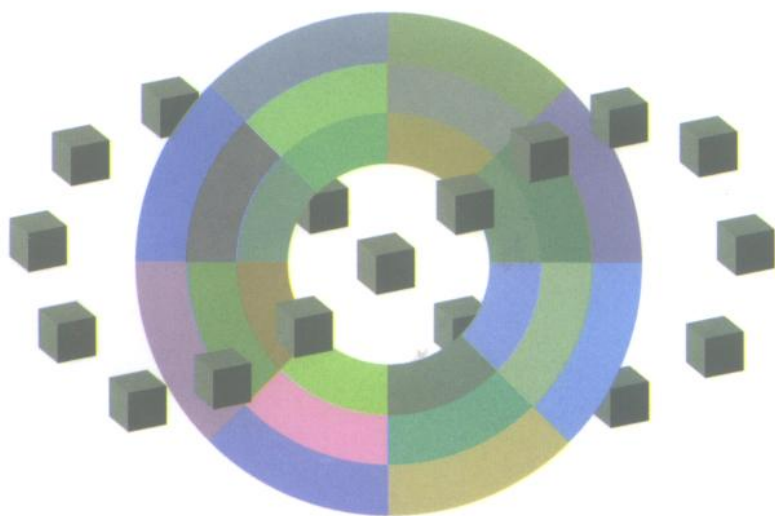


# 数字控制入门

〔日〕 雨宫好文 主编 高木章二 著



科学出版社 OHM社

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1 什么是数字控制              | 11 |
| 1.1 室内温度的控制            | 11 |
| 1.2 远距离操作的机器人手臂        | 15 |
| 1.3 微机控制               | 18 |
| 1.3.1 微机的构成            | 18 |
| 1.3.2 微机的动作            | 19 |
| 1.3.3 A/D 转换器和 D/A 转换器 | 19 |
| 1.4 数字控制               | 23 |
| 本章要点                   | 28 |
| 练习题                    | 28 |
| 2 控制系统的表示方法            | 31 |
| 2.1 水槽流出液体的控制          | 29 |
| 2.2 水槽系统的方程式           | 31 |
| 2.3 方框图的绘制             | 34 |
| 2.4 用离散时间系统表示水槽系统      | 38 |
| 2.5 离散时间系统的方框图         | 41 |
| 本章要点                   | 45 |
| 练习题                    | 45 |
| 3 一阶系统的输出              | 47 |
| 3.1 没有输入时离散时间系统的输出     | 47 |
| 3.2 连续时间系统的输出          | 51 |
| 3.2.1 自由响应             | 51 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 3.2.2 阶跃状输入的输出 .....             | 52  |
| 3.3 连续时间系统的离散化 .....             | 55  |
| 3.4 有输入时离散化系统的解 .....            | 58  |
| 本章要点 .....                       | 63  |
| 练习题 .....                        | 63  |
| <br>4 二阶系统 .....                 |     |
| 4.1 二阶系统的例子 .....                | 65  |
| 4.2 模拟二阶系统的表示方法 .....            | 70  |
| 4.3 模拟二阶系统的响应 .....              | 73  |
| 4.3.1 自由响应和状态 .....              | 73  |
| 4.3.2 阶跃响应 .....                 | 76  |
| 4.4 离散化系统的响应 .....               | 82  |
| 4.4.1 利用欧拉近似的状态方程式的<br>离散化 ..... | 82  |
| 4.4.2 状态 .....                   | 84  |
| 4.4.3 自由响应 .....                 | 88  |
| 本章要点 .....                       | 90  |
| 练习题 .....                        | 90  |
| <br>5 二阶系统的精确离散化 .....           |     |
| 5.1 用向量表示状态方程式 .....             | 93  |
| 5.1.1 向量和矩阵 .....                | 93  |
| 5.1.2 行列式和逆矩阵 .....              | 99  |
| 5.1.3 状态方程式 .....                | 103 |
| 5.2 传递函数和状态方程式的关系 .....          | 104 |
| 5.3 状态方程式的解 .....                | 107 |
| 5.4 状态方程式的离散化 .....              | 110 |
| 本章要点 .....                       | 115 |
| 练习题 .....                        | 115 |

