

液压随动系统的微型计算机控制

瞿寿德

(北京钢铁学院)

赵克俭

(机械工业部自动化研究所)

摘 要

本文针对一典型的电液传动装置提出了一种控制器。该控制器实际上是带有少量外围设备的单板机。文中叙述了控制系统模型、理论分析、综合的方法以及仿真研究和在线控制实验的结果。

一、引 言

液压随动系统由于反应速度快、控制精度高以及抗负载的刚性大,在机械制造、轧钢,特别是在飞行器和船舶的操纵系统等领域里,有着广泛的应用。但其设计至今仍沿用古典的频域法。因此,如何应用现代控制理论的已有成果和飞速发展中的微型计算机技术,充分发挥液压随动系统的优势,是一个有吸引力的课题。

应用数字计算机对液压随动系统实现最优控制,其主要困难在于受控对象具有非线性动态特性,不仅对机理模型进行参数估计有一定的困难,而且由于液压随动系统的反应速度相当快,即使有了精确的非线性数学模型,也难以在很短的时间内计算出最优控制律,以实现实时控制。P. J. Armstrong 曾根据 D. McCloy 所建立的液压随动系统理论模型^[1]提出几种次优控制方案^[2],这些方案都是以精确掌握对象模型,并能准确测量油缸活塞的速度信号为前提的。倘若上述条件不满足,不能准确切换,则在稳态工作点附近将出现极限环。因此,直到现在液压随动系统主要还是采用基于模拟电子技术的传统控制方法。

本文在研究快速液压随动系统的微型计算机控制时,从工程的角度出发,对设计中的实际问题作了比较合理的处理。本文以机械工业部自动化研究所研制,并提供工厂使用的电液伺服阀-油缸传动装置为具体对象,用 M68000 型单板机实现了在线双模式控制。

二、控制系统设计

针对用微型计算机实现液压随动系统双模式控制的实际需要,笔者对电液伺服阀大开口下的 Bang-bang 控制与小开口下的线性控制分别建立两种不同的数学模型。为此,首先使系统的输入信号从零突变到最大允许值,通过测得的飞升曲线来建立 Bang-bang

控制用的近似数学模型。为使最优开关曲线的计算不过于复杂，系统模型的阶数不能太高，选取如下的开环传递函数：

$$G_1(s) = K \frac{T_1 s - 1}{s(T_2 s + 1)} e^{-\tau s},$$

然后用非线性最小二乘法^[3]根据实测数据进行参数估计，得到 $K = 17.25 \text{ 秒}^{-1}$ ， $T_1 = 4.537 \times 10^{-3} \text{ 秒}$ ， $T_2 = 17.19 \times 10^{-3} \text{ 秒}$ ， $\tau = 17.5 \times 10^{-3} \text{ 秒}$ 。对于这样一个简化的数学模型，换接时刻不可能是严格最优的，在 Bang-bang 控制结束以后仍有少量残余偏差，这可用线性控制方法予以消除。

微型计算机 D/A 转换器最大输出电压 $u_{\max} = \pm 5 \text{ 伏}$ ，系统输出为活塞位移 y ，通过位移传感器反馈到输入端；给定信号 r 和反馈信号 y 之差就是输送到 A/D 转换器的误差信号 e 。

在推导最优开关曲线之初，暂且假定 $\tau = 0$ ，即先就无时滞情况进行讨论。由于受控对象的开环传递函数有零点，选取状态变量

$$\begin{aligned} x_1 &= e, \\ x_2 &= \dot{e} - \frac{KT_1}{T_2} u. \end{aligned}$$

在常值给定信号 $r = \text{const}$ 时，状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \frac{KT_1}{T_2} u, \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{T_2} x_2 + \frac{K(T_2 - T_1)}{T_2^2} u. \end{aligned}$$

在这种情况下，Bang-bang 控制以线段 L 为目标集，

$$L = \left\{ (x_1, x_2) : x_1 = 0, |x_2| \leq \left| 5 \frac{KT_1}{T_2} \right| \right\},$$

