

目标自动跟踪系统中瞄准线控制器的综合化设计

邱晓波^{1,2}, 周启煌¹, 窦丽华², 单东升¹

(1. 装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072; 2. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

摘要: 在目标自动跟踪系统设计中, 为了简化系统结构设计以实现越来越多复杂功能的综合, 提出了按控制误差实现功能综合的理论方法, 并给出了基于自抗扰技术实现功能综合的完整解决方案. 将目标运动速度视为系统扰动, 采用扩张状态观测器实时估计并加以补偿. 在提高控制性能的同时, 用跟踪微分器对目标运动速度进行滤波并提取其一阶导数, 结合其他传感器测量值实现对目标运动状态的估计等信息处理功能. 实验结果表明: 系统跟踪机动目标的误差小于 0.1 mrad, 响应快速、超调小于 10%, 对目标的运动状态估计精确; 该方法结构简单, 只需改造现有控制器的软件, 即可高性能地实现多种功能的综合, 适应于今后系统功能的发展.

关键词: 功能综合; 机动目标跟踪; 自抗扰控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Integrated design of the sightline controller for automatic target tracking system

QIU Xiao-bo^{1,2}, ZHOU Qi-huang¹, DOU Li-hua², SHAN Dong-sheng¹

(1. Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In designing the target-tracking system, in order to simplify the system structure but realize more complex functions, we propose an error-based technique for designing the sightline controller, and put forth a complete project for active disturbance rejection. In this project the target velocity is detected as unknown disturbance which is estimated in real-time and compensated by an augmented state-observer. To improve the control performances, a tracking differentiator(TD) is used as a filter for estimating the target velocity and acceleration. This information is integrated with the measured values from other sensors for estimating the dynamic states of the target system. Experimental results show that this system can track rapidly maneuvering targets with tracking-error less than 0.1mrad and maximum overshoot ratio less than 10%, satisfying the integrated multi-functional requirements. By modifying the software in the controller, this project can easily be carried over to other multi-functional control applications.

Key words: function integration; maneuvering targets tracking; active disturbance rejection control

1 引言(Introduction)

目标跟踪系统是集目标探测、信号处理、伺服控制及精密机械等于一身的复杂光电系统^[1]. 长期以来, 其一直是人们在各种军用和民用领域感兴趣的研究对象. 由不可避免的模型和扰动不确定性、被跟踪目标运动状态不确定性等带来的鲁棒控制问题, 以及对被跟踪目标运动状态的估计理论与方法是多年来的研究重点. 针对跟踪过程中瞄准线控制的方法主要有: 等效复合控制方法^[2,3]、 H_∞ 控制方法^[4]等. 针对目标运动状态估计的方法包括确定性模型方法、“当前”统计模型方法^[5]、交互式多模型方法^[6]等. 随着在军事上实现远距离精确打击等不同应用需求的发展, 将目标运动状态估计与自动跟

踪技术相综合的诉求迫在眉睫^[7]. 然而, 由于以上两方面研究问题的关注点不尽相同, 其一直处于相互独立、并行发展的状态, 这使得实际应用中同时实现以上功能的系统结构过于复杂. 要在工程上实现高品质的瞄准线控制, 并综合对机动目标运动状态的准确估计, 以实现更高级的应用仍面临着缺乏正确理论描述和综合化设计方法的严峻挑战.

本文以某型目标自动跟踪火控系统研制为背景, 对其中的瞄准线控制器的多功能综合设计进行了深入研究, 提出了按控制误差的综合实现多功能综合的理论方法. 并从控制误差综合的角度进行了瞄准线自抗扰控制器的结构设计, 以控制过程观测得到的目标状态变量为基础设计了机动目标运动状态滤

波器. 自抗扰控制技术(ADRC)是中科院研究员韩京清为适应数字控制的需要而设计的一套新的系统综合方法^[8,9]. 因其动态控制品质好、算法简单、参数适应性广、鲁棒性强, 而在控制系统设计中得到广泛应用^[10~12]. 而且随着对自抗扰控制技术中的跟踪微分器(TD)和扩张状态观测器(ESO)非线性滤波特性的深入认识, 其在数字滤波、参数估计、系统辨识等信息处理领域逐渐受到关注^[13~15].

本文最后给出了基于自抗扰控制技术实现瞄准线控制器综合化设计的完整算法. 通过大量对比实验研究, 验证了本文方法的有效性. 只需一个瞄准线控制器即可实现多种功能的综合, 简化了系统结构.

2 基于控制误差的功能综合(Control error based function integration)

目标跟踪技术在军事装备应用中, 越来越追求小型化、精确化和智能化. 然而系统功能的发展却受到物理空间的极大约束, 当前靠物理结构的优化设计来实现多功能综合的优化效果并不显著.

