

文章编号: 1000-8152(2002)01-0121-04

## 大射电望远镜馈源轨迹跟踪自适应控制\*

苏玉鑫 段宝岩

(西安电子科技大学机电工程学院·西安, 710071)

**摘要:** 针对大射电望远镜悬索馈源为一非线性慢时变多变量耦合的系统特点, 提出用多变量极点配置自校正预测控制器(MPSTPC)来实现馈源轨迹的跟踪控制, 建立了悬索-馈源系统的数学模型, 在有随机风扰动和无随机风扰动的情况下, 进行了数字仿真. 结果表明, 该控制算法可以很好地满足馈源系统轨迹跟踪高精度要求.

**关键词:** 大射电望远镜工程; 轨迹跟踪; 多变量极点配置自校正预测控制器; 自适应控制

**文献标识码:** A

## Adaptive Predictive Tracking Control of Feed for Large Radio Telescope

SU Yuxin and DUAN Baoyan

(School of Electro-mechanical Engineering, Xidian University · Xi'an, 710071, P. R. China)

**Abstract:** Being encountered to the characteristics of nonlinearity, non-stationary and multivariable coupled feed system of next generation large spherical radio telescope (LT), an adaptive control method based on multivariable pole assignment self-tuning predictive controller (MPSTPC) is utilized to realize the trajectory tracking of the feed. The model of the feed-cable system is developed, and the simulation of the proposed control method is carried out with and without random wind disturbance. The simulation results have shown that the tracking accuracy is much better than that of self-tuning regulator.

**Key words:** large radio telescope; trajectory tracking; multivariable pole assignment self-tuning predictive control; adaptive control

### 1 引言(Introduction)

90 年代以来,越来越多的天文学家意识到需要某种真正国际合作的新一代大射电望远镜(LT),以迎接天体物理在新世纪的挑战.1995 年 10 月,在我国贵州召开了第三届 LT 工作组会议暨大射电望远镜国际学术会议,使 LT 工程向在贵州建三十几面口径 300~500 米的球面望远镜的设计方案倾斜变得更有利,甚至在某种程度上已形成了国际共识<sup>[1]</sup>.

针对已有 LT 的弱点,文[2]提出“LT 光、机、电一体化设计方案”,被认为是“革新式的设计”.但由于该方案是利用六根大跨度悬索通过伺服电机改变悬索长度,来实现馈源运动轨迹跟踪控制,而悬索馈源系统又是一个非线性慢时变多变量耦合系统,并且馈源轨迹跟踪精度要求较高(稳态跟踪误差 $\leq 4\text{mm}$ ).因此,给控制工程实现上带来不小难度,文[3]提出了带有学习功能的多变量自校正调节器,得到了较为理想的结果,唯一不足的是馈源运动第一圈的跟踪误差较大<sup>[3]</sup>.本文采用多变量极点配置自

校正预测控制器(MPSTPC)来实现馈源轨迹跟踪控制,得到了更为理想的结果,并为该方案工程实现奠定了坚实基础.

### 2 LT 悬索-馈源控制系统结构及工作原理 (Structure and working principle of cable-feed control system)

LT 悬索-馈源控制系统结构如图 1 所示.为了实现馈源轨迹的跟踪,把馈源运动轨迹依馈源轨迹跟踪速度  $V$  和  $T$  采样周期  $T$  离散为一系列的点,这样一来,即可通过伺服电机系统来改变各离散点之间的索长来实现馈源运动轨迹的跟踪.

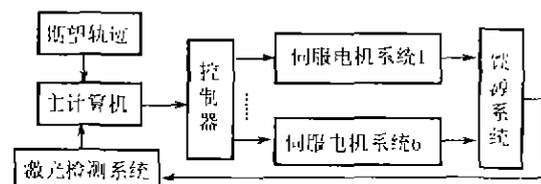


图 1 LT 悬索馈源控制系统结构图

Fig 1 Structure of cable-feed control system for LT

\* 基金项目:国家自然科学基金(59675040)和中科院国家天文观测中心大射电望远镜实验室经费支持项目.

