

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.005

一种雷达搜跟转换近似时间最优控制方法

柳江, 陈松波

(零八一电子集团研究院, 成都 611700)

摘要: 为解决时间最优控制 (time optimal control, TOC) 存在的颤抖和鲁棒性下降问题, 提出一种雷达搜跟转换近似时间最优控制 (proximate TOC, PTOC) 方法。以搜跟雷达方位伺服作为研究对象, 在电机角速度和角加速度受约束的条件下, 设计近似时间最优控制器, 建立控制数学模型, 并基于 Matlab 进行仿真论证及实物验证。验证结果表明: 该算法切实可行, 能达到系统技术指标要求, 可广泛应用于搜跟一体雷达伺服系统中。

关键词: 搜跟雷达; 雷达截获时间; 近似时间最优; 伺服系统

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A

Approximate time optimal control method for radar search and tracking conversion

Liu Jiang, Chen Songbo

(Research Institute, No. 081 Electronics Group Co., Ltd., Chengdu 611700, China)

Abstract: In order to solve the problems of chattering and robustness degradation in time optimal control (TOC), an proximate time optimal control (TOC) method for radar tracking conversion is proposed. Taking the azimuth servo of tracking radar as the research object, the approximate time-optimal controller is designed under the constraint of motor angular velocity and angular acceleration, and the control mathematical model is established, and the simulation demonstration and physical verification are carried out based on Matlab. The results show that the algorithm is feasible and meets the technical requirements of the system, which can be widely used in the search and tracking radar servo system.

Keywords: tracking radar; radar intercept time; PTOC; servo system

0 引言

系统反应时间是武器系统的一个关键指标, 雷达搜跟转换时间是武器系统反应时间的重要组成部分。时间最优控制 (TOC) 采取 bang-bang 控制, 能使系统从初始状态到最终状态使用时间最少, 由于系统中存在非线性因素, 控制系统将发生颤抖且不具有鲁棒性^[1]。近似时间最优控制 (PTOS) 在 TOC 基础上增加了线性区, 大误差时采取 bang-bang 控制, 当误差减小到一定阈值时, 控制输出从最大值平滑切换到线性工作区, 解决了 TOC 控制存在的颤抖和鲁棒性降低的问题。

针对伺服系统 PTOC 问题, 众多学者对其进行研究并提出了不同的控制思想。刘亚云等^[2]提出当角位置误差减小到一定阈值时, 由时间最优控制算法切换为滑模变结构控制算法; 由于滑模变结构控制在滑动模态下会产生高频抖振, 需采取复杂的趋近率算法进行补偿。程国卿等^[3]在进入线性区后采取一个线性扩展状态观测器对系统未测量速度和未知扰动加以估计, 用于反馈和补偿, 以消除系统稳态误差。陆涛等^[4]在线性控制区对闭环阻尼进行动态调度, 通过设计一个降阶的扩展状态观测器对系

统中不可量测的速度信号和未知扰动进行估计, 并用于反馈控制和扰动补偿。张义超等^[5]在误差进入限制区间后采取比例微分的控制律实现响应时间最优且无颤抖问题。笔者在 TOC 基础上增加了比例积分线性区, 大误差时采取 bang-bang 控制, 当误差减小到一定阈值时, 控制输出从最大值平滑切换到线性比例积分工作区, 解决了 TOC 控制存在的颤抖和鲁棒性下降的问题。

1 近似时间最优控制律设计

典型的伺服系统可以用一个双积分模型来表示:

$$\left. \begin{aligned} \dot{y} &= \omega \\ \dot{\omega} &= b \cdot \text{sat}(u) \end{aligned} \right\}。 \quad (1)$$

式中: y 为可测的角位置输出; ω 为角速度; b 为模型参数; u 为幅值受限的输入信号。饱和限幅函数 $\text{sat}()$ ^[3] 定义为:

$$\text{sat}(u) = \text{sign}(u) \cdot \min\{u_{\max}, |u|\}。 \quad (2)$$

式中: $\text{sign}()$ 为符号函数; u_{\max} 为最大控制量。

系统的任务是在控制信号受限的条件下尽快跟踪上目标 r , 理论上 TOC 的控制率为:

