

基于目标特性的雷达伺服 PID 参数优化设计

任臻臻^{1,2}, 蔡红维², 吴高扬², 王康², 刘畅²

(1. 国防科技大学 电子科学学院, 长沙 410073;

2. 西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

摘要: 针对某任务中雷达伺服系统 PID 控制参数设置不合理引起初始段跟踪不稳定的问题, 详细分析了 PID 控制参数影响雷达伺服系统的机理, 对问题故障进行了准确定位, 提出了基于不同目标特性的 PID 控制参数优化设计方案, 并采用近距离、远距离两种部署方式开展试验验证, 结果表明优化设计方案可行, 均能实现目标的稳定跟踪; 对雷达设备使用单一 PID 控制参数无法兼容不同测量点位火箭跟踪问题的分析、定位及解决具有一定的指导意义。

关键词: 伺服系统; PID 参数; 目标特性; 稳定跟踪

Optimization Design of PID Parameters for Radar Servo System Based on Target Characteristics

REN Zhenzhen^{1,2}, CAI Hongwei², WU Gaoyang², WANG Kang², LIU Chang²

(1. National University of Defense Technology, Department of Electronic Science, Changsha 410073, China;

2. Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China)

Abstract: Aimed at the unreasonable PID control parameter setting of radar servo system in a certain task, it causes the problem of unstable tracking in initial segment, this paper analyzes the influence of PID control parameters on radar servo system in detail, accurately locates the fault, proposes an optimal design scheme of PID control parameters based on different target characteristics. The experiments are verified by the aspects of the short-range and long-distance points. The results show that the optimization design can meet the stable tracking target. The use of single PID control parameters for radar equipment is not compatible with rocket tracking at different points, It has a certain guiding significance for the analysis, positioning and solution of the problem.

Keywords: servo system; PID parameters; target characteristics; stable tracking

0 引言

随着现代科技的发展, 雷达系统在军事、航空、无人驾驶等领域的应用越来越广泛。雷达伺服系统的性能直接影响到系统的跟踪精度、响应速度和稳定性, 雷达伺服系统在雷达系统中具有非常重要的意义。PID 控制是雷达伺服系统中应用最广泛的一种控制方式, 表示比例、积分、微分 (Proportion, Integral, Differential) 控制。随着电子计算机和控制领域的发展, 控制器的方案虽在不断丰富^[1-3], 但由于 PID 控制法结构简单、操作方便、适用性强和鲁棒性强等特点至今仍未被雷达设备广泛使用。特别是在工业应用中, 针对控制对象的准确数学模型往往很难建立, 控制系统的参数不固定, 利用控制原理进行分析达到参数整定需要耗费很大精力, 效果却不尽如人意, 效费比过低。所以经常采用 PID 控制, 根据工程经验在现场进行整定, 以得到合适的效果。实际分类有 PID 控制、PI 控制和 PD 控制。随着现代微机技术的快速发展, PID 算法因可以精细修正而变得更加完善^[4]。PID 控制器的参数选择对控制效果具有重要影响, 因此, 对 PID 控制参数进行优化是提高雷

达伺服系统性能的关键。

航天测控系统要求更高效、更精准、更快速地跟踪目标, 雷达设备作为靶场主流无线电装备, 对其性能要求也随之更高, 快速响应、高跟踪精度和宽速范围也是未来的发展方向。凭借控制机理清晰明确、响应速度快、特性好、精度高、可靠性高, PID 控制器被广泛应用于雷达地伺服系统中^[5-6]。大量实验表明, 为了获得更好的控制效果, 需要对 PID 控制器进行参数整定^[7]。近年来, 随着控制技术的不断发展, 研究者们提出了很多 PID 控制器参数的整定方法, 常见的包括 PID 模糊控制法、神经网络算法、粒子群算法及人群搜索算法等^[8-12]。

本文详细分析了 PID 控制参数影响雷达伺服系统的机理, 提出了基于不同目标特性的 PID 控制参数优化设计方案, 分别部署于近距离、远距离的测量点位开展验证, 结果表明均能满足稳定跟踪目标, 解决了雷达设备使用单一 PID 控制参数无法兼容不同测量点位火箭目标特性跟踪的问题。

1 研究背景

如图 1 所示, 某雷达伺服系统工作原理为: 天线采用

收稿日期: 2024-01-01; 修回日期: 2024-01-22。

作者简介: 任臻臻 (1995-), 女, 大学本科, 工程师。

引用格式: 任臻臻, 蔡红维, 吴高扬, 等. 基于目标特性的雷达伺服 PID 参数优化设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 91-96, 132.

