软且会发生弯曲的情况下进行读数，仪表将无法显示数值。只有当测量仪在大约 0.5 秒内对具有相同数值的不可见值进行了多次测量后，才能显示读数。因此，不可靠的测量读数将不会显示。

测量尖端位置偏低

与其他许多探头不同，Surfix®测量仪（测量范围可达1.5mm）具有极小的探头重量，约为3克。这具有两个特殊优势：

1. 与其他测量范围相似的探头相比，Surfix®探头在定位时产生的动态冲击效应降低至10%。这种较低的冲击效应显著减少了探头尖端磨损，并对敏感表面具有温和作用。而其他探头在定位时产生的冲击力则超过100N。
2. 该探针测量元件采用弹簧加载设计，其静态接触压力极低，仅约0.5N。得益于我们独特的探头制造工艺，无论测量方向为自上而下、横向或俯视，该接触压力均能保持近乎恒定。这一特性具有显著优势，尤其适用于需要对延性（软质）涂层进行精确对比测量的场景。

测量尖端耐磨性

所有Surfix®探头测量元件均由硬质耐磨金属（碳化钨）制成。这意味着在正常情况下，探头具有几乎无限的使用寿命。实验室测试在探头使用一百万次后停止，因为即使在那时也没有记录到明显的磨损和损坏迹象。

磨损测量头的测量误差诊断

对于在恶劣工况下工作的探头（例如频繁在粗糙、坚硬或爆破表面进行测量，或频繁在粗糙表面移动），即使采用极高耐磨性的测量探头尖端也可能发生磨损。因此，由磨损导致的测量误差并非总能被识别。以下部分重点讨论F模式下工作的测量探头及Surfix®测量仪，即那些采用磁感应方法、适用于铁/钢的测量仪。采用N模式工作的探头及Surfix®测量仪，通常不会因探头尖端磨损而产生测量误差。但可通过相同方式进行测试验证。

采用以下方法可确定探头尖端磨损情况：

1. 打开涂层测厚仪

2. 清除校准（操作说明）

工作校准处于激活状态。

3. 将探头或测厚仪置于铁零板上：

当探头处于正常工作状态时，主机显示的数值应控制在误差限值的两倍范围内。例如，对于探头 FN1.5，其校准值 $\pm 6\mu\text{m}$ 。超出该公差范围的数值表明探头存在故障，必须进行维修。

为确保探针测量结果准确无误，建议执行以下步骤：

4. 将Fe零板上的刻度归零（操作说明，单点校准）

5. 将约 $100\mu\text{m}$ 的标准片置于铁基零板上并施加探头。若探头仍能正常工作，其与校准箔标定值的偏差应小于 $\pm 5\mu\text{m}$ 。偏差越大，说明探头测量元件已严重损坏。

备注：

若超出第3项和第5项所述的误差限值，但您已使用参考箔片进行了两点校准，那么您仍能够使用磁感应法在铁质材料上进行精确测量。建议使用其他参考箔片（可选）进行精度测试。

对于磨损的FN探头（其会在铁和钢上产生错误的测量值），但在非磁性金属上仍可达到足够的精确测量。前提是已进行过单点校准，更理想的是进行过两点校准。

为确保测量探头的充分使用（特别是未经校准的测量），当出现第3项和第5项所述的偏差时，建议对探头进行维修。

使用探针导向器（测试工作台）

对于螺钉头、螺母、垫圈等小型零件的涂层，以及直径小于4mm的圆柱形部件上涂层，或靠近边缘的特定位置涂层，人工测量往往难以达到精准度。此时，PHYNIX 探头导向器（测试工作台）便能派上用场。拆卸黑色塑料接触环后，将探头插入标准探头壳体并固定安装。为保护测量探头，需将塑料接触环重新旋紧。为便于操作人员清晰读数，可将Surfix®涂层测厚仪通过专用支架固定在钢杆顶端。导轨则可通过螺钉夹固定于桌面。



图3 Surfix® Pro S 测试工作台

探头的安装开口尺寸:	Ø10 mm - Ø14 mm
通过压力杆进行操作的最大值:	15 mm
高度调节的最大值:	100mm
测量板, 接地铝板:	120mm×160mm×20mm
宽度×高度×厚度:	120mm×160mm×320mm
重量:	约2.5千克

5. 如何进行连续厚度测量？其测量目的为何？

在管道中或难以到达的位置进行测量

在大面积区域进行测量

使用涂层厚度计 Surfimax® Pro S 时，可启用可选择的连续测量模式（Conti-mode），在此模式下，无需在每次测量后提起探头，就像在标准测量模式中一样，探头只需持续与表面接触即可。

测量的厚度值以每分钟180个测量值的速率显示。

由于探头尖端采用耐磨硬质合金制成，在进行滑动测量时（尤其在涂漆表面）可避免探头受损。

使用探头FN 1.5/90°在管道或难以到达的位置进行测量时，连续测量模式具有优势，因为通常情况下探头需要抬升2厘米，而在连续测量模式下则无需如此操作。

在大面积测量中，需要从表面多个位置获取快速且可靠的测量值。连续测量模式非常适合此用途，因为每次测量后无需将探头抬起并重新定位。

校准的基本原理

6. 术语“校准”的含义

术语“校准”的实际含义定义如下：

测量系统测量偏差的确定在不干预测量设备的情况下，使用预设应用条件的设备。

该定义的偏离出现在厚度测量的初始阶段，此时引入了“校准”一词用于仪器调整。

“校准”是指通过改变测量仪器的设置来消除系统性测量偏差。该“校准”的目的是消除超出误差容许范围的测量偏差。

7. 涂层测厚仪为何及何时需要校准?

磁感应探头磁通线的流动

若家用电子秤未归零，或秤盘残留其他物质，称量时将无法显示准确数值。即使秤盘为空，也会显示正值或负值，导致待称物体的实际重量被高估或低估。基于磁感应与涡流原理的涂层厚度测量方法虽原理相似，但操作更为复杂。

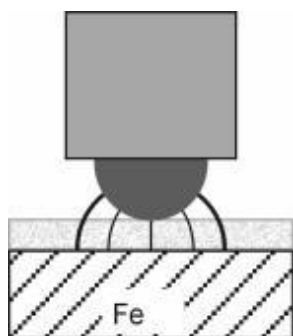


图4 在平面上使用磁探头产生的磁场

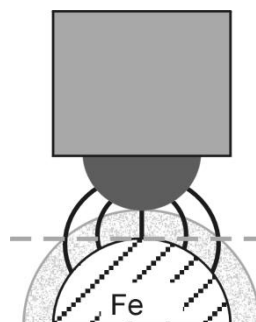


图5 在凸面处使用磁探头的磁场

家用秤只需进行一次调整即可归零，从而能准确显示重量，这一点在某些情况下与涂层厚度测量仪也是一样的，因为它们也需要进行校准才能进行正确的测量。当测试对象的几何形状偏离标准几何形状时这种情况总是存在的。

其背后的技术原理可以通过使用物理磁体模型来解释：

图 4 显示了带有油漆涂层的扁平铁质金属片上的磁性探针。

假设该测量仪已通过探头校准，可准确测量该平面表面的涂层厚度。这意味着在测量范围内，无论涂层厚薄都能获得精准数据。如图4所示，磁力线从探头磁极延伸而出，穿过非磁性漆层后进入铁质物体内部。此时磁极与磁性基材之间的磁力线平均长度与涂层厚度成正比。这意味着探头能够“识别”磁力线的长度，将其转换为电子信号，并将结果显示为涂层厚度。

图 5 展示了一个凸形铁质物体，其表面涂层的厚度与图 4 中的平面铁质物体的涂层厚度相同。校准参数未发生变化，因此与图 4 中的参数相同，即该测量仪是针对平面表面的测量进行校准的。您马上就能看出，尽管这两个铁质物体的涂层厚度相同，但图 5 中的一些磁力线却要长得多。但探头只是“

识别”磁通线的长度。这意味着该测量仪会记录更高的涂层厚度读数，但这显然是不正确的。

从这个例子中，您还可以明白，如果探头放置在凹面之上，那么一些磁通线会变短，从而导致涂层厚度的测量结果会偏低。

从物理角度来看，这很正常，但这种影响显然不利于涂层厚度的测量。不过，有一种简单的方法可以完全避免此类误差，那就是进行校准。

若选定测量点时已知测试样品的几何形状将显著影响磁通线长度及涂层厚度，则应校准该测量仪。

若采用涡流法检测有色金属，上述解释并不完全准确。但曲线表面的测试结果仍受相同影响。因此，通过校准探头，亦可消除与试样几何形状相关的误差。

8. 若涂层厚度计未校准或校准不当，其显示值将如何？

*涂层厚度“零”
值的测量 实际涂
层厚度的测量*

若涂层厚度计未经校准，或校准精度不足以满足特殊应用要求，即使涂层厚度为零（即未涂层样本），其读数仍可能显示为负值或正值。涂层样本亦然：由于校准不当，该仪器可能显示过高或过低的读数。此现象与允许公差范围内的微小偏差无关。

