

铰链的科学：铰链在航空雷达中的应用

刘伟楠

北京空管工程技术有限公司 北京 100621

【摘要】：本文深入探讨了旋转铰链在民用航空雷达系统中的核心作用、工作原理、关键技术及发展趋势。旋转铰链作为连接雷达固定系统与旋转天线的关键机电部件，承担着传递旋转力矩和实现射频/控制信号不间断传输的双重功能。论文首先介绍了铰链的基本结构，随后详细分析了其在航空雷达中的一体化多层设计，包括波导、同轴、电信号及编码器等多通道集成方案，并阐述了其如何通过非接触耦合与滑环技术解决360度旋转下的信号传输问题。文章进一步探讨了铰链的射频性能指标与设计难点，强调了其在严苛航空环境下对高可靠性和长寿命的极致要求。最后，展望了未来旋转铰链向轻量化、集成化、全固态无接触化以及智能化预测性维护方向发展的趋势。本文系统性地总结了旋转铰链的技术内涵，揭示了其对支撑航空雷达技术发展的重要价值。

【关键词】：旋转铰链；航空雷达；机电一体化；信号传输；相控阵

DOI:10.12417/3083-5526.25.07.013

引言：无处不在的铰链与航空雷达的特殊需求

铰链作为一种基础机械连接装置，广泛存在于从日常生活到高端科技的各个领域。从简单的门窗合页到精密的航空航天机构，从普通的橱柜门到高端的折叠屏手机，铰链技术以其独特的方式连接着我们的物质世界，在精密的航空雷达系统中，旋转铰链扮演着至关重要的角色，它不仅是实现雷达天线360度连续旋转扫描的机械传动核心，更是确保雷达收发信号在动静部件间稳定、不间断传输的电气桥梁。本文旨在系统阐述铰链，特别是旋转铰链，在航空雷达中的应用科学。

口，将驱动电机的旋转力矩平稳传递给天线阵面，并确保旋转轴线精确对中；二是作为电气连接接口，实现雷达收发机与旋转天线之间的射频信号及低压控制信号的不间断传输。其工作原理基于电磁场在特定结构波导或同轴线中的传播特性，通过精心设计的旋转接触或非接触耦合结构，使得信号在相对转动的两部分之间实现低损耗、低驻波比的过渡。

2 一体化多层结构设计 with 多通道传输

典型的航空雷达旋转铰链通常采用“一体化多层”结构设计，这种多通道集成方案有效解决了传统结构体积大、集成度低的问题。相关研究表明，采用“可堆积”或“三导体同轴线耦合”结构，能够将内、外通道信号进行物理隔离，通过多点馈电技术有效抑制旋转抖动，实现低损耗、低驻波比的高性能传输^[1]。图2是航空雷达旋转铰链的结构图，从高到低集成不同通道：JTS旋转铰链由外壳、高级转动轴、低级转动轴、9针滑环和编码器组成。旋转铰链的顶端与天线转台齿轮中心相匹配，天线转动的同时带动旋转铰链转动轴转动，铰链不但可以360度不停地旋转，也在固定部分和旋转部分之间成为媒介。

高级转动轴部分用于传输波导信号，也就是传输一次雷达目标低波束信号，用于接收远距离目标。低级转动轴部分则用来传输同轴射频信号，包括一次雷达目标高波束信号、一次雷达气象高、低波束信号以及二次雷达和、差、控制波束信号。9针滑环则用来传输电信号，包括一次雷达极化马达供电、状态监控及命令控制信号。2个互为备份的方位编码器则安装在高级转动轴和低级转动轴之间，有独立的供电通道和方位信号传输通道，互不影响，2路方位编码器输出的方位增量脉冲（ACP）和方位增量脉冲（ARP）信号，经主用询问器滤波处理后送给一二次雷达系统使用，两路方位信号互为热备份，任何一路方位编码器故障都不会影响询问器接收另一路方位信号，保证系统正常运行。

