

一种快速自动精密定位系统的研究

李迅波*

(电子科技大学电子机械系 成都 610054)

【摘要】 以谐振腔机械调谐机构为例,对快速自动精密定位系统进行了分析与实验研究。应用机电一体化技术对这种自动机械定位装置进行建模,并作动态数字仿真。根据仿真结果,设计了硬件闭环控制、测试系统及配套软件,使整个机电系统达到了较好的统一,满足设计要求,取得了良好效果。所得结果对类似的精密位置控制装置具有普遍意义。

关键词 机电一体化; 闭环控制; 精密定位; 单片机; 计算机数字仿真

中图分类号 TP272; TH113.1

随着现代科学技术的迅速发展,在很多领域,例如机械加工、测量及电子技术中,都需要对物体位置进行自动、高精度的定位。本文结合微波通信机调谐谐振腔的自动精密定位系统进行研究,其解决问题的原理、方案及实施系统具有一定的典型性。所需精密调谐的微波腔是一矩形谐振腔,其内置有 6 根调谐用内导体,内导体与腔外滑块刚性连接。这 6 根内导体在腔内不同位置,即与之连接滑块的不同位置,都对应了一个确定的调谐频率。因此调频问题就化为对滑块位置的调节和自动定位问题。传统通信机调谐系统是机械式的手动系统,其调谐速度慢,定位精度及与之相连系的调谐精度低而不能满足要求,因而传统老式手动系统逐渐被自动调谐系统所取代。为达到通信机宽带和精确选定工作频率,滑块的位置变化有一定范围,且定位精度要高。例如对某一个具体通信机频率变化为 610 MHz~960 MHz,频率分辨率为 0.05 MHz,频率响应小于 3 s,要求滑块位移变化范围为数十毫米,定位精度 $\leq 7 \mu\text{m}$ 。本文应用机电一体化技术,对这种自动机械定位装置进行了研究,设计了整个自动调节定位系统,对其中的重要问题进行了建模和动态数字仿真。根据仿真结果,设计了硬件闭环自动控制、测试系统及配套软件,使整个机电系统达到了较好的统一,得到了良好结果。

1 机械伺服装置的设计

该谐振腔的特点要求滑块移动平稳,响应速度要快,定位精度高。因此机械伺服装置要求精密,结构简单紧凑,可靠性高,保证系统的技术指标得到实现。

精密机械伺服装置由动力元件、传动链、导轨组成。动力元件就是驱动滑块的动力源,传动链是把动力元件的动力转换成滑块的移动机构,而导轨是用来实现给定滑块直线运动轨迹的导向装置。我们选用体积小、重量轻、易程控步进电机驱动并定位。为了提高其运行速度,采用了闭环控制。传动链设计为螺旋机构,以保证有较高的传动精度,它的运动方式为丝杆转动,螺母移动,如图 1 所示。

丝杆与螺母的相对位移量 L 与相对转角 φ 有以下关系

* 1997 年 9 月 7 日收稿,1997 年 10 月 6 日修改定稿

* 男 34 岁 硕士 讲师

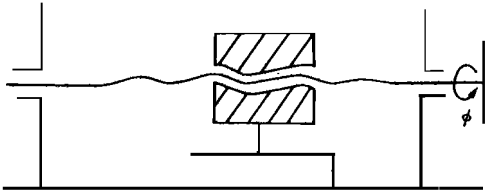


图1 螺旋机构传动图

$$L = (S/360)\phi = (nt/360)\phi \quad (1)$$

式中 t 为螺距; n 为螺纹头数; s 为导程。

螺杆材料为淬硬抛光 45 号钢, 螺母材料为青铜, 许用压强为 3 MPa, 螺杆直径为 8 mm, 螺距 $t=1$ mm, 螺纹头数 $n=1$, 考虑到定位(需自锁), 螺纹牙形角为 30° , 由式(1)可得系统的脉冲当量 $L = \delta = (nt/360)\phi$, 其中 $n=1$, $t=1$ mm, $\phi = \beta = 1.5$ 代入得

