

机器人控制

陈明哲 编著

北京航空航天大学出版社

机器人控制

陈明哲 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书较全面地介绍了机器人的控制方法、技术实现以及传感技术与智能控制等。全书分为三章。第一章介绍机器人的一些主要控制方法，使读者能比较全面地了解机器人控制方法与理论；第二章介绍实现机器人控制的一些主要技术问题；第三章介绍传感技术与智能控制，主要是为了拓广读者的视野，了解智能机器人的概貌。

书后附有较多的新近的参考文献。

本书适宜于大专院校与机器人有关专业的师生阅读，也可供有关工程技术人员参考。

2R35/b6

机 器 人 控 制

JI · QIREN KONGZHI

陈明哲 编著

责任编辑 陶金福

*

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

北京航空航天大学印刷厂印装

*

开本787×1092 1/32 印张，5.125 字数，118千字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷 印数，3000册

ISBN 7-81012-101-4/TP·017 定价：1.05元

前 言

本书是作者近年来在从事机器人控制研究和教学工作的基础上编写的，曾作为研究生教材讲授过两次。本书较全面地介绍了机器人的主要控制方法、技术实现以及传感技术与智能控制等。目的在于使读者能全面、系统地了解机器人控制的理论与技术，有助于进一步研究机器人控制方法和研制机器人控制器。书末参考文献丰富，使读者学完本书后，能较快地进入专题研究。

全书分为三章。第一章介绍机器人的一些主要控制方法。许多学者对机器人控制问题进行了研究，提出了不少方法。遗憾的是一些方法只有理论意义，一些方法只有仿真结果，由于计算量大等等原因而未能在工业机器人上得到应用。因此在理论与实际相结合方面还有许多事情要做。希望通过本章介绍的方法的学习与研究，能够缩短理论与实际的距离，创造新的实用控制方法。第二章介绍一些主要的技术问题，着重介绍电驱动方式。本章内容比较扼要，有关这些技术问题的细节可参阅书末的文献。第三章介绍传感技术与智能控制，主要是为了拓广读者的视野，了解智能机器人的概貌。

对于主要从事机器人机械方面研究的人员，可以着重学习：概论，第一章的1.1，1.2，1.3，1.7节，第二章等；对于从事机器人控制研究的人员，建议通读全书。阅读本书时，需要掌握自动控制原理、现代控制理论基本知识和有关

机器人结构与力学的知识。

本书适宜于大专院校与机器人有关专业的师生阅读，也可供有关工程技术人员参考。

在本书的编写过程中，作者的导师张启先教授给予许多帮助和指导，出版社陶金福老师付出了许多辛勤劳动，在此一并深表感谢。

由于水平有限，错误与缺点在所难免，希望读者批评指正。

作者 1988年4月
于北京航空航天大学

概 论

自动化技术水平是一个国家科学技术水平的重要标志。从生产发展的历史来看,自动化是机器生产的高级形式。工业生产自动化大致可分为三个方面:1.连续生产(如化工工业等)自动化,这方面自动化程度很高;2.非连续生产(如机械工业等)自动化,在大批量生产的情况下,由于采用了自动机床等,自动化水平也很高;3.在中、小批量生产情况下,采用各种程控机床、数控机床、机械手和机器人,自动化程度也较高。当然,机器人的研制发展已远不是解决中、小批量生产的自动化问题和改善工人的生产劳动条件等,目前机器人已经向非工业生产领域(如宇宙与海洋开发、救灾、社会福利等)拓广应用,并且与人工智能等学科相结合,进一步向智能机器人方向发展。

本书叙述操作型机器人的一些控制方法和控制技术问题。对于步行机器人和主从遥控机器人的控制不作介绍。尽管这两种机器人的控制方法与操作型机器人有相似之处,但它们还是有其独特内容。关于机器人的结构、运动学和动力学等问题请参看有关书籍。

