



普通高等学校创新机械工程教育系列规划教材

机械系统动力学

崔玉鑫 编著
赵丁选 主审



科学出版社

普通高等学校创新机械工程教育系列规划教材

机械系统动力学

崔玉鑫 编著

赵丁选 主审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统阐述了机械系统运动学与动力学的基本理论和方法。作者对本领域的大量文献进行筛选与分类,将确实行之有效的建模方法,根据作者对机械系统动力学体系的理解奉献给读者。

全书分为四部分:第一部分(第2章)介绍机械系统动力学涉及的数学基础知识,包括张量、矢量等内容;第二部分(第3~7章)介绍解决“机构”问题的多刚体系统动力学,包括运动学基础、动力学基础、多刚体系统动力学方程、基于D-H法的机器人动力学和罗伯森-维登伯格多刚体系统动力学;第三部分(第8~9章)介绍解决“结构”问题的弹性力学的有限元法,包括弹性力学的基本概念、基本方程、静态分析的有限元法和动态分析的有限元法;第四部分(第10~11章)介绍动力学方程的解法,包括线性方程组的解法、非线性方程组的解法、微分方程组的解法和矩阵特征问题的解法。

本书可作为高等工科大学的力学、机械、航空航天、机器人、车辆与兵器等专业的高年级本科生和研究生以及相关领域科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统动力学 / 崔玉鑫编著. —北京: 科学出版社, 2017.6
普通高等学校创新机械工程教育系列规划教材
ISBN 978-7-03-053447-7

I. ①机… II. ①崔… III. ①机械动力学-高等学校-教材 IV. ①TH16
中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第133821号

责任编辑: 朱晓颖 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第一版 开本: 787×1092 1/16

2017年6月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 352 000

定价: 45.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

机械系统动力学是研究机械系统的运行状态与其内部参数、外界条件之间关系的一门学科，其理论分为运动学和动力学两部分。运动学是指在不考虑系统受力的情况下，研究系统内点或刚体的位置、速度、加速度等运动量之间的关系，例如，机器人手末端的位置，速度和加速度与各关节转角、角速度、角加速度的关系。动力学是指在考虑系统受力的情况下，研究系统的力与运动的关系，可以是给定主动力求运动或约束力，也可以是给定运动求主动力和约束力，例如，给定机器人手末端的运动规律，求各关节的驱动力矩。

现代科学和工程技术提出了许多复杂系统的运动学和动力学问题。例如，新兴交叉学科——计算机图形学、计算机视觉、虚拟现实技术等，要求研究人员具备较为扎实的运动学基础知识，否则无法胜任此领域的工作；各种车辆、机械、机器人、水下工作机、航天器等的研制都需要在制造样机以前对系统进行运动学和动力学分析、结构参数的综合优化与全数字仿真，否则可能失败，造成巨大浪费。

但是，目前国内高等教育，尤其是本科教育阶段，对这部分知识的讲授未能达到实际应用所要求的深度。大多数院校在大学物理、理论力学等课程中讲授相关内容，在运动学方面，介绍质点在三维空间的运动以及刚体的“平面运动”；在动力学方面，介绍质点在三维空间的动力学以及刚体“平面运动”的动力学。讲授刚体在三维空间的运动学及动力学的院校较少。而在实际应用中，很多情况下，刚体在三维空间的运动并不能简化为“平面运动”，如行驶的车辆、飞行的飞机、卫星、多关节的机器人等，且两者在理论上区别较大，自学难度较高。由于理论水平未能达到实际应用的要求，大多数科研人员只能借助国外编写的一些仿真软件（如ADAMS、RecurDyn等软件）来解决设计、分析中的问题。而软件的使用需要具备一定的理论基础，欲达到熟练、深入的应用程度，则需要较高的理论水平；另外，借助仿真软件并不能解决所有实际应用中的问题，有时需要自行编写程序，例如，将程序写入不能安装大型软件的微芯片，这种情况对理论知识的要求更高；再者，从自主知识产权、国家科研知识储备以及教育系统学科建设等角度来看，掌握及传授此部分理论知识是必需的。

作者经多年在该领域的教学过程中发现，没有合适的教材是大多数院校未能讲授这部分内容的主要原因。客观来说，国内在该领域研究的优秀著作^[1-8]并非没有，如上海交通大学刘延柱教授、洪嘉振教授编著的《多体系统动力学》《计算多体系统动力学》《高等动力学》《多刚体系统动力学》等，天津大学刘又午教授编著的《多体系统动力学》，吉林大学陆佑方教授编著的《柔性多体系统动力学》，北京理工大学袁士杰教授编著的《多刚体系统动力学》，大连理工大学齐朝晖教授编著的《多体系统动力学》等。现有著作对于欲在该领域深入研究的学者来说大有益处，但对于初学者来说，入门过程具有一定难度。其原因在于：一方面，本领域知识理论性较强，而现有著作起点较高，与本科阶段知识没有很好地衔接；另一方面，

大多数著作可能是篇幅所限，很多公式未给出详尽的推导过程，给读者的理解带来一定困难。针对以上两方面原因，本书在编写时，将新知识与旧知识的关系进行梳理，使读者由熟悉的知识开始入门，逐渐过渡到新内容，而且尽量做到每个公式给出详尽的说明和推导过程。

