

 Springer

# 应用机器人学： 运动学、动力学 与控制技术

(原书第2版)

Theory of Applied Robotics:  
Kinematics, Dynamics, and Control

[澳大利亚] 雷扎 N. 贾扎尔 (Reza N. Jazar) 著  
周高峰 等译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 应用机器人学：运动学、 动力学与控制技术

Theory of Applied Robotics: Kinematics,  
Dynamics, and Control

(原书第 2 版)

[澳大利亚] 雷扎 N. 贾扎尔 (Reza N. Jazar) 著

周高峰 崔陆军 朱 强 郭士锐 赵则祥 译

周高峰 赵则祥 李峰 校审



机械工业出版社

本书由澳大利亚墨尔本皇家理工大学的 Reza N. Jazar 所著，是原书的第 2 版。全书分为运动学、动力学和控制技术 3 个部分，共 15 章，主要内容包括：概述、旋转运动学、定向运动学、运动的运动学、正向运动学、逆向运动学、角速度、速度运动学、运动学中的数值法、加速度运动学、运动动力学、机器人动力学、路径规划、时间最优控制、控制技术。

本书可作为机械电子工程、电气工程、电子工程、自动控制等专业的高年级本科生、工程硕士生或博士生以及理工科大学教师的教学参考书，也可供从事机器人和自动化设备或生产线等应用开发工作的研发人员或相关工程技术人员学习和参考。

Translation from the English language edition:

Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control

by Reza N. Jazar

Copyright © Springer Science+Business Media, LLC 2006, 2010

Springer is part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可的出口，视为违反著作权法，将受法律制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2016-0510 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

应用机器人学：运动学、动力学与控制技术 / (澳) 雷扎·N. 贾扎尔 (Reza N. Jazar) 著；周高峰等译. —北京：机械工业出版社，2017.8

书名原文：Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control  
ISBN 978-7-111-57788-1

I. ①应… II. ①雷…②周… III. ①机器人学 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 203141 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：崔滋恩 责任编辑：崔滋恩 臧弋心 责任校对：张晓蓉

封面设计：马精明 责任印制：常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·37.75 印张·2 插页·919 千字

0001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-57788-1

定价：198.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-68326294

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面防伪标均为盗版

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## Reza N. Jazar 教授简介



Reza N. Jazar 系澳大利亚墨尔本皇家理工大学航空、机械与制造工程学院机械工程系教授，1990 年取得德黑兰理工大学硕士学位，研究方向为机器人学。1997 年，获得伊朗沙力夫理工大学博士学位，研究方向是非线性动力学和应用数学。1999 年，开始在北美的一些大学工作。

Reza N. Jazar 教授是经典动力学和非线性动力学方向的专家，他在动力学建模和数学建模方向有着丰富的经验。Reza N. Jazar 在很多大学工作过，他利用自己的工作经验，提出了许多理论和新思想，并且在经典动力学、机器人学、控制和非线性振动等方面也有很多的发现。Razi（拉齐）加速度、时间导数理论、无秩序变换、连铸机理论、汽车驱动器算法、浮动时间法、能量释放率理论、RMS 最优法，这些都是他的发现和新思想中的部分内容。

Reza N. Jazar 教授发表学术论文、技术报告 200 余篇，出版科技书籍 30 余本，其中包括《机器人学应用理论》《汽车动力学：理论与应用》。

他目前的研究方向是非线性振动与非线性动力学，包括汽车非线性振动与非线性动力学、机器人学、MEMS、轨道力学和机电一体化等。

# 译者序

当前, 机器人正在不断地替代人类完成繁重的体力劳动、部分脑力劳动以及在恶劣环境中的工作, 机器人正在成为现代工业中不可缺少的组成部分, 且发挥的作用越来越大。机器人技术是集机械、电子、自动控制、计算机、人工智能等学科领域中的相关知识和技术而形成的一项综合性应用技术。

商用机器人最早于 1961 年由美国 Unimate 公司正式生产, 随后各种商用机器人快速发展, 机器人理论也应运而生。

本书由澳大利亚墨尔本皇家理工大学的 Reza N. Jazar 教授所著, 从理论及应用的角度出发, 阐述机器人学应用理论。第 1 版由 Reza N. Jazar 教授于 2007 年在美国曼哈顿大学机械工程系任教期间出版, 第 2 版于 2010 年出版。本书是 Reza N. Jazar 教授在机器人学应用方面的多年教学和科研工作积累的成果, 是他对机器人学应用理论思考、总结和研究的集中体现。Reza N. Jazar 教授依据机器人学的主要构成和特点, 从理论应用层面将全书分为三个部分: 运动学、动力学和控制技术。本书对重要的内容、定理或结论进行了解释和证明, 同时总结了每章的主要内容, 说明了使用符号。全书布局合理, 逻辑性强, 论述严谨, 语言精练, 内容翔实, 深入浅出, 便于读者学习和掌握, 它充分体现出了 Reza N. Jazar 教授严谨治学的学者风范和教书育人的深厚情怀。本书不愧是机器人领域中的经典书籍, 值得广大读者学习、探讨、研究、应用和参考。

