

雷尼绍无线电跳频扩频 (FHSS) 传输

创新型无线电跳频传输测头可为各类机床提供稳定灵活的检测方案。

摘要

工件检测测头是提升制程效率的关键工具，能够实现快速的工件找正与批次切换，并完成工件检测确认以及关键工件尺寸的序中控制。所有安装在主轴或刀塔上的测头都需要一种信号传输方式，其中无线电传输是大型机床和五轴加工中心最常见的选择。然而在工厂环境中，用户在部署无线电传输技术时仍面临诸多挑战，尤其是需遵守当地法规，并防范其他无线电设备带来的干扰。2003年，雷尼绍推出了全球首款采用无线电跳频扩频 (FHSS) 传输技术的工件检测测头，为大型机床上的测头测量应用提供了一套可靠、紧凑且通用的解决方案。这项技术经过不断发展完善，目前已集成于最新的“QE”系列无线电系统RMP测头和RMI-QE中。

测头信号传输基础知识

数控机床使用工件检测测头来确定工件在找正过程中的位置和方向，并检测关键特征的尺寸和位置，以进行检测确认与制程控制。测头通过感应工件表面的一系列离散点来完成检测。当测头的测针碰到工件表面时，会产生一个触发信号；该信号必须传输至数控系统，以便记录机床在触发时刻的位置。

由于测头在使用时安装于机床主轴上，因此触发信号需通过远程传输系统发送至数控系统。目前主要有三种信号传输技术：电感式、光学（红外线）和无线电传输。无论采用哪种方式，测头均需配备一个发射器，用于将测头状态信号传输至接收器，而接收器则以硬线形式连接至机床数控系统。

电感传输的距离非常有限（接收器通常安装在主轴端面），而光学传输和低功率无线电传输的有效距离可达数米。光学传输依赖发射器与接收器之间存在无遮挡的可视路径，同时也可借助机床内部的光波反射信号进行辅助传输。无线电传输不仅能利用反射，还能借助机床内部物体周围显著的衍射效应，因此特别适用于测量时测头需进入工件内部的大型机床，或五轴机床中无法保证直线可视路径的复杂应用环境。

触发点的可重复性是实现高精度工件测量的基础，因此任何测头信号传输系统的一个关键设计 requirements 是能够以极短且高度可重复的时延将触发信号传递至数控系统。测头与工件表面碰触时刻的不确定性将直接影响位置测量结果的准确性（值得注意的是，数控系统中触发锁存电路的响应速度与可重复性也会产生影响）。传输时延过长还可能增加测头或工件受损的风险。

测头信号传输系统的另一项关键设计 requirements 是信号的稳定性与可靠性。所有有效触发信号必须快速传输至数控系统，以便及时停止机床运动；同时，系统还需具备抗干扰能力，能够有效应对来自工厂其他设备的无线电干扰，并确保不会对这些设备造成影响。

无线电传输必须具备以下功能：

- 定期传输测头状态信息（包括测头是否处于复位或触发状态，以及电池电量），以便数控系统实时了解测针是否已碰触工件表面，或信号传输是否受阻，从而在必要时安全停止机床运动
- 在测针碰触工件表面后，接收器需在短暂且固定的时延后生成触发信号，确保信号响应及时且稳定
- 相比通过机械方式激活测头（如使用刀柄内的控制开关或测头中的离心力触发装置），更理想的方式是通过无线电传输实现测头控制信号的收发（由数控系统向测头发送信号），以便远程控制测头的开启与关闭



