

文章编号: 1001-0920(2004)12-1373-05

机动目标运动模型动态辨识理论的研究

周启煌, 常天庆, 邱晓波

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: 在对现有机动目标假定模型结构的合理性及现代战场对目标模型需求性综合分析的基础上, 完成了机动目标运动模型的辨识理论研究, 提出了机动目标运动模型可动态辨识的条件, 为解决机动目标运动模型动态辨识提供了新的技术途径。所提出的“参数辨识模型”具有良好的模型结构, 对目标的各种运动模态具有广泛的适应能力。

关键词: 机动目标; 模型动态辨识条件; 参数辨识模型

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

On dynamic identification of maneuvering target-movement model

ZHOU Qi-huang, CHANG Tian-qing, QIU Xiao-bo

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China Correspondent: QIU Xiao-bo, E-mail: qiuxiaobo007@sohu.com)

Abstract: Based on the analysis of existing model structure of maneuvering target and the demand of modern battlefield, the condition for dynamic identification of maneuvering target movement model is presented. A guide line of the dynamic identification of maneuvering target movement model is proposed. And a new technique method is given to dynamically identifying the maneuvering target. The proposed model is an optimized model structure and has a strong adaptability in kinds of mode of moveable target.

Key words: maneuvering target; dynamic identification condition; parameter identification model

1 引言

机动目标运动模型的在线辨识及相关目标信息处理的研究与工程应用, 一直都是含有火力控制系统或制导控制系统的多种武器系统的重大课题, 它对于提高武器控制系统对目标的跟踪精度与射击目标的命中精度关系极大。对战车火控系统而言, 目标模型的失实, 严重时所造成的射角误差可高达 1~3 mrad 之多, 这种缺陷的存在, 使火控系统其他方面的改进都失去了意义^[1]。由于战场环境对模型特性具有多种要求(其中包括对采样周期适应性要求和目标多模态转换的适应性要求), 又无法按差分方

程进行模型的辨识, 使得这一问题至今未能解决。国内外对该问题处理的方法是, 根据战场环境对目标运动规律进行假定, 并按假定的预置模型进行目标信息的自适应滤波处理。

目前, 国内多采用“当前”统计模型对目标运动规律进行假定; 国外则发展到用“交互式多模型(MM)”自适应滤波的算法进行目标多模型的假定和目标信息的处理^[2,3]。其中后者是目前最先进的目标信息处理算法, 其有效性不容置疑, 但它既要目标多种可能的运动模型进行人为的假定, 又要对战斗中目标运动模态之间的转换规律进行人为的估

收稿日期: 2003-09-28; 修回日期: 2004-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60175010)。

作者简介: 周启煌(1935—), 男, 湖北武汉人, 教授, 从事战车火控系统与指控系统等研究; 常天庆(1963—), 男, 河南郑州人, 教授, 博士生导师, 从事战车火控系统分指控系统等研究。

计,这种双重的假定与估计,明显降低了计算精度和控制精度

2 机动目标模型结构特性分析

战车火控系统在跟踪阶段与射击提前量的解算阶段(称解命中阶段),要进行目标当前状态的滤波与提前点处目标状态的预测 它们均需同一的目标模型,但采样周期却截然不同 对于自动跟踪火控系统,前者为 20~ 40ms,后者则要以弹丸的飞行时间 t_f 为周期(0.5~ 3 s)进行 因此,能适用于不同的采样周期,是机动目标模型结构合理性的首要条件 对此,应考察常用的各种预置(假定)的机动目标模型

2.1 预置的机动目标模型结构

1) 匀加速度模型

假定目标沿 x 方向机动,机动加速度为常数 模型结构为

$$\ddot{x}(t) = 0, \quad (1)$$

其状态方程为

$$\dot{X}(t) = AX(t), \quad (2)$$

式中: $X(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$, 3 个分量依次为目标的位置、速度和加速度变量; A 为系数矩阵,并有

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

2) 随机加速度模型

亦称为 Singer 模型 它假定目标在作匀速直线运动的基础上,附加一个机动加速度的外来干扰,且假定机动加速度是零均值的平稳随机过程 显然,机动加速度应是时间相关的,并认为其概率密度函数近似服从于均匀分布 它的模型结构为

$$\ddot{x}(t) = -\alpha_r \ddot{x}(t) + W_M(t), \quad (3)$$

式中: $W_M(t)$ 为表征机动加速度特性的白噪声,其均值为零,方差为 $2\alpha_r \sigma_r^2$; σ_r^2 为随机加速度的方差; $\alpha_r = 1/\tau_r$, τ_r 为机动相关时间常数