## 6 控制系统的稳定问题

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.1 火箭的姿态控制 .....        | 117 |
| 6.2 判断是否稳定的方法 .....      | 122 |
| 6.2.1 连续时间系统 .....       | 122 |
| 6.2.2 离散时间系统 .....       | 127 |
| 6.3 可控制系统 .....          | 131 |
| 6.3.1 可控性 .....          | 132 |
| 6.3.2 可观性 .....          | 136 |
| 6.3.3 控制系统特征值的任意配置 ..... | 139 |
| 本章要点 .....               | 142 |
| 练习题 .....                | 142 |

## 7 控制性能

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 7.1 稳态特性(稳态偏差) .....              | 145 |
| 7.1.1 用直流伺服电机的回转体运动控制系统 .....     | 146 |
| 7.1.2 与目标值相关的稳态偏差 .....           | 150 |
| 7.1.3 与外扰相关的稳态偏差 .....            | 156 |
| 7.2 过渡特性(速应性和衰减性) .....           | 158 |
| 7.2.1 二阶系统的场合 .....               | 158 |
| 7.2.2 高阶系统的场合 .....               | 161 |
| 7.2.3 利用模型表示过渡特性 .....            | 167 |
| 7.3 离散时间系统期望的极点范围 .....           | 168 |
| 7.3.1 连续时间系统的极点同离散时间系统极点的对应 ..... | 168 |
| 7.3.2 期望的极点范围 .....               | 170 |
| 本章要点 .....                        | 171 |
| 练习题 .....                         | 172 |

## 8 采用直流伺服电机的位置控制系统的设计

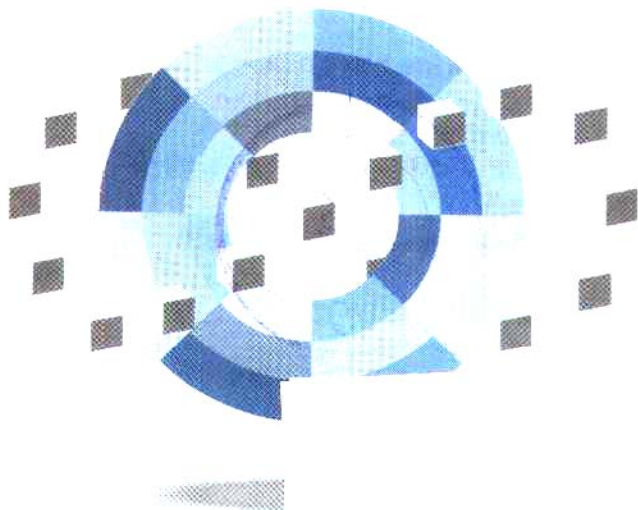
|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 8.1 比例控制 .....          | 176 |
| 8.1.1 控制系统的开环脉冲传递函数 ... | 176 |
| 8.1.2 用根轨迹法分析过渡特性 ..... | 177 |
| 8.2 具有速度反馈的比例控制 .....   | 179 |
| 8.2.1 开环脉冲传递函数 .....    | 179 |
| 8.2.2 指定极点的设计 .....     | 180 |
| 8.2.3 控制系统的响应 .....     | 181 |
| 8.3 模型随动系统 .....        | 183 |
| 8.3.1 控制系统的规范模型 .....   | 183 |
| 8.3.2 控制对象的模型 .....     | 184 |
| 8.3.3 控制系统的构成 .....     | 185 |
| 8.3.4 控制系统的响应 .....     | 186 |
| 本章要点 .....              | 189 |
| 练习题 .....               | 189 |
| 练习题答案 .....             | 191 |
| 参考文献 .....              | 201 |