引导方式对准目标，雷达发射电磁波遇到目标形成回波，系统识别捕获目标，信号处理模块根据捕获的回波信号解算角误差信号、AGC 控制码。跟踪误差信号以串行方式输出，误差信号通过滤波处理，与速度负反馈、再生正反馈信号合成，最后再经滤波、放大、限幅等综合控制处理后，控制伺服功放和电机，驱动天线做消除目标偏差的运动，形成自跟踪环路^[13]。

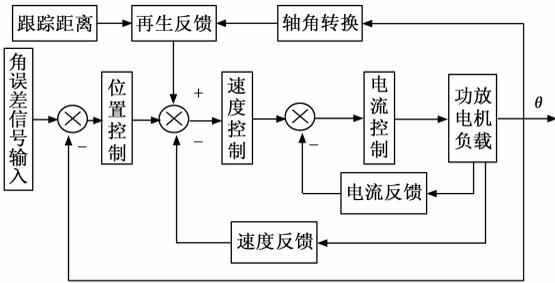


图 1 伺服系统工作原理图

PID 控制器是雷达跟踪系统中的重要组成部分，根据目标的位置和速度信息，计算相应的控制信号来调整雷达的发射功率、波束指向等参数，实现对目标的稳定跟踪。如果 PID 参数设置过于激进，即比例系数、积分系数和微分系数都过大，会导致控制信号过于敏感，使雷达伺服跟踪系统容易受到干扰，或者在目标运动速度较快时出现超调现象，从而影响雷达的跟踪稳定性。相反，如果 PID 参数设置过于保守，即比例系数、积分系数和微分系数都过小，会导致控制信号过于缓慢，使雷达伺服跟踪系统对于目标的运动变化反应不够灵敏，也会导致跟踪不稳定。

雷达跟踪的过程中，天线的运动一方面靠角误差经 PID 算法校正进行闭环跟踪，另一方面依靠再生反馈进行动态滞后补偿，补偿快速目标运动引起的滞后，二者的结合确保雷达可以稳定跟踪目标。雷达伺服系统 PID 控制参数设置如果不合理，火箭飞行跟踪过程中，会出现雷达跟踪不稳定情况，伺服跟踪抖动、随机误差超标甚至丢失目标。因此，需要根据实际情况选择合适的 PID 参数，以保证系统的稳定性和跟踪精度。

1.1 典型案例

2022 年，某 X 频段单脉冲雷达在执行某型火箭的初始段跟踪过程中，多次出现了跟踪不稳定情况，呈现出近距离跟踪火箭时追尾跟踪与超出火箭头部不断交替出现，中远距离跟踪趋于稳定的现象，且雷达实测方位、俯仰数据有大幅度抖动。

1.2 问题分析

针对上述问题，从以下 4 方面进行了系统分析：1) 岗位人员操作不合规；2) 火箭起飞后角速度、角加速度等指标超出雷达设计指标范围；3) 反射式雷达无法稳定跟踪近距离、快速体目标；4) 雷达伺服系统 PID 控制参数设置不合理。建立故障树如图 2 所示。

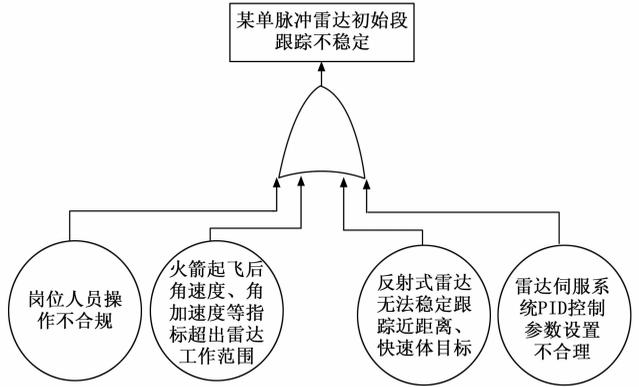


图 2 某任务某单脉冲雷达初始段跟踪不稳定故障树

1.3 问题排查

本问题需要从 3 个方面开展排查，分别为岗位人员、雷达性能、目标特性。通过复核岗位人员操作情况，分析显示控制软件录屏视频，排查当时岗位人员是否存在注意力不集中、业务操作不熟练、应急处置不及时的问题。分析存盘数据中方位、俯仰角速度和角加速度，与雷达的方位、俯仰角精度工作指标进行对比，分析是否由火箭起飞后速度或角加速度变化过快导致跟踪不稳定。雷达伺服 PID 参数需要根据实际情况选择合适的参数，以保证系统的稳定性和跟踪精度，因此有必要对其进行深入分析。最后，不同跟踪目标不同跟踪距离，对雷达跟踪性能要求不是一以贯之的，需要分析近距离、面目标，与远距离、面目标的目标特性区别。

