

# 高温叶尖间隙和 叶片振动监测系统

*CapaciSense*<sup>™</sup>

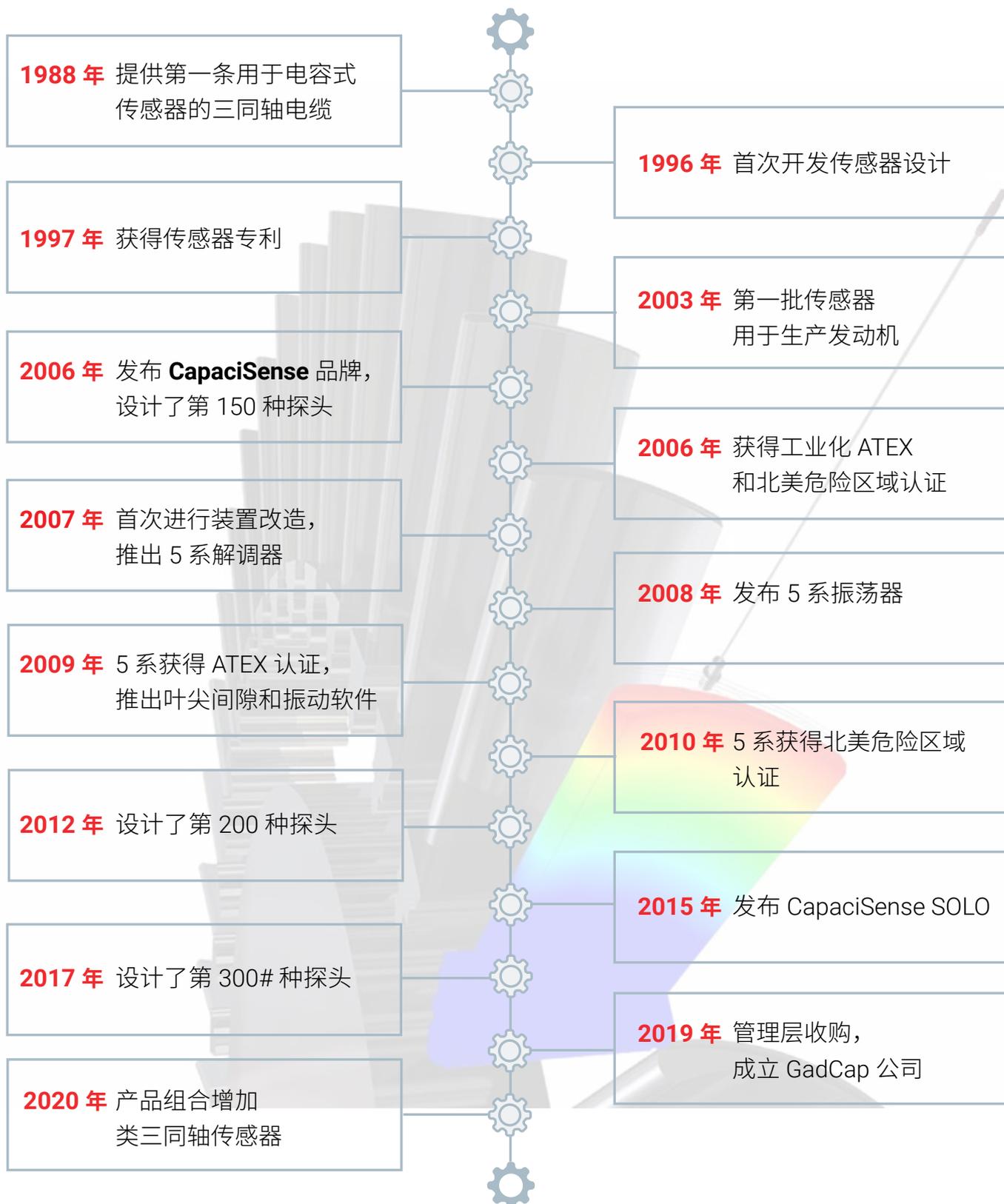
By



# 历史

20 世纪 80 年代，在高温矿物绝缘电缆市场领导者 Pyrotenax 的支持下，我们开发了 **CapaciSense** 系统。**CapaciSense** 产品现已成熟，变成完整的系统和服务包，广泛应用于全球发电和航空航天工业。**CapaciSense** 传感器在极端条件下的寿命长达数年，能够连续监测压气机和涡轮的各级，因此备受青睐。

尽管这些年来我们加入过多家公司，但是在这些变化中，唯一不变的是 **CapaciSense** 系统的设计、制造和支持工程师。他们在 GadCap 技术解决方案方面拥有数十年的经验。



# 目录



## 目录

---

- 第 2 页 历史
- 第 3 页 目录
- 第 4 页 公司简介
- 第 5 页 应用领域
- 第 6 页 选择 **CapaciSense** 系统的理由
- 第 8 页 **CapaciSense** 的工作原理
- 第 10 页 传感器和电缆组件 (探头)
- 第 11 页 测量连续表面的电子设备
- 第 12 页 测量叶片的电子设备
- 第 14 页 软件
- 第 15 页 服务与支持

# 公司简介

## 监测运行中的涡轮叶片，即使是高温运行

GadCap **CapaciSense** 系统结合叶尖间隙和振动监测，使用高带宽电子设备和先进的涡轮传感器提供两套数据。传感器（探针）能够承受高达 1400°C/2552°F 的温度，**CapaciSense** 系统可监测高温和连续运行的涡轮。

