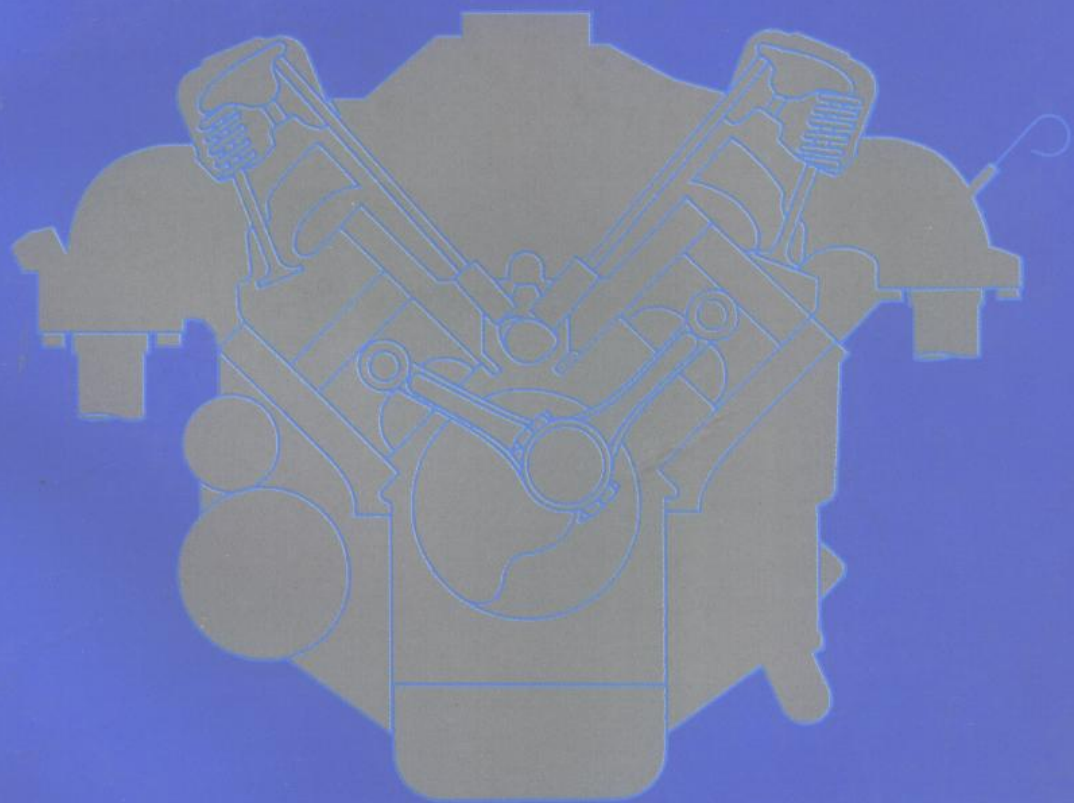


(美) E·J·豪格 著

机械系统的计算机辅助 运动学和动力学

(第1卷 基本方法)

刘兴祥 李吉蓉 林梅 马盛明 杨宪玲 译
庄细荣 校订



高等教育出版社

(美) E·J·豪格 著

机械系统的计算机辅助 运动学和动力学

(第1卷 基本方法)

刘兴祥 李吉蓉 林 梅 译
马盛明 杨宪玲

庄细荣 校订

高等教育出版社

(京) 112 号

图字: 01-1995-106号

Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems Vol. I

E. J. Haug

Original English Language Edition Published by Allyn and Bacon

Copyright ©1989 by Allyn and Bacon

All Rights Reserved

图书在版编目 (CIP) 数据

机械系统的计算机辅助运动学和动力学 第1卷 基本方法 / (美) 豪格 (Haug, E. J.) 著; 刘兴祥等译; 庄细荣校订. —北京: 高等教育出版社, 1996

ISBN 7-04-005602-X

I. 机… II. ①豪…②刘… III. ①机械学: 动力学-计算机辅助计算②机械学: 动力学-计算机辅助技术③机械-运动(力学)-计算机辅助计算④机械-运动(力学)-计算机辅助技术 IV. ①TH113②TH113.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 17368 号

*

高等教育出版社出版

北京沙滩后街 55 号

邮政编码: 100009 传真: 64014048 电话: 64054588

新华书店总店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 23.25 字数 570 000

1996年4月第1版 1996年4月第1次印刷

印数 0001—747

定价 24.50 元

凡购买高等教育出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等

质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换

版权所有, 不得翻印

内 容 简 介

本书是根据(美)E·J·豪格著“Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Vol. I: Basic Methods”一书翻译而成的。