1.3.1 岗位人员操作不合规

复核任务实际测量过程中雷达伺服岗位人员操作情况，从整个初始段雷达跟踪过程中看，岗位操作手初次捕获跟踪火箭满足跟踪条件。雷达跟踪开始呈现不断追尾、超头现象时，目标并未丢失，且跟踪有效指示灯显示绿色，因此未做应急。在目标丢失后直至重捕成功应急操作用时约 3 s，操作准确且应急迅速。雷达初始段跟踪岗位人员严格按照捕获跟踪方案进行相应操作，操作合规，应急措施合理，排除该项可能性。

1.3.2 火箭起飞后角速度、角加速度等指标超出雷达工作范围

分析任务中雷达引导弹道的方位、俯仰角速度及角加速度，与方位、俯仰工作范围对比可知，火箭方位、俯仰角速度及角加速度远小于雷达方位、俯仰工作范围。火箭起飞后角速度、角加速度等指标未超出雷达工作范围，排除该项可能性。

1.3.3 反射式雷达无法稳定跟踪近距离、快速体目标

该雷达是反射式脉冲测量雷达，其原理是向外发射电磁波，再接收目标反射回的电磁波完成测距、测角。由于在某测量点位执行任务时距离较近，火箭可以视为体目标，因此火箭垂直快速升空时，反射式雷达跟踪火箭首尾造成的方位、俯仰抖动难以避免，这种抖动情况随着火箭远离

雷达而逐渐减弱。

通过对以往该雷达在此测量点位执行的任务进行统计分析, 发现跟踪近距离、快速体目标虽然会造成一定方位、俯仰抖动情况, 但抖动表现远小于本次任务中的抖动表现, 且未发生目标丢失情况。因此, 反射式雷达无法稳定跟踪近距离、快速体目标, 不是导致本次任务雷达初始段跟踪不稳定的原因。

经分析排查, 近距离跟踪火箭时, 目标起始距离过近, 方位、俯仰角速度变化过快, 雷达伺服系统响应速度过慢, 天线滞后明显, 导致追尾跟踪; 随后天线由于再生反馈的作用, 迅速加速向上运动, 天线超前, 导致超出火箭头部, 偏离雷达波束范围后, 俯仰角误差变为零, 目标丢失。问题故障原因最终定位为雷达伺服系统 PID 控制参数设置不合理导致初始段跟踪不稳定。

2 PID 控制系统

2.1 PID 控制原理

控制系统主要由 PID 控制器、执行器以及被控对象组成, 其原理如图 3 所示。

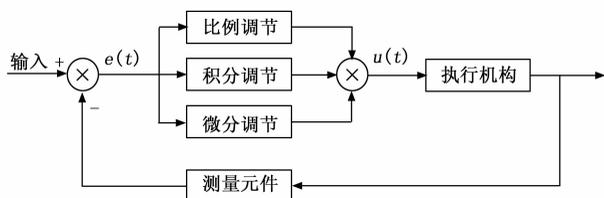


图 3 PID 控制系统原理框图

PID 控制, 也就是比例、积分、微分控制, 它是一种极其经典的控制系统设计方式。其基本原理是通过调整控制器的 3 个参数, 从而做到对被控对象的精确控制。PID 控制器是一种线性控制器, 根据给出的输入值 $x(t)$ 与系统实际测量值 $y(t)$ 形成控制偏差, 即:

$$e(t) = x(t) - y(t) \quad (1)$$

PID 算法公式为:

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + \frac{K_d de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中, $U(t)$ 为控制器的输出信号, $e(t)$ 为控制器的输入偏差信号, K_p 为控制器的比例系数, K_i 为控制器的积分系数, K_d 为控制器的微分系数^[14], $x(t)$ 、 $y(t)$ 为控制器的给出值、测量值。

PID 控制器各部分作用^[15-17]如下:

1) 比例控制部分。比例控制是一种最直接的控制方式, 控制的输出与输入误差信号为比例关系。当控制系统存在偏差 $e(t)$, 控制系统立刻产生与偏差信号成比例的控制信号, 向减小误差方向发展。当偏差信号为 0 时, 输出控制信号也为 0。增大比例系数可以尽可能地减小偏差信号, 同时也可以加快响应速度, 缩短调节时间, 但比例系数过大会导致控制系统动态性能变差, 甚至造成闭环系统不稳定。