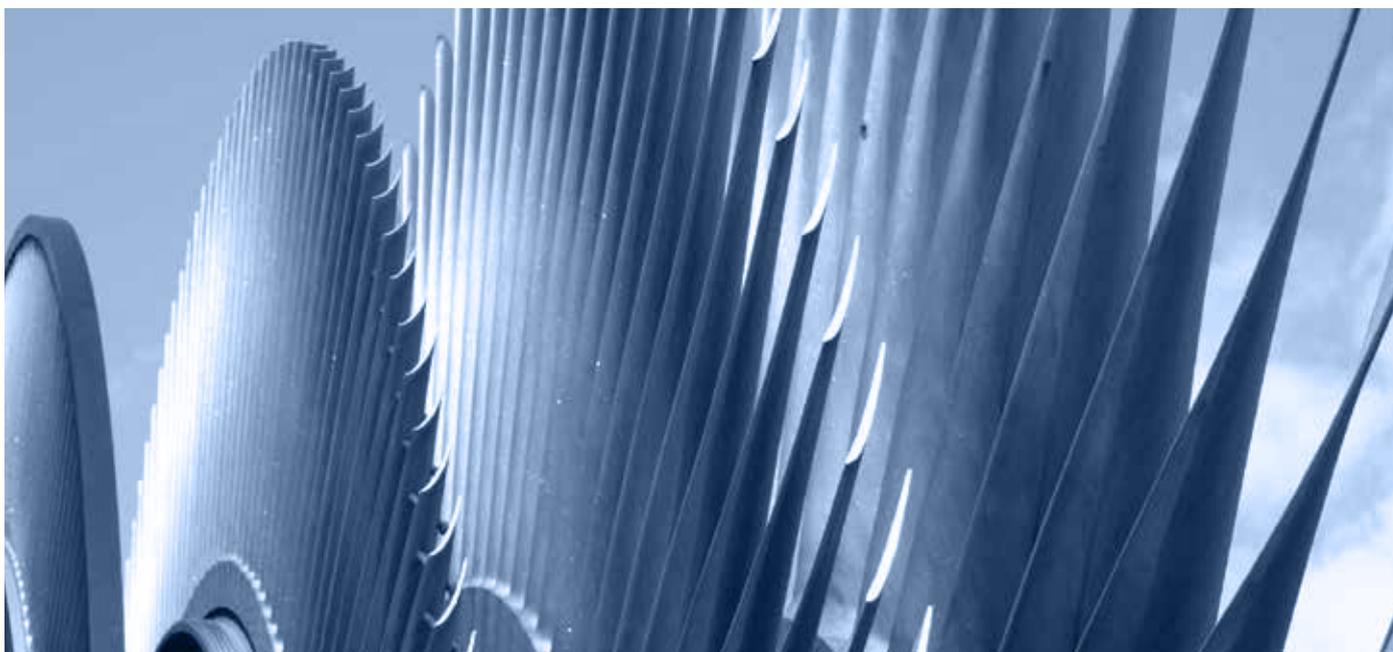
**CapaciSense** 状态监测系统相当于通过一个虚拟窗口来观察涡轮内部的运行情况，具有以下功能：

- 提供准确的实时数据，帮助实现更小的间隙；优化机器效率，降低燃料成本
- 在热重启期间，监测叶片和机匣的热膨胀差异，防止叶片摩擦造成叶尖损坏
- 通过叶尖定时监测振动，提前预警问题或潜在故障，防止出现代价昂贵的意外停机，甚至灾难性故障

**CapaciSense** 系统用于发电和航空航天工业的燃气轮机，但也适用于传统接近探针不能满足环境需要的其他应用。

**CapaciSense** 系统以电容理论为基础，包含传感器、安装于涡轮上本地电子设备、远程电子设备以及带有分析软件的控制和处理模块。

本文简要介绍了 **CapaciSense** 的功能。



# 应用领域

## 发动机设计验证

在设计燃气轮机时，无论是发电还是航空航天工业，效率都是一个至关重要的驱动因素。燃料效率越高，意味着运营成本越低，这是选择涡轮的主要考虑因素。全球大多数领先的涡轮开发商都使用我们的系统进行高温下叶尖间隙与叶冠间隙的设计验证，取代原有的技术。

通过我们的 **CapaciSense** 系统，涡轮机设计师可在发动机运行的各个阶段获得发动机样机叶尖间隙的实时图像。

## 运行中的发动机

一些最高效的发动机采用自适应间隙控制，在运行时优化叶尖间隙。**CapaciSense** 可用于提供驱动这些系统所需的宝贵数据。

一些全球最大发电涡轮机的设计师选择安装我们的状态监测系统，持续监测叶尖间隙和振动。航空航天客户也在飞行测试发动机上使用 **CapaciSense**，这证明它可以监测航空发动机状态。

如果您负责运营商发动机的保险，安装 **CapaciSense** 系统可让您更加确信资产的正常运行，以及防止热重启造成潜在损坏。

## 翻新改造

因为停机维修代价高昂，所以必须尽量减少停机维修，并在了解当前发动机状况的情况下适时进行。加装 **CapaciSense** 系统后，用户可提前获知叶片摩擦或振动导致的潜在叶片故障。根据发动机运行的这种额外信息，可确保安全进行热重启，因为知道叶片和机匣的热膨胀差异不会导致可能引起昂贵修理的叶片摩擦。