新近在复杂系统理论中形成的, 通过多功能模型的综合来实现多功能的综合设计被认为是解决上述问题更有效的途径. 因为模型的综合, 是对系统功能进行全面分析而实现的优化设计, 而非简单的将现有功能叠加, 所以只要设计合理, 只需付出很小的空间代价. 虽然实现模型综合的理论难度较大, 但本文的作者们已在诸如炮控系统“浮动基准坐标轴”设计理论等多个方向的研究中不断取得成果, 并形成较成熟的控制思想^[1]. 本文所开展的瞄准线控制器的综合化设计, 也是这一控制理论方法的推广.

针对本文研究背景, 首先按实际应用的需求对各项功能要求进行了数学描述, 继而提出了基于控制误差的功能综合基本模型, 并以一类瞄准线控制系统为研究对象分析了其基本数学模型.

2.1 多功能的问题描述(Description of multi-function)

过去, 对目标跟踪问题的描述分为瞄准线控制及目标信息处理两个方面, 都有相应的功能定义及指标要求, 下面将从误差分析的角度对其重新审视.

考虑未来对目标自动跟踪的功能需求, 至少应包括以下4项功能, 并定义如下:

定义1 瞄准线的独立稳定功能.

针对目标自动跟踪系统, 它指在载体运动过程中, 稳定的瞄准线隔离载体扰动而指向惯性空间中某一固定目标的能力.

通常用稳定精度指标来衡量. 稳定精度就是瞄准线在惯性空间与固定目标间的角误差, 记为 Δx_1 .

定义2 精密跟踪功能.

它指在载体运动过程中, 瞄准线能够稳定地跟踪机动目标的能力.

一般而言, 对目标机动能力的描述是以最大机动速度和机动加速度来定义的. 随着目标机动能力的提高, 对精密跟踪功能的要求越来越高. 这里依然可以用瞄准线与被跟踪机动目标间的角误差来衡量, 记为 Δx_2 .

定义3 快速切换功能.

它指在载体运动过程中, 瞄准线快速地从跟踪一个目标到稳定地跟踪另外一个目标的能力.

此功能体现的是对控制过渡过程的要求. 虽然常用过渡时间等指标衡量切换功能的优劣, 但是, 仍然可以从控制误差的变化过程来分析. 此时, 误差是指瞄准线与待跟踪的下一目标之间的角误差, 记为 Δx_3 .

定义4 机动目标建模与状态估计功能.

它指目标跟踪系统基于跟踪过程中对目标的状态观测, 实时估计出目标的位置、速度和加速度等运动状态的能力.

在目标跟踪系统中实现此功能的前提是解决对目标的状态观测问题, 这在工程设计中是一个难题. 过去主要依赖于一些传感器直接或间接测量. 如果不采用传感器, 那么可用于目标建模及状态估计的观测值就只有瞄准线控制器输出的瞄准线与目标之间的角误差, 记为 Δx_4 . 由于对目标的状态估计只有当目标机动时才有实际意义, 因此, 状态估计的观测输入 $\Delta x_4 = \Delta x_2$. 这样, 状态估计功能和精密跟踪功能就在时间轴上同步进行.

2.2 功能综合模型(Mathematics model for function integration)

由上述分析可知, 控制器及滤波估计器设计的被控对象和观测数据都与瞄准线的控制误差相关. 以上各项功能的模型可以表述为

$$\begin{cases} \Delta x_1 \rightarrow 0, \\ \Delta x_2 \rightarrow 0, \\ \Delta x_3 \rightarrow 0, \\ \text{Filter}(\Delta x_2, t) = [\theta_i \quad \dot{\theta}_i \quad \ddot{\theta}_i]^T, \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_i , $\dot{\theta}_i$ 和 $\ddot{\theta}_i$ 分别是目标的位置、速度和加速度等运动状态. 就控制功能而言, 瞄准线控制器的输入分别是 Δx_1 , Δx_2 , Δx_3 3个变量, 在时间轴上是非周期分时出现的. 瞄准线控制系统对不同功能控制目标的响应, 就是对这3个误差输入所产生的非周期性动

态过程在时间上的有机组合.

令瞄准线控制器的综合输入变量为 Δx , 则

$$\Delta x = \Delta x_1 \cup \Delta x_2 \cup \Delta x_3. \quad (2)$$

该式即是进行由功能模型式(1)所确定的瞄准线控制器四项功能综合化设计的基本模型. 这样, 多功能的综合就由控制误差的动力学方程统一起来.

虽然式(2)给出了多功能综合化设计的模型, 但它能否在一个控制策略下同时满足多功能的性能指

标要求, 则取决于先进的控制及滤波估计技术在瞄准线控制器中的应用.