本书代表了美国机械原理教材发展的新动向,它着重论述一种系统方法,利用该法计算机能自动建立运动学和动力学数学模型,并用数值方法自动求解。主要内容有:计算机辅助运动学和动力学基础,平面矢量、矩阵和微分运算,平面笛卡儿坐标运动学,运动学中的数值方法,平面运动学的建模和分析,平面系统动力学,动力学中的数值方法,平面动力学的建模和分析,空间笛卡儿坐标运动学,空间运动学的建模和分析,空间系统动力学,空间动力学的建模和分析等。

本书可供高等工业学校有关专业大学生、研究生、教师及工程技术人员参考。

译者序

本书是根据(美)E·J·豪格(E. J. Haug)著:“Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Vol. I: Basic Methods”(机械系统的计算机辅助运动学和动力学,第1卷 基本方法)(1989年版)一书翻译而成的。

本世纪70年代末和80年代初,随着电子计算机及其技术的飞速发展,美国出版了几种反映机械原理发展方向的新教材,改变了传统教材偏重几何图解方法的作法,不同程度地将解析法和计算机辅助分析和综合等现代方法引入机械原理课程,使这门古老的学科焕发了青春,获得蓬勃发展。80年代末,E·J·豪格著《机械系统的计算机辅助运动学和动力学》又以崭新的体系和内容面世。鉴于机构运动和动力性能研究的不断深入,而常常需要建立和求解运动学非线性代数方程和动力学非线性微分方程,因此该书着重论述一种系统方法,利用这种方法计算机能自动建立运动学和动力学数学模型,并用数值方法自动求解。该书代表了美国机械原理教材发展的新动向;机构的计算机辅助分析现已发展到了一个新阶段,即由对个别机构的人工建模发展到对各种机构的计算机自动建模,由人工选用算法求解发展到计算机自动求解,由适用范围小的专用分析软件发展到适用范围十分宽广的大型通用分析软件。此外,该书内容也和传统教材有较大差异,它不是分别论述各种机构和机械系统,而是按平面系统和空间系统介绍必要的数学基础、数值方法、建模及分析方法等。因此,该书的翻译出版,必将引起我国读者的极大兴趣,开阔他们的眼界,在一定程度上推动我国机械原理课程教学内容的改革和发展。

参加本书翻译的有:林梅(前言,第3章,3.6、3.7节,第10章,第11章,第12章),马盛明(符号表,第1章,第2章,第3章3.1~3.5节),杨宪玲(第4章,第7章,第8章),刘兴祥(第5章,第6章),李吉蓉(第9章)。全书由林梅、马盛明统稿。

承蒙庄细荣同志在百忙之中对本书进行了认真细致的校订,使本书增色不少,在此表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,译文中的错误或不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者

1995年8月

符号表

$\vec{a}$	几何矢量	d_{ij}	从构件 i 上点 P_i 到构件 j 上点 P_j 的矢量
$a, \vec{a} $	矢量 $\vec{a}$ 的大小	$dm(P)$	点 P 处的微分质量
$\mathbf{a}=[a_x, a_y, a_z]^T$	$\vec{a}$ 的整体坐标系分量的列矢量	DOF	自由度
$\mathbf{a}'=[a_{x'}, a_{y'}, a_{z'}]^T$	$\vec{a}$ 的局部坐标系分量的列矢量	E	与欧拉参数有关的 3×4 矩阵
$\vec{a}^\perp, \mathbf{a}^\perp,$	与 $\vec{a}$ 或 $\mathbf{a}$ 正交的矢量	f	弹簧-阻尼器-致动力
$\tilde{\mathbf{a}}$	与 $\mathbf{a}$ 有关的 3×3 矢量积矩阵	F	广义致动力
$\dot{\mathbf{a}}, \ddot{\mathbf{a}}$	$\mathbf{a}$ 的一阶和二阶时间导数	f, g, h	沿 x', y', z' 轴的单位矢量
$a(q)$	矢量变量的标量函数	F	构件上的合力
a_q	$a(q)$ 对 q 的偏导数	F^Λ	构件上的作用力
A	旋转变换矩阵	F^C	构件上的约束力
$\dot{A}, \ddot{A}$	A 的一阶和二阶时间导数	$F_i^{m_k}$	运动副反作用力
A_i	从坐标系 $x'_i-y'_i-z'_i$ 到坐标系 $x-y-z$ 的变换矩阵	F^P	作用在点 P 处的力
A_{ij}	从坐标系 $x'_j-y'_j-z'_j$ 到坐标系 $x'_i-y'_i-z'_i$ 的变换矩阵	G	与欧拉参数有关的 3×4 矩阵
A^T	矩阵 A 的转置矩阵	h	时间步长
A^{-1}	矩阵 A 的逆矩阵	I, I_n	单位矩阵
$\vec{a} \cdot \vec{b}$	标量积(点积)	J'	平面构件的极转动惯量
$\vec{a} \times \vec{b}$	矢量积(叉积)	J'	构件的惯性矩阵
B	$dA/d\phi$	l	弹簧-阻尼器-致动器长度
$B^1 \dot{q}(t_0)=v^1$	初始速度条件	l_0	弹簧自由长度
c	阻尼系数	k	弹簧常数
c_θ	扭转阻尼系数	k_θ	扭转弹簧常数
C_i^P	从坐标系 $x''_i-y''_i-z''_i$ 到坐标系 $x'_i-y'_i-z'_i$ 的变换矩阵	m	刚性构件质量
		M	复合质量矩阵
		n	作用在平面构件上的转矩
		n'	作用在构件上的转矩
		N	广义致动器转矩
		n'^Λ	构件上的作用转矩