2) 积分控制部分。积分控制能对误差信号进行延迟记忆, 主要作用是消除稳态误差, 积分作用的大小取决于积分系数, 积分系数越大, 引起的积分作用就越强, 积分系数越小, 引起的积分作用就越弱。积分作用强有利于消除稳态误差, 但会导致控制系统的稳定性有所下降, 尤其是当偏差信号较大时, 大的积分系数经常会使控制系统产生过大的超调量, 导致调节时间延长。

3) 微分控制部分。微分控制可以表现偏差信号的变化趋势, 能够在偏差信号值变得特别大之前, 在控制系统中引入一个信号进行早期修正, 可以增快控制系统的调节速度, 从而减少调节时间。恰当的微分可以加快控制系统响应速度, 有效地减少超调量, 从而增加控制系统的稳定性, 但同时会使控制系统的抑制干扰能力降低, 微小干扰就会引起控制系统的输出信号。

2.2 PID 控制参数

当控制系统安装完成后, 系统各个部分以及被控对象各控制通道的特性就确定下来, 不能随意改变, 但是可以改变控制器的参数, 即控制器的比例系数、积分系数和微分系数。要想改变整个系统的性能, 可以通过改变 3 个系数的大小, 以便取得较好的过渡效果和 control 质量。按照给定的控制系统, 求取控制器参数使得控制系统质量达到最好的效果, 这就是控制器参数整定。常规的控制器参数整定方法有 Ziegler-Nichols 法、Cohen-Coon 法和反应曲线衰减法等, 这些方法提出较早并已发展成熟, 但不适用复杂的非线性控制系统。现有的 PID 参数整定方法主要有模糊 PID 控制、智能算法 PID 控制以及分数阶 PID 控制。

理论计算整定法和过程整定法是控制器参数整定方法中最基本的两类。理论计算整定法是按照系统的数学模型, 经过精确的理论计算最终确定控制器参数。理论上来看, 理论计算整定法比工程整定法更能接近达到控制器参数的“最佳整定”, 但数学模型不管是使用解析法还是实验测定法求解, 都仅仅能近似地反映控制系统动态特征, 结果可靠性不高, 在实际中不能直接进行应用, 还需要结合工程实际进行调整和修正。而工程整定法主要依据积累的工程经验, 直接通过实验获取, 不需要完整准确的数学模型以及原理知识, 由于简便、实用、易于掌握, 被广泛应用于工程实践。但理论计算整定法可以通过理论计算, 帮助减少整定过程中的盲目性, 较快地整定到最佳状态。

由于雷达伺服需要根据实际情况选择合适的 PID 参数, 以保证系统的稳定性和跟踪精度。该雷达在远距离测量点位执行任务时出现过测量数据随机误差过大超差问题, 经排查定位于伺服 PID 参数设置不合理引起伺服跟踪抖动^[18], 为减少伺服系统跟踪产生的超调量, 对 PID 控制参数 (速度环、电流环积分系数) 进行了一系列调整。

1) 减小积分系数 K_i 。削弱速度环、电流环积分环节对系统的影响, 可以减小系统的超调, 降低系统的响应速度, 提高系统稳定性。

2) 伺服新增平滑处理模块。对信号处理器发往伺服控

制模块的角误差进行平滑处理^[19]，平滑处理后 PID 控制原理如图 4 所示。平滑处理后 PID 算法公式如下：

$$U(t) = K_p e'(t) + K_i \int e'(t) dt + \frac{K_d de'(t)}{dt} \quad (3)$$

式中， $e'(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e(t)$ ，其中 N 为平滑滤波阶数； K_p 为比例系数， K_i 为积分系数， K_d 为微分系数。

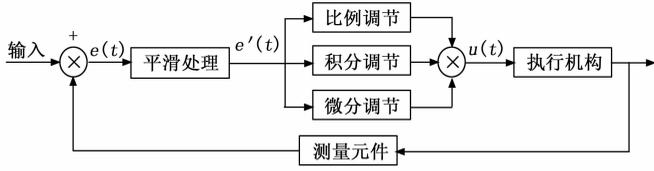


图 4 平滑处理后 PID 控制原理示意图

两条措施综合起来，虽然整体减小了系统超调，解决了雷达跟踪测量数据随机误差超差问题，但同时也严重降低了系统的响应速度，使得系统滞后严重。远距离测量点由于目标起始距离相对较远，相对雷达而言，起始时目标速度变化较慢，滞后不影响整体跟踪效果。但是近距离测量点目标起始距离过近，相对雷达而言，目标初始方位、俯仰角速度变化较快，降低了系统的响应速度，滞后较为明显^[20]，可能导致目标丢失。

