



大型球面射电望远镜控制系统研究¹⁾

邱金波

段宝岩

(西安电子科技大学电子机械学院 西安 710071)

(西安电子科技大学电子机械学院 西安 710071)

(西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

(E-mail: byduan@xidian. edu. cn)

彭 勃 南仁东

(中国天文观测中心,中国科学院北京天文台 北京 100012)

摘 要 针对大射电望远镜机电光一体化设计新方案(大跨度悬索结构)的特点,提出了将连续的高次曲线跟踪问题转化为对一组离散点跟踪问题的控制策略与方法. 考虑到轨迹跟踪重复性的特点,将具有学习功能的自校正控制方法应用之. 数值结果说明了方法的有效性.

关键词 大射电望远镜机电光一体化设计,大跨度悬索结构,自校正控制,系统仿真.

ON CONTROL SYSTEM OF LARGE RADIO TELESCOPE

QIU Jin-Bo

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

DUAN Bao-Yan

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

(E-mail: byduan@xidian. edu. cn)

PENG Bo NAN Ren-Dong

(Beijing Astronomy Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

Abstract Considering the special characteristics (long-cable structure) of the new design project with the integration of mechanical, electronic and optic technologies for the next generation large radio telescope, a corresponding control strategy and methodology are described. The strategy is that the problem of tracing a high nonlinear 3D curve is transformed into a problem of tracing a group of discrete points. Since the trajectory is repeatable for the same radio source, the self-regulate control

1) 国家自然科学基金(59675040)与国家天文观测中心大射电望远镜实验室资助项目. 第四届大射电望远镜(LT)学术年会上宣读,中国北京,1997. 11.

method with a learning function is utilized. The numerical result has shown the feasibility and efficiency of the method.

Key words Synthetic design of optomechanics for large radio telescope, long-cable structure, self-tuning regulator, system simulation.

1 引言

建造新一代大射电望远镜(LT)是世界天文与天线专家在1993年日本京都大会上联合发起的,推进工作正在世界范围内紧张而有序地进行着^[1].针对我国贵州境内的 Karst 地貌,文[2]提出了全新的机电光一体化设计方案.

在新方案中,线馈源由六根大跨度的悬索支撑,其扫描运动通过计算机控制的伺服系统驱动悬索来实现.由于风等随机荷载作用,线馈源的实际位置将会偏离其理论上的位置.为了实时获得实际位置,将现代激光检测技术应用之.为在理论上分析新方案的可行性,文[2]提出了需进行的几个方面的研究工作.文[3]与文[4]对新设计方案中的非线性结构分析、随机动态响应及线馈源的运动轨迹描述等问题,均做了研究.本文主要讨论另一主要问题——线馈源跟踪扫描的运动控制问题.

2 LT 跟踪控制的策略与方法

2.1 LT 控制思想与策略

LT 控制系统的精确数学模型难以给出,且控制精度要求很高(扫描时的位置误差不得超过4mm,相应的最高工作频率为8GHz),所幸的是运动速度较低(跟踪速度1~2cm/s).也就是说,这是一个非线性慢时变多变量耦合控制系统.

LT 控制的目的是通过改变各悬索的索长来控制线馈源的空间位置,从而实现所要求的对天体的跟踪.在馈源大范围的缓慢运行过程中,被控对象——悬索馈源系统为一非线性缓慢时变系统,控制输入为索长的改变量,输出为线馈源端点的位置.考虑到不能得到被控系统的精确模型及外界环境的复杂性,本文采用多变量自校正调节器进行控制.

实施有效控制的前提是及时知道误差,这可通过比较由激光检测得到的空间位置与其理论位置来获得.通过预先将线馈源端点的实际运行轨迹(一高次曲线^[5])离散为一组离散点,便可将连续轨迹的跟踪问题转化为一组离散点的跟踪问题.对线馈源端点跟踪的另一要求是线速度,为此,点与点之间的曲线距离取为 vT (v 为线速度要求).于是,在完成逐点跟踪的同时,也满足了轨迹与速度的两种要求.

根据天文观测的特点,线馈源的跟踪运动是一重复运动(同一天体).为此,可将学习思想引入控制方法中.即在下一次运行至该点时,运用上一次在该点所得控制律对其修改并保存.这样,充分利用以往的控制经验,使运行误差在重复运行过程中逐渐减小,直至保持在电性能所允许的误差范围内.

