

# 坦克瞄准线稳定系统的系统辨识方法研究

韩斌, 常天庆, 苏奎峰

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

**摘要:** 坦克瞄准线稳定系统复杂的内部结构导致机理建模的准确性大大降低, 提出了利用经典阶跃响应法与遗传算法相结合的方法对某型坦克瞄准线稳定系统伺服控制回路进行系统辨识; 通过 DSP 系统与三次样条插值数据处理测得了某种工况下的瞄准线稳定系统阶跃响应曲线; 以先验知识为基础确定待辨识系统模型阶次, 并利用改进遗传算法辨识模型参数, 从而获取被控对象的模型; 用阶跃响应性能指标误差评价法对系统辨识方法的效果进行了验证, 结果表明, 该方法能准确地实现瞄准线稳定系统的模型辨识。

**关键词:** 坦克瞄准线稳定系统; 系统辨识建模; 遗传算法; 三次样条插

## System Identification Method Research for Tank Stabilized Sight System

Han Bin, Chang Tianqing, Su Kuifeng

(Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**Abstract:** Building model for Tank Sight Stabilized System by traditional mechanism method is difficult because of its complex internal structure. Proposes a method which combines classical step response method and the genetic algorithm to identify a certain type Tank Sight Stabilized System. Obtains the step response curve of Sight Stabilizing platform in certain conditions based on DSP system and Cubic spline method. Determines the order of the model based on priori knowledge, identifies parameter of the model using GA. Finally checked the effective of the method by using step response property label error evaluating method. The result shows that the method can be identified precisely with the identification model of Tank Sight Stabilized System System.

**Keywords:** tank sight stabilized system; system identification modeling; genetic algorithms; cubic spline

## 0 引言

坦克瞄准线稳定系统是利用惯性器件的定轴性来隔离车体干扰, 从而保证瞄准镜的视轴在惯性空间的稳定。其性能很大程度上决定了坦克武器系统的作战效能。系统模型是进行控制系统设计的基本信息, 模型的精确度直接影响了控制系统性能的好坏。目前根据性质划分, 系统建模方法主要分为两类: 机理建模与系统辨识建模。另外, 近年来群优化智能算法发展与应用十分迅速, 遗传算法等在系统辨识建模方面得到了广泛运用<sup>[1]</sup>。

由于我国坦克瞄准线稳定系统研究起步比较晚, 关于坦克瞄准线稳定系统建模的研究一直停留在机理建模与仿真上, 而坦克瞄准线稳定系统复杂的内部结构, 导致机理建模所建系统模型与实际系统相比误差较大, 目前国内能够应用于实验的坦克瞄准线稳定系统建模方法研究比较少。文献 [2] 利用机理建模对某型装甲车辆稳瞄平台伺服控制回路进行了分析与建模, 获得了理想状态下的稳瞄平台伺服控制回路模型, 但是实际应用效果没有验证。文献 [3] 基于压电陀螺使用机理建模的方法对某型战车稳瞄系统进行了设计与仿真, 但同样未对实际应用做出任何验证。文献 [4-5] 基于机理建模方法对上反稳瞄系统数字化进行了设计与研究, 对模型准确度没有加以验证<sup>[2-5]</sup>。

结合坦克瞄准线稳定系统工作时电机只在有限角度进行正反转的实际情况, 本文选择基于遗传算法与阶跃响应法相结合

的辨识方法以某型坦克瞄准线稳定系统伺服控制回路为例对坦克瞄准线稳定系统进行系统辨识。

## 1 控制对象阶跃响应曲线获取

为了能够获取控制对象相对准确的模型, 首先利用控制系统与实验平台获取控制对象的阶跃响应曲线。

为了保证坦克瞄准线稳定系统能够正常稳定的运行, 实验数据的获取是在系统电流闭环的情况下运行采集的。为了尽可能提高数据采样的精度, 在充分考虑了控制系统的运行速度与反应时间后, 选择了 0.2 ms 为数据采样周期。同时考虑到坦克瞄准线稳定系统平时工作的电流范围, 采用单位阶跃响应曲线来反映系统性能, 结合系统的稳定性时间, 采用幅值为 0.5, 周期为 60 ms 的方波来等效阶跃信号作为输入。实验时, 利用上位机程序控制 DSP 系统实现输入输出数据的采集。同时, 利用 DSP 系统处理数据的高速性, 实现八点同时采样, 而后取均值作为输出数据, 以达到滤波的效果。获得的输入输出数据如图 1 所示。

