研究生高水平课程体系建设丛书

计算机控制系统（第2版）

闫建国　主编

西北工业大学出版社



研究生高水平课程体系建设丛书

计算机控制系统

（第2版）

主　编　闫建国
副主编　李中健
编　者　闫建国　李中健
　　屈耀红　邢小军

西北工业大学出版社
西　安

【内容简介】 本书分为10章，系统地阐述了计算机系统的理论基础，包括计算机控制系统概论、计算机系统的信号转换与处理、计算机控制系统的数学描述与分析、计算机控制系统设计方法(连续域-离散化设计，离散域设计)、数字PID控制器设计、计算机控制系统的状态空间设计、复杂系统的计算机控制方法设计、多采样频率系统的分析与设计、计算机网络控制系统分析与设计、自适应与智能控制分析与设计等。第2～10章末附有一定数量的习题，供读者学习时参考。

本书可作为计算机应用、自动控制类专业的研究生教材，也可作为同类专业高年级本科生的教材，以及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制系统 / 闫建国主编. —2版. —西安：西北工业大学出版社，2019.3

ISBN 978-7-5612-6350-1

Ⅰ.①计… Ⅱ.①闫… Ⅲ.①计算机控制系统 Ⅳ.①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第017747号

JISUANJI KONGZHI XITONG

计算机控制系统

责任编辑：张 友　　**策划编辑**：何格夫

责任校对：王 尧　　**装帧设计**：李 飞

出版发行：西北工业大学出版社

通信地址：西安市友谊西路127号　　邮编：710072

电　　话：(029)88491757，88493844

网　　址：www.nwpup.com

印 刷 者：陕西向阳印务有限公司

开　　本：787 mm×1 092 mm　　1/16

印　　张：23.125

字　　数：607千字

版　　次：1996年3月第1版　2019年3月第2版　2019年3月第1次印刷

定　　价：72.00元

如有印装问题请与出版社联系调换

第 2 版前言

本书是笔者长期在西北工业大学从事研究生、本科生教学以及科学研究工作的基础上总结编写的教材，同时也继承了周雪琴主编的《计算机控制系统》(西北工业大学出版社，1996 年 11 月出版)的主要章节与内容，并增补了新的教学内容。

本书主要分三个部分。第一部分(1～3 章)是计算机系统的理论基础，包括计算机控制系统概念，计算机控制系统的信号转换与处理，计算机控制系统的数学描述与分析；第二部分(4～6 章)是计算机控制系统的基本控制方法设计，包括连续域-离散化设计，离散域设计，数字 PID 控制器设计，状态空间设计；第三部分(7～10 章)是控制系统设计，包括复杂控制系统设计、多采样频率控制系统设计、计算机网络控制系统设计、计算机自适应控制系统设计等。全书共 10 个章节，第 2～10 章末附有一定数量的习题，同时根据教学大纲要求在附录中提供了拉普拉斯变换和 z 变换表。

本书采用连续域控制理论与计算机离散控制相结合，形成一个完整的体系——计算机控制系统，书中从计算机基础控制理论，到经典的计算机控制系统设计，再到复杂的计算机控制系统设计，进行深入浅出的介绍，尤其针对当前网络控制和人工智能控制，专列出第 9 章和第 10 章进行详细介绍。

本书可作为自动控制类专业和计算机应用类专业的研究生教材。各章内容既独立，又具有连贯性，可以针对不同专业要求选择不同章节或根据不同的学习深度要求选择不同的内容分段教学。

本书第 1,6,7,9 章由闫建国编写，第 3,4,8 章由李中健编写，第 5 章由邢小军编写，第 2,10 章由屈耀红编写。全书由闫建国统稿并任主编，李中健任副主编。

本书由周雪琴教授审阅，并提出了许多修改意见，在此表示深切感谢。在编写本书的过程中，得到了吴慈航、董霁锋、高逸的协助，同时参考了大量相关文献，在此谨向以上三位同志及参考文献的作者深表谢意。

由于水平有限，书中定存在疏漏及不妥之处，肯请广大读者批评指正。

编　者

2018 年 12 月

第1版前言

《计算机控制系统》一书是作者在西北工业大学自动控制系多年从事研究生、本科生教学工作以及科学研究工作的基础上总结编写而成的。在撰写过程中也参考吸收了国内外有关教材和文献资料的内容。

本书可分为四部分。一是计算机控制系统的理论基础:包括系统概念,信号转换及处理,数学模型;二是计算机控制系统的分析与设计方法:连续域-离散化设计,离散域设计方法,状态空间设计方法,多采样频率系统的分析与设计;三是集散型计算机控制系统:系统特点,人-机接口,通信系统的构成等;四是计算机控制系统的实现:采样频率的选择,语言转换,计算机与传感器、执行机构的连接,等等。最后用一个典型随动系统作为实例,来具体阐明系统的设计与实现问题。全书共11章,各章(除第一、十章外)后均附有一定数量的习题,以供读者参考。