$$\delta = \frac{1 \times 1.5}{360} = 4.17 \mu\text{m}/\text{脉冲}$$

丝杆螺母副的传动精度 $4 \mu\text{m}$ 。电动机转轴通过

联轴器与驱动丝杆联接, 以传转矩。考虑到两轴直径较小, 同心度要求较高, 工作平稳, 所以选择刚性套筒联轴器, 用销钉将套筒与两轴联接起来。

为了保证在步进电机驱动下滑块移动灵便, 移动和定位精度高、导向好, 对温度变化不敏感, 我们设计制作了滚动导轨。导轨材料选用淬火钢, 其摩擦系数为 0.003, 导轨定位精度为 $0.2 \mu\text{m}$, 在微量位移时不产生爬行现象。

螺旋副的传动效率

$$\eta = \tan \lambda / \tan(\lambda + \rho) \quad (2)$$

式中 螺纹角 $\lambda = 2.28^\circ$; 螺旋副中的摩擦角 $\rho = \arctan(f/\cos\beta) = 11.7^\circ$, 传动副满足自锁条件。代入式(2)得

$$\eta = 16\%$$

滑块加到丝杆上的负载转矩力为

$$T_l = \frac{36 \delta^2 W}{2\pi\beta\eta} \times 10^{-2} \quad (3)$$

式中 滑块重 $W=1$ kg; 滚动摩擦系统 $\mu=0.003$, 代入式(3)得

$$T_l = 6.8 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}$$

轴的强度校核

$$\tau = T_l / W_t < [\tau] \quad (4)$$

式中 W_t 为抗扭截面模量, $W_t = (\pi/16)d^3 = 102.4 \text{ mm}^3$; $[\tau]$ 为许用剪切力, $[\tau] = 35 \text{ MPa}$, $\tau = 6.6 \times 10^{-5} \text{ MPa}$, 可见, $\tau \ll [\tau]$ 。

轴的扭转刚度的校核为

$$\Phi = T_l / 0.1385d^4 \ll [\Phi] \quad (5)$$

$$\Phi = 1.2 \times 10^{-5} \text{ deg/m}$$

精密传动的许用扭转角 $[\Phi] = 0.25 \text{ deg/m}$, 显然 $\Phi \ll [\Phi]$, 所以传动轴满足强度条件。

由此, 以步进电机作动力源, 刚性套筒联轴器、精密丝杆螺母副、滚动导轨等为精密机械构成了系统的机械位移、定位伺服装置。

2 系统建模并数字仿真

为了了解该伺服装置的动态特性, 是否能满足要求, 以及优化控制, 对系统进行建模并进行数字仿真。由文献[1]可给出电机驱动回路电路方程为

$$U = RI + l \frac{dI}{dt} + \omega \frac{\partial L}{\partial \theta} I \quad (6)$$

式中 U 为相电压； I 为相电流； R 为相电阻； l 为电机相绕组动态电感； L 为平均电感。

由力学定理，系统的动力学方程为

$$T_e = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_l \quad (7)$$

式中 J 为电动机转子及负载惯量； D 为电动机粘性度摩擦系数； T_l 为负载摩擦转矩； θ 为转子角位移； T_e 为电动机电磁转矩。

综合式(6)、(7)及 $\omega = d\theta/dt$ 得出系统的微分方程表达式为

$$U = RI + l \frac{dI}{dt} + \omega \frac{\partial L}{\partial \theta} I \quad (8)$$

$$T_e = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_l \quad (9)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (10)$$

为了了解系统内部参数的变化情况，取相电流 $I(I_a, I_b, I_c)$ ，角位移 θ 及角速度 $\omega = d\theta/dt$ 为状态变量，用状态变量描述系统。

由式(8~10)写出状态方程

$$\frac{dI}{dt} = (U - RI - \omega \frac{\partial L}{\partial \theta} I) / l \quad (11)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (12)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -[D\omega - (T_e - T_l)] / J \quad (13)$$