2.2 LT 的学习型自校正控制算法

对于这样一个非线性慢时变多变量耦合控制系统而言,虽不能建立起精确的数学模

型,但馈源的运动可用如下所示的离散差分方程来描述^[6],即

$$Y(t+d) = -A(q^{-1})Y(t) + B(q^{-1})u(t) + \varepsilon(t+d), \quad (1)$$

则系统的自校正控制律为

$$B_0 u(t) + \Omega^T \varphi(t) = 0, \quad (2)$$

其中 $u(t)$ 与 $Y(t)$ 分别是系统在时刻 t 的输入与输出向量; $Y(t+d)$ 与 $\varepsilon(t+d)$ 分别是系统在时刻 $t+d$ 的输出与误差向量; $A(q^{-1})$ 与 $B(q^{-1})$ 均为 $p \times p$ 的多项式矩阵,即

$$\begin{cases} A(q^{-1}) = A_0 + A_1 q^{-1} + \dots + A_{na} q^{-na}, \\ B(q^{-1}) = B_0 + B_1 q^{-1} + \dots + B_{nb} q^{-nb}, \end{cases} \quad (3)$$

$\varphi(t)$ 和 Ω 分别是时刻 t 的误差向量与参数矩阵,即

$$\begin{cases} \varphi(t) = [-Y^T(t) - Y^T(t-1) \dots Y^T(t-na), U^T(t), u^T(t-1), \dots, u^T(t-nb)]^T, \\ \Omega = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T = [A_0, A_1, \dots, A_{na}, B_0, B_1, \dots, B_{nb}]^T, \end{cases} \quad (4)$$

式中 B_0 为一预给的非奇异阵(如单位阵).

至此,可将算法步骤描述如下:

- 1) 读取 t 时刻的 $Y(t)$, 并与已知的输入输出向量共同组成观察数据向量 $\varphi(t-d)$. 若 $Y(t)$ 满足要求, 则停止迭代; 否则转 2);
- 2) 应用递推最小二乘法计算新的参数矩阵 Ω ;
- 3) 由公式(2)得到当前的控制规律并转 1).

为利用重复观测的特点, 本文采用学习型的自校正调节控制方法. 具体为如下所示的 p -积分学习控制方法

$$u_j(t) = u_1(t) + k_r \sum_{i=1}^{j-1} \alpha^{(j-1)-i} \cdot e_i(t+d), \quad (5)$$

其中 $u_j(t)$ 是时刻 t 第 j 次扫描的输入量, 其为过去 $(j-1)$ 次扫描中对应时刻的误差之加权和. α 为遗忘因子, 本文取其为 $0.95 \sim 0.99$. k_r 为与速度有关的学习系数.

3 LT 控制算法仿真与结果

上一节所讨论的控制算法的运作, 需预知线馈源的实际位置, 在实际工程中, 将由激光检测系统实时测出其实际位置. 而在理论研究阶段, 可由当前各悬索长度并结合非线性响应分析来确定线馈源当前的实际位置.

由文[4]已知, 若知道馈源点位置, 则可通过迭代法与数值积分法求得各悬索索长. 然而, 由索长求出馈源点位置, 则是一个反问题, 比较困难. 为此, 本文采用如下的优化方法求解之, 设上层三根悬索当前的索长分别为 S_1, S_2 及 S_3 . 假定线馈源上端点的位置为 $\bar{A}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, 与之相应的三索索长分别为 \bar{S}_1, \bar{S}_2 及 \bar{S}_3 . 于是可构造如下目标函数

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (S_i - \bar{S}_i)^2}, \quad (6)$$