如图 5 所示，查询近距离测量点位任务实际跟踪数据及俯仰角速度变化，雷达无法稳定跟踪近距离快速目标，由引导转跟踪后，天线快速向下运动，俯仰角速度快速减小，天线快速滞后。随后天线在再生反馈作用下迅速加速向上运动，俯仰角速度迅速加大，导致天线超前，直至超前至偏离雷达波束范围，俯仰角误差变为零，目标丢失。

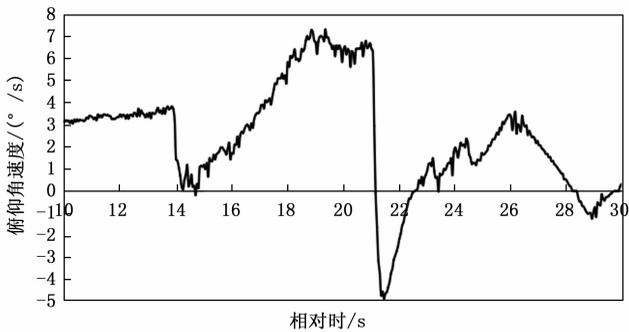


图 5 某任务实际跟踪俯仰角速度趋势变化图

2.3 现象分析复现

为了验证近距离测量点位跟踪时目标丢失，是由于伺服系统响应滞后导致，利用相同近距离测量点位、使用相同存盘数据进行实验。雷达采用存盘数据模拟器模拟目标飞行航路，伺服系统保持原编码程序，PID 参数与实际跟踪一致，雷达跟踪模拟飞行目标。通过实验可以清晰地看到初始段跟踪不稳定现象复现，雷达伺服系统明显响应速度过慢，滞后严重，模拟飞行目标最终丢失。综合实验结果可知，本次近距离测量点位跟踪不稳定导致目标丢失，原

因是伺服 PID 参数在近距离测量点位的环境下不适用，需要解决雷达使用单一 PID 控制参数无法兼容不同测量点位火箭目标特性跟踪的问题。

3 控制参数优化设计

该雷达所应用的站点比较固定，因此考虑针对使用特点设计近距离/远距离两套 PID 控制参数，如图 6 所示，由显示控制软件进行测量点位选择，经过通信控制软件转发给伺服，伺服根据测量点位选择调用近距离/远距离两套 PID 控制参数。

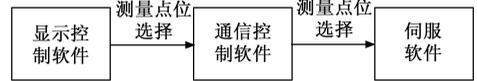


图 6 PID 控制参数选择示意图

显示控制软件参数设置中新增“测量点位”选择：近距离测量点位/远距离测量点位，该测量点位信息可以存储在参数配置文件中；显示控制软件每次启动时会自动读取配置文件中的测量点位，通过系统控制报将“测量点位”发送至通信控制软件。通信控制软件整字节转发，通过伺服控制报将“测量点位”控制位转发给伺服系统。伺服接收“测量点位”指令，根据测量点位，调用相应的 PID 参数。

伺服系统通过伺服状态报，将伺服当前所调用的测量点位参数号送给通信控制软件，直接转发给显示控制软件，显示控制软件将伺服反馈回来的测量点位进行显示，用于操作手确认伺服当前所调用的测量点位参数是否正确。

3.1 平滑滤波阶数优化

平滑滤波是基于多项式拟合的思想，通过对信号进行局部多项式拟合来实现平滑效果。具体而言，平滑滤波器使用一个滑动窗口，在每个窗口内进行多项式拟合，并将拟合结果作为该窗口中心点的新值。目标是使得拟合曲线与窗口内数据点的误差最小化，通过滑动窗口对整个信号进行滤波，得到平滑后的信号。

多项式的阶数通常取决于窗口大小，一般来说，不能超过窗口大小减一，而平滑滤波器为保证有一个中心点，窗口大小一般为奇数，所以多项式的阶数一般为偶数。窗口越大，平滑效果越好，但同时也可能导致信号细节丢失。在实际应用中，平滑滤波器可以通过调整窗口大小和多项式阶数，根据实际需求对信号进行不同程度的去噪处理，使信号更加稳定可靠。

为使实验结果更具说服力，同时采用某次任务原始数据（未滤波 $N=2$ ）、10 次平滑滤波（ $N=10$ ）、20 次平滑滤波（ $N=20$ ）3 种处理方法，得到俯仰误差值的变化趋势，综合分析平滑滤波阶数的效果。实际跟踪数据与经 10 次、20 次滤波后的俯仰误差值对比如图 7 所示。

