

电容式传感器操作与优化

Contents

- 电容和距离-2
- 聚焦电场-3
- 目标大小的影响-3
- 测量范围-3
- 多通道感应-3
- 目标材料的影响-4
- 测量非导体-4
- 最大限度地提高精确度-5
 - 目标大小-5
 - 目标形状-5
 - 表面光洁度-5
 - 平行-6
 - 环境-6
- 工厂校准-7
- 定义-8
 - 灵敏度-8
 - 灵敏度误差-8
 - 偏移误差-8
 - 线性度误差-8
 - 误差范围-9
 - 带宽-9
 - 分辨率-9

适用设备：

电容式位移测量系统。

应用：

所有电容测量。

概要：

该《技术说明》回顾了电容传感的概念和理论，以帮助优化电容式传感器的性能。它还对 Lion Precision 文献和手册中出现的电容传感术语进行了定义。

电容和距离

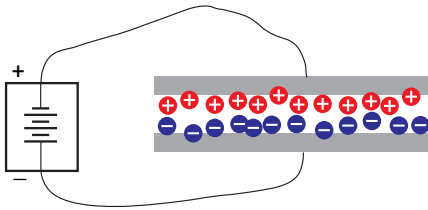


图 1

对导电物体施以电压导致正负电荷分别聚集在各物体上。这就在物体间的空间形成了电场。

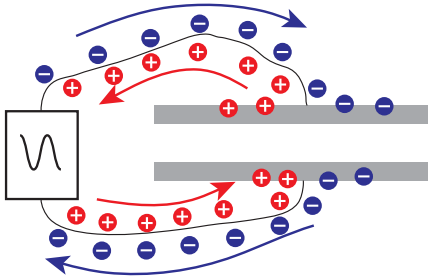


图 2

施以交流电压引起正负电荷在物体间来回移动，生成可被传感器探测到的交流电。

面积 x 电介质 距离

图 3

电容由面积、距离和电介质（导体之间的材料）决定。面积或电介质增大则电容增加，距离增大则电容减小。

法拉（电容单位）

电容的测量单位为法拉 (Farad)，以在 19 世纪中叶于电学和磁学领域进行开拓性试验的 Michael Faraday 命名。

一法拉是一个相当大的单位。在电子电路图中，大多数电容器都以微法拉为单位测量 (μF , 10^{-6})。电容式传感器感应到的电容变化大约为 1 毫微微法拉 (fF , 10^{-15})。

无接触式电容传感器的工作原理是测量被称为电容的电性能之变化。电容这一术语描述两个相距一定距离的导电物体如何对施用于它们的电压差作出反应。当对导体施以电压后，导体之间就会形成电场，该电压可令正负电荷分别在每个物体处聚集（参见图 1）。如果电压的极性改变，正负电荷也会随之改变。

电容式传感器使用交流电压，可令电荷不断地改变位置。电荷的运动生成了可被传感器探测到的交流电（参见图 2）。电流的大小由电容决定，而电容的大小则是由导电物体的面积和两者之间的距离所决定的。面积较大、相距较近的物体相比于面积较小、相距较远的物体，可生成更大的电流。电容还受物体之间非导电物体类型的影响。

严格来说，电容的大小与导体的表面面积以及导体间材料的介电常数直接成正比，与导体间的距离成反比（参见图 3）。

在典型的电容传感应用中，探头或传感器是导电物体之一，而目标物体则是另一个。（使用电容式传感器感测塑料和其他绝缘体将在非导电目标部分予以讨论。）传感器及目标的大小、以及两者之间的材料都假设为常量。因此，电容的任何变化都是因为探头和目标之间的距离发生了变化。电子器件已经过校准，以根据电容的变化生成具体的电压变化。这些电压经过测量，用于代表距离的具体变化。针对一定量的距离变化所产生的电压变化量被称之为灵敏度。一般的灵敏度设置为 1.0 伏/100 微米。这说明，每 100 微米的距离变化会恰好产生 1.0 伏的输出电压变化。利用此标定方法，+2 伏的输出电压变化说明目标向探头移近 200 微米。