收稿日期:1999-10-15; 收修改稿日期:2000-07-31.

在实际观测过程中,激光检测系统不断以一定的采样周期实时检测馈源系统在空间的实际位置,传送给主计算机,主计算机通过运算求得该时刻的6根悬索的实际长度  $S_i$ ,与期望索长  $S_{di}$  相比较,求得6索的索长差  $\Delta S_i$  ( $\Delta S_i = S_{di} - S_i, i = 1, \dots, 6$ ),作为控制器的输入,控制器通过一定的控制算法计算出伺服电机所对应的输入量,控制电机方向及转速,去控制收(放)6索的长度,从而实现馈源运动轨迹的跟踪。

### 3 LT 馈源轨迹跟踪多变量极点配置自校正预测控制器 (MPSTPC for feed trajectory tracking)

如上所述,悬索-馈源系统是一个6输入6输出多变量耦合系统,而且,系统的精确数学模型难以建立,并且控制精度要求很高(稳态精度小于4mm),幸运的是系统运行速度缓慢(跟踪速度仅为1~2cm/s),也就是说,该系统是一个非线性慢时变多变量耦合系统。

对于这样的一个非线性慢时变多变量耦合系统,虽然,不能建立其精确的数学模型,但是,馈源系统的运动可用6输入6输出多变量随机线性离散差分方程来描述

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + \epsilon(k). \quad (1)$$

式中,  $y \in \mathbb{R}^6, u \in \mathbb{R}^6, \epsilon \in \mathbb{R}^6$  分别为输出、输入和不可测有界扰动向量,  $d$  为滞后步数,  $A(z^{-1}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}(z^{-1}), B(z^{-1}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}(z^{-1})$ , 可以表示为

$$A(z^{-1}) = I + A_1z^{-1} + A_2z^{-2} + A_3z^{-3} + A_4z^{-4},$$

$$B(z^{-1}) = B_0 + B_1z^{-1} + B_2z^{-2} + B_3z^{-3} + B_4z^{-4}.$$

要求  $A(z^{-1})$  与  $B(z^{-1})$  左互质,阶次都取为4,并使  $A(z^{-1})$  开环稳定,对  $B(z^{-1})$  根不要求。

对于这样的系统,选用多变量极点配置自校正预测控制器作为控制器<sup>[4]</sup>,其系统结构图如图2所示。

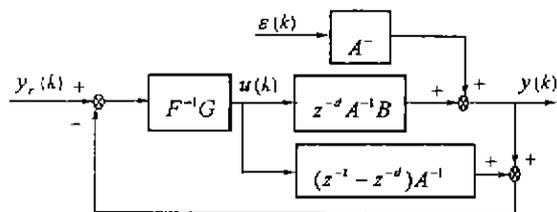


图2 MPSTPC系统结构图

Fig. 2 Schematic diagram of MPSTPC

可配置如下闭环极点

$$F(z^{-1}) + z^{-1}G(z^{-1})A^{-1}(z^{-1})B(z^{-1}) = T(z^{-1}), \quad (2)$$

并取

$$G(z^{-1}) = K_1(z^{-1})A(z^{-1}). \quad (3)$$

其中,  $F(z^{-1}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}(z^{-1}), G(z^{-1}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}(z^{-1})$ , 且  $F(z^{-1})$  与  $G(z^{-1})$  左互质,  $T(z^{-1}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}(z^{-1}), K_1(z^{-1}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}(z^{-1}), F(0) = I_{6 \times 6}$ .