2.3 瞄准线控制系统基本模型(Dynamic model for the sightline system)

基于陀螺原理实现独立稳定的瞄准线控制结构如图1所示^[16]. 图中: θ_i 为目标位置, θ_o 为瞄准线位置, M_f 为干扰力矩, M 为控制力矩, Δx 为视频跟踪器测量的跟踪误差.

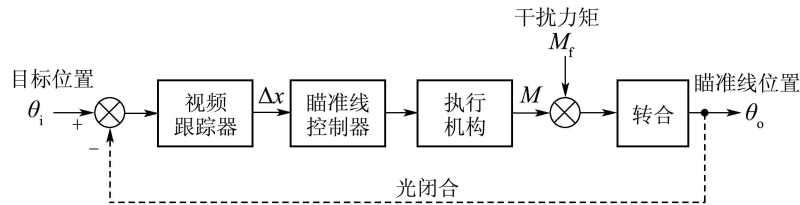


图 1 瞄准线控制系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of sightline control system

瞄准线运动的一般动力学方程为

$$M = H(t) \cdot \dot{\theta}_o + M_f(\theta_o, \dot{\theta}_o) + M_d(\theta_o, \dot{\theta}_o, t). \quad (3)$$

其中: $H(t)$ 为陀螺的角动量, $M_f(\theta_o, \dot{\theta}_o)$ 是由不平衡力矩及摩擦力矩等构成的干扰力矩, $M_d(\theta_o, \dot{\theta}_o, t)$ 是未知外部扰动.

式(3)为一复杂的时变、非线性微分方程. 要得到其精确系统模型是十分困难的. 为了尽可能减少这些不确定性因素的影响, 在工程上采取了诸如全液浮陀螺等技术^[16]. 这样, 在研究目标跟踪问题时, 假设目标的运动轨迹 $\theta_i, \dot{\theta}_i$ 已知, 且连续有界, 基本控制力矩可按以下标称模型进行计算:

$$M = \hat{H} \cdot \dot{\theta}_i + \hat{M}_f. \quad (4)$$

式中 $\hat{H}$ 是经过测算的系统参数, 并假定为一常量. 把一切未知外部干扰归为干扰力矩 $\hat{M}_f$, 并假定其在一定工作时间内也为常量.

如果设计的控制器是稳定的, 则跟踪误差 $\Delta x = \theta_i - \theta_o$ 及其一阶导数也是连续有界的. 由式(3)(4)知, 按照直接计算力矩方法设计控制器产生的跟踪误差的动力学方程为

$$\Delta \dot{x} = W(\theta_o, \dot{\theta}_o, t), \quad (5)$$

式中:

$$W(\theta_o, \dot{\theta}_o, t) = \hat{H}^{-1} \cdot [(H(t) - \hat{H}) \cdot \dot{\theta}_o + M_f(\theta_o, \dot{\theta}_o) + M_d(\theta_o, \dot{\theta}_o, t) - \hat{M}_f].$$

这样, 对于式(5)所描述的非线性不确定系统, 由于模型的不确定性的影响, 系统的控制精度难

以保证. 因此, 对目标运动轨迹已知的跟踪系统设计瞄准线控制器的基本目标就是: 寻求控制率, 使得系统的控制误差 $\Delta x \rightarrow 0$, 克服未建模动态及系统结构参数变化带来的不利影响.

然而, 对于本文所述的这一类目标自动跟踪系统, 被跟踪目标是非合作对象, 其运动轨迹 $\theta_i, \dot{\theta}_i$ 事先完全无法预知, 即无法直接以式(5)为基础设计控制率. 因此, 在实际应用中, 通常采用传感器直接测量 θ_o 或 $\dot{\theta}_o$, 并近似认为是目标运动轨迹 θ_i 或 $\dot{\theta}_i$, 从而实现力矩计算, 构成基本的等效复合控制方案^[3]. 以等效复合控制思想为基础的控制方案在一定范围内取得了较好的跟踪效果, 但是增加了硬件结构复杂度, 并恶化了系统的动态性能. 本文提出一个不同于以上设计思路的控制结构, 详见3.2节.

3 瞄准线控制器的综合化设计(Integrated design of the sightline controller)

3.1 自抗扰控制技术(Active disturbance rejection control)

自抗扰控制技术是对反馈系统中的“线性”与“非线性”、“模型论”与“控制论”等问题不懈探索的结果^[17]. 自抗扰控制器把系统中的许多不确定因素归为对系统的“扰动”, 用ESO进行估计、补偿, 实现动态系统的反馈线性化, 并结合TD和非线性状态误差反馈控制律(NSEF)来提高系统的动态性能. 自抗扰控制器的一般结构如图2所示^[9].

