

Fig. 4 Parameter  $v_s$  of our algorithm

better robustness.

#### Reference

- [1] Smith, O. J. M., A Controller to Overcome Dead Time, ISA Journal, 6,28,(1959), 62—64.
- [2] Hang, C. C. et al, A Performance Study of Control Systems with Dead Time, IEEE-IECI, 27, 234, (1980). 852—854.
- [3] Palmor, Z. J. and Shinnar, R., The Research Report about Stability of system with Dead Time, Proc. JA CC., 2, 59, (1978), 852—856.
- [4] Palmor, Z. J., Stability Properties of Smith Dead-time Compensator Controllers, Int. J. Control, 32, 6, (1980), 937—939.
- [5] Chien, I. L. et al, A Self-tuning Controller for Systems with Unknown or Varying Time Delays, ACC, 2, (1984), 905—908.
- [6] Wellstead, P. E. et al, Pole Assignment Self-tuning Regulator, IEE, 126, 8, (1989), 781—790.
- [7] Puthenpura, S. C. and Macgregor, J. F., An Pole-zero Assignment Approach, IEE, 134, 9, (1987), 26—28.
- [8] Allidina, A. Y. and Yin, H., Explicit Pole-assignment Self-tuning Algorithms, Int. J. Control. 42, 5, (1985), 1113—1130.
- [9] Lin, C. M. and Chen B. S., Adaptive Controller with Desired Pole/Zero Assignment, IEE, 133, 6, (1986), 301—306.
- [10] Zarrop, M. B. and Fishcher, M., Reduced-variance Pole-assignment Self-tuning Regulator, Int. J. Control, 42, 5, (1985), 1013—1033.

## 一种鲁棒自适应极点配置预估控制器

陈怡轩 吴广玉

(哈尔滨工业大学控制工程系)

### 摘 要

本文提出一种鲁棒自适应极点配置预估控制新方法。它有效地克服了因对象模型与史密斯预估模型不同而引起的系统不稳定现象。

关键词：鲁棒性；极点配置；自适应控制。

# 随动系统的最速控制

郑 勇

李瑞棠

(西安石油学院石油勘探仪器及自动化系) (西安电子科技大学电子工程系)

## 摘 要

本文就三阶系统时间最优控制进行了分析、设计和试验,其中包括实测系统的开关面、开关线以及自动调整等。对于一个典型的雷达天线伺服模拟系统,通过实验说明本文方法是有效的。

**关键词:** 时间最优控制; 随动系统; 微机控制。

## 一、引 言

我国的雷达伺服系统至今仍采用经典控制,这对于当今各种飞行器高速机动的状况很不适应,提高系统的快速反映能力,实现对目标的快速捕获是当前较为迫切的问题。借助于最速控制理论是解决这一问题的途径之一。为了保证最速控制的实时性,应采用状态反馈的方法来综合控制系统。雷达伺服系统的受控部分通常是三阶的,用上述方法来设计最速控制在文献中却多限于二阶系统,面对三阶系统的最速控制的工程实现报道却几乎没有见到。因为严格按状态反馈来综合最速控制系统在工程实现上将困难重重。然而实际的系统各参数总是有误差,因此精确的理论设计显得没有必要,完全可以用简单易行的方法去逼近理想情形。本文基于这种思想提出一种三阶系统最速控制方法,实验表明是可行的。

## 二、问题的提法

雷达受控部分可用图1来表示。系统的状态方程为

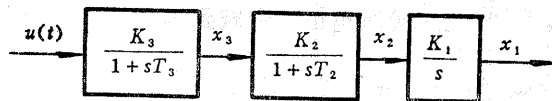


图 1 受控部分框图

$$\dot{x}_1 = K_1 x_2 \quad (1.2.1)$$

$$T_2 \dot{x}_2 + x_2 = K_2 x_3 \quad (1.2.2)$$

$$T_3 \dot{x}_3 + x_3 = K_3 u \quad (1.2.3)$$

$$|u| \leq u_M \quad (1.2.4)$$

其中  $u_M$  为  $u$  允许的最大取值。为了便于统一处理，将系统的状态方程表示成误差形式。令

$$x = x_1 - r(t) \quad (1.2.5)$$

$$y = K_1 x_2 - \dot{r}(t) \quad (1.2.6)$$

$$z = \frac{K_1 K_2}{T_2} x_3 - \frac{K_1}{T_2} x_2 - \ddot{r}(t) \quad (1.2.7)$$