为简化控制器方程,令配置的闭环多项式矩阵为

$$T(z^{-1}) = I_{6 \times 6} + (T(1) - I)z^{-1}. \quad (4)$$

式中

$$T(1) = I_{6 \times 6} + \sum_{j=1}^4 T_j. \quad (5)$$

又因为馈源轨迹跟踪速度较慢,因此,可假设馈源系统进入稳态跟踪后,系统的控制量变化不大,即

$$B(z^{-1})u(k) = B(1)u(k). \quad (6)$$

则控制器方程为

$$u(k) = u(k-d) - T_1[u(k-1) - u(k-d)] + T(1)B_R^{-1}(1)A(z^{-1})[y_r(k) - y(k)]. \quad (7)$$

其中,  $B_R^{-1}(1)$  为  $B(1)$  的右逆阵,  $y_r(k)$  为系统的参考输入。

采用递推最小二乘法在线辨识原模型参数<sup>[5]</sup>,其中,令  $B_{0 \times 6 \times 6}$  不参加辨识,其值由离线建模结果和实际运行经验综合考虑后确定。在此暂取为  $B_0 = I_{6 \times 6}$ 。

递推最小二乘法在线辨识的计算过程可描述如下:

$$\hat{\Theta} = \hat{\Theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \hat{\Theta}^T(k-1)\varphi(k-d) - B_0u(k-d)]^T, \quad (8)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k-d)}{\alpha + \varphi^T(k-d)P(k-1)\Psi(k-d)}, \quad (9)$$

$$P(k) = \frac{1}{\alpha} [P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k-d)\varphi^T(k-d)P(k-1)}{\alpha + \varphi^T(k-d)P(k-1)\Psi(k-d)}]. \quad (10)$$

式中,  $\hat{\Theta}$  为参数向量

$$\hat{\Theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6] = [\hat{A}_1, \hat{A}_2, \hat{A}_3, \hat{A}_4, \hat{B}_1, \hat{B}_2, \hat{B}_3, \hat{B}_4]^T,$$

$\varphi(k-d)$  为观测数据向量

$$\varphi(k-d) = [-y^T(k-1), -y^T(k-2), \dots, -y^T(k-4), -u^T(k-d-1), -u^T(k-d-2), \dots, -u^T(k-d-4)]^T,$$

$\alpha$  为遗忘因子,  $\alpha = 0.98$ 。

综上所述,MPSTPC 控制律的计算过程可描述如下:

- 1) MPSTPC 算法赋初值;
- 2) 读取系统的输出向量  $y(k)$ , 并组成数据向量  $\varphi(k-d)$ ;
- 3) 用递推最小二乘法计算最新参数估计向量  $\hat{\Theta}(k)$ ;
- 4) 将  $\hat{\Theta}(k)$  值代入式 (7), 再利用  $B(z^{-1})B_R(z^{-1}) = I_{6 \times 6}$ , 即可求得控制律  $u(k)$ ;
- 5) 将采样次数加 1, 即  $k = k + 1$ , 返回(2), 继续运算.

#### 4 仿真结果 (Simulation results)

##### 4.1 系统模型 (Model of the cable-feed system)

悬索-馈源被控系统的任一支路由如下的伺服电机和大跨度悬索两个环节组成

$$G_i(s) = G_{mc}(s) \cdot G_{si}(s) \quad (i = 1, 2, \dots, 6). \quad (11)$$

其中,  $G_{mc}(s)$  与  $G_{si}(s)$  分别为伺服电机和悬索的传递函数.

伺服电机的传递函数可描述为<sup>[6]</sup>

$$G_{mc}(s) = \frac{K}{(T_L s + 1) \cdot (T_M s + 1)}. \quad (12)$$

式中,  $K$  为增益系数;  $T_L$  与  $T_M$  分别为伺服电机的电磁时间常数与机电时间常数. 根据所选电机的功率大小, 可确定其参数为:  $K = 30$ ,  $T_L = 0.017s$ ,  $T_M = 0.076s$ .