n'^C	构件上的约束转矩	δ	变分算子
nb	构件数	$\delta\phi$	平面旋转变分
nc	广义坐标数	$\delta\pi$	虚转动
nh	完整约束数	δr	虚位移
$p = [e_0, e^T]^T$ $= [e_0, e_1, e_2, e_3]^T$	欧拉参数矢量	δr^P	点 P 的虚位移
		δq	用广义坐标矢量 q 表示的变分
P_i, Q_i, R_i	运动副定义点	δW	虚功
$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$	广义坐标矢量	$\Delta q^{(k)}$	牛顿-拉夫森修正值
Q	广义力	$\Phi(q, t) = 0$	复合约束
Q^A	广义作用力矢量	$\Phi^D(q, t) = 0$	驱动约束
Q^C	广义约束力矢量	$\Phi^K(q, t) = 0$	运动学约束
r	到构件质心的矢量	$\Phi^{d1}(a_i, a_j) = 0$	点-1 约束
r^P	到构件上点 P 的矢量	$\Phi^{d2}(a_i, d_{ij}) = 0$	点-2 约束
R	正交旋转矩阵	$\Phi^I(q(t_0), t_0) = 0$	初始位置条件
R^n	n 维实空间	$\Phi^p(p) = 0$	欧拉参数归一化约束
SE	柔性零件的应变能	$\Phi^{p1}(h_i, h_j) = 0$	平行-1 约束
s^P	固定在构件上、到点 P 的矢量的整体表示	$\Phi^{p2}(h_i, d_{ij}) = 0$	平行-2 约束
s'^P	固定在构件上、到点 P 的矢量的局部表示	Φ_i	约束雅可比
T''_i	运动副反作用转矩	Φ_{π_i}	旋转约束雅可比
t_n	时间网点	$\Phi^s(P_i, P_j) = 0$	球面运动副约束
TPE	总势能	$\Phi^{ss}(P_i, P_j, C) = 0$	球面-球面副约束
$\text{tr } A$	矩阵 A 的迹	Φ_u	关于 u 的约束雅可比
u	相关广义坐标矢量	Φ_v	关于 v 的约束雅可比
v	独立广义坐标矢量	γ	加速度方程的右边
$V(q)$	势能	$\dot{\gamma}$	加速度方程修正后的右边
$x-y, x-y-z$	整体坐标系	λ	拉格朗日乘子矢量
$x'-y', x'-y'-z'$	固定在构件上的局部坐标系	γ	速度方程的右边
$x''-y''-z''$	固定在构件上的运动副定义坐标系	θ_{ij}	从 x'_i 轴到 x'_j 轴的角
t_0	初始时间		

θ_0	扭转弹簧的自由角	ω	角速度
$\theta(\vec{a}, \vec{b})$	矢量 $\vec{a}$ 与 $\vec{b}$ 间的夹角	$\mathbf{0}$	零矩阵
ρ'	质心在坐标系 $x''-y''-z''$ 上的位置	$\vec{0}$	零矢量

前 言

任务

机械系统的运动学和动力学已从一门手工图解艺术发展成为一门高度发达的解析几何学和动力学方面的学科。在机械系统运动学和动力学特性中所出现的大位移和大转动,导致必须建立和分析非线性数学模型。运动学的非线性代数方程和动力学的非线性微分方程的分析过程非常复杂,在大多数应用中不可能获得闭型解。因此,在这一领域的有关文献中,包括了大量的分析特殊用途的机构和机器而得出的特殊技术和出色的分析方法。这种情况与有限元结构分析和电子线路分析方面的文献形成了鲜明的对比,有限元结构分析和电子线路分析是更多地进行系统性研究,并适应使用计算机建立和求解控制方程。

本书运用对各类机构和机器均适用的笛卡儿坐标,介绍平面和空间系统的运动学和动力学分析的基本方法。所采用的方法强调了用计算机建立和求解运动学和动力学控制方程的系统分析法,可使工程师从繁琐的常规公式推导和计算中解放出来。全书着重介绍基本理论依据,这些理论依据是工程师在为计算机模拟建立模型和分析结果中必须掌握的,以保证模型确实代表了实际事物。本书的任务是指导读者使之有能力使用大型计算机代码完成冗长的运算,但又要求其使用者对建立模型的过程进行评估,并以鉴定的眼光评价结果的合理性。