其中  $r(t)$  为目标方位信号。在天线快速调转阶段工程上通常认为

$$r(t) = a + bt \quad (1.2.8)$$

其中  $a$  为初位移， $b$  为速度常数，且应满足

$$|b| \leq K_1 K_2 K_3 u_M \quad (1.2.9)$$

由此可得规范化状态方程

$$\dot{x} = y \quad (1.2.10)$$

$$\dot{y} = z \quad (1.2.11)$$

$$\dot{z} = -\frac{1}{T_2 T_3} y - \left( \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) z + \frac{1}{T_2 T_3} v \quad (1.2.12)$$

$$-(K_1 K_2 K_3 u_M + b) \leq v \leq (K_1 K_2 K_3 u_M - b) \quad (1.2.13)$$

运用能控性判据可知此系统是完全能控的，由最速控制理论知，对任一初态，系统的最速开关控制有唯一解。

对于此系统，最速控制的一般提法是：在最短时间  $T$  内，有  $x(T) = y(T) = z(T) = 0$ ，且当  $t > T$  时，仍有  $x(t) = y(t) = z(t) = 0$ 。

其实际意义是：给定目标方位信息后，控制信号使天线转动在最短时间达到最大加速度，并保持至天线转速达到最大，天线指向以最快速度向目标位置靠近，到达某个合适位置时，控制信号  $u(t)$  极性切换，使天线转动在最短时间达到最大负加速度，从而天线转速以最快速度衰减，到达另一合适位置时， $u(t)$  极性再一次切换，使天线负加速度在最短时间减少到零，同时天线转速也正好衰减到零，并且天线指向恰好以给定精度到达目标方位。

### 三、分析与设计

三阶系统最速控制切换区域由系统的开关面、开关线来确定，如图2所示，当目标信号  $r(t)$  给定后，在开关信号的控制下，系统从状态空间的任意一点  $(x, y, z)$  出发，到达开关面  $S$  后， $u(t)$  极性切换，使系统状态轨迹在开关面上运动，当到达开关线  $L$  时， $u(t)$  极性再次切换，使状态轨迹沿曲线  $L$  到达坐标原点。

对于三阶系统, 通过状态方程求其开关控制规律的解析式十分困难, 更重要的是, 实际系统的放大倍数, 时间常数不易测得准确, 此外还有系统的摩擦、间隙、非线性和小时间常数等因素存在, 理论上得出的解析式也不是完全可信的. 因此系统的开关面、开关线需通过实测来获得.

实际中采样控制造成的系统状态值的不连续性, 使得系统状态点不可能准确地落到开关面上, 而是均匀地落在以开关面为中心, 以一个采样周期内状态行程的范围为边界的区域内. 图3是开关面断面区域示意图. 鉴于这种原因, 在工程实现上可以用几个分段平面来近似开关面, 如图3所示. 同理, 系统的开关线也可用分段直线来近似. 这样, 微机的计算工作量将大为减少, 实时性得以保证和增强.