收稿日期: 2024-05-22; 修回日期: 2024-06-20

第一作者: 柳江 (1969—), 男, 湖南人, 硕士。

$$u(t) = u_{\max} \cdot \text{sign}(f_t(e) - \omega) \quad (3)$$

式中 $f_t(e) = \text{sign}(e) \cdot \sqrt{2bu_{\max}|e|}$, $e=r-y$ 为角度误差。

实际系统中由于 TOC 鲁棒性差导致控制效果不佳, 需采取一种近似时间最优的折中方案, 即先用 TOC 进行快速跟踪控制, 当误差减小到预定值时平滑切换到比例积分控制, 其控制率如下:

$$f_{\text{ptos}}(e) = \begin{cases} \text{sign}(e) \cdot (\sqrt{2bu_{\max}|e|} - k_1 \cdot y_L / k_2) & |e| > y_L \\ k_1 / k_2 \cdot \text{PI}(e) & |e| \leq y_L \end{cases} \quad (4)$$

式中: y_L 为线性区的宽度; k_1 和 k_2 分别为角位置和速度反馈增益, k_1 和 k_2 的取值可通过极点配置法来确定。设线性区的闭环极点对应离散域特征方程为 $z^2 + p_1 \cdot z + p_0 = 0$, 则可得:

$$k_1 = (p_1 + p_0 + 1) / (b \cdot T^2), \quad k_2 = (p_1 - p_0 + 3) / (2b \cdot T)$$

根据 $f_{\text{ptos}}(e)$ 函数在 $|e|=y_L$ 处连续可控的平滑条件, 可得

$$y_L = (b \cdot u_{\max} / 2) \cdot (k_2 / k_1)^2$$

如图 1 所示, 在角位置误差 e 及角速度 ω 的相平面上, 可以把 PTOC 控制区域分割成饱和区 S^+ 和 S^- 以及不饱和区 U (包含线性工作区 L) 3 部分。系统典型运动轨迹: 从饱和区以最大控制量加速,

进入不饱和区后控制量减小或减速, 最后进入线性控制区, 从而实现快速平稳跟踪目标。

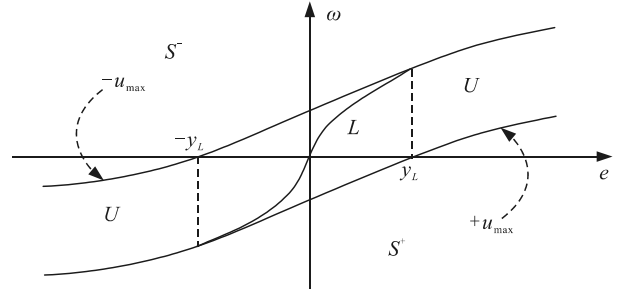


图 1 PTOC 控制区域

2 角速度受限的近似时间最优控制

基于近似时间最优控制的伺服机构, 其电机最大转速受到一定的限制, 因此控制系统中有必要考虑进行角速度受限控制算法设计。设负载轴允许工作的最大角速度为 ω_{\max} , 控制量 u_{ptos} 为负载的角加速度, 系统减速到零所需的角位移为 $\theta = \omega_{\max}^2 / (2b \cdot u_{\max})$ 。当角误差 $|e| > \theta + y_L$ 时, 若负载角速度已达到最大角速度为 ω_{\max} , 则保持恒速控制; 当角误差 $|e| \leq \theta + y_L$ 时, 则立即采用 PTOC 减速段控制; 当角误差 $|e| \leq y_L$ 时, 则转入线性区控制。

角速度受限控制率如下:

$$\omega = \begin{cases} \text{sign}(e) \cdot \omega_{\max}, & |e| > \theta + y_L \\ \text{sign}(e) \cdot \omega_{\max}, & y_L < |e| \leq \theta + y_L \\ (k_1 / k_2) \cdot \text{PI}(e), & |e| \leq y_L \end{cases} \quad (5)$$