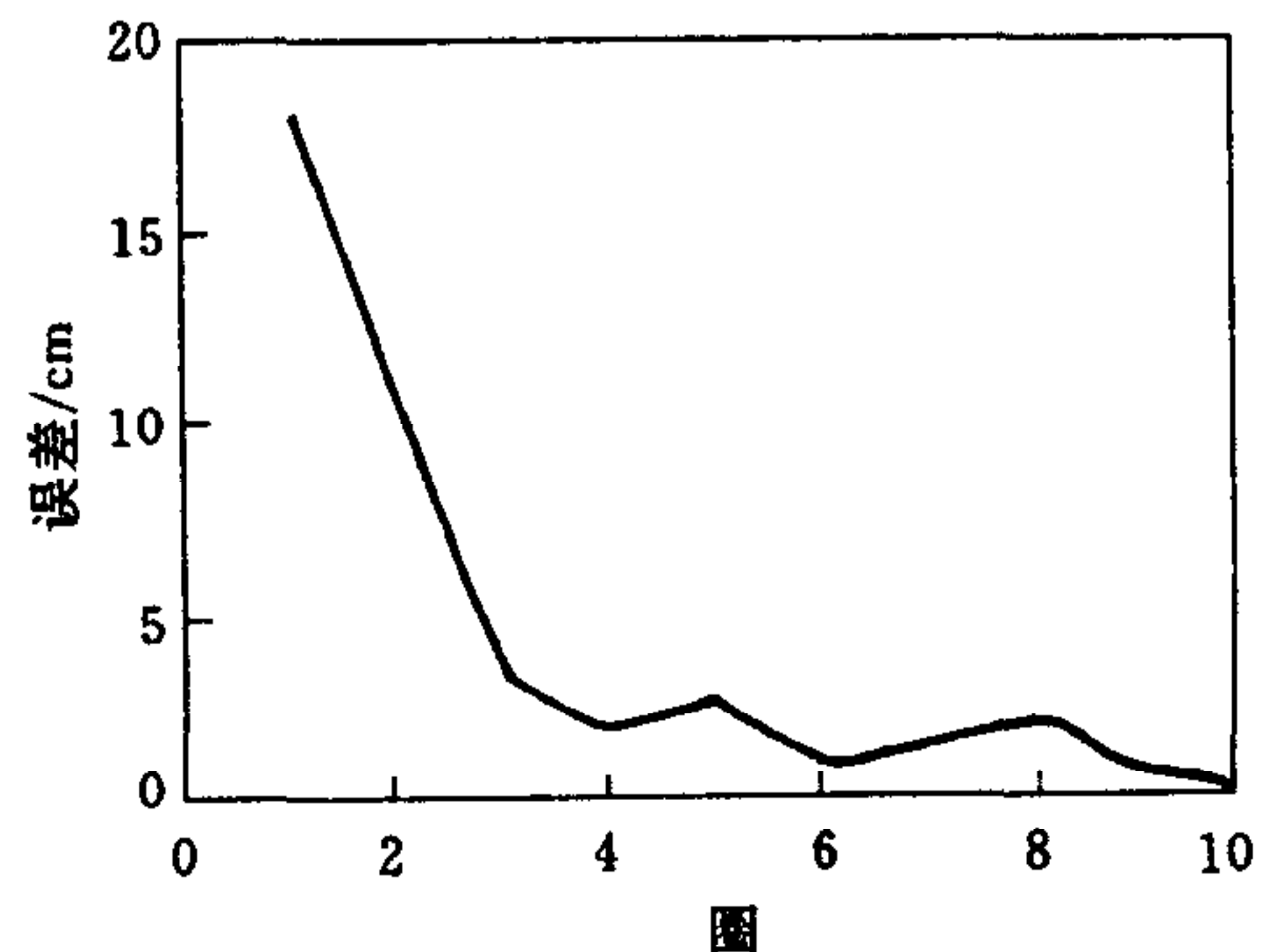


图1 有干扰时误差随学习圈数变化情况

通过极小化 f 可得最优解 (x^*, y^*, z^*) , 从而可得对应的馈源点位置 $\tilde{A}(x^*, y^*, z^*)$. 由于随机风荷等外界干扰作用, \tilde{A} 并非为真实的位置. 本文再应用非线性随机响应分析的有限元方法获得真实位置 A .

控制模型取为四阶差分模型, 以下列出了有风干扰下的结果. 干扰源为随机风荷, 风速取为 50m/s. 图1是引入学习后, 前十圈的跟踪误差图. 由图可见, 随着学习次数的增加, 误差逐渐下降. 虽下降中出现反复, 但大的趋势不变.

图2与图3分别描述了在有干扰时学习控制在第4与第10圈的跟踪情况. 可以看出, 第四圈时, 开始几步的误差还比较大, 而到第十圈时, 误差已基本消失. 对于干扰施加点的误差而言, 也可在很短时间内校正过来.