本书适用于三年级或四年级本科生或研究生工科教学的开始阶段,亦可供已具备学士学位的在职工程师自学之用。全书引入和使用矢量分析矩阵法和多元微积分。运动学方程的建立仅采用矢量分析和微积分的基本方法,而动力学方程的推导从以下两个牛顿质点运动基本定律开始:(1)力等于质量乘以加速度;(2)作用力与反作用力大小相等,方向相反。书中详尽地论述了数值方法,以便能够对用计算机求解运动学和动力学方程所需的所有运算有个全面的理解。

本书的主要注意力集中于对各应用领域中常见的中、大规模机械系统所进行的运动学和动力学分析。因此重点主要放在建立机械系统模型和分析说明由计算机模拟获得的结果。例题用来说明一些物理上的难点,例如多余约束、机构锁定和奇异构形,这些问题常阻碍机构或机器完成所要求的功能。由于设计低劣的机构和机器在物理上可能失效,显而易见,代表其性能的数学运算必然会遇到麻烦。通过对机构和机器物理失效数学结果的证明和推演,可帮助读者对数值结果进行分析,并确定该系统性能的物理属性。

本书可作为称作“动力分析与设计系统(DADS)”的大型计算机代码的理论基础,该计算机代码可从计算机辅助设计软件公司(Computer Aided Design Software Incorporated)”买到。该公司地址为 P. O. Box 203, Oakdale, Iowa 52319。这种价格很低的计算机代码可用于大学教学。本书例题和习题,均使用 DADS 计算机代码对各类应用情况列出公式、求解,分析说明结果,并研究可对其性能进行改进的其他设计方法。读者可通过本书例题和习题的分析得到透彻的理解。然而,若对实际机械系统缺乏具体了解,是很难在机器的运动学和动力学方面获得实际能力的。因此,建议读者将 DADS 计算机代码与本书结合起来使用,以便能在实际的运动学和动力学分析中建立模型并获得经验。

本书内容安排

第1章讨论机械系统运动学和动力学研究范围及指导运动学和动力学计算机辅助设计方法发展的原理。

第2章至第8章构成本书的第一篇,讨论机械系统平面运动学和动力学问题。第2章给出一种自成体系的矩阵代数推导结果及多元微分符号和方法,这些在本书其他各章中均有使用。第3章给出并分析用于确定平面中构件位置和方向的笛卡儿坐标以及构件间运动约束的程序库。通过例题分析展示了控制或驱动机构运动的方法,以及进行位置、速度和加速度分析的一些方法。第4章阐述求解运动学方程的一些数值方法,研究和示范求解线性方程的矩阵法以及求解非线性方程的牛顿-拉夫森(Newton-Raphson)法。第5章介绍平面运动系统建立模型及分析,说明为评价系统性能和考虑设计改变的影响而开发的一些方法的应用。

第6章推导平面系统的动力学方程,包括弹簧和阻尼器产生的内力,运动副和驱动件中的反作用力计算以及平衡构形的确定方法。第7章介绍求解动力学和静力学方程的数值方法,简要但自成体系地推导了适合于大规模系统动力学分析的数值积分法。第8章介绍一些实例的动力学分析,其中有些实例在第5章已作了运动学分析。

第9章至第12章构成本书的第二篇,该部分研究在三维空间运动的机械系统的运动学和动力学。第9章引入用于确定刚体空间方向的欧拉(Euler)参数,引出一个运动学约束的程序库,并对确定位置、速度和加速度的运动学控制方程进行推导和分析。第10章介绍空间系统的运动学分析。第11章研究空间系统的动力学方程,此章是第6章平面系统推导的直接扩展。最后,第12章完成空间系统的动力学分析。

本书在教学和自学中的使用方法

本书的内容在过去8年中一直在衣阿华大学四种不同的课程及其后续课程中使用。一种教学方式是以本书第一篇为基础,在本科生中讲授一个学期机械系统平面运动学和动力学的课程;第二种方式是对较高水平的学生讲授一个学期,复习平面系统的基本概念并进展至本书的第二篇,加授第一篇的第4章和第7章,学习机械系统空间运动学与动力学;第三种方式是在一个学期中仅讲授平面和空间运动学;最后一种方式是使用本书的全部内容作为两个学期前后课程的基础,对四年级的本科生和刚开始学习的研究生讲授平面及空间系统运动学和动力学。