实际跟踪原始数据的俯仰误差值是带起伏，真实反映了误差起伏的特性。经平滑滤波（ $N=10$ ）平滑处理之后，俯仰误差滤波效果明显，毛刺被滤掉，误差最大起伏幅度

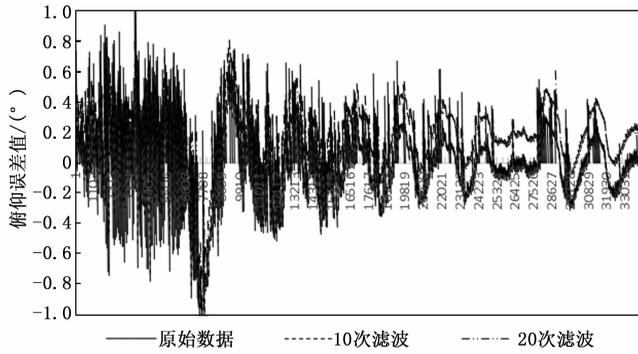


图 7 某任务实际跟踪数据与经 10 次、20 次滤波后俯仰误差值对比图

减小, 但经 10 次滤波后误差曲线与原始曲线明显滞后, 经查询数据文件, 滞后约 5 ms。经平滑滤波 ($N=20$) 平滑处理之后, 俯仰误差滤波效果比 $N=10$ 时还要明显, 误差最大起伏幅度更小, 但经 20 次滤波后误差曲线与原始曲线滞后更加明显^[21], 经查询数据文件, 滞后约 10 ms。表明平滑滤波算法对误差起伏有改善作用, 对近距离时由于体目标影响造成的伺服跟踪抖动有改善。滤波次数越多, 平滑效果越明显, 但是由于滤波引起的滞后问题也更严重。

经综合考量, 为兼顾平滑效果与滞后问题, 最终近距离测量点位选择滤波 10 次 ($N=10$) 为最佳选择。

3.2 PID 控制参数分段优化设计

从目标特性来看, 凡是尺度能和无线电波长相近, 具有 2 个或 2 个以上散射中心的任何体目标, 都会产生角闪烁。在实际应用场景中, 远距离目标角闪烁导致的测角误差很小, 对角度跟踪的影响几乎可以不计, 视为点目标。随着雷达越来越接近目标, 目标角闪烁导致的角度误差会对角度跟踪产生显著影响, 目标接收回波产生畸变^[22], 如果不能得到很好的抑制, 可能导致丢失目标。由于在某测量点位执行任务时距离较近, 火箭可以视为体目标, 因此火箭垂直快速升空时, 反射式雷达跟踪火箭首尾造成的方位、俯仰抖动难以避免^[23], 这种抖动情况随着火箭远离雷达而逐渐减弱。

1) 远距离测量点位: 速度环的积分系数在 $[0.0375, 0.05]$ 区间内, 电流环的积分系数在 $[0.005, 0.007]$ 区间内; 平滑滤波模块, 目标距离在 30 km 以内, 为应对近距离火箭目标闪烁影响, 将信号处理模块误差绝对值限制在 0.3° 以内, 再采用 20 次平均误差 ($N=20$) 作为当前信号处理模块输入误差, 以实现信号处理模块误差的平滑处理^[24]; 目标距离在 30 km 以外, 由于火箭目标闪烁影响极小, 将信号处理模块误差绝对值限制在 0.3° 以内, 再采用 2 次平均误差 ($N=2$) 作为当前信号处理模块输入误差。

2) 近距离测量点位: 增大积分系数可以增强速度环、电流环积分环节对系统的影响, 加快系统的响应速度, 减少调节时间, 避免因伺服系统滞后导致目标丢失。将速度环的积分系数增加到 $[0.075, 0.1]$ 区间内, 电流环的积分系数

增加到 $[0.001, 0.003]$ 区间内; 平滑滤波模块, 目标距离在 10 km 以内, 为应对近距离火箭目标闪烁影响, 将信号处理模块误差绝对值限制在 0.8° 以内, 再采用 10 次平均误差 ($N=10$) 作为当前信号处理模块输入误差, 以实现信号处理模块误差的平滑处理; 根据以往近距离测量点位执行多种任务经验, 火箭飞行 10 km 后, 已超过最大俯仰, 角速度变化较小, 所以目标距离在 10~30 km 内, 参照远距离测量点位任务执行情况, 将信号处理模块误差绝对值限制在 0.3° 以内, 再采用 20 次平均误差 ($N=20$) 作为当前信号处理模块输入误差, 以实现信号处理模块误差的平滑处理^[25]; 目标距离在 30 km 以外, 由于火箭目标闪烁影响极小, 将信号处理模块误差绝对值限制在 0.3° 以内, 再采用 2 次平均误差 ($N=2$) 作为当前信号处理模块输入误差。