全书由周高峰、崔陆军、朱强、郭士锐、赵则祥翻译。周高峰、赵则祥、李峥峰负责全书统稿、整理和校对工作。具体分工如下: 前言、第 1~第 9 章和全书习题由周高峰翻译, 第 10、第 11 章由郭士锐翻译, 第 12 章由朱强翻译, 第 13~第 15 章由崔陆军翻译, 附录由赵则祥翻译。同时, 中原工学院机电学院尚会超博士、李峥峰博士、席建普博士、牛继高博士及高级实验师贺红勋和张素香也参与了部分章节的整理工作。

在此期间, 非常感谢中原工学院机电学院赵则祥教授、郑州大学信息工程学院王延年副教授、郑州大学机械工程学院赵凤霞教授对本书翻译稿件所提出的宝贵意见和建议, 同时也要感谢机械工业出版社对本书的出版所做的一切工作和努力, 最后要特别感谢中原工学院机电学院对译者的支持和指导。

本书可作为机械电子工程、电气工程、电子工程、自动控制等专业的高年级本科生、工程硕士生或博士生以及理工科大学教师的教学参考书, 也可供从事机器人和自动化设备或生产线等应用开发工作的研发人员或相关工程技术人员学习和参考。

由于译者水平有限, 加之时间仓促, 书中难免有不妥之处、缺陷甚至错误, 恳请广大读者、专家和学者批评指正, 意见和建议反馈邮箱: zhougf123456@sina.com。

郑州弘德苑 周高峰

# 原书第2版前言

如果没有来自我的学生们，特别是来自哥伦比亚大学的我的那些学生们的评论和建议的话，这本书将不可能有第2版。在本书所介绍的新内容中，很多都是学生反馈的直接结果，是他们帮助我提炼和整理了材料。

我写这本书的目的就是为学生提供能够用得上的知识。幸运的是，我已经成功地编写出了能够涵盖机器人学中包括细节和解释在内所有方面的一本参考书。

这本书的第1版是在2007年出版的。之后不久，它就成了机器人领域中广受欢迎的参考书。我很想感谢已经使用过或者参考过本书的学生和老师。是你们的问题、评论和建议帮助我创作了本书的第2版。

本书沿用第1版的符号体系。



# 原书第1版前言

本书作为课本是为工程专业的学生而设计的，它介绍了有关机器人学中的基础知识。利用这些基础知识能够为分析机器人系统中的运动学、动力学和控制开发计算机程序。

自从1970年以来，随着机器人领域的飞速发展，大量图书中出现了机器人学这个主题。然而，该主题与经典认知有关，在现代发展中仍然保持着热度。事实证明没有哪一本书能够涵盖机器人学中几乎所有的主题。由于机器人领域的持续发展，以及运动学、动力学和控制解析统一性的发展，对新书的需求日益上升。

机器人的古典运动学和动力学起源于过去4个世纪中伟大科学家们的研究工作，他们建立了方法学和动态系统行为的认识学。自从20世纪初期以来，动态科学的发展已经转向了可控的人工系统分析。因此，对于机器人的分析来说，人们期望发展的就是融合含有控制理论的运动学和动力学。

其他的重要发展就是精确快速的数字计算以及智能计算机编程。

## 本书层级

本书是由在非线形动态系统中的近几十年的研究发展演变而来的，可供有关机器人学中的本科生、研究生课程使用；主要用于高年级的本科生和一年级的工程研究生。该书最初讲授的就是机械系统中有关空间运动学和动力学的主题，因此，它提供的是有关机器人运动学和动力学的基础知识和前沿主题。整本书涵盖在两次连续的课程中；然而，跳过一些课程，在一门课程中集中学习本书也是可以的。本书要求学生具有运动学、动力学以及数值方法的一些基础知识。

本书的内容是处于应用理论层级。它深度地解释了许多概念，并且强调了这些概念的应用，同时解释和证明了大部分相关理论。在整本书中，特别强调引入概念的物理意义。所选定的主题都是机器人领域中特别感兴趣的课题。这样做的目的就是将机器人领域中大量的主题和方法介绍给学生。

## 本书组织架构

组织本书是为了便于教师教学和学生自学。

第1章“概述”，回顾了机器人基础，包括机器人的分类和发展历史。

第I部分“运动学”陈述了机器人的正向运动学和逆向运动学。运动学分析指机器人在关节与基座坐标系空间中的位置、速度和加速度分析。在末端执行器和关节变量之间建立运动学关系。引入了用于描述刚体坐标系的Denavit-Hartenberg (D-H)方法，并利用该方法进行正向运动分析。机器人的模块化处理概念可以很好地向我们展示如何综合分析简单连杆，以便对复杂机器人进行正向运动学处理。对于逆向运动学分析，本书介绍了耦合思想、逆矩阵方法和迭代技术。很明显，球形机械手的表述就需要我们将分析法应用于逆向运动学之中。