作者对本领域的大量文献进行筛选与分类，将确实行之有效的建模方法，根据作者对机械系统动力学体系的理解奉献给读者。全书分为四部分，除绪论、附录之外各章安排如下。

第一部分为数学基础，是第2章。考虑到机械系统动力学涉及理论力学、弹性力学、线性代数、矩阵论、数值计算方法、软件工程等多学科知识，为了能让读者顺利地学习本书的内容，将书中经常用到的数学基础知识以较简洁的形式进行介绍。同时也期望通过本部分的学习，将一些常用的数学符号的书写作统一规范。

第二部分介绍解决“机构”问题的多刚体系统动力学，包括第3~7章，这部分内容是本书讲授的重点。其中第3章为运动学基础，介绍质点和刚体在三维空间的位置、姿态、速度、加速度等运动量的概念与应用；第4章为动力学基础，介绍质点系和刚体的质心、动量、动量矩、动能、转动惯量等物理量的概念，以及动力学的基本定理——动量定理和动量矩定理；第5章为多刚体系统动力学方程，介绍牛顿-欧拉动力学方程、动力学普遍方程、第一类和第二类拉格朗日方程以及独立广义坐标的统一形式动力学方程，分析五种动力学方程的特点和适用场合；第6章为基于D-H法的机器人动力学，介绍对于机器人这类机械系统更为有效的动力学建模方法；第7章为罗伯森-维登伯格多刚体系统动力学，介绍如何利用“图论”方法来描述机械系统的关联结构，以及在此基础上建立的一种对任意多刚体系统都有效的建模方法，其具有统一的建模过程和方程形式，利用该方法能够编制统一的动力学仿真程序或软件。

第三部分介绍解决“结构”问题的弹性力学的有限元法，包括第8~10章，这部分是考虑理论体系的完整性而编写的。其中第8章为弹性力学基础，介绍弹性力学的基本概念和基本方程；第9章为静态分析的有限元法，介绍有限元法的基本思想、求解流程以及“结构”静态分析问题的总体方程；第10章为动态分析的有限元法，介绍“结构”动态分析问题的总体方程、固有特性以及响应分析。

第四部分介绍动力学方程的解法，包括第10~11章。第二部分和第三部分建立机械系统的动力学方程，这部分将介绍如何对这些方程进行求解。

为避免公式推导过于烦琐，多刚体系统动力学相关各章的例题多限于少量构件组成的简单系统。读者用书中叙述的方法推导公式，不一定比传统的牛顿-欧拉方法或拉格朗日方程更简便。例题设置的目的是帮助读者理解各种方法的基本思想和熟悉计算步骤，且能对各种方法的优缺点进行对比。多刚体系统动力学的方法仅在处理由大量刚体组成的复杂系统、利用计算机编程计算时方能显示出优越性。

本书在编写过程中参考了大量国内外优秀学者的著作和文献，并获得了几位前辈的帮助和指导，在此向各位表示由衷感谢！

本书得到国家重点研发计划课题（2016YFC0802902）专项经费资助。

限于作者的水平，疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正。

崔玉鑫

2016年12月于吉林大学

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.4 欧拉角姿态坐标	44
1.1 机械系统动力学的研究意义	1	3.2.5 HPR 姿态坐标	47
1.2 机械系统动力学的研究内容	6	3.2.6 卡尔丹角姿态坐标	49
1.3 机械系统动力学的研究历史	7	3.2.7 各种姿态坐标的优点和缺点	50
1.4 课程学习中需要注意的问题 和知识点	10	3.3 刚体在空间中的速度和 加速度	56
习题	11	3.3.1 矢量对时间的导数	56
第 2 章 数学基础	12	3.3.2 刚体的角速度矢量	56
2.1 张量	12	3.3.3 矢量相对不同基对时间的 导数	58
2.2 矢量	13	3.3.4 角速度矢量的叠加原理	59
2.2.1 矢量的运算	13	3.3.5 刚体的角速度与姿态坐标 导数的关系	60
2.2.2 矢量矩阵与矢量基	14	3.3.6 点的速度和加速度	68
2.2.3 矢量的坐标阵	16	3.4 约束和约束方程	70
2.3 并矢	17	3.4.1 约束	70
2.3.1 并矢的定义与坐标阵	17	3.4.2 约束方程	72
2.3.2 并矢的运算	19	习题	83
2.4 张量的重要等式	21	第 4 章 动力学基础	85
2.4.1 矢量的二重叉积	21	4.1 基本概念	85
2.4.2 矢量的混合积	23	4.1.1 质心	85
2.4.3 其他	23	4.1.2 动量	86
习题	25	4.1.3 动量矩	86
第 3 章 运动学基础	26	4.1.4 动能	87
3.1 点在空间中的位置	27	4.2 刚体的质量几何	88
3.1.1 点在单一坐标系下的位置	27	4.2.1 惯量张量的概念	88
3.1.2 点在不同坐标系下的坐标	27	4.2.2 惯量张量的叠加原理	88
3.1.3 齐次坐标矩阵与齐次变换矩阵	29	4.2.3 刚体对任意点与对质心的 惯量张量的关系	89
3.1.4 方向余弦阵	30	4.2.4 惯量张量相对不同基的 坐标阵	90
3.2 刚体在空间中的位姿	35		
3.2.1 方向余弦姿态坐标	36		
3.2.2 有限转动四元数姿态坐标	36		
3.2.3 欧拉四元数	43		