图解

机电一体化入门系列

# 数字控制入门

〔日〕雨宫好文 主编 高木章二 著  
王棣棠 译



科学出版社 OHM 社

2000 北京

图字: 01 - 1999 - 2498 号

Original Japanese edition

Zukai Mekatronikusu Nyuumon Shiriizu: Dijitaru Seigy Nyuumon (Kaitei 2 - han)

Supervised by Yoshifumi Amemiya

Written by Shoji Takagi

Copyright © 1999 by Shoji Takagi

published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 1999

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

圖解メカトロニクス入門シリーズ

デジタル制御入門 (改訂 2 版)

高木章二 オーム社 1999 改訂 2 版 第 1 刷

图书在版编目(CIP)数据

数字控制入门/(日)雨宮好文編;(日)高木章二著;

王棟棠译. - 2 版. - 北京:科学出版社,2000

ISBN 7-03-008070-X

I. 数… II. ①雨… ②高… ③王… III. 数字控制 - 基本知识 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 67383 号

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

中国科学院印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

2000 年 1 月第 一 版 开本: 889 × 1194 1/32

2000 年 1 月第一次印刷 印张: 6 3/8

印数: 1 - 5 000 字数: 165 000

定 价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

## 译者序

本书是日本名古屋大学名誉教授雨宫好文先生主编,日本丰桥技术科学大学高木章二教授撰写的图解机电一体化入门系列中的一本。本书在日本受到了读者的欢迎,自1983年出版十几年来,先后9次印刷,并于1998年修订再版。

现代科学技术日新月异,尤其是计算机的飞速发展和普遍应用,为控制理论的发展提供了工具和条件,计算机控制系统正在高技术和工业自动化领域得到了广泛应用。为适应这一发展趋势,满足工程技术人员必须学习和掌握计算机控制系统知识的需要,我们翻译了本书,以便为工程技术人员提供一本中级水平的计算机控制系统方面的书籍。

本书比较结合实际,以实例阐述了基本理论和方法,略去深奥冗长的严格论证和推导,阐述了理论的物理意义和数学意义。篇幅适中,内容较全面,使初学者容易入门。

书中每个主题都举出了具体例子,并以“MEMO”和“NOTE”的形式汇集了许多便于理解所讲述内容的预备知识。各章末有本章要点和练习题,书末有练习题解答,便于自学者自行校正。

本书可作为计算机控制专业的入门教材或其它专业的选修教材,也可供函授学习或自学。

由于译者水平有限,书中难免会有缺点和错误,恳请读者批评指正。

王棣棠

## 主 编 的 话

图解机电一体化入门系列是从1983年开始出版的。

当时,机电一体化一词刚刚被社会认可。机械工程技术人员都有一种“不学习电子技术,就会落后于时代……”的危机感。每次举办讲座都座无虚席。

“对于初学者来说,学习哪些内容能最有效?”针对这一问题,我们进行了研究。在确定了以此为本套丛书的编写方针后,我们进行了相应的选题。事实证明,我们的预见是正确的。从那时起至今十几年来,这套丛书还继续受到读者的喜爱,读者至今已超过10万。

这次,我们根据读者提出的各种建议,对本套丛书进行了修订,改版后奉献给大家。这次改版,除对上版的内容进行了详细订正外,为方便读者学习,还在各章结尾处添加了本章要点和练习题等。

在这次再版的过程中,我们还讨论了在本套丛书中应融入多少机电一体化领域最新进展的问题。结果我们认为,本套丛书还应继续保持“面向初学者”这一有特色的编写方针,将那些属于机电一体化“后续课程”的内容让位于市面上正在推出的其它参考书。

本次改版的有以下8本书,希望能满足您的学习要求。

- |                    |             |
|--------------------|-------------|
| (1) 传感器入门          | (2) 控制用微机入门 |
| (3) 控制用机电入门        | (4) 机器人控制入门 |
| (5) 数字控制入门         | (6) 信号处理入门  |
| (7) CAD/CAM/CAE 入门 | (8) 接口电路入门  |

