

用自适应控制改善天文望远镜 低速性能的仿真研究

叶宁 汪晓来 陈子衡

(中国科学院紫金山天文台) (南京天文仪器厂)

摘 要

笔者针对一架中型射电望远镜,建立了一个由微型计算机和模拟计算电路组成的混合仿真系统,通过实时仿真实验,研究了应用数字自适应控制技术改善地平装架天文望远镜低速性能的实际方法。结果表明:(1)采用适当的数字自适应控制器,能够基本消除望远镜系统的低速死区,使系统的速度精度提高约四倍;(2)用八位单板计算机来实现模型参考自适应控制器是现实可行的。

一、引 言

为对天体进行精细的观测,要求地平装架天文望远镜具有良好的低速平稳性和很高的跟踪精度。而由于镜体俯仰角的变动,镜体及电动机转子的不平衡以及润滑程度、环境温度等不确定因素,都会引起电动机轴上负载惯量、扭矩、静动摩擦等在较大范围内波动,特别对于极低速的伺服跟踪,往往用常规的控制方法不易克服系统中非线性摩擦引起的低速爬行现象而影响跟踪精度。采用自适应控制技术提高望远镜系统的跟踪精度^{[1]、[2]}是一种有吸引力的做法。为探求应用数字计算机和自适应控制技术来改善地平装架高精度天文望远镜之低速性能的实际途径和方法,笔者针对紫金山天文台13.7毫米波射电望远镜的方位轴伺服控制系统,建立了一个混合计算机仿真实验系统,并应用模型参考自适应控制方法进行了实时仿真控制实验。

二、仿真实验系统的构成

紫金山天文台13.7毫米波射电望远镜是一架正在研制中的精密天文观测设备。望远镜的主体是一地平装架的抛物面天线,其口径为13.7米,整个望远镜置于天线罩内。要求在 $0.001^{\circ}/\text{秒}$ 至 $0.02^{\circ}/\text{秒}$ 的速度范围内,望远镜方位系统的跟踪精度好于 0.0008° 。该望远镜方位轴伺服控制系统的构成如图1所示。

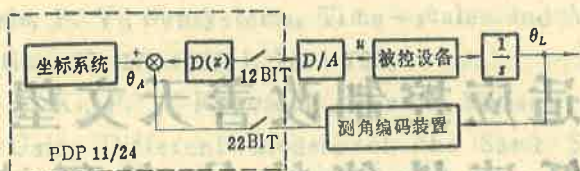


图 1 方位轴位置闭环系统构成

其中 θ_A 是指令轴位, θ_L 是实际轴位, $D(z)$ 是数字控制器。被控设备由天线和驱动装置组成, 构成了系统的速度环, 速度环中采用了双电机并联消齿隙驱动以及电流反馈和测速反馈技术。在低速状况下, 该速度环的数字模型可用图 2 表示。

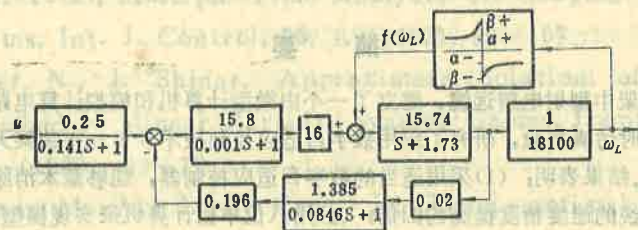


图 2 方位轴速度环低速模型框图

其中 $\omega_L = \dot{\theta}_L$, $f(\omega_L)$ 是非线性摩擦力矩, β_+ 、 β_- 反映了静摩擦水平, α_+ 、 α_- 反映了库伦摩擦水平。根据图2, 我们建立了速度环的电路仿真模型。又用 TRS—80 建立了微机实时控制装置, 该装置作为控制机与速度环仿真电路联合构成了图 3 所示的混合仿真系统。