实际上,我们发现在使用本书的所有课程中,DADS代码的使用在设计题目中已成为一种很有价值的工具,使学生能够在建立实际模型和获得数值反馈的过程中积累分析方面的经验。机械系统运动学和动力学分析教学中的一个主要难题是启发从物理上认识机构和机器,以及建立模型和说明结果的技术。虽然可以编制一些特殊用途的计算机程序来完成本书阐述的计算方法,但更为有效的方法是使用像DADS这样现成的、完全调整好的计算机程序,开发学生对实际机械系统建立模型和分析的能力。设计变化对机器运动学和动力学性能影响的研究,如本书第5、8、10、12章所讨论的例题,对于激发学生、使学生深入了解机械系统运动学和动力学工具的应用是相当有效的。

第二卷内容:高级课题及跨学科问题

关于机械系统的计算机辅助运动学和动力学的高级课题及跨学科问题,将在即将出版的第

二卷中阐述。本书中的基本公式和数值方法，在相关著作《中等动力学》^[35]中所包含的动力学基本概念以及近期发展起来的基础理论和数值方法，构成了第二卷的基础。

第二卷的内容将包括用于建立模型的计算机图学方法和演示计算机预测的动画图学方法。对于构成现代机械系统动力性能所必不可少的反馈控制和液压子系统，也在该卷中用与本书阐述的类似公式建立模型。

该书中将研究一些有可能用于高速运动学和动力学模拟的高等相对坐标运动学和动力学公式，提出适合于这些公式的计算方法。新兴的多处理器并行计算机方法，提供了一种独特的高速计算方式，包括实时、人工参与环路模拟等，这种方法将与相对坐标公式配合进行研究。这种新兴技术的主体是这本书中所阐述的一些基本方法的重要扩展。

该卷中还将对现代机器动力学中的特殊问题和跨学科问题进行研究，这些问题包括动摩擦，静摩擦，冲击，间歇运动，奇异运动学构形分析和动态稳定性，机器人和机器人工作空间的边界定义，以及柔性多构件动力学的分析。在这些领域中所探讨的一些方法，适用于本书中的基本公式以及高等相对坐标公式。

第二卷中还将研究一些利用数学和数值分析的新兴多重理论几何和微分几何方法来分析和求解微分-代数运动方程的高等数值方法。这些方法为求解机械系统各种类型的运动方程提供了强有力的新工具。最后，一些预测设计变量对动力学性能影响以及进行优化设计的设计敏感性分析和优化方法也将在此卷中进行阐述和演示。

致谢

作者对丰富本书内容作出贡献的以下审阅人表示感谢：

罗伯特·A·卢卡斯教授
利哈伊大学

戴维·赫顿教授
华盛顿州立大学

H·J·萨默三世教授
宾夕法尼亚州立大学

特别感谢在过去10年来对本书的形成作出重要贡献的许多同事和学生，他们是：K·E·阿特金森、D·S·贝、R·R·贝克、R·S·黄、D·Y·乔、S·S·金、O·K·夸恩、N·K·马尼、P·E·尼克拉维什、T·帕克、J·O·桑、R·A·韦哈格、S·C·吴、W·S·尤。

最后，作者对C·R·盖耶、R·L·赫夫、J·L·马克汉姆、C·K·米尔斯及S·M·范福森在准备本书手稿和插图的许多草稿中所付出的耐心和作出的贡献表示感激。

目 录

符号表	(1)
前言	(1)
第 1 章 计算机辅助运动学和动力学基础	(1)
1.1 机械系统运动学和动力学的研究范围	(1)
1.2 运动学分析和动力学分析的传统方法	(8)
1.3 计算运动学和动力学的任务	(8)
1.4 本书内容学习指导	(10)

第一篇 平面系统

第 2 章 平面矢量、矩阵和微分运算

.....	(13)
2.1 几何矢量	(13)
2.2 矩阵代数	(15)
2.3 代数矢量	(20)
2.4 坐标变换	(21)
2.5 矢量和矩阵微分	(24)
2.6 固定在动坐标系上点的速度和加 速度	(27)
习题	(29)
主要公式汇总	(31)

第 3 章 平面笛卡儿坐标运动学

.....	(33)
3.1 平面运动学的基本概念	(33)
3.2 构件和机架间的约束(绝对约束)	(39)
3.3 成对构件间的约束(相对约束)	(41)
3.3.1 相对坐标约束	(42)
3.3.2 转动副和移动副	(44)
3.3.3 复合运动副	(47)
3.4 齿轮和凸轮-从动件	(49)
3.4.1 齿轮	(49)
3.4.2 凸轮-从动件	(53)
3.4.3 点-从动件	(58)
3.5 驱动约束	(59)
3.5.1 绝对驱动件	(59)

3.5.2 相对驱动件	(61)
3.5.3 速度方程和加速度方程的右边	(66)
3.6 位置、速度和加速度分析	(66)
3.6.1 位置分析	(67)
3.6.2 速度分析	(69)
3.6.3 加速度分析	(69)
3.6.4 在时间网格上的运动学分析	(71)
3.7 奇异构形	(71)
习题	(76)