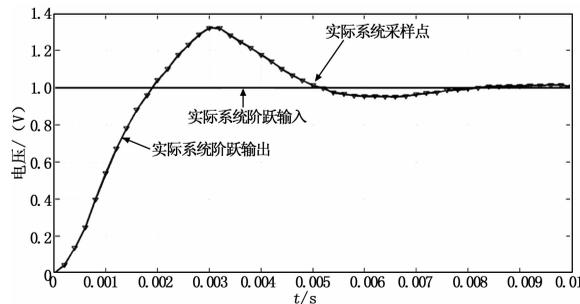


图 1 采样输入输出曲线

图 1 中水平长短虚线为阶跃输入信号采样曲线, 从零点开始。交叉点为输出数据采样点, 实线折线为输出数据即阶跃响

收稿日期: 2014-05-25; 修回日期: 2014-07-02。

基金项目: 武器装备“十二五”预研项目(40405070201)。

作者简介: 韩斌(1989-), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要从事车载高精度稳瞄平台方向研究。

常天庆(1963-), 男, 河南郑州人, 教授, 博士生导师, 主要从事火控系统及其智能化方向的研究。

应还原曲线。从图 1 中可以看出, 由于前期均值滤波的缘故, 噪声的影响比较小, 因此不需要再做滤波, 但是可以看出阶跃响应曲线还原比较差, 为了得到能够完整反映控制系统性能的阶跃曲线, 需要对采样点做进一步插值处理。

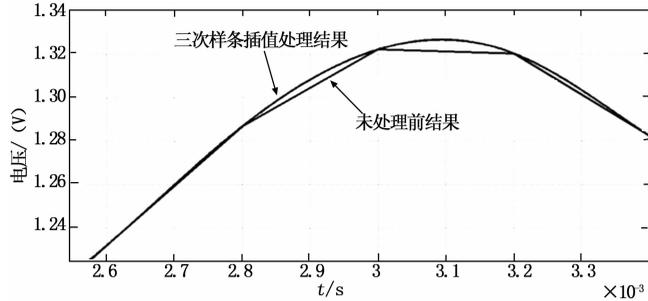


图 2 三次样条插值处理效果对比

目前, 普遍使用的插值方法有线性插值、最临近插值、拉格朗日插值、HEMIT 插值、牛顿插值、分段插值等<sup>[6]</sup>。根据实际需要, 本文采用三次样条插值, 使插值获得的曲线连续且导数连续。三次样条插值是指曲线分段用三次多项式描述, 并且在插值点连续且一阶二阶导数连续<sup>[7]</sup>。在 Matlab 中以 Spline 函数实现三次样条插值, 在区间范围内按照需求等间隔选取 5 000 个插值点, 获取插值图像截取部分如图 2。可以看出三次样条插值对于平滑曲线, 还原曲线效果十分明显, 提高了超调量计算与调整时间、上升时间的计算准确度。

## 2 待辨识模型阶次确定

在采集数据时为了系统的稳定采用电流闭环, 但是实际想要辨识出的是电机的传递函数, 以便对电流环 PI 控制器及后续控制加以设计, 为此把电流环剥离出来, 把其他部分看作是受控对象。如图 3 是所用的实验系统结构, 电流环的反馈系数为  $n$ , 实际实验条件  $n=1$ 。控制器为 PI 控制, 实际实验条件  $k_p = 1.5, k_i = 0.04$ 。为了测得控制对象的传递函数, 首先将电流环与控制对象看作一个整体, 将闭环看作整体进行系统辨识, 而后通过计算获得控制对象的传递函数。