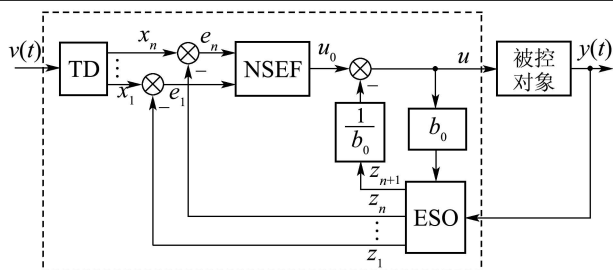


图2 自抗扰控制器结构框图

Fig. 2 Block diagram of ADRC controller

3.2 瞄准线自抗扰控制器设计(Active disturbance rejection controller for sightline control)

由2.3节的分析可知, 本文设计要面对的目标, 其运动特性未知. 如果把未知的目标运动轨迹 θ_i , $\dot{\theta}_i$ 也视为系统的一部分不确定因素, 取控制力矩

$$M = u. \quad (6)$$

由式(3)得

$$\dot{\theta}_o = H^{-1}(t) \cdot [u - M_f(\theta_o, \dot{\theta}_o) - M_d(\theta_o, \dot{\theta}_o, t)], \quad (7)$$

则跟踪误差 Δx 的动力学方程可写为

$$\Delta \dot{x} + H^{-1}(t) \cdot u = W_1(\theta_o, \dot{\theta}_o, t). \quad (8)$$

记方程中的不确定性部分为函数

$$W_1(\theta_o, \dot{\theta}_o, t) = \dot{\theta}_i + H^{-1}(t) \cdot [M_f(\theta_o, \dot{\theta}_o) + M_d(\theta_o, \dot{\theta}_o, t)].$$

这个不确定性函数说明, 控制的不确定性来自两个方面, 即“外部扰动”, 未知的目标运动; 和“内部扰动”, 未建模动态及结构参数变化.

记状态 $s_1 = \Delta x$, 令不确定函数 $W_1(\theta_o, \dot{\theta}_o, t)$ 为扩张状态变量 s_2 , 且 $\dot{s}_2 = w(t)$, 则有以下状态方程:

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = s_2 - H^{-1}(t) \cdot u, \\ \dot{s}_2 = w(t). \end{cases} \quad (9)$$

瞄准线控制系统输出方程为 $y = s_1$, 设计以下二阶ESO对未知状态进行动态估计^[9].

$$\begin{cases} \dot{e} = z_1 - s_1, \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} \cdot e + b_0 \cdot u, \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} \cdot \text{fal}(e, \alpha_1, \delta_1). \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \cdot \text{sgn } e, & |e| > \delta, \\ e \cdot \delta^{\alpha-1}, & |e| \leq \delta, \end{cases} \quad \delta > 0.$$

式中 β_{01} , β_{02} , α_1 和 δ_1 是ESO可调参数. 只要参数选择适当, 则ESO输出 $z_1 \rightarrow s_1$, $z_2 \rightarrow s_2$, 即对未知状态

s_2 进行了动态估计.

令参数 $b_0 = -H^{-1}(t)$, 设计的控制率为

$$u = \beta \cdot \text{fal}(-z_1, \alpha_2, \delta_2) - \frac{z_2}{b_0}. \quad (11)$$

式中 β , α_2 和 δ_2 是待定参数.

结合式(9)(11), 有

$$\Delta \dot{x} \approx -b_0 \cdot \beta \cdot \text{fal}(\Delta x, \alpha_2, \delta_2). \quad (12)$$

这样, 通过ESO的扰动补偿作用, 控制系统被转化成一个积分串联型的结构. 只要跟踪误差 Δx 存在, $\Delta x \rightarrow 0$ 的过程将持续进行, 直到 $\Delta x = 0$.

扰动补偿的瞄准线自抗扰控制器如图3中自抗扰控制器虚框部分所示. 需说明两点:

1) 被控对象中存在一个二次型函数^[16], 因此在设计自抗扰控制器时引入了“虚拟控制量” u . 该二次型函数描述了控制力矩 M 和实际控制量 U 之间的关系:

$$M = N(U^2) = K_m \cdot U \cdot |U|. \quad (13)$$

式中 K_m 是放大系数, 其与被控对象结构相关. 实际应用中可视为一常数.

为了使“虚拟控制量” u 等效于实际的控制力矩 M , 则有实际控制量输出的函数:

$$U = M_d(u) = \text{sgn } u \cdot \sqrt{\frac{|u|}{K_m}}. \quad (14)$$

2) 系统输入量, 即对控制误差 Δx 的期望值, 就是 $v(t) = 0$. 这样在瞄准线稳定及精密跟踪的过程中, 无须跟踪微分器TD的参与, 自抗扰控制结构可以进一步简化. 只有在实现快速切换功能时, 为了提高控制过程的动态品质, 避免过大超调带来的不利影响, 才需要采用TD来安排过渡过程.