4 试验验证及结果分析

4.1 近距离测量

为了验证近距离测量点位参数设置合理性, 部署该雷达在近距离测量点位执行某火箭跟踪任务, 显示控制软件选择“近距离测量点位”, 经过通信控制软件转发给伺服, 伺服根据近距离测量点位选择调用近距离 PID 控制参数。

雷达跟踪方位、俯仰角度和随机误差如图 8、图 9 所示。雷达选用近距离测量点位 PID 控制参数, 实测角度与理论角度、数引角度一致性良好, 任务中雷达在起飞后第 14 s 截获跟踪上火箭目标, 除火箭大 β 角时丢失目标外, 其余时刻均跟踪稳定, 方位、俯仰随机误差满足正常工作指标要求。经实际跟踪任务验证, 近距离测量点位 PID 控制参数可以满足该测量点位任务执行, 设备跟踪稳定可靠。

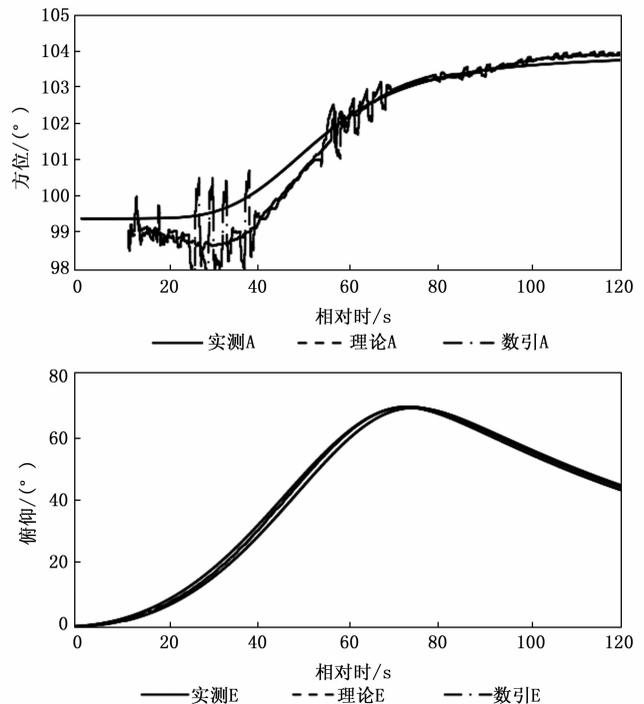


图 8 某任务实际跟踪雷达跟踪方位、俯仰对比图

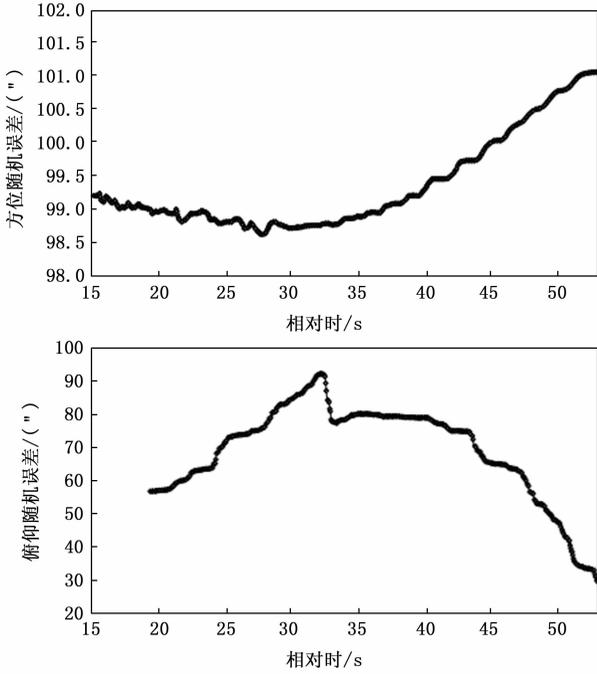


图 9 某任务实际跟踪雷达跟踪方位、俯仰随机误差图

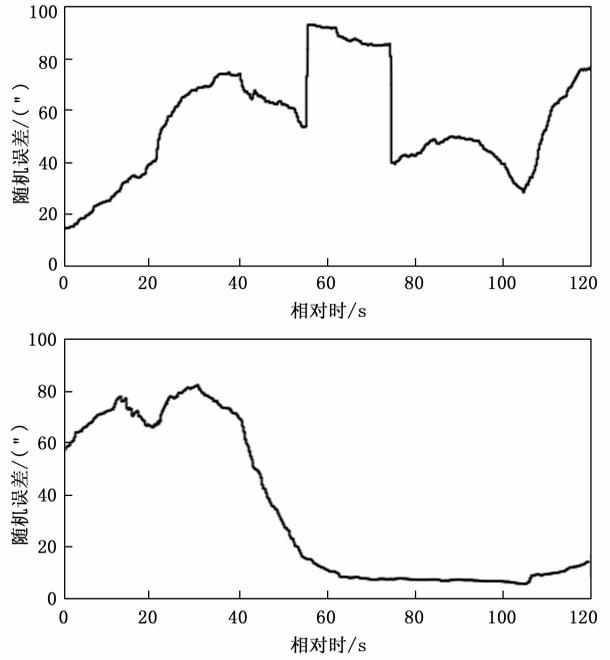


图 11 某任务实际跟踪雷达跟踪方位、俯仰随机误差图

4.2 远距离测量

为了验证远距离测量点位参数设置合理性，部署该雷达在远距离测量点位执行某火箭跟踪任务，显示控制软件选择“远距离测量点位”，经过通信控制软件转发给伺服，伺服根据远距离测量点位选择调用远距离 PID 控制参数。

雷达跟踪方位、俯仰角度和随机误差如图 10、图 11 所示。雷达选用远距离测量点位 PID 控制参数，实测角度与

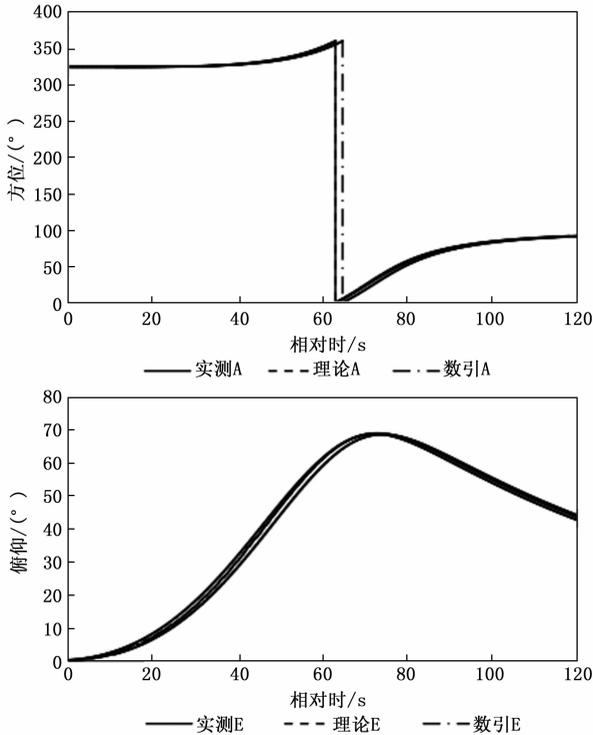