状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = -\alpha_r x_3(t) + W_M(t). \end{cases} \quad (4)$$

或

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BW_M(t), \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\alpha_r \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

3) “当前”统计模型

它是对 Singer 模型的一种重要修正 Singer 模型假定机动加速度的均值为零,而实际上,当目标以某一加速度机动时,下一时刻的加速度取值是有限的,且只能存在于“当前”加速度的邻域内 因此,“当前”统计模型是非零均值的时间相关模型,其机动加速度的“当前”概率密度用修正的瑞利分布描述,均值即为“当前”加速度的预测值 “当前”统计模型的状态方程为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + C\bar{a} + BW_M(t), \quad (6)$$

式中: $A, B, W_M(t)$ 均与随机加速度模型中相应的量相同; \bar{a} 为机动加速度的均值; C 为系数矩阵,且 $C = [0 \ 0 \ \alpha_r]^T$.

2.2 预置的机动目标模型结构合理性分析

上述预置的目标模型均为连续模型,还必须离散化后才可在数字式火控系统中应用,即

$$X(k+1) = \Phi(\Delta t)X(k) + W(k), \quad (7)$$

式中: Δt 为离散化的时间间隔,亦为系统的采样周期; k 为以 Δt 为周期的时间序号; $\Phi(\Delta t)$ 为转移矩阵,即离散状态方程的系数矩阵

连续状态方程离散化的关键算法是转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$ 的计算,通用的算式为

$$\Phi(\Delta t) = e^{A\Delta t}.$$

在一般情况下,上式的计算十分复杂,这一矩阵指数函数甚至要用无穷级数的和来逼近求解,即

$$\exp(A\Delta t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A^k \Delta t^k}{k!}.$$

然而上述 3 种模型却隐含有一个重要的特性,即它们结构的合理性可化解这一复杂的计算过程 因为转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$ 的求解,实际上是以 Δt 为区间对状态方程组的积分,从方程组(4)的结构可以看出,第 3 式已实现积分变量分离,可单独积分 因此,只要第 3 式积分有解,便可由下向上递推地实现全状态方程积分的解析求解 从分析上述 3 种模型状态方程组的第 3 式可以发现,它们的结构特性相似,只要白噪声 $W_M(t)$ 的统计规律已知,均可积分有解,从而可实现其转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$ 的解析求解 即匀加速度模型为

$$\Phi(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \Delta t^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

式中

随机加速度模型和“当前”统计模型均为

$$\Phi(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \alpha \\ 0 & 1 & \beta \\ 0 & 0 & \gamma \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{1}{\alpha_f} (\alpha_f \Delta t - 1 + \exp(-\alpha_f \Delta t)),$$

$$\beta = \frac{1}{\alpha_f} (1 - \exp(-\alpha_f \Delta t)),$$

$$\gamma = \exp(-\alpha_f \Delta t).$$

转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$ 的解析求解, 化解了计算的困难, 且在表达式(8)和(9)中, 又呈现出一个重要的特性, 即模型的采样周期 Δt 已析出为转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$ 中各元素的组成因子. 这一重要特性的存在, 保证了上述 3 种模型均可适应系统采样周期不断变化的要求. 因为采样周期变化时, 只要将 Δt 的具体数值代入, 即可生成满足新的采样周期的系统离散化模型. 由此可得出两个重要结论, 即:

1) 为适应系统采样周期的不断变化, 机动目标模型离散化时转移矩阵可解析求解(即状态方程组第 3 式积分有解), 是模型结构合理性的必要条件.

2) 虽然目前系统辨识理论和算法已取得重要进展, 并且是现代控制理论的重要组成部分, 但它的辨识算法仍难以在机动目标模型的动态辨识中直接进行应用. 因为通用的系统辨识算法都是关于对象差分方程的辨识. 差分方程为参数模型, 其模型参数都严格地与模型的采样周期 Δt 相关, 采样周期不同, 模型参数也随之而异. 显然, 它适应不了采样周期的不断变化. 这正是机动目标状态的自适应滤波, 在长时间内不是通过模型辨识, 而要以假定的模型为基础, 只进行机动特性估计的主要原因.