本书把采样控制理论与计算机应用相结合,两者相互渗透,形成一个完整的整体——计算机控制系统。书中既介绍了经典控制理论和方法,也介绍了现代控制理论和方法,同时对新型计算机控制系统——集散控制系统,专列一章作较详细的介绍。

本书可作为自动控制类专业和计算机应用类专业的研究生教材。各章内容互相联系形成一个整体,同时也注意到它们之间的相对独立性,以便于不同教学要求的选用。

本书第一、二、八章由周雪琴编写,第三、四、六章由卢京潮编写,第五章(§5-1~§5-3)由张友民编写,第七、九章和第五章中§5-4、§5-5由安锦文编写,第十、十一章由闫建国编写。全书由周雪琴统稿任主编,安锦文为副主编。

该书由西安交通大学自动控制系刘文江教授、博士导师审阅。刘文江教授认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见,给本书增色不少,在此深表谢意。在本书撰写过程中得到了西北工业大学研究生院、自动控制系和自动控制理论及应用教研室有关领导和同志们的大力支持和帮助,在此谨向他们表示诚挚的谢意。

由于水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者指正。

编　者

1996年11月

目　录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　计算机控制系统的组成及工作原理 …… 1
1.2　计算机控制系统主要特点与典型应用分类 …… 4
1.3　计算机控制系统的理论与设计 …… 10

第 2 章　计算机控制系统中信号转换与处理 …… 14

2.1　计算机控制系统中的信号描述 …… 14
2.2　采样过程及数学描述 …… 17
2.3　采样信号重构 …… 27
2.4　本章小结 …… 33
习题 …… 33

第 3 章　计算机控制系统的数学描述与分析 …… 34

3.1　z 变换 …… 34
3.2　广义 z 变换 …… 43
3.3　差分方程 …… 50
3.4　脉冲传递函数 …… 52
3.5　计算机控制系统稳定性分析 …… 58
3.6　离散系统频率特性分析 …… 70
3.7　离散状态方程 …… 73
3.8　本章小结 …… 83
习题 …… 83

第 4 章　计算机控制系统设计方法 …… 87

4.1　概述 …… 87
4.2　连续域-离散化设计 …… 88
4.3　离散域 z 平面根轨迹设计 …… 102
4.4　离散系统的频率域设计 …… 111
4.5　离散域解析设计法 …… 116
4.6　本章小结 …… 124
习题 …… 125

第 5 章　数字 PID 控制器设计 …… 128

5.1　PID 控制器及其控制作用 …… 128
5.2　数字 PID 控制算法 …… 132
5.3　PID 算法的改进 …… 136
5.4　PID 控制参数的整定 …… 145
5.5　先进 PID 控制算法 …… 153
5.6　本章小结 …… 165
习题 …… 165

第 6 章　计算机控制系统的状态空间设计 …… 167

6.1　离散系统的可控、可达及可观性 …… 167
6.2　脉冲函数控制器的状态空间转换 …… 176
6.3　状态空间最少拍设计 …… 181
6.4　状态空间状态反馈和极点配置法 …… 189
6.5　状态空间状态观测器设计法 …… 198
6.6　状态空间的调节器设计法 …… 208
6.7　状态空间的伺服器设计法 …… 212
6.8　状态反馈控制抗干扰补偿 …… 220
6.9　本章小结 …… 223
习题 …… 223

第 7 章　复杂系统的计算机控制方法设计 …… 226

7.1　计算机串级控制方法 …… 226
7.2　前馈控制 …… 239
7.3　解耦控制 …… 246
7.4　本章小结 …… 263
习题 …… 264

第 8 章　多采样频率系统的分析与设计 …… 267

8.1　多采样速率的配置 …… 267
8.2　多采样信号频率分析与等效变换 …… 269
8.3　时域采样信号分解法 …… 280
8.4　多采样系统的状态矩阵法 …… 286
8.5　多采样频率系统的性能分析 …… 287
8.6　多速率系统的控制器设计 …… 289
8.4　本章小结 …… 292
习题 …… 293

第 9 章　计算机网络控制系统分析与设计 …… 294

9.1　计算机网络控制系统分析 …… 294
9.2　计算机网络控制数学模型 …… 297
9.3　基于连续域-离散化设计的闭环增广网络模型 …… 302
9.4　基于 PID 网络控制器的设计 …… 306
9.5　定常延迟网络控制系统的控制器设计 …… 309
9.6　基于状态空间的网络控制系统设计 …… 321
9.7　本章小结 …… 328
习题 …… 328

第 10 章　自适应与智能控制分析与设计 …… 330

10.1　自适应控制系统描述 …… 330
10.2　模型参考自适应系统 …… 333
10.3　计算机的自适应控制设计 …… 340
10.4　自适应控制系统的自学习方法 …… 349
10.5　本章小结 …… 355
习题 …… 355

