

通用型多变量工业控制机的研制

龙庆华

(华南师范大学微电子学研究所·广州, 510631)

白方周 庞国仲 曾季康

(中国科学技术大学十系·合肥, 230026)

摘要: 本文阐述了一种通用型多变量工业控制机的设计, 硬件配置, 系统结构及软件. 并简要介绍了多变量控制系统的核心算法. 动态预补偿器, 动态补偿器以及多变量 Smith 预估器的设计. 现场实际运行结果表明, 此工业控制机设计是合理的, 使用灵活方便. 它将为多变量控制技术的应用推广起到促进作用.

关键词: 多变量; 控制系统; 工业控制机设计

1 概述

在工业过程控制中, 大多数受控对象都是多变量的, 且参数间存在着不同程度的耦合, 要获得良好的控制效果需要采用较先进的控制策略. 目前现代控制理论中, 多变量频域技术得到了广泛的应用. 因为它保留和继承了广大工程技术人员所熟知的古典频域法所具有的优点. 在工程设计中易于接受和实现. 从多变量频域法的提出至今已在许多工业过程控制中取得了很好的效果. 在国内, 在化工系统, 工业锅炉系统的控制中, 也收到了明显的经济效益. 为了进一步推广多变量控制技术, 必须有可靠、灵活、适应性强的通用型工业控制机作为硬件支持, 为此我们研制了 MIC-1 通用型工业控制机(或称多变量解耦控制器). 它适用于工业锅炉、加热炉、热处理工艺设备、精馏塔等控制. 有了它的支持, 加上我们已具有的多变量系统设计程序包(MFCAD)^[1]这一有力工具, 可以大大缩短多变量控制系统设计及开发周期.

我们研制的 MIC-1 型工业控制机是以三输入三输出系统为标准设计的. 它具有很大的灵活性. 它适用于 3×3 , 2×2 , 甚至单变量系统, 并有较大的扩展余地. 除实现多变量解耦控制外, 还可增加数个单变量系统通道. 甚至可实现二个以上多变量系统的并行控制. 为了便于开发应用, 此控制机还具有仿真功能, 并可氏孛 撇问 脑谳幽需啊以及与上位机通讯.

2 控制机系统设计

2.1 系统结构

本控制机是以 3×3 输入输出, 且具有大时延补偿的多变量控制系统为标准型而设计的, 其结构如图 1.

其中 $G(s)$ 为控制对象传递函数矩阵

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s)e^{-\tau_{11}^e} & g_{12}(s)e^{-\tau_{12}^e} & g_{13}(s)e^{-\tau_{13}^e} \\ g_{21}(s)e^{-\tau_{21}^e} & g_{22}(s)e^{-\tau_{22}^e} & g_{23}(s)e^{-\tau_{23}^e} \\ g_{31}(s)e^{-\tau_{31}^e} & g_{32}(s)e^{-\tau_{32}^e} & g_{33}(s)e^{-\tau_{33}^e} \end{bmatrix}$$

g_{ij} 为第 j 输入与第 i 输出端的对象传递函数,

τ_{ij} 为第 j 输入端至第 i 输出端的延迟时间常数, $K_c(s) = \text{diag}\{K_{c1}(s), K_{c2}(s), K_{c3}(s)\}$ 为动态补偿器的传递函数矩阵,

$K_p(s)$ 为动态解耦传递函数矩阵, $P(s) = G_0 - G(s)$ 为 Smith 预估器传递函数矩阵, 且 $G_0(s) = G(s)|_{\tau_{ij}=0}$,

$F(s) = \text{diag}\{f_1, f_2, f_3\}$ 为反馈增益矩阵, 其输出向量 $Y(s) = H(s) \cdot R(s)$.

闭环传递函数 $H(s) = [I_m + G_0(s)K_p(s)K_c(s)F(s)]^{-1}G(s)K_p(s)K_c(s)$.

从结构上讲, 它是一个反馈型多变量控制系统, 同时加入了动态解耦和 Smith 预估技术. 这可使系统满足一般工业过程控制要求.