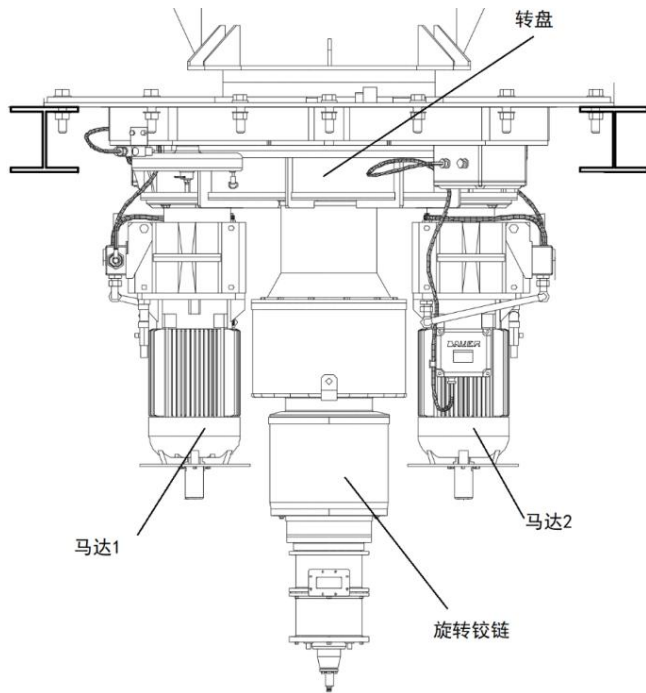


图1 雷达系统中旋转铰链位置

1 旋转铰链的核心功能与基本工作原理

如图1所示，在航空领域的雷达中，旋转铰链处于雷达大盘的正下方，其核心功能可归结为两点：一是作为机械传动接

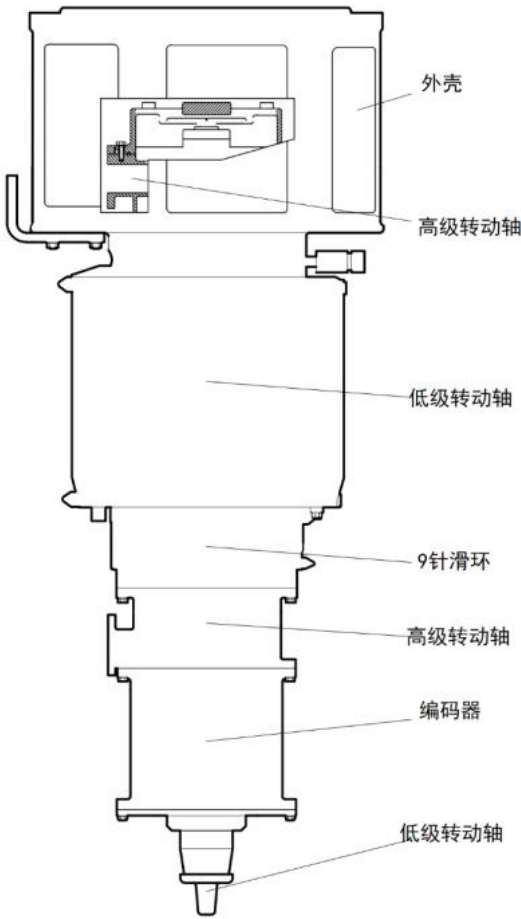


图2 航空雷达旋转铰链结构图

3 三百六十度旋转下的信号连接解决方案

这时可能有人会疑问，既然雷达在360度不停地旋转扫描目标，那传输线不会打结吗？旋转铰链是一种机电设备，从结构上既有固定部分又有转动部分，在旋转铰链的下方固定部分通过馈线或波导与雷达系统相连，在旋转铰链的上方转动部分通过馈线或波导与天线相连，同时与天线同步转动。在旋转铰链的中间部分，详情可图3旋转铰链固定部分和转动部分剖面图，其中二次雷达波束通道所在的射频信号是通过封闭空间的趋肤效应、1/4波长传输线耦合，没有实际的机械接触面，而9针滑环处的电信号则通过一组随轴旋转的导电滑环传播，当旋转部件旋转时，电刷与滑环电相接触，保持持续的电连接，为了确保信号的可靠传输，电刷和滑环采用特定的材料和配置进行设计，最大限度地减少接触电阻和磨损。接触材料通常因其高导电性和耐腐蚀性而被选择，同时接触形状和表面光洁度经过优化，以最大限度地减少摩擦并提高电气性能。