附录　拉普拉斯变换和 z 变换表 …… 357

参考文献 …… 359

第1章 绪 论

计算机控制系统是以自动控制理论与计算机技术为基础，以计算机为载体的数字控制系统。计算机不仅在科学计算、数据处理等方面获得了广泛的应用，而且在自动控制领域也得到了越来越广泛的应用。

早在1946年美国就生产出第一台电子计算机，用于科学计算，在经历了70多年的不断改进发展后，计算机已应用在人类活动中的各个领域，从人们日常使用的电器设备、手机、汽车到航空航天的飞行器、机载设备，航海的轮船、舰艇、潜水器，无不渗透着计算机控制的应用。计算机在各个控制领域和设备中参与数据检测、数据计算、人工智能决策、控制运算、质量参数控制等诸多工作，它能模拟人的大脑、感觉器官，收集周围各种信息，以超过人的大脑的运算速度，快速规划行动策略，通过不同方式的信号输出控制它所能及的设备运动，这就是计算机带来的高智能控制的魅力所在。

计算机控制是人工智能、信息网络等现代科技的一门基础科学技术，本书将从最基础的计算机数字控制技术介绍控制系统的组成、工作原理及它的特点，研究计算机参与控制后给控制理论及控制系统设计所带来的新的处理方法。

1.1 计算机控制系统的组成及工作原理

计算机在控制系统中主要承担智能计算的任务，亦即控制系统中控制规律的执行是由计算机来实现的。所以，由于计算机的出现，控制策略的种类也就不断增多，如非线性系统的控制与计算、大系统复杂逻辑的判断和云数据的处理及计算等。

例1-1 如图1-1所示的雷达自动跟踪目标遥控火炮系统。雷达系统实时测出运动目标的高低角、方位角和斜距，通过通信网线传输给自动火炮控制系统。火炮模拟器对测回的运动目标数据进行实时处理，计算出火炮应该采用的对攻击目标的攻击角、方位角(图中未示出)和提前角，然后驱动火炮的运动。

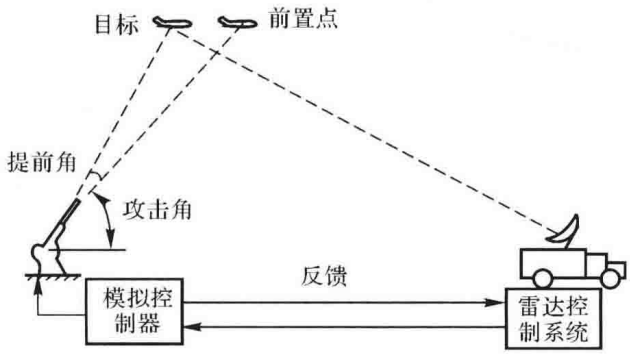


图1-1 火炮控制系统

在火炮控制系统中，被控对象炮塔的实际移动位置由测量位移传感器测出，并把所测得的信号作为位置反馈信号与给定值进行比较，计算出两者的偏差参与控制修正。为了改善系统性能，火炮控制系统采取了三个措施：①位置精度控制引入了由有源网络组成的串联校正；②内环速度控制利用了测速发电机提供的并联校正信号参与速度控制量修正；③快速运动采用了电子开关实现系统工作状态转换的逻辑控制，如图 1－2 所示，当偏差大于某限定值时，断开位置反馈，使电机以最大速度向减小偏差方向运动，当偏差小于某限定值时再接通主反馈，以提高系统的跟踪精度。在连续系统中各传递的信号都采用模拟电路，实现的是连续模拟信号的控制，控制器采用的是模拟信号。

图 1－1 中的模拟控制器可由计算机控制器代替，把给定值的计算、修正量的计算以及电子开关等功能用计算机来完成，例如，图 1－2 所示的模拟控制器采用位置反馈环并入到计算机控制系统，形成如图 1－3 所示的系统。若把图 1－3 中的速度环也并入计算机控制系统，由软件构成串级控制构架，则形成如图 1－4 所示的系统，其控制智能化程度将更优于图 1－3 的结构。