式(11)~(13)用矩阵表示

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \\ \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & 0 & 0 \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & 0 & 0 \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \text{面模} & 0 & 0 & \omega & -\frac{D}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{l}_{aa} & \dot{l}_{ab} & \dot{l}_{ac} & 0 & 0 \\ \dot{l}_{ba} & \dot{l}_{bb} & \dot{l}_{bc} & 0 & 0 \\ \dot{l}_{ca} & \dot{l}_{cb} & \dot{l}_{cc} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \\ 0 \\ T_e - T_l \end{bmatrix}$$

从状态方程组知道控制向量 $[U_a, U_b, U_c, 0, T_e - T_l]$ 及状态向量 $[I_a, I_b, I_c, \theta, \omega]$ 的初始状态，可以利用四阶龙格-库塔法求解状态方程和 I_a, I_b, I_c, θ 及 ω 随时间的变化关系，从而可以得出电机的单步运行、起动过程及加速过程，算出系统的单步响应时间、起动频率、加速时间及振荡等动态指标，为系统的控制提供指导。

用 C 语言编制状态方程的求解程序，即进行数字仿真。数字仿真结果如下：

单步响应仿真 系指电机在单相励磁定位状态下进行一次相切换，其转子将走过一个步距角，并在新的平衡位置附近作衰减振荡运动。通过数字仿真可以找出单步响应时间、振荡周期、超调量等。图 2 为电机带负载惯量时单步响应曲线。从仿真结果看，负载惯量越大，其单步响应时间、振荡周期变大，振幅也随之增大。在设计系统时，应尽量减小负载惯量。

图 3 表示带负载转矩后，模拟出单步响应曲线。从仿真结果看，负载惯量一定时，振荡周期随

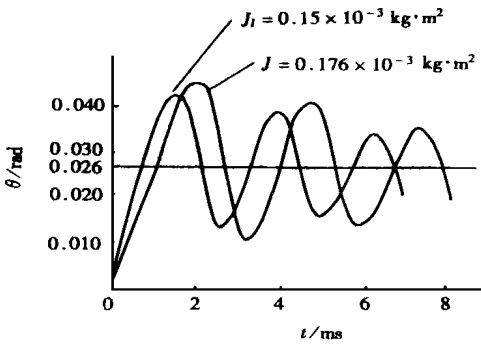


图 2 电机带负载惯量时单步响应曲线

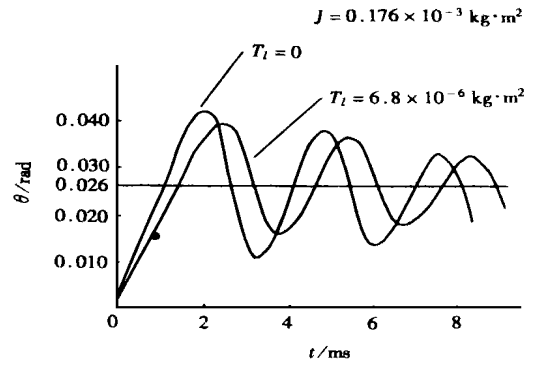


图 3 带负载转矩的单步响应曲线

摩擦负载转矩增大而增大,但振荡减弱。由单步响应曲线可找出三相步进电机的带负载固有频率 $f_n = 380$ Hz,要防止低频振荡,驱动脉冲频应避免等于 f_n 及其整数倍。

步进电机的起动过程仿真 寻找极限起动频率(即电机不失步起动的最高频率),用计算机仿真的极限起动频率为 1 200 Hz,考虑实际因素,其实际起动频率为 1 000 Hz。

仿真加速过程 步进电机由起始频率 f_0 直线加速到最高运行频率 f_c ,按直线规律(斜率为 $\tan 83^\circ$),从 $f_0 = 1000$ Hz 加速到 $f_c = 6427$ Hz,其加速脉冲如表 1 所示。

