

适用于滑环应用的 60 GHz无线数据互联

作者：Anton Patyuchenko，现场应用工程师

第四次工业革命通过在生产过程中实现新场景来推动数字化制造向前发展（参见图1）。这些场景依赖于基本的设计原则，包括器件互联、信息透明、技术协助，以及分散决策。没有先进的无线通信技术，就无法在现代智能工厂中实现所有这些原则。它们支持在广泛的领域实现多种应用，包括过程自动化、资产跟踪、机械控制、内部物流和基础设施网络。

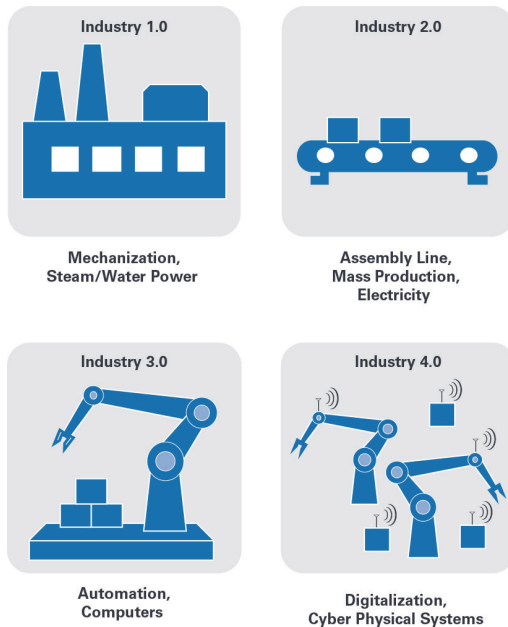


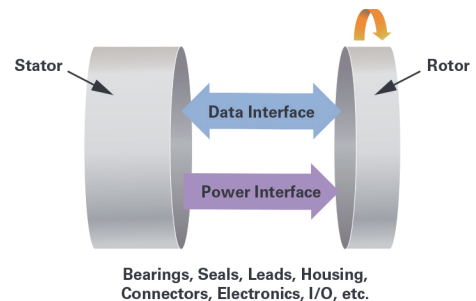
图1 工业革命概述。

智能工厂集成多种信息物理系统，这些系统需要速度更快、更加可靠的无线解决方案来处理严苛的工业环境中不断增长的数据量。推动这些解决方案发展取得成果，以便在要求较高的工业4.0场景中部署的主要因素包括：实现移动SCADA、更换传统系统，或者通过移动设备实现数据传输（以前不可行或者受到限制）。本文主要探讨受到最后一个因素推动的无线技术。

本文第一部分概述现代工业应用对于机械旋转子系统之间的通信接口的主要要求。第二部分尝试根据在转子和定子之间传送数据所用的机制类型，对当今这些子系统中使用的多种数据接口技术进行分类。这部分简要概述了这些技术，并且讨论了这些技术的优缺点。第三部分介绍一种支持高速、低延迟通信的新型60 GHz无线解决方案，该方案能够在滑环组件中实现先进的数据接口架构，以满足新工业场景的严苛要求。

旋转接头中数据接口的工业要求

旋转接头，也经常被称为滑环，是在旋转连接中传输数据和功率的组件（参见图2）。现代工业场景要求在旋转部件之间提供更快、更可靠的数据传输，随着此需求日益增长，对旋转接头中使用的数据接口的带宽、串扰和EMI性能的要求也日益严格。满足这些要求对于保证相应工业设备的实时运行、连续正常运行和最大效率至关重要。



Parameter	Description
Rotational speeds	5000 rpm to 6000 rpm
Data rates	100 Mbps, 1 Gbps+
Protocol	IEEE802.3, TSN, and other
BER	1×10^{-12} or better
Immune to misalignments, EMI, cross-talk, and contaminants, maintenance-free, compatible with power interface	

