

编著

姜剑虹

吴克坚

金月敏

机器人机械学

江苏科学技术出版社

机 器 人

机械学

金万敏 吴克坚 姜剑虹 编著

江苏科学技术出版社

(苏)新登字第002号

机器人机械学

金万敏 吴克坚 姜剑虹编著

出版发行：江苏科学技术出版社

经 销：江苏省新华书店

印 刷：江苏华星印刷有限公司

开本 787×1092 毫米 1/32 印张 16.5 插页 6 字数 361,000

1994 年 4 月第 1 版 1994 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—1,000 册

ISBN 7—5345—1766—4

TP·39

定价：12.00 元

责任编辑 钱 亮

我社图书如有印装质量问题，可随时向承印厂调换。

内 容 提 要

机器人机械学是机器人学的重要组成部分,是从事机器人控制及机器人智能研究所必须掌握的知识。本书共分十章,第一章、第二章讨论了机器人的机构组成、自由度、结构及应用;第三章介绍了空间位姿的描述与变换;第四至第八章详细介绍了机器人运动学和动力学问题,包括机器人运动学的正逆解、雅可比阵、工作空间、轨迹规划及动力学建模方法等;第九章进一步讨论了机器人运动弹性动力学问题;第十章提出了机器人机构优化与综合的几种方法。

本书可作为从事机器人研究工作者的参考资料,也可作为高校机械学、自动控制、一般力学等专业研究生和高年级大学生的教材。

验，使它逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金，以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世，还得到江苏联合信托投资公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持，特此表示衷心感谢！

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

前 言

最近二十年来, 机器人技术发展迅速, 应用领域不断扩大, 并由此形成了一门新的学科——机器人学。机器人学反映了多学科理论的综合运用, 其所研究的问题涉及到机械学、自动控制、计算机电子工程、传感器技术、仿生学、人工智能等知识领域。按其研究内容, 机器人学大致可以划分为机器人机械学、机器人控制及机器人智能三个方面。

本书作为机器人学的重要组成部分, 从机械学的角度出发系统阐述了机器人的机构组成、运动学、动力学及机构综合等方面的内容。机器人机构是一种多自由度、多杆的、开链型(或含局部闭链)的空间机构, 是一个复杂的、可控的多体系统, 它有别于传统的闭链型机构。因此, 一方面机器人机械学的研究需要经典的机械学理论, 另一方面经典机械学理论亦在机器人机械学的研究中得到补充和开拓。

本书是以笔者多年从事机器人研究的经验为基础, 结合介绍了机器人机械学的基础理论及国内、外的最新研究成果。书中第一、二章对目前的机器人机构作了系统的归纳和讨论。第三章讨论了本书阐述问题所采用的数学工具。第四至第八章介绍了有关机器人运动学和动力学的理论, 包括机器人机构的正、逆解, 雅可比矩阵, 运动学与静力学关系, 工作空间, 轨迹规划, 动力学建模等。这些内容一方面反映了有关机器人运动学和动力学的经典理论; 另一方面, 对机器人早期理论作了补充, 并进行了更深入的探讨。第九章所讨论

的机器人运动弹性动力学的问题是近年来才被重视和广泛研究的，本书所提出的方法反映了笔者近年的研究成果。第十章所提出的机器人机构优化与综合问题，同样是一个新的课题，目前尚有待于深入研究。

现代工业机器人的出现和发展正在使传统的工业生产方式逐步向自动化、智能化和无人化方向迈进，同时，在农业、社会服务、海洋开发、宇航、军事等领域，机器人的应用范围也越来越广。毫无疑问，随着机器人技术的发展，必将改变我们的生产和生活方式。我国的机器人研究工作自70年代末80年代初起步以来，目前已经进入商品化阶段。希望本书的出版能为机器人工作者、高校有关教师、研究生和大学生等提供有益的参考。

参加本书编写的还有徐卫良博士、凌云博士、钱瑞明副教授、查选芳讲师、李昊同志、黄正欧同志。日本山梨大学牧野洋教授对本书提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢！

编 者

一九九三年五月

符 号 表

- A 无因次加速度
 A_i 连杆间位姿变换矩阵
 A_i^* 辅助变换矩阵
 a 加速度, 实系数
 a_i 连杆长度, 实系数
 $\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)^T$ 接近矢量
 B_i 坐标转换矩阵
 B_i^* 坐标转换子矩阵
 b 实系数
 b_i 实系数
 C 系统阻尼矩阵
 C_i 杆阻尼矩阵
 c 实系数
 c_i 质心, 实系数
 $\hat{c}_i$ 对偶空间的点
 $\vec{D}$ 微分运动矢量
 D 系统陀螺阻尼矩阵
 DR 驱动力波动函数
 D_i 杆陀螺阻尼阵, 重力项
 D_{i0} 单元陀螺阻尼矩阵
 D_{ij} 耦合惯量