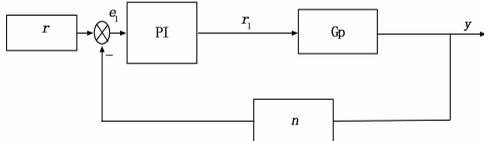


图 3 试验测试所用控制结构

直流力矩电机输入电压与电枢输入电流的控制模型为一阶。加入 PI 控制器参数与单位负反馈, 电流闭环传递函数阶次为二阶, 结合阶跃响应曲线形状, 确定闭环传递函数阶次为无时滞二阶传递函数<sup>[8]</sup>, 具体形式为:

$$G(s) = \frac{1}{a_w^2 s^2 + 2\xi a_w s + 1} \quad (1)$$

因此, 所要辨识确定的参数只有  $a_w$  与  $\xi$  两个参数。实验中控制输入电压最大为 10 V, 实验时施加电压为 1 V, 对应的稳态值为 1 V, 为了便于指导控制器设计及计算, 文中直接用电压采集值进行辨识计算。

## 3 模型参数估计

在确定要辨识模型阶次之后, 就可根据系统的输入输出数据, 按照一定的辨识算法确定模型结构参数。本文采用遗传算法进行参数辨识。遗传算法作为一种全局寻优的优化算法, 有

着并行操作与全局寻优的优点, 近年来无论是理论研究或是工程应用都取得了长足的发展, 但是算法本身为迭代运算, 计算时间较长, 因此本文加以改进, 采用变位变概率变异算子, 使收敛速度加快。并对适应度函数重点进行了设计, 达到了更好的辨识效果。

### 3.1 遗传算法设计

为了提高遗传算法运行的速度与效果, 对遗传算法进行改进设计。

对待辨识模型进行参数辨识时, 取两个参数耦合编码为样本个体, 使用二进制编码, 选择操作采取保存最优个体的随机采样选取方法, 交叉算子采用均匀交叉算子, 变异采用随机变异算子, 变异概率与变异位数随进化代数自适应调整<sup>[9]</sup>。即

$$\begin{cases} p_m = 0.1 - (0.1 - 0.001) \frac{t}{T} \\ n = N - t \end{cases} \quad (2)$$

设  $M$  为种群的大小,  $X_i (i = 1, 2, \dots, M)$  为个体, 重点对适应度函数进行比较设计后, 选择超调量与调整时间以及上升时间和峰值时间加权的方式作为适应度函数, 具体算法步骤如下。

步骤 1: 置代数计数为  $t=0$ , 通过随机数产生初始种群  $P_0$ ;

;

步骤 2: 提取染色体, 还原参数值, 通过适应度函数计算求得群体中每个个体的适应值, 并进行排序;

步骤 3: 判断是否到达最大进化代数  $T$ , 若是则算法终止否则, 转步骤 4;

步骤 4: 以概率  $P_v$  进行选择操作产生一些染色体进入新一代种群  $P(t)$ ;

步骤 5: 以概率  $P_c$  进行交叉操作产生一些染色体进入新一代种群  $P(t)$ ;

步骤 6: 以概率  $P_m$  进行变异操作产生一些染色体进入新一代种群  $P(t)$ ;

步骤 7:  $t+1 \rightarrow t$ , 转步骤 2。

### 3.2 适应度函数设计

传统遗传算法进行系统辨识时一般采用采样点误差平方和或其变形公式为适应度函数, 编程运行足够代数之后, 辨识参数获取效果如图 4 所示。由图进行阶跃响应性能指标误差分析知, 系统辨识效果比较差。分析原因是中间一些次要采样点的误差干扰了关键参数点 (比如峰值点等) 的误差, 因此想要获得比较好的系统辨识结果, 需要对适应度函数重新进行设计。