2.2 控制机的技术性能

- 1) 可适用于 3 输入 3 输出或以下变量数的多变量控制系统.
- 2) 被控对象可具有时延, 无时延或大时延.
- 3) 可实现多变量系统的动态解耦.
- 4) 具有多速率控制手段.
- 5) 控制算法运行速度小于 500ms.
- 6) 控制过程中可根据需要定时打印各种信息.
- 7) 可实现与上位机通讯.
- 8) 利用小键盘及显示器 (8 个 LED 及 24 键) 可实现 PID 参数在线修改及改变控制策略.
- 9) 具有数字仿真及半实物仿真功能.

2.3 硬件结构

控制机采用 16 位 68000 为主 CPU^[2,6], 其运算速度快, 寻址能力强, 指令系统功能强. 系统配置了 64K ROM, 128K RAM, 且具有 7 级向量中断. 主机配有丰富的外部接口 (两个并行口用于小键盘控制及参数报警显示, 两个 RS-232 串行口用于连接调试终端及与上位机通讯. 机内还配有专用打印机及

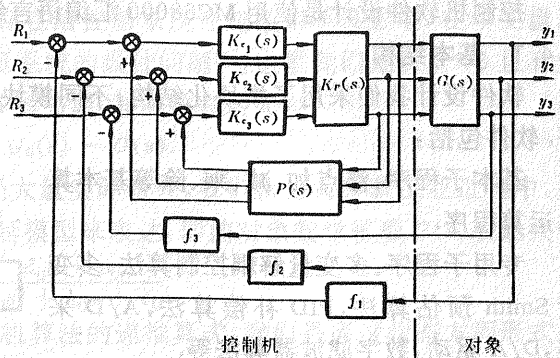


图 1 多变量控制系统结构

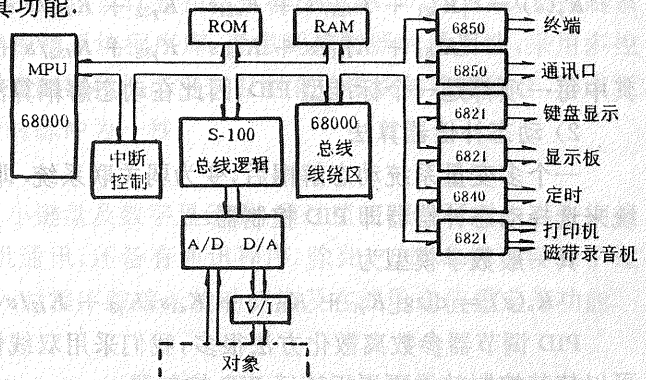


图 2 控制机硬件结构

磁带机接口)。机器具有便于扩展的 S-100 总线。其过程通道包括单端 32 路(或差分 16 路)可控增益 12 位 A/D 及 6 路 12 位 D/A。通道中加入了 V/I 转换及光电隔离,用以提高可靠性及抗干扰能力。其硬件框图如图 2。

2.4 软件

控制机软件设计是使用 MC68000 汇编语言编写的^[3]。

2.4.1 基本结构

软件设计我们采用了模块化结构,不同模块的组合就生成各种系统的管理及应用程序。软件包括:

基本子程序:浮点加、减、乘、除等基本算术运算程序。

专用子程序:多变量解耦控制算法,多变量 Smith 预估算法, PID 补偿算法, A/D 采集, D/A 驱动, 数字滤波器算法等。

中断服务程序:显示、打印、计时、通讯程序等。

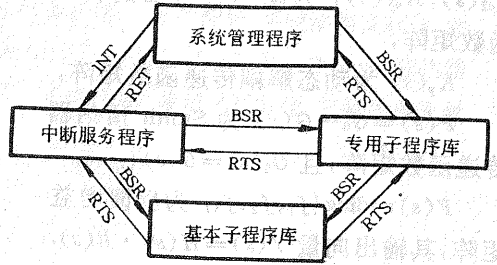


图3 软件结构

系统管理程序:控制台监视、时钟管理。各软件之间基本联系如图 3。

2.4.2 控制器算法

由控制系统结构可知,多变量控制系统的控制器包括解耦 $K_p(s)$, 补偿器 $K_c(s)$ 以及 Smith 预估器 $P(s)$ 。它们的设计采用了 ROSENBROCK 的逆 NYQUIST 阵列法^[4]。这种设计实际上是经典作图法(NYQUIST 轨迹法)推广应用的结果。其前提是首先消除多变量系统中的强耦合,通过解耦,使多输入多输出系统变为多个单变量系统(彼此无耦合或弱耦合)来分析和设计。下面介绍算法程序。