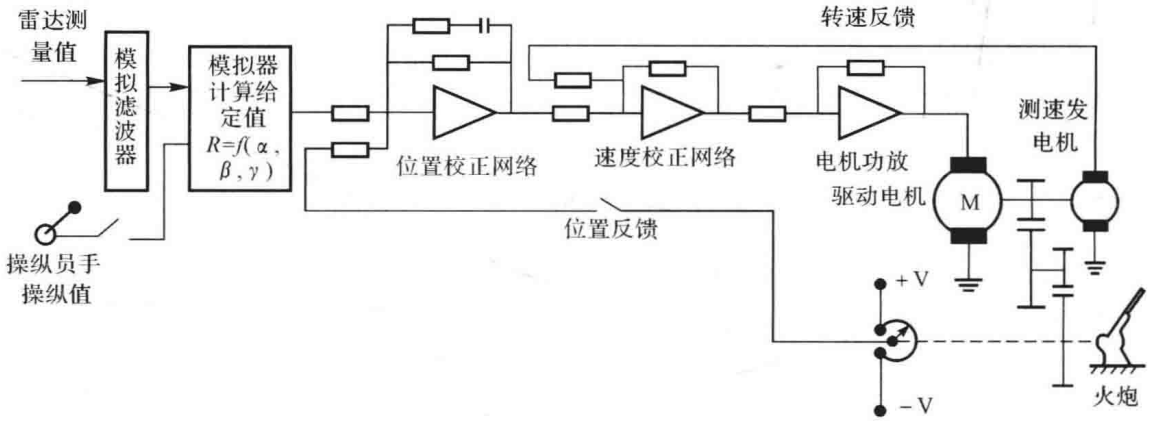


图 1－2　自动火炮控制系统

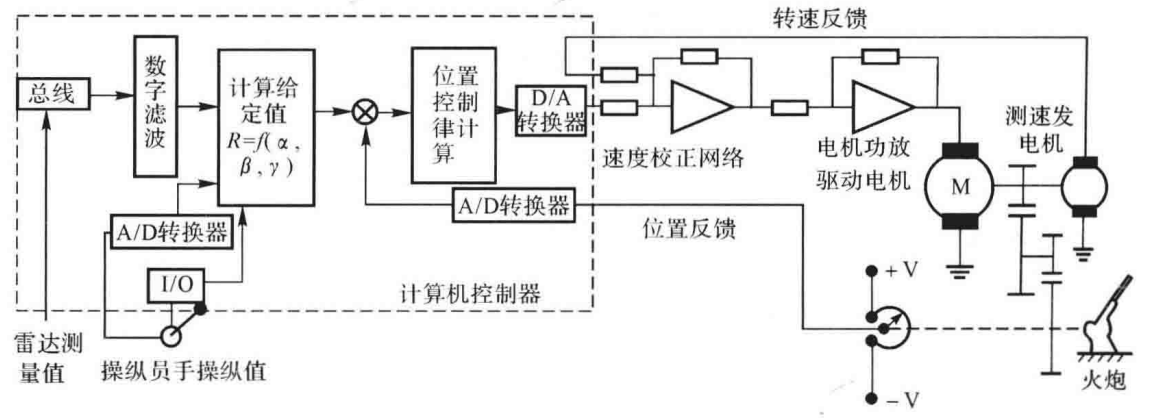


图 1－3　自动火炮计算机位置控制系统

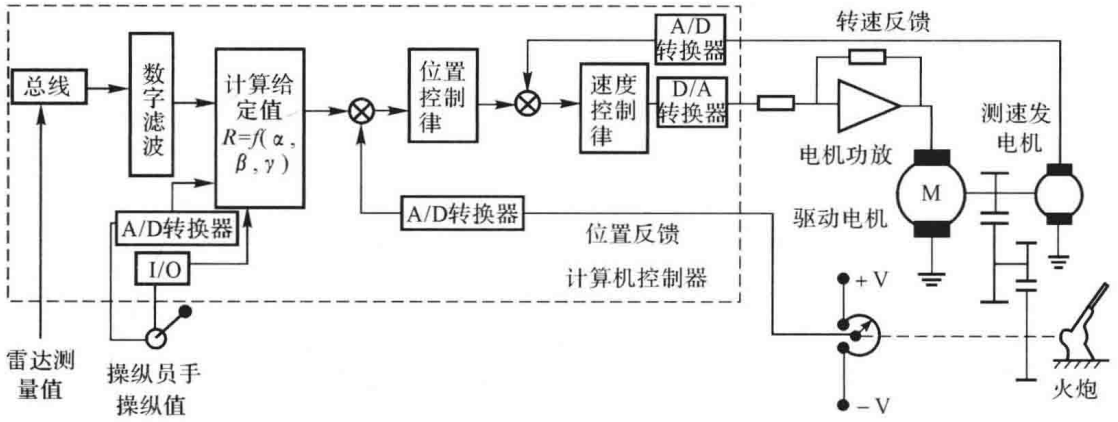


图 1-4 自动火炮计算串级控制系统

由上述实例可见,计算机控制系统可以由下述各部件组成。

(1)被控对象:如火炮系统的火炮炮塔。

(2)执行机构:如火炮系统中的驱动电机回路。

(3)测量装置:如火炮系统中采用的测量电位计和测速发电机。

(4)计算机接口部件:主要有以下几个接口部件。

1)模/数(A/D)转换器:主要是把直流模拟信号(直流电压量或电流量)转换为数字的二进制信号,送入计算机。

2)数/模(D/A)转换器:将计算机数字信号转换为模拟信号(直流电压或电流)并送给外放大驱动器。

3)脉冲测试接口:主要对脉冲信号的测试、计数或脉宽计时,将其转换成数字信号输入到计算机。

4)输出输入接口:对输入的开关量(或输出的状态量)检测,表示有或无;或对外状态量进行检测。如图 1-2 所示的操纵员手柄的检测,除了检测手柄状态还需要以开关量描述输出输入,即通过数字信号"0""1"表示开关状态。