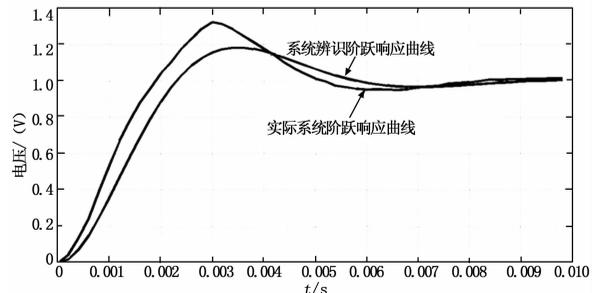


图 4 采样误差适应度函数辨识效果图

突出关键点误差的调整作用, 忽略次要点误差, 设计适应度函数。以阶跃响应性能指标: 超调量误差  $e_{MP}$ 、上升时间误差  $e_{TR}$ 、峰值时间误差  $e_{TP}$  和调整时间误差  $e_{TS}$  加权为第  $i$  次迭代的种群适应度函数, 即:

$$f_i(x) = a_{i1} e_{MP}(x) + a_{i2} e_{TR}(x) +$$

$$a_{i3} e_{TP}(x) + a_i e_{TS}(x) \quad (3)$$

其中适应度函数系数  $a_{ij}$  由专家经验法与自适应调整方法结合所确认。具体计算公式如下：

$$\begin{cases} a_{i1} = 0.25 + 0.2 \frac{e_{mp}(i-1)}{e_{mp}(i-1) + e_r(i-1) + e_{tp}(i-1) + e_{ts}(i-1)} \\ a_{i2} = 0.15 + 0.2 \frac{e_r(i-1)}{e_{mp}(i-1) + e_r(i-1) + e_{tp}(i-1) + e_{ts}(i-1)} \\ a_{i3} = 0.18 + 0.2 \frac{e_{tp}(i-1)}{e_{mp}(i-1) + e_r(i-1) + e_{tp}(i-1) + e_{ts}(i-1)} \\ a_{i4} = 0.22 + 0.2 \frac{e_{ts}(i-1)}{e_{mp}(i-1) + e_r(i-1) + e_{tp}(i-1) + e_{ts}(i-1)} \end{cases} \quad (4)$$

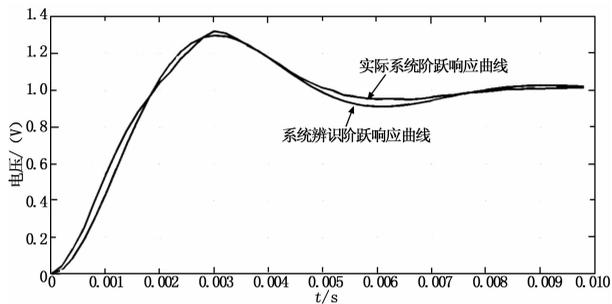


图 5 改变适应度函数辨识效果图

公式中  $e_{mp}(i-1)$ 、 $e_r(i-1)$ 、 $e_{tp}(i-1)$ 、 $e_{ts}(i-1)$  分别为第  $i-1$  次迭代最优个体超调量误差、上升时间误差、峰值时间误差和调整时间误差。取相同迭代次数与初始种群数量，式 3 为适应度函数编写程序，迭代结果如图 5 所示。可以看出改进后的适应度函数对于加快收敛，增强系统辨识效果起到了很大的作用。

### 3.3 仿真与实验

利用 MATLAB 软件，编写改进的遗传算法的程序<sup>[10]</sup>，选取采样点误差、超调量误差、调整时间误差与上升时间误差加权的方法编写适应度函数，种群数量设为 100，采用二进制编码，染色体长度为 40，参数长度为 20。迭代 100 代后，其参数辨识结果为  $a_w = 0.000\ 903$ 、 $\xi = 0.359$ 。系统辨识得到的模型传递函数为：

$$G(s) = \frac{1}{8.154e - 7s^2 + 6.484e - 4s + 1} \quad (5)$$

## 4 系统辨识方法效果评价

对于系统辨识，测量噪声和处理方法存在的误差，都可能导致辨识的误差，因此系统辨识方法的好坏需要对系统辨识结果进行量化效果评价验证。阶跃响应性能指标作为评价控制系统控制品质好坏的一种常用手段，通过仿真曲线与实际系统曲线的阶跃响应性能指标之间的误差或者相似度来评价辨识模型的好坏，通过不同辨识方法辨识模型的比较，评价辨识方法的好坏。在采用阶跃响应进行试验时，主要采用比较模型仿真输出与实际系统输出的上升时间、调整时间和超调量 3 个性能指标之间各自的偏差来评价。