操作型机器人(下简称机器人)的典型工作任务有三种:1.点位运动(Point to Point, PTP),常见于搬运工作等;2.连续轨迹运动(Continue Path, CP),常见于喷漆、电弧焊等工作;上述两种工作任务常常对手部的姿态有所要求;3.装配工作,典型的工作任务是将销子插入孔中。

机器人的工作任务一般在基座空间（即与基座相连的坐标系确定的空间）中给定，而所需要的控制指令往往在关节空间中给定，因此必须从机器人的运动学方程^[1]

$$\bar{X} = f(q) \quad (0-1)$$

来求解关节坐标：

$$q = f^{-1}(\bar{X}) \quad (0-2)$$

式中： \bar{X} 为基座空间的6维矢量，表示手部的位姿（位置与姿态）；

q 为关节空间 n 维矢量， n 为自由度数。

以上问题称为运动学反解问题。由于式(0-1)为非线性超越方程组，因此上述求解过程相当困难，并且出现多值解。不过对于特殊结构参数的机器人求解还是比较简单。这里还须进一步研究实时递推解法。

根据力学原理可以建立如下机器人动力学方程：

$$A(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q})\dot{q} + C(q) = u \quad (0-3)$$

式中： $A(q)$ ， $B(q, \dot{q})$ 为 $n \times n$ 矩阵；

$C(q)$ ， u 为 $n \times 1$ 矩阵；

u 为输入力矩（控制量）。

有好几种方法可以建立机器人动力学模型^[2~4]，但它们在计算量等方面各有优缺点。现在一般认为牛顿-欧拉方法计算量比较小。另外，比如Kane方程法^[5]，计算量也比较小，但是由于用了准坐标、偏速度等，用它来研究机器人的动力学特性并不方便。

一般认为机器人系统是一个大系统，对它的控制采用递阶控制。机器人的递阶控制一般分为三级：决策级、策略级和执行级。

1. 决策级：识别环境，建立环境模型，理解任务涵

义，将任务分解为基本动作序列；

2. 策略级：将基本动作变为关节坐标协调变化的规律，分配给各关节伺服系统；

3. 执行级：各个关节伺服系统执行给定指令等。

决策级控制应属于智能控制范围，目前决策级控制基本上还是由人来完成。本书着重讨论执行级控制问题。现在有将机器人按代来划分：以示教——再现为主要特征的称为第一代机器人，把使用较多传感器、具有初步智能的机器人称为第二代，而具有较多智能的称为第三代机器人。本书所叙述的方法基本上限于第一代机器人。

因为本书牵涉到的变量很多，所以作如下约定：每一节所用的字母符号的意义一般只限于本节内。

目 录

前 言

概 论

第一章 机器人的一些控制方法

- 1.1 预备知识····· (1)
- 1.2 运动学控制方法与计算力矩法····· (11)
- 1.3 经典控制方法····· (18)
- 1.4 变结构控制方法····· (31)
- 1.5 拟哈密顿函数方法····· (36)
- 1.6 最优控制方法····· (42)
- 1.7 力反馈控制方法····· (50)
- 1.8 分散控制方法····· (59)
- 1.9 自适应控制方法····· (70)
- 1.10 其他方法····· (80)

第二章 机器人控制系统的技术问题

- 2.1 电机伺服系统····· (85)
- 2.2 示教——再现技术····· (100)
- 2.3 计算机控制系统与机器人语言简介····· (107)

第三章 传感技术与智能控制概述

- 3.1 机器人传感技术简介····· (119)
- 3.2 智能控制概述····· (138)

- 参考文献····· (147)

第一章 机器人的一些控制方法

1.1 预备知识

在实际中，一些系统可以表为二阶常微分方程

$$J\ddot{\theta} + F\dot{\theta} + h\theta = Ku \quad (1-1)$$

式中： θ 为输出量；

u 为输入量；

J 、 F 、 h 和 K 为常系数。

对式 (1-1) 进行拉氏变换，得

$$(Js^2 + Fs + h)\theta(s) = Ku(s) \quad (1-2)$$

于是系统的开环传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{K}{Js^2 + Fs + h} \quad (1-3)$$