注： a) 涂层厚度计已在平坦表面（如Fe零位板）完成校准。但实际测量是在曲率半径 $R=5\text{ mm}$ 的弯曲钢表面进行（该数值低于标准几何结构的最小曲率半径 $R=20\text{ mm}$ ）。读数始终偏高，因此显示结果不准确。若测试样本为凸面未涂层钢表面（涂层厚度为零），该测量仪将显示正值读数。

b) 已使用半径 $R=5\text{ mm}$ 的凸面未涂层钢表面对涂层厚度计进行了校准。但涂层厚度的测量应在足够平坦且较大的钢表面上进行。测量结果总是偏低，因此在显示屏上显示的数值也是错误的。如果样品是一个未涂覆的平整钢表面（涂层厚度为零），则测量仪会显示负值。

9. 哪些应用程序最适合五种校准模式？

标准应用

未经校准的测量（工作校准）

采用一点校准法进行测量

采用两点校准法（单箔校准）进行测量

双箔校准（Surfix® Pro S）

在涂层测量对象（Surfix® Pro S）上的校准

校准频率

影响量规校准后精度的因素

量具精度的合理要求

Surfix®测量仪的标准应用场景包括对标准尺寸试件表面进行测量，此类情况下无需单独校准。对于标准应用，工厂校准即可满足需求（详见下段说明）。这类标准几何形状的测量对象尺寸通常大于所谓的极限几何形状，例如1.5mm标准探针就是典型代表。

1. 测试表面尺寸大于15mm×15mm

2a. 铁或钢制物体曲率半径（凸/凹）大于20mm（对应外径或内径为40mm）

2b. 非铁质物体曲率半径（凸/凹）大于50mm（对应外径或内径为100mm）

3a. 厚度大于0.6毫米的铁或钢测试对象

3b. 厚度超过50 μm 的有色金属测试对象

基本上，校准模式是决定可达到精度的关键因素。如果不需要极高的测量精度，那么与测量准备和校准相关的费用就会降低。

未经校准的测量（工作校准）

对于许多应用，即所谓的标准应用，涂层厚度计无需校准，仅需进行工作校准即可。此类标准应用通常是在标准几何形状上进行的测量。

采用此类校准模式可确保测量不确定度，例如对于探头FN 1.5（测量范围1.5毫米），其不确定度为 $\pm 3\mu\text{m}$ 或测量读数的3%。

Surfix[®]测量仪中的校准功能可通过两种模式激活：

1. 在菜单项“校准”中，所有现有单独校准将被清除（参见操作说明）。
2. 将测量仪重置为基本设置（全量复位）。注意：使用“全量复位”功能时，所有存储的测量值及可能的限值将被清除（参见操作说明）。

注：当显示屏左上角未显示“零”或“校准”字样时，工厂校准即被激活。这些字样仅在单独校准后出现。

采用一点校准法进行测量

选择“一点校准”这一术语是因为探针的特性仅在一个参考点（即零点，涂层厚度为零）上被确定。

这种称为“归零”的校准方式无需箔片标准，特别适用于质量小于上述标准几何尺寸的组件测量。当所需精度高于工件校准时，也会选择单点校准。

如果待测的未涂层试样与待测量的涂层物体具有相同的尺寸和相同的材料特性（磁导率、电导率、温度和表面粗糙度），则只需对其进行简单的归零操作即可。归零操作应始终在后续测量所要进行的位置进行，例如当测量点距离边缘小于5mm时（见操作说明）。

注：设置为零后，量规存储器中的单个箔片校准（两点校准）将被清除。

显示屏将仅显示零值。

两点校准测量

此类校准（仅适用于Surfix® SX、Pocket-Surfix®及Surfix® Pro S）除需进行归零外，还需使用标准箔片。两点校准特别适用于测试尺寸小于上述参考标准尺寸的组件。若需获得比单点校准更精确的读数，也应采用两点校准。使用标准探头时，两点校准的测量不确定度保证值为 $\pm (1 \mu\text{m} + 1\%$ 的测量值)。校准参考标准的厚度应始终大于待测涂层厚度，但不得超过1.5倍。首先需对两点校准进行归零，此时适用条件与单点校准相同。随后使用参考箔片进行校准（参见操作说明）。具体操作时，需将箔片置于未涂层测试样本上，并将探头定位在与归零操作相同的点位。将数值定位至指定倍数后，通过方向键（菜单键）将箔片厚度值传输至显示屏。随后按下“OK”键完成两点校准。此时可对同类测量对象进行测量。

我们使用“两点校准”这一术语，是因为探头的特性线是在两个点（即“零点”和基准值点）上确定的。

注：设置为零后，单个箔片校准将被清除。

显示屏将显示“零”。

使用标准进行校准后，显示屏将显示“零校准”。

双箔校准

该类校准特别适用于粗糙表面的测量，例如喷砂处理的基材。若需采用磁感应法或涡流法进行测量，亦适用于弱磁化基材。

该类校准采用两种不同厚度的校准箔片。箔片厚度的选择标准为：较薄箔片的厚度为预期涂层厚度的0.5至0.9倍，较厚箔片的厚度为预期涂层厚度的1.1至1.5倍。

通过两次箔片校准，确定探头特性曲线的两个参考点，即较薄箔片值与较厚箔片值。

涂层测量对象的校准

当无未涂层测量对象可用时，可采用此校准方法。该方法仅适用于采用磁感应模式工作的探头及配套评估软件。探头特性曲线的参考点一方面用于未知涂层厚度的测定，另一方面用于未知涂层厚度加上附加箔层的厚度。此时计算虚拟零点，并在输入附加箔层厚度值后确定探头特性曲线。

其前提是存在可进行校准操作的光滑表面。预期测量误差大于单点、两点或双叶板校准的误差（参见探头技术数据）。

不建议在不平整表面（如结构化涂层）上进行校准操作，因可能导致较大测量误差。

校准频率

校准完成后，参数将保存至量具存储器，无需重复校准。

然而，我们建议在使用数小时后，或若该测量仪已停用数日或更长时间时，您应借助校准试片来检查其精度。当然，这必须在量具校准时所依据的相同几何条件下进行。

影响量规校准后精度的因素

当量具经过仔细校准（单点或双点校准）后，实验室条件下的标准测量不确定度将始终保持不变，或通常显著降低。

然而在实际操作中，某些因素可能导致测量不确定度较高。以下列举若干示例：

- 测试样本的尺寸和曲率需要单独校准，但该测量仪尚未进行足够仔细或正确的校准。
- 测量尖端或测量部位未清洁
- 该测量是在具有爆破表面的基底上进行的，从而导致测量值的强烈散射
- 探针头磨损
- 该涂层含有氧化铁（云母铁）

- 具有“橘皮效应”的涂层
- 基底太薄

这些效应将在后续章节中予以讨论

量具精度的合理要求

操作人员往往期望涂层厚度计的测量精度高于实际可能范围。首先，该仪器的技术构造可能不够先进；其次——这种情况最为常见——测量任务本身过于特殊或复杂，现有方法和技术难以胜任。

以下是一些例子：

- 对手工刷涂的油漆涂层进行测量。若物体为手工涂装，则极小区域内涂层厚度的差异远大于散射由量具本身产生的测量值。对于油漆涂层厚度的测量， $\pm 3 \mu\text{m}$ 或 $\pm 3\%$ 的量具不确定度完全满足要求。
- 喷砂钢基材上涂料涂层的测量。

由于钢材表面粗糙，油漆涂层层分布极不均匀，无法均匀覆盖，而是沿着铁质表面的轮廓分布。这种情况下，涂层厚度计会显示出较大的数值波动，无论测量仪器多么精密，都无法获得准确的结果。

即使仪表经过编程设定为高精度测量，这个问题依然存在。数值的波动源于被测物体本身的特性。操作人员需要明确精度的边界范围，并掌握读数评估方法。通过特殊校准手段和/或对读数进行统计分析，可以部分解决这一难题。

10. 涂层厚度测量中的“漂移补偿”是什么意思？

电子元器件老化引起的自动校正漂移

温度漂移的自动校正

所有有源和无源电子元件的技术特性都会因老化和温度的影响而或多或少发生变化。测试信号越小，就越需要通过电子仪表进行放大，这会加剧老化和温度的负面影响，从而导致测量精度下降。