第Ⅱ部分“动力学”深入陈述和讨论了机器人动力学。这样做的一个目的就是回顾基本的方法，并说明这些方法怎样用于前面章节中提到的机器人运动学中的位移问题。此部分还介绍了递归的牛顿-欧拉 (Newton-Euler) 动力学、拉格朗日 (Lagrangian) 函数、机械臂惯性矩阵和广义力等概念，并将这些概念运用到运动的动态方程推导之中。

第Ⅲ部分“控制技术”说明了用于机器人的最优时间控制的上浮时间技术。这项技术可应用于开环控制算法之中。此部分还介绍了计算转矩的方法，在此过程中可利用前馈和反馈信号的合成确定系统误差动力学。

### 叙述方法

本书的叙述方法是“事实—原因—应用”。“事实”就是我们在每节中介绍的主题。“原因”就是对事实进行“证明”。最后将事实“应用”在一些例子中进行检验。相关实例是本书中非常重要的一部分，因为它们能够说明怎样应用在“事实”中所介绍的知识。它们也包含了一些需要扩展主题的其他“事实”。

### 前提条件

由于本书主要是为高年级本科生和一年级工程专业的研究生而编写的，因此有一个前提就是用户要熟悉矩阵代数和基本的反馈控制。对于本书的读者而言，前提条件就是读者要有运动学、动力学、矢量分析和矩阵论的基础。在本科前三年，通常讲授这些基础知识。

### 单位系统

本书所采用的单位系统是国际单位系统 (SI)，除非另有说明。度 (°) 或者弧度 (rad) 单位被用来表述角度变量的数量。

### 符号

- 1) 小写粗黑斜体字母用来表示矢量。矢量在  $n$  维欧几里得空间中表述。例如：

$$\begin{aligned} & \mathbf{r}, \mathbf{s}, \mathbf{d}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \\ & \mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{v}, \mathbf{w}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \\ & \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\delta}, \boldsymbol{\phi} \end{aligned}$$

- 2) 大写粗黑斜体字母用来表示动态矢量或者动态矩阵。例如：

$$\mathbf{F}, \mathbf{M}, \mathbf{J}$$

- 3) 带“^”的小写字母用来表示单位矢量。单位矢量不加粗。例如：

$$\begin{aligned} & \hat{i}, \hat{j}, \hat{k}, \hat{e}, \hat{u}, \hat{n} \\ & \hat{I}, \hat{J}, \hat{K}, \hat{e}_\theta, \hat{e}_\varphi, \hat{e}_\psi \end{aligned}$$

- 4) 带“~”的小写字母表示一个与一矢量相关的  $3 \times 3$  斜对称矩阵。例如：

$$\tilde{\mathbf{a}} = \begin{pmatrix} 0 & -a_3 & a_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$$

- 5) 两个字母上方的箭头表示起点和终点的位置矢量。例如：

$$\overrightarrow{ON} \text{ 表示一个从 } O \text{ 点到 } N \text{ 点的位置矢量。}$$

- 6) 小写字母上的一个双箭头表示与四元数相联系的  $4 \times 4$  矩阵。例如：



$$\vec{q} = \begin{pmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix} \quad q = q_0 + q_1 \hat{i} + q_2 \hat{j} + q_3 \hat{k}$$

7) 非粗体小写字母表示矢量的长度。例如：

$$r = |\mathbf{r}|, \quad a = |\mathbf{a}|, \quad b = |\mathbf{b}|, \quad s = |\mathbf{s}|$$

8) 大写黑体字母  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  表示旋转矩阵或变换矩阵。例如：

$$\mathbf{Q}_{z,\alpha} = \begin{pmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad {}^G\mathbf{T}_B = \begin{pmatrix} c\alpha & 0 & -s\alpha & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0.5 \\ s\alpha & 0 & c\alpha & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

9) 大写字母  $B$  用来表示刚体坐标系。例如：

$$B(oxyz)、B(Oxyz)、B_1(o_1x_1y_1z_1)$$

10) 大写字母  $G$  用来表示一个全局的惯性的或者固定的坐标系。例如：

$$G、G(XYZ)、G(OXYZ)$$

11) 变换矩阵右下标表示参考坐标系。例如：

$\mathbf{T}_B$  表示参考坐标系  $B(oxyz)$  的变换矩阵

12) 变换矩阵左上标表示目标坐标系。例如：

${}^G\mathbf{T}_B$  表示从参考坐标系  $B(oxyz)$  到目标坐标系  $G(OXYZ)$  的变换矩阵。

13) 当没有上下标时，矩阵用括号表示。例如：

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} c\alpha & 0 & -s\alpha & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0.5 \\ s\alpha & 0 & c\alpha & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