悬索可看作一个纯滞后环节, 其传递函数可表示为

$$G_{si}(s) = e^{-\tau_i s}. \quad (13)$$

其中,  $\tau_i$  为滞后时间常数, 其与悬索的挠度直接相关. 如果用直杆来近似大跨度悬索, 参考文献[7], 则滞后时间常数可表示为

$$\tau_i = \frac{\text{悬索长度}}{\text{悬索速度}} = \frac{L_i}{\dot{L}_i}, \quad (14)$$

其中,  $L_i$  可由文献[8]计算得到,  $\dot{L}_i$  可由下式计算得到

$$\dot{L}_i = \frac{\Delta L_i}{T}. \quad (15)$$

$\Delta L_i$  为两相邻采样点之间的索长差,  $T$  为采样时间.

又考虑大挠度对滞后时间常数的影响, 悬索对象修正之后的滞后时间常数为

$$\tau_i = d_c \cdot \frac{\text{悬索长度}}{\text{悬索速度}} = d_c \cdot \frac{L_i}{\dot{L}_i}. \quad (16)$$

$d_c$  为修正系数. 根据口径为 500m 时悬索的实际挠度情况<sup>[8]</sup>, 在此取为:  $d_c = 4$ .

采用一阶 Padé 近似<sup>[7]</sup>, 则悬索的传递函数为

$$G_{si} = e^{-\tau_i s} = \frac{1 - \frac{\tau_i}{2}s}{1 + \frac{\tau_i}{2}s} + \frac{1 - d_c \cdot \frac{L_i}{2\dot{L}_i}s}{1 + d_c \cdot \frac{L_i}{2\dot{L}_i}s}. \quad (17)$$

因此, 任一支路的传递函数为

$$G_i(s) = G_{mi}(s) \cdot G_{si}(s) = \frac{30}{(0.017s + 1)(0.076s + 1)} \cdot \frac{1 - d_c \cdot \frac{L_i}{2\dot{L}_i}s}{1 + d_c \cdot \frac{L_i}{2\dot{L}_i}s}. \quad (18)$$

将上述传递函数离散化, 即得到被控系统仿真的数学模型.

##### 4.2 无随机干扰 (Simulation result without random wind disturbance)

在实际工程应用之前, 为了验证 MPSTPC 的工程可行性, 在上述模型参数的情况下, 进行了计算机仿真. 采样周期为:  $T = 0.3s$ . 工程的物理几何参数为: 大射电望远镜反射面的口径为 500m, 塔高为: 150m; 悬索的横截面积、弹性模量和密度分别为:  $8cm^2$ ,  $2.058 \times 10^7 N/cm^2$ ,  $7.85 \times 10^{-3} kg/cm^3$ . 馈源总重量为: 20tons.

对于所采用的 MPSTPC 控制算法, 分别在有扰和无扰的情况下进行了轨迹跟踪仿真. 仿真时, 把馈源的运动轨迹离散为 360 个点.

图 3 是采用 MPSTPC 在没有随机干扰的情况下的仿真结果, 由此可见在没有随机干扰的情况下, 馈源系统的跟踪精度是很高的.

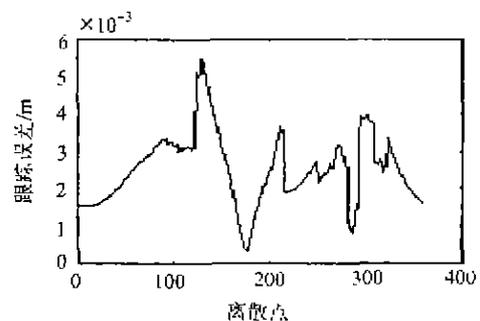


图 3 无随机干扰下, 馈源轨迹跟踪误差

Fig. 3 Trajectory tracking error of the feed without random wind disturbance

##### 4.3 有随机干扰 (Simulation result with random wind disturbance)

干扰源为随机风荷, 风速为 50m/s (贵州当地的历史最大风速仅为 9m/s). 根据 ADINA 软件对馈源有限元模型在上述风荷下响应的模拟结果来施加干扰. 仿真结果如图 4.