且在终止时刻 t^* 有 $u(t^*) = -\frac{T_2}{KT_1} x_2(t^*)^{[4]}$ ，此后转入线性控制。

由于目标集的存在，Bang-bang 控制的最优开关曲线对于 $u = 5 \text{ 伏}$ 和 $u = -5 \text{ 伏}$ 应分别为 v_+ 与 v_- ，如图 1 所示。但因线段 L 的长度很有限，用一条通过坐标原点的相迹作

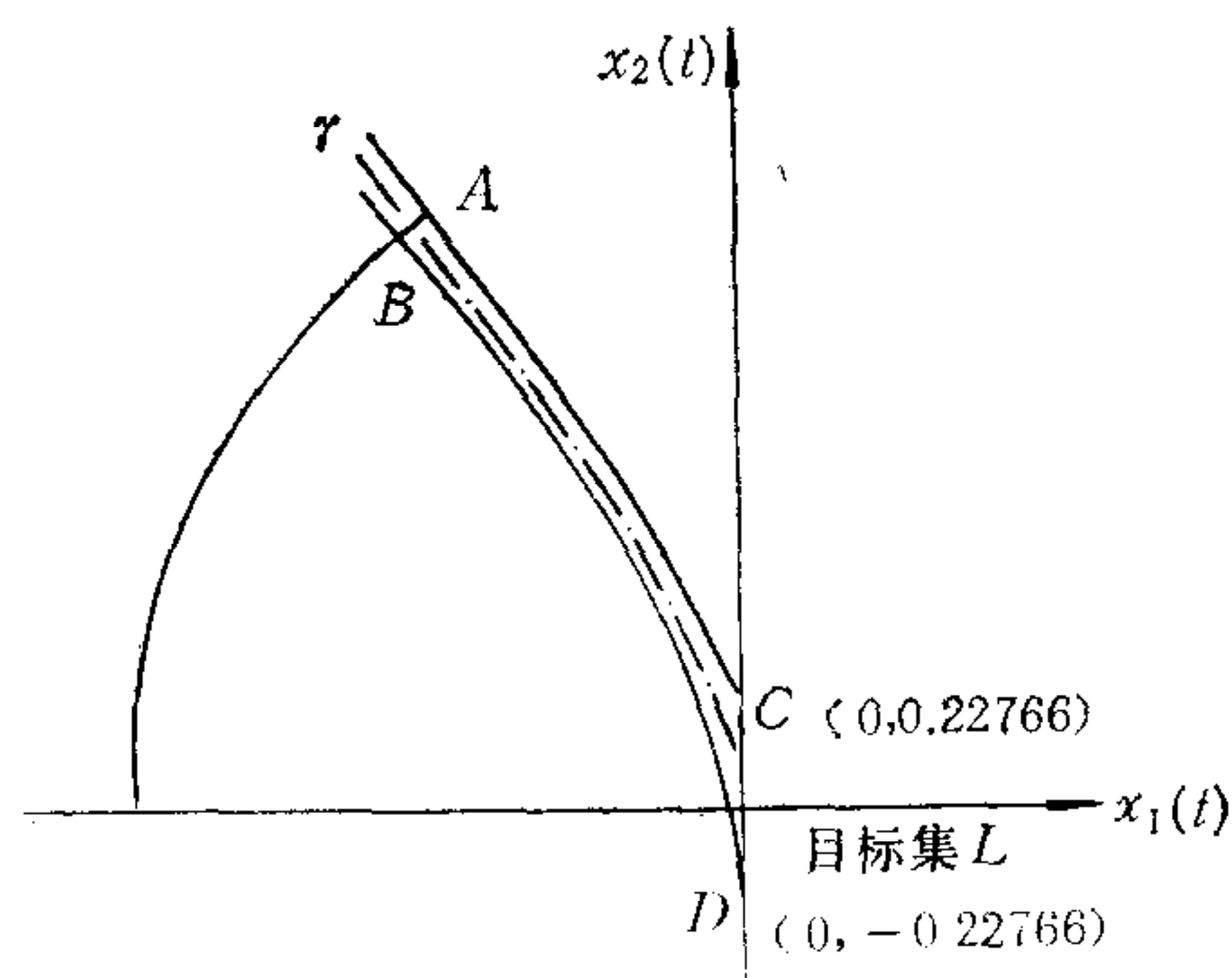


图 1

为次优开关曲线 v :

$$v = \left\{ (x_1, x_2) : \frac{x_1}{1.719 \times 10^{-2}} + x_2 = 86.25 \ln [1 + 1.156 \times 10^{-2} |x_2|] \text{sign} x_2 \right\}$$