14) 矢量左上标表示描述矢量的坐标系。那个上标说明矢量所属的坐标，因此用那个坐标系的单位矢量表达矢量。例如：

${}^G\mathbf{r}$  表示坐标系  $G(OXYZ)$  中的位置矢量。

15) 矢量的右下标表示矢量的参考点。例如：

${}^G\mathbf{r}_P$  表示坐标系  $G(OXYZ)$  中点  $P$  的位置矢量。

16) 矢量左下标表示被测角度矢量参考的坐标系。例如：

${}^B\mathbf{v}_P$  表示坐标系  $B(oxyz)$  相对于全局坐标系  $G(OXYZ)$  的点  $P$  速度矢量。

如果左下标与左上标是相同的，那么可以省略左下标。例如：

$${}^B\mathbf{v}_P = {}^B\mathbf{v}_P$$

17) 角速度矢量右下标表示角速度矢量所参考的坐标系。例如：

$\omega_B$  表示刚体坐标系  $B(oxyz)$  的角速度

18) 角速度矢量左下标表示被测角速度矢量所参考的坐标系。例如：

${}^G\omega_B$  表示刚体坐标系  $B(oxyz)$  相对于全局坐标系  $G(OXYZ)$  的角速度

19) 角速度矢量左上标表示角速度矢量所在坐标系。例如：

${}^B_1\omega_{B_2}$  表示刚体坐标系  $B_1$  相对于全局坐标系  $G$  并且在刚体坐标系  $B_2$  中所表达的角速度。

当角速度矢量左下标和左上标相同时，通常省略左上标。例如：

$${}^G\boldsymbol{\omega}_B \equiv {}^G_G\boldsymbol{\omega}_B$$

20) 如果力矢量左下标是数字，则该数字表示在串联机器人中的坐标系数。坐标系  $B_i$  表示在关节  $i+1$  处所建立的坐标系。例如：

$\mathbf{F}_i$  表示坐标系  $B_i(oxyz)$  中所测的在关节  $i+1$  处的力矢量

在关节  $i$  处有一个从连杆  $i$  作用到连杆  $(i+1)$  的作用力  $\mathbf{F}_i$  和一个从连杆  $(i+1)$  到连杆  $i$  的反作用力  $-\mathbf{F}_i$ 。在连杆  $i$  上总是有来自连杆  $(i-1)$  的作用力  $\mathbf{F}_{i-1}$ ，以及来自连杆  $(i+1)$  的反作用力  $-\mathbf{F}_i$ 。作用力称为驱动力，反作用力称为从动力。

21) 如果力矩矢量右下标是数字，则该数字说明在串联机器人中的坐标系数。坐标系  $B_i$  表示在关节  $i+1$  处所建立的坐标系。例如：

$M_i$  表示坐标系  $B_i(oxyz)$  中所测的在关节  $(i+1)$  处的力矩矢量

在关节  $i$  处有一个从连杆  $i$  作用到连杆  $(i+1)$  的作用力矩  $\mathbf{M}_i$  和一个从连杆  $(i+1)$  到连杆  $i$  的反作用力矩  $-\mathbf{M}_i$ 。在连杆  $i$  上总是有来自连杆  $(i-1)$  的作用力矩  $\mathbf{M}_{i-1}$ ，以及来自连杆  $(i+1)$  的反作用力矩  $-\mathbf{M}_i$ 。作用力矩称为驱动力矩，反作用力矩称为从动力矩。

22) 导数算子的左上标表示变量求导所在的坐标系。例如：

$$\frac{{}^G d}{dt}x, \quad \frac{{}^G d_B}{dt}\mathbf{r}_P, \quad \frac{{}^B d_G}{dt}\mathbf{r}_P$$

如果变量是一矢量函数，定义矢量的坐标系与时间导数的坐标相同的话，那么我们可以使用下列简化的标记，

$$\frac{{}^G d_G}{dt}\mathbf{r}_P = G\dot{\mathbf{r}}_P, \quad \frac{{}^B d_B}{dt}\mathbf{r}_P = {}^B\dot{\mathbf{r}}_P$$

并用其简化方程。例如：

$${}^G\mathbf{v} = \frac{{}^G d_G}{dt}\mathbf{r}(t) = G\dot{\mathbf{r}}$$

23) 如果小写字母的后面跟着角度，那么在数学方程中小写字母  $c$  和  $s$  表示余弦  $\cos$  和正弦  $\sin$  函数。例如：

$$c\alpha = \cos\alpha, \quad s\varphi = \sin\varphi$$

24) 大写黑体字母  $\mathbf{I}$  表示取决于矩阵方程维数的单位矩阵，它是一个  $3 \times 3$  或  $4 \times 4$  单位矩阵。 $\mathbf{I}_3$  或  $\mathbf{I}_4$  用来区分单位矩阵的维数。例如：