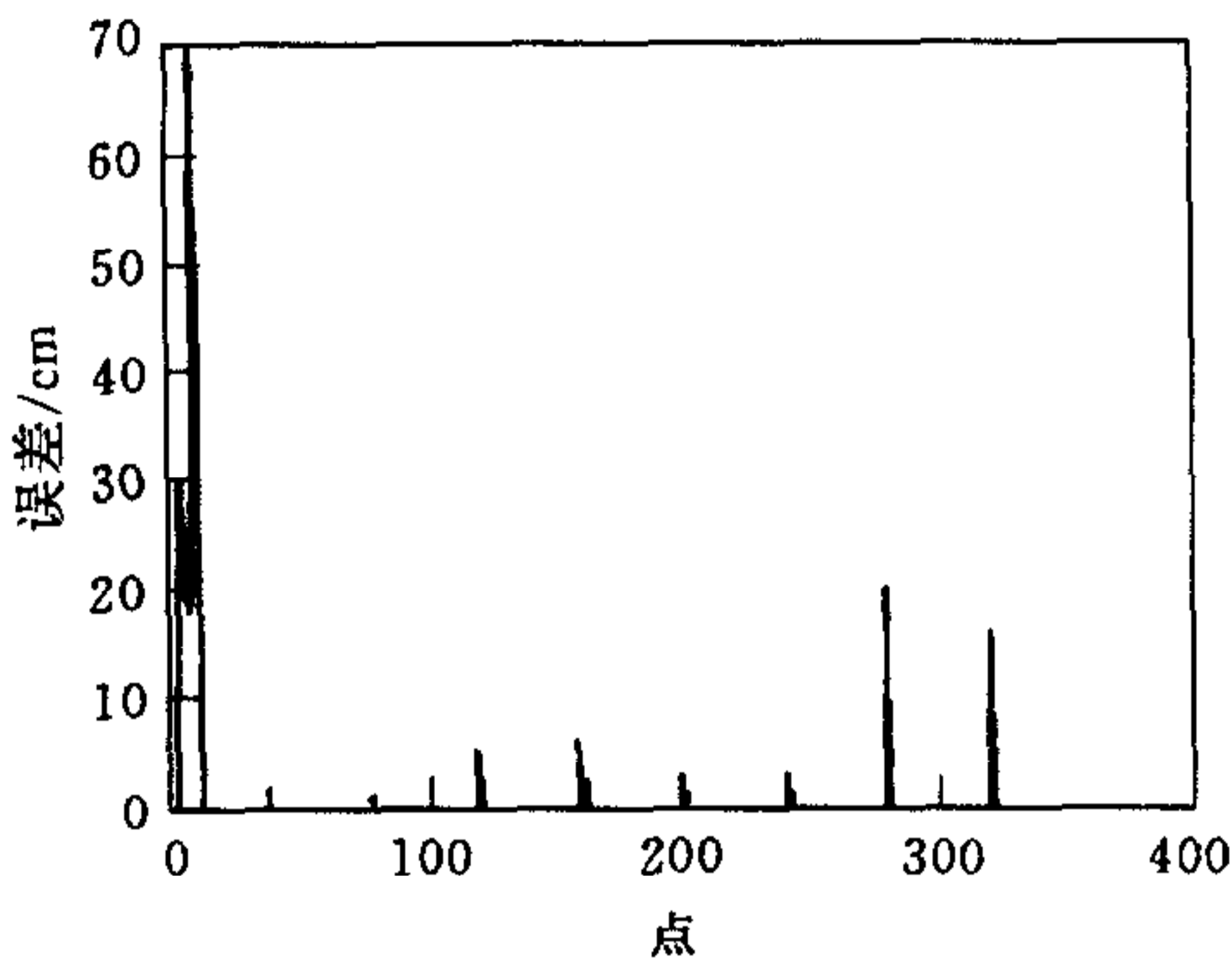


图2 有干扰时学习控制第四圈误差图

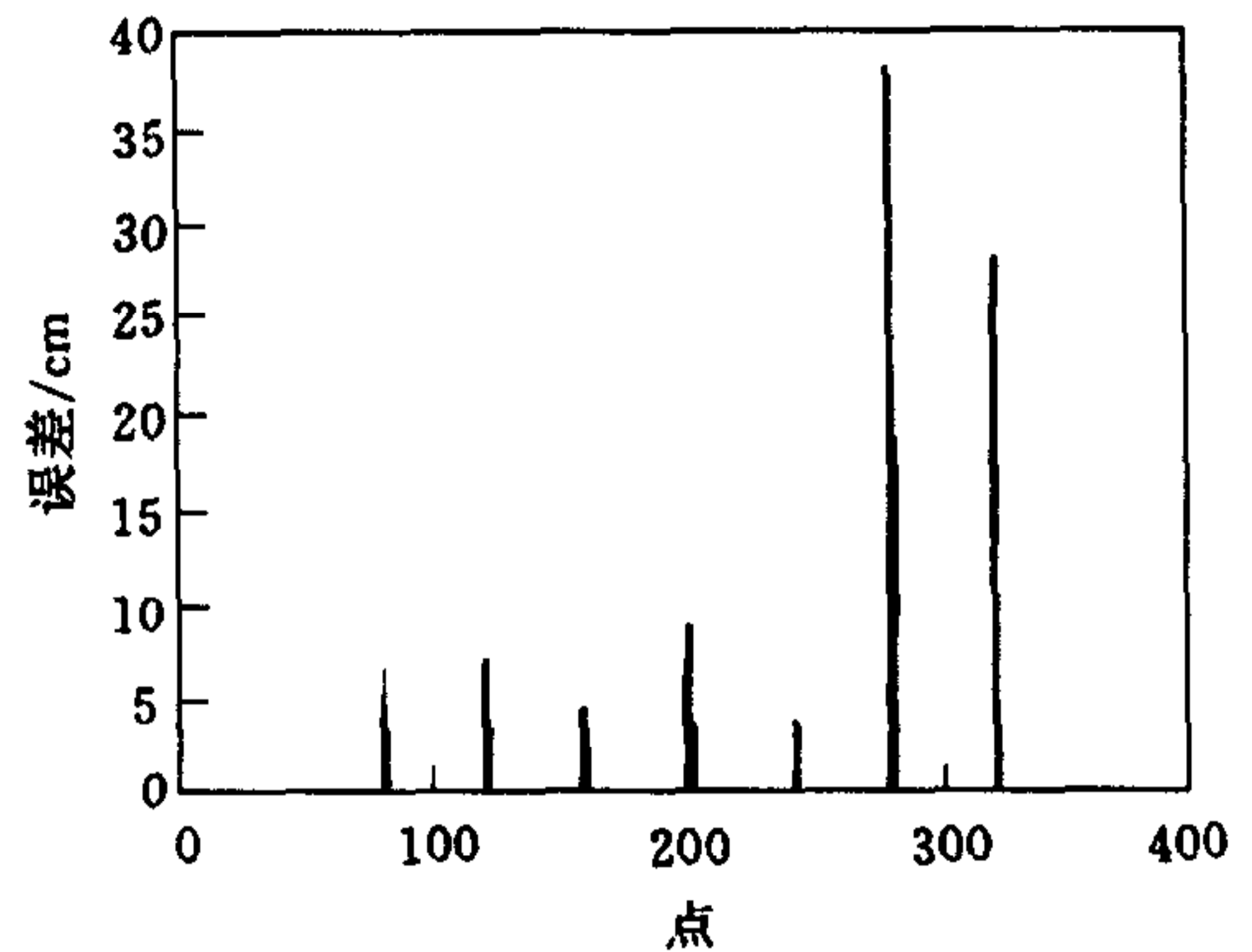


图3 有干扰时学习控制第十圈的误差图

以上结果说明, 应用学习型的自校正调节器方法, 可收到比较理想的效果. 在有干扰且干扰比较大时, 应用学习型的自校正控制可使系统在 1~3 步内稳定下来. 若再加上阻尼, 效果会更好.

4 结论

本文对文[2]提出的 LT 光机电一体化设计方案中的控制部分做了较为深入的探讨与研究, 通过对 LT 线馈源跟踪运动与控制特点的分析, 提出了 LT 控制策略—将连续的高次曲线轨迹跟踪问题转化为对一组离散点的跟踪问题. 针对 LT 轨迹跟踪具有重复性的特点, 将学习型的自校正控制方法应用之. 为获得线馈源的实际位置, 应用了优化与结构非线性随机风荷响应分析等计算机仿真方法. 结果说明了本文所描述的控制方法的可行性与有效性.

参 考 文 献

- 1 南仁东等. 国际 LT 项目争建建议书. 北京: 北京天文台, 1996
- 2 Duan B Y *et al.* Study on the line feed system of large spherical radio telescope from the viewpoint of mechanical and structural engineering. In: Proceeding of the Third International Conference on Large Telescope, Guizhou of china, October 2~6, 1995
- 3 Duan B Y, Duan S J. On the nonlinear dynamic analysis of the line feed structure and its suspended cable

structure used in large spherical radio telescope. Invited Paper at the 25th conference of International Union of Radio Science, Lille of France, Aug. 28~Sep. 5, 1996

- 4 Duan B Y, Zhang J B. Some new result about the integrated design of mechanical, electronic, optic and automatic control technologies for next generation large telescopes. Invited Paper at the Inter. Conf. of LT Workshop, Sydney of Australia, Dec. 15—18, 1997
- 5 Wu Shengyin. On the coordinates and the tracking traces of two ends of a feed for the spherical radio telescope. Report of Beijing Astronomical Observatory, October, 1997
- 6 孙得保,汪秉义. 自适应控制原理. 武汉:华中理工大学出版社,1991

邱金波 1972年11月生于湖南,1998年3月于西安电子科技大学获硕士学位,现为西安交通大学博士研究生. 主要研究方向为振动主动控制.

段宝岩 1955年3月生于河北省冀县,1989年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,期间并赴日本北海道大学做客坐研究员. 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:电子机械、机电一体化、面向工程广义优化设计及 CAD/CAE. 已发表论文100余篇,论著3本,获省部级以上科技进步奖3项。