雨宫好文

# 前 言

本书第一版发行已历时 12 年,在此期间先后印刷了 9 次,受到了多方面读者的欢迎。

第一版是本着“即使初学控制的人也能够容易而具体地理解数字控制的基础”这一想法来编写的。后来收到许多读者的意见,提出比起基础知识来他们更希望写入具有参考价值的控制方法,尤其是希望能将此书当作教科书使用的读者,更是提出了汇集每章重点、增加练习题等意见。

因此,此次就参考读者的各种意见进行了修订,实现了第 2 版的出版。新版书在各章末增添了本章要点和练习题,在全书末有练习题解答,为使书中内容能尽可能涵盖全部基础内容,做了部分改写,特别是对 6.3 节和 8.3 节进行了全面改写。

数字控制的知识和研究方法,随着微型计算机性能的提高及价格的降低,已变为各种领域的技术人员不可缺少的工具了。

机器人等多数电子机械产品,是由机械部分、促动器、传感器、控制用微机及接口电路所组成。数字控制对协调各部分,最大限度发挥装置的整体性能起着重要作用。

本书叙述了数字控制的基本研究方法和设计方法,同第一版一样特别侧重以下几点。首先,就每个主题都举出了具体的例子,并且以“即使牺牲数学上的严密性也仍然重视易于读者理解”为原则来加以说明。在展开新的理论和说明时,为便于读者的理解,以“MEMO”和“NOTE”的形式汇集了许多预备知识。特别是,由于数字控制的对象在许多场合是“模拟量”,因此增加了许多模拟理论的说明。由此,初学控制的人不会对控制对象的变化规律感到陌生,能够自然地理解和思考。

## 6 前 言

第1章,就什么是控制,数字控制系统是怎样构成的,举出温度控制和机器人的位置控制为例加以说明。到这一章结束,明确了设计控制系统要解决什么样的问题,对此第2章到第7章做了论述。

第2章到第5章就怎样表示控制系统,控制系统又有怎样动作做了解说。

控制系统一旦失控后果不堪设想。这个问题即控制系统的稳定问题在第6章里做了研讨。该章还就控制对象的稳定化可能性及稳定控制做了论述。控制系统稳定地动作,还要求这个系统显示出好的控制结果,第7章讲述了如何表示控制系统的性能。

最后,第8章举出一个机械电子学中的重要问题即采用直流伺服电机控制回转体运动的例子,介绍了几种数字控制系统的基本设计方法。特别是在此次修订版中,介绍了作为有效控制方法的模型随动控制。