毋庸置疑，这一原则同样适用于涂层厚度测量仪。

为确保测量仪保持精确，必须在短时间间隔内持续将测试信号与参考值进行比对。与标准值的偏差会立即被识别并归零；换言之，即实施补偿。当所有采用使用这种补偿方法的所有 Surfix® 测量仪，在进行一次校准后就不必再次更改。即使长时间未使用，输入的值仍会保留。除了这一巨大优势外，测量仪可以在 0°C 至 60°C 的环境温度和高达 150°C 的测试样品表面温度下进行精确测量，这一切都无需担心，因为自动漂移补偿功能可以解决相关问题。

特殊案例

11. 测量对象的几何形状会对测量读数产生何种影响？

小型组件测量：例如垫圈、螺钉头、小型圆柱形部件 凸凹形状部件

边缘测量 腔体测量 薄板测定 螺纹测量

涂层厚度测量的几何限制 曲面测量误差

测量对象的边缘几何

在前几章中，重点部分详细讨论了测量对象不同几何形状对读数的影响。

下页所示的几何图形中，除典型形状外，还给出了 Surfix® 量规的误差倾向和典型几何极限值。当未达到极限值（低于值）时，如果需要或规定了相应的测量精度，则建议单独校准。

薄板测量

当在薄铁板（厚度小于0.6毫米）上进行读数时，磁力线并非全部聚集。其中部分磁力线穿透了薄板。将探头置于板状物上并沿宽弧线运行至探头的对向磁极。因此，磁通线的平均长度大于厚金属板中的磁通线。若测量仪未经校准，读数将过高。此种情况下，我们建议进行单独校准。

当对厚度大于50 μm 的薄非铁金属镀层进行读数时，可直接使用仪器校准进行测量。实际操作中，测量探头接触薄非铁金属箔时会产生轻微凹陷。金属箔会围绕

测量探头轻微弯曲，这会导致数值出现若干 μm 的负误差。

这就解释了为什么，例如，如果你测量铝管（约100 μm 厚）上的薄漆层（约5 μm 至20 μm ），你将无法达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ 至 $\pm 2 \mu\text{m}$ 的预期测量不确定度。

然而，对于厚度超过50 μm 的铝箔，可测量厚度超过约80 μm 的较厚层。就百分比而言，负误差在此情况下影响较小，通常可接受。对于厚度超过0.3mm的有色金属板，测量无问题，因为表面与探头接触时不会弯曲，因此测试结果准确。

螺纹测量

采用本文所述方法无法对螺纹的顶面和侧面进行涂层厚度测量。

涂层厚度测量的几何限制

对于小型组件的测量，当使用工作范围达1.5毫米的探头测量时，存在两种几何下限值情况：

案例1：

当完成一点或两点校准时，可继续进行限值A（见下文）的低于限值情况测量。

限值A:

- 弯曲铁质部件: $R_{min} = 20 \text{ mm}$, 最小直径= 40 mm
- 弯曲非铁金属部件: $R_{min} = 50 \text{ mm}$, 最小直径= 100 mm
- 扁铁和有色金属部件 : 最小测量面积 = 15mm x 15mm
- 铁质组件厚度: 厚度最小= 0.6 mm
- NE金属部件厚度 (理论值) 最小值= 0.05 mm*

案例2:

若尺寸低于限值B (见下文) , 则无法进行精确测量, 因组件尺寸过小而无法实施单点或双点校准。

限值B:

- 弯曲的铁和有色金属零件: $R_{min} = 2 \text{ mm}$ 和 最小直径= 4 mm
- 扁铁和有色金属零件 : 最小测量面积 = 5mm x 5mm
- 铁质部件厚度: 厚度最小 = 0.1 mm
- NE金属零件厚度 (理论值) 厚度最小 = 0.01 mm*

*实际应用中由于机械压痕 : 厚度最小= 0.3毫米

曲面测量误差

第7章阐述了曲面测量误差的理论原因。

图6展示了使用双用途探头FN1.5 (测量范围0-1.5mm) 在未经预先校准的曲面上进行测量时的两种定量效果示意图。

图6上面的示意图展示了未涂层钢或铝制凸面测量涂层厚度时产生的误差, 下面的示意图则显示了钢或铝制凹面测量时的误差。

如图所示, 曲面NE部件 (例如铝制部件) 的测量误差显著大于钢制部件。

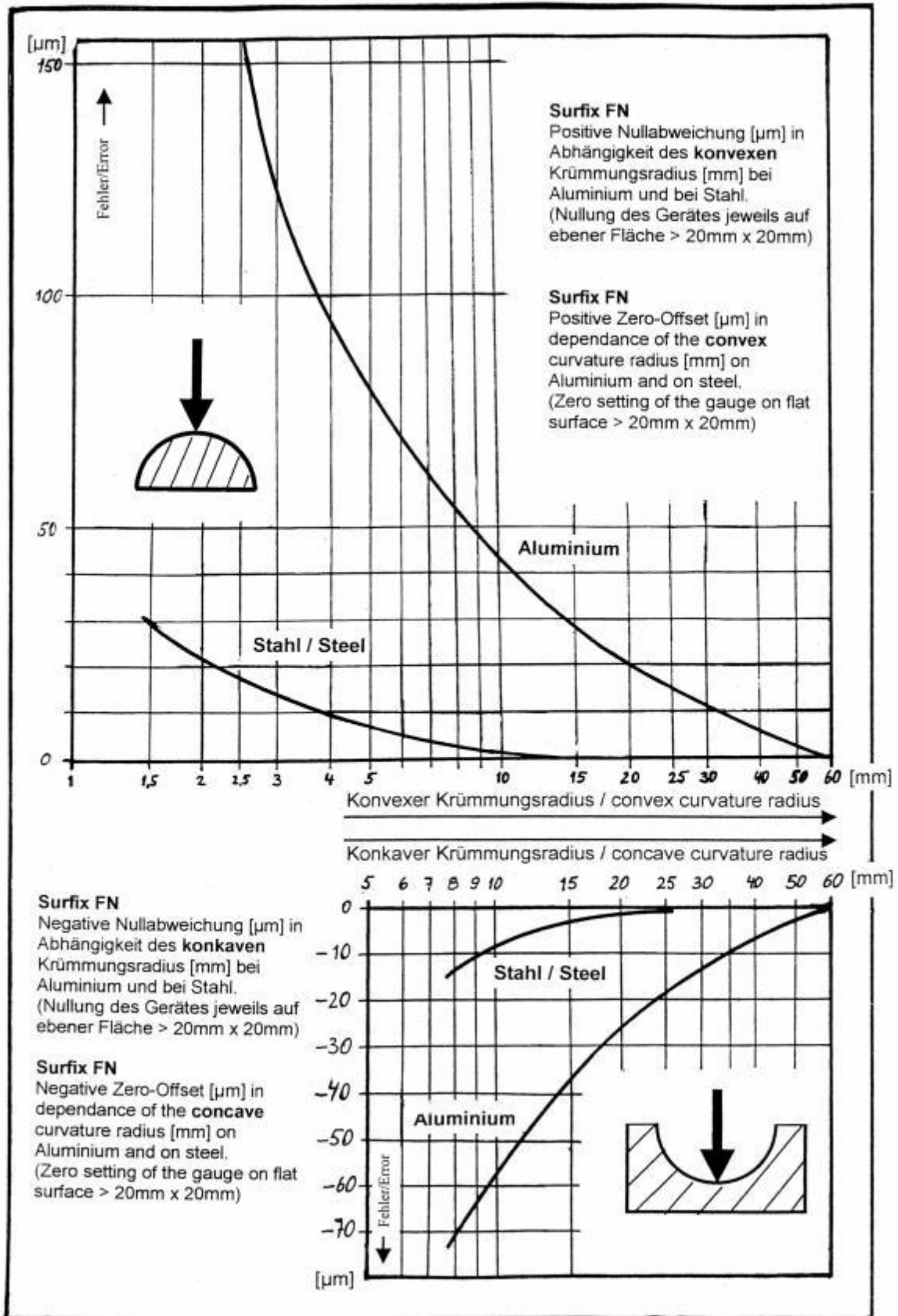


图6: 曲面测量误差

示例：

所用涂层厚度计的校准工作正在进行中，因此适用于平面表面。

测量对象为一个凸度半径 $R=8$ 毫米（对应圆柱体直径16毫米）的未涂层钢制零件。在上图的钢制曲线中，可读取到 $+3\ \mu\text{m}$ 的预期偏差。

相比之下，半径 $R=8$ 毫米的铝制圆柱体会产生约 $+55\ \mu\text{m}$ 的偏差。

因此，对于曲率半径 $R=8\ \text{mm}$ 的凹面，钢制零件的预期偏差约为 $-14\ \mu\text{m}$ ，铝制零件的预期偏差约为 $-70\ \mu\text{m}$ 。