图1：雷尼绍RMP60-QE测头

影响无线电传输性能与可靠性的因素

- 1. 扩频或定频** — 所选频率范围内可能存在哪些其他设备？采取了哪些措施以确保这些设备能够在同一频段内共存？
- 2. 抗信号干扰能力** — 当出现信号干扰时，测头如何仍能保持稳定可靠的运行？
- 3. 触发信号的可重复性** — 在存在干扰的情况下，传输至数控系统的触发信号是否仍具有良好的可重复性？
- 4. 避免“死角”问题** — 机床内部的信号反射可能在某些位置造成信号抵消干扰，如何确保测头在这些区域仍能正常工作？
- 5. 监管合规性** — 同一款测头是否可以在全球范围内使用，而不会违反各地的无线电通信法规？
- 6. 电源管理与开关方式** — 如何最大限度延长电池使用寿命？测头的开启与关闭可以通过哪些方式实现？
- 7. 安装便利性** — 传感器和接收器的设计如何影响测头系统在典型机床上的安装时间与操作复杂度？

定频无线电传输技术

“传统”无线电传输测头（如雷尼绍的MP16和MP18型号）采用固定信道进行信号传输。在经批准的低功率无线电频谱内（例如欧洲的433 MHz频段），可使用多个离散信道。在安装过程中，测头与接收器会被设定在某一特定信道上，之后将一直保持该设置，除非手动切换至其他信道。以433 MHz频段为例，雷尼绍曾使用69个信道，每个信道的带宽为20 kHz。这种设计使得在同一工厂内可以部署多个测头系统，即使这些系统安装在相邻的机床上，也不会发生测头与接收器之间的“串扰”现象。

实践表明，定频无线电技术整体上较为可靠，其主要限制在于频段内可用信道数量有限；然而，这类设备容易受到工厂内其他使用相同频率的无线电设备的干扰，因此如今已逐步被采用扩频技术的新型设备所取代。

图2展示了一个典型场景：当另一台发射功率更高的设备占用了测头所使用的部分信道时，会导致测头接收器接收到的信号被干扰或破坏。在这种情况下，唯一的解决方案是更换测头的工作信道，直至找到未被占用的频段；或者（如果条件允许）调整干扰设备的传输频段。

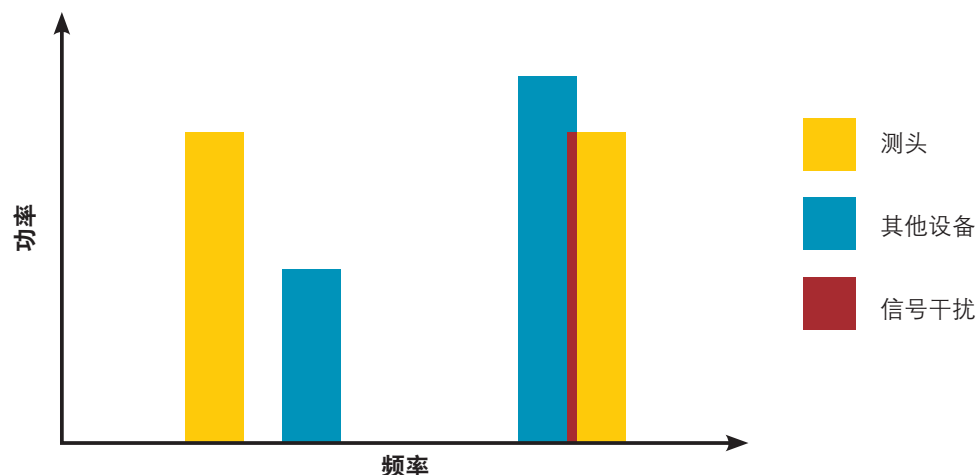


图2：使用固定信道时，测头与其他设备使用的频率范围不得重叠

扩频无线电技术

扩频传输通过将信号分布在更宽的频率范围内, 相较于单一信道传输, 具备更强的抗干扰能力和更高的可靠性。主要的扩频技术包括:

1. **直接序列扩频 (DSSS)** — 以低功率在较宽的频率范围内同时发送信号, 常用于WiFi无线网络
2. **跳频扩频 (FHSS)** — 以相对较高的功率, 在一系列预先设定的编码频率之间跳变进行信号传输, 发送与接收双方需共享跳频序列, 广泛应用于“蓝牙”设备以及雷尼绍的“QE”无线电测头系统
3. **线性调频扩频 (CSS)** — 采用宽带线性调频信号 (即“啁啾”信号) 进行扩频, 主要用于远距离数据传输 (如LoRaWAN), 以及需要双向测距或距离监测的场景
4. **超宽带 (UWB)** — 利用纳秒级脉冲在超过500 MHz的宽频带上传输信号, 实现短距离、高带宽通信, 并具备高精度测距功能。该技术正逐渐应用于智能手机设备, 主要用于“标签”追踪等场景

跳频技术 — 工业应用的理想选择

雷尼绍最新一代QE系列机床测头测量系统采用混合跳频扩频(FHSS)调制技术, 在2.402至2.481GHz的ISM频段内运行, 共提供39个信道, 每个信道带宽为2 MHz。该系统至少由两个部分组成: 一部分是安装在机床主轴或工作台上的测量测头 (如RMP60), 另一部分是连接至数控系统并固定在机床静态结构上的RMI-QE接口。

FHSS传输方式要求发射端与接收端在通信过程中不断地在多个信道间“跳频”, 并在工作时使用到整个频段内的所有可用信道。这种方式使系统既能与其他扩频系统共存, 也能兼容同频段设备 (如微波炉) 的干扰。跳频系统在遇到其他设备信号冲突时, 具备优异的抗干扰能力, 可通过切换至其他频率或信道重新发送数据, 同时能够确保时间信息与测量结果的准确性不受影响。与多数其他扩频技术相比, FHSS支持更多“高功率”设备在同一空间内同时运行, 因此非常适合用于设备密集的大型制造工厂等高负载工业环境。