为了研讨所设计的控制系统是否恰当地仿真及验证各章练习题解答,第八章还附记了利用被广泛使用的控制系统设计用软件 MATLAB 的内容。

对于在编写本书时从策划到审校都给予了指导的名古屋大学名誉教授雨宫好文先生,以及出版时承蒙欧姆社(OHM SHA)给予的多方帮助,在此深表谢意。

高木章二

# 目 录

|       |                  |    |
|-------|------------------|----|
| 1     | 什么是数字控制          | 11 |
| 1.1   | 室内温度的控制          | 11 |
| 1.2   | 远距离操作的机器人手臂      | 15 |
| 1.3   | 微机控制             | 18 |
| 1.3.1 | 微机的构成            | 18 |
| 1.3.2 | 微机的动作            | 19 |
| 1.3.3 | A/D 转换器和 D/A 转换器 | 19 |
| 1.4   | 数字控制             | 23 |
|       | 本章要点             | 28 |
|       | 练习题              | 28 |
| 2     | 控制系统的表示方法        | 31 |
| 2.1   | 水槽流出液体的控制        | 29 |
| 2.2   | 水槽系统的方程式         | 31 |
| 2.3   | 方框图的绘制           | 34 |
| 2.4   | 用离散时间系统表示水槽系统    | 38 |
| 2.5   | 离散时间系统的方框图       | 41 |
|       | 本章要点             | 45 |
|       | 练习题              | 45 |
| 3     | 一阶系统的输出          | 47 |
| 3.1   | 没有输入时离散时间系统的输出   | 47 |
| 3.2   | 连续时间系统的输出        | 51 |
| 3.2.1 | 自由响应             | 51 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 3.2.2 阶跃状输入的输出 .....             | 52  |
| 3.3 连续时间系统的离散化 .....             | 55  |
| 3.4 有输入时离散化系统的解 .....            | 58  |
| 本章要点 .....                       | 63  |
| 练习题 .....                        | 63  |
| <br>4 二阶系统 .....                 |     |
| 4.1 二阶系统的例子 .....                | 65  |
| 4.2 模拟二阶系统的表示方法 .....            | 70  |
| 4.3 模拟二阶系统的响应 .....              | 73  |
| 4.3.1 自由响应和状态 .....              | 73  |
| 4.3.2 阶跃响应 .....                 | 76  |
| 4.4 离散化系统的响应 .....               | 82  |
| 4.4.1 利用欧拉近似的状态方程式的<br>离散化 ..... | 82  |
| 4.4.2 状态 .....                   | 84  |
| 4.4.3 自由响应 .....                 | 88  |
| 本章要点 .....                       | 90  |
| 练习题 .....                        | 90  |
| <br>5 二阶系统的精确离散化 .....           |     |
| 5.1 用向量表示状态方程式 .....             | 93  |
| 5.1.1 向量和矩阵 .....                | 93  |
| 5.1.2 行列式和逆矩阵 .....              | 99  |
| 5.1.3 状态方程式 .....                | 103 |
| 5.2 传递函数和状态方程式的关系 .....          | 104 |
| 5.3 状态方程式的解 .....                | 107 |
| 5.4 状态方程式的离散化 .....              | 110 |
| 本章要点 .....                       | 115 |
| 练习题 .....                        | 115 |

## 6 控制系统的稳定问题

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.1 火箭的姿态控制 .....        | 117 |
| 6.2 判断是否稳定的方法 .....      | 122 |
| 6.2.1 连续时间系统 .....       | 122 |
| 6.2.2 离散时间系统 .....       | 127 |
| 6.3 可控制系统 .....          | 131 |
| 6.3.1 可控性 .....          | 132 |
| 6.3.2 可观性 .....          | 136 |
| 6.3.3 控制系统特征值的任意配置 ..... | 139 |
| 本章要点 .....               | 142 |
| 练习题 .....                | 142 |

## 7 控制性能

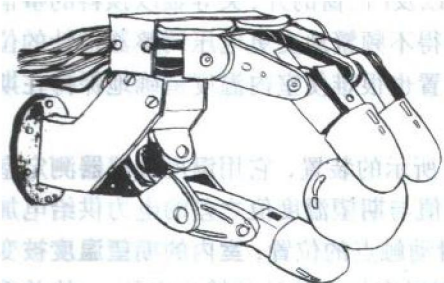
|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 7.1 稳态特性(稳态偏差) .....              | 145 |
| 7.1.1 用直流伺服电机的回转体运动控制系统 .....     | 146 |
| 7.1.2 与目标值相关的稳态偏差 .....           | 150 |
| 7.1.3 与外扰相关的稳态偏差 .....            | 156 |
| 7.2 过渡特性(速应性和衰减性) .....           | 158 |
| 7.2.1 二阶系统的场合 .....               | 158 |
| 7.2.2 高阶系统的场合 .....               | 161 |
| 7.2.3 利用模型表示过渡特性 .....            | 167 |
| 7.3 离散时间系统期望的极点范围 .....           | 168 |
| 7.3.1 连续时间系统的极点同离散时间系统极点的对应 ..... | 168 |
| 7.3.2 期望的极点范围 .....               | 170 |
| 本章要点 .....                        | 171 |
| 练习题 .....                         | 172 |