3 机动目标现行预置模型的特性分析

上述 3 种模型虽然满足了模型结构合理性的必要条件, 但也存在如下致命的不足, 严重阻碍了目标建模与目标信息处理的深入发展:

1) 它们只是对目标机动规律的一种假定. 特别是它们假定的立意都只强调目标机动时的单一特性或部分特性, 不能在较大范围内逼近机动目标的运动规律. 实际上, 机动目标的运动规律是多模态的, 在一次战斗的不同过程中它的模型会自动转换. 前面所提到当前盛行的“交互式多模型自适应滤波”算法(MM)以及两栖坦克海上射击时目标模态的自动转换, 均反映了对机动目标模型的这一军事需求.

2) 目前以假定模型为基础, 所采用的目标状态自适应 Kalman 滤波算法, 被认为是弥补预置模型

与机动目标实际运动规律之间误差的有效方法, 实际上也存在明显的不足.

Kalman 滤波器的工程设计中, 往往多看重模型的精确性, 而将许多未知因素都归并于目标的运动噪声 $W(k)$ 与观测噪声 $V(k)$ 之中, 只需大致给定它们的统计特性, 并通过滤波器的收敛特性予以检验. 这种对 $W(k)$ 和 $V(k)$ 的统计特性不作深入研究的设计方法, 虽然可能使最优滤波降为次优, 却给工程设计带来了方便. 现行的自适应滤波, 采取与上述方法完全相反的思路来解决“自适应”问题. 其技术途径是, 在给出预置目标模型后, 在滤波器的运行中通过对 $W(k)$ 和 $V(k)$ 等噪声统计特性的复杂计算, 来实现对模型的部分参数及噪声自身统计特性的实时估计, 达到部分“自适应”的目的. 这一算法的缺陷是技术难度大, 而且模型参数估计的精度也难以提高^[4].

3) 战车火控系统对火炮射击的控制, 为一非制导系统. 机动目标模型误差对火控系统的影响尤为重要. 射击时, 弹丸出炮口后的整个飞行时间 t_f 内是无控的, 如何根据机动目标的运动模型, 进行解命中问题的 t_f 时间后目标状态的最优预测估计, 对提高火控系统的射击精度关系极大. 如果目标的预置模型存在误差, 将直接对火控系统最重要的战技性能——首发命中率产生重大影响.

4 机动目标模型的辨识条件

上述目标模型结构合理性必要条件的析出, 为机动目标模型动态辨识这一重要课题的解决提供了可能. 据此, 要实现机动目标模型的辨识, 必须满足以下两个基本条件:

1) 应在连续时间域中, 在三阶线性微分方程结构的范围内, 确定待辨识的目标模型结构;

2) 待辨识的目标模型状态方程(4)的第 3 式, 应是变量分离和积分解析有解的.

上述辨识条件表明, 机动目标模型的辨识问题是一个具有特殊结构的连续微分方程的辨识问题. 如何利用现代系统辨识理论和算法解决这一问题, 是当前在机动目标模型辨识问题上能否取得突破的主要技术途径.

5 参数辨识模型的提出及其适用范围

5.1 参数辨识模型结构的确定

实现目标模型的动态辨识, 将不局限于只针对目标机动的单一特性或部分特性, 而应随着辨识模型参数的变化, 在更大的范围上适应目标的机动特性, 这正是目标模型动态辨识的优点所在. 但由于上

述辨识条件的限制,这一适用范围也不可能是无限的

为充分利用上述辨识条件,确定机动目标模型的结构为

$$\ddot{x}(t) = a\dot{x}(t) + b + W(t), \quad (10)$$

式中: a 和 b 为待辨识的模型参数, $W(t)$ 为均值为零的白噪声

因模型的辨识要通过 a 和 b 的辨识来实现,故称模型(10)为“参数辨识模型”.其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) = ax_3(t) + b + W(t). \end{cases} \quad (11)$$

显然,状态方程(11)的第3式是变量分离的,只要白噪声 $W(t)$ 的统计特性已知,它也是积分有解的.而且在线性模型范围内,第3式也是满足这些条件的最复杂的结构.其转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$ 为

$$\Phi(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{a^2}(\exp(a\Delta t) - a\Delta t - 1) \\ 0 & 1 & \frac{1}{a}(\exp(a\Delta t) - 1) \\ 0 & 0 & \exp(a\Delta t) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