D_{ii} 有效惯量

$D_{i,jk}$ 哥氏力项

$D_{i,jl}$ 向心力项

d_i 杆间距离, 杆变量

$\vec{d}_i$ 微分平移矢量

E 变换矩阵, 能量函数

E_i 模态变换矩阵

$(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ 基矢量

$(\vec{e}'_1, \vec{e}'_2, \vec{e}'_3)$ 基矢量

F 自由度数

$\vec{F}$ 系统广义力矢量

$\vec{F}_u$ 质点 u 上的主动力

$F^{(r)}$ 广义主动力

$F^{*(r)}$ 广义惯性力

$\vec{F}_{i0}$ 单元力向量

$\vec{F}_i$ 杆件力向量

$\vec{F}_i^*$ 杆件力向量

$\vec{\sim F}_i$ 杆件力向量

$\vec{\sim F}_i$ 杆件力向量

$\vec{f}_i$ 杆件间作用力矢

$\vec{f}_L$ 质点 L 上的主动力

$\vec{f}_L^*$ 质点 L 上的惯性力

g 重力加速度

$\vec{G}$ 重力加速度矢量

- $\vec{H}_i$ 力矢量
 H_i 惯量矩阵
 h 杆件参数
 I 单位阵
 i 角标
 $\vec{i}$ x 轴单位矢量
 I_{oi} 惯性张量
 I_{ii} 质量惯性矩 ($i = x, y, z$)
 I_{ij} 质量惯性积 ($i = x, y, z, j = x, y, z, i \neq j$)
 J 雅可比阵, 无因次跃动
 J^* 共轭矩阵
 J_i 关节标志
 j 角标, 跃动
 $\vec{j}$ y 轴单位矢量
 $\vec{K} = (R_x, R_y, R_z, 0)^T$ 空间矢量
 K 系统静刚度矩阵
 K_i 杆刚度矩阵
 K_{io} 单元刚度矩阵
 $\bar{K}_i$ 杆刚度矩阵
 $\widetilde{K}_i$ 杆刚度矩阵
 $\bar{K}_i^*$ 杆刚度矩阵
 K^d 系统动刚度矩阵
 K_i^d 杆动刚度矩阵
 K_{io}^d 单元动刚度矩阵
 $\bar{K}_i^d$ 杆动刚度矩阵
 K_i^{d*} 杆动刚度矩阵
 $\widetilde{K}_i^d$ 杆动刚度矩阵

$\vec{h}$ z 轴单位矢量

L 轨迹长度, 拉格朗日函数

ΔL 步长

l_i 杆长

M 系统质量矩阵

M_i 杆质量矩阵

M_i^* 杆质量矩阵

$\widetilde{M}_i$ 杆质量矩阵

$\overline{M}_i$ 杆质量矩阵

$\overline{M}_i^*$ 杆质量矩阵

$\widetilde{M}_i^*$ 杆质量矩阵

m_i 质量

m_μ 质点质量

$\vec{m}$ 矢量

N_{i0} 单元型函数

$N(J)$ 核空间

N 插补步数

$\vec{N}_i$ 力矩矢量

$\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)^T$ 法向矢量

O 坐标原点

$\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)^T$ 位移列向量

$\vec{Q}_{i0}$ 单元外力向量

$\vec{Q}_i$ 杆外力向量

$\widetilde{Q}_i$ 杆外力向量

$\overline{Q}_i$ 系统外力向量

$\widetilde{Q}_i^*$ 杆外力向量

$\overrightarrow{Q_i}$ 杆外力向量

$\overrightarrow{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ 关节广义坐标

$\dot{\overrightarrow{q}} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)$ 关节广义速度

$\ddot{\overrightarrow{q}} = (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n)^T$ 关节广义加速度