接收到截获指令后, 根据方位角度误差范围、负载允许的最大角速度及最大角加速度确定近似最优控制速度输出值。

某搜跟雷达驱动电机选用交流直驱电机, 编码器采用高精度光电编码器。电机允许工作最大角速度为 $180 (^{\circ})/s$, 最大角加速度为 $300 (^{\circ})/s^2$, 以目标加速度为控制量, 采用角速度受限的近似时间最优控制算法。雷达搜跟转换近似时间最优控制仿真模型如图 2 所示。

3 雷达搜跟转换应用

搜跟雷达工作时一般包含搜索、截获 (搜跟转换) 和跟踪 3 种常用工作模式。搜索模式时雷达以恒定转速旋转, 雷达输出空域内可疑目标的航迹, 随后操控人员可选定重点目标进行锁定跟踪。为提高系统的截获概率, 需伺服系统在角速度、角加速度受限的条件下尽快跟上目标。搜跟转换时初始状态方位角度为 y_0 , 方位角速度为 ω_0 , t_1 时刻达到目标状态方位角度为 y_1 , 方位角速度为 ω_1 。伺服控制器

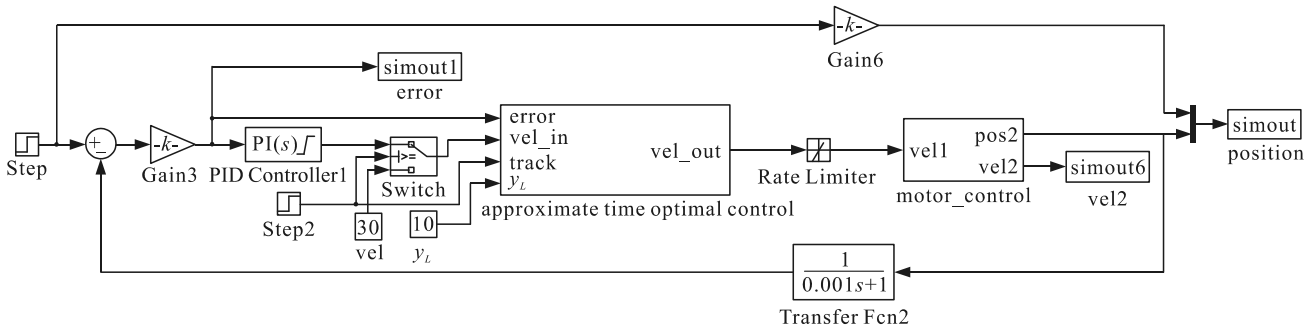


图 2 雷达搜跟转换近似时间最优控制仿真模型

搜跟转换时雷达方位伺服当前状态 (y_0, ω_0) 为 $(159^\circ, 180^\circ/\text{s})$ ，跟踪目标状态 (y_1, ω_1) 为 $(209^\circ, 0)$ ，截获时目标角位置误差为 50° ，Matlab 仿真搜跟转换方位角度响应如图 3 所示。由图可知转换时间为 0.9 s 。

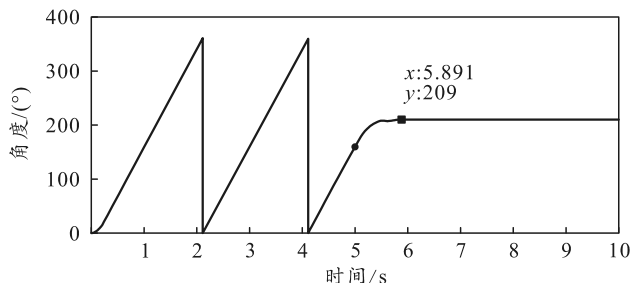


图 3 搜跟转换方位角度响应曲线 1

搜跟转换时雷达方位伺服当前状态 (y_0, ω_0) 为 $(100^\circ, 180^\circ/\text{s})$ ，跟踪目标状态 (y_1, ω_1) 为 $(249.3^\circ, 0)$ ，截获时目标角位置误差为 149.3° ，Matlab 仿真搜跟转换方位角度响应如图 4 所示。由图可知转换时间为 1.4 s 。