5)通信总线:主要完成数据的交互和外通信协议的转换。

(5) 数字计算机(包括计算机硬件和软件):首先它在计算机控制系统中起着控制器的作用,对信号进行加工,形成系统所要求的主控信号,其次还能承担数据处理、监督、管理等任务。计算机硬件除主机以外,还有输入、输出通道,人机通信设备和存储器等外部设备,计算机软件包括系统软件和应用软件等。

例 1-1 中计算机的作用,是对采集的原始信号进行数字滤波,计算给定量和偏差量,对偏差信号进行控制律计算,形成并输出控制信号,利用软件对系统进行逻辑控制,等等。

像连续控制系统一样,计算机控制系统亦可分为闭环控制、开环控制以及复合控制等不同的控制类型。如例 1-1 中对于火炮控制、雷达目标跟踪系统,可以用图 1-5 所示的计算机控制结构描述。而对于火炮群系统的自主控制,按计算机结构描述可描述为计算机网络控制结构,如图 1-6 所示。

原书缺页

原书缺页

艇中的典型应用大致可分为以下几类。

1. 数据采集处理系统

尽管单独数据处理不属于计算机控制的范畴，然而，一个计算机控制系统离不开数据的采集和处理。如预警飞机的计算机数据采集和数据处理系统，飞机所有侦察任务设备获得的数据都需通过数据任务计算机采集汇总，或发送给指挥员操作显示系统，供指挥人员实时使用，或存储在数据记录设备中，用于事后分析。计算机在数据采集处理系统中起到主体作用。

例 1-2 飞机的黑匣子——数据记录仪。

如图 1-8 所示的飞机数据记录仪系统，具有 1553B 总线、以太网(100 Mb/s)总线、模拟量输入采集口、SCSI 异步通信串口(20 Mb/s 或 120 Mb/s)，可将图像、语音等采集数据存储在硬盘或电子盘中。

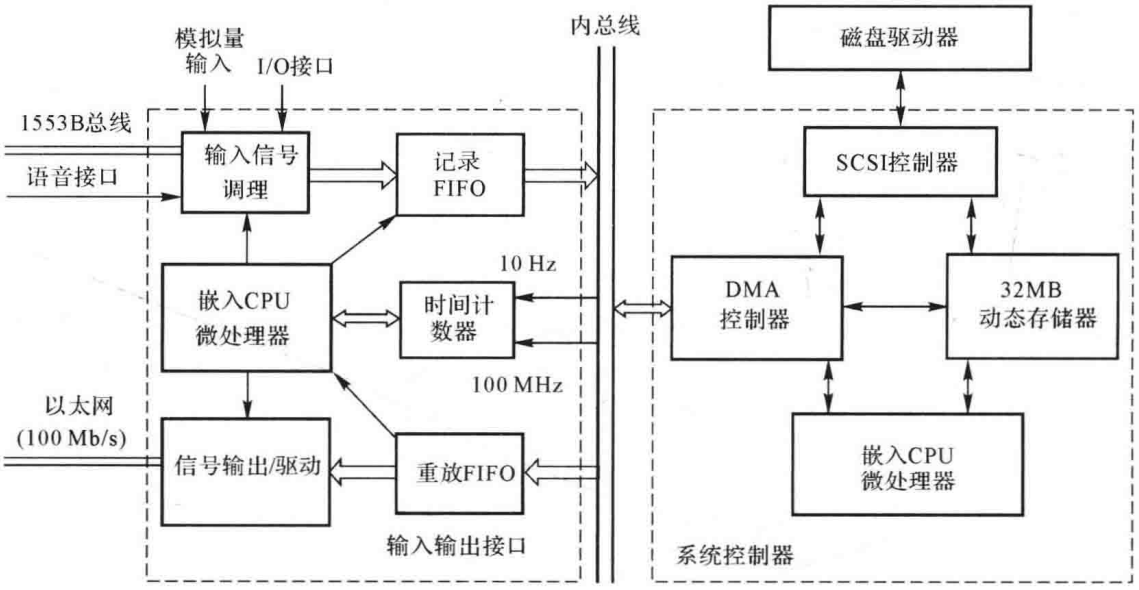


图 1-8 飞机数据记录仪系统

计算机数据采集系统如图 1-9 所示，采集计算机主要对实际控制系统输入输出参数进行巡回检测、处理、分析、记录，对越限参数及时报警，并可实时分析过程控制系统参数变化趋势。