图2 旋转接头—高层框图和要求。

工业旋转数据接口组件必须确保在非常快的转速下（5000 rpm至6000 rpm），能够以典型的100 Mbps数据速率，高品质的持续传输数据。在大多数情况下，这一数据速率已足够，但有些特殊应用要求以1 Gbps或更高的速率进行快速传输，并成为当今的基准指标。工业应用还要求支持基于IEEE802.3（以太网）的协议、其他工业总线协议，以及确定性实时通信，以实现时间敏感型应用和IIoT功能。面向这些应用的数据接口解决方案必须能够不受物理失调、电磁干扰和串扰的影响，实现比特误码率(BER)等于或低于 1×10^{-12} 的无误差数据传输。工业环境中的污染不应影响旋转接头的运行，理想情况下旋转接头无需维护且不受磨损。最后，数据接口技术必须与旋转接头组件的动力传输子系统兼容，以满足目标应用的所有功能要求。

数据接口技术

旋转接头多种多样，其功能特性、外形大小、转速(rpm)、最大数据速率、功率范围、支持的接口类型、通道数量，以及许多其他设计因素，都随应用要求而有所不同。在这些设计考量因素中，关于数据接口的一些要求非常重要，因此，要在滑环组件中正确实施数据接口，选择适当的技术非常关键。用于实现这一功能的数据通信技术通常可分为接触式和非接触式。这些技术之间存在一些差异，具体取决于它们为了实现数据传输通信通道所采用的耦合类型。

接触型接口

接触型解决方案通常在定子上采用复合材料、单丝或复合丝电刷，它靠着转子上的导电环滑动，从而在移动组件和静止组件之间形成不间断的电信号通道（参见图3）。与数据通信相关的电刷类型选择取决于信号带宽、数据传输速率、所需的传输质量、工作电流和转速。虽然这是一项较为完善的技术，自问世以来一直用于滑环中，但它也存在一定的局限性。由于接触型滑环的机械式接触点需要定期维护，因此在恶劣的工作环境中使用时可靠性会受到影响。机电旋转接头也容易受电磁干扰的影响。此外，用于建立接触型接口的物理介质的特性，以及各种失配效应，都会对通道带宽造成莫大影响。而且，滑动接触产生的电阻变化会降低传输质量，这在高数据速率实时应用中尤为重要。

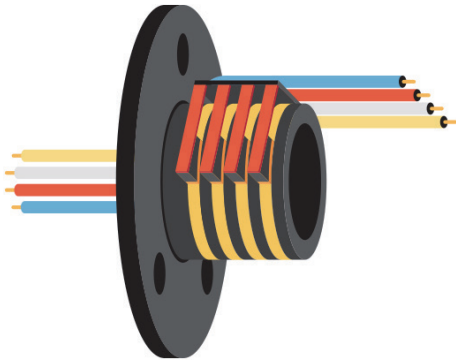


图3. 接触型滑环。供图：Servotectica/CC BY-SA 4.0。

非接触型接口

非接触型旋转接头采用辐射或非辐射电磁场在旋转部件之间传输数据，解决了这些限制因素。与电信号传输技术相比，此技术具有几个性能优势。它没有机械式接触点，不存在接触磨损，减少了维护需求，以高速旋转时，也不会因为阻抗导致数据损失。

光纤旋转接头

最常见的非接触型解决方案是光纤滑环，也称为光纤旋转接头(FORJ)，其原理图如图4所示。FORJ依靠光辐射来传输数据，通常在850 nm至1550 nm的红外波长下工作，能够以几十Gbps的极高数据速率传输各种类型的模拟或数字光纤信号，而且不受电磁干扰影响。但是，光纤解决方案并非没有挑战。它们会遭受较强的非本征损耗，因角度和轴向失调导致信号衰减。这些失调也是造成旋转信号波动的主要因素，对于某些应用，这非常关键。此外，光纤旋转接头在恶劣的工业环境中通常需要高水平的保护。