表 1 频率与时间间隔的对应关系

频率/Hz	1 000	1 270	1 425	1 687	1 992	2 225	2 488	2 632	2 950	3 126
时间间隔/ms	1	0.8	0.7	0.6	0.5	0.45	0.4	0.38	0.34	0.32
频率/Hz	3 315	3 738	3 976	4 235	4 518	4 887	5 167	5 543	5 960	6 427
时间间隔/ms	0.3	0.27	0.25	0.23	0.22	0.20	0.19	0.18	0.17	0.15

3 系统结构

根据计算机的仿真结果,得出系统的运动特性为整个系统设计及运行软件的编制打下基础。由于系统机械结构的刚性、环境温度会造成一定的传动误差,且系统响应要尽量快,所以采用步进电机的开环系统来克服这些误差是有一定的困难,这里经过分析比较采用反馈补偿的闭环控制方法。

滑块的位置检测传感器选用高精度的光栅位置传感器,其规格为 50 线/mm,分辨率为 $20 \mu\text{m}$ /脉冲,由式(1)可知,机械伺服装置的分辨率为 $4.17 \mu\text{m}$ /脉冲。显然,光栅传感器须加四细分电路,使分辨率达到 $5 \mu\text{m}$ /脉冲,才能与机械伺服装置匹配。

整个系统结构框图如图 4 所示,它由 MSC-51 单片机、步进电机、谐振腔、光栅位置传感器、整形及细分电路、位置显示器、键盘等组成。

为了防止功率放大驱动对计算机的影响,在环形分配器与功率驱动电路间加了光电耦合器件。位置显示器具有相对位置显示(预置工作位置)和绝对位置显示(实际工作位置),通过它能方便直观地了解系统的工作状态。

系统工作过程如下:通过键盘预置工作位置,其值通过单片机显示在相对位置显示器上,同时使其处于减计数状态。单片机根据步进电动机的运行方向,使绝对位置显示器处于加计数或减计数状态。工作时,单片机按某种频率不断发出脉冲,送给环形分配器,驱动步进电机运行。步进电

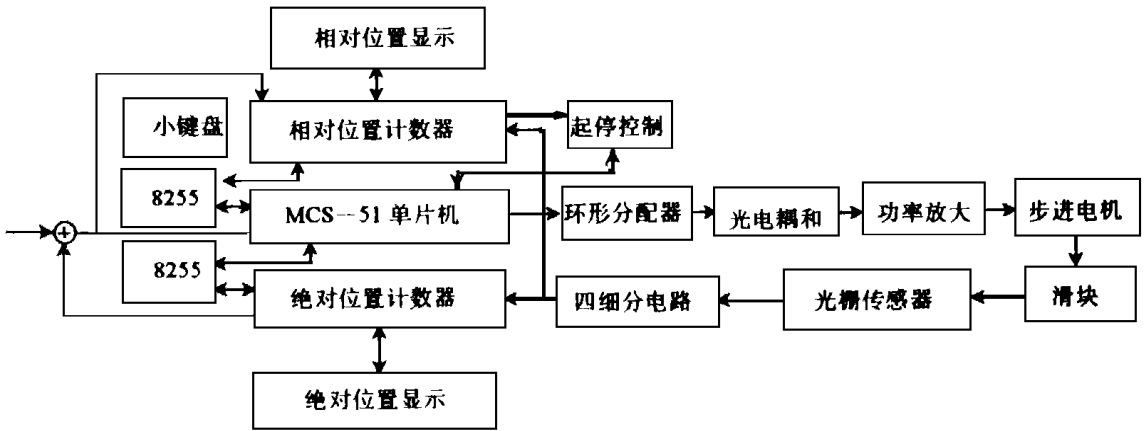


图4 控制系统结构框图

机通过机械伺服机构驱动滑块作平稳移动，其位移由光栅传感器进行检测，光栅传感器不断输出脉冲传给绝对位置计数器和相对位置计数器，绝对计数器不断进行加计数或减计数，显示滑块实际工作位置，而相对位置计数器不断地进行减计数，当进行到指定的工作位置时，相对计数器显示为0，同时触发启动控制，锁住单片机，单片机从绝对位置计数器读取显示器的实际工作位置，判断是否达到预置的工作位置，再决定是否发补偿脉冲或结束运行。