4.3	动量定理和动量矩定理	90	6.3.2	建模步骤	127
4.3.1	动量定理	90	第 7 章 罗伯森-维登伯格多刚体系统动力学		
4.3.2	动量矩定理	91	135		
第 5 章 多刚体系统动力学方程			7.1 多刚体系统组成元素		
5.1	牛顿-欧拉动力学方程	94	136		
5.2	动力学普遍方程	96	7.2 多刚体系统的关联结构		
5.2.1	虚功原理	96	137		
5.2.2	虚功率原理	98	7.2.1 关联结构类型		
5.3	第一类拉格朗日方程	100	137		
5.4	第二类拉格朗日方程	103	7.2.2 关联结构的数学表达		
5.4.1	拉格朗日关系式	103	138		
5.4.2	质点系的第二类拉格朗日方程	104	7.3 树系统的运动学与动力学		
5.4.3	多刚体系统的第二类拉格朗日方程	105	145		
5.5	独立广义坐标的统一形式动力学方程	108	7.3.1 单独铰的运动学		
第 6 章 基于 D-H 法的机器人动力学			147		
6.1	机器人结构的数学描述	115	7.3.2 树系统的运动学		
6.1.1	杆件与关节的编号	115	145		
6.1.2	杆件的连体坐标系	115	7.3.3 树系统的动力学		
6.1.3	结构的 D-H 参数	116	152		
6.1.4	用 D-H 参数确定坐标系间的齐次变换矩阵	116	7.3.4 力元		
6.1.5	用修改的 D-H 法建立的坐标系和选取的 D-H 参数	118	156		
6.2	运动学分析	120	7.3.5 铰的约束力		
6.2.1	刚体的速度与广义坐标的导数关系	120	157		
6.2.2	刚体的加速度与广义坐标的导数关系	123	7.3.6 编程说明		
6.3	动力学分析	124	158		
6.3.1	动力学方程	124	7.4 非树系统的动力学		
			159		
			7.4.1 移除铰		
			159		
			7.4.2 复制刚体		
			161		
			第 8 章 弹性力学基础		
			163		
			8.1 弹性力学中的物理量		
			163		
			8.1.1 载荷		
			163		
			8.1.2 应力		
			164		
			8.1.3 应变		
			164		
			8.1.4 位移		
			165		
			8.2 弹性力学的基本方程		
			165		
			8.2.1 平衡方程		
			165		
			8.2.2 几何方程		
			166		
			8.2.3 物理方程		
			168		
			第 9 章 静态分析的有限元法		
			170		
			9.1 结构离散		
			170		
			9.2 单元分析		
			171		
			9.2.1 位移函数		
			171		
			9.2.2 单元应变矩阵		
			172		
			9.2.3 单元应力矩阵		
			173		

9.2.4 单元刚度矩阵	173	11.3.2 一阶微分方程组的解法	199
9.3 总体分析	175	11.3.3 高阶微分方程组的解法	200
9.3.1 总刚集成原理	175	11.4 矩阵特征问题的解法	200
9.3.2 载荷移置	176	11.4.1 对称矩阵的变换法	200
9.3.3 约束处理	177	11.4.2 乘幂法	203
9.4 总体方程	178	11.4.3 反幂法	205
第 10 章 动态分析的有限元法	179	11.4.4 子空间迭代法	207
10.1 结构离散	179	第 12 章 附录	209
10.2 单元分析	180	12.1 行列式	209
10.3 总体分析	181	12.1.1 行列式的概念	209
10.4 固有特性分析	181	12.1.2 行列式的性质	209
10.5 响应分析	182	12.1.3 行列式的展开定理	211
10.6 共振的应用和危害	184	12.2 矩阵	211
第 11 章 动力学方程的解法	186	12.2.1 矩阵的定义与运算	211
11.1 线性方程组的解法	186	12.2.2 矩阵的线性相关性和秩	214
11.1.1 格莱姆法则	187	12.2.3 矩阵的逆矩阵	215
11.1.2 高斯消去法	189	12.2.4 矩阵的特征值与特征向量	215
11.2 非线性方程组的解法	193	12.2.5 矩阵导数	217
11.3 微分方程组的解法	195	参考文献	219
11.3.1 微分方程的解法	195		

第1章 绪 论



本章知识要点

- (1) 了解机械系统动力学在工程实际中的应用情况。
- (2) 理解刚体、机构和结构的概念。
- (3) 了解机械系统动力学的研究历史。



兴趣实践

在一张桌子上放置一个小米粒和一个四方盒子。如何描述两者相对桌子的位置，在描述上两者有何不同；如果使四方盒子的底面不与桌面平行，只一个角点与桌面接触，此时如何描述四方盒子相对桌子的方位。通过这个例子，体验过去所学知识在处理三维问题时的不足。



探索思考

质点、刚体、弹性体这几种模型都是对客观事物的一种抽象、假设，那么在什么情况下选择何种模型呢？例如，在研究人或汽车在城市地图中的位置时，应该把人或汽车假设为质点还是刚体？在研究飞机的飞行控制时，将其假设为质点是否合适？当用机器人模仿、跟随人的运动时，人的哪些部分可假设为刚体？钢质的杆在受力时是否会变形，在研究其强度时，应该将其假设为刚体还是弹性体？