若预先在未涂层的曲面进行校准，则可完全消除与曲率相关的测量偏差，从而使未涂层表面显示为零。



测量对象的边缘几何

下图所示几何结构偏离了“水平”（理想几何形态），可能导致测量误差。R、A、D和T的指定限值适用于测量范围为0.2毫米和1.5毫米的标准探头。

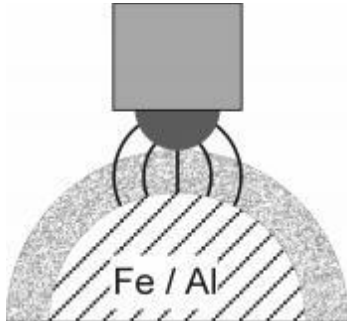


图7 凸面测量。趋势：正误差 校准条件：

R < 20 mm (Fe)
R < 50毫米 (铝等)

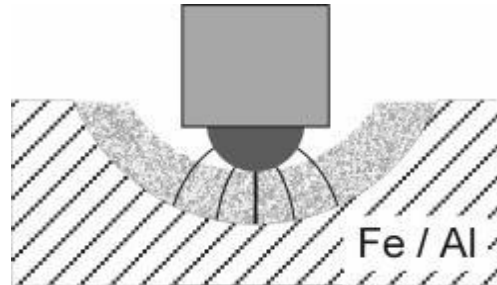


图8 凹面测量 趋势：负误差。校准条件：

R < 25 mm (Fe)
R < 50毫米 (铝等)

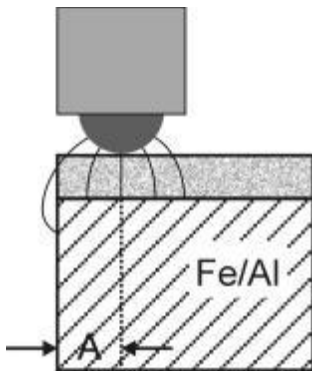


图9 边缘测量。

趋势：正误差。

校准时 A < 5 毫米 (铁+铝等)

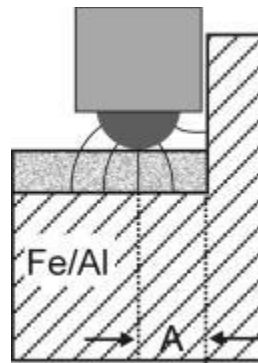


图10 测量法兰

趋势：负误差。

校准时 A < 5毫米 (铁+铝等)

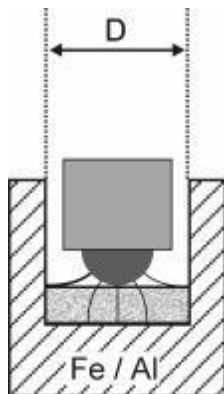


图11 空腔测量。

趋势：负误差。

校准时 D < 20 毫米 (铁+铝等)

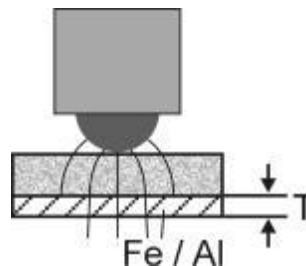


图12 薄板测量。

趋势：正误差 (Fe) 趋势：负误差 (Al等)

当T < 0.6 mm 时 (铁) 进行校准

当T < 0.1mm (铁) 或T < 0.01mm (铝等) 时不得进行测量

12. 如何对过小的测量对象进行人工放大？

附着于较大金属部件
嵌入较大金属部件中

适用于垫圈、螺钉头、铆钉等小型铁质部件。

测量必须使用与首次设置校准参数时完全相同的部件，并在完全相同的位置进行。即使位置发生微小变化，也可能导致显著误差。

若增大待测小部件周围的磁场强度，这种不规则结果的影响可显著降低。具体方法包括：将测试样本（如薄垫圈）置于较大铁件表面，或将螺钉头嵌入较大铁制部件中。

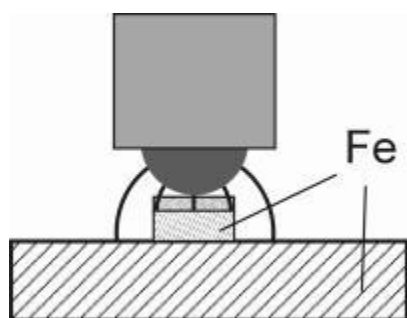


图13 通过背衬材料扩大磁性质量

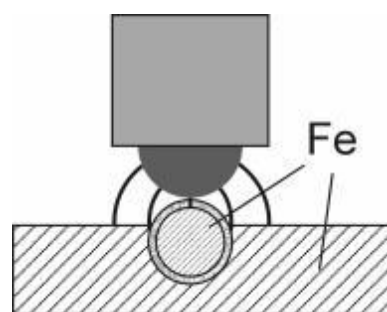


图14 通过嵌入扩大磁性团块

采用较大非铁金属部件对小型非铁金属部件进行人工扩大的效果，不如使用铁/钢制小型部件。



13. 对于多层涂料系统（如涂料叠加式），如何仅显示最上层？

零偏移/零点抑制

零偏移法，程序A（磁法）

零偏移，程序B（涡流法）

零偏移，程序C（两种方法）

零偏移/零点抑制

在测量多层结构时，我们只需关注最上层的厚度。该层数据将单独显示并保存，同时进行统计分析。由于磁法和涡流法都无法区分各层结构，因此可采用A、B、C三种方法来抑制底层干扰，清晰呈现上层厚度。但需注意，底层厚度必须保持足够均匀。

钢基零偏移测量（程序A，磁法）

（最大抑制幅度20 μm ）

1. 仅允许两点校准！
2. 将测量仪归零至需抑制的层厚，或选择相应厚度的箔片，将其置于与涂层部件几何形状相同的裸铁片上。
3. 完成上述操作后，使用厚度与预期值相近的箔片参考标准进行箔片校准。在此过程中，将箔片参考标准置于已归零的箔层上（参见上文第2项）。
4. 注：当处于测量模式F（磁法）时，该方法仅适用于约20 μm 的抑制（零偏移）。超过此值可能导致额外误差。

NE金属测量的零偏移（程序B，涡流法）

（最大抑制200 μm ）

1. 仅允许两点校准！
2. 按照A点所述方法进行校准，但需使用相应的有色金属。
3. 零偏移值超过200 μm 将引发额外误差。

零偏移测量在钢及有色金属上的应用（程序C，两种方法）

1. 首先使用五种校准模式之一（第9章，可能的校准模式）对测量仪进行校准。
2. 在菜单项“偏移设置”中，通过输入带负号的数字值来设定需抑制的偏移值。

每次读数后，输入偏移值会自动从总厚度值中扣除。这意味着仅顶层涂层会显示为差异涂层厚度，且仅该读数会被显示、存储于测量仪内存中并进行统计评估。

当打印测量值时，出于记录目的，偏移值始终被包含在内。

注：总层厚度（偏移值+显示层厚度）不得超过总测量范围。

14. 采用分层结构（如钢基+锌+油漆）时，如何对各层涂层的厚度进行无损检测？

校准

测量

用磁性原理和涡流原理两种不同的测量方法分别测量油漆和锌的涂层是可行的，用FN双用途测量仪测量最为方便。在开始之前，请注意以下两点：

1. 锌涂层的厚度应大于25 μm ，以确保测量漆膜厚度时未出现显著误差。此类误差源于锌涂层过薄（图1）。
2. 进行校准和测量时，必须设置为测量模式F或模式N。切勿使用自动FN模式！（参见操作说明，测量部分）

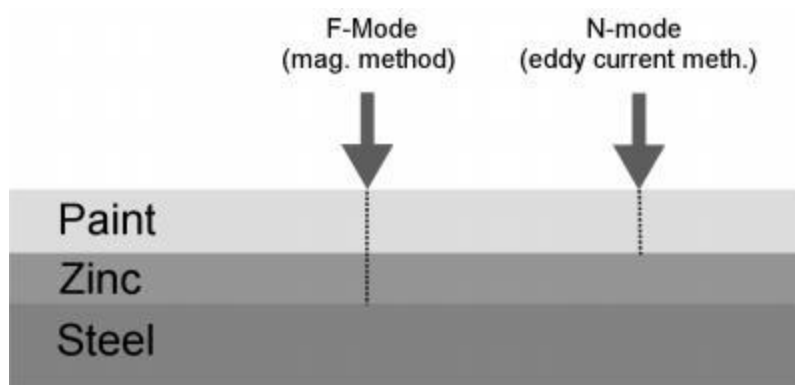


图15 钢基锌涂层体系中各层的分离

校准

- a) 在测量锌涂层上的油漆厚度前，必须使用测量模式N（涡流法）对无油漆的小锌区域表面进行两点校准。
- b) 在测量油漆与锌层的总涂层厚度前，需先在几何形状相同的未涂层钢样上进行单点或双点校准，使用F测量模式，以确保结果准确。