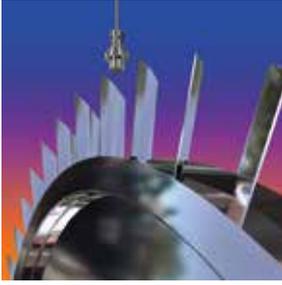
经过欧洲和北美的批准，我们的SOLO系统可以在危险区域安全使用。对于使用翻新涡轮的用户而言，翻新涡轮将带有更多的状态监测传感器进行预测性维护或在“近乎摩擦”的条件下检查叶片，这情况下设备能在危险区域里工作极为重要。

## 非燃气轮机

虽然 **CapaciSense** 系统主要应用于涡轮机，但也可用于传统系统无法满足要求的相近应用，例如燃气密封间隙、涡轮增压器等叶轮或活塞间隙测量。



# 选择 CapaciSense 系统的理由



## 提高可靠性，降低维护成本

提供实时数据，对潜在问题发出提前预警信号，帮助做出正确决定，避免出现代价昂贵的意外停机，甚至灾难性故障。

涡轮对叶尖摩擦非常敏感，这可能是发生故障的一个原因。热重启期间，我们的叶尖间隙功能监测叶片和机匣的热膨胀差异，所提供的信息有助于预防叶片摩擦引起的叶尖损坏。

叶尖定时功能监测叶尖的到达时间，利用它计算叶片偏转，识别振动。



## 改进输出和效率

由于发动机内部温度很高，我们的传感器设计用于在高达 1400°C/2552°F 的温度下工作。还可用于测量涡轮级叶片间隙，这是一个非常重要的因素，因为这意味着可以监测整个发动机，而不仅仅是压缩机低温区域。这样增加了单独控制各级的可能性，并优化整个涡轮机，而不仅仅针对一个区域。

因为涡轮机的燃料效率直接受到间隙大小的影响，所以设计师和制造商利用实时输出，将工作涡轮机的间隙调整到最小，从而达到更高的燃料效率。



## 适合危险区域

CapaciSense SOLO具有欧洲和北美危险区域认证（ATEX和IECEX）。SOLO本身必须位于安全区域，但可以驱动长达20米（65.6英尺）的电缆进入危险区域。



## 一个传感器同时完成叶尖定时和间隙测量

**CapaciSense** 系统可通过一个采用最新技术的传感器同时测量叶尖间隙和叶尖定时。叶片通过信号传统上只能提供间隙信息，但随着高速电子设备和软件的应用，现在能够分辨叶片到达时间。

测量叶片疲劳的传统方法包括应变测量和光学叶尖定时测量。虽然应变能提供准确的信息，但它们只为装有应变片的叶片提供信息，而且这些应变片不适合生产环境。安装它们甚至会改变叶片的振动特性。

光学传感器可提供出色的叶尖定时数据，但只能提供短期定时数据，因为光学元件很容易雾化。使用技术已经成熟的 **CapaciSense** 间隙传感器，可获得叶片振动的数据，无需安装额外的仪表。

## 持久耐用

对于状态监测应用，传感器需要在较长时间内保持最佳性能。**CapaciSense** 传感器久经考验，非常耐用。右上图是在定期检修期间拆除的四只传感器，它们在世界最大的涡轮机之一的最热涡轮区域内连续运行多年。为了清除沉积的燃烧产物，其中一只传感器经过抛光，图片显示它仍然接近原始状况。所有 **CapaciSense** 传感器都有获得专利的完全防脱落部件，这可以限制传感器碎片进入发动机的风险，即使传感器损坏，也不影响发动机的安全。

## 值得信赖的历史

自 1996 年开始研发以来，我们的系统已被全球燃气轮机制造商成功用于验证极端环境下的叶尖间隙。

## 定制解决方案

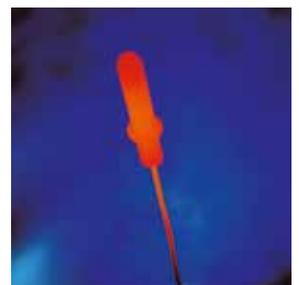
**CapaciSense** 团队为每个项目提供全面的设计和开发服务，满足您的应用要求。我们根据您的使用环境定制传感器：

- 极端温度 (1400°C/2552°F)
- 温度循环
- 振动
- 潮湿（包括在线水洗）

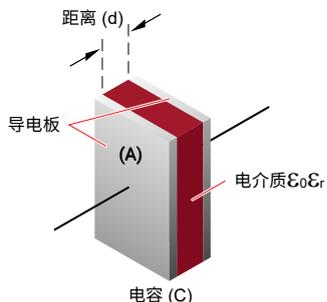
在提供解决方案时，我们将进行校准盘的设计和制造，以精确复制实际的叶尖轮廓，并提供传感器校准和完整的安装服务。我们的目标不是提供部件，而是提供完整的解决方案。

## 更加便捷

在推出 5 系时，除了改善信号质量，我们还提供从振荡器到解调器的校准下载，以及确认电子设备是否接入正确通道的功能。**CapaciSense** SOLO 则更胜一筹，校准数据现在存储在探针本身上。**CapaciSense** 探针可插入任何 SOLO 设备测量间隙，无需重新校准或评估校准数据。