## 8 采用直流伺服电机的位置控制系统的设计

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 8.1 比例控制 .....          | 176 |
| 8.1.1 控制系统的开环脉冲传递函数 ... | 176 |
| 8.1.2 用根轨迹法分析过渡特性 ..... | 177 |
| 8.2 具有速度反馈的比例控制 .....   | 179 |
| 8.2.1 开环脉冲传递函数 .....    | 179 |
| 8.2.2 指定极点的设计 .....     | 180 |
| 8.2.3 控制系统的响应 .....     | 181 |
| 8.3 模型随动系统 .....        | 183 |
| 8.3.1 控制系统的规范模型 .....   | 183 |
| 8.3.2 控制对象的模型 .....     | 184 |
| 8.3.3 控制系统的构成 .....     | 185 |
| 8.3.4 控制系统的响应 .....     | 186 |
| 本章要点 .....              | 189 |
| 练习题 .....               | 189 |
| 练习题答案 .....             | 191 |
| 参考文献 .....              | 201 |

# 第 1 章

## 什么是数字控制



### 1.1 室内温度的控制

研究一个目的在于使室内的温度保持在所期望温度的问题。假定期望的室内温度比室外的温度高。首先,考虑图 1.1 所示的向电加热器供给一定电力的装置。供给电加热器的电力与电压调整器指针所显示的数字间的关系如图 1.2 所示。这时,如果室

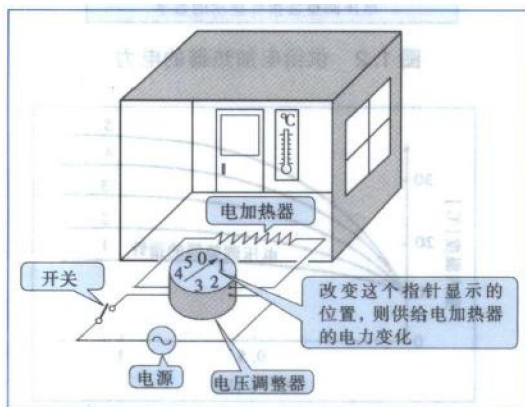


图 1.1 用电加热器的室内暖房装置

内的人员考虑现在的气温把电压调整器的指针调整到适当的位置,经过一定时间后,室内达到舒适的温度(图 1.3),这样的室内温度的操作称为控制。所谓控制,一般来说是指“对对象施加操作,使构成对象的物体做所希望的动作”。

上述的场合,需要人去正确地确定电压调整器的指针位置。可是,由于室外温度的变化以及门、窗的开、关等难以预料的事情引起室内温度的变化,人不得不频繁地变更电压调整器指针的位置。即使这样,图 1.1 的装置也很难使室内温度精确地保持在期望值。

因此,考虑采用图 1.4 所示的装置,它用温度传感器测定室内温度,将对应于实测温度值与期望温度值之差的电力供给电加热器。通过设定电位计的滑动触点的位置,室内的期望温度被变换为与此对应的电压。期望温度与电位计的输出电压  $e_d$  的关系

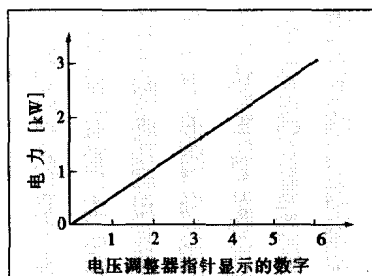


图 1.2 供给电加热器的电力

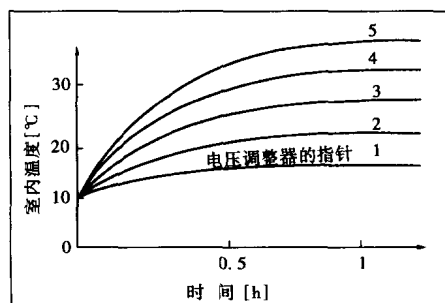


图 1.3 室内温度的变化(室外温度  $10^{\circ}\text{C}$ )