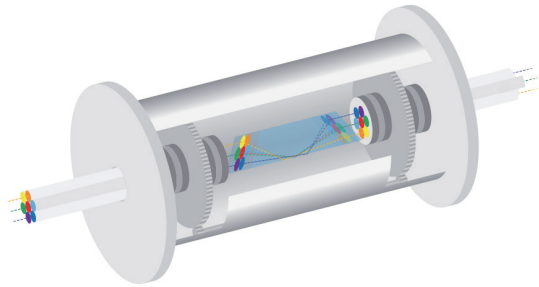


图4. 光纤旋转接头。供图：Servotectica/CC BY-SA 4.0。

感性和容性接口

另一种非接触型技术是基于近场耦合机制建立，通过初级非辐射感性和容性电路元件在较低的电磁频谱频段下生成的电场和磁场实现。

感性方法利用电磁感应原理来连接组件中的活动部件。使用这种耦合方式的滑环（原理图如图5所示）对于高转速工业应用非常有用，但它们更适合进行功率传输，而不是高速数据传输。它们也广泛应用于风力涡轮机应用中，为桨距控制系统提供电信号和电力，以及活动组件以高转速运行的封装应用中。

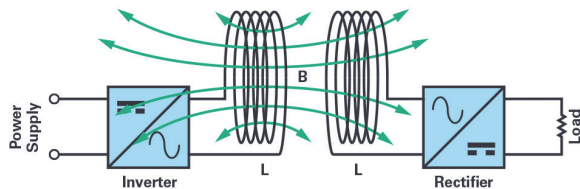


图5. 感性耦合。

相对于依赖磁场的感性滑环，基于电容技术的滑环利用电场在转子和定子之间传输数据。图6所示的容性耦合方法提供了一种成本相对较低的轻型解决方案，其涡电流损失可以忽略不计，且具备出色的失调性能。此技术能够在恶劣的运行环境中以几Gbps的高速可靠传输数据，且不受转速影响。容性滑环通常设计用于和以太网现场总线组合使用，广泛用于时间敏感型工业应用中。

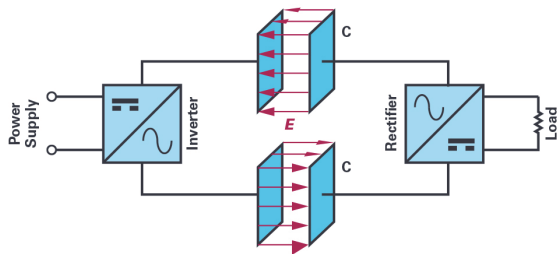


图6. 容性耦合。

其他类型的接口

除了主要利用感性或容性耦合机制的非接触型滑环技术外，还可以使用适当的耦合结构，例如波导元件或传输线路元件，实现采用这两类机制组合的解决方案。还有一些特殊类型的滑环：例如，依靠水银作为传导介质的滑环。但是，浸水银滑环对操作环境的要求非常严格，不能在高温环境中使用，因此不适合工业应用领域。

表1. 基于数据接口耦合技术进行旋转接头分类

类型		特性	
接触	复合材料电刷	高电流、高转速、低数据速率	接触磨损、EMI、通道带宽、电阻变化
	单丝导线	低电流、低噪声、低接触阻抗	
	复合丝导线	单通道多接触点、最低噪声、最低接触阻抗、高数据速率	
	浸水银	低阻抗、稳定连接、不能在高温环境中使用、安全隐患	
非接触	FORJ	无电磁干扰、Gbps 级数据速率、较强的非本征损耗、对失调敏感、需要保护措施	
	感性	近场、磁场耦合、高转速、高功率	
	容性	近场、电场耦合、低成本、轻量型、对失调不太敏感、高转速、Gbps 级数据速率	
	电磁	近 / 远场、大容量数据传输、对失调不太敏感、Gbps 级数据速率	