图3: 雷尼绍RMI-QE接收器/接口

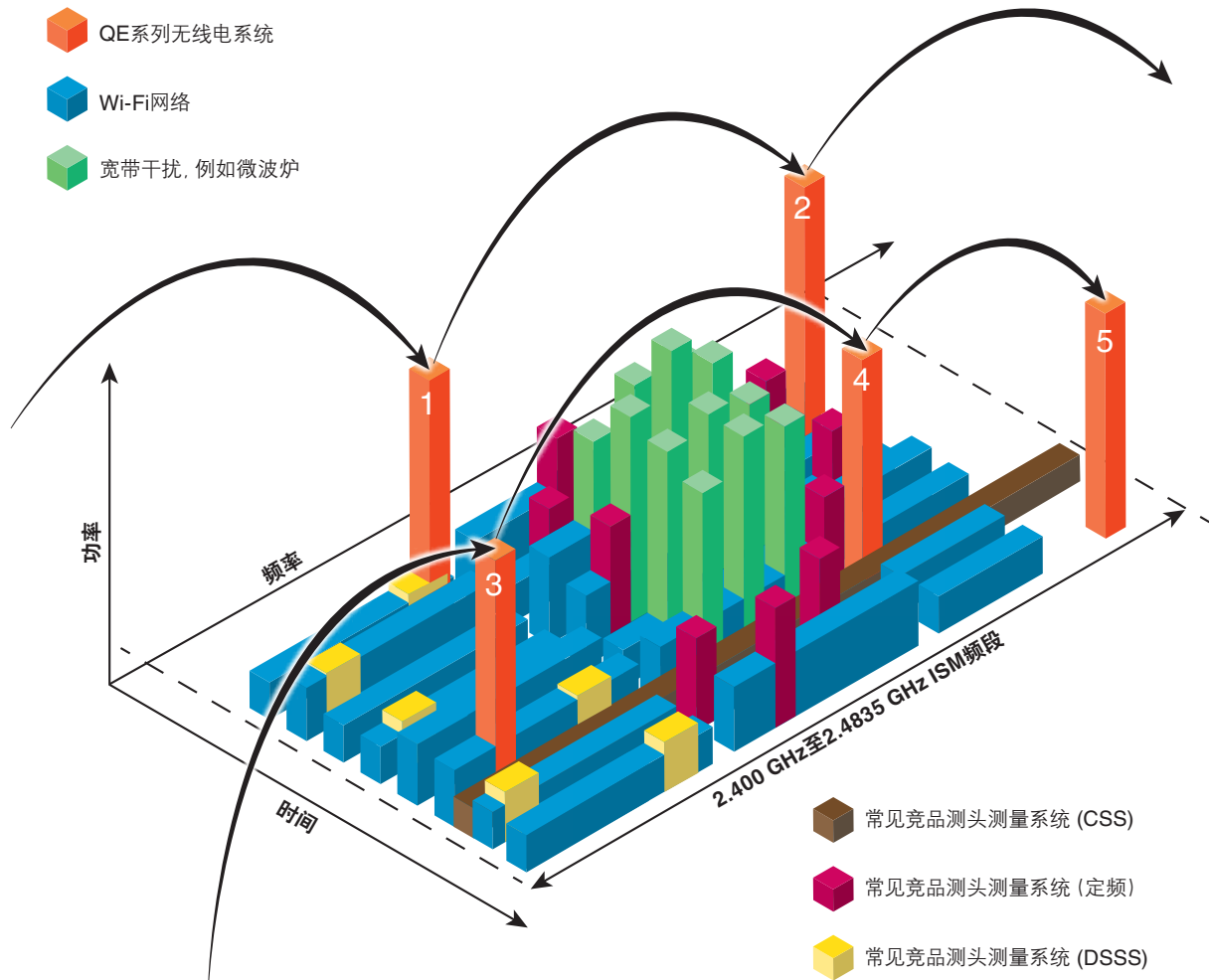


图4：FHSS测头系统信号与同一频段内的其他无线电信号活动共存

图4展示了FHSS测头信号在整个2.4 GHz频段内的一系列频率之间进行跳频的过程：

1. 在第一个频率点，频谱未被占用，测头信号成功传输至接收器。
2. 首次跳频后，系统切换至一个已被高功率设备占用的频率信道，此时测头信号会被更强的信号干扰，无法顺利传输。
3. 随后，频率跳转至一个与DSSS设备频段重叠的信道。DSSS设备以低功率在较宽频率范围内进行传输，而测头信号的功率足以确保测头通信成功，同时DSSS设备仍保有充足的带宽用于自身通信。
4. 频率未被占用，测头信号可顺利传输。
5. 测头系统将持续使用多种可能的跳频序列，并在运行过程中遍历所有可用信道。

抗干扰能力强

FHSS系统可在包含其他扩频和定频设备的嘈杂电磁环境中稳定运行。雷尼绍通信协议的设计包含唯一的测头ID, 可确保RMI-QE接收的是来自目标测头的信息, 而非邻近机床上的其他测头信号。系统还具备多项安全功能, 包括身份验证、数据完整性校验和干扰检测等。每套系统均采用独特的跳频模式, 确保与邻近机床上的其他雷尼绍系统共存且互不干扰。该定制通信协议通过在通信失败时进行多次重传, 可有效抵御干扰, 同时保持测头系统的低延迟和高测量性能。如果RMI-QE在多次重试后仍未接收到来自RMP测头的有效信号, 将触发错误输出, 促使机床安全停机。

要干扰无线电测头的信号传输, 干扰信号必须在同一时间、同一信道上出现, 并且信号强度足以覆盖测头信号。2.4 GHz频段专用于低功率传输, 因此在任何时刻, 信号强度足以达到RMI-QE工作范围的设备数量通常较少。干扰信号可能会破坏通信数据包, 但若持续阻断通信, 干扰设备必须与测头使用完全相同的跳频序列和时间间隔, 这种情况发生的概率极低。