3.3 信息处理功能的综合(Integrated design of information processing function)

通过上节的分析可知, ESO具有观测未知的目标运动角速度 $\dot{\theta}_i$ 和干扰力矩 M_f 等系统内外部未知扰动的能力. 随着现代陀螺技术水平的提高, 相对于目标运动角速度 $\dot{\theta}_i$, 干扰力矩 M_f 等带来的漂移速度可以忽略不计, 因此对系统起决定性作用的就是外部扰动量 $\dot{\theta}_i$. 这样就不依赖专门设置的一套传感器件来直接测量 $\dot{\theta}_i$, 而通过ESO就能够在控制的同时, 间接地将其准确估计出来. 这一点非常有吸引力, 它使我们简化系统硬件结构, 并实现控制

与信息处理的综合设计成为现实.

正如图3中信息处理功能单元所示, 取ESO的输出 z_2 , 使用一个跟踪微分器TD1对其进行滤波处理, 即可得到目标运动角速度 $\hat{\theta}_i$ 及其一阶导数的估计

值. 再加上车体运动姿态信息和目标距离信息, 即可实现目标机动建模与状态估计功能. 有关机动目标建模、估计与预测滤波器设计等工作已完成, 详见文献[18], 这里不再赘述.

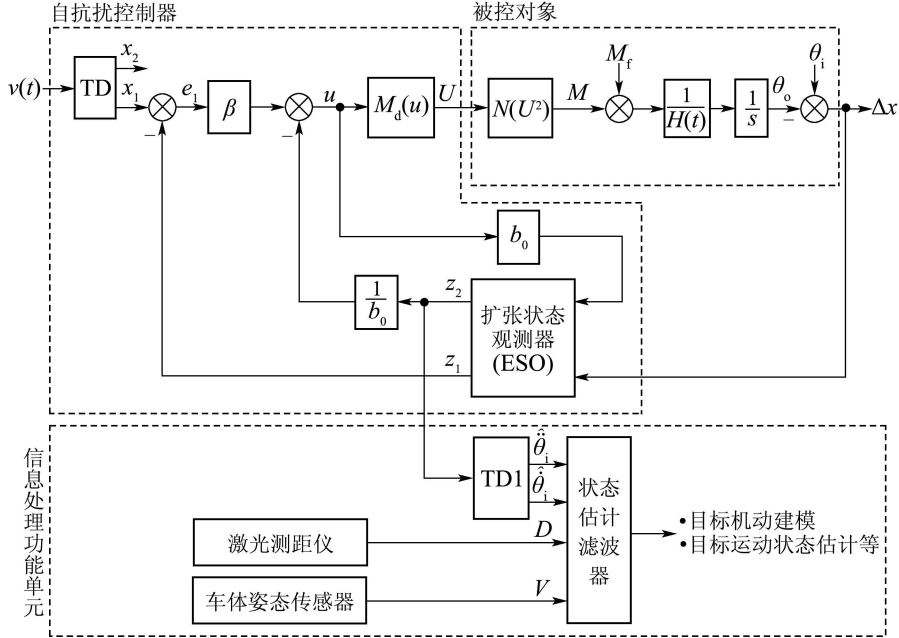


图3 基于瞄准线控制的综合化设计框图

Fig. 3 Integrated design based on sightline controller

3.4 多功能综合算法设计(Algorithm of multi-function integration)

基于自抗扰技术的多功能综合算法如下.

已知 采样控制周期 T_0 , 在 $k \cdot T_0$ 时刻图像跟踪器输出的控制误差 $\Delta x(k)$, 目标距离 D 和载体运动速度矢量 $\vec{V}(k)$. 如果要启动瞄准线切换控制功能, 则已知瞄准线与期望方位之间的初始偏差 Δx_0 .

Step 1 使用扩张状态观测器ESO获得目标运动角速度观测值 $z_2(k)$, 其离散形式为

$$e(k) = z_1(k-1) - \Delta x(k), \quad (15a)$$

$$z_1(k) = z_1(k-1) + T_0 \cdot [z_2(k-1) - \beta_{01} \cdot e(k) + b_0 \cdot u(k-1)], \quad (15b)$$

$$z_2(k) = z_2(k-1) + T_0 \cdot [-\beta_{02} \cdot \text{fal}(e(k), \alpha_1, \delta_1)]. \quad (15c)$$

Step 2 用跟踪微分器TD安排过渡过程, 其离散形式为:

1) 稳定及精密跟踪功能.

$$x_1(k) = x_2(k) = 0. \quad (16)$$

2) 快速切换功能.

$$x_1(k) = x_1(k-1) + T_0 \cdot x_2(k-1), \quad (17a)$$

$$x_2(k) = x_2(k-1) + T_0 \cdot \text{fhan}[x_1(k-1), x_2(k-1), \Delta x_0, r, h]. \quad (17b)$$

其中fhan函数参见文献[9].