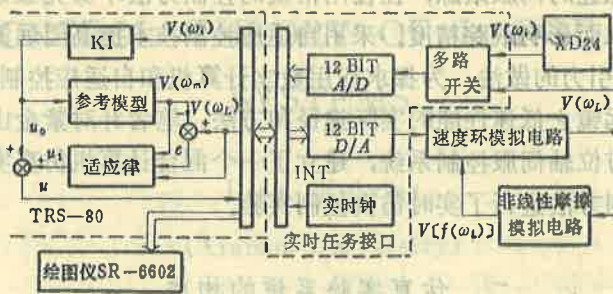


图 3 混合计算机仿真系统构成

三、自适应系统的结构、算法和实现

1. 自适应系统结构的选取

考虑到望远镜置于罩内, 运行条件较好, 因而采用了模型参考自适应系统结构, 并用数字计算机实现其中的参考模型和适应控制器。

2. 自适应控制算法的设计

笔者采取先按连续系统设计,再离散化的方法来选取参考模型和综合自适应律,实测速度环仿真电路线性部分的频率特性,得到其传递函数为

$$G(s) = \frac{V(\omega_L)}{u} \bigg|_{V[f(\omega_L)] = 0} = \frac{131(s + 11.8)}{(s + 7)(s^2 + 11.2s + 163)} \quad (1)$$

由于仅考虑低速状况,并希望控制算法尽可能简单,取一阶系统

$$G_m(s) = k_m / (s + a_m) \quad (2)$$

作为参考模型(这意味着用 $G'(s) = k_p / (s + a_p)$ 作为 $G(s)$ 的近似,其中 $k_p > 0$, $a_p > 0$, 为缓慢时变参数)。这样,自适应系统的连续结构如图 4 所示。

其中 $\tilde{f}(\omega_L) = [(0.141s + 1)(0.001s + 1)/63.2]f(\omega_L)$, u_0 是速度指令, u_1 是辅助控制信号。

用 Ляпунов 直接方法综合自适应律。由图 4 可写出以下关系式:

$$\text{参考模型方程} \quad \dot{\omega}_m + a_m \omega_m = k_m u_0, \quad (3)$$

$$\text{可调系统方程} \quad \dot{\omega}_L + a_p \omega_L = k_p [u_0 + u_1 + \tilde{f}(\omega_L)], \quad (4)$$

$$\text{误差方程} \quad \dot{e} + a_m e = -(k_p - k_m) u_0 + (a_p - a_m) \omega_L - k_p \tilde{f}(\omega_L) - k_p u_1. \quad (5)$$

考虑到所用的自适应系统结构有适应速度快的优点^[3],因此在收敛周期内,视 k_p , a_p 为常数。另外,注意到 ω_L 应跟踪 ω_m , 并为使问题简化,在综合自适应律时,取 $-\alpha \text{sgn}(\omega_m)$ 作为 $\tilde{f}(\omega_L)$ 的近似,在收敛周期内视 α 为常数。这样,误差方程变为

$$\dot{e} + a_m e = -(k_p - k_m) u_0 + (a_p - a_m) \omega_L + k_p \alpha \text{sgn}(\omega_m) - k_p u_1. \quad (6)$$

为使上式右端最小化,考虑取辅助控制信号为

$$u_1 = K_1 u_0 + K_2 \omega_L + K_3 \text{sgn}(\omega_m), \quad (7)$$

则误差方程可写为

$$\dot{e} + a_m e = x_1 u_0 + x_2 \omega_L + x_3 \text{sgn}(\omega_m), \quad (8)$$

其中 $x_1 = -(k_p - k_m + k_p K_1)$, $x_2 = a_p - a_m - k_p K_2$, $x_3 = k_p \alpha - k_p K_3$; K_1 , K_2 , K_3 是可调参数,它们的确定应使 $e = 0$ 成为式(8)的渐近稳定点。

取 Ляпунов 函数为

$$V = -\frac{1}{2} \left\{ e^2 + \frac{1}{\lambda_1} (x_1 + \beta_1 e u_0)^2 + \frac{1}{\lambda_2} (x_2 + \beta_2 e \omega_L)^2 + \frac{1}{\lambda_3} [x_3 + \beta_3 e \text{sgn}(\omega_m)]^2 \right\}, \quad (9)$$

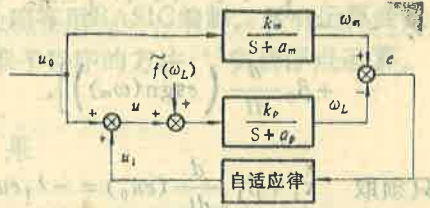


图 4 自适应系统的连续结构

式中 $\lambda_i, \beta_i, i=1, 2, 3$, 都是正常数。

我们能得到

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -a_m e^2 + x_1 e u_0 + x_2 e \omega_2 + x_3 e \operatorname{sgn}(\omega_m) + \frac{1}{\lambda_1} (x_1 + \beta_1 e u_0) \left[\dot{x}_1 + \beta_1 \frac{d}{dt} (e u_0) \right] \\ & + \frac{1}{\lambda_2} (x_2 + \beta_2 e \omega_L) \left[\dot{x}_2 + \beta_2 \frac{d}{dt} (e \omega_L) \right] + \frac{1}{\lambda_3} \left[x_3 + \beta_3 \operatorname{sgn}(\omega_m) \right] \left[\dot{x}_3 \right. \\ & \left. + \beta_3 \frac{d}{dt} (e \operatorname{sgn}(\omega_m)) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