对该系统引入单位负反馈，于是闭环系统的传递函数为 (图 1-1)

$$\frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{K}{Js^2 + Fs + (h+K)} \quad (1-4)$$

式中： $R(s)$ 为输入信号的象函数；

$$R(s) = \theta(s) + u(s)$$

闭环传递函数式 (1-4) 的分母即为系统的特征方程。一般形式的特征方程为

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (1-5)$$

式中： ζ 为阻尼比；

ω_n 为自然频率。

对照式 (1-4) 分母与式 (1-5)，可知

$$\omega_n^2 = \frac{h+K}{J}, \quad 2\zeta\omega_n = \frac{F}{J} \quad (1-6)$$

为了求得图1-1系统的稳态误差 $u(\infty)$ ，应先将式 (1-4) 变换，得

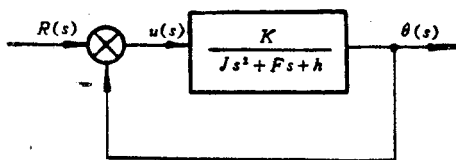


图 1-1

$$u(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)} \quad (1-7)$$

设输入为定值信号，即 $R(s) = C_1/s$ ；然后运用终值定理

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s u(s) \quad (1-8)$$

可求得

$$u(\infty) = \frac{C_1 h}{K + h} \quad (1-9)$$

实际上，常对图1-1系统采用比例——积分——微分 (PID) 控制 (如图1-2所示)，以改善系统的品质。图中 K_P 为增益系数， T_I 和 T_d 为时间常数。

上面介绍的是单输入单输出线性定常系统。对于多输入多输出系统，其动态方程可表为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{状态方程}) \quad (1-10)$$

$$y = Cx + Du \quad (\text{输出方程}) \quad (1-11)$$

式中： x 为 n 维矢量，表示系统的状态；
 u 为 p 维矢量，表示 p 个输入；
 y 为 m 维矢量，表示 m 个输出，
 A 为 $n \times n$ 矩阵， B 为 $n \times p$ 矩阵， C 为 $m \times n$ 矩阵， D
 为 $m \times p$ 矩阵；上述矩阵一般为时变矩阵。

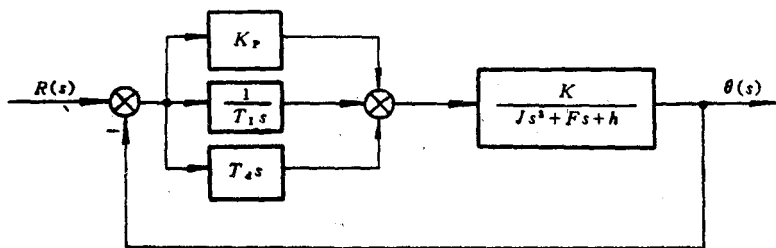


图 1-2

状态方程 (1-10) 可用拉氏变换来求解 (设 A , B 为常数矩阵)。对式 (1-10) 取拉氏变换，得

$$sX(s) - x(0) = AX(s) + BU(s) \quad (1-12)$$

式中： $x(0)$ 为 $x(t)$ 的初始值。

$$\text{即 } X(s) = [sI - A]^{-1}x(0) + [sI - A]^{-1}BU(s) \quad (1-13)$$

对式 (1-13) 取拉氏反变换，得

$$\begin{aligned} x(t) = & L^{-1}[(sI - A)^{-1}]x(0) \\ & + L^{-1}[(sI - A)^{-1}BU(s)] \end{aligned} \quad (1-14)$$

另外，对于齐次状态方程

$$\dot{x} = Ax \quad (1-15)$$

可以知道其解为

$$x(t) = \left[I + A(t - t_0) + \frac{1}{2!} A^2(t - t_0)^2 + \dots \right] x(t_0) \quad (1-16)$$

定义矩阵指数 (为简单起见, 令 $t_0 = 0$, $x(t_0) = x(0)$) :

$$e^{At} \stackrel{\text{def}}{=} I + At + \frac{1}{2!} A^2 t^2 + \dots \quad (1-17)$$