Step 3 控制量计算.

$$u(k) = \beta \cdot [x_1(k) - z_1(k)] - \frac{z_2(k)}{b_0}, \quad (18a)$$

$$U(k) = \text{fal}[u(k), 0.5, 0] \cdot \sqrt{\frac{1}{K_m}}. \quad (18b)$$

Step 4 用跟踪微分器TD1对扩张状态观测器ESO输出的 $z_2(k)$ 进行滤波, 以获得目标运动角速度和角加速度的估计值 $\hat{\theta}_i, \hat{\theta}_i'$.

$$\hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(k-1) + T_0 \cdot \hat{\theta}_i'(k-1), \quad (19a)$$

$$\hat{\theta}_i'(k) = \hat{\theta}_i'(k-1) + T_0 \cdot \text{fhan}[\hat{\theta}_i(k-1), \hat{\theta}_i'(k-1), \hat{\theta}_i(k-1), z_2(k), r_1, h_1]. \quad (19b)$$

Step 5 目标机动建模与运动状态估计.

考虑实际的应用环境, 在没有显著降低计算精

度的情况下,为了减少计算量,把目标的机动以及极坐标系引入的伪加速度一并考虑,直接在极坐标系下建立目标机动模型及其卡尔曼滤波算法,可得目标在炮塔极坐标系^[1]下的实际运动状态估计 $[\hat{\theta}(k)\hat{\dot{\theta}}(k)\hat{\ddot{\theta}}(k)]^T$. 详细的卡尔曼滤波递推算法见参考文献[5]. 将估计的运动状态,结合目标距离 D 和载体运动速度矢量 $\vec{V}(k)$ 等信息,可实现指挥控制、高精度解命中计算等功能^[1].

以上算法中 $\beta_{01}, \beta_{02}, b_0, \beta, r, h, r_1, h_1$ 和 K_m 为待整定参数,控制周期 T_0 为0.04 s, b_0 和 K_m 数值由被控对象结构特性决定.

经过测算,参数 $b_0 \approx -0.25(\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s})^{-1}$, $K_m \approx 7.26 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{A}$. 实际系统中选取如下一组设计参数:

$$\begin{aligned} \beta_{01} &= 25, \beta_{02} = 125, \beta = 4, \\ r &= 100, h = 0.4, r_1 = 100, h_1 = 0.04. \end{aligned}$$

4 实验与仿真结果(Experiment results)

本文用基于以上综合方法研制的某型目标自动跟踪火控系统为对象,进行了实验台架试验,机动目标由计算机投影生成,载体扰动通过控制台架运动而施加于目标自动跟踪系统. 在所有实验中,均和当前装备中实际采用的方法作了实验比较研究,以验证基于自抗扰技术的综合设计方法的可行性、有效性.

4.1 精密跟踪实验(Tracking of maneuvering target)

考虑到实际应用中目标的机动特性,可知目标机动的最大角速度小于40 mrad/s,最大角加速度小于8 mrad/s². 图4中的实线和虚线分别为原系统PID控制方法和本文方法对以最大角速度和角加速度机动的目标跟踪的误差曲线. 本文方法的跟踪误差小于0.1 mrad,明显优于PID控制方案.

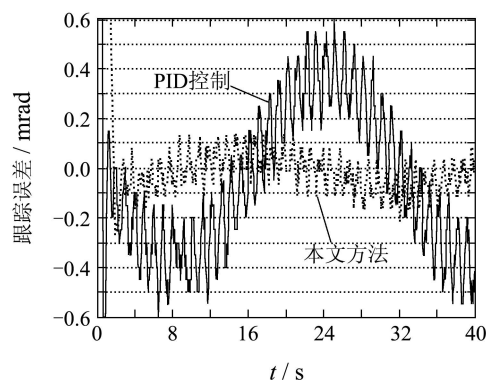


图4 载体扰动下的精密跟踪误差

Fig. 4 Tracking error of system with disturbance

4.2 快速切换实验(Step response)

快速切换性能可以通过阶跃响应的过渡过程来衡量,由图5可见,在同样2 s的过渡时间内,PID控制的超调量远大于自抗扰控制的超调量,十分不利于目标的捕获和跟踪.