预习准备

理论力学的内容及其应用。

1.1 机械系统动力学的研究意义

机械系统动力学是研究机械系统的运行状态与其内部参数、外界条件之间关系的一门学科，其理论分为运动学(Kinematics)和动力学(Dynamics)两部分。这些理论主要应用在以下几方面。

1) 机械设计

在目前的高等教育中，机械设计的学科体系主要包括如图 1-1 所示的三个方面：①基础零部件的设计；②通用设计理论与方法；③专业机械的设计。

机械系统动力学属于通用设计理论与方法的内容之一。在基础零部件的设计与专业机械的设计过程中涉及大量的运动学和动力学问题，例如，在传动设计中，传递的速度关系；在典型机构设计中，终端机构的位置、速度、加速度等运动学量与动力源的运动量之间的关系；

在工程机械设计与机器人设计中，终端机构的位置、速度、加速度等运动学量与各关节的角度、驱动力矩等运动量之间的关系。



图 1-1 机械设计的学科体系

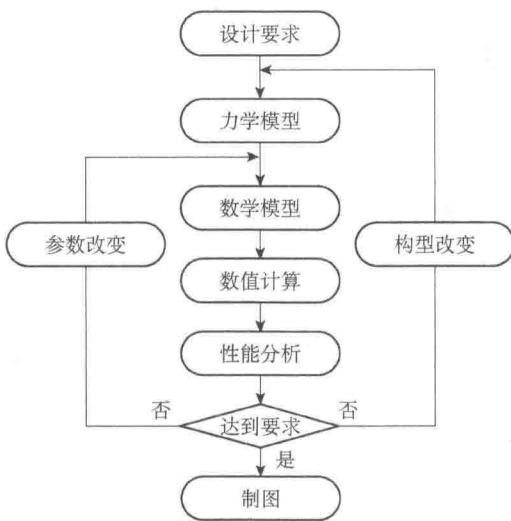


图 1-2 机械系统设计流程图

机械系统设计流程如图 1-2 所示，在正式出工程图纸与加工生产前，必须对产品的构型和参数进行分析与优化，考察所定方案是否能达到设计要求，这个过程称为虚拟设计。虚拟设计的第一步是根据设计要求对产品的构型提出方案，建立相应的力学模型。然后根据力学的基本原理建立数学模型，如系统的运行学与动力学模型。通过数值分析得到运动学与动力学的性能，有的还必须进行运动学与动力学仿真。若经过分析性能没有达到设计要求，则需进行系统参数的修正，或者对系统的力学模型做修改。前者仍可以使用先前的数学模型，后者则需重新推导建立数学模型。显然，数学模型是虚拟设计的关键，而机械系统动力学就是研究建立机械系统的数学模型的科学。

目前国内高等教育,尤其是本科教育阶段,大多数院校在“大学物理”、“理论力学”等课程中讲授相关内容,但未能达到实际应用所要求的深度。在运动学方面,介绍质点在三维空间的运动以及刚体的“平面运动”;在动力学方面,介绍质点在三维空间的动力学以及刚体“平面运动”的动力学。对于传统机械的设计,这样的深度可能是足够的,但随着现代科学和工程技术的发展,传统课程已不能满足需求。在实际应用中,很多情况下,刚体在三维空间的运动并不能简化为“平面运动”,如行驶的车辆、飞行的飞机、卫星、多关节的机器人等,且两者在理论上区别较大。

2) 机械系统仿真与虚拟现实

在机械系统仿真与虚拟现实方面,运动学理论中的关于点在空间中的位置以及刚体在空间位姿的内容,是虚拟现实技术中计算机图形学的基础理论。下面以目前比较流行的用于显示二维和三维图形的计算机图形 API(Application Programming Interface)——OpenGL(Open Graphics Library)为例,来说明运动学理论在其中的应用情况。

在二维的计算机屏幕上显示三维场景或物体的过程如下。

(1) 建立三维场景或物体的数据。这些数据主要是描述三维场景或物体的所有面的顶点坐标和面的颜色、纹理等信息,例如,工程领域一般用 Catia、SolidWorks、ProE 等软件建立三维模型。在单个物体建模时,顶点坐标一般是相对某个局部坐标系的,而在显示时,顶点坐标需转换为相对某个摄像机坐标系。

(2) 在世界坐标系下选择一个点(也称为视点),放置一个虚拟摄像机,根据摄像机能够拍摄的远、近、上、下、左、右的极限构造一个四棱台体(也称为视锥体),用四棱台体与三维场景或物体做布尔运算,将四棱台体内部的数据提取出来,并将其转化为摄像机坐标系中的坐标,用于后续显示,如图 1-3 所示。