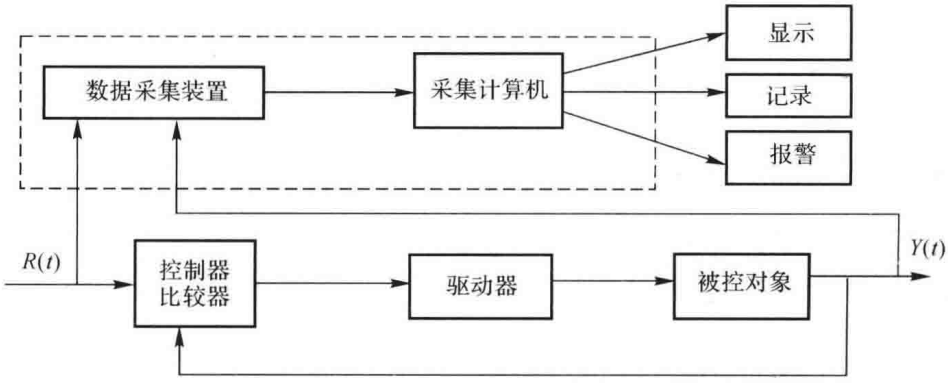


图 1-9 计算机数据采集系统

2. 直接数字控制系统

直接用计算机参与过程变量控制回路的控制，这种控制系统叫直接数字控制(Direct Di-

gital Control，DDC）系统，如图 1－10 所示。由于计算机的特点与优势，直接数字控制系统除了能够实现 PID 控制外，还能进行多回路控制、前馈控制、纯滞后补偿控制、多变量解耦控制以及最优、自适应等复杂规律的控制。这种系统，计算机直接参与了控制，所以具有实时性好、可靠性高、环境适应性强等优点。

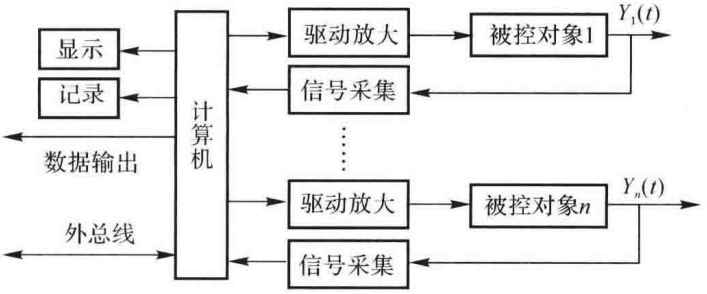


图 1－10　直接数字控制系统

例 1－3　数字飞行控制系统。

图 1－11 是飞机飞行纵向通道俯仰角模拟控制简图。传感器分别测量俯仰角 θ、俯仰角速度 $\dot{\theta}$ 等。滤波器是一种低通滤波器，它将抑制传感器输出信号中夹杂的高频噪声。

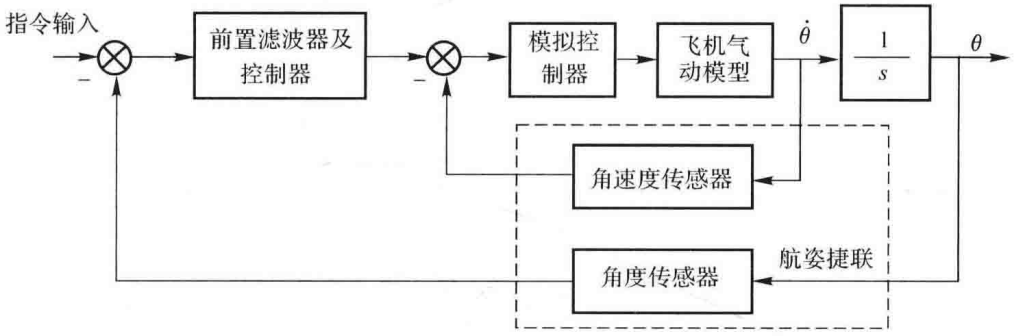


图 1－11　飞机飞行纵向通道俯仰角模拟控制简图

图 1－12 所示为飞机飞行纵向通道俯仰角数字控制简图。图中，飞机纵向自动驾驶仪改置为多采样周期的计算机控制系统，系统中速度和位置反馈采用不同的采样周期 T_1，T_2，T_3。这种在同一个系统中存在几个不同采样周期的采样器的系统也称为多采样频率系统。通常，如果一个回路中信号变化的速率远低于另一个回路中信号变化的速率，则较低速率回路的采样周期可以选得比较大。