式中,模型的采样周期 Δt 也析出为转移矩阵 $\Phi(\Delta t)$ 中各元素的组成因子,说明参数辨识模型可适应系统采样周期不断变化的要求

5.2 参数辨识模型对运动模式适用能力的分析

参数辨识模型的参数 a 和 b 综合决定了目标加速度的变化率.其中: a 为相对于加速度的机动系数,一般情况下它为小于零的负数,单位是 s^{-1} ; b 为变化率中的常数,单位是 m/s^3 .对当代坦克而言,参数 a 和 b 的综合效应可使目标加速度的变化率达到 $\pm 0.5 m/s^3$ 左右.当 $|a|$ 取值很小时, $|b|$ 的最大值可达 $0.4 \sim 0.5 m/s^3$ 以上;而当 $|b|$ 值很小时, $|a|$ 的取值范围则视目标的机动情况在 $0 \sim 1 s^{-1}$ 之间.

本模型是按辨识条件提出的,具有可行的最佳模型结构.与其他模型相比增加了参数 b ,正是由于参数 a 和 b 的不同组合,使得本模型可适应机动目标全部运动状态,这是其他模型所不能实现的.特别是除机动外,根据 a, b 及初始条件的特殊组合,还可以判断出目标所具有的特定运动模式.例如:

1) $b = 0$ (工程上可按 $b = 0.0001$ 处理,下同),目标加速度的初值为零,参数辨识模型(10)的结构退化为 $\dot{x} = 0$,此即为匀速直线运动的模式;

2) $a = 0, b = 0$,初始加速度不为零,目标进入

匀加速直线运动的模式;

3) $a = 0, b = 0$,目标作匀加速直线运动

上述参数辨识模型(10)对目标的多种运动模式的适应能力,使得它不仅具有对采样周期变化的适应能力,而且随着实测目标状态参数的变化,动态辨识的模型参数 a 和 b 也将自动修正,以便自动适应战斗过程中机动目标运动模式的变化

6 参数辨识模型对运动模式的适用能力及辨识实验

本模型为连续型模型,首先要从有噪声的目标序列观测数据中估计出各阶导数,然后才可进行模型的仿真实验及动态辨识.在将自抗扰控制器(ADRC)^[5]中的扩张状态观测器(ESO)改造成性能优良的非线性滤波器后,这一难题得到了解决.下述仿真实验均是在此基础上进行的

6.1 匀速直线运动的实现

设定模型参数 $a = -0.3, b = 0.0001 (b = 0)$.选择初速 $V = 1 m/s$ 时,由仿真实验测得含有误差的目标状态参数后,估计出的目标运动速度和加速度曲线如图1和图2所示.图中曲线表明,目标作初速为 $1 m/s$ 的匀速直线运动,且无需对 a 和 b 进行辨识

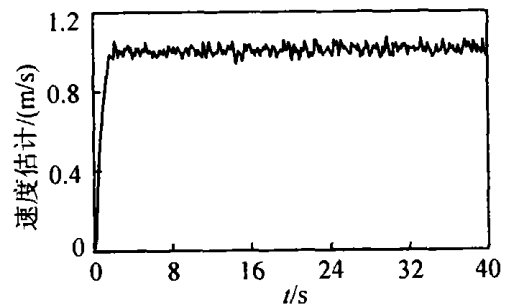


图1 目标的速度曲线

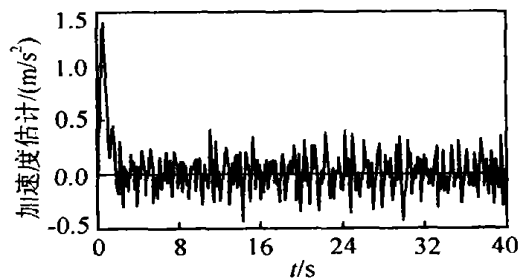


图2 目标的加速度曲线

6.2 匀加速直线运动的实现

当设定模型参数 $a = -0.0001 (a = 0), b = 0.0001 (b = 0)$,并选择初始加速度为 $1 m/s^2$ 时,由仿真实验所估计的目标运动速度和加速度曲线如图