并不使性能明显降低。

现在进而考察真实系统中存在着时滞 $\tau = 17.5 \times 10^{-3}$ 秒的情形。具有时滞的系统和以上的分析不同之处在于：其相点并不是立刻而是须经过一段时间 τ 才反应出控制作用的变化。为了保证系统仍按最优方式工作，换接应提前时间 τ 进行。因此，设计的控制器应根据系统现时刻的状态 $x(t)$ ，以及在此刻之前一段时间 τ 内控制作用的变化，由系统模型预测出 $t + \tau$ 时刻的状态 $x(t + \tau)$ ，再把预测值用于无时滞的场合，即可得到有时滞系统的最优控制律。系统状态的预测，可按图 2 所示的计算框图进行。

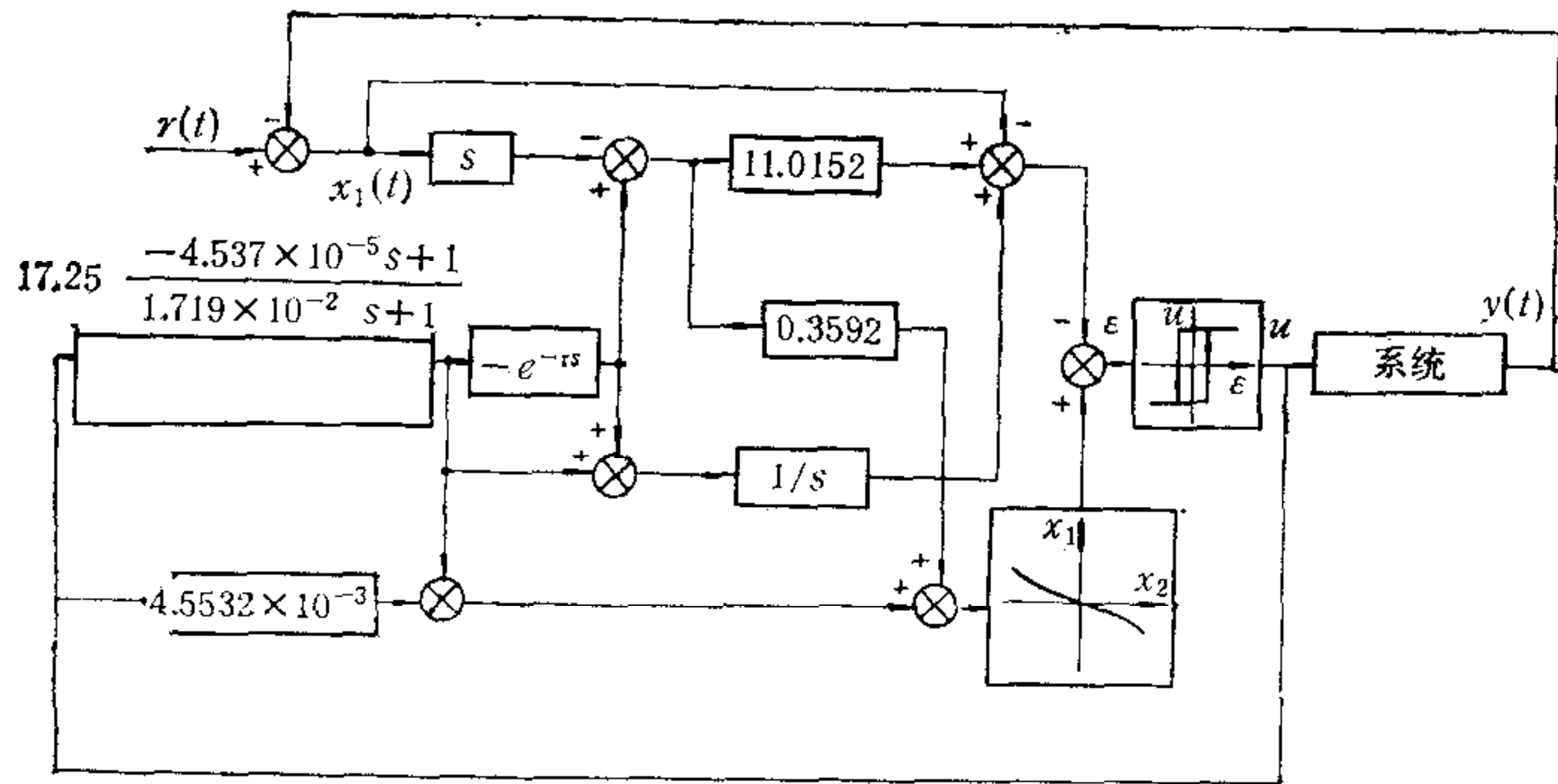


图 2

下面简要介绍一下系统的线性控制方式。为了建立液压传动装置在电液伺服阀小开口时的线性参数模型，采用通常的频率响应法进行辨识^[5]，得到传递函数为

$$G_2(s) = \frac{3.208 \times 10^{-4} s^2 - 5.484 \times 10^{-2} s + 17.42}{s(6.972 \times 10^{-5} s^2 + 1.2637 \times 10^{-2} s + 1)(4.442 \times 10^{-3} s + 1)}$$