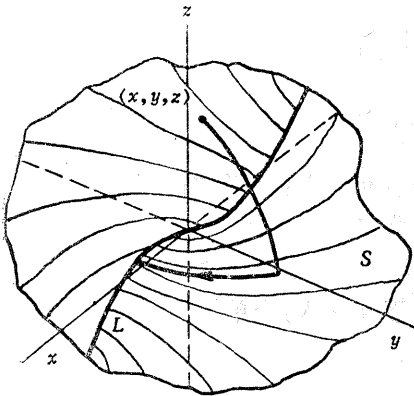


图 2 系统开关面和开关线示意图

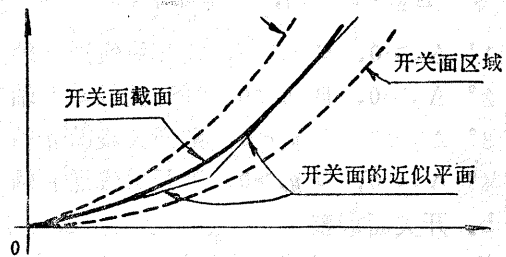


图 3 开关面断面区域示意图

对于一个实际的系统, 由于其最大速度和最大加速度总是有限的, 则开关面所占据的空间范围也是有限的, 而且往往只有较小的范围. 若只想用平面来代替开关面就只需要开关面的部分信息, 如三点即可定一平面. 这样, 在较小的范围内获得开关面的部分信息就不是太困难了. 事实上, 可针对实际的受控系统, 先确定代表开关面的两条边界的两种极端情况下的状态轨迹, 然后根据情况在这两条边界范围内再增测几条状态轨迹, 以这些轨迹点为基础从而确定所需的分段近似平面.

开关面的两条边界可按下述方法进行:

1. 系统静止,  $r(t)$  参数  $a > 0$ ,  $b$  给定, 取  $u(t) = +u_M$ , 作用于系统一段时间, 使系统速度  $y$  增大至饱和, 加速度  $z$  为零. 然后切换  $u(t)$  为  $-u_M$ , 并开始记录系统状态值  $(x, y, z)$ , 当系统达到某个位置时, 再次切换  $u(t)$  为  $u_M$ , 使得  $z$  变号时  $y$  的绝对值为最小 (可试验几次来达到). 这样, 当  $z$  到达零时, 可认为  $y$  也为零, 从而系统在  $y-z$  平面上到达了坐标原点. 为使系统状态在空间坐标上也到达原点, 设  $z$  变号时  $x$  值为  $x_0$ ,  $x_i$  是记录的各  $x$  分量, 令  $x'_i = x_i - x_0$ , 则状态值中其余  $y_i, z_i$  分量与  $x'_i$  一起构成了经过开关面边界和开关线的状态轨迹  $(x'_i, y_i, z_i) (i = 1 \sim k)$ . 其中  $u(t)$  最后的一次切换到  $z$  变号记录的状态轨迹构成了开关线.

2. 系统静止,  $r(t)$ 同1, 再次启动系统. 为了获得开关面上另一边界的轨迹, 令  $u(t) = +u_M$ , 作用于系统极短时间, 使  $z$  达到最大就切换  $u(t)$  为  $-u_M$ , 此时开始记录系统状态值. 当到达某个位置时再次切换  $u(t) = +u_M$ , 使  $z$  变号时  $y$  的绝对值为最小, 以后类同于1. 对于  $a < 0$  的情况是类似的, 开关线的直线近似也是类似的.

实际系统中, 一些部件参数随环境温度的变化, 齿轮及轴承摩擦系数的变化, 控制部件参数的老化都将引起开关面、开关线的漂移, 控制中应随时进行调整. 笔者的作法是, 开关线调整时只考虑  $y$  方向的漂移, 而  $x$  方向的漂移靠调整开关面来解决.