触发信号的可重复性

当测头触发信号产生时, 必须以高度可重复的方式将其传输至数控系统。传输过程中设计了一个短暂时延, 用于在出现信号干扰时进行重试, 该时延的持续时间具有高度可重复性。在测针碰触工件表面并触发测头后约 $5\text{ ms} \pm 1\text{ }\mu\text{s}$, 触发信号将发送至数控系统。由于该时延稳定可控, 可通过测头标定轻松消除其影响。

避免传输“死角”

无线电信号不仅在测头与RMI-QE接收器之间直接传输, 还会通过机床内部的反射路径传播 (参见图5)。单一波长的无线电传输可能会出现信号盲区或“死角”, 这是由于直接路径与反射路径之间发生抵消干扰所致 (当反射波与直达波振幅相同且相位相差180度时, 会产生完全抵消干扰)。严重干扰可能导致接收器测得的信号振幅低于其灵敏度阈值, 从而影响通信质量。

在固定波长系统中, 切换信道通常只能将信号盲区转移至机床的其他位置, 而无法彻底消除。为降低信号盲区发生的概率, 许多固定波长系统会配置两个接收器, 彼此呈90度角布置。

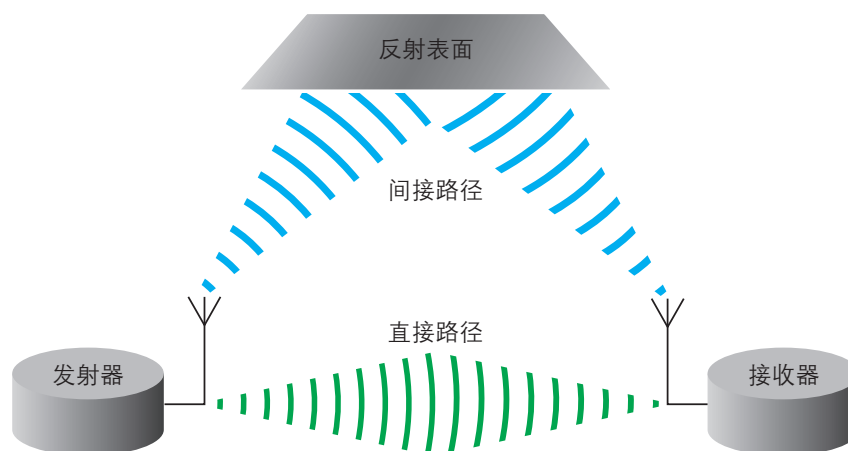


图5: 无线电波会在机床内部表面发生反射, 从而干扰沿直接路径传输至接收器的信号。跳频系统通过有规律地切换信道, 有效避开信号“死角”

跳频系统则通过有规律地切换信道,有效规避“死角”问题。2.4 GHz频段覆盖的波长范围从0.121 m (信道38)至0.124 m (信道00)。通常,反射路径明显长于直接路径(至少长2.5个波长)。在这种情况下,即使信道38出现完全盲区,信道00的信号衰减也仅为6 dB,因此即使在某一波长上存在信号盲区,仍可实现稳定传输。凭借这一特性,跳频系统仅需一个接收器即可确保系统具备可靠性能。

在实际应用中,跳频系统由于存在多条具有不同长度的反射信号路径,在连续信道频率上出现相邻盲区的可能性极低。此外,反射路径的信号振幅通常会减弱,也进一步降低了在某一波长上发生完全抵消干扰的风险。

监管合规

扩频系统因支持多个设备在同一频谱范围内可靠共存,受到多数市场无线电监管机构的青睐。2.4 GHz频段几乎在全球范围内获得广泛认可,目前已有大量采用该频段的扩频和低功耗宽带设备投入商用。这一优势使无线电传输系统能够采用统一设计,覆盖所有主要工业国家,有效简化了机床制造商在向多个市场供应系统时所面临的合规问题。相比之下,为满足各地区法规要求,固定频率系统在美国、欧洲和亚洲需使用不同的频段。