第 4 章 运动学中的数值方法

4.1 计算的组织	(81)
4.2 约束方程和雅可比的计算	(85)
4.3 系统的装配	(87)
4.4 线性方程求解和矩阵因子分解	(91)
4.4.1 高斯方法	(91)
4.4.2 $L-U$ 因子分解	(97)
4.5 用牛顿-拉夫森法求解非线性方程	(100)
4.6 多余约束的识别和消除	(102)
习题	(104)

第 5 章 平面运动学的建模和分析

5.1 建模和分析技术	(106)
5.2 曲柄滑块机构的运动学分析	(108)
5.2.1 可供选择的模型	(108)
5.2.2 装配分析	(110)
5.2.3 驱动件的确定	(113)
5.2.4 分析	(113)

5.2.5 锁定构形	(116)	6.5 平衡条件	(163)
5.3 四杆机构的运动学分析	(117)	6.6 约束反作用力	(165)
5.3.1 可供选择的模型	(117)	习题	(168)
5.3.2 装配	(119)	第7章 动力学中的数值方法	(171)
5.3.3 驱动件的确定	(120)	7.1 计算的组织	(171)
5.3.4 分析	(120)	7.2 微分-代数混合运动方程的求解	(174)
5.3.5 锁定构形	(122)	7.3 求解微分-代数方程的算法	(177)
5.4 急回机构的运动学分析	(123)	7.3.1 一阶初值问题	(177)
5.4.1 可供选择的模型	(123)	7.3.2 广义坐标分块	(179)
5.4.2 装配	(125)	7.3.3 直接积分	(179)
5.4.3 驱动件的确定	(126)	7.3.4 约束的稳定性	(180)
5.4.4 分析	(126)	7.3.5 混合算法	(180)
5.5 齿轮-滑块机构的运动学分析	(130)	7.4 一阶初值问题的数值积分	(181)
5.5.1 运动学模型	(130)	7.4.1 多项式插值法	(182)
5.5.2 装配	(132)	7.4.2 亚当斯-巴什福思预估法	(186)
5.5.3 驱动件的确定	(132)	7.4.3 亚当斯-莫尔顿校正法	(191)
5.5.4 分析	(132)	7.4.4 预估-校正值算法的计算机执行过程	(194)
5.6 阀门挺杆机构的运动学分析	(134)	7.5 平衡分析的数值方法	(196)
5.6.1 阀门挺杆机构模型	(134)	习题	(199)
5.6.2 装配	(137)	第8章 平面动力学的建模和分析	(200)
5.6.3 驱动件的确定	(137)	8.1 建模和分析技术	(200)
5.6.4 分析	(137)	8.2 曲柄滑块机构的动力学分析	(201)
DADS 习题	(139)	8.2.1 动力学模型的建立	(201)
第6章 平面系统动力学	(142)	8.2.2 平衡分析	(202)
6.1 平面刚体的运动方程	(142)	8.2.3 逆向动力学分析	(202)
6.1.1 由牛顿方程演变来的变分运动方程	(142)	8.2.4 动力学分析	(204)
6.1.2 带质心坐标的变分运动方程	(144)	8.3 急回机构的动力学分析	(206)
6.1.3 微分运动方程	(145)	8.3.1 动力学模型的建立	(206)
6.1.4 质心的性质和极转动惯量	(146)	8.3.2 平衡分析	(207)
6.1.5 复合体的惯性特性	(149)	8.3.3 逆向动力学分析	(207)
6.2 虚功和广义力	(151)	8.3.4 动力学分析	(207)
6.3 受约束平面系统的运动方程	(154)	8.4 螺旋弹簧的动力学分析	(209)
6.3.1 平面系统的变分运动方程	(155)	8.4.1 激波	(209)
6.3.2 拉格朗日乘子	(158)	8.4.2 撞击和振荡	(210)
6.3.3 微分-代数混合运动方程	(159)	8.5 阀门挺杆机构的动力学分析	(213)
6.3.4 初始条件	(161)	DADS 习题	(214)
6.4 运动学上被驱动系统的逆向动力学			

第二篇 空间系统

第9章 空间笛卡儿坐标运动学	(217)	9.1 空间矢量	(217)
-----------------------------	-------	----------------	-------