测量

开始测量前，必须设置F模式或N模式。

若选择F模式，将测量总涂层厚度，因锌和清漆两种涂层均不具磁性。

若选择N模式，系统将仅测量漆层厚度，而不会检测锌层。通过两次测量值的差值即可得出锌层的厚度。

备注：

若锌涂层均匀，上述方法可获得精确的漆膜厚度读数。

若锌涂层厚度不均匀，特别是超过 $30\ \mu\text{m}$ 时，这种厚度差异对漆膜测厚读数的影响微乎其微。

经验法则：例如，若漆层下锌层厚度偏离约 $25\ \mu\text{m}$ 的 $+3\ \mu\text{m}$ ，此时漆层厚度读数将比实际值多出约 $+1\ \mu\text{m}$ 。若需更精确的漆层厚度测量，建议在多个位置取样检测漆层，通过F模式测试锌层均匀性，以便在测量漆层时考虑该因素。

锌层厚度超过约 $50\ \mu\text{m}$ 的测量误差可忽略不计。

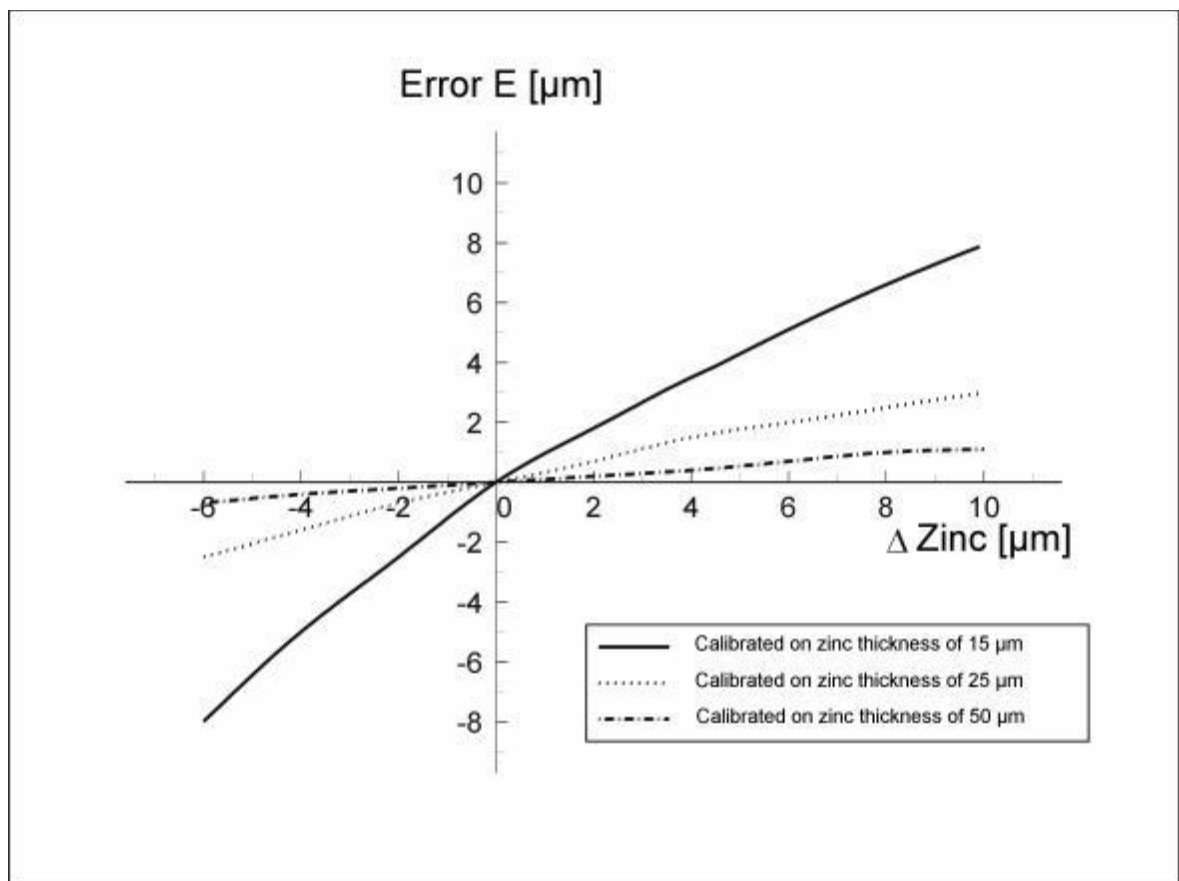


图16 涂层厚度测量误差E与锌层厚度变化‘ Δ -锌层厚度’的关系，该关系基于各锌层厚度的单独校准

15. 如何通过现有涂层（如汽车车身）对钢上的锌层进行无损检测

许多钢结构构件在涂装前需进行镀锌处理，以增强防腐蚀保护。该处理可采用热镀锌或镀锌锌层两种方式。

通常这些镀层的厚度应大于约 $8\mu\text{m}$ 。若锌层厚度不足 $5\mu\text{m}$ ，则无法有效防止腐蚀。

下述方法适用于

- a) 由钢和铁制成、表面为平面或略微弯曲的测量对象
- b) 采用多功能探头的涂层厚度测量仪（例如 Surfifix® FN 或 Surfifix® easy FN）的应用。

锌层检测通过两种测量方式实现：一种采用磁感应法（F模式），另一种采用涡流法（N模式）。通过计算显示值的差值，可明确判断锌涂层厚度是否超过 $5\mu\text{m}$ 。即使厚度小于 $5\mu\text{m}$ 的涂层也能被检测到。

更详细的描述可参见相应操作说明。

16. 如何测量具有透明水膜或含酸碱性水膜的表面？

PHYNIX 生产的探头均采用密封设计，可防止液体渗入定位点区域的探头系统，因此在测量对象表面存在水膜时仍可正常使用。但测量完成后，需清除探头残留水分，以保护探头手柄内的电子元件。防止水的毛细渗透。

酸性或碱性液体膜会破坏标准探头的尖端，从而在短时间内导致显著的测量误差。例如，在电镀车间（铬镀或阳极氧化）中可能发生这种情况。在电镀过程中，待镀物体需从镀液中取出，以便在湿表面进行中间涂层厚度测量。

针对此类情况已开发出专用探头，其探头尖端可耐受酸性和碱性溶液。需注意的是，即使在此情况下，测量后仍应使用湿布清除探头尖端上的强腐蚀性液体膜。

17. 基底表面粗糙度对测量读数有何影响？

粗糙（喷砂）钢表面的测量

校正方法1：归零

修正方法2：四步法

粗糙（喷砂）钢表面测量（磁性原理）

若未采取特殊防护措施，使用磁性涂层测厚仪测量粗糙钢表面时，涂层厚度读数会因材料特性而显著偏高。下图清晰展示了这种现象的成因——光滑表面与粗糙表面的磁通线长度存在差异。我们推荐两种方法，可有效消除粗糙表面带来的负面影响。

这些方法可测量峰区的涂层厚度。峰区涂层厚度及其测量结果具有重要意义，尤其对于评估防腐蚀性能至关重要。

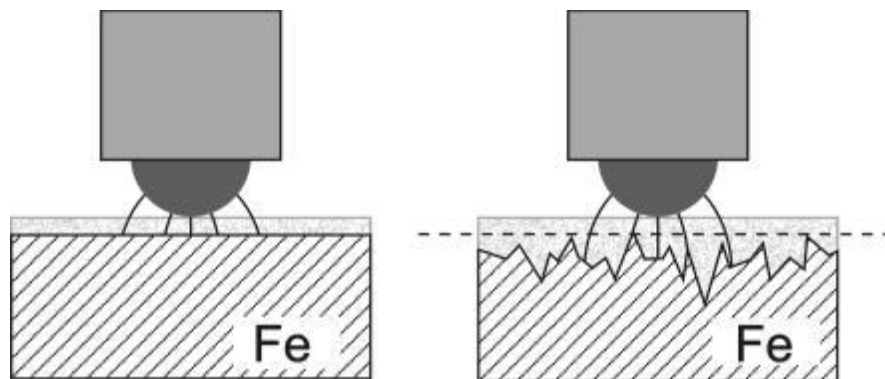


图17 在相同峰层厚度条件下，平滑表面与粗糙表面测量时的不同通量长度

该探头可置于粗糙未涂层表面，用于下述两种校准方法。为便于参考，亦可在具有相同粗糙度结构的喷砂参考板上进行校准。迄今为止，尚无实用方法能在不将探头置于粗糙未涂层表面进行校准的情况下消除粗糙度的影响。