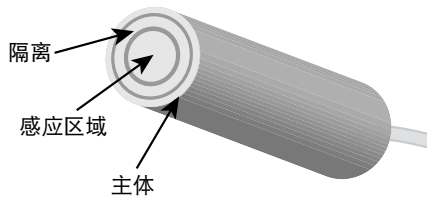


图 4

电容式传感器探头组件

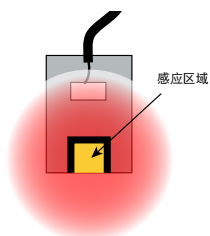


图 5

未隔离的感应区域电场剖面图

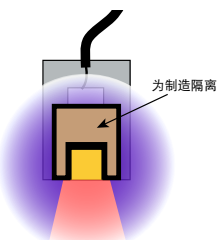


图 6

塑造感应区域电场之隔离区域的剖面图

感应电场覆盖大于探头感应区域 30% 的区域。

一般来说，探头可发挥作用的最大距离大约是传感器直径的 40%。普通的校准通常将间距值保持为大大低于这一值。

对同一目标使用多个探头需要励磁电压同步。将一个驱动器配置为主控器、将另一个配置为被控器可达成以上要求。

聚焦电场

当对导体施以电压后，电场会从导体的各面向外散射。在电容式传感器中，传感电压施用于探头的感应区域（参见图 4 和 5）。为精确测量，感应区域的电场需要置于探头和目标之间。如果允许电场蔓延至其他物体或目标的其他区域，那么其他物体的位置改变将被按照目标位置改变的方式测量。一种称为“隔离”的技巧被用于防止此类情况的发生。为制造隔离，感应区域的后部和侧面都被与传感区域电压相同的另一个导体所包围（参见图 4 和 6）。当对感应区域施以电压后，利用单独的电路对隔离施以同样的电压。由于感应区域和隔离所受的电压相同，因此它们之间不会产生电场。探头侧面或后方的任何其他导体会对隔离、而非感应区域形成电场。只有感应区域前方未受隔离的区域允许和目标形成电场。

目标大小的影响

当选择一个探头用于特定的应用时，目标大小是一个主要的考虑因素。当以隔离方式关注感应电场时，电场会形成轻微锥形场，它是感应区域的射影。在标准校正的情况下，最小的目标直径为感应区域直径的 30%。探头距离目标越远，最小目标尺寸值越大。

测量范围

探头发挥作用的范围是感应区域大小的一个函数。感应区域越大，测量范围也就越大。由于驱动器电子器件在探头中被设计成拥有固定的电容。因此，探头越小就越应靠近目标，以达到想要的电容值。电子器件在校准器件可以调节，但也存在对调整范围的限制。一般来说，探头可发挥作用的最大距离大约是感应区域直径的 40%。普通的校准通常将间距值保持为大大低于这一值。

多通道感应

通常，多个探头会同时对一个目标进行测量。由于系统测量不断变化的电场，因此每个探头的励磁电压必须同步，否则探头会相互干扰。如果它们不同步，一个探头将试图增大电场，而另一个则努力减小它，其结果将是一个错误的读数。

驱动器电子器件可以被配置为主控器或被控器。主控器为被控器设置了多通道系统同步。

电容式传感器可测量以下全部导体：黄铜、钢铁、铝、甚至是咸水，诸如同类。

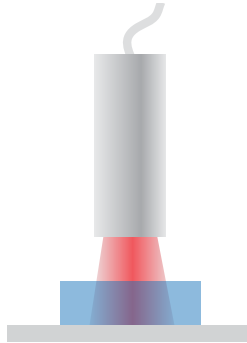


图 7

可通过将电场穿过非导体、并直达其后方的固定导电目标这一方式来测量非导体



图 8

如果非导体后方没有导电目标，边缘电场可能会穿过附近的非导体形成，以允许感应到非导体

目标材料的影响

感应电场正在寻求一个导电表面。只要目标是一个导体，电容式传感器就不会受到具体目标材料的影响。由于感应电场在导体表面停止，因此目标厚度不影响测量。

测量非导体

电容式传感器最经常被用于测量导电目标位置的变化。但电容式传感器也可以有效测量非导体的存在、密度、厚度和位置。塑料等非导电材料和空气相比有不同的介电常数。介电常数决定着非导电材料如何影响两个导体之间的电容。当一个非导体插入探头和固定的参考目标之间时，感应场穿过材料到达接地目标（参见图 7）。非导电材料的存在改变介电常数，并进一步改变电容。电容会根据材料的厚度或密度而改变。