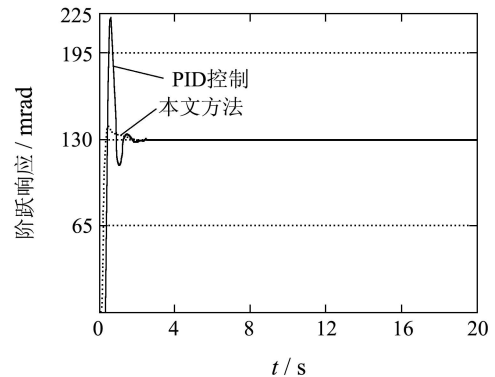


图5 载体扰动下系统的阶跃响应

Fig. 5 Step response of system with disturbance

4.3 鲁棒控制实验(Robustness)

因为ESO具有观测系统内外部未知扰动的能力,所以当被控对象的内部参数发生变化时,自抗扰控制器能够实时地估计并加以补偿,从而在理论上应该具备良好的控制鲁棒性. 图6为陀螺仪角动量 $H(t)$ 减小约30%后得到的精密跟踪实验结果,跟踪误差依然小于0.1 mrad,实验验证自抗扰控制器鲁棒性很强.

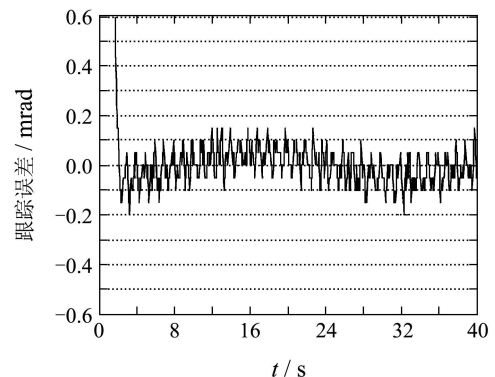


图6 $H(t)$ 参数变化后系统的跟踪误差

Fig. 6 Tracking error of system when $H(t)$ is changed

但是,需要注意的是,虽然自抗扰控制性能在系统内部结构参数发生变化时表现良好,但是由于系统的 b_0 参数变化,ESO估计的目标运动角速度将产生较大误差,基于本文所述综合方案的信息处理工作将失效. 因此,在实际应用中,应保证系统内部参数的一致性. 这一点在实际系统中可得到有效保证.

4.4 目标运动状态估计实验(Estimating of the target's state)

实验中将原系统目标角速度采集方法^[16]与本文所述方法进行比较. 目标作正弦运动 $\theta_i(t) = 200\sin(0.2t)$ 时的实验结果见图7. 显然原系统方法滤波延迟造成的误差过大, 且未给出角加速度的估计.

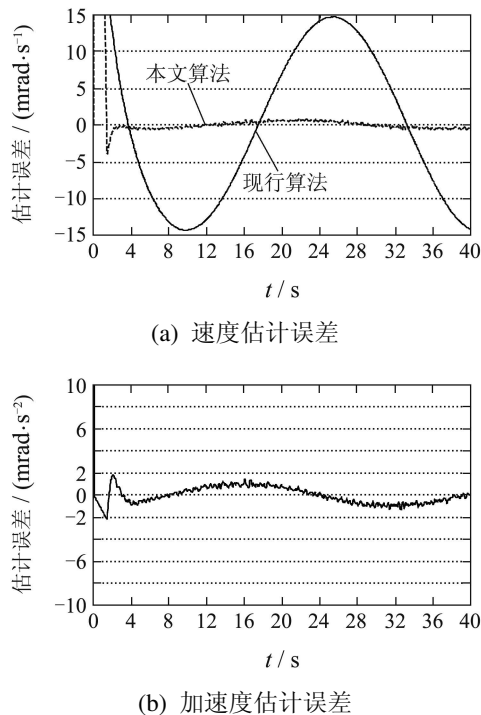


图7 载体扰动下对目标运动状态的估计误差

Fig. 7 Estimation error of the target's state

5 结论(Conclusions)

针对目标自动跟踪系统对多种控制功能以及目标信息处理功能的需要, 本文基于对多种功能控制误差的分析, 提出了按误差综合实现系统综合化设计的方法. 并针对一类目标运动状态未知的跟踪系统, 基于自抗扰控制技术, 给出了完整的综合设计方案和工程算法. 该方案采用扩张状态观测器从估计出目标的运动角速度并加以控制补偿, 以最大程度地提高控制性能. 同时进一步用跟踪微分器估计目标的运动角速度及其一阶导数, 为实现诸如机动目标建模、目标状态估计等信息处理功能提供依据.

1) 相比原系统的PID控制方案, 该方案精密跟踪误差基本小于 0.1 mrad , 响应快速、超调小, 控制鲁棒性好;

2) 与原系统传感器测量方案相比, 本文所述方法对目标的运动状态估计更加精确、快速;

3) 无需在现有系统上添加任何信息处理硬件模块, 只需在现有的目标自动跟踪瞄准线控制器中进行相应算法程序的编写, 就实现了多种功能的综合, 明显简化了系统结构, 并降低了成本.

致谢 衷心感谢已故中国科学院数学与系统科学研究院韩京清研究员在本项目研制过程中给予的精心指导. 感谢装甲兵工程学院周伟科博士生、韩洋博士生、王英杰硕士生在实验过程中给予的帮助. 感谢陆军航空兵学院王晓卫副教授在视频跟踪器设计上的帮助.