校正方法1：归零

（适用于粗糙度Rz小于20 μm 的情况）

除以下内容外，还需进行两点校准：

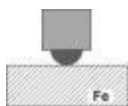
将探头置于粗糙未涂层表面约10次以进行归零，随后通过按下OK键确认。

在标定模式“箔片标定”中，将探头与标定标准物一同置于粗糙表面上约5次，并通过确认键（OK键）进行验证。

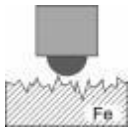
现在可以开始测量。请勿忘记多次应用探头。读数的平均值等于峰间平均涂层厚度。

修正方法2：四步法

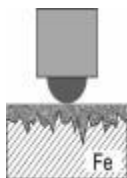
(适用于粗糙度Rz大于20 μm 的情况)



1. 校准时，将测量仪置于与被测粗糙表面形状相同、材质相同的平滑表面进行（单点和双点校准）。



2. 确定粗糙度效应。将探头置于未涂层粗糙测量物体上约10次，并计算平均值 \bar{x}_0 以及测量值的标准差 s_0 。符号“0”表示对未涂层测量对象进行的测量。平均值 \bar{x}_0 是衡量粗糙度对涂层厚度测量影响的指标。



3. 粗糙底漆涂层厚度的测量，将探头置于待测层上约5至10次测定平均值 \bar{x}_{0+C} 为第2点所述测量值。指数“0+C”代表在粗糙涂层测量对象上进行的测量。测量值由实际层厚与粗糙度（参见第2点）得出。

4. 计算与平均值 \bar{x}_{0+C} 和 \bar{x}_0 的差值，该差值即为峰值上的平均层厚度

例子：

点2的测量结果产生

$$\bar{x}_0 = 15 \mu\text{m}, s_0 = 5 \mu\text{m}$$

点3的测量结果产生

$$\bar{x}_{0+C} = 80 \mu\text{m}$$

根据第4点计算得出

$$\bar{x}_C = (\bar{x}_{0+C} - \bar{x}_0) = 65 \mu\text{m}$$

此外，由于粗糙度（ $\pm 5 \mu\text{m}$ ）以及测量仪的公差（本例中为 $\pm (1 \mu\text{m} + \text{测量值的 } 1\%)$ ）也会导致差异。

因此，峰顶上方的平均涂层厚度为 $65 \mu\text{m} \pm 7 \mu\text{m}$ 。

注：当涂层厚度超过约 $300 \mu\text{m}$ 时，粗糙度的影响可忽略不计，因此无需采用上述方法。此时需在光滑表面校准量具，或使用工作校准。

18. 对于非典型层必须注意哪些事项？

软层

磷酸盐层

热敷层高达 150°C 高温达 300°C

铁云母层（铁磁性）

软涂层 有时可在含有溶剂的涂料中发现。含有软化剂或橡胶层的涂层也如此柔软，即使在 0.3N 的低探针接触压力下也可能弯曲，且涂层厚度显示比实际更薄。磷酸盐层具有多孔结构，且大多不超过约 5 至 $7 \mu\text{m}$ 。当探针尖端定位时，多孔结构被破坏，探针尖端仅向内压入几微米。这种压痕误差相对于总厚度而言过大，导致测量值无法使用。

软层和磷酸盐层的提示：

在涂层与探头之间放置一块约 $100 \mu\text{m}$ 的校准箔。这块相对较硬的材料能显著降低接触压力，从而减少表面凹陷。从测量值中减去校准箔的厚度，即可得到实际涂层厚度。

借助探头导向装置，我们可以更精准地进行读数，尤其适用于薄层磷酸盐涂层。若需更清晰地观察测量点，可先取下探头上的塑料接触环。此时需将探头的弹簧式传感器缓慢置于样品表面，使其刚好接触敏感涂层。随后将探头元件回缩约0.5毫米至1毫米至探头外壳内。若连续读数效果良好，则无需再使用减压校准箔片；若读数不达标，则需使用校准箔片继续测量。

备注：

箔片越厚，探针凹陷越小，然而测量不确定度将增大。因此，在特定条件下30 μm 或50 μm 校准箔片可产生更可靠且可重复的测量值。

高温涂层测量范围可达150°C

使用Surfix®或Surfix® Pro S探头可测量高达150°C的热涂装及新烧结粉末涂层。此时需使用耐热塑料材质的浅褐色接触环（可选配件）。探头应保持原位直至听到声学信号或读数显示，最长不超过0.5秒。每次测量间隔约5秒以确保探头尖端冷却。高温环境下，热态钢与有色金属会改变磁导率和电导率，普通探头可能导致显著测量误差。

Surfix®系列探头使用标准探头（测量范围0.2和1.5 mm）进行测量时，即使在高温表面也不需要校准，因为传感器对渗透性和导电性变化不敏感。

热涂层最高可达300°C

高温接触环可可靠测量高达300°C的热表面。通过安装螺纹接触环，可轻松完成测量探头FN1.5或F1.5（测量范围1.5毫米）的必要改装。该接触环可测量热表面厚度达1000 μm。具体使用方法详见操作说明。

云母铁（铁磁性）

云母铁层具有弱铁磁性。它们主要附着在钢材部件上，能提供强大的防腐蚀保护。因此需要添加粘合剂（以氧化铁小片形式存在）。这些小片通常平行于表面排列，能额外抵御可能渗入层内的腐蚀介质。由于氧化铁具有铁磁性，这些

云母铁层在显示时总会呈现过薄的数值。误差范围可达30%，具体数值取决于氧化铁的浓度。

一般来说，如果使用校准标准（例如带有铁矿涂层的铁板）进行两点校准，那么铁矿涂层的负面影响在测量结果中几乎不会显现出来。为此，您应该使用深度表来测量铁板上的铁矿涂层厚度，或者进行机械差值测量。





19. 基底（有色金属）的电导率对测试结果有何影响？

诸如铝、青铜、铜、黄铜、锌等基材
电导率值补偿

涡流检测方法中，涡流线圈的测试信号与线圈和基体金属之间的距离有关，而该距离等于涂层的厚度，同时测试信号也与非铁金属基体的电导率有关。基底的电导率越大，测头显示的涂层厚度就会比实际值更薄。当然，这种负面影响可以通过在相应基底上进行校准来消除，这与许多涂层厚度测头的推荐操作一致。

在Surfix®电涡流探头（N型）上，测量范围为0.2毫米和1.5毫米时，上述效应不会产生任何影响，因为特殊的电子电路会补偿任何可能的导电性变化。您可以立即从一种金属切换到另一种金属，而无需重新校准。这种补偿对于在镀层轻金属上进行的测量非常有利，因为其确切的合金成分及其电导率是未知的。尽管非铁基材的导电性发生变化，这些仪表始终能准确测量。这种导电性补偿对黄铜、青铜、锌、各种铝合金、铜和银等基材有效。这对应于13至61 m/Ω mm²的导电性范围。



20. 钢材的低磁化率对测试结果有何影响？

非合金钢的测量

低合金钢的测量

硬化钢的测量

不锈钢或奥氏体钢的测量及方法选择

非合金钢的测量

典型的非合金钢包括低碳结构钢（普通建筑用钢），这类钢容易磁化，是磁性测量原理测量涂层厚度的理想基体。纯钢材料可直接进行测量，无需预先校准。只要试样尺寸符合几何标准（第11章《测量对象几何形状对测量读数的影响》），且校准精度达标（第9章《校准模式》），工厂校准即可满足需求。

低合金钢的测量

低合金钢含有少量铬、钒、镍等金属添加剂，以增强机械强度。虽然可以磁化，但其磁导率低于普通钢。采用磁性测量原理可对低合金钢进行涂层厚度检测。无论精度要求如何，在测量前需进行单点或双点校准；若未完成校准，系统会显示读数偏高。