在探头之前设置参考目标并非总是可行的办法。通常，一种称之为“边缘”的技巧也可用于测量。如果在探头前方没有直接的导电参考，则感应电场将会绕回探头本身。这种现象称之为边缘电场。如果一种非导电材料靠近探头，那么它的绝缘体将会改变边缘电场；这种方法可用于感应非导电材料。

传感器对非导电目标的灵敏度与材料的介电常数成正比。下表列出了部分常见非导电材料的介电常数。

材料	介电常数相对 (ϵ_r)
真空	1.0
空气	1.0006
环氧树脂	2.5-6.0
聚氯乙烯	2.8-3.1
玻璃	3.7-10.0
水	80.0

最大限度地提高精确度

现在我们已经讨论了电容式传感工作的基本原理，我们可以在使用电容式传感器时构想出可最大限度地提高效力并减少误差的策略。精确度需要测量在与传感器校准相同的条件下实施。无论是在工厂中校准的传感器，还是在使用中校准的传感器，可重复的结果来源于可重复的条件。如果我们仅希望距离影响测量结果，那么所有其他变量都必须为常量。以下部分将讨论常见的误差来源以及如何令误差最小化。

目标大小

除非另有说明，工厂校准采用的是远大于传感区域的平整导电目标。经过此种方式校准的传感器在测量大于传感区域 30% 的平整目标时能够得出精确的结果。如果目标区域过小，电场将会开始环绕目标的侧面，这意味着电场延伸范围将超过校准时的范围，并且会测量更远的目标（参见图 9）。这种情况下，探头就必须更加接近目标，以获得相同的零点。由于探头和目标之间的距离与原始校准时两者间的距离不同，误差就会出现。探头不再测量平整表面也会导致误差的出现。

如果探头与目标之间的距离被视为 Z 轴，那么较小的目标就会导致额外的问题，那就是传感器会对探头的 X 和 Y 坐标敏感。在不改变间距的情况下，如果探头在 X 或 Y 轴移动，输出就会发生明显改变，因为更少的电场去向目标中心，而更多的电场去往侧面。

目标形状

形状也是一项考虑因素。由于探头根据平整目标校准，因此测量具有弯曲表面的目标将会产生误差（参见图 10）。由于探头将测量至目标的平均距离，位于零电压时的间距将于系统校准时的这一数值有所不同。电场针对弯曲表面的不同反应行为也会造成误差。如果必须测量非平整目标，那么系统可以根据最终的目标形状施以工厂校准。或者，在将平整校准应用于弯曲表面时，可利用倍增器修正测量值。

表面光洁度

当目标表面不是完全光滑时，系统将会根据被传感器光点尺寸覆盖的区域取平均点（参见图 11）。当探头在目标表面移动时，测量值会发生变化，因为目标表面的平均位置会随探头移动而变化。此类误差的大小取决于表面不规则的性质和对称性。



图 9

较小的目标导致感应区域扩展至目标侧面，致使出现误差



图 10

弯曲的目标将需要探头更加靠近，并且灵敏度将会受到影响

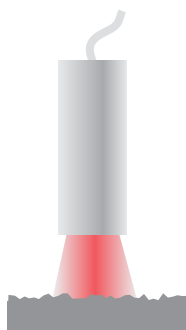


图 11

粗糙表面将趋向使用平均点，但可能在目标的不同位置生成不同的结果，尤其是在使用微小探头的情况下



图 12
缺少平行将导致误差

更多的温度相关误差是源于测量固定装置的膨胀和缩小，而非探头或电子器件的漂移。

平行

在校准过程中，传感器表面与目标表面是平行的。如果探头或目标出现任何明显的倾斜，电场命中目标的光点形状就会伸长并改变电场与目标之间的相互作用（参见图 12）。电场不同的活动行为也会造成测量误差。在极高的分辨率下，即使是倾斜几度也能造成误差。在针对测量设计固定装置时，必须将平行因素考虑在内。

环境

由于温度保持在 22°C - 35°C (72°F - 95°F)，Lion Precision 电容式传感器能够将漂移抵消至最小程度。在此温度范围内，误差小于全量程的 0.5%。

另一个更加棘手的问题是，几乎所有的目标和固定装置材料都在此温度范围内显示出较大的膨胀和收缩现象。当此类情况发生时，测量值的变化就不再是测量器误差。它们属于目标和探头间距离的真正变化。细致的固定装置设计对最大限度地提高精确度很有帮助。