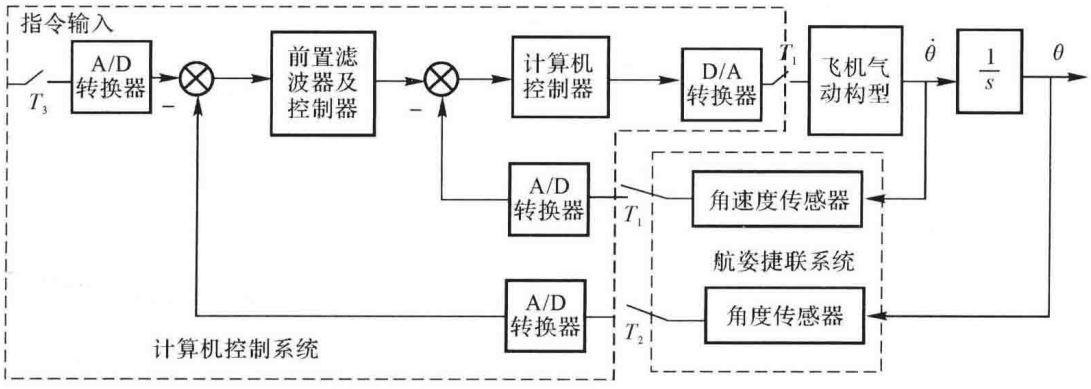


图 1－12　飞机飞行纵向通道俯仰角数字控制简图

当驾驶员操纵驾驶杆时，控制指令通过力传感器、前置滤波器、分时采样、A/D 转换，以数字量进入计算机，在计算机内，与当时的飞机姿态信息比对，按预定的算法进行计算，得到输出

控制量，然后通过 D/A 转换、零阶保持形成近似连续的控制量，驱动执行机构（即舵机），操纵飞机舵面偏转，形成飞机飞行气动特性的变化，使得飞机按驾驶指令规定的姿态进行飞行。

3. 监督控制系统

所谓监督控制系统（SCC），是指用计算机的输出来直接改变模拟控制器或 DDC 的设定值，所以又叫作计算机设定值控制系统。它有两种类型：一种是 SCC 加模拟控制器的系统，在这种系统中，计算机的输出并不直接对被控对象施加影响，而是根据现场测得的各种变量的情况，经过分析后计算改变控制器的设定值，由操作员修正其设定值，计算机只监视模拟控制器的工作情况，因而称为监控系统，如图 1－13 所示。另一种是 SCC 加数字控制器的系统，如图 1－14 所示，系统中计算机的输出直接改变数字控制器的设定值，往往在系统中，计算机在执行监督控制的同时，兼并完成直接数字控制任务。

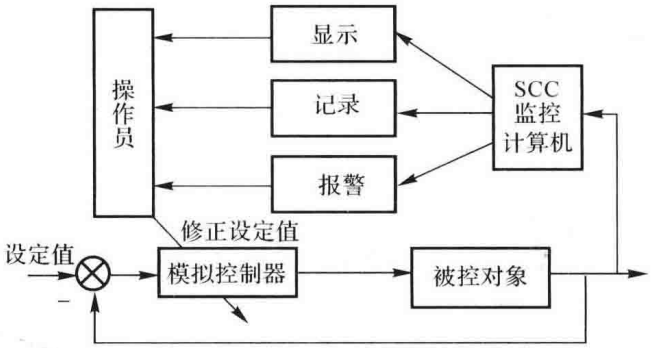


图 1－13　修正模拟控制器的监控系统

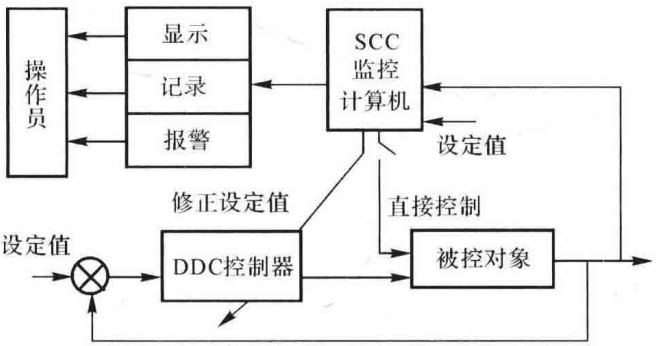


图 1－14　修正数字控制器的监控系统

监督控制可以提高系统的可靠性：当 DDC 控制器发生故障时，监督控制计算机可以代替前者完成操作任务；当监督控制计算机发生故障时，DDC 控制器又能独立执行任务。

4. 网络控制系统

随着现代工业生产的快速发展，急需提高生产过程的自动化和管理水平。为此不仅要求计算机参与控制，而且也需要计算机完成系统过程管理控制任务。在网络控制系统中，除了底层的直接数字控制和监督控制外，还包含远程的监督计算机和远程指挥系统计算机等多个计算机，构成了相互联系的层次，又称为级，各级都有自己的控测目标，各级各类计算机之间使用高速信号网络互相连接，快速进行信息交互，达到上下、左右各个系统可协同一致地进行工作。