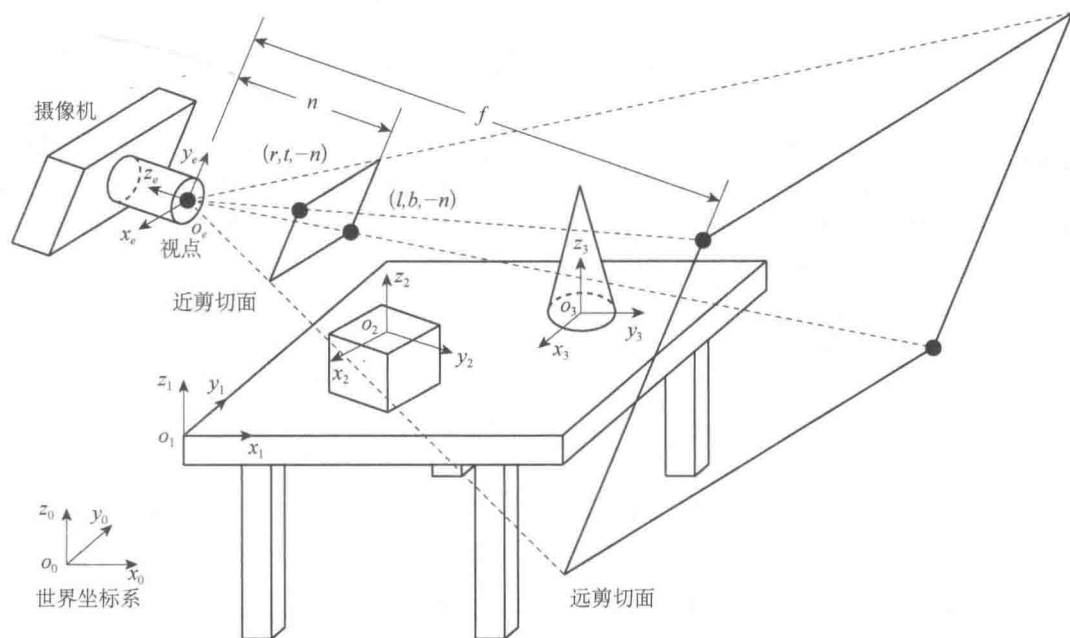


图 1-3 三维场景取景过程

(3)通过对四棱台体内部数据的缩放变换、透视变换等处理，将三维场景或物体投射到二维平面上。

计算机利用 OpenGL 对三维场景或物体的显示处理(渲染)流程如图 1-4 所示。

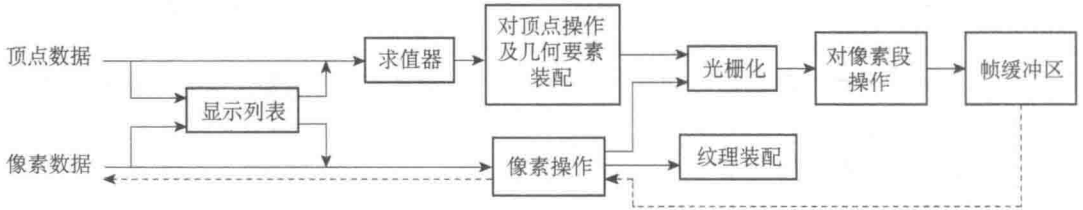


图 1-4 OpenGL 渲染流程

在世界坐标系下的点显示到计算机屏幕窗口中的坐标变换过程如图 1-5 所示。

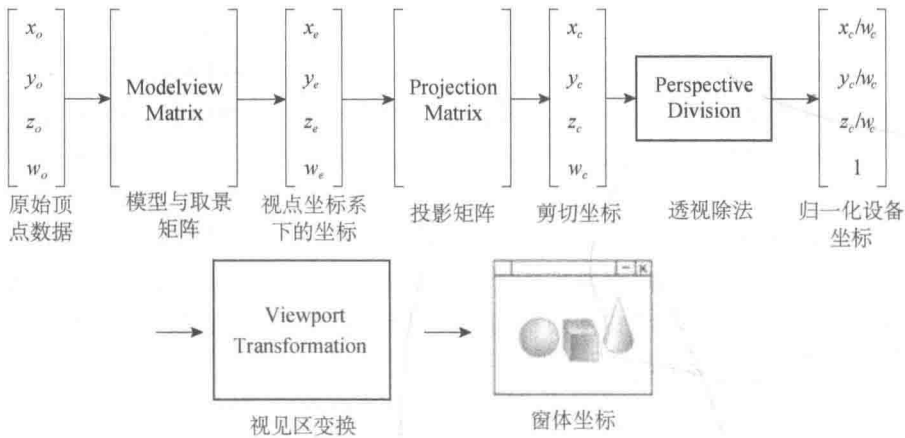


图 1-5 OpenGL 顶点数据处理流程图

设虚拟摄像机的远、近拍摄极限(也称为远、近剪切面)为 f, n ，近剪切面上点在视点坐标系 $o_e x_e y_e z_e$ 下坐标为 $(r, t, -n)$ ，左下点坐标为 $(l, b, -n)$ ，则在视点坐标系下的坐标为 (x, y, z) 任意点 K ，变换到归一化设备中的坐标为 K'' ，其坐标为

$$K'' = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f+n}{f-n} & -\frac{2nf}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l}x + \frac{r+l}{r-l}z \\ \frac{2n}{t-b}y + \frac{t+b}{t-b}z \\ -\frac{f+n}{f-n}z - \frac{2nf}{f-n} \\ -z \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Perspective Division}} \begin{bmatrix} \frac{-2nx/z}{r-l} - \frac{r+l}{r-l} \\ \frac{-2ny/z}{t-b} - \frac{t+b}{t-b} \\ \frac{-(az+b)/z}{-1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