于是式 (1-15) 的解可表为

$$x(t) = e^{At} x(0) \quad (1-18)$$

对照式 (1-14) 与式 (1-18), 有

$$e^{At} = L^{-1}[(sI - A)^{-1}] \quad (1-19)$$

根据卷积定理, 有

$$\begin{aligned} & L^{-1}[(sI - A)^{-1} B U(s)] \\ &= \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (1-20)$$

最后得到

$$x(t) = e^{At} x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau \quad (1-21)$$

关于系统方程 (1-15) 平衡点的稳定性, 即系统对于干扰 $x(0)$ 的响应 $x(t)$ 的特性, 可用矩阵 A 的特征值来判断。

从式 (1-13) 可知

$$[sI - A]^{-1} = \frac{\text{adj}[sI - A]}{\det[sI - A]}$$

式中: $\det[sI - A]$ 为 A 阵的特征多项式。

可以证明, 系统方程 (1-15) 渐近稳定的充要条件是 A 阵所有特征值都具有负实部。

目前在系统的稳定性分析中, 李雅普诺夫第二方法用得比较多。该方法先得设定一个李氏函数 $V(x)$, $V(x)$ 具有

下列性质：

1. $V(x)$ 的一阶偏导数连续；
2. $V(x)$ 正定，且 $V(0)=0$ ；
3. 当 $\|x\| \rightarrow \infty$ 时， $V(x) \rightarrow \infty$ 。

然后将 $V(x)$ 沿系统方程的解轨迹对时间求导，

$$\text{即} \quad \dot{V}(x) = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) \dot{x} \quad (1-22)$$

若 \dot{V} 为半负定，系统是稳定的；

若 \dot{V} 为负定的，系统是渐近稳定的；

当 \dot{V} 为半负定时，若系统的解轨迹都不包含在 $\dot{V}=0$ 的集合中，则系统也是渐近稳定的。

对于系统方程 (1-15) 可以选下列二次型为可能的李氏函数：

$$V(x) = x^T P x \quad (1-23)$$

式中： P 为 $n \times n$ 对称正定矩阵。

$$\begin{aligned} \text{于是} \quad \dot{V} &= \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} = (Ax)^T P x + x^T P Ax \\ &= x^T (A^T P + P A) x \end{aligned} \quad (1-24)$$

$$\text{令} \quad A^T P + P A = -Q \quad (1-25)$$

则系统方程 (1-15) 稳定的充分条件是 Q 必须为半正定。

选取李氏函数需要一定的技巧。比如对于不同的系统，可以选下列函数：

$$V(x) = (x^T K x)^{\frac{1}{2}} \quad (1-26)$$

$$V(W) = \text{tr}(W^T K W) \quad (1-27)$$

作为李氏函数（这在以后章节中还要详细介绍）。

式中： x 为矢量；

K 为正定矩阵；

W 为矩阵。

下面介绍最优控制问题。

给出系统的品质指标：

$$J_1(u) = \int_0^{t_f} (\|x\|_Q^2 + \|u\|_R^2) dt + x^T(t_f)Gx(t_f) \quad (1-28)$$

式中： $\|x\|_Q^2 \triangleq x^T Q x$

$\|u\|_R^2 \triangleq u^T R u$

矩阵 $Q \geq 0$, $G \geq 0$, $R > 0$

t_f 为末时刻。

对系统方程 (1-10) 在上述指标下的最优控制可以用几种方法求得，但对于二次型指标线性调节器问题用哈-雅方程求解是比较方便的。

先考虑系统方程

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1-29)$$

与品质指标

$$J_2(x(t), u, t) = \int_t^{t_f} l[x(s), u(s), s] ds + m(x(t_f), t_f) \quad (1-30)$$