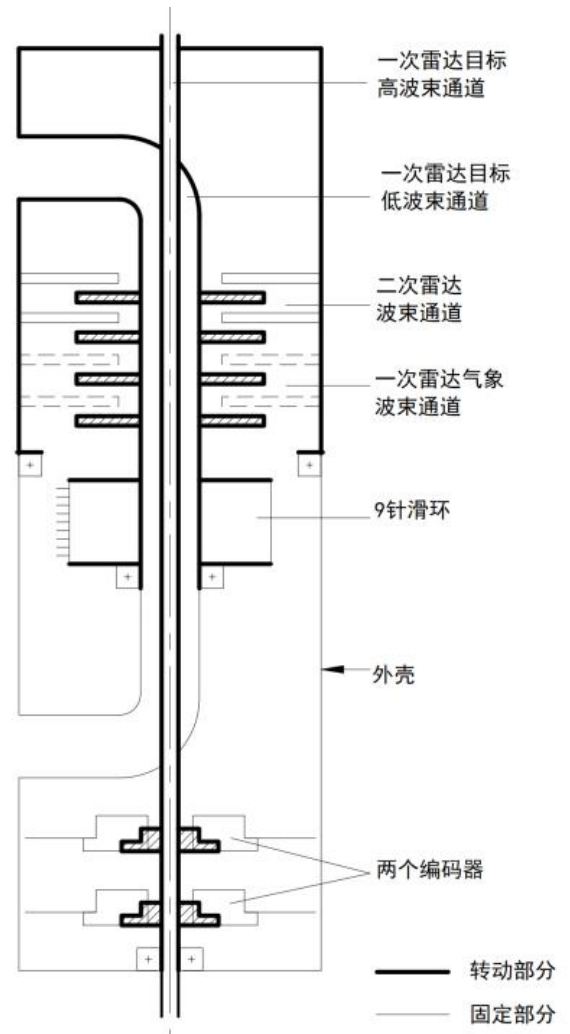


图3 旋转铰链固定部分和转动部分剖面图

4 关键性技术指标、设计挑战与可靠性要求

旋转铰链的射频性能主要体现在插入损耗、电压驻波比和旋转波动上，其设计难点在于如何在部件持续相对运动时，维持传输线特征阻抗的连续与匹配，针对超宽频带（如4GHz带宽）的需求，传统的矩形波导关节难以满足，工程实践表明，采用“阶梯扭转波导”结构，通过多段波导按特定规律扭转连接，利用反射波互相抵消的原理，可以在较小的轴向尺寸内实现极宽的工作频带和优良的驻波性能^[2]。对于波导型，需精确控制圆波导的圆度、同心度及与矩形波导接口的匹配，对于大功率应用场景，圆波导旋转铰链的设计尤为关键。研究指出，通过精确控制圆波导半径、腔体长度及模式变换块尺寸，并利用HFSS等电磁仿真软件进行优化，可以显著提升其功率容量，实现插损小于0.1dB、旋转起伏低于0.05dB的稳定性能^[3]；对于同轴型，需确保滑动接触界面的接触电阻稳定、一致，并有效抑制因机械断续可能引起的信号瞬断或相位跳变。如图4同轴线缆右侧为固定部分，左侧为旋转部分，采用“四分之一波长短路活塞”等抗流结构，可在物理接触面形成射频开路，有效减少接触电阻变化对信号的影响。

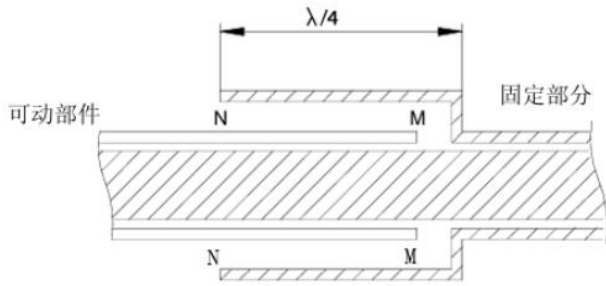


图4 同轴线缆剖面图

5 未来发展趋势

民用航空器对部件的使用寿命和可靠性要求极高，旋转铰链作为雷达转动的核心部件，其作用寿命关乎到雷达的平稳运行，在数载生命周期内，需在剧烈振动、连续运行等严苛环境下平稳工作，其可靠性必须满足航空业最高的安全标准。因此，从材料选择、冗余设计到生产工艺，每个环节都遵循最严格的质量控制体系。随着同步辐射等大科学装置对纳弧度级（nrad）精度的需求，柔性铰链技术展示了其无摩擦、无回退空程的独特优势。通过优化设计，此类机构已能实现±8.91 nrad的重复精度，这为未来航空雷达中高精度、全固态无接触传动机构的

参考文献：

[1] 唐波.L 频段双通道旋转关节的研制[J].电讯技术, 2007, 47(4): 172-173
 [2] 杨睿萍.某新型雷达旋转关节的结构设计研究[J].中国电子科技集团公司第二十研究所学报,2003
 [3] 朱乙平.大功率圆波导旋转铰链的设计与仿真研究[J].雷达与对抗,2006(1):57-60,70
 [4] 赵高峰,祝万钱,张丽敏等.纳弧度级柔性角位移调节机构的优化设计[J].核技术,2024,47(6):060101

发展提供了技术路径^[4]。未来，民用航空雷达旋转铰链的发展将呈现以下趋势：广泛采用高强度铝合金、复合材料，并利用先进制造工艺（如精密增材制造）进一步压缩体积、重量，集成更多功能于单一模块，呈现轻量化与集成化；随着有源相控阵雷达在民机上的应用，机械扫描需求可能减弱或变化，但旋转铰链在某些配置中仍需用于馈电网络旋转，无接触式的旋转变压器、射频耦合器（如定向耦合器实现旋转信号耦合）技术将更受青睐，彻底消除机械磨损点，呈现全固态与无接触化；集成更先进的传感器与数据处理单元，实现对铰链健康状态的实时评估与剩余使用寿命预测，并与雷达健康管理系统深度集成，最大化提升运营经济性，呈现智能化与预测性维护。

6 结论

民用航空雷达旋转铰链是一个多学科交叉的精密部件，其技术内涵远超普通机械轴承。其性能的不断提升，紧密跟随并支撑了航空雷达技术的发展。从波导型到高性能多通道同轴型，从定期维修到状态监控，旋转铰链的演进体现了航空电子设备对高可靠、长寿命、易维护的不懈追求。未来，随着新材料、新工艺及智能化技术的融合应用，旋转铰链将继续向着更高性能、更低全生命周期成本的方向发展，为民航飞行安全提供更坚实的保障。