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

25) 星号★表示更前沿的主题或者例子，对于本科教学和初次阅读可以不涉及这些主题和例子。

26) 平行符号 ( $\parallel$ ) 表示两平行的关节轴。

27) 用正交符号 ( $\perp$ ) 表示两正交的关节轴。两正交轴以直角交叉。

28) 用垂直符号 ( $\perp$ ) 表示两直角关节轴。对于同一参考系，两直角关节轴呈直角。

## 主要译者简介



**周高峰**，男，博士，副教授，陕西华县人，现从事机械电子工程专业的大学教学与科研工作。2002年获机械电子工程专业学士学位，2011年6月获西安交通大学机械电子工程专业博士学位。2002年8月作为助理工程师，在国内一家重型机械研究所从事机械结构设计工作。2010年作为研发中心副主任，从事立式车床工作台改造性设计工作。2011年7月作为国内一家国有研究院工程项目管理部部长，从事机械工程项目管理工作。自从2012年9月大学执教以来，主要讲授机械电子工程专业课程及其双语专业课程，研究方向为：柔性薄膜传感器、精密检测技术、机械结构设计与装配自动化、机电传动与控制、液压系统工程、工业机器人。多家国际学术期刊和国际会议的学术稿件审稿人、编委等，如JMMT、Sensor review、IEEE sensors Journal、Assembly automation、Industrial robot、IEEE transaction on mechatronics、Review of scientific instrument、IEEE sensors conference等。已发表学术论文30余篇，其中SCI/EI收录11篇，获国家授权发明专利3项，已主持出版中英文专业科技书籍3部。除此之外，还负责一些来自政府和企业的研发项目。



**崔陆军**，男，博士，副教授，山西长治人，现从事机械电子工程专业的大学教学与科研工作。2004年7月获机械电子工程专业学士学位，2010年4月于华中科技大学机械学院获机械电子工程专业博士学位。河南省高校精密制造工程技术研究中心和河南省高校重点学科开放实验室“现代制造装备及仪器实验室”的核心成员，郑州市科技创新团队的骨干教师，省级和校级青年骨干教师，近年来已在Journal of Computational and Theoretical Nanoscience、Optoelectronics Letters等国内外期刊或国际会议上发表科研论文近30余篇，其中被SCI/EI收录论文20篇，发明和实用新型专利各一项，公开发明专利10项。研究方向为测控与光纤传感技术。



**郭士锐**，男，河南南阳人，现从事机械设计的大学教学与科研工作。2014年7月获机械设计制造及其自动化专业博士学位。主要从事先进制造技术（激光加工技术）的研究。先后主持河南省高校科技计划项目，郑州市科技计划项目，参与国家自然科学基金，国家国际科技合作项目，浙江省重大科技专项重点工业项目，浙江省公益技术应用研究国际科技合作项目等纵向科研项目。还参与横向项目数项，如：激光熔覆再制造汽轮机转子项目，为杭州汽轮机股份有限公司解决了技术难题；参与研发用于刀具等薄片类零件的快速激光合金化技术，在杭州张小泉集团得到广泛应用。攻读博士期间获研究生国家奖学金和优秀毕业生等荣誉称号，在第10届全国激光加工学术会议上获优秀论文奖。截至目前共发表论文20篇，其中SCI/EI收录7篇。

# 目 录

译者序

原书第2版前言

原书第1版前言

第1章 概述	1	1.3.3 驱动	8
1.1 发展历史	1	1.3.4 控制	9
1.2 机器人元器件	2	1.3.5 应用	9
1.2.1 连杆	2	1.4 机器人运动学、动力学、控制概述	9
1.2.2 关节	3	★1.4.1 三元组	10
1.2.3 机械手	4	1.4.2 单位矢量	11
1.2.4 机械手腕	4	1.4.3 参考坐标系和坐标系统	11
1.2.5 末端执行器	4	1.4.4 矢量函数	13
1.2.6 驱动器	5	1.5 机器人动力学问题	14
1.2.7 传感器	5	1.6 主题预览	14
1.2.8 控制器	5	1.7 机器人——多学科交叉的机器	15
1.3 机器人的分类	5	1.8 本章小结	15
1.3.1 几何结构	5	习题	16
1.3.2 工作空间	7		

## 第 I 部分 机器人运动学

第2章 旋转运动学	21	★3.2 欧拉参数	70
2.1 绕全局直角坐标轴旋转	21	★3.3 欧拉参数的确定	75
2.2 绕全局直角坐标轴连续旋转	27	★3.4 四元数	77
2.3 全局翻滚角、俯仰角、偏航角	30	★3.5 自旋张量与旋转张量	80
2.4 绕局部直角坐标轴旋转	31	★3.6 表述旋转过程中的问题	82
2.5 绕局部直角坐标轴连续旋转	34	★3.6.1 旋转矩阵	83
2.6 欧拉角	35	★3.6.2 角轴	84
2.7 局部翻滚角、俯仰角、偏航角	43	★3.6.3 欧拉角	84
2.8 局部轴对全局轴旋转	44	★3.6.4 四元数	85
2.9 一般变换	46	★3.6.5 欧拉参数	87
2.10 主动变换和被动变换	51	★3.7 旋转的合成与分解	88
2.11 本章小结	53	3.8 本章小结	92
习题	54	习题	93
第3章 定向运动学	62	第4章 运动的运动学	100
3.1 轴角旋转	62	4.1 刚体运动	100