#### a. 开关线调整

设  $y_l$  ——  $u(t)$  第二次切换时  $l$  时刻的  $y$  值

$y'_l$  ——  $l$  时刻由  $z_l$  决定的开关线上的  $y$  值

$y_n$  ——  $z$  变号时  $n$  时刻的  $y$  值

令  $\Delta_2 = y_l - y'_l$ , 调整如下:

- 1°  $\Delta_2 \geq 0$ , 且  $y_n > 0$ , 则开关线逆  $y$  轴方向平移  $y_n - \Delta_2$  个单位;
- 2°  $\Delta_2 \geq 0$ , 且  $y_n < 0$ , 则开关线沿  $y$  轴方向平移  $\Delta_2 - y_n$  个单位;
- 3°  $\Delta_2 < 0$ , 且  $y_n < 0$ , 则开关线沿  $y$  轴方向平移  $\Delta_2 - y_n$  个单位;
- 4°  $\Delta_2 < 0$ , 且  $y_n > 0$ , 则开关线逆  $y$  轴方向平移  $y_n - \Delta_2$  个单位.

#### b. 开关面调整

设  $x_i$  ——  $u(t)$  第一次切换时  $i$  时刻的  $x$  值

$x'_i$  ——  $i$  时刻由  $y_i, z_i$  所决定的开关面上的  $x$  值

$x_n$  ——  $z$  变号时  $n$  时刻的  $x$  值

令  $\Delta_1 = x_i - x'_i$ , 调整如下:

- 1°  $\Delta_1 \geq 0$ , 且  $x_n > 0$ , 则开关面逆  $x$  轴方向平移  $x_n - \Delta_1$  个单位;
- 2°  $\Delta_1 \geq 0$ , 且  $x_n < 0$ , 则开关面沿  $x$  轴方向平移  $\Delta_1 - x_n$  个单位;
- 3°  $\Delta_1 < 0$ , 且  $x_n < 0$ , 则开关面沿  $x$  轴方向平移  $\Delta_1 - x_n$  个单位;
- 4°  $\Delta_1 < 0$ , 且  $x_n > 0$ , 则开关面逆  $x$  轴方向平移  $x_n - \Delta_1$  个单位.

对于一个确定的系统, 当  $r(t)$  的参数  $a, b$  给定以后, 系统的开关面和开关线在状态空间中的位置就完全固定了. 当  $r(t)$  的参数发生变化时, 其开关面和开关线在空间的位置也相应发生变化. 当参数  $a, b$  在允许范围内变化时, 在空间形成一族开关面和开关线区域. 若对实际允许范围内的每一个  $a, b$  值都求出相应的开关面和开关线, 不仅不可能也没有必要. 因为状态点实际上是落在以开关面为中心, 以一个采样周期内状态行程为边界的范围内, 从而可认为凡是落入此范围的状态点都是到达了开关面上, 由此造成的误差可通过在坐标原点处设置一个与之相应的死区范围来解决, 即状态点一旦进入死区就认为已到原点, 从而转入通常的跟踪控制. 这样,  $r(t)$  参数变化导致的开关面区域就可用有限个开关面来代替, 用前述的开关面范围对开关面区域进行划分即可确定