硬化钢的测量

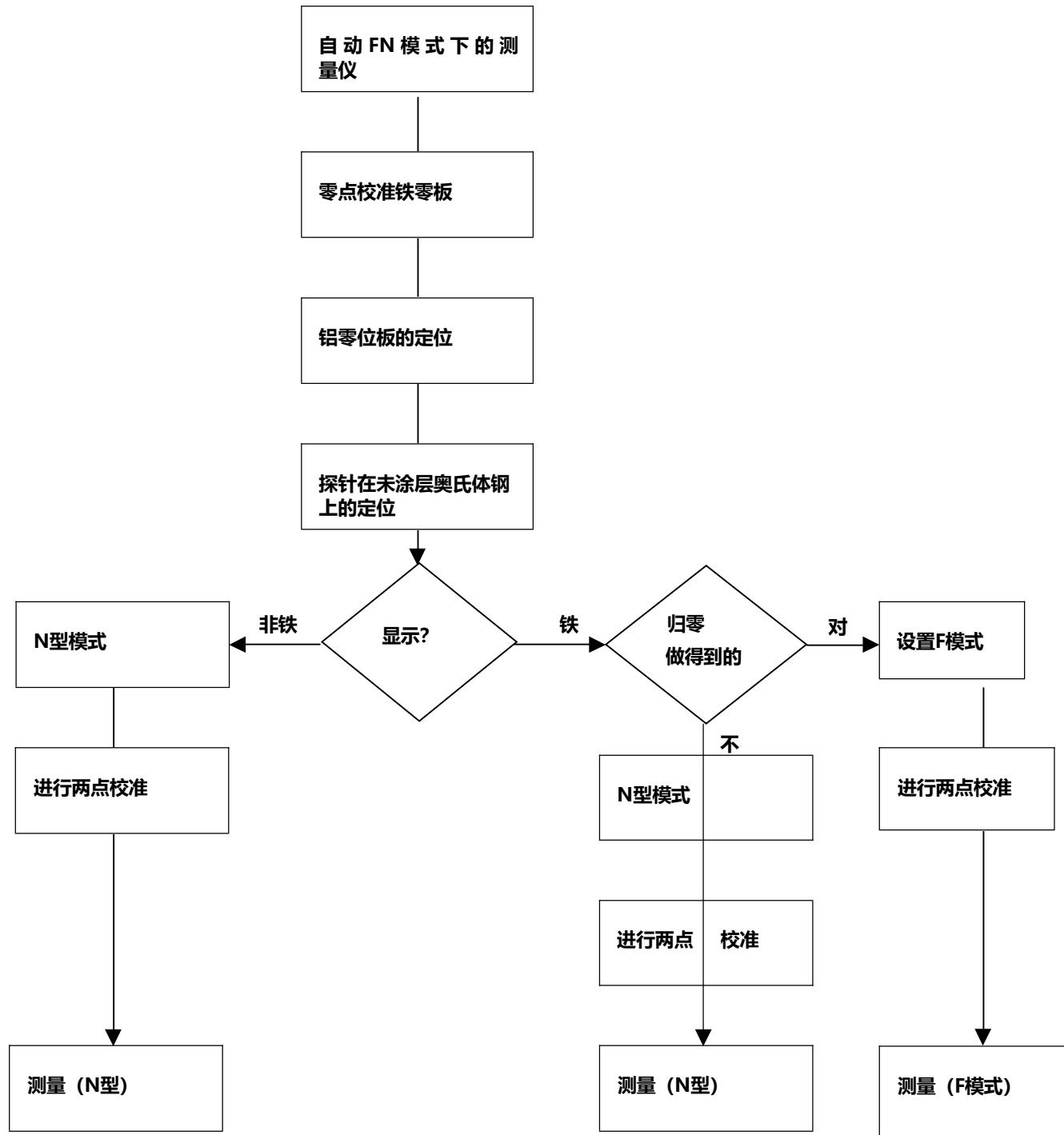
硬化钢是一种高合金钢，含有碳及其他金属添加剂（如铬、钒、镍等）。其可被磁化，但与低合金钢类似，磁导率低于纯钢。采用磁性方法可测量涂层厚度，经校准后显示较高数值，因此可采用单点或双点测量。测量前应进行校准。不同硬度等级会显著影响磁导率，需单独校准。同一工件上也可能存在不同硬度等级。例如剪刀的刃口经过硬化处理，而手柄则未硬化。

不锈钢或奥氏体钢的测量及测量方法的选择

对于多数奥氏体钢而言，其合金含量高低或磁性状态是否支持采用磁感应模式（F模式）或涡流模式（N模式）进行涂层厚度测量，这些特性往往难以立即判断。简而言之，使用FN型双功能探头时，Surfix®测量仪始终适用于检测奥氏体钢表面的非金属涂层，例如油漆、清漆、塑料、珐琅、陶瓷等材料。通过以下流程图可明确需采用的测量方法。



奥氏体钢测量方法的选择



21. 自动基体识别系统 ‘AUTO FN’ 的局限性是什么？

钢表面绝缘层和金属涂层的测量

Surfix® SX-FN1.5测厚仪能轻松区分不同测试样本基材，无论是钢材还是有色金属的涂层，都能精准测量涂层厚度。

不过，当铁磁钢表面同时涂覆油漆等绝缘涂层和锌等有色金属涂层时，其实并没有专门的识别规则。测量时通常采用涡流原理（测量模式N）来检测锌层上的油漆涂层，而磁性原理（测量模式F）则适用于漆层和锌层这两种非磁性涂层。仪表会根据漆层和锌层的厚度自动切换工作模式，无论是模式N还是模式F都能正常运作。

在“自动FN”测量模式下显示的涂层厚度读数可能具有显著误差，不得使用。因此建议采用固定组F模式（磁感应法）测量总厚度，例如钢基底上的涂料+锌层。锌层表面的涂料定位需采用固定N模式（涡流法）进行测量（第14章，采用层状结构，例如“涂锌钢”这种形式，如何对各层涂层的厚度进行无损检测？）

22. 磁干扰和电磁干扰对测量有什么影响？

变压器附近测量

显示器附近的测量

钢质高压杆测量

铁路桥梁钢结构的测量

传输天线附近的测量

用于磁感应和涡流涂层厚度测量的探头由电感线圈系统构成（详见第三章《探头构造与工作原理》）。这些线圈系统同时兼具磁性与电磁特性，因此本质上对所有磁场和电磁场都具有敏感性。当处于此类场强范围内时，涂层厚度的测量值可能出现显著波动，甚至导致检测结果无法显示。

在测量模式F（磁法）中，探头原则上对低频磁场敏感。这类磁场尤其常见于变压器和显示器附近。若在高压杆塔上的钢梁或承载电力列车的铁路桥上
进行测量，此类磁场同样会影响测试结果。

在测量模式N（涡流法）中，探头原则上对高频磁场敏感。此类磁场常见于发射天线附近及手机周边。

由于探头尺寸异常微小，其传感器通常对磁场或电磁干扰场不敏感。FN1.5和FN0.2探头的测量元件为非常小。

若发现仪表读数波动剧烈或完全无读数，请检查是否由上述磁性或电磁场导致。消除此类干扰场影响的唯一方法是移出其作用范围。

23. 探头特性会产生哪些影响？

测量范围起始处的分辨率与测量不确定度

测量范围末端的分辨率与测量不确定度

使用Surfix® 探头（如FN 1.5探头）进行测量时，您会发现可显示厚度小于100 μm、分辨率为0.1 μm 的薄层。例如15.2μm、15.3μm、15.4μm等。当图层尺寸超过1000 μm 时，分辨率将降至2 μm 。

下表显示了测量范围为0.2mm和1.5mm的探头在测量范围下的分辨率：

分辨率[μm]	范围[μm]
0.1	0...100
0.2	100...250
0.5	250...500
1	500...1000
2	1000...1500

测量范围起始处的分辨率与测量不准确性

在测量范围的起始端，测量不确定度“u”主要由测量不确定度的绝对分量决定。

例如：使用探针FN 1.5时，绝对测量误差为 $\pm 1 \mu\text{m}$ （经过一点或两点校准后）

0 μm 处的分辨率是 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ；

0 μm 处的测量不确定度为 $u = \pm 1 \mu\text{m}$ 。

因此，分辨率比测量不确定度小10倍！这是一个非常理想的比率！

测量范围末端的分辨率与测量不确定度

在测量范围的末端，测量不确定度“u”由测量不确定度的相对部分决定（1或3 μm 的绝对误差较小，可忽略不计）。使用探头FN1.5时，这是测量值的+2%或1%（经过一点或两点校准后）。