1) 动态解耦算法

设计一个“预补偿器”(解耦器),使系统开环传递函数矩阵达到“对角优势阵”。工程中常采用常数矩阵描述。但有些情况下用常数解耦器无法使开环传递函数达到对角优势,只能采用动态解耦来达到,因此本控制机选择了一般形式的动态解耦器,其数学模型如下:

$$K_p(s) = \begin{bmatrix} K_{p11} + K_{i11}/s + K_{d11}s & K_{p12} + K_{i12}/s + K_{d12}s & K_{p13} + K_{i13}/s + K_{d13}s \\ K_{p21} + K_{i21}/s + K_{d21}s & K_{p22} + K_{i22}/s + K_{d22}s & K_{p23} + K_{i23}/s + K_{d23}s \\ K_{p31} + K_{i31}/s + K_{d31}s & K_{p32} + K_{i32}/s + K_{d32}s & K_{p33} + K_{i33}/s + K_{d33}s \end{bmatrix}$$

其中每一项都是一个标准型 PID,因此在动态解耦算法中可直接调用 PID 算法模块。

2) 动态补偿器算法

一个多变量系统动态解耦后,变为弱关联系统。即可利用古典频域法按一组单变量系统来选择动态补偿器即 PID 控制器。

其一般数学模型为

$$K_c(s) = \text{diag}[K_{p1} + K_{i1}/s + K_{d1}s, K_{p2} + K_{i2}/s + K_{d2}s, K_{p3} + K_{i3}/s + K_{d3}s]$$

PID 调节器参数离散化方法很多,我们采用双线性变换法在计算机上实现。这种算法可以使其控制效果更逼近连续 PID 控制器。

由于某些场合(如广义控制对象中包括数字可编程调节器)其控制量是增量形式,因

此本机中我们也有增量型 PID 算法子程序,在 PID 算法中我们还加入了抗积分饱和算法,以避免某些大扰动情况下出现的积分饱和现象。

3) 多变量 Smith 预估器算法

在多数工业过程控制中,控制对象常遇到纯时延特性,有时时延很长(如传热过程或广义对象中质量仪表的纯时延),时延的存在给控制系统性能带来不良影响,在单变量系统的设计中常采用 Smith 预估器解决时延系统的设计问题^[5],这里我们是以 3×3 且有大时延对象为标准模式设计了多变量 Smith 预估器,其函数表达式为

$$P(s) = G_0(s) - G(s).$$

这里涉及到一个对象模型的确定问题,经大量实际研究,我们认为大多数工业过程中,多变量系统的每一项均可用一个二阶加时延模型来表达,即前对象数学模型 $G(s)$ 表达式中的 g_{ij} 可用下式表示:

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}s + e_{ij}}{a_{ij}s^2 + b_{ij}s + c_{ij}}.$$

从 Smith 预估器模型,可以得到计算机算法的递推算式,我们是通过状态方程形式描述多变量 Smith 预估器,借助计算机将其离散化而实现的。

4) 数字滤波器算法

数字滤波器是为了滤去各输入通道的噪声而设计的,我们选用了一般形式的传递函数,其输出差分方程为 $Y(K) = \sum_{i=0}^{10} a_i E(k-i) - \sum_{j=1}^{11} b_j Y(k-j)$ 。

用户可根据不同要求和给定指标,方便地修改来达到相应目的。

2.4.3 多速率采样

一般计算机控制系统中,根据经验,一般选择采样角频率 $\omega_s = 10\omega_c$, ω_c 为系统开环频率特性截止频率,而采样周期 $T = \frac{2\pi}{\omega_s}$ 。

对于一个多变量系统采样周期的选定变得复杂化了,由于各通道频率特性不尽相同,因此就需要一组采样周期,一个 3×3 系统就有一组三个采样周期 $\{T_{c_1}, T_{c_2}, T_{c_3}\}$ 。