只须取 $\dot{x}_1 + \beta_1 \frac{d}{dt} (e u_0) = -\lambda_1 e u_0$,

$$\dot{x}_2 + \beta_2 \frac{d}{dt} (e \omega_L) = -\lambda_2 e \omega_L,$$

$$\dot{x}_3 + \beta_3 \frac{d}{dt} (e \operatorname{sgn}(\omega_m)) = -\lambda_3 e \operatorname{sgn}(\omega_m),$$

就有: 对任意 $e \neq 0$,

$$\dot{V} = -a_m e^2 - \beta_1 (e u_0)^2 - \beta_2 (e \omega_L)^2 - \beta_3 [e \operatorname{sgn}(\omega_m)]^2 < 0. \quad (12)$$

对式(11)积分, 并利用公式

$$\begin{aligned} H[(k+1)T] &= \int_0^{(k+1)T} f(t)g(t)dt = \int_0^{kT} f(t)g(t)dt + \int_{kT}^{(k+1)T} f(t)g(t)dt = H(kT) \\ &+ T f(kT)g(kT), \end{aligned} \quad (13)$$

式中 T 是采样周期, 进行离散化, 可得离散形式的自适律如下:

$$\begin{aligned} K_1(k+1) &= K_1(0) + B_1 e(k+1) u_0(k+1) + K_1^*(k+1), \\ K_1^*(k+1) &= K_1^*(k) + C_1 e(k) u_0(k), \\ K_2(k+1) &= K_2(0) + B_2 e(k+1) \omega_2(k+1) + K_2^*(k+1), \\ K_2^*(k+1) &= K_2^*(k) + C_2 e(k) \omega_L(k), \\ K_3(k+1) &= K_3(0) + B_3 e(k+1) \operatorname{sgn}[\omega_m(k+1)] + K_3^*(k+1), \\ K_3^*(k+1) &= K_3^*(k) + C_3 e(k) \operatorname{sgn}[\omega_m(k)], \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $K_j(0), B_j, C_j, j=1, 2, 3$, 是常数。辅助控制信号为

$$U_1(k) = K_1(k) u_0(k) + K_2(k) \omega_2(k) + K_3(k) \operatorname{sgn}[\omega_m(k)]. \quad (15)$$

参考模型的离散化形式取为

$$\omega_m(k+1) = A_m \omega_m(k) + B_m u_0(k), \quad (16)$$

其中
$$B_m = \frac{k_m}{a_m} (1 - e^{-a_m T}), \quad A_m = e^{-a_m T}. \quad (17)$$

3. 自适应控制算法的程序实现

自适应控制仿真实验的程序框图略。

实时控制程序用汇编语言编制；初始化、数据处理等用BASIC编制。所有运算变量取四字节浮点数表示，采取调用TRS—80ROM中标准子程序的方法^[4]实现浮点运算。

四、实验结果

根据天线制造厂家提供的数据设置了非线性摩擦特性，取采样周期 $T = 0.1$ 秒，以正弦信号作为速度指令，通过对比实验考察了：

1. 自适应控制对非线性摩擦的补偿作用。结果见图5。从图5看到，自适应控制使由非线性摩擦造成的低速死区大大减小，并使速度误差的均方值 $(\text{SIGMA} =$