由于阶数较高，不易用传统的根轨迹法或频率法进行系统综合。但考虑到系统的大偏差

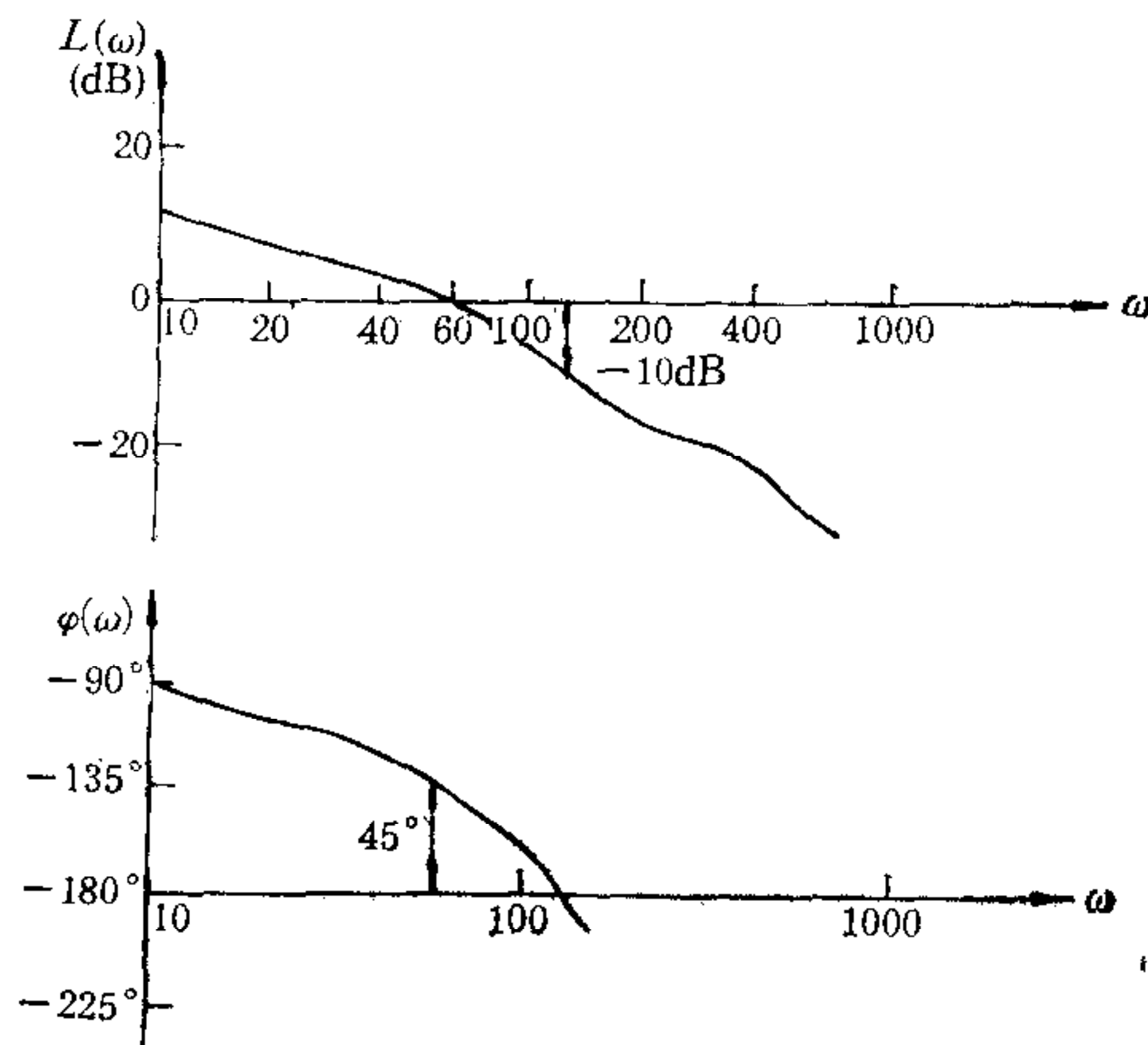


图 3

已由 Bang-bang 控制方式迅速减小，线性控制方式仅须保证在小偏差下稳定工作，故可放宽对其响应速度的要求。通过数字计算机进行辅助设计，取采样周期为二毫秒，可选用如下的输出反馈调节器：

$$D(z) = \frac{10.023z^2 - 8.436z + 1.55}{z^2 - 0.3206z + 0.7666}$$

线性控制系统开环对数幅频曲线和相频曲线示于图 3，其相角裕度约为 45° ，幅值裕度约为 -10dB ，能够满足稳定性要求。

为了把本文提出的这种微型机控制系统和常用的模拟量 PID 调节器相对比，分别进行了仿真研究。当系统的初始偏差为 21 毫米时，后一种方案的过渡过程时间为 0.4 秒（偏差减到初始值的 5%），超调量为 15%；而本文的方案在 0.192 秒后，偏差已减为初始值的 0.024%，超调量仅为 0.02%。由此可见，新方案在性能指标上有显著提高。

三、技术实现与实验结果

鉴于在微型机控制系统中，微型机要完成的计算工作量相当大，而液压传动装置的动作又很快，因此选用以 MC68000CPU 为核心的 M68K128MB 型单板机，并配备必要的外围接口设备来构成控制器。然而，即使采用上述单板机，也难以对状态预测进行实时运算，又不能采用查表的方法，因此，笔者对计算框图中一些关键性运算块作了适当处理。次优开关曲线则是离线预先算好，经量化后存放在内存中，用查表方法决定换接时刻。Bang-bang 控制的采样周期定为 1.1×10^{-3} 秒，以使滞后时间 τ 能被它整除。由 Bang-bang 控制进入线性控制，以 $|e| < 0.7$ 毫米为界，而由线性控制转为 Bang-bang 控制则以 $|e| > 2$ 毫米为界。把 A/D 和 D/A 转换时间也考虑在内，因微型机运算而占用系