9.2 空间刚体运动学	(225)		(311)
9.3 欧拉参数定向广义坐标	(237)	11.3.2 受约束运动方程的欧拉参数形式 ...	(313)
9.4 运动学约束	(245)	11.4 内力	(315)
9.4.1 运动副定义坐标系	(245)	11.4.1 移动弹簧-阻尼器-致动器	(315)
9.4.2 矢量和点上的约束	(246)	11.4.2 扭转弹簧-阻尼器-致动器	(317)
9.4.3 构件上的绝对约束	(252)	11.5 逆向动力学、平衡分析和运动副中 的反作用力	(318)
9.4.4 成对构件间的约束	(254)	11.6 空间微分-代数运动方程求解的数 值问题	(319)
9.4.5 成对构件间的复合约束	(262)	习题	(320)
9.5 驱动约束	(267)	主要公式汇总	(321)
9.6 位置、速度和加速度分析	(269)	第 12 章 空间动力学的建模和分析 ...	(323)
9.6.1 位置分析	(269)	12.1 建模和分析技术	(323)
9.6.2 速度分析	(270)	12.2 空间曲柄滑块机构的动力学分析 ...	(323)
9.6.3 加速度分析	(271)	12.2.1 模型	(323)
习题	(273)	12.2.2 逆向动力学分析	(323)
主要公式汇总	(275)	12.2.3 动力学分析	(323)
第 10 章 空间运动学的建模和分析	(277)	12.3 空间四杆机构的动力学分析	(325)
10.1 建模和分析技术	(277)	12.3.1 可供选择的模型	(325)
10.2 空间曲柄滑块机构的运动学分析 ...	(279)	12.3.2 平衡分析	(326)
10.2.1 模型	(279)	12.3.3 逆向动力学分析	(326)
10.2.2 装配	(281)	12.3.4 动力学分析	(327)
10.2.3 驱动件的确定	(282)	12.4 空气压缩机的动力学分析	(329)
10.2.4 分析	(282)	12.4.1 模型	(329)
10.3 空间四杆机构的运动学分析	(283)	12.4.2 逆向动力学分析	(331)
10.3.1 可供选择的模型	(283)	12.4.3 动力学分析	(332)
10.3.2 装配分析	(287)	12.5 车辆的动力学	(334)
10.3.3 驱动件的确定	(288)	12.5.1 可供选择的模型	(334)
10.3.4 分析	(289)	12.5.2 平衡分析	(339)
10.4 空气压缩机的运动学分析	(289)	12.5.3 操纵特性曲线	(340)
10.4.1 模型	(289)	12.5.4 动力学分析	(341)
10.4.2 装配	(291)	12.6 调速器机构的动力学分析	(345)
10.4.3 驱动件的确定	(292)	12.6.1 可供选择的模型	(346)
10.4.4 分析	(292)	12.6.2 稳定状态分析	(347)
DADS 习题	(293)	12.6.3 外力矩	(348)
第 11 章 空间系统动力学	(295)	12.6.4 动力学分析	(348)
11.1 刚体运动方程	(295)	DADS 习题	(350)
11.2 质心的性质及转动惯量和惯性积 ...	(300)	参考文献	(351)
11.3 受约束空间系统的运动方程	(311)		
11.3.1 受约束运动方程的牛顿-欧拉形式			

第 1 章 计算机辅助运动学和动力学基础

数字计算机对科学和工程的所有领域已经产生显著的影响,在许多学科中甚至起支配作用。精心研制的计算机软件已经使结构分析和电子线路分析发生巨大变化。然而,在机械系统的运动学和动力学中,情况却有很大的差异。尽管计算技术在这一领域的潜力至少与结构分析和电子线路分析一样大,但发展却落后了。本书的目的是介绍用计算机建立并求解机械系统运动学和动力学方程的基本方法,使机械工程师切身感受到已被结构工程师和电气工程师使用了一段时期的现代计算机方法的某些优点。本章的目的是确定讨论对象的范围,介绍典型应用,阐述用计算机建立并求解运动学和动力学控制方程的方法。

1.1 机械系统运动学和动力学的研究范围

对于本书来说,机械系统可定义为相互联接、彼此能够相对运动的刚性构件的集合,该相对运动与限定各对构件相对运动的运动副相一致。通过定义机械系统某些构件的位置或相对位置与时间的关系,可以规定该系统的运动。那么,系统的运动就由运动学代数关系式确定或由运动和外力的微分方程确定,在后一种情况下,系统的运动由物理学定律确定。机械系统的运动学和动力学的特点是运动幅度大,这个特点导致代数约束方程和微分运动方程具有几何非线性性质。

在机械系统设计中采用三种本质上不同的分析:

机械系统的运动学分析涉及系统的运动,而与引起运动的力无关。一般来说,系统中一个或多个构件的位置或相对位置与时间的关系是规定好的。其余构件的位置、速度和加速度与时间的关系,则通过求解位置的非线性代数方程组和速度、加速度的线性代数方程组来确定。

机械系统的动力学分析则涉及由外力作用引起的系统的运动。一种特殊的动力学分析是确定在与时间无关的力作用下系统的平衡位置。在外力作用下系统的运动要求与运动学关系式相一致,这些关系式通过联接系统构件的运动副施加给系统。动力学方程是微分方程或微分方程与代数方程的组合。