应使所采用的采样周期 T_c 是最小采样周期 T_{\min} 的整数倍,在我们机器中,设计了多速率采样,每通道的控制过程适应于本通道特性,使对过程的控制有更大灵活性。

2.4.4 多变量解耦控制器算法

软件设计中除上述多个程序模块外,还设计有初始化程序块, A/D, D/A, 以及控制系统管理模块等共 38 个基本模块构成控制系统程序库,考虑到控制器的通用性,采用多控制字及状态字,根据不同过程对象用控制字和状态字来控制有关模块的连接组合,形成不同控制策略的控制器,控制系统的定时脉冲为一秒。

2.4.5 其他控制软件

为了便于现场调试,本机设置了小键盘及数字显示器,通过监控程序可对内存查询修改及 PID 参数整定,为实现与上位机通讯,还备有通讯程序,除此之外,本机还设计了过程通道定期,不定期自检,及系统投入时程序跟踪无扰动切换及在线给定值重定等功能。

3 仿真功能

由于本控制机具有丰富的控制算法库,可容易的实现整个控制系统的全数字仿真,包括无时延闭环系统,有时延闭环系统及有时延使用 Smith 预估器闭环系统的数字仿真。

除此之外,本控制机加上一个“对象模拟机”可构成一个半实物仿真系统,可检验控制机实时控制过程及模拟干扰试验,以确定控制系统性能及控制机性能的优劣.

4 现场运行

本控制机在南京烷基苯厂 F_{501} 加热炉上试投运取得了满意的结果,该加热炉已实现了多变量计算机控制.其对象模型如图 4.

为验证本机的通用性,用本机代替原多变量控制器.经建模实验测得对象模型如下:

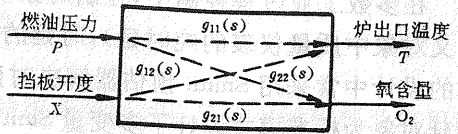


图 4 加热炉控制模型

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.6e^{-60s}}{1900s^2 + 70s + 1} & \frac{-0.2e^{-45s}}{2000s^2 + 80s + 1} \\ \frac{-0.8e^{-30s}}{30s + 1} & \frac{0.4e^{-15s}}{40s + 1} \end{bmatrix}$$

用 MFCAD 软件包对上述模型进行设计

$$\text{解耦阵 } K_p(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0.33303 \\ 2.0025 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{补偿阵 } K_c(s) = \text{diag} \left\{ 1.4 \left(1 + \frac{1}{35s} \right), 2.3 \left(1 + \frac{1}{38.44s} \right) \right\}.$$

经全数字及半实物仿真表明实际设计参数是合适的.控制系统稳定,计算机按参数投入,采样周期 15 秒.运行结果是满意的,基本达到了解耦控制.

控制机在 F_{501} 加热炉上闭环运行了 76 分钟,前 30 分钟进行跟踪、无扰动切换和平稳过程控制.控制过程中的实测数据如图 5、6.在实验期间现场烟道吹灰,温度有所下降,最大下降值为 1°C .后 46 分钟进行了扰动实验.即在线改变氧含量的给定值.得到了一组在大扰动下的系统响应曲线如图 7.温度波动是 $\pm 2.5^\circ\text{C}$,控制系统是稳定的.