表1中总结了我們探讨的各类数据接口技术，它们提供众多特性和功能，能够满足典型的工业滑环应用要求。但是，这些传统技术大多仅支持短距离数据传输，这要求转子和定子上的收发器元件需彼此非常靠近。此外，第四次工业革命还对滑环应用数据接口的可配置性、可靠性和速度提出了严格的要求，而现有的传统技术往往不能满足这些要求。

本文介绍了一种基于非接触型技术的新型解决方案，此方案依靠电磁毫米波在辐射近场（菲涅耳）和远场区域远距离传输数据，解决了其他方法存在的一些关键限制。这种解决方案不但为滑环应用提供了一种紧凑且经济高效的先进微波数据接口，还能与传统的非辐射旋转接头的耦合元件组合，以较低成本实现更出色的性能。

毫米波数据接口解决方案

60 GHz频段

低成本微波元件制造技术的出现，使其在军事领域之外的各类商业市场都实现了广泛应用。特别是60 GHz毫米波技术，凭借其位于微波频谱上半部分的独特优势，正日益受到市场的广泛关注。这一全球范围内免授权且基本未占用的频段能够提供高达9 GHz的宽带宽，支持高数据速率，提供的短波长可以实现紧凑型系统设计，且具备高衰减比，因此干扰水平低。这些优点使得60 GHz技术对诸如多千兆WiGig网络（IEEE 802.11ad和下一代IEEE 802.11ay标准）、无线回程连接和高清视频无线传输（专有的WirelessHD/UltraGig标准）等应用具有吸引力。

在工业领域，60 GHz技术主要用于毫米波雷达传感器和数据速率较低的遥测链路中。但是，随着该领域的快速发展，60 GHz技术很可能能够在工业子系统中实现高速、超低延迟的数据传输。

集成式数据接口架构

本文介绍了一种采用60 GHz频段，适用于工业滑环应用的新型毫米波数据接口解决方案。该解决方案的关键功能性元件是ADI公司的60 GHz集成式芯片组，由HMC6300发射器和HMC6301接收器组成，其原理图分别如图7和图8所示。这个完整的硅锗(SiGe)收发器解决方案最初针对小型蜂窝回程应用进行了优化，完全可以满足工业滑环应用的数据通信需求。芯片组在57 GHz至64 GHz频率范围内工作，可以使用集成式频率合成器以250 MHz、500 MHz或540 MHz的离散频率阶跃进行调谐，也可以使用外部LO信号进行调谐，以满足目标应用特定的调制、一致性和相位噪声要求。

收发器芯片组支持多种调制格式，包括开关键控(OOK)、FSK、MSK和QAM，最大调制带宽为1.8 GHz。它提供最大15 dBm的输出功率，可以使用集成式检波器进行监控。此芯片组支持灵活的数字或模拟IF/RF增益控制、低噪声系数，以及可调的低通和高通基带滤波器。此解决方案非常适合超低延迟工业滑环应用，其中一个独特优势是在接收器信号链中集成了一个AM检波器，可用于对OOK等幅度调制进行解调。

OOK是控制应用中常用的一种调制方法，因为它无需使用成本高昂且耗电的高速数据转换器，因此能够实现简单、低成本的通信解决方案。此外，由于OOK系统架构不包含复杂的调制和解调级，所以能够提供低延迟性能，这对于工业实时应用非常重要。