4.2 齐次变换 .....	103	★6.4 逆向运动技术比较 .....	249
4.3 逆齐次变换 .....	109	★6.4.1 解的存在性和唯一性 .....	249
4.4 复合齐次逆变换 .....	114	★6.4.2 逆向运动技术 .....	250
★4.5 螺旋坐标 .....	121	★6.5 奇异配置 .....	250
★4.6 逆螺旋运动 .....	134	6.6 本章小结 .....	252
★4.7 复合螺旋变换 .....	136	习题 .....	252
★4.8 普吕克(Plücker)坐标 .....	139	<b>第7章 角速度</b> .....	260
★4.9 线几何和面几何 .....	144	7.1 角速度矢量及其矩阵 .....	260
★4.9.1 矢量矩 .....	144	★7.2 时间导数和坐标系 .....	269
★4.9.2 角度和距离 .....	145	7.3 刚体速度 .....	276
★4.9.3 平面和线 .....	145	★7.4 速度变换矩阵 .....	280
★4.10 螺旋坐标和普吕克坐标 .....	148	7.5 齐次变换矩阵的导数 .....	286
4.11 本章小结 .....	149	7.6 本章小结 .....	292
习题 .....	150	习题 .....	292
<b>第5章 正向运动学</b> .....	158	<b>第8章 速度运动学</b> .....	298
5.1 D-H注释 .....	158	★8.1 刚性连杆速度 .....	298
5.2 相邻两坐标系间的变换 .....	164	8.2 正向速度运动学 .....	302
5.3 机器人正向位置运动学 .....	177	8.3 雅可比生成矢量 .....	310
5.4 球形手腕 .....	186	8.4 逆向速度运动学 .....	320
5.5 组装运动学 .....	194	8.5 本章小结 .....	326
★5.6 螺旋坐标变换 .....	203	习题 .....	326
★5.7 非D-H法 .....	207	<b>第9章 运动学中的数值法</b> .....	333
5.8 本章小结 .....	212	9.1 线性代数方程 .....	333
习题 .....	212	9.2 矩阵求逆 .....	343
<b>第6章 逆向运动学</b> .....	222	9.3 非线性代数方程 .....	348
6.1 解耦技术 .....	222	★9.4 连杆变换矩阵中的雅可比矩阵 .....	353
6.2 逆变换技术 .....	234	9.5 本章小结 .....	360
★6.3 迭代技术 .....	246	习题 .....	360

## 第Ⅱ部分 机器人动力学

<b>第10章 加速度运动学</b> .....	364	11.3 刚体旋转动力学 .....	404
10.1 角加速度矢量和角加速度矩阵 .....	364	11.4 惯性矩阵的质量矩 .....	411
10.2 刚体加速度 .....	371	11.5 牛顿运动方程的拉格朗日形式 .....	419
★10.3 加速度变换矩阵 .....	373	11.6 拉格朗日力学 .....	425
10.4 正向加速度运动学 .....	379	11.7 本章小结 .....	429
10.5 反向加速度运动学 .....	381	习题 .....	431
★10.6 刚性连杆的递归加速度 .....	385	<b>第12章 机器人动力学</b> .....	437
10.7 本章小结 .....	391	12.1 刚性连杆的牛顿-欧拉动力学 .....	437
习题 .....	392	★12.2 递归牛顿-欧拉动力学 .....	452
<b>第11章 运动动力学</b> .....	399	12.3 机器人拉格朗日动力学 .....	458
11.1 力和力矩 .....	399	★12.4 拉格朗日方程和连杆变换矩阵 .....	474
11.2 刚体移动动力学 .....	403	12.5 机器人静力学 .....	482

12.6 本章小结 .....	487	习题 .....	489
<b>第Ⅲ部分 机器人控制</b>			
<b>第13章 路径规划 .....</b>	<b>496</b>	15.2 计算转矩控制 .....	561
13.1 三次方路径 .....	496	15.3 线性控制技术 .....	564
13.2 多项式路径 .....	501	15.3.1 比例控制 .....	565
★13.3 非多项式路径规划 .....	510	15.3.2 积分控制 .....	565
13.4 基于关节路径规划的机械手运动 .....	512	15.3.3 微分控制 .....	565
13.5 笛卡儿坐标路径规划 .....	514	15.4 传感与控制 .....	567
★13.6 旋转坐标路径规划 .....	518	15.4.1 位置传感器 .....	568
13.7 末端执行器路径的机械手运动 .....	521	15.4.2 速度传感器 .....	568
13.8 本章小结 .....	529	15.4.3 加速度传感器 .....	568
习题 .....	530	15.5 本章小结 .....	569
★ <b>第14章 时间最优控制 .....</b>	<b>536</b>	习题 .....	569
★14.1 最优时间与 bang-bang 控制 .....	536	<b>参考文献 .....</b>	<b>572</b>
★14.2 浮动时间法 .....	543	<b>附录 .....</b>	<b>583</b>
★14.3 机器人时间最优控制 .....	549	附录 A 全局坐标系三重旋转 .....	583
14.4 本章小结 .....	553	附录 B 局部坐标系三重旋转 .....	584
习题 .....	553	附录 C 中心螺旋运动的三重组合旋转 .....	585
<b>第15章 控制技术 .....</b>	<b>557</b>	附录 D 三角函数公式 .....	586
15.1 开环控制和闭环控制 .....	557		