在上述过程中，需要用户处理的最重要的工作是：将虚拟世界中的所有点在世界坐标系下的坐标转换到在视点坐标系下的坐标。这一问题的复杂原因在于：虚拟世界中的点并不是直接相对世界坐标系给出的，如桌子上的点的坐标是相对桌子坐标系 $o_1 x_1 y_1 z_1$ 的；正方体上的点的坐标是相对正方体坐标系 $o_2 x_2 y_2 z_2$ 的；而正方体的位姿又是相对桌子坐标系给出的。这些

关于点相对不同坐标系坐标的问题，以及刚体位姿的问题，正是运动学要研究的问题。所以，不具备较为扎实的运动学基础知识的科研人员，很难胜任此领域的工作。

另外，为了使在计算机中进行的仿真更符合实际，达到各种仿真的目的，需要建立更精细的实物的数学模型。例如，图 1-6 是一台飞行驾驶模拟器，为了训练飞行员，又要避免在真实飞机上进行训练所带来的危险，一个很好的解决办法是让飞行员在飞行驾驶模拟器上训练。图 1-6(a) 是驾驶模拟器的外观，图 1-6(b) 是模拟器驾驶舱内部。为了使飞行员的训练更有效，需要使飞行模拟器中飞机的数学模型非常接近于真实飞机的性能。而这些数学模型正是机械系统动力学所研究的内容。



(a) 外观

(b) 驾驶舱内部

图 1-6 飞行驾驶模拟器

此外，应用大型通用的动力学仿真软件，如 ADAMS、RecurDyn、ANSYS 等进行机械系统运动学和动力学仿真分析时，也需要具备一定的理论基础，欲达到熟练、深入的应用程度，则需要具备较高的理论水平。

3) 机械系统控制

在机械系统的控制方面，其控制策略要么是基于运动学的，要么是基于动力学的。例如，对于自由运动机器人来说，其控制器设计^[9]可以按是否考虑机器人的动力学特性而分为两类。

一类是完全不考虑机器人的动力学特性，只是按照机器人实际轨迹与期望轨迹间的偏差进行负反馈控制。这类方法通常称为“运动学控制”，其基本的控制系统框图如图 1-7 所示，其中的控制器常采用 PD 或 PID 控制。

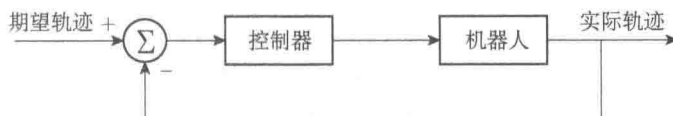


图 1-7 基于运动学的控制系统框图

对于图 1-8 中的机器人，控制中的“期望轨迹”是机械手末端点相对基座坐标系的曲线或离散点，而控制器控制的是在各关节处的驱动元件实现各关节的转动或移动，为了实

现控制，就要建立机械手末端点位置、速度、加速度与各关节运动量的关系，也就是运动学理论。

运动学控制的主要优点是控制规律简单，易于实现。但对于控制高速、高精度机器人来说，这类方法有两个明显的缺点：一是难于保证受控机器人具有良好的动态和静态品质；二是需要较大的控制能量。

另一类控制器设计方法通常称为“动态控制”，这类方法是根据机器人动力学模型设计出更精细的非线性控制，所以又称为“以模型为基础的控制”。机器人动态控制方案常常采用如图 1-9 所示的基本结构。

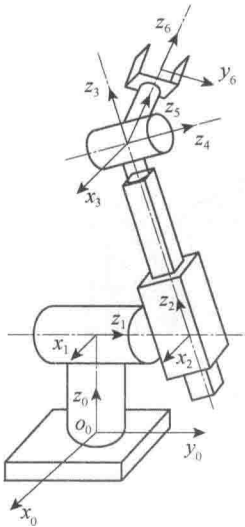


图 1-8 Stanford 臂

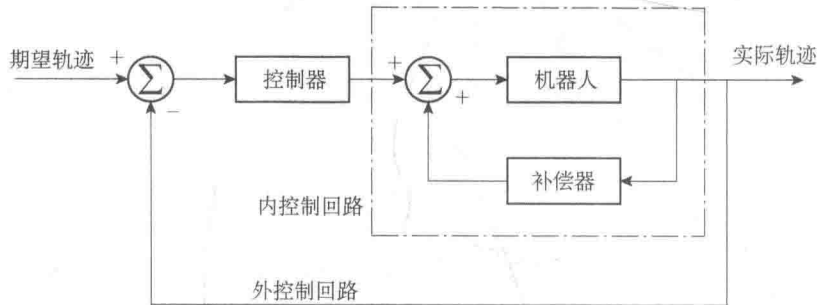


图 1-9 基于动力学的控制系统框图

可以看出它与运动控制方法在结构上的差别是引入了一个内控制回路，其作用是根据机器人动力学特性进行动态补偿，使经内控制回路作用后的机器人变为一个更易于控制的系统。用动态控制方法设计的控制器可使被控机器人具有良好的动态和静态品质，克服了运动控制方法的缺点。

由此可见，机械系统的运动学和动力学理论在机械系统控制过程中也是必不可少的。

1.2 机械系统动力学的研究内容

机械系统是由大量零部件组成的复杂系统，在对机械系统进行设计、优化与性能分析时，可以将其分为两大类：机构(Mechanism)和结构(Structure)，如图 1-10 所示。