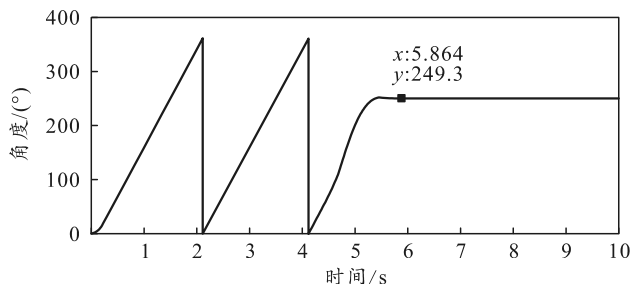


图 4 搜跟转换方位角度响应曲线 2

搜跟转换时雷达方位伺服当前状态 (y_0, ω_0) 为 $(180^\circ, 180^\circ/\text{s})$ ，跟踪目标状态 (y_1, ω_1) 为 $(137.2^\circ, 0)$ ，截获时目标角位置误差为 317.2° ，Matlab 仿真搜跟转换方位角度响应如图 5 所示。由图可知转换时间为 2.285 s 。

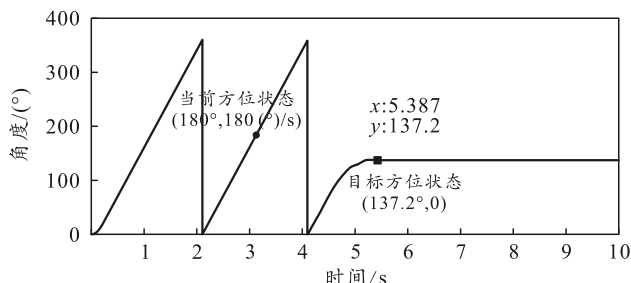


图 5 搜跟转换方位角度响应曲线 3

根据上述仿真结果，雷达搜跟转换时间满足要求，过程平稳，说明该算法切实可行。某搜跟雷达截获过程采用近似时间最优控制算法，方位角度响应曲线如图 6 所示。图中，搜跟转换初始状态为 $(y_0=180^\circ(3\ 000\ \text{mil}), \omega_0=180^\circ/\text{s})$ ，跟踪目标状态为 $(y_1=137.16^\circ, \omega_1=0)$ ，由图可知实际截获时间为 2.26 s ，截获完后顺利进入目标跟踪状态。工程验证结果与图 5 仿真结果相吻合，该算法能满足搜跟雷达快速平稳转换的相关技术要求。

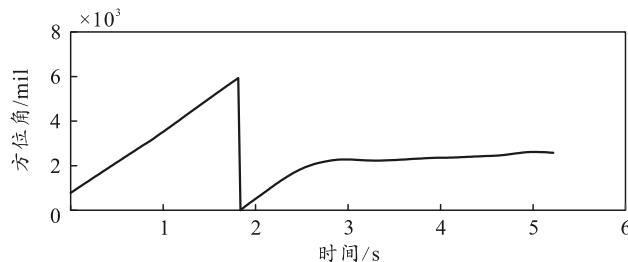


图 6 搜跟转换方位角度实际响应曲线 4

4 结束语

笔者基于角速度受限近似时间最优控制算法对搜跟雷达方位伺服系统截获过程进行控制，建立了近似时间最优控制律，并基于 Matlab 进行了算法仿真，在某型搜跟雷达上完成工程验证，达到了系统技术指标要求，可广泛应用于搜跟一体雷达伺服系统中。

参考文献：

- [1] CHEN B M, LEE T H, PENG K, et al. Composite nonlinear feedback control for linear systems with input saturation: theory and an application[J]. IEEE transactions on Automatic Control, 2003, 48(3): 427-439.
- [2] 刘亚云, 金亮亮. 一种改进的时间最优控制算法[J]. 雷达科学与技术, 2014(4): 210-213.
- [3] 程国卿, 胡金高. 限速伺服系统的近似时间最优控制方案[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2015(2): 180-185.
- [4] 陆涛, 程国扬. 扰动补偿变阻尼近似时间最优控制的应用研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(10): 83-86.
- [5] 张义超, 黄晨, 陆浩然, 等. 输入饱和的双积分系统的复合时间最优控制[J]. 计算机测量与控制, 2017(4): 83-86.