# 第1章

## 概 述

准则 0：机器人不可以伤害人类，或者由于故障使人遭受不幸。

准则 1：机器人不可伤害人，或者通过不动作，允许一个人受到伤害，如果这不违背高一级的准则。

准则 2：机器人必须严格执行人类给定的指令，除非所给的指令与高一级准则发生冲突。

准则 3：机器人必须保护它自己的存在，只要这样的保护不与高一级的准则发生冲突。

阿西莫夫·艾萨克 (Isaac Asimov) 提出了有关“机器人学”的这 4 个准则，以保护我们免受机器人智能化的影响。虽然我们距真正应用阿西莫夫准则还有一段时间，并不立即需要，然而这些准则对于制作计划是有好处的。

机器人学这个术语指的是对机器人的研究与使用。该术语于 1941 年在阿西莫夫的短篇小说科幻小说《借口》里第一次提出。

美国机器人学研究所给出了机器人的定义：机器人是一个可重复编程的多功能操纵器，为了执行不同的任务，通过不同的程序驱动可用于移动材料、工具或者专业化装置。

从工程的角度来说，机器人是一个复杂的通用装置，它包含了机械机构、传感系统和自动控制系统。机器人学的理论基础包括：力学、电气科学、自动控制、数学和计算机科学。

### 1.1 发展历史

大约在 1938 年，人们第一次发明了用于喷涂的位置控制装置，然而第一个现代工业机器人是于 20 世纪 60 年代由 J. Engelberger 所制造的通用机械手，它是机器人市场中的第一款机器人，因此 Engelberger 被称为机器人学之父。在 20 世纪 80 年代，由于自动化工业的巨大投资，机器人工业得到了快速发展。

在科研领域，第一个自动化设备可能是 Grey Walter 机器 (1940) 和 John 的霍普金四足动物。第一个可编程机器人是由 George Devol 于 1954 年设计开发的。1959 年，第一个商业化的可用机器人出现在市场上。1960 年以后，机器人机械手应用于工业，并且在 20 世纪 80 年代呈现飞速发展。

机器人的出现是遥控器技术和机床数控 (CNC) 技术这两大技术融合的结果。在第二次世界大战期间，人们开发了遥控器，用于加工放射性材料、新技术零件。因此，最初的机器人只不过是具有数字控制的机械连接，设计这样的机器人主要是将材料从点 A 传送到点 B。

今天，更复杂的应用（例如焊接、喷涂和装配）要求机器人有更多的运动能力和感知能



力。因此，一个机器人是一个多学科工程装置。其中机械工程用来设计机械元件、机械臂、末端执行器，也负责机器人的运动学、动力学和控制分析；电气工程主要负责机器人的驱动器、传感器、动力源和控制系统；系统设计工程负责机器人的感知和控制方法。编程或软件工程负责机器人的逻辑、智能、通信和联网。

今天，我们有 1000 多个与机器人相关的组织、协会和俱乐部；有 500 多种与机器人相关的杂志、期刊及报纸；每年有 100 多种与机器人有关的会议和竞赛；在大学里有 50 多门与机器人有关的课程。机器人有着巨大的工业应用市场，并且能应用于不同的技术操作。机器人的出现及发展提高了工业劳动生产率，部分避免了人们去面对那些令人厌烦的、单调乏味的或者危险的工作。而且，机器人可以比人更出色地完成许多操作，提供更高的精度和重复性。除了工业，机器人还可用于极端环境中。在许多领域，没有机器人的话，高技术标准几乎是不可能达到的。机器人可以在高温和低温环境中工作，甚至不需要光照、休息、新鲜空气、薪水或者升职。机器人是未来的机器，它的应用范围正在不断地扩大，其结构变得更加复杂。图 1-1 所示为一个高性能机械手。

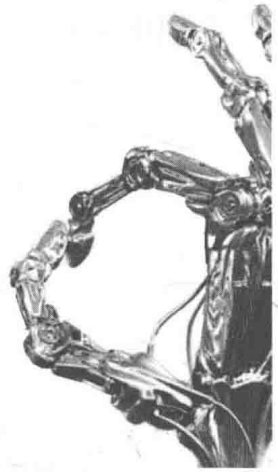


图 1-1 高性能机械手

可以说，机器人将以 4A 性能在 4D 或者 3D3H 环境中工作。4A 性能是自动化 (automation)、扩展 (augmentation)、辅助 (assistance) 和自治 (autonomous)；4D 环境是指危险 (dangerous)、肮脏 (dirty)、枯燥 (dull) 和困难 (difficult) 的环境。3D3H 意思是枯燥 (dull)、肮脏 (dirty)、危险 (dangerous)、酷热 (hot)、繁重 (heavy) 和危险 (hazardous) 的环境工况。

## 1.2 机器人元器件

在运动学上，机器人手臂是由连接关节的连杆所组成的，以形成一个运动链。然而机器人作为一个系统，它是由机械臂或者卸料器、手腕、末端执行器、驱动器、传感器、控制器、处理器和相关软件等部分构成的。