机构是指在运行过程中各部件间存在大范围相对运动的机械系统，如操作机械臂、机器人。研究机构时，主要关注机构在载荷作用下的运行规律——实时的位置(Position/ Location)、速度(Velocity)和加速度(Acceleration)以及作用反力(Reaction Force)，这些属于多体系统动力学的研究内容。

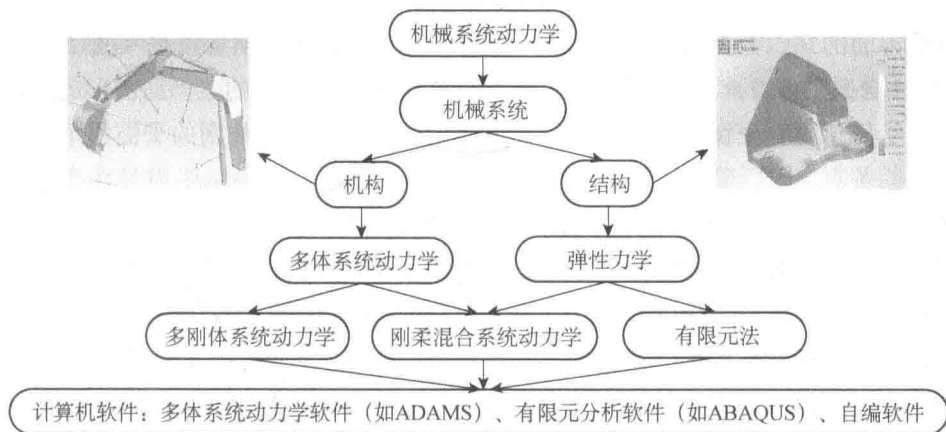


图 1-10 机械系统动力学的研究内容

结构是指在正常的工况下构件间没有相对运动的机械系统，如车辆的壳体、桥梁以及各种零部件。研究结构时，主要关注结构在载荷作用时的强度(Strength)、刚度(Stiffness)、变形量(Strain)与动态特性(Dynamic Characteristics)，这些属于弹性力学的研究内容。

多体系统动力学根据其研究对象的变形程度又可以分为多刚体系统动力学和刚柔混合系统动力学。本书主要介绍多刚体系统动力学。研究弹性力学方法有很多，本书主要介绍目前最常用的方法——有限元法。

所谓刚体(Rigid Body)是指在运动过程中体内任意两点的距离保持不变的物体。刚体是理想化的物体，在现实世界是很难找到的。根据研究目的的不同，一个物体可以看作刚体也可以看作弹性体(Elastic / Flexible Body)，例如，在研究挖掘机机械臂的运动规律时，可以将各个臂看作刚体；而在研究某个臂的强度时，则视其为弹性体。

机械系统动力学理论和方法最终都要以计算机程序或计算机软件的形式应用于实际。根据需求的不同，可以选择自己编写软件，也可以选择使用已经开发好的通用动力学软件。前者的优点是比较灵活，缺点是工作量巨大且容易出错；后者的优点是效率高、稳定可靠，缺点是不够灵活。通常情况下，在机械设计领域的仿真分析中，可以选择通用动力学软件，如多体系统动力学软件 ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems, 机械系统动力学自动分析)，有限元分析软件 ABAQUS；在虚拟现实领域或需要将数学模型程序写入某些微芯片时，一般需要自己编写软件。

1.3 机械系统动力学的研究历史

机械系统动力学源于力学。力学是最早产生并获得发展的科学之一。人们在生产劳动中，创造了一些简单的工具和机械(如斜面、杠杆等)，并在不断使用与改进这些工具和机械的过程中，积累了不少经验，从经验里获得知识，形成了力学规律的起点。我国古代在《墨经》《考工记》《论衡》和《天工开物》等书籍文献中，对于力的概念、杠杆原理、滚动摩擦、材

料的强度等方面的知识都有相当多的记载。另外，古希腊杰出的学者阿基米德(Archimedes, 公元前 287~公元前 212 年)可以称得上是静力学的创始人。在他的《平面图形的平衡和其重心》一书中给出了杠杆平衡原理的论证，并讨论了一些规则或不规则的平面图形的重心位置或多个重心的关系。

15 世纪，欧洲进入了文艺复兴时期。当时由于商业资本的兴起，手工业、城市建筑、航海造船和军事技术等各方面提出的许多迫切问题激励了科学的迅速发展。多才多艺、学识渊博的科学家和工程师达·芬奇(da Vinci, 1452~1519 年)就是这个时代的杰出代表。达·芬奇研究过落体运动；用虚速度的方法证明了杠杆原理；提出了连通器的原理，极大地丰富了阿基米德的液体压力理论；研究了柱和梁的承载能力。在他的札记中，有许多对机械设计的构想，如飞行器、降落伞、机械传动等。

不久以后，波兰天文学家哥白尼(Copernicus, 1473~1543 年)提出太阳中心说。这一学说推翻了托勒密陈旧的地球中心学说，结束了 1000 多年的地心说的统治，引起了人们宇宙观的根本变革，严重地打击了神权统治，从此自然科学开始从神权中解放出来。