参考文献(References):

- [1] 周启煌, 常天庆, 邱晓波. 战车火控系统与指控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
(ZHOU Qihuang, CHANG Tianqing, QIU Xiaobo. *Fire Control and Command Control System of Combat Vehicle*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.)
- [2] 孙丽娜, 宋悦铭, 戴明. 采用复合控制提高机载光电平台的数引跟踪精度[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 265 – 269.
(SUN Lina, SONG Yuemin, DAI Ming. Improving digital-leading tracking precision for photoelectric platform by complex control[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 265 – 269.)
- [3] 马佳光. 复合控制及等效复合控制原理及应用[J]. 光电工程, 1988, 15(5): 1 – 16.
(MA Jiaguang. Theory and application of compounding control and equivalent compounding control[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1988, 15(5): 1 – 16.)
- [4] 张文博, 范大鹏, 朱华征. 基于采样控制理论的光电跟踪伺服系统内模控制[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 221 – 228.
(ZHANG Wenbo, FAN Dapeng, ZHU Huazheng. Internal model control for electro-optical tracking servo system based on sampled-data control theory[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 221 – 228.)
- [5] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
(ZHOU Hongren, JING Zhongliang, WANG Peide. *Tracking of Maneuvering Targets*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991.)
- [6] 彭冬亮, 郭云飞, 薛安克. 三维高速机动目标跟踪交互式多模型算法[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(5): 831 – 836.
(PENG Dongliang, GUO Yunfei, XUE Anke. An interacting multiple model algorithm for a 3D high maneuvering target tracking[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(5): 831 – 836.)
- [7] 周启煌. 中国军事科技与军事装备的自主创新[J]. 现代军事, 2009, 391(8): 74 – 77.
(ZHOU Qihuang. Independent innovation in china's military technology and armaments[J]. *Conmilit*, 2009, 391(8): 74 – 77.)
- [8] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
(HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique-the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.)

- [10] SUN B, GAO Z Q. A DSP-based active disturbance rejection control design for a 1kW H-Bridge DC-DC power converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52(5): 1271 – 1277.
- [11] ZHENG Q, DONG L L, LEE D H, et al. Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes[C] // *2008 American Control Conference*. New York: IEEE, 2008: 4425 – 4430.
- [12] 张淼, 刘立强. 光伏三相并网系统的自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 175 – 177.
(ZHANG Miao, LIU Liqiang. Disturbance rejection controller for photovoltaic three-phase grid-connected system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 175 – 177.)
- [13] 黄远灿, 韩京清. 扩张状态观测器用于连续系统辨识[J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 381 – 384.
(HUANG Yuancan, HAN Jingqing. Continuous time system identification with the extended states observer[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(4): 381 – 384.)
- [14] 宋金来, 甘作新, 韩京清. 自抗扰控制技术滤波特性的研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 110 – 112.
(SONG Jinlai, GAN Zuoxin, HAN Jingqing. Study of active disturbance rejection controller on filtering[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(1): 110 – 112.)
- [15] 邱晓波, 窦丽华, 韩京清, 等. 自抗扰控制在坦克机动目标状态估计中的应用[J]. 兵工学报, 2009, 30(7): 158 – 162.
(QIU Xiaobo, DOU Lihua, HAN Jingqing, et al. The application of active disturbance rejection controller to estimating maneuvering target states for tank[J]. *Acta Armamentaria II*, 2009, 30(7): 158 – 162.)
- [16] 朱竞夫, 赵碧君, 王钦钊. 现代坦克火控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
(ZHU Jingfu, ZHAO Bijun, WANG Qinzhaoh. *Modern Tank Fire Control System*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.)
- [17] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 487 – 492.
(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development of active disturbance rejection controller[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 487 – 492.)
- [18] 周启煌, 常天庆, 邱晓波. 机动目标运动模型动态辨识理论的研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1373 – 1377.
(ZHOU Qihuang, CHANG Tianqing, QIU Xiaobo. On dynamic identification of maneuvering target movement model[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(12): 1373 – 1377.)

作者简介:

邱晓波 (1976—), 男, 博士, 副教授, 目前研究方向为火控系统与指控系统、信息融合等, E-mail: qiuxiaobo007@sohu.com;

周启煌 (1935—), 男, 教授, 少将, 目前研究方向为电子信息系统、智能控制等研究, E-mail: zhou.qh2001@sina.com;

窦丽华 (1961—), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为图像处理和目标识别、多源信息融合等, E-mail: doulihua@bit.edu.cn;

单东升 (1964—), 男, 副教授, 目前研究方向为火控系统与指控系统、嵌入式系统设计等, E-mail: aafe_tkfc@yahoo.com.cn.