

浅谈速度环滞后对连续波雷达跟踪的影响

西昌卫星发射中心 张 驰 刘建滨 丰 伟 鲁 聪 刘昌旭

摘 要：连续波雷达凭借无距离盲区、测速精度高的优势，在动目标跟踪领域得到广泛应用，其伺服控制系统中速度环作为位置环与电流环的中间核心环节，承担着速度指令解算、机械扰动抑制与运动状态平滑的关键作用。速度环滞后是系统设计与工程应用中常见的动态特性问题，由硬件响应延迟、控制算法运算耗时、信号传输损耗等多因素引发。本文从连续波雷达伺服系统三环耦合机制出发，分析速度环滞后的产生原因与量化特征，重点探讨其对雷达目标跟踪精度、动态响应能力、稳定性的影响规律，并提出针对性的抑制与补偿策略，为连续波雷达伺服系统的参数整定与性能优化提供理论参考。

关键词：连续波雷达；伺服系统；速度环滞后；目标跟踪；动特性

一、引言

连续波雷达通过发射连续射频信号，利用多普勒效应实现对目标径向速度的精准测量，同时结合相位检测完成距离计算，在场景中成为动目标跟踪的核心传感器。各环路通过带宽配比实现功能协同，其中速度环作为承上启下的中间层，将位置环输出的角度位移指令转化为连续的速度指令，同时为电流环提供精准的转矩参考，其动态响应性能直接决定雷达天线的运动跟随特性，进而影响目标跟踪的整体效果，速度环滞后现象难以避免。深入研究速度环滞后对连续波雷达跟踪的影响，具有重要的理论价值与工程指导意义。

二、连续波雷达伺服系统中速度环的核心功能与滞后成因

2.1 速度环在三环系统中的核心功能

连续波雷达伺服系统的三环嵌套结构形成了逐级解耦的闭环控制链，信息流沿位置环→速度环→电流环单向传递，扰动抑制则沿电流环→速度环→位置环逆向过滤，各环路决定了系统的整体性能[1]。速度环作为中间层体现在三个方面：一是指令转换与平滑，将位置环根据目标角度误差解算的离散位移指令，转化为连续、平稳的速度指令，避免因指令突变导致电机转速剧烈波动，保证雷达天线的匀速跟随运动；二是扰动抑制，通过 PI/PID 控制算法抑制机械负载突变、风阻干扰、电机转矩脉动等中频扰动，防止此类扰动传递至位置环影响角度定位精度；三是速度反馈与校正，通过编码器、测速发电机等元件采集电机实际转速，与速度指令进行对比，实时校正转速误差，保证速度跟踪的稳态无差特性。

2.2 速度环滞后的主要成因与量化特征

纯滞后又称传输滞后，是指速度指令从输出到电机实际转速开始响应的延迟，惯性滞后由系统的惯性特性引发，主要源于电机的机电惯性、机械传动机构的转动惯量，以及速度环控制电路的 RC 滤波环节，表现为电机转速从开始响应到达到稳态值的渐变过程[1]。

容量滞后主要由控制算法的运算耗时与信号处理的容量限制引发；电机死区电压、机械摩擦

与间隙等非线性因素会加剧速度环滞后。

三、速度环滞后对连续波雷达跟踪的影响规律

连续波雷达的目标跟踪过程，本质是雷达天线通过伺服系统跟随目标空间位置变化的过程，速度环滞后通过改变天线的运动跟随特性，从跟踪精度、动态响应能力、系统稳定性三个维度影响雷达的跟踪性能，且滞后程度与影响效果呈正相关，当滞后超过临界值时，会导致系统性能急剧恶化。

3.1 降低目标跟踪精度，增大速度与距离测量误差

跟踪精度是连续波雷达的核心性能指标，包括角度跟踪精度、速度测量精度与距离测量精度，速度环滞后对三者均存在显著影响，其中对速度与距离测量的影响更为直接[1]。

从速度测量角度，连续波雷达通过提取回波信号的多普勒频移解算目标径向速度，而雷达天线的运动速度由速度环精准控制，当速度环存在滞后时，会形成天线运动与目标运动的速度差，该速度差会被叠加至目标的实际多普勒频移中，导致雷达解算的目标速度包含虚假成分，产生测速误差。