# CapaciSense 的工作原理



$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

其中：

C = 电容

$\epsilon_r$  = 介电常数（在此应用中为常数）

$\epsilon_0$  = 真空介电常数（常数）

A = 重叠电极面积（在此应用中为常数）

d = 电极间距

因为 C 与 1/d 成正比，所以测量 C，即可计算出 d。

CapaciSense 是一种非接触式测量系统，通过电容检测物体的距离和到达时间。

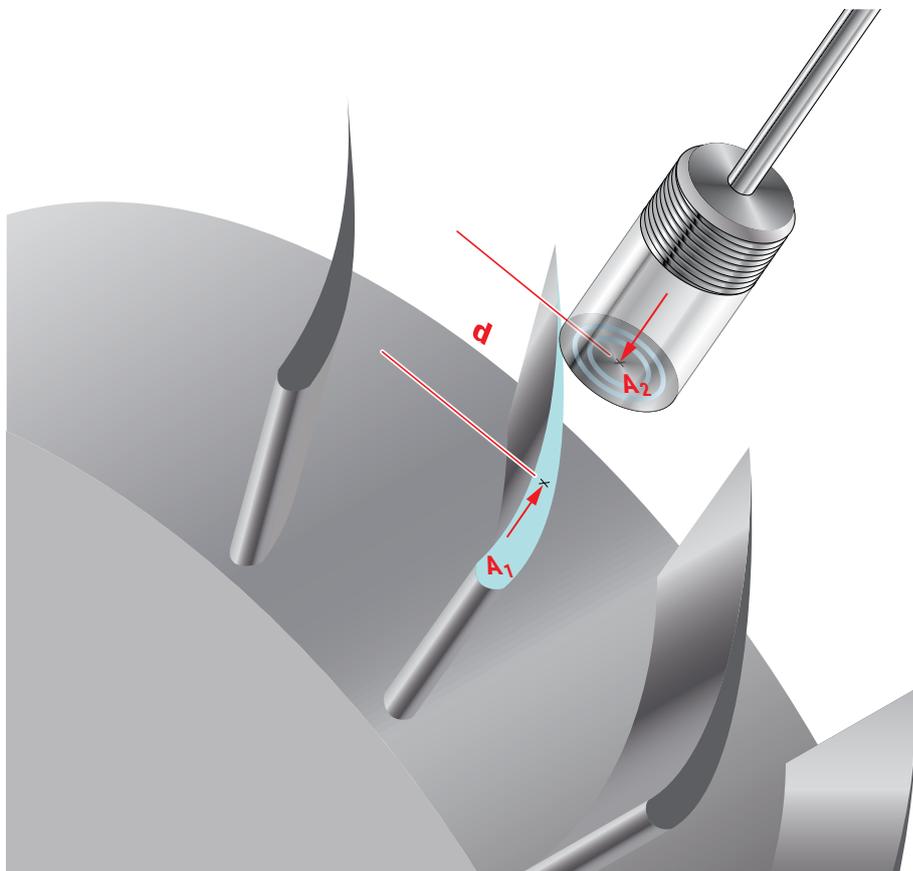
## 电容技术

系统的核心功能相对简单，使用电容平行板理论。

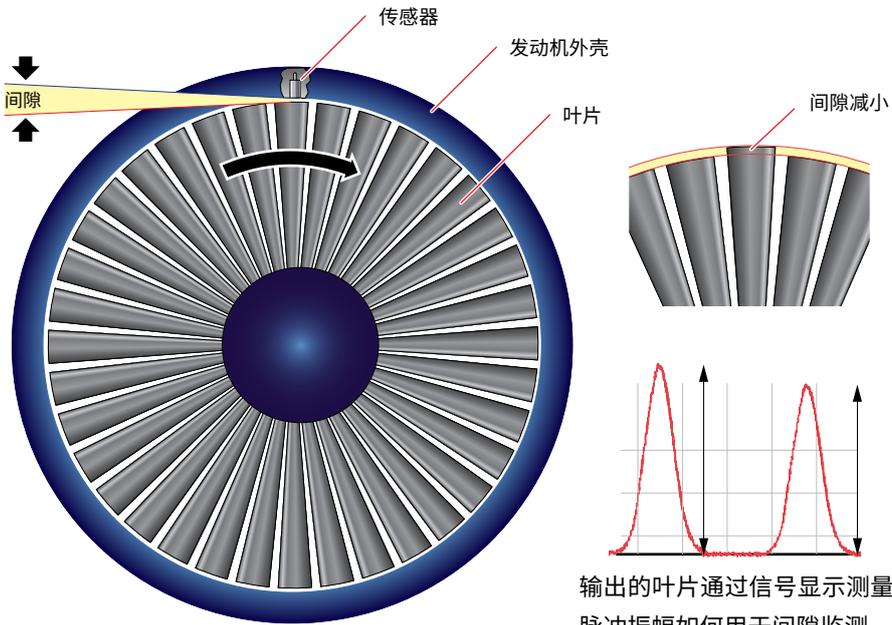
重叠电极面积与叶片轮廓 (A1) 和电极尺寸 (A2) 相关，假设为常数。因为实践证明，由燃烧引起的微小变化可忽略不计，所以介电常数也可视为常数。