### 1.2.1 连杆

构成机器人的刚体被称为连杆。在机器人学中，我们有时使用机械臂 (arm) 表示连杆。机器人手臂或者连杆是一刚性元件，它可以有与其他所有连杆相关的相对运动。从运动学的角度看，两个或者两个以上的连杆连接到一体，若在它们之间没有相对运动，那么这些连杆就可以作为一个连杆考虑。

#### 例 1-1 连杆数目。

图 1-2 所示为含有 7 个连杆和 8 个旋转关节的平面连杆机构。在连杆 3、10 和 11 之间没有任何相对运动，因此它们可以作为一个连杆考虑，例如连杆 3。杆 6、12 和 13 有相同的状况，它们也作为一个连杆考虑，例如杆 6。杆 2 和杆 8 是刚性连接的，只能当作一个连杆，例如杆 2。杆 3 和杆 9，跟杆 2 和杆 8 具有相同的关系，它们也可看作一个杆，例如杆 3。

### 1.2.2 关节

两个连杆在关节处通过接触而连接，在关节处它们的相对运动可用同一坐标表示。典型的关节要么是旋转的，要么是棱柱的。图 1-3 描述了旋转关节和棱柱关节的几何形式。旋转关节 R 就像一个铰链，允许在两连杆之间有相对旋转。棱柱关节 P 允许在两连杆之间有相对移动。

如果旋转关节将两连杆连接起来，它们将绕着一条线发生相对转动，这条线称为关节轴线。如果棱柱关节将两连杆连接起来，它们将沿着一条直线发生移动，这条线也称为关节轴线。在关节处，描述两被连接连杆的单一坐标值称为关节坐标或者关节变量。对于旋转关节，关节变量是一角度；对于棱柱关节，关节变量则是距离。

在机器人中旋转关节和棱柱关节的符号说明分别如图 1-4a~图 1-4c 和图 1-5a~图 1-5c 所示。

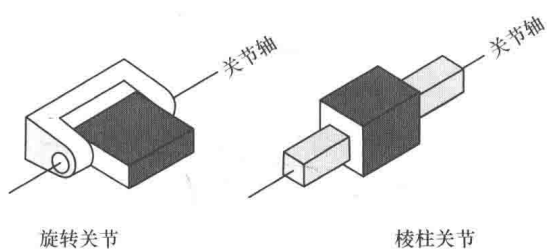


图 1-3 旋转关节和棱柱关节说明

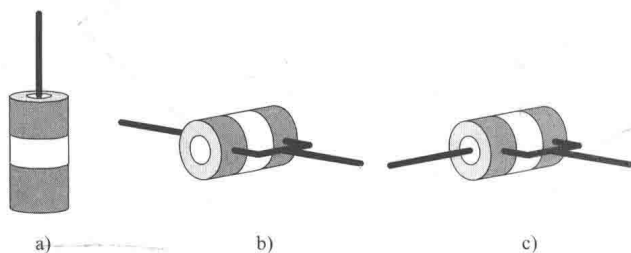


图 1-4 机器人旋转关节（副）的符号说明

主动关节的坐标由驱动器控制，而从动关节则没有驱动器。从动关节变量是主动关节变量和机械臂几何参数的函数。因此，从动关节也可称为非主动关节或者自由关节。

主动关节通常是移动或者转动，然而从动关节可以是任何能够提供面接触的低副关节。有 6 种不同的低副关节，分别为：旋转副、移动副、圆柱副、螺旋副、球副以及平面副。旋转副关节和移动副关节是最常用的关节，它们用在串联机械手中。其他的关节类型只不过是为了完成相同的功能或者提供附加自由度的一个实现。棱柱关节（移动副）和旋转关节（旋转副）提供一个自由度，因此一个机械手的关节数就是该机械手的自由度。典型的机械手应该至少有 6 个自由度，3 个自由度用于定位，3 个自由度用于定向。具有 6 个以上自由度的机械手在运动学上就是冗余机械手。

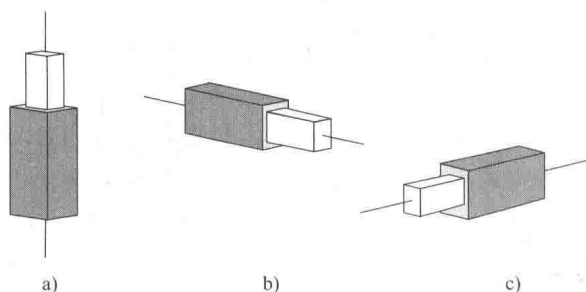


图 1-5 机器人棱柱关节（副）的符号说明

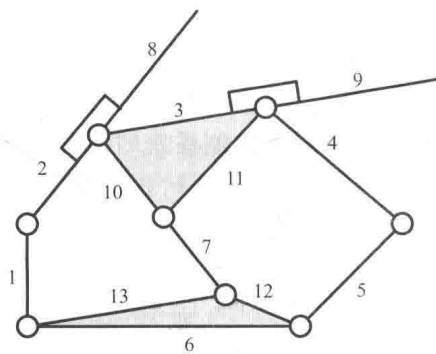


图 1-2 含有 7 个连杆和 8 个旋转关节的平面连杆机构