开关面在区域中的个数。然后对每个开关面确定其近似平面即可获得系统对  $r(t)$  参数变化的最速控制规律。

根据上述的分析与设计, 可得主要控制程序框图, 如图4所示。

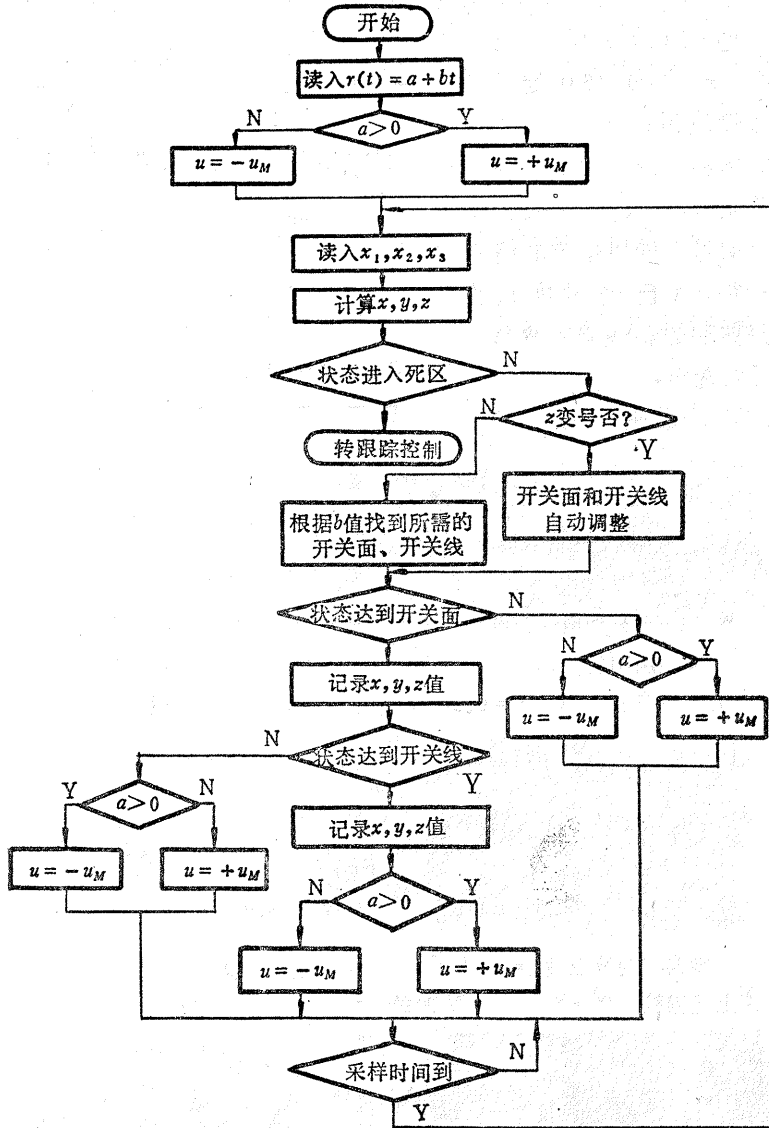


图 4 控制程序框图

#### 四、实验结果与结论

一个典型的雷达伺服系统受控部分的等效传递函数为

$$G_i(s) = \frac{4.5}{s(1+0.025s)(1+0.05s)}$$

根据这个函数,设计了超调量  $\sigma \leq 20\%$ , 调整时间  $T_s \leq 0.45$  秒的经典控制。对此系统实测了其开关面、开关线,将最速控制程序,经典控制程序送微机,受控系统通过 A/D、D/A 转换板与 IBM-PC 微机相连,构成了微机控制系统,采样周期 0.01 秒, A/D 转换 12 位。对于不同的跟踪信号  $r(t)$  进行控制,根据记录和示波器显示,得到了一组数据和波形,见表 1 和图 5。

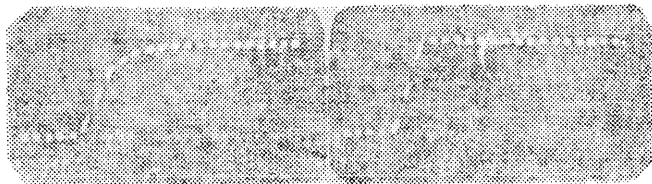
在表 1 和图 5 中,  $r(t) = 0.26$  伏处于经典法控制系统的线性范围;  $r(t) = 1$  伏时处于经典法控制的饱和范围。由于本经典控制系统属于一阶无差系统,对于表 1 和图 5 中给定的斜线信号不能以给定的精度(死区范围)进行跟踪(已通过实验验证),故未给出经典法的斜线响应波形。

从表 1 和图 5 可以看出:

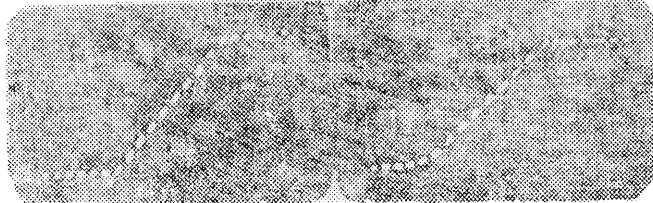
1. 在线控范围内,最速控制完成位

表 1

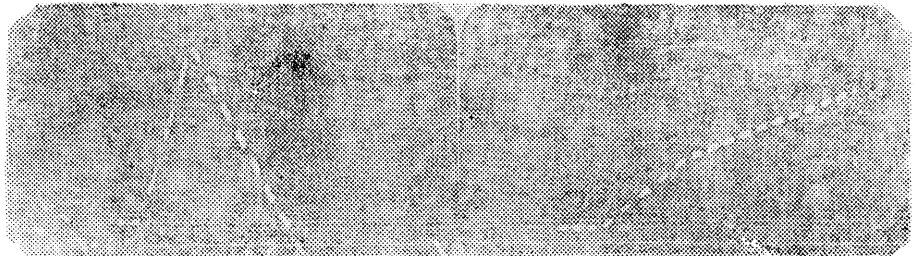
跟踪信号 $r(t)$ (伏)	控制方式	经典控制位置 调转所需 周期(拍)	最速控制位置 调转所需 周期(拍)
0.26 V		59	29
1 V		129	115
$1 + 0.5t$ V		—	216
$2 - 0.5t$ V		—	146



经典控制响应波形, 最速控制响应波形  
(以上是跟踪信号  $r(t) = 0.26$  V 时输出波形, 时标 100 毫秒)



经典控制响应波形, 最速控制响应波形  
(以上是跟踪信号  $r(t) = 1$  V 时输出波形, 时标 100 毫秒)



$r(t) = 2 - 0.5t$  V 时最速控制响应波形,  $r(t) = 1 + 0.5t$  V 时最速控制响应波形  
(以上波形图中的时标是 400 毫秒)

图 5 实验响应波形

置调转大大快于经典控制。

2. 在饱和范围内, 最速控制稍快于经典控制。这是在饱和范围内, 经典法的控制信号处于极限运用, 效果等同于最速控制, 但一旦到达线控范围, 控制信号的大小则线性减小, 因而系统状态趋近平衡点的速度是越来越慢。而最速控制在任何时候其控制信号都是极限运用, 减速阶段也是如此, 使系统以最快的速度趋向平衡点。因此经典控制总是次于最速控制。可以想到, 在设计经典控制时, 减小系统的线控范围增大其饱和范围可以在相当程度上逼近最速控制, 但将导致系统的过渡特性出现较大的过冲和振荡, 以致达不到设计要求。

3. 经典控制响应波形在转折处比较平滑, 最速控制则比较平直, 这个事实恰好反映了非线性控制的特点。此外, 一阶无差系统的经典控制跟踪斜线信号的精度是受限的, 而最速控制却无此限制。

4. 本文提出的方法由于采用了实测法和近似法, 放宽了对系统数学模型精确性要求, 这在实时性要求较强和微机控制场合尤为适用。

**致谢** 本文的工作得到张以杰教授的指导和帮助, 在此表示感谢!

### 参 考 文 献

- [1] Huang Guangyuan, Speed-tracker with Digital Control System and Its Simulation, Control Theory and Application, 1, 4, (1984), 54—63.
- [2] 蒲先俊, 快速反应雷达系统的引导捕获时间分析, 现代雷达, 7, 3, (1985), 33—40.
- [3] 张以杰、李瑞棠编, 雷达控制系统基础, 国防工业出版社, 北京, (1980)。

## The Time-optimal Control of Servomechanisms

Zheng Yong

(Department of Petroleum Exploration Instruments and Automation, Xian Petroleum Institute)

Li Ruitang

(Department of Electronic Engineering, Xian University of Electronic Science and Technology)

### Abstract

This paper discussed the analysis, design and experiment of the optimal control of a 3rd system, including the practical measurement of the swithing surface and swithing curve as well as their adjustment. The effectiveness of this method was verified by a simulation experiment for a typical radar servomechanism.

Key words—Time-optimal control, Servomechanism, Microcomputer control.