电源管理与开启方式

由于测头采用电池供电,低功耗设计尤为重要。在运行过程中,测头会定期发送信号,以及在检测到触发信号时发送信号,以降低电池消耗。在周期性通信的间隔期间,测头的功耗极低,仅维持测头接口和微处理器的基本运行。而在信号传输期间,测头功耗会升高,因为电池需为无线调制解调器及其控制电路供电。正常传输时,信号发射的无线电功率(ERP)限制在2.5 mW,并通过信道跳频实现最长距离达15 m的稳定通信,而无需依赖提高发射功率。

QE测头可通过无线电开启信号、离心力触发装置或刀柄控制开关(适用于RMP60和RMP600)进行激活。在无线电开启模式下,测头通过接收来自RMI-QE的信号并识别系统的唯一ID实现激活,其优势在于无需使用高功率开启信号,从而减少对邻近测头系统及周边其他无线电设备的干扰。

安装简便

与光学传输系统相比,无线电测头系统的一个显著优势在于其安装所需的时间和操作更少,因此特别适用于大型机床。无线电系统在接口安装的位置和方向上具备更高的灵活性,同时通过简化甚至免除布线需求,加快了整体安装进程。FHSS系统的另一优势是,仅需一个接口/天线即可实现稳定可靠的运行。

QE测头具备多种尺寸规格(直径为24 mm、40 mm和63 mm,对应长度为31 mm、50 mm和76 mm),适用于大型机床以及小型多主轴或五轴机床,展现出卓越的灵活性。理想情况下,工件检测测头的长度应与机床上最短刀具组件的长度相当,以便在靠近机床Z轴行程的最上端的位置检测由该刀具加工的表面。

结语

雷尼绍率先将跳频扩频无线电传输技术应用于机床测头。时至今日,在日益复杂、干扰频繁的工业环境中,扩频无线电传输技术依然能够实现稳定可靠的信号传输,并确保与其他无线电设备的良好共存。雷尼绍的测头方案具有高度通用性,不仅满足全球不断变化的无线电法规要求,更在制造业中树立了无线电传输测头在性能与可靠性方面的行业标杆。

www.renishaw.com.cn/machinetool



© 2025 Renishaw plc. 版权所有。RENISHAW®和测头图案是Renishaw plc的注册商标。
Renishaw产品名、型号和“apply innovation”标识为Renishaw plc或其子公司的商标。
其他品牌名、产品名或公司名为其各自所有者的商标。
Renishaw plc。在英格兰和威尔士注册。公司编号：1106260。注册办公地：New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK。
在出版本文时，我们为核实本文的准确性作出了巨大努力，但在法律允许的范围内，无论因产生的所有担保、条件、声明和责任均被排除在外。



扫码关注雷尼绍官方微信
文档编号：H-5650-2074-02-A
发布：2026.01

- | | | |
|--|--|---|
| 上海 T +86 21 6180 6416 E shanghai@renishaw.com | 天津 T +86 22 8485 7632 E tianjin@renishaw.com | 青岛 T +86 532 8503 0208 E qingdao@renishaw.com |
| 北京 T +86 10 8420 0202 E beijing@renishaw.com | 成都 T +86 28 8652 8671 E chengdu@renishaw.com | 西安 T +86 29 8833 7292 E xian@renishaw.com |
| 广州 T +86 20 8550 9485 E guangzhou@renishaw.com | 重庆 T +86 23 6865 6997 E chongqing@renishaw.com | 宁波 T +86 574 8791 3785 E ningbo@renishaw.com |
| 深圳 T +86 755 3369 2648 E shenzhen@renishaw.com | 苏州 T +86 512 8686 5539 E suzhou@renishaw.com | 郑州 T +86 371 6658 2150 E zhengzhou@renishaw.com |
| 武汉 T +86 27 6552 7075 E wuhan@renishaw.com | 沈阳 T +86 24 2334 1900 E shenyang@renishaw.com | |