空气的介电常数受湿度影响。介电常数随着湿度的增加而增大。湿度还可与探头制造材料相互作用。实验数据表明，相对湿度 (RH) 从 50% 至 80% 的改变可造成全量程 0.5% 的误差。

Lion Precision 探头材料经过精挑细选以令此类误差最小，与此同时，在需要最大精度的应用中，温度和湿度控制也是标准惯例。国际标准详细指出，测量应在 20°C 或精确至 20°C 时的“真实长度”条件下实施。

工厂校准

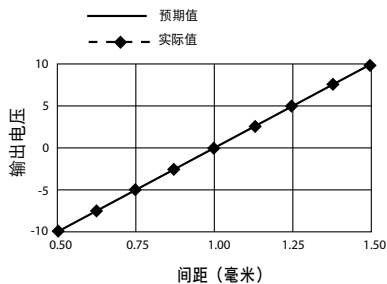
Lion Precision 的校准系统设计是与空气轴承主轴和滑轨设计领域的全球领先企业 Professional Instruments 合作实施的。其最新设计灵感来源于精度运动控制电子器件，而该器件的定位精度小于 0.012 微米不精确度。

校准系统定期接受 NIST 可追踪激光干涉仪的验证。校准过程中使用的测量设备（数位表和信号发生器）也根据 NIST 可追踪标准进行校准。针对每件此类设备的校准信息都被归档保存，以方便可追踪性验证。

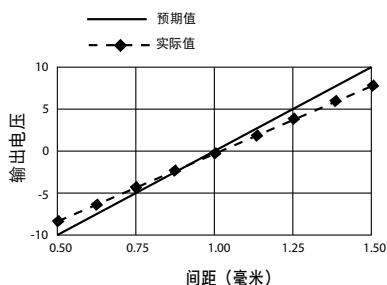
技师利用校准系统来精确定位与探头间距离已知的校准目标。校准系统收集位于这些点的测量值，并且分析其灵敏度和线性度。数据的分析用于调整为满足订单规格而被校准的系统。

校准灵敏度和线性度后，系统被置于环境舱中，该环境舱的温度补偿电路经过校准可令测量值在 22°C 至 35°C 这一温度范围内的漂移最小化。可影响分辨率的带宽和输出噪声值也被予以测量。

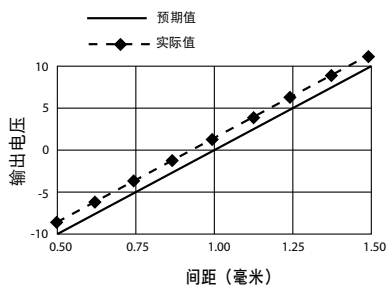
校准完成后，会生成校准证书。该证书同订购的系统一起运送，并被归档保存。校准证书符合 ISO 10012-1 中第 4.8 章的规定。



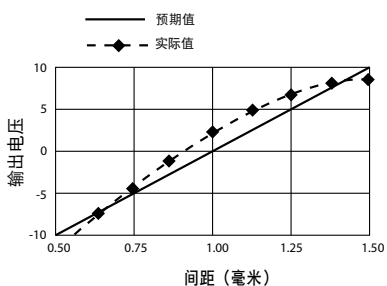
灵敏度 - 直线的斜率为灵敏度；在此例中为 1 伏/0.05 毫米。



灵敏度误差 - 实际测量的斜率偏离理想斜率。



偏移误差 - 一个定值增加到全部测量中。



线性度误差 - 测量数据不在直线上。

定义

灵敏度

灵敏度表明输出电压受目标与探头间距离改变而变化的幅度。一般的灵敏度为 1 伏/0.1 毫米。这表明目标与探头间的距离每变化 0.1 毫米，输出电压就会改变 1 伏。当针对不同的间距大小标绘出输出电压时，得出的直线斜率就是灵敏度。

灵敏度误差

系统灵敏度在校准过程中设定。当灵敏度偏离理想值时，这一现象就被称为灵敏度误差、增益误差或刻度误差。由于灵敏度为直线斜率，因此灵敏度误差通常以斜率百分比的形式呈现；将理想斜率与实际斜率对比。