3.2 削弱系统动态响应能力，降低复杂运动目标的跟瞄效果

连续波雷达常需跟踪做加减速、变向等复杂运动的目标，这要求伺服系统具备快速的动态响应能力。速度环作为系统动态响应的核心，其滞后特性会直接降低系统的快速性，表现为系统超调量增大、调节时间延长、响应速度变慢。当目标做加减速运动时，位置环会根据目标角度的变化率快速调整速度指令，而速度环滞后会使电机实际转速无法及时跟随指令变化，形成动态跟踪滞后[3]。对于变向运动目标，速度环滞后会导致系统的反向响应时间延长，电机从正转切换为反转（或反之）时，需要先克服速度环的滞后惯性，才能实现转速的反向调整，此过程中会出现短暂的“转速停滞”现象，导致目标位置在短时间内超出雷达的波束覆盖范围，严重时甚至会引发目标丢失。此外，速度环滞后会使系统的动态跟随特性呈现非线性，即不同运动速度、加速度的目标对应的跟踪误差存在显著差异，增加了雷达跟踪性能的不稳定性。

3.3 降低系统稳定裕量，易引发系统振荡与失稳

伺服系统的稳定性是雷达实现正常跟踪的前提，连续波雷达伺服系统的稳定性由三环的参数配比与动态特性共同决定，速度环滞后会降低系统的相角裕量与增益裕量，使系统的稳定裕量减小，引发系统振荡与失稳[2]。根据控制理论，系统的相角裕量直接决定其稳定性，相角裕量越大，系统的稳定性越好。速度环的纯滞后环节会产生相角滞后，即系统的相角裕量降低。当相角裕量减小至临界值以下时，系统会从稳定状态变为临界稳定甚至不稳定状态，表现为雷达天线的转速出现持续振荡，该振荡会直接导致目标跟踪误差急剧增大，无法实现稳定跟踪。

四、速度环滞后的抑制与补偿策略

针对速度环滞后对连续波雷达跟踪的不利影响，结合滞后的产生机理与影响规律，从系统设计优化、控制算法改进、工程补偿措施三个方面提出针对性的抑制与补偿策略，通过多维度协同优化，降低速度环滞后程度，提升雷达的跟踪性能。

4.1 优化系统硬件设计，减小固有滞后

速度环的固有滞后由硬件特性决定，通过优化硬件选型与设计，可从源头减小纯滞后与惯性滞后。在传感器选型方面，选用高采样率、低延时的速度检测元件，减小速度采样与反馈的纯滞后时间；在功率放大环节，采用宽频带、快响应的数字功率放大器，替代传统的模拟放大器，降低放大器的响应延时。

在机械结构设计方面，采用低转动惯量、高传动效率的机械传动机构，减小机械摩擦与间隙，降低系统的惯性滞后；同时对雷达天线的负载进行轻量化设计，减小电机的输出转矩负担，使电机能够快速响应速度指令[4]。此外，优化伺服控制器的硬件电路，采用高性能的微处理器，提高控制指令的解算速度，减小算法运算的容量滞后。

4.2 结合信号处理算法，补偿跟踪误差

从雷达信号处理层面，通过改进信号解算算法，补偿速度环滞后引发的跟踪误差。针对速度环滞后引发的多普勒频移测量误差，在多普勒频移解算环节，引入天线运动速度补偿，通过速度传感器采集天线的实际转速，解算其对应的多普勒频移，从雷达回波的总频移中剔除该部分频移，得到目标的实际多普勒频移，提高测速精度。

五、结论与展望

速度环滞后作为连续波雷达伺服系统中不可避免的动态特性问题，为降低速度环滞后的影响，需从源头优化硬件设计，减小固有滞后；改进控制算法，提升速度环的动态响应性能；采取工程补偿措施，抑制耦合滞后与非线性滞后；结合信号处理算法，对跟踪误差进行后期补偿，通过多维度的协同优化，实现速度环滞后的有效抑制。本文通过分析速度环滞后的影响规律，提出了一系列针对性的优化策略，为连续波雷达伺服系统的设计与优化提供了理论参考。

参考文献

- [1] 纪飞, 楼生强, 辛勤, 等. 连续波雷达加速度和速度估计方法研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(21):17-19.
- [2] 任仕召, 魏光辉, 潘晓东, 等. 典型雷达装备带内连续波辐射效应试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(5):57-62. DOI:10.11884/HPLPB202032.190471.
- [3] 闫志明, 李曦, 李道帅, 等. 导弹尾焰对多频连续波雷达影响研究[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(1):55-60. DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2018.01.009.
- [4] 黄科元, 周滔滔, 黄守道, 等. 永磁伺服系统基于微分自适应补偿的快速无超调控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9):137-144.