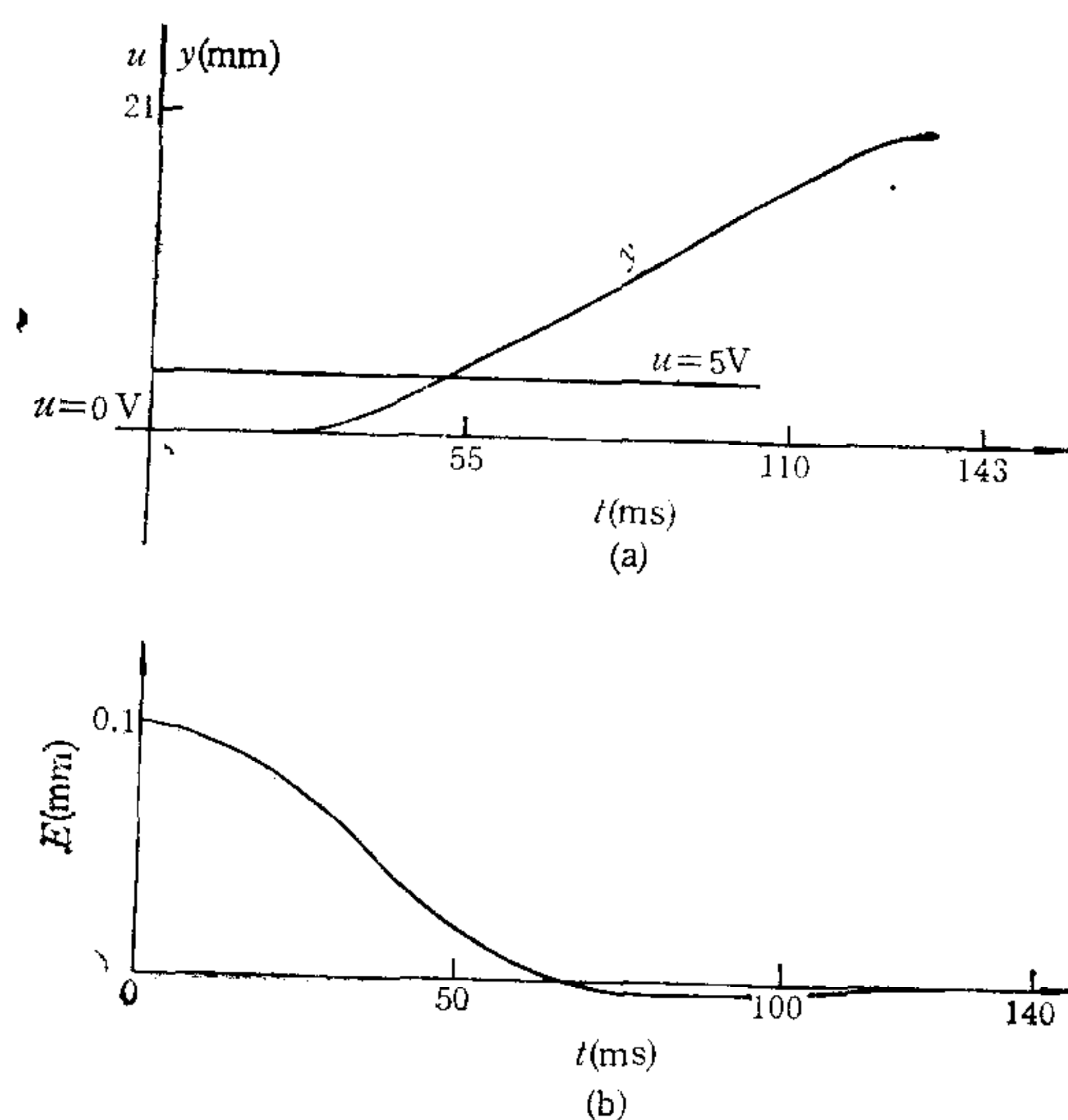


图 4

(a) Bang-bang 控制时动态响应曲线 (b) 线性控制时动态响应曲线

统的时间约为 0.15 毫秒。线性控制器的微型机实现比较容易,因运算占用系统的时间约为 0.06 毫秒。用 M68K128MB 型单板机作为控制器,在实验室进行实时控制实验,示波器录下的过渡过程(图 4)与数字仿真的结果基本一致。实时控制实验结果证明:用微型机控制液压随动系统在技术上是可行的。

参 考 文 献

- [1] McCloy D., Some Phenomena Associated with Bang-bang Hydraulic Servos, 1970 Joint Automatic Control Conference of the American Automatic Control Council, 148—153.
- [2] Armstrong P. J. and McCloy D., Suboptimal Solutions for Time-optimal Control of a Hydraulic Servomechanism, *ibid.*, 154—159.
- [3] 王德人,非线性方程组解法与最优化方法,人民教育出版社,1979.
- [4] Athans M. and Falb P. L., Optimal Control, McGraw-Hill, 1966.
- [5] 周蔚吾,线性系统辨识程序块及其在电液伺服控制系统中的应用,第三届全国控制理论及其应用学术交流会论文.

MICROCOMPUTER CONTROL FOR HYDRAULIC SERVOSYSTEMS

QU SHOUBE

(Beijing University of Iron and Steel Technology)

ZHAO KEJIAN

(Institute of Automation, The Ministry of Mechanical Engineering)

ABSTRACT

In this paper, a double-mode controller is presented for a typical hydraulic servosystem. The controller is essentially a single-board microcomputer with a few peripheral devices. The system modeling, the theoretical analysis and synthesis, the research of computer simulation and the on-line test are described.