图 10 某任务实际跟踪雷达跟踪方位、俯仰对比图

理论角度、数引角度一致性良好，任务中雷达在起飞后第 13.4 s 截获跟踪上目标，任务弧段内均跟踪稳定，方位、俯仰随机误差满足正常工作指标要求。经实际跟踪任务验证，远距离测量点位 PID 控制参数可以满足该测量点位任务执行，设备跟踪稳定可靠。

综上，经实际跟踪任务验证，基于近距离/远距离测量点位不同目标特性，提出的两套 PID 控制参数合理可行，均可以满足该测量点位任务执行，设备跟踪稳定可靠，解决了雷达设备使用同一 PID 控制参数无法兼容不同测量点位火箭跟踪问题。

5 结束语

通过对某任务中雷达初始段跟踪不稳定问题的分析，深入探究了 PID 控制参数影响雷达伺服系统的工作机理，对问题故障进行了准确定位，提出了基于不同目标特性的 PID 控制参数优化设计方案。通过部署于近距离、远距离的测量点位实际跟踪验证，提出的两套 PID 控制参数合理可行，能满足不同跟踪模式下的控制要求。对雷达设备使用单一 PID 控制参数无法兼容不同测量点位火箭目标特性跟踪问题的分析、定位及解决具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 解登宇. 基于神经网络的 PID 控制器的设计 [J]. 科教导刊, 2020 (21): 74-75.
 [2] 叶政. PID 控制器参数整定方法研究及其应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
 [3] 黄炬. 楼宇中央空调自控系统的研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.

(下转第 132 页)