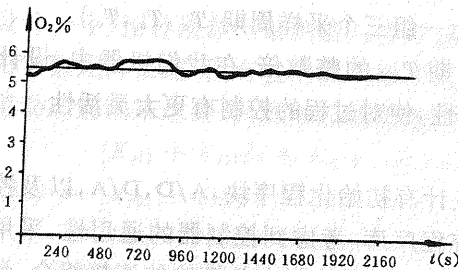


图 5 氧含量给定值与实测值

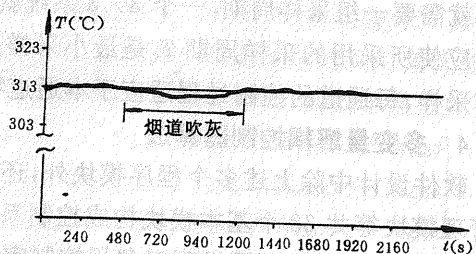


图 6 炉出口温度给定值与实测值

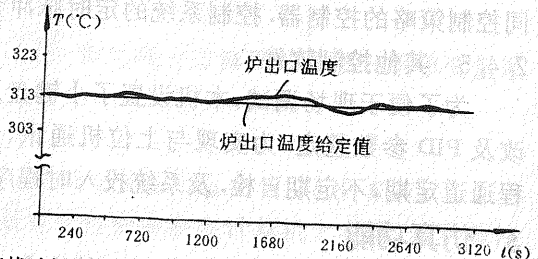
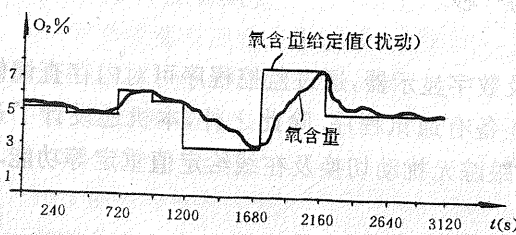


图 7 氧含量给定值扰动的系统输出曲线

我们研制的 MIC-1 型控制机具有一套标准算法,软硬件密切配合,进一步完善了多变量控制系统的开发技术.实际应用上也表现出相当的优越性.它将对控制计算机产品的开发及系列化起到促进作用.

参 考 文 献

- [1] 白方周, 庞国仲. 多变量频域理论与设计技术. 北京: 国防工业出版社, 1988, 396—399
- [2] 天津市电子计算机研究所, 深圳市微型电脑有限公司. TWS-0600 十六位单板微型计算机使用说明. 1986
- [3] Motorola Inc. 68000 Assembly Language Programming Motorola Inc. Austin Texas, U. S. A., 1979
- [4] Rosenbrock, H. H. . Design of Multivariable Control System using Inverse Nyquist Array. Pro. IEEE, 1969, 116, 1929—1936
- [5] Ogunnaiké, B. A. and Ray, W. H. . Computer-aided Multivariable Control System Design for process with Time Delays. Computers in chemical Engineering, 1982
- [6] 黄藻华等. MC68000 微型计算机. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1984, 62—125

The Development of a General Purpose Control Computer for Multivariable Industrial Processes

LONG Qinghua

(Institute of Microelectronics, Normal University of South China • Guangzhou, 510631, PRC)

BAI Fangzhou, PANG Guozhong and ZEN Jikang

(Department 10, China University of Science and Technology • Hefei, 230026, PRC)

Abstract: In this article we described the design of a general purpose control computer for multivariable industrial process and the central algorithm of multivariable control system. The field application results showed that the design of this control computer is good and convenient for use. It will bring about a great advance in multivariable control technique.

Key word: multivariable; control system; industrial control computer; design

本文作者简介

龙庆华 副教授. 1963年毕业于中国科学技术大学自动化系. 曾任教于中国科学技术大学. 现任华南师范大学微电子学研究所任副所长. 主要从事自动控制系统、自动检测仪表、计算机应用系统、综合管理信息系统等方面的研究与开发. 负责研制的“DSC 控制系统”获 1987 年中科院科学进步三等奖. 参加研制的“兰炼精馏塔多变量控制系统”获 1990 年中国石化总公司科学进步二等奖.

白方周 1957 年毕业于哈尔滨军事工程学院. 1958 年至 1976 年主要从事武器控制系统和专用模拟机的研制. 1977 年调至中国科学技术大学从事控制系统理论和应用方面的教学与研究. 现为中国科学技术大学计算机系教授. “多变量系统设计程序包”、“兰炼常压塔多变量控制系统”成果曾分别获中科院及中国石化总公司科学进步二等奖.

庞国仲 1963 年毕业于中国科学技术大学自动化系. 后在该校自动化系、无线电系、系统科学与管理科学系从事教学与科学研究. 现为自动控制系副教授. 主要从事自动控制理论及应用研究. “多变量系统设计程序包”、“兰炼常压塔多变量控制系统”成果曾分别获中科院及中国石化总公司科学进步二等奖.

曾季康 1982 年毕业于西安交通大学无线电系. 1985 年在中国科学技术大学计算机系读研究生, 并获硕士学位. 现为中国科学院西安光机所助研.