使指标方程 (1-30) 最小的控制应满足下述方程^[6]

$$-\frac{\partial J_2(x(t), u, t)}{\partial t} = \min_u \left\{ l(x(t), u(t), t) + \left[\frac{\partial J_2(x(t), u, t)}{\partial x} \right] f(x, u, t) \right\} \quad (1-31)$$

方程 (1-31) 就是著名的哈-雅方程。

若 u^* 为最优控制，则满足下列方程：

$$-\frac{\partial J_1^*(x(t), u^*, t)}{\partial t} = l(x(t), u^*(t), t) + \left[\frac{\partial J_1^*(x(t), u^*, t)}{\partial x} \right] f(x, u^*, t) \quad (1-32)$$

对于系统方程 (1-10) 与品质指标方程 (1-28), 可以证明^[7] 最优指标 J_1^* 可表为

$$J_1^* = x^T(t)P(t)x(t) \quad (1-33)$$

式中: $P(t)$ 为对称矩阵。

因此由式 (1-31) 可得

$$-x^T \dot{P}x = \min_u \{ u^T R u + x^T Q x + 2x^T P A x + 2x^T P B u \} \quad (1-34)$$

式 (1-34) 右边可以通过配方得到

$$\begin{aligned} & u^T R u + x^T Q x + 2x^T P A x + 2x^T P B u \\ &= (u + R^{-1} B^T P x)^T R (u + R^{-1} B^T P x) \\ & \quad + x^T (Q - P B R^{-1} B^T P + P A + A^T P) x \end{aligned} \quad (1-35)$$

因为 R 是正定的, 所以推得最优控制:

$$u^* = -R^{-1} B^T P x \quad (1-36)$$

使式 (1-34) 最小, 这时式 (1-34) 变为

$$-x^T \dot{P}x = x^T (Q - P B R^{-1} B^T P + P A + A^T P) x \quad (1-37)$$

上式应对所有 x 都成立, 因此得

$$-\dot{P} = P A + A^T P - P B R^{-1} B^T P + Q \quad (1-38)$$

式 (1-38) 称为矩阵黎卡笛方程。根据式 (1-38) 可以求得矩阵 P , 从而构成式 (1-36) 所示的最优控制。

类似地可以得到无限时情况 (即 $t_f \rightarrow \infty$) 的解。这时对于常数矩阵 A, B , 最优控制为

$$u^* = -R^{-1}B^T P x \quad (1-39)$$

式中： P 为常数矩阵，是方程：

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (1-40)$$

的解。

为了增加系统的稳定度，可以要求系统的特征值位于复平面的一定区域内，比如可以要求在左半平面上，位于 $\text{Re}(s) = -\alpha (\alpha > 0)$ 左侧的那部分区域内。于是可以将稳定度 α 引入品质指标中：

$$J_3 = \int_0^{\infty} e^{2\alpha t} (\|x\|_Q^2 + \|u\|_R^2) dt \quad (1-41)$$

然后用与上述类似的方法求解最优控制问题^[7]。

下面导出方程(1-10)与(1-11)的离散形式。在计算机控制系统中， $u(t)$ 一般是阶梯输入（采用零阶保持器），即

$$u(t) = u(kT) = \text{const}, \quad kT \leq t < (k+1)T, \quad (1-42)$$

式中： T 为采样周期。

从式(1-21)可得（注意 $e^{AT} = e^{A((k+1)T - kT)}$ ）：

$$\begin{aligned} x[(k+1)T] &= e^{AT} x(kT) \\ &+ \int_{kT}^{(k+1)T} e^{A((k+1)T - \tau)} B u(kT) d\tau \end{aligned} \quad (1-43)$$

由于 $u(kT)$ 在积分区间内为恒量，当取积分变换替换 $t = (k+1)T - \tau$ 时，有

$$\begin{aligned} &\left(\int_{kT}^{(k+1)T} e^{A((k+1)T - \tau)} B d\tau \right) u(kT) \\ &= \left(\int_0^T e^{At} B dt \right) u(kT) \end{aligned} \quad (1-44)$$

于是得到方程(1-10)与(1-11)的离散状态方程：