按照控制方法分，网络控制系统可分为三种：集散控制系统、分级控制系统和远程网络控制系统。

(1)集散控制系统。如图1-15所示为一般集散控制系统,可由PLC控制器、嵌入计算机、工控机、PC等组成,每个基本控制单位是一套控制器,完成对一个量的控制。若一条流水线有n个控制单元,则由n个基本控制单位完成现场的DDC控制。所有控制单元的控制器和顶层工程师站、操作员站和管理计算机连接在现场网络上,完成各点数据交互。

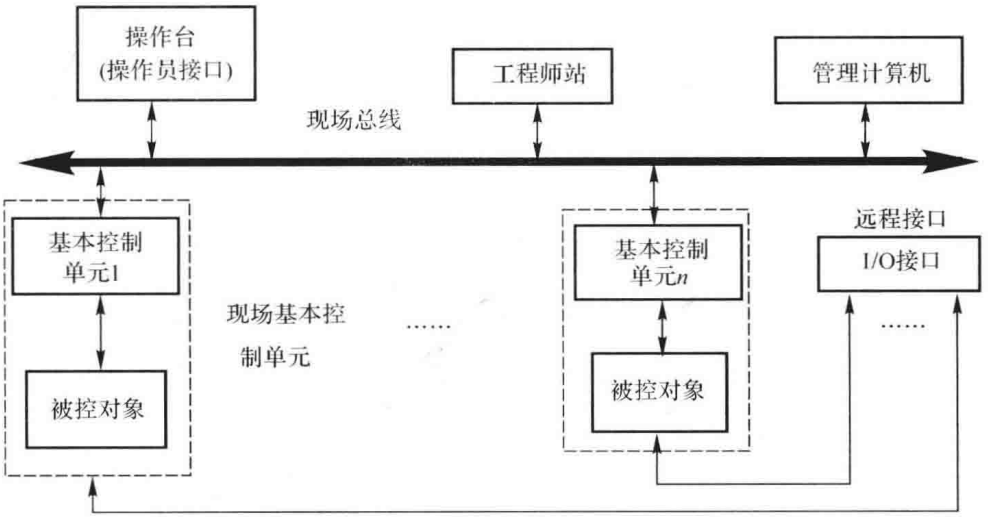


图1-15 一般集散系统构型

(2)分级控制系统。分级控制系统的结构如图1-16所示。图中描述了目前中大型无人机平台控制系统所采用的分级计算机网络控制构型。最底层为各个关键参数或设备直接参与计算机控制,该层称为现场级或一级计算机控制层;再上一层的计算机控制具有系统级管理和监控功能,如图1-16中的导航计算机是在一级计算机控制中的飞控外环控制,构成二级计算机;顶层控制由一台计算机负责,该计算机管理飞机各个子系统、二级计算机和飞机任务设备等子系统,称为三级计算机,在本例中为最高级。一级计算机到二级计算机的连接可采用内总线或直接操控;二级计算机与三级计算机则采用航电总线或高速网络总线连接。

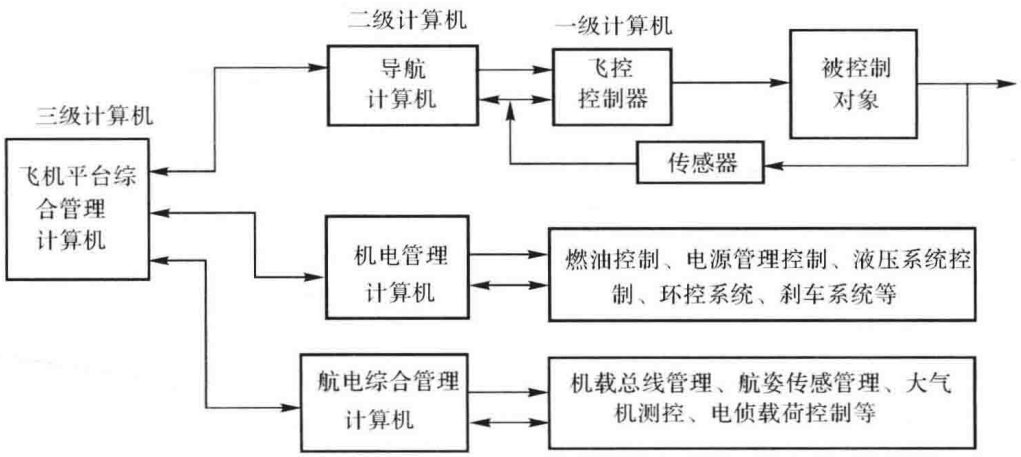


图1-16 中大型无人机分级计算机网络控制

(3)远程网络控制系统。由一台中央计算机(CC)和若干台卫星计算机(SC)构成计算机网络,中央计算机配置了齐全的各类外部设备,各个卫星计算机可以共享其资源,通过卫星中转