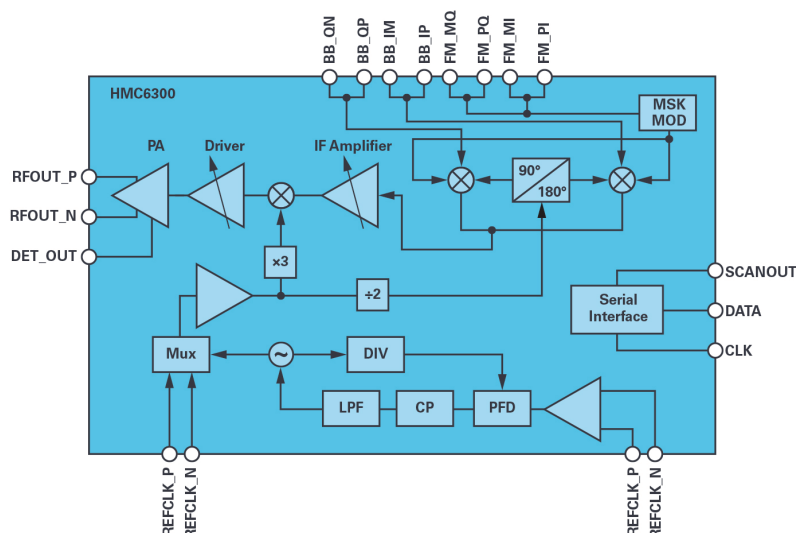


图7. 发射器HMC6300的功能框图。

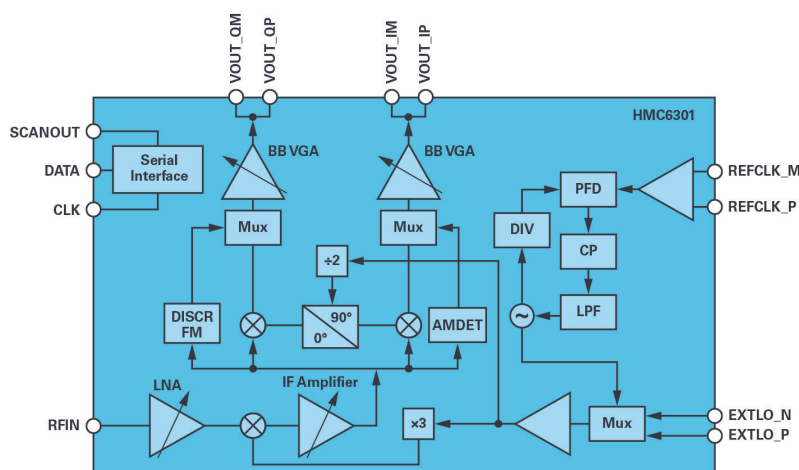


图8. 接收器HMC6301的功能框图。

ADI公司的发射器HMC6300和接收器HMC6301集成解决方案都采用小型4 mm × 6 mm BGA封装，将特性和性能优势以独特的方式组合在一起，可以满足现代高速滑环应用的严苛要求。除了核心收发器元件外，全双工滑环数据接口的完整概念设计还包括天线、电源管理、I/O模块和辅助信号调理组件，可以根据目标应用的需求进行选择。有关整个60 GHz全双工数据接口解决方案概念的详细框图，请参见图9。此解决方案能够以高于1 Gbps的速度实现高度、超低延迟数据传输，且比特误码率可以忽略不计。使用适当的天线设计和增益设置可以在几十厘米距离内实现可靠通信，这为在特定的工业场景中广泛使用滑环解决方案开启了契机。

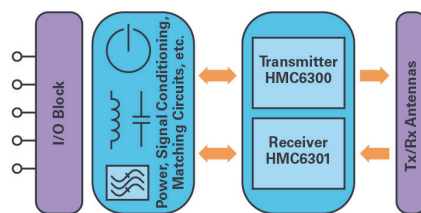


图9. 60 GHz全双工数据接口的框图。

分立式数据接口架构

本文介绍的集成式解决方案的性能功能足以满足大部分工业滑环应用的需求，但是，受工业组件定制这个趋势的广泛影响，数据接口可能需要提供支持千兆位的更快数据速率。因此，可能需要使用分立式组件来配置定制解决方案，以满足特定需求。