由上图可见,大多数点的轨迹跟踪的误差仅1mm为左右,远远低于带有学习功能的多变量调节器所得到的轨迹跟踪误差10mm左右<sup>[3]</sup>.而且,即使在施加了较大随机干扰的点处,跟踪误差虽然较大,但这个较大的误差经过1~3步的调节,就很快稳定在跟踪精度要求的范围内.由这些结果可以看出:“预测”功能在克服非线性大滞后特性的明显作用.

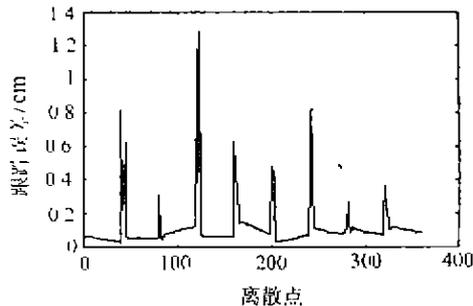


图4 随机干扰下,馈源轨迹跟踪误差

Fig. 4 Trajectory tracking error of the feed with random wind disturbance

## 5 结论(Conclusions)

由上述的仿真结果可以看出,MPSTPC的跟踪效果明显优于文献[3]的方法,即使在较大随机干扰作用下,也可以很快地使跟踪精度保持在允许范围内.而且不需要学习,从而使得馈源轨迹跟踪精度自始至终都能满足要求.而且,正在建造一个具有可比性的直径为50m缩尺模型,来模拟柔索的大柔性和大滞后特性,并在工程上验证上述方法的可行性.

虽然得到了较令人满意的结果,但必须指出的是:这些结果是基于悬索-馈源静力学分析而得到的.虽然馈源的轨迹跟踪速度仅为1~2cm/s,但其动力学行为与其静力学行为之间仍然存在不小的差别.目前正在研究采用神经网络方法来获得悬索-馈源系统的逆动力学模型,从而实现更精确的转矩控

制,期望得到更好的轨迹跟踪效果.

## 参考文献(References)

- [1] Nan R D and Peng B. A proposal of the international project of large radio telescope (LT) [R]. Beijing: Beijing Astronomical Observatory, 1996
- [2] Duan B Y, Zhao Y Z and Wang J L, et al. Study on the line feed system of large spherical radio telescope from the viewpoint of mechanical and structural engineering [A]. Proceeding of the Third International Conference on Large Radio Telescope [C], Guizhou, China, 1995
- [3] Qin J B and Duan B Y. On control system of large radio telescope [J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(1): 93-97
- [4] Shu D Q, Liu H C and Wu B L, et al. Intelligent adaptive control for a group of cover annealing furnaces [J]. Acta Automatica Sinica, 1991, 17 (2): 207-214
- [5] Li Q Q. Theory, Design and Applications of Adaptive Control System [M]. Beijing: Science Press, 1990
- [6] Chen B S. Automatic Control of Electrical Drive System [M]. Beijing: China Machine Press, 1991
- [7] Nicholson H. Modelling of Dynamical Systems [M]. Exeter, London: Wheaton & Co., Ltd., 1981
- [8] Duan B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis [J]. Mechatronics, 1999, 9 (1): 53-64

## 本文作者简介

苏玉鑫 1969年生,西安电子科技大学机电工程学院副教授,博士研究生,研究兴趣为机电控制及自动化,自适应控制与模糊控制,已发表论文20余篇. Email: yxsu@mail.xidian.edu.cn

殷宝岩 1955年生,1989年毕业于西安电子科技大学获工学博士学位,1991年至1994年,国家公派赴英国利物浦大学做博士后研究工作,期间赴日本北海道大学做客座研究员,现为西安电子科技大学电子机械学科教授,博士生导师,副校长.主要研究方向包括:机电一体化,面向工程广义优化设计及CAD/CAE,已发表论文150余篇.