1500 μm 处的分辨率 $\pm 2 \mu\text{m}$ ；

1500 μm 处的测量不确定度为31 μm 和16 μm 。

因此，该结果是测量不确定度的8倍，或者说16倍！这也是一个非常理想的比率！

可以看出，测量值的分辨率明显小于规定的测量不确定度。这是优质测量仪器的必备条件。

基本规则：测量读数的不确定度绝不能小于测量读数的分辨率。

对于所有测量范围从零开始的涂层厚度计，其测量不确定度 u_m 总是给出绝对值和相对值。没有绝对误差范围的计算结果可能不准确，甚至可能是错误的。

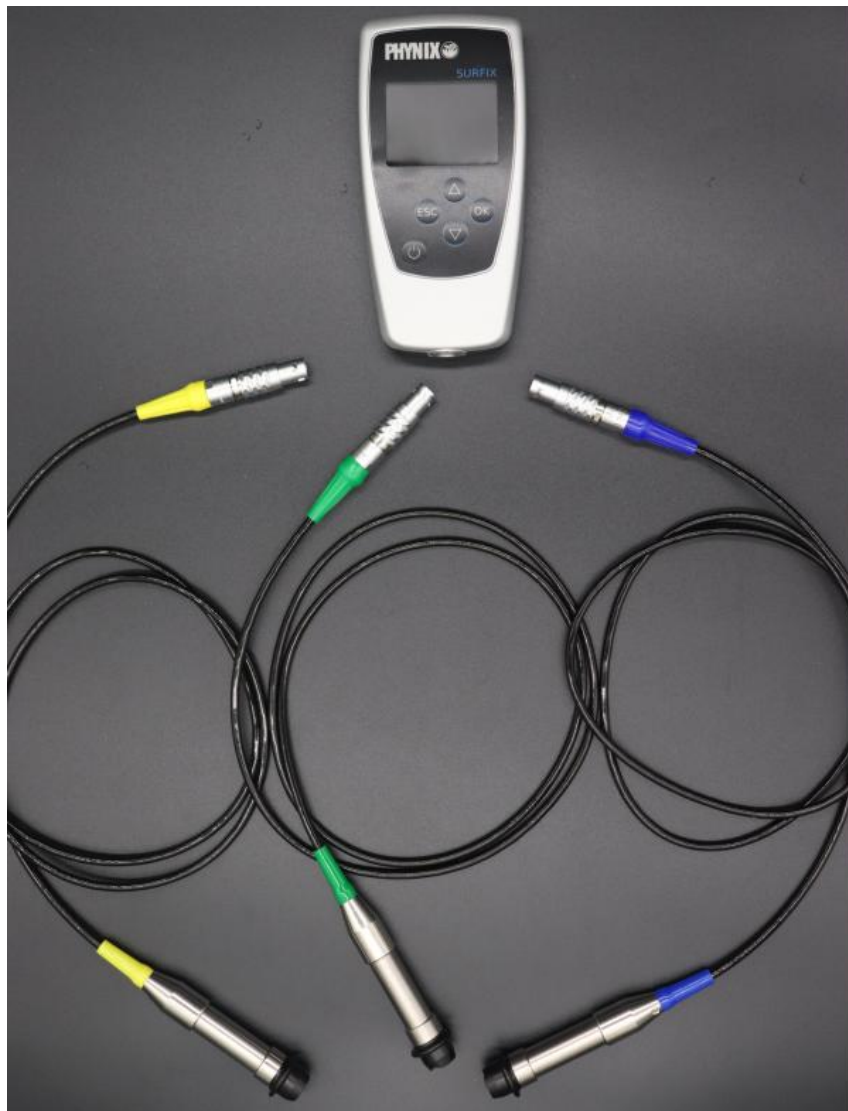
正是这种绝对不确定度值使得薄涂层的测量成为一个问题。

我们可将迄今所述事实归纳如下：

您需为薄涂层测量设定合理限值，因为必须准确判定何种测量不确定度可使测试结果符合您的个人要求。以下要点可能对您有所帮助。

1. 测量薄涂层时，应先进行单点或双点校准。单点校准通常就足够了。测量不确定度 u 将只有 $\pm 1 \mu\text{m}$

2. 将探针缓慢且小心地置于测试样本上，如条件允许，每次均应固定于同一位置。薄涂层受此影响较小，且不会产生凹陷。通过这种方式，您将获得具有较小标准偏差(s)的可重复测量值。根据前文所述，s会增加总测量不确定度。
3. 必须始终牢记，即使测量不确定度允许该量具接受异常高的数值，此类测试结果仍优于无结果。
4. 通过投入更多时间和精力，例如借助探针导引器、使用薄型高精度校准箔（10 μm 箔）以及进行详细统计分析（DIN1319-3，测量技术基本术语），可以提高测试结果。采用这些方法，测量不确定度可远低于± 1 μm。



24. 如何测试涂层厚度测量仪的准确性?

测试准确性

高精度校准

制造商检验合格证书

测试准确性

为验证涂层厚度测量仪的准确性，采用精密标准进行检测（箔材：10 μm 至 500μm；板材：500 μm 以上至10mm）。测量工作采用经认证的长度测量系统进行。厚度小于100 μm 的标准件测量不确定度为 $U=\pm 1 \mu\text{m}$ ；对于较厚的箔片或板材，测量不确定度为 $U=\pm 1\%$ 。标准件的真实厚度值在95%置信度下（符合ISO推荐标准），其测量不确定度范围为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 或 $\pm 1\%$ 。PHYNIX 提供的所有标准件均采用可追溯至德国联邦共和国国家长度标准（PTB）的测量系统进行检测。

高精度校准

标准品不仅可用于涂层测厚仪的检测，还可用于其校准（详见箔片校准操作指南）。为确保测量精度，校准时应选用厚度与待测值相近的标准品（范围100%至150%）。

25. Surfex[®]涂层测厚仪具有哪些记忆功能?

单值

统计值

公差值

校准值

根据所选测量模式（参见说明书），上述部分或全部数值均可存储。

单值

具有存储功能的测量仪可在每次测量后自动保存测量读数。保存的数值可随时显示、传输至电脑或打印。最多可保存10,000次单次测量读数（Surfix[®] Pro S）。

统计值

除测量读数外，大多数仪表还可保存统计数值并显示。

这些是：

N 测量读数次数

\bar{x} 读数平均值

s 标准差

max 最大单值

min 最小单值

作为可选方案，可从预设的测量读数块（5至20个测量读数）中任一区块计算出块值统计量。

耐受值

输入上下限公差值后，当公差值超出或未达到时，系统会发出提示音。此时打印输出中将标注对应的测量读数。使用Surfix® Pro时，输入公差值后，可计算cp和cpk值，并将其保存为个体统计量以及块值统计量。

校准值

对于所有Surfix®检测仪，校准值将保留直至被覆盖或删除。

Surfix® Pro S的特殊优势在于可自动保存多达250种不同应用的校准值。这意味着当未来需要再次进行测量时，无需重新校准。只需调用仪器中保存的校准值，即可立即开始测量（操作说明）

26. 如何将Surfix®检测仪中存储的数据传输至外设？

使用FixSoft和ProSoft进行PC数据传输

将内容转至便携式打印机- PrintFix

FixSoft和ProSoft程序专为将保存的测量值传输至个人电脑而开发。

FixSoft是一款用于量具系列 **PocketSurfix®**、**Surfix® SX**、**Surfix®**和 **Surfix® Pro S** 的简易传输软件程序。

测量值（包括统计数据）会与直方图和趋势展示一起，被传输到微软电子表格程序Excel中的预制模板（用于整合测量值的模板）中。随后可输入具体客户数据，如日期、批次数据、公司名称和检验员等。熟悉Excel的用户可修改该模板。

ProSoft 是一款专为 **Surfix® Pro S** 规格系列设计的纯英语实用数据转移程序。**ProSoft** 是一款专为数据管理和行政管理设计的数据库程序，能够管理 **Surfix® Pro S** 中保存的单个或全部测量序列数据。单个测量序列以选择列表形式显示，所选文件会在独立窗口中呈现，同时显示各测量序列的测量值。

作为其统计量、限值和偏移值。直方图通过 ± 3 个标准差范围内的测量值呈现。趋势图显示所有测量值相对于平均值的变化趋势。测量值可显示为 μm 或密耳。原始数据保持不变。

将内容转至便携式打印机- PrintFix

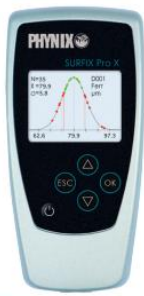
PrintFix 是一款便携式热敏纸打印机，配有集成红外接口。**Surfix®**测量仪中保存的测量数据无需连接电缆，即可在现场或后续办公室中可靠打印。涂层厚度测量仪（参见操作说明）中保存的数据（包括统计值）在发出打印命令后会立即打印。

作者：Dipl. Ing. Hans F. Nix

翻译修订：邱建康

2026-1-5

产品组合一览



- Surfix® Pro X, SX/EX**
- + 高分辨率 彩屏显示
 - + 蓝牙
 - + 超大数据存储

专业型仪器，
适于各种应用



- Pocket-Surfix® X**
- + 数据存储
 - + USB 2.0
 - + 背光LED显示屏

紧凑型设计，
功能多样



- Surfix® easy X**
- + 在线统计
 - + 校准功能
 - + 背光LED显示屏

小巧如手机，
灵活操作



PHYNIX
SENORTECHNIK

德国菲尼克斯系列涂层测厚仪