$\overrightarrow{r}$ 点矢

$\overrightarrow{r_i}$ 连接两杆坐标原点的矢量

R_i 方向余弦矩阵

R 惯性力函数, 姿态变换阵, 圆弧半径

$R(J)$ 值域空间

$U = U(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 位函数

U_{i0} 单元势能

U_i 杆势能

$\overrightarrow{u}$ 矢量

u_r 广义速率

$\overrightarrow{u_{i0}}$ 单元节点位移

$\overrightarrow{u_i}$ 杆节点位移

$\overrightarrow{u}$ 系统节点位移

V 无因次速度

V^m m 维向量空间

$\overrightarrow{V_{i0}}$ 质心速度

$\overrightarrow{V_i}$ 杆速度

$\overrightarrow{V_i^*}$ 牵连速度

$\overrightarrow{V_i^*}$ 相对速度

$\overrightarrow{V^{(r)}}$ 偏速度

$\dot{\vec{V}}_{ci}$ 质心加速度

$\dot{\vec{V}}_i$ 杆加速度

$\vec{v}$ 矢量, 速度

v_i 加权系数

$\vec{v}_\mu$ 质点 μ 速度

S 无因次位移, 弧长

S_i 静矩

$\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)^T$ 滑动向量

s 位移

T 齐次变换矩阵, 时间

T_i 位姿变换矩阵, 时间

T_{ci} 单元动能

T_r 姿态矩阵

T_i 位置矩阵

t 时间变量

Δt 时间间隔

$W_i(p)$ 工作空间

$\vec{X}$ 振型

(x, y, z) 直角坐标

$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 对偶空间坐标

(x', y', z', ω') 齐次坐标

Z_i 系数

$\vec{Z}_i$ z 轴单位矢量

α 广义欧拉角, 欧拉角, 实系数

β 广义欧拉角, 欧拉角, 实系数

ν 广义欧拉角, 欧拉角

- θ 广义欧拉角, 欧拉角
 ψ 广义欧拉角, 欧拉角
 ϕ 广义欧拉角, 欧拉角
 θ_i 关节转角, 连杆夹角
 λ 实数
 ω_i 角速度
 $\dot{\omega}$ 角加速度
 ω_i 固有频率
 $\dot{\omega}^{(r)}$ 偏角速度
 $\vec{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$ 关节广义驱动力
 ρ_i 密度
 $\vec{\rho}_i$ 质心点矢
 ε 对偶标记符
 $\vec{\Omega}$ 对偶矢量
 $\vec{\Omega}^0$ 对偶矢量
 $\hat{\Omega}$ 旋量
 ξ_i 阻尼比
 ϕ_i 固有模态
 ϕ^0 约束模态矩阵
 ϕ^I 主模态矩阵

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1.1 机器人的发展概况	1
§ 1.2 工业机器人系统	4
§ 1.3 工业机器人的主要应用领域	23
§ 1.4 工业机器人的特性参数	32
第二章 机器人机构	41
§ 2.1 空间机构自由度计算	41
§ 2.2 工业机器人的自由度配置	59
§ 2.3 机器人的手臂机构	63
§ 2.4 机器人的腕部机构	70
§ 2.5 机器人的手部机构	73
§ 2.6 机器人关节的驱动与传动机构	77
§ 2.7 行走机构	92
第三章 空间位姿的描述与变换	108
§ 3.1 齐次坐标	108
§ 3.2 齐次变换	111
§ 3.3 齐次变换的合成	120
§ 3.4 等效旋转变换	128

第四章 机器人机构运动学	134
§ 4.1 机器人的手部位姿	134
§ 4.2 D—H变换矩阵	142
§ 4.3 正向运动学方程	148
§ 4.4 几个逆运动学通用公式	162
§ 4.5 逆运动学方程的解	170
§ 4.6 逆运动学解的优化	198
第五章 机器人机构的雅可比矩阵	202
§ 5.1 微分变换	202
§ 5.2 机器人机构雅可比矩阵的建立	218
§ 5.3 速度分析中的雅可比矩阵	228
§ 5.4 静力分析中的雅可比矩阵	237
§ 5.5 雅可比矩阵的对偶性	252
第六章 机器人机构的工作空间	257
§ 6.1 工作空间的描述	257
§ 6.2 工作空间的边界曲线方程	266
第七章 机器人机构轨迹规划	281
§ 7.1 轨迹规划的一般问题	281
§ 7.2 关节空间的轨迹规划	283
§ 7.3 直角坐标空间的轨迹规划	295
§ 7.4 轨迹生成的旋量方法	304
第八章 机器人机构动力学	318

§ 8.1	牛顿-欧拉方法	319
§ 8.2	拉格朗日方法	339
§ 8.3	凯恩方法	373
§ 8.4	凯恩方法在机器人动力学中的应用	395
§ 8.5	动力学方程的等价性	429
第九章	机器人机构运动弹性动力学	439
§ 9.1	引言	439
§ 9.2	机器人构件的有限元方程	442
§ 9.3	机器人机构弹性动力学一般方程	449
§ 9.4	弹性动力学方程的坐标缩减	460
§ 9.5	机器人机构弹性动力分析	466
第十章	机器人机构综合与优化	474
§ 10.1	机器人机构的型综合	474
§ 10.2	机器人机构尺寸综合	490
§ 10.3	机器人机构的动力学优化设计	500
参考文献		511