选择递推最小二乘法作为对比辨识方法，使用 Matlab 编写程序对同一组输入输出数据进行辨识，辨识获得参数为  $a_w = 0.001$ 、 $\xi = 0.398\ 5$ ，系统辨识得到的模型传递函数为：

$$G(s) = \frac{1}{1e - 6s^2 + 7.97e - 4s + 1} \quad (6)$$

按照辨识所得系统模型进行阶跃响应实验与阶跃仿真实验，所得结果如图 6 所示。长短虚线代表改进遗传算法系统辨识模型阶跃响应，等距虚线代表最小二乘法系统辨识模型阶跃

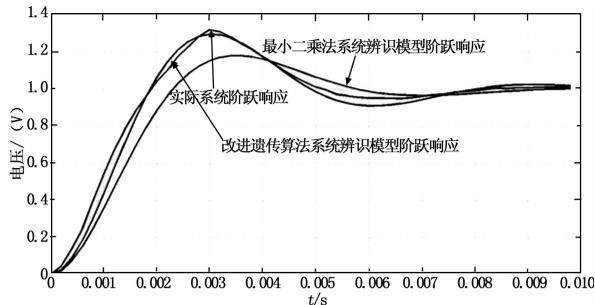


图 6 两种辨识方法辨识效果对比

响应。可以直观的看到改进遗传算法系统辨识效果要比最小二乘法系统辨识效果好。

表 1 为从阶跃响应指标定量分析两种辨识方法效果。可以看出，遗传算法辨识方法输出和最小二乘辨识输出的四个性能指标相比，遗传算法辨识方法偏差更小，方法效果更好。证明了辨识方法的有效性。

表 1 两种辨识方法辨识效果定量分析

性能指标	真实输出	遗传输出	遗传偏差 / (%)	二乘输出	二乘偏差 / (%)
上升时间 $e_{tr}/ms$	1.877	1.898	1.12	2.16	15
调整时间 $e_{ts}/ms$	6.598	7.109	7.74	7.62	15.5
峰值时间 $e_{tp}/ms$	3.005	3.008	0.1	3.45	16.5
超调量 $e_{mp}/V$	0.322	0.302	6.2	0.26	19.2

## 5 结论

本文利用遗传算法以某型坦克瞄准线稳定系统伺服控制回路为例对坦克瞄准线稳定系统进行了离线辨识方法研究。设计了输入输出数据的量测试验，通过三次样条插值处理数据获得被控对象阶跃响应的曲线，对处理后的输入输出数据，选定模型结构及其阶数，利用改进遗传算法对其进行参数辨识，得到了辨识对象的模型，并用阶跃响应性能指标误差评价法对遗传算法辨识方法与最小二乘辨识方法辨识效果进行了对比评价，结果证明了所提辨识方法的有效性。

### 参考文献：

- [1] 李言俊，张科. 系统辨识理论及应用 [M]. 北京：国防工业出版社，2003.
- [2] 谢杰. 装甲车辆瞄准线控制系统设计 [D]. 北京：装甲兵工程学院，2013.
- [3] 杨晓宇，里程遥，李翰飞. 基于压电陀螺的战车稳瞄系统建模与仿真 [A]. 第十一届自动化应用技术学术交流会论文集 [C]. 2006.
- [4] 张德宁. 上反稳瞄系统数字化控制研究 [D]. 天津：天津大学，2006.
- [5] 张建松. 数字上反稳瞄系统的自抗扰控制研究 [D]. 天津：天津大学，2006.
- [6] 庞中华，崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2009.
- [7] 刘光辉，蔡文远. 系统辨识方法及应用 [M]. 北京：国防工业出版社，2010.
- [8] 杨静. 伺服系统的参数辨识 [D]. 西安：西安电子科技大学，2010.
- [9] 谢敏，赵文龙，鲁道旺，等. 基于遗传算法的舵机数学模型辨识研究 [J]. 计算机测量与控制，2012 (2)：428-430.
- [10] 倪博溢，萧德云. MATLAB 环境下的系统辨识仿真工具箱 [J]. 系统仿真学报，2006，18 (6)：1493-1496.