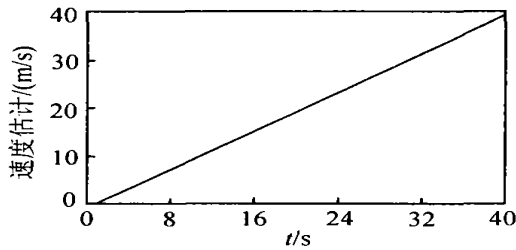


图 3 目标的速度曲线

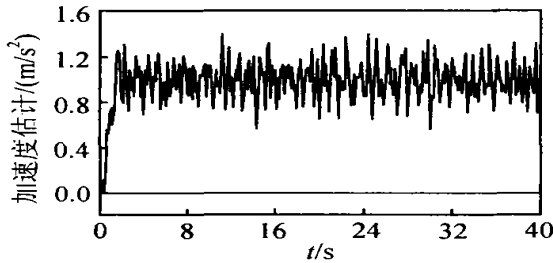


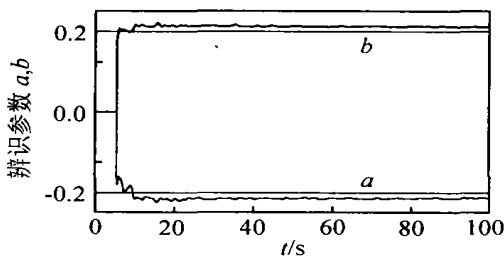
图 4 目标的加速度曲线

3和图4所示 图中曲线反映出目标作初始加速度为 1 m/s^2 的匀加速直线运动

6.3 辨识实例

现代坦克在战场作机动运动时, 参数 a 和 b 的数值范围分别是 $-0.2 < a < 0, 0 < |b| < 0.15$ 而且 $|a|$ 数值越小, $|b|$ 的数值越大时, 目标的机动特性越强 经过反复统计与计算, 确定参数 a 和 b 辨识的允许误差为 20%, 这时 a 和 b 的综合误差所造成解命中预测误差 (1σ) 小于 0.2 m .

假定目标按模型参数 $a = -0.2 \text{ s}^{-1}, b = 0.2 \text{ m/s}^3$ 的规律运动, 考虑到辨识过程中的噪声, 图 5 给出了参数辨识过程的曲线 由图可见, 当辨识时间到达 5 s 时, 模型参数已收敛到可使用的精度范围

图 5 $a = -0.2 \text{ s}^{-1}, b = 0.2 \text{ m/s}^3$ 的参数辨识曲线

7 结 语

本文对现有机动目标假定模型结构的合理性及现代战场对目标模型需求性综合分析的基础上, 完成了机动目标运动模型的辨识理论研究, 提出了机动目标运动模型可动态辨识的条件 后续的研究已经表明, 它为我国首次实现机动目标运动模态与运动模型的双重动态辨识提供了必要的理论依据和新的技术途径

在机动目标运动模型可辨识的条件下, 参数辨识模型可能是目前最为完整的模型结构 它对机动目标的各种运动模态具有广泛的适应能力, 不仅是目标机动时最佳的模型结构, 而且当目标处于特定的运动模态时, 也能通过模型参数 a 和 b 的某种组合与初始条件的取值相适应 因此, 当目标在战场上机动运动和改变运动模态时, 无需进行多模型的预置, 只需按参数辨识模型进行在线动态辨识, 随着参数 a 和 b 的自动修正, 便可覆盖各种模型状态, 极大地方便了系统建模与目标信息处理的工程设计.

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, 2002
- [2] Paepour E, Bar-Shalom Y. MM tracking of maneuvering target in the presence of glint [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronics*, 1998, 34(3): 996-1003
- [3] Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y, et al. Interacting multiple model in tracking: A survey [J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronics*, 1998, 34(1): 103-123
- [4] 周启煌. 坦克火控系统机动目标的自适应滤波与自适应解命中问题 [J]. *火力与指挥控制*, 1997, 22(3): 25-33
(Zhou Q H. Adaptive filtering and hitting solution problem of maneuvering targets in tank fire control system [J]. *Fire Control and Comm and Control*, 1997, 22(3): 25-33)
- [5] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用 [J]. *控制与决策*, 1998, 13(1): 19-23
(Han J Q. A auto-disturbance-rejection controller and its applications [J]. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19-32)