根据此理论，通过测量电容，我们能够计算出叶尖与传感器“板”之间的距离。系统的先进电子设备将电容转化为电压，甚至当叶片以超音速通过传感器时，在电压与距离之间建立直接相关性。

因为此系统返回的电容非常小（只有几十飞法 (fF)），需要利用先进技术来精确测量（详见第 11 页所述的电子选配件）。



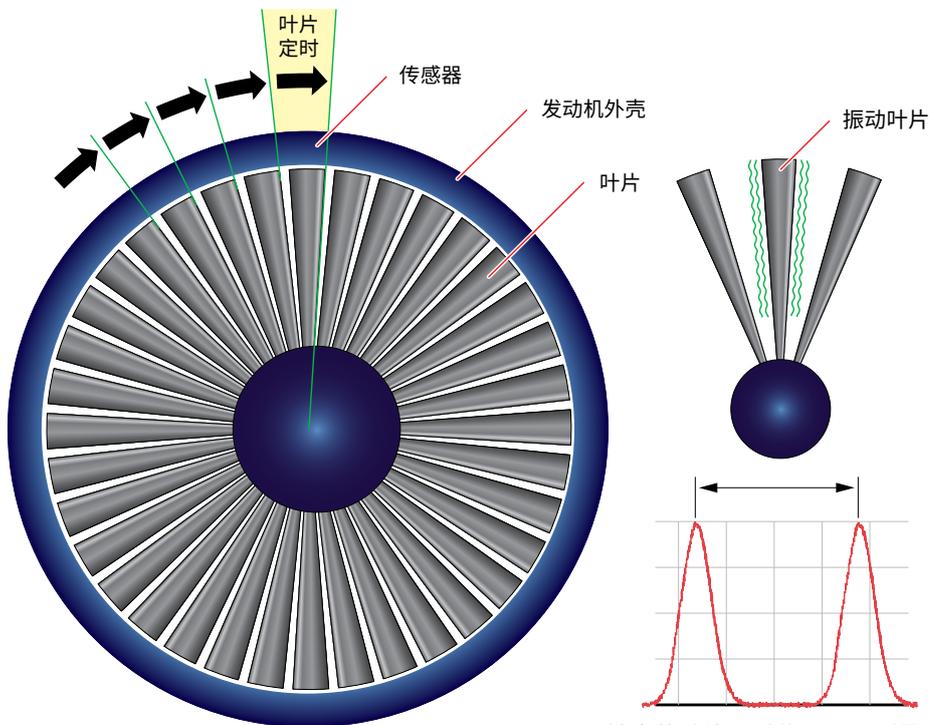
## 叶尖间隙



输出的叶片通过信号显示测量脉冲振幅如何用于间隙监测



## 叶尖定时



输出的叶片通过信号显示测量到达时间如何用于振动监测

# 传感器和电缆组件 (探头)

## 认证与证书

CapaciSense 高温间隙和振动监测系统已按照 QAN7944 质量保证条例获得批准和认证，可用于非危险和危险区域。

证书编号：

Baseefa 15ATEX0173X

IECEX BAS 15.0127X

SGSNA 19/0106

传统上，所有 CapaciSense 探针都采用三同轴构造，即内部电极被屏蔽层包围，然后是最外层壳体。传感器具有如下特点：

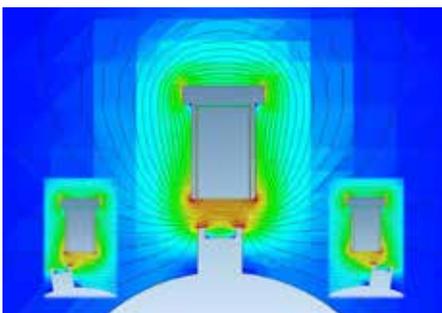
- 一个中央“感应”电极
- 一个减少漏电电容的屏蔽层
- 降低噪声的外部屏蔽/外壳
- 所有内部元件都采用防脱落设计，以防金属件掉入叶片中
- 定制设计（迄今超过 300 种设计）
- 根据不同应用，针对连续表面或叶片系统进行优化
- 采用超合金结构，工作温度可达 1400°C (2552°F)
- 结构坚固，使用寿命超过 10,000 运行小时

## 三同轴或类三同轴？

除了三同轴探头，我们还提供类三同轴探头。类三同轴传感器将电缆护套端接在传感器内，而不是连接到屏蔽层上。采用这种设计，体积小，内部元件数量少，价格便宜。然而，与三同轴相比，它们有一些缺点，包括噪声大和测量范围小。从 2020 年起，GadCap 开始为预算有限但对信号质量要求不高的应用领域提供质优价廉的类三同轴传感器，与 CapaciSense Solo 配套使用。

所有 CapaciSense 探头都在英国华盛顿工厂设计和制造。近年来，我们进行大量投资，更新探头的激光焊接，以及内部加工零件。

为了进一步理解技术，我们采用有限元分析 (FEA) 工具，使下一代探头更加完善。



## 高温传感器



主要用于涡轮应用。采用沟槽和冷却孔设计，使产品的运行温度提高到 1400°C/2552°F。

## 中温传感器



通常用于压缩机应用或 AM 系统，中温设计工作温度高达 1000°C/1832°F。中温传感器具有与高温范围相同的特性，但无冷却功能。虽然这些传感器仍然可以在更高温度下使用，但使用寿命会缩短。