开普勒(Kepler, 1571~1630 年)根据哥白尼学说及大量的天文观测，发现了行星运动三定律。这些定律是后来牛顿发现万有引力定律的基础。

伽利略(Galileo, 1564~1642 年)在物理学(力学)发展中作出了划时代的贡献。伽利略最早准确地提出并弄清了速度和加速度的概念，并根据运动基本特征量速度把运动分为匀速运动和变速运动两类，并得出了匀变速运动的公式。伽利略由思想实验得出的一个佯谬入手，对亚里士多德的落体学说提出了反驳，他正确指出了自由落体运动的规律并将抛体运动分解为水平匀速运动和竖直自由落体运动。伽利略提出了惯性定律，正确地理解了力学中的相对性原理。在动力学上，伽利略把力的作用同运动状态的变化联系起来，从而奠定了动力学的基础。伽利略于 1638 年出版了《关于两种新科学的叙述及其证明》一书，这里所说的两种新科学即材料力学和动力学。在该书中，就悬臂梁的应力分布、简支梁受集中载荷的最大弯矩、等强度梁的截面形状以及空、实心圆柱的抗弯强度比较进行了阐述。一般认为，该书是“材料力学”作为一门科学的标志。

动力学在伽利略研究的基础上，经过笛卡儿(Descartes, 1596~1650 年)、惠更斯(Huygens, 1629~1695 年)等的努力，后来由牛顿(Newton, 1642~1727 年)总其大成。牛顿于 1687 年在他的名著《自然哲学的数学原理》中，完备地提出了动力学的三个基本定律，并从这些定律出发对动力学作了系统的叙述。牛顿运动定律是整个经典力学的基础。

在力学史上，17 世纪被看作动力学的奠基时期，与此同时，17~19 世纪初，静力学也获得了进一步的成熟。

荷兰学者斯特文(Stevin, 1548~1620 年)得到了斜面上物体平衡的条件与力合成的平行四边形法则。

法国学者伐利农(Pierre Varignon, 1654~1722 年)发展了古希腊静力学的几何学观点，提出了力矩的概念和计算方法并用以研究刚体平衡问题。

法国学者潘索(Poinsot, 1777~1859年)系统地讨论了力偶的性质并提出了静力平衡的条件。

18世纪转入动力学的发展时期。德国学者莱布尼茨(Leibniz, 1646~1716年)与牛顿彼此独立地发明了微积分,为力学由矢量力学朝着分析方向的发展提供了基础。

瑞士学者伯努利(Bernoulli, 1667~1748年)最先提出了以普遍形式表示的静力学基本原理,即虚位移原理。

瑞士数学力学家欧拉(Euler, 1707~1783年)引入了欧拉角描述刚体的定点转动,并先后建立了刚体定点转动的运动学和动力学方程,并给出了欧拉可积的情况。

1743年,法国学者达朗贝尔(d'Alembert, 1717~1785年)在《动力学论》中引入了“惯性力”的概念,而将由牛顿第二定律表示的运动方程看成在每一瞬间的平衡力系,这就是“达朗贝尔原理”。这一原理的引入使动力学问题可以转化为静力学问题进行处理,或者说将动力学与静力学按统一观点来处理。

1788年,法国数学家、力学家拉格朗日(Lagrange, 1736~1813年)出版了《分析力学》一书。此书是力学发展新的里程碑。拉格朗日完全用数学分析的方法来解决所有的力学问题,而无需借助以往常用的几何方法,全书一张图也没有。在此基础上,逐步发展为一系列处理力学问题的新方法,称为分析力学。

后来,英国学者哈密顿(Hamilton, 1805~1865年)又先后提出了哈密顿正则方程和哈密顿原理,使分析力学变得更为完善。

19世纪初到中期,因大量使用机器而引入的效率问题,促进了“功”的概念的形成,“能”的概念也逐渐在物理学、工程学中普遍形成。在此时期发现了能量守恒和转化定律,这个定律不仅对技术应用有着特别重大的意义,而且在力学和其他科学之间,在物质运动的各种形式之间,起到了沟通作用,使力学的发展在许多方面和物理学紧密地交织在一起。机器的大量使用 and 技术的迅速进步,促使了工程力学的形成和发展。相应地,力学的几何方法也获得了很大的发展和应用。19世纪中期,先后形成了一系列力学专门学科,如图解力学、机器与机构理论、振动理论。机械振动理论是最后发展起来的机械系统动力学理论。在电动机、发电机和汽轮机出现以后,高速转子引起的振动问题变得突出起来。

随着现代科技的发展,如车辆、飞机、机器人等工业技术,尤其是航天技术的迅速发展,出现了由大量构件以各种方式联系组成的复杂系统,而且有的构件在作大位移运动时,构件本身产生的变形不能忽略。若所有构件的自身变形可忽略,则称该系统为多刚体系统,否则,称为刚柔混合多体系统或直接称为多体系统。对于多刚体系统动力学问题的研究,以牛顿-欧拉方程为代表的矢量力学方法和以拉格朗日方程为代表的分析力学方法仍可加以利用。但随着组成系统的刚体数量增多,刚体之间的联系状况和约束方式复杂化,传统的方法已显得力不从心。20世纪70年代,罗伯森(Roberson)和维登伯格(Wittenburg)^[10,11]首先提出利用欧拉提出的图论方法描述多刚体系统的关联结构,使计算机能够识别多系统内千变万化的关联关系,借助图论的数学工具将系统的结构引入运动学和动力学计算公式,从而推导出具有统一的建模过程和方程形式的动力学方程,利用该方法能够编制统一