逆向动力学分析是运动学分析和动力学分析的混合形式,它规定了系统中一个或多个构件的位置或相对位置与时间的关系,从而利用运动学方程可完全确定系统的位置、速度和加速度。利用已知的位置、速度和加速度则可求解系统的运动方程,就像由代数方程去确定引起所规定的运动所需的力一样。

用来将机械系统分类的一个重要依据与作用在系统上的力的来源有关。这在具有某种形式控制的现代机械系统中特别重要。由电气和液压反馈控制子系统产生的力效应,在现代机械系统的动力学中起关键作用。因此,机械系统动力学的研究范围在很大程度上取决于作用在系统上力系的种类。

作用在机械系统上最基本的力的形式是重力,通常认为其大小不变,作用方向垂直于地球

表面。由于构件与其周围介质的相互作用，在系统的构件上还作用着其他一些比较简单的力，包括空气动力、摩擦力以及由于系统各零件的相对运动产生的阻尼力。有一种作用在机械系统上的重要的力与柔性零件有关，这些零件包括螺旋弹簧、片簧、轮胎、减振器，以及许多承受与之相关的反力和反力矩的其他可变形零件。由柔性零件产生的力作用在系统各构件之间，它们是构件相对位置和相对速度的函数。

为了更具体地了解本书所研究的各类机械系统运动学和动力学的应用，考察一些典型的工程应用例子是很有帮助的。图 1.1.1 所示的 V-8 型发动机包含许多运动零件，并示出了一些在机械设计中所采用的最常见的机构。发动机曲轴在润滑轴承中转动，曲轴上装有与连杆相联的偏心转动轴承，然后通过转动轴承将连杆与在燃烧气缸中运动的移动活塞相联接。装配在一起的曲轴、连杆和活塞通常称为曲柄滑块机构。该机构用于这种发动机和许多其他机器部件中。这种机构的基本用途是，将燃料燃烧产生的作用在活塞上的力转换成绕曲轴转动轴线作用的转矩，从而产生回转运动，用以推动车辆或驱动转动机械。凸轮一般用来使凸轮从动件产生精确的定时运动，从动件通过一个摇臂控制阀杆的位置，以便在发动机工作时开启和关闭进气阀和排气阀。为了关闭阀门并使凸轮和从动件保持接触，采用了阀门弹簧，如图所示。虽然在发动机内还有许多其他机构，但这些基本零件是典型的机械零件。

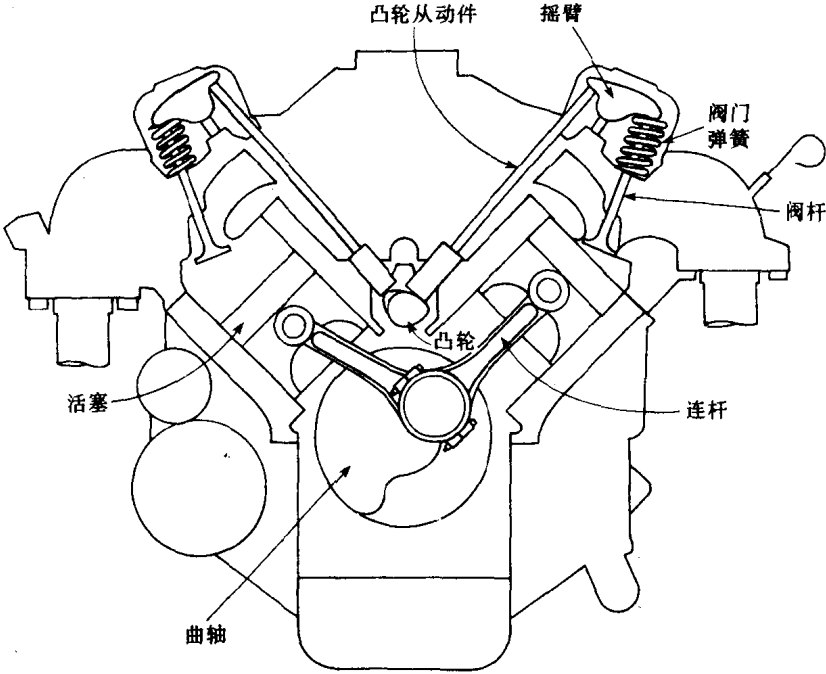


图 1.1.1 V-8 型发动机的横截面

曲柄滑块机构的第二种应用是图 1.1.2 所示的冲压机构。曲柄绕支点 O 摆动一定角度。连杆一端与曲柄在点 A 铰接，另一端与冲头在点 B 铰接，连杆将载荷传递到在机座中移动的冲头，使冲头往复运动。仔细控制各构件的尺寸，可使在相当大的曲柄驱动角内作用的小转矩转换成在冲头