偏移误差

当将定值增加到系统的输出电压上时，就会出现偏移误差。电容测量系统通常在设置阶段被“归零”，消除任何来源于原始校准的偏移误差。尽管偏移误差会在系统归零后改变，但误差却将体现在测量值上。温度变化是偏移误差出现的主要因素。Lion Precision 系统对温度相关的偏移误差进行补偿，以将误差保持在小于 0.04%F.S./°C 的范围内。

线性度误差

灵敏度可在数据的任意两点间发生微小的变化。这种变化的累积影响被称为线性度误差。线性度规格是指对输出值距离直线远近的测量。为计算线性度误差，校准数据将与最符合这些点的直线相比较。这一参考直线通过利用被称之为“最小二乘方拟合”的校准数据计算得来。位于校准线上、并距离理想直线最远的点误差值就是线性度误差。线性度误差通常以全刻度的百分比表示。如果最远点的误差为 0.001 毫米，并且校准的全刻度范围是 1 毫米，则线性度误差为 0.1%。

请注意，线性度误差并不说明灵敏度误差。它只是对直线平直度的测量，而不是对直线斜率的测量。具有较大灵敏度误差的系统可能是完全线性的。

间距 (毫米)	预期 值 (VDC)	实际 值 (VDC)	误差 (毫米)
0.50	-10.000	-9.800	-0.010
0.75	-5.000	-4.900	-0.005
1.00	0.000	0.000	0.000
1.25	5.000	5.000	0.000
1.50	10.000	10.100	0.005

图 13

误差范围是校准范围内的最坏情况误差。在此例中，误差范围是 ± 0.01 。

快速响应的输出在用于伺服控制反馈系统时可令相位容限最大化。

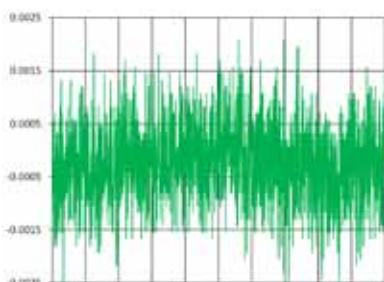


图 14

来源于 15 千赫传感器的噪声

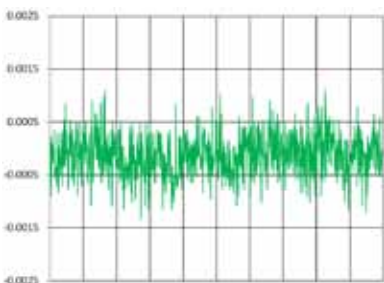


图 15

来源于 100 千赫传感器的噪声

误差范围

误差范围负责说明线性度和灵敏度误差的结合。它是在校准范围内对最坏情况绝对误差的测量。误差范围的计算方式是将位于某些具体间距值的输出电压与其预期值相比较。比较得出的最坏情况误差列于系统的误差范围上（参见表 13）。

带宽

带宽的定义为输出降至 -3 dB 时的频率。该频率也被称为截止频率。信号电平上 -3 dB 的下降相当于实际输出电压下降 70%。在带宽为 15 千赫的情况下，低频 ± 1 伏的改变仅会导致电压发生 ± 0.7 伏的变化。

除感应高频运动外，快速响应的输出在用于伺服控制反馈系统时可令相位容限最大化。一些驱动器提供可选择的带宽，以获得分辨率或反应时间的最大值。

分辨率

分辨率是一个系统能够进行的最小可靠测量值。测量系统的分辨率必须优于测量系统所需的最终精确度。如果您需要了解 0.02 微米以内的测量值，那么测量系统的分辨率必须优于 0.02 微米。

分辨率的主要决定因素为电噪声。电噪声出现于输出电压中，致使输出值发生微小的瞬时误差。即使在探头/目标间距为绝对常量时，驱动器的输出电压也会出现微小、但可测量的噪声，可能说明间距正在变化。此噪声为电子元件所固有，只可能尽力减小，但不可能被消除。

如果一个驱动器的输出噪声为 0.002 伏、且敏感度为 10 伏/1 毫米，则它的输出噪声为 0.000,2 毫米（0.2 微米）。这说明，在任何瞬时上，输出都有可能出现 0.2 微米的误差。

输出噪声值的大小与带宽直接相关。一般来说，噪声在大范围的频率上均匀分配。如果较高的频率在输出前被过滤，就会出现噪声更少、分辨率更佳的结果（参见图 14 和 15）。在检查分辨率规格时，了解该规格适用的带宽十分重要。