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2(k)})$$
 减少为无自适应控制的1/4以下。

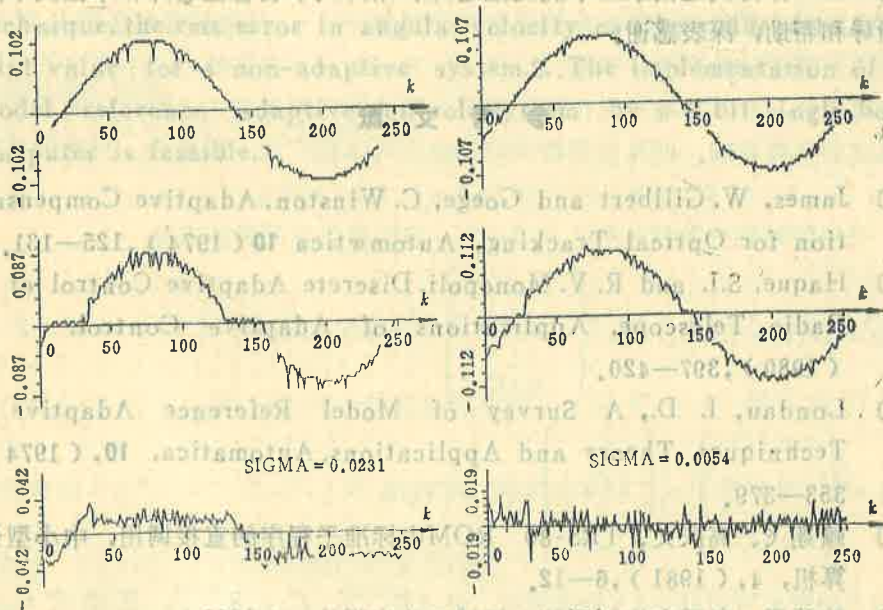


图 5 对比实验结果 1

其中 $\omega_i = 0.102 \sin(2\pi f k T + \gamma)$, $f = 0.04 \text{ Hz}$, $T = 0.1 \text{ 秒}$

2. 自适应控制对系统增益变化的补偿作用. 在系统增益减小33%和增大46%的两种情况下, 无自适应控制时速度误差变化较大, 而有自适应控制时速度误差变化很小, 两种情况下的SIGMA值分别约为无自适应控制时的1/7和1/2.7 (图略).

3. 自适应控制对极点变化的补偿作用. 通过改变参考模型的极点 Λ_m , 相对考察自适应对被控对象极点变化的补偿作用. 在 Λ_m 增大一倍的情况下, 自适应控制下的SIGMA值约为无自适应控制时的 $\frac{1}{9}$ (图略).

五、结 语

1. 实验结果表明, 所采用的自适应控制器对非线性摩擦、系统增益和极点变化都有一定的补偿能力, 可使系统的速度精度提高约四倍.

2. 由于自适应控制程序 (包括所调用的浮点运算标准子程序) 所占内存容量小于3K字节, 程序的运行时间开销约为0.065秒, 因此采用单板机来实现模型参考自适应控制是现实可行的.

3. 实验中发现 $K_s(k)$ 变化很小, 这与库仑摩擦水平基本设定为常数有关. 若在实际系统中出现 $K_s(k)$ 变化较小, 则可考虑将 $K_s(k)$ 固定 (此时对库仑摩擦的补偿退化为死区处理), 以简化程序.

致谢 本工作得到过南京工学院史维老师、南开大学袁著社老师和中山大学陈云烽老师的指导和帮助, 深表感谢.

参 考 文 献

- [1] James, W. Gillbert and Goege, C. Winston, Adaptive Compensation for Optical Tracking, *Automatica* **10** (1974), 125—131.
- [2] Haque, S.I. and R.V. Monopoli, Discrete Adaptive Control of a Radio Telescope, *Applications of Adaptive Control*, (1980), 397—420.
- [3] Londau, I. D., A Survey of Model Reference Adaptive Techniques, *Theory and Applications, Automatica*, **10**, (1974) 353—379.
- [4] 赖翔飞、高庆义, TRS-80 ROM中标准子程序的直接调用, 中小型计算机, **4**, (1981), 6—12.
- [5] 韩曾晋, 自适应控制系统, 机械工业出版社, (1983),

SIMULATION STUDY OF ADAPTIVE CONTROL FOR IMPROVING THE LOW-SPEED PERFORMANCE OF THE TRACKING SYSTEM FOR ASTRONOMICAL TELESCOPE

Ye Ning, Wang Xiaolai, Chen Ziheng

(Purple Mountain Observatory Academia Sinica)

Abstract

A real time hybrid simulation using a microcomputer and an analog circuit was performed for studying the improvement of the low-speed performance of the tracking system for an altazimuth mounting astronomical telescope. The model reference adaptive technique was applied to this real time simulation of control. The experiment indicated: 1. By applying the model reference adaptive technique, the rms error in angular velocity can be reduced to 1/4 of that value for a non-adaptive system. 2. The implementation of the model reference adaptive control system by a 8 bit single board computer is feasible.