## 低温传感器



为了在 200°C/392°F 以下的温度工作，低温设计采用柔性三轴电缆，而不是矿物绝缘电缆。尽管也使用专门的组装技术，但是传感器的成本更低，安装更方便。

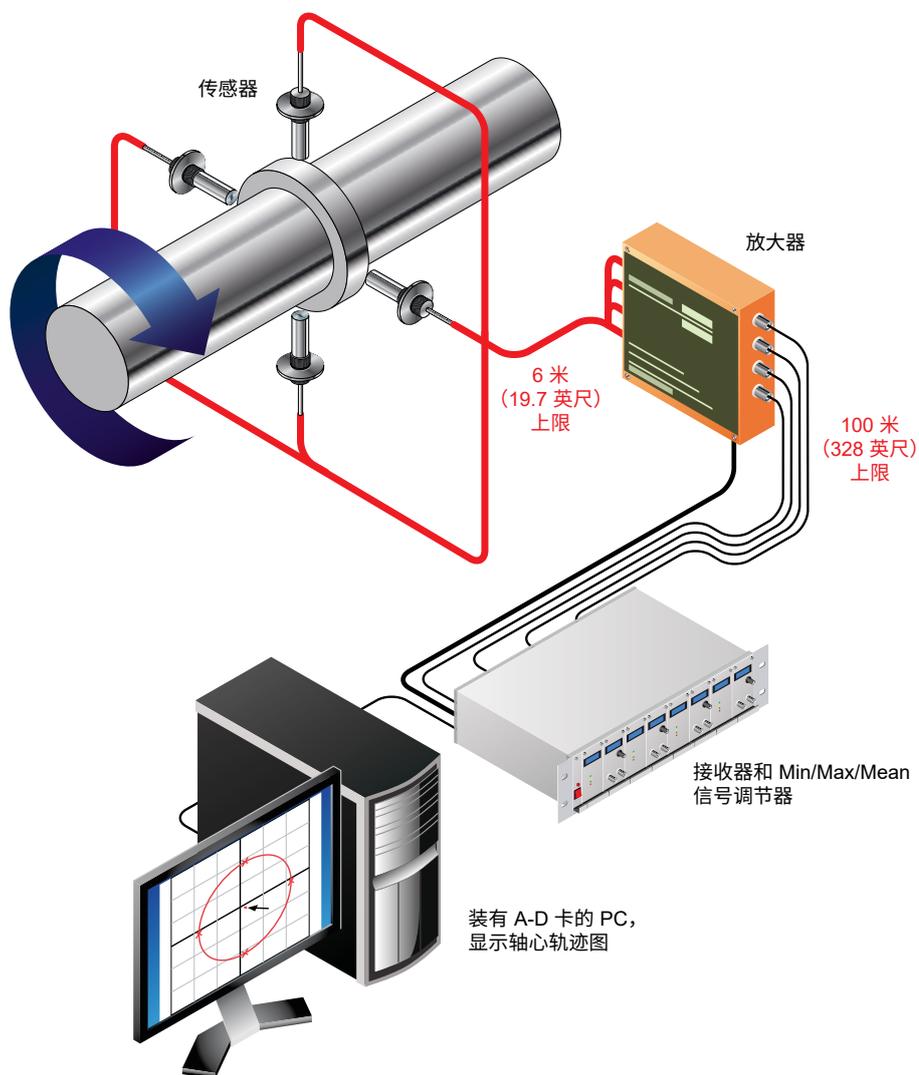
# 测量连续表面的电子设备

## AM 系统

此系统最适合在恶劣条件下测量缓慢移动的间隙。

探针配备的电缆长度可达 6 米（19.7 英尺），与本地安装的 AM 振荡器机柜相连。此机柜可容纳四个放大器，最多可连接四根探针。输出引线从机柜插头引入一个 19 英寸机箱（容纳八个接收器），可与两个振荡器机柜配套使用。可提供与间隙或电容成正比的“DC”信号。因为这是低频应用，大多数测量系统可以使用合适的校准数据将它记录并线性化成工程间隙单位。为了减少测量需求，我们还可以提供 MIN/MAX/MEAN 选配模块。

## 系统组件



# 测量叶片的电子设备



## 5 系 FM 系统

在取得巨大成功的 4 系基础上，5 系为电容式传感需求提供一个“双盒”解决方案。在探头后面安装一个小的振荡器，振荡器与探头距离可达 6 米（19.7 英尺），然后通过不超过 100 米（328 英尺）的同轴电缆连接到一个 19 英寸机箱。19 英寸机箱可容纳 12 个解调器，因此最多可连接 12 个振荡器和探针。

5 系向后兼容 4 系解决方案，可以购买单个通道，可以对现有装置进行通道数升级。

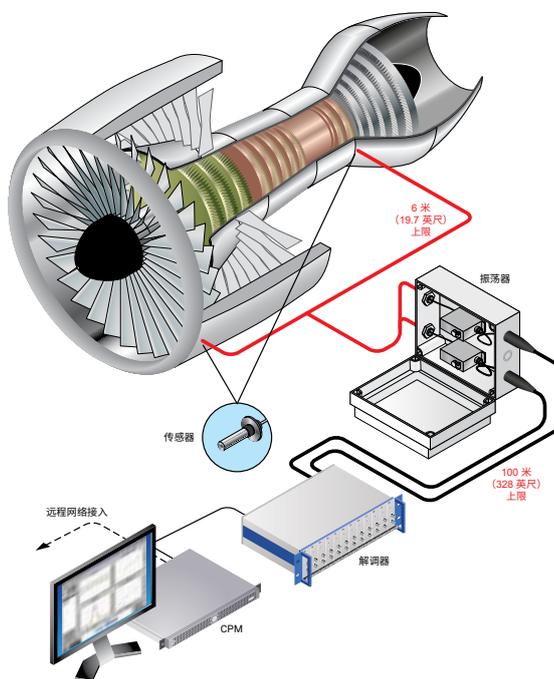
GadCap 推荐将 5 系连接到我们的控制和处理模块 (CPM)，实现全面的控制和灵活性，但是也可手动配置系统，使用您自己的数据记录系统来测量“平均”RMS 间隙信号或原始叶片通过信号 (BPS)，然后处理成叶片间隙。

当与 CPM 配套使用时，每个解调器机箱有 12 个无电压报警触点。可以配置这些触点，在间隙超出公差时向用户发出警告。

探针校准数据可以存储在振荡器中，自动下载到 CPM 进行信号线性化，确认正在监测哪个探针。

5 系的最大带宽可达 400kHz。

## 系统组件



## SOLO 系统

SOLO 是为工业安装设计的完美解决方案，是“单盒”电子解决方案。每个 SOLO 单元最多可连接 4 根探头，每根探头的电缆总长度可达 20 米（65.6 英尺），但是在某些情况下可使用更长的电缆。此系统为每个通道输出一个叶片通过信号 (BPS)。您可以用自己的测量系统记录，但是我们强烈建议与 **CapaciSense** CPM 配套使用，因为它可以提供实时逐个叶片的叶尖间隙值和平均值，以及到达时间 (TOA) 叶尖定时数据。通过 RJ45 网络连接，还可以使用 CPM 对 SOLO 进行全面配置。

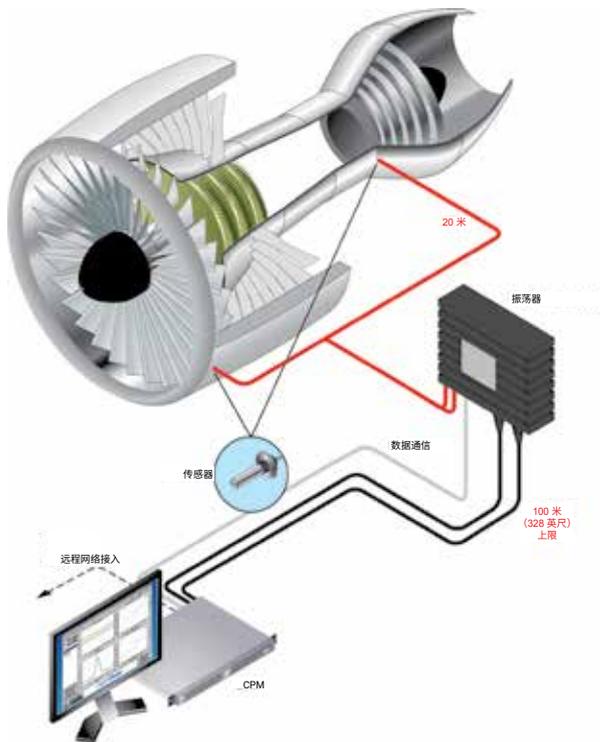


与 5 系的区别在于，不再要求探头与电子设备进行定制匹配，即探头可从一个系统调换到另一个系统。为方便使用，**CapaciSense** 探针现在配有 SOLO 可以读取的“智能”标签。安装后，包括校准在内的所有探针详细信息都会传递给 CPM。为了确保没有交叉接线，SOLO 会产生一个试验信号来确认通道编号。

带宽在 350 kHz 以上，虽然比不上 5 系，但是对于大多数应用来说，速度已经足够。

作为一种一体式解决方案，SOLO 非常适合对现有旋转设备进行改造。CapaciSense SOLO 已获得北美和欧洲批准（ATEX 和 IECEx），可用于危险区域。

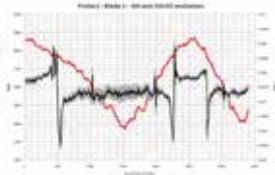
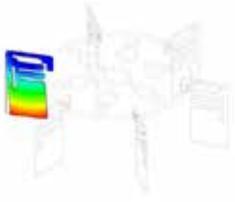
## 系统组件



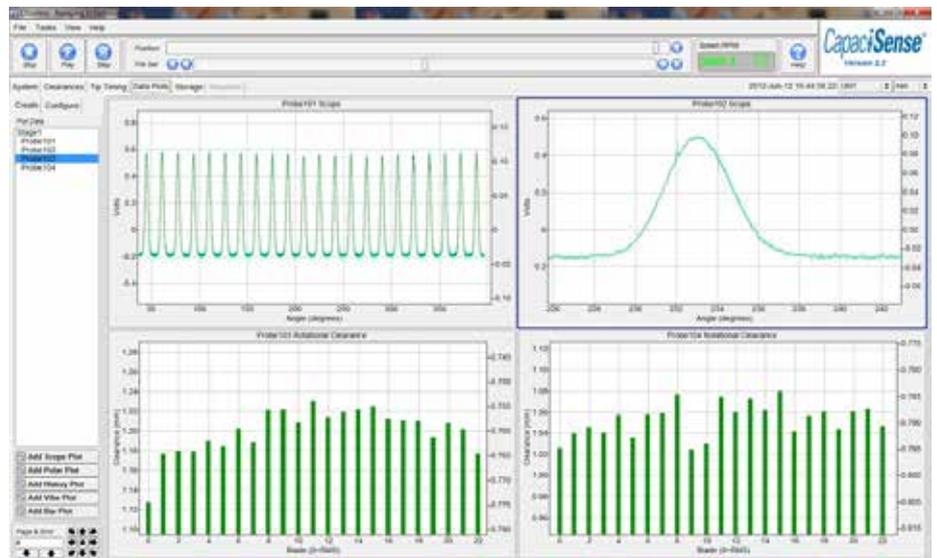
# 软件

## 配有软件的控制和处理模块 (CPM)

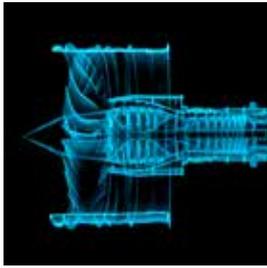
试验开始前用于配置系统，以数值、图片、可视绘图和图表的形式呈现数据：



- 可同时控制 5 系和 SOLO
- 在控制和处理模块 (CPM) 中，对模拟量的叶片通过信号 (BPS) 时行同步采样，采样充高达 10MHz
- 通过内置数据采集和软件，用户无需采集和分析模拟数据，但是可提供原始数据供高级用户分析
- 使用 CPM 控制增益和带宽设置
- 自动下载传感器校准，不会混淆信号
- 自动设置——无需跳线搭接
- 同步信号——同步多个机箱，汇集数据
- 配有硬盘，可以存储数据和进一步分析
- 5 系和 SOLO 配置可用于“超慢模式”
- 每转一次键相信号输入（发动机转速/叶片识别）
- 在提供叶尖间隙的同一系统中增加叶片振动监测功能（简单软件更新）
- 从基于 Microsoft Windows® 或 Linux® 的机器进行远程访问，不需要安装软件
- 与其他系统连接的 Modbus 和 DLL 接口

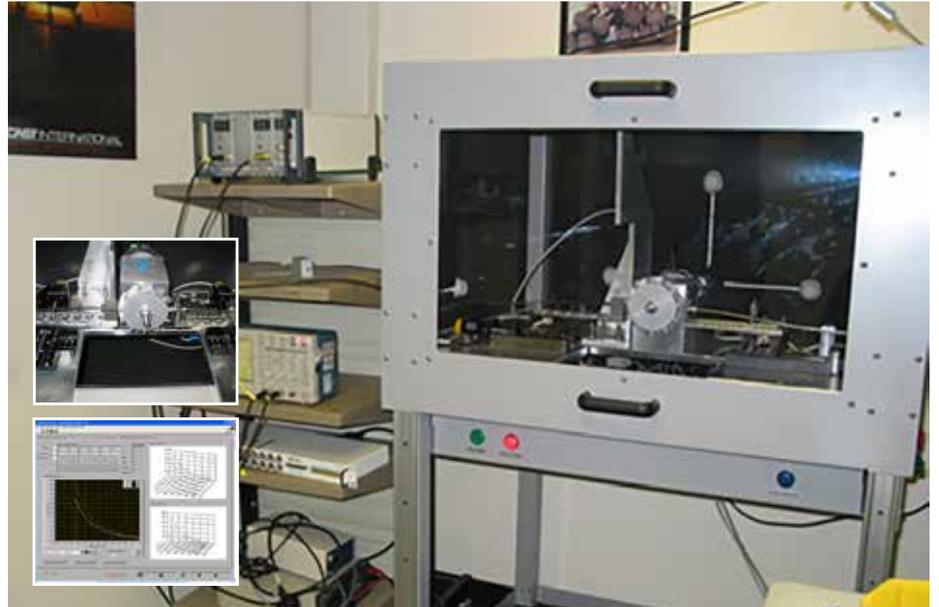


# 服务与支持



GadCap 提供全面的设计服务，为您的测量需求提供交钥匙解决方案。除了提供定制探头和用户定制电子设备外，所有系统都可以根据您的具体测试对象进行校准，这对叶片系统来说特别重要。

购买我们的系统后，您可以享有培训、现场安装协助或问题咨询等一流的售后服务支持。我们热诚为您提供帮助。如需讨论您的需求或获取更多信息，请联系当地代表或 GadCap 总部。



3 Rutherford Road  
Stephenson Industrial Estate  
Washington  
Tyne & Wear  
NE37 3HX  
United Kingdom

电话: +44 191 250 9100  
传真: +44 191 247 5705

sales@GadCap.co.uk

[www.TipTiming.com](http://www.TipTiming.com)

[www.TipClearance.com](http://www.TipClearance.com)

[www.CapaciSense.com](http://www.CapaciSense.com)

[www.GadCap.com](http://www.GadCap.com)

[www.GadCap.co.uk](http://www.GadCap.co.uk)

*CapaciSense*<sup>TM</sup>

By