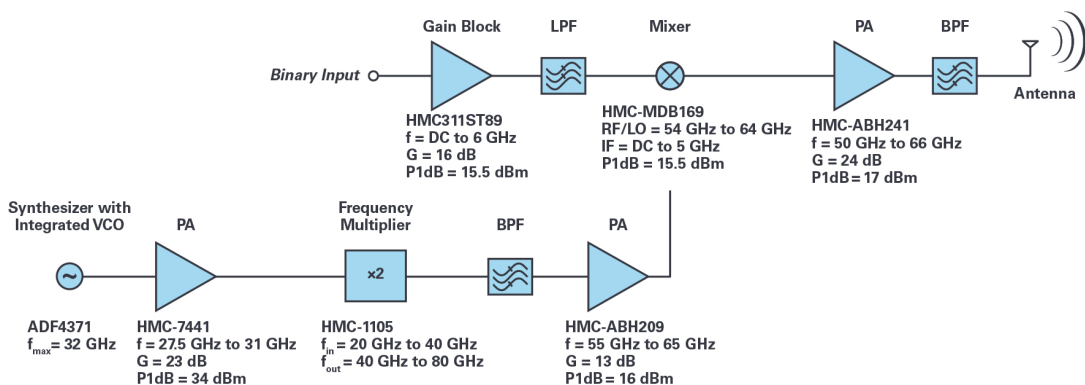


图10. 适用于60 GHz发射器的完整信号链解决方案 (OOK调制器)。

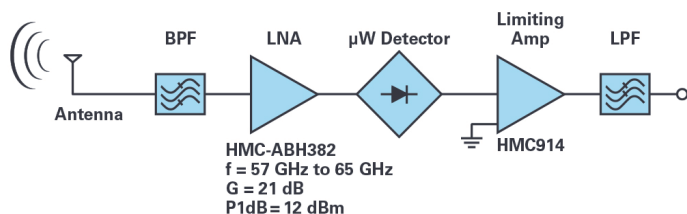


图11. 适用于60 GHz接收器的完整信号链解决方案 (OOK解调器)。

图10和图11显示支持5 Gbps以上数据速率的60 GHz数据接口的完整信号链解决方案示例。这种OOK解决方案通过采用ADI公司的标准RF组件和基本自定义模块来实现，包括无源器件、匹配电路、分支型滤波器、偏置器、衰减器等（图中未显示所有组件）。

这种分立式解决方案基于单个检测系统架构实现。但是，基于性能要求也可以在视频检测阶段之前对RF信号进行下变频处理，从而有助于实现超外差架构。

结论

工业4.0正在推动许多技术的变革，其中一个就是工业通信。在第四次工业革命的推动下产生的新应用场景，要求在实时运行的自动化设备的旋转组件之间，实现更快、更可靠且更准确的超低延迟数据传输。

ADI公司提供广泛的、涵盖整个频谱范围的高性能集成式和分立式RF和微波组件，支持通过旋转接头实现非接触型Gbps级数据传输的特定应用设计。本文介绍了一种集成式和分立式数据接口解决方案，它利用毫米波电磁波可实现转子和定子之间的数据传输。本文介绍的解决方案不仅提供高速数据传输、超低延迟、可以忽略不计的比特误码率、强干扰衰减和免维护操作，还可以经受更高层次的失调，支持在更远距离内传输数据，支持更广泛的循环组件，以满足日益增长的现代工业应用需求。

ADI公司为工业4.0合作伙伴提供深厚的工业领域专业知识和新一代功能经验，帮助当今的工厂基础设施开发更快、更经济高效的先进解决方案，做好迎接未来的准备。

作者简介

Anton Patyuchenko于2007年获得慕尼黑技术大学微波工程硕士学位。毕业之后，Anton曾在德国航空航天中心(DLR)担任科学家。他于2015年加入ADI公司担任现场应用工程师，主要负责医疗健康、能源和微波应用，目前为ADI公司的战略与重点客户提供现场应用支持。联系方式：
anton.patyuchenko@analog.com。

在线支持社区

ADI EngineerZone™

访问ADI在线支持社区，中文技术论坛
与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn



ADI公司
请访问analog.com/cn

如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和
技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解
答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。
请访问ez.analog.com/cn。

©2019 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。
商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

TAA21550sc-9/19