4 实验结果和结论

当以1 000 Hz的脉冲频率运行时，滑块只需往某方向运行一次就可到达指定位置。一般当相对运行步数超过500个脉冲数时(对应滑块位移2.1 mm)，相对位置显示为417；当运行脉冲数小于500个脉冲数时，相对位置显示器要多1~2个脉冲数，经计算机作判断补偿后，实际相对位置显示器为0。

当以快速升降频运行时，滑块一般也只需往某方向运行一次就能到达指定位置，有时，从相对位置计数器显示结果来看，多出一、二个脉冲数，经计算机补偿后，滑块精确定位到指定位置。

经过仿真与实际运行表明，我们所设计的精密机械位置伺服机构结构合理，其运行机构转动惯量，摩擦转矩小，精密机械位置伺服机构能对滑块位移进行精密伺服，保证机构运行平稳，无爬行现象，定位精度高，定位精度 $\leq 5 \mu\text{m}$ ，系统最长响应时间 $\leq 2.5 \text{ s}$ ，优于设计指标。

从实验结果看，整个设计思想合理，方法正确，使机、电在该系统中较好地结合在一起，使系统性能很好地满足设计要求。该系统的设计思想方法也同样适用于同类精密驱动及定位系统中。

感谢陈光禚教授、张家裕教授在完成本工作中给予的关心、帮助和指导。

参 考 文 献

- 1 Kuo Benjamin C. Theory and application of STP MOTORS. New York: WEST Publishing Co, 1989
- 2 Kent A J. Analysis of power monitoring on Ac induction drive systems. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 239: 112~116
- 3 克洛斯里克 C M. 动态系统模型的建立和分析. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 4 何立民. MCS-51系列单片机应用系统设计配置与接口技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990
- 5 叶松林. 精密机械仪器零件. 杭州: 杭江大学出版社, 1989

- 6 上海微电机研究所主编, 微特电机设计程序, 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- 7 李忠杰, 步进电机应用技术, 北京: 机械工业出版社, 1988
- 8 叶欣编译, Turbo C 使用大全, 北京科海培训中心, 1989

Study of A System with Fast, Automatic, Precision Location

Li Xunbo

(Dep. of Electromechanical Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A mechanical system with fast automatic precision location function is studied and analyzed. A mathematical model of the system is given in this paper. Using the model, the dynamic analysis about the system is made and the dynamics of the system is gained. According to the results, the control closed system is finished. The experiment of the system is proved to be good and it is shown that the system can satisfy the requirement, which is a good example for combining machinery with electronics. The method of the device has significance for the system of precision location.

Key words electromechanical technology; computer closed control; precision location; siglechip computer; computer digital analogue

编辑 徐培红

°科研成果与介绍°

电磁场课程机辅助教学(CAI)软件

主研人员: 冯林 杨显清 王园

电磁场课程计算机辅助教学(CAI)软件成功地创建了一门而向 21 世纪高效率, 高质量的课程。完成的 CAI 软件包括了电磁场中的一些重要原理和定理的示范、动态图形模拟及随机习题库, 具有图文并茂、操作方便、色彩变化多样, 以形象模拟和演示为主的特点。克服了单纯“书本搬家”; 具有比较完整的系统性; 界面和图形制作精美; 习题库部分具有很好通用性。

该软件达到国内同类软件的先进水平, 在动态图形模拟方面属国内领先水平, 成果用于教学实践, 有利于改善教学手段, 提高教学质量, 同时产生深远的社会效益。

低 RCS 反射面天线

主研人员: 阮颖铮 冯林 韩晓英 邓书辉 周海京 兰宏

该项成果通过理论分析与实验研究, 提出并论证了通过抑制模式项散射降低反射面天线 RCS 的思想和方案。利用这种技术思想制作的带阻型滤波副反射面天线, 达到了在雷达工作频段外天线的 RCS 在 10 dB 以上, 基本保持了原天线的辐射性能, 且不需要改变原天线的整体结构, 其研究成果属国内领先水平, 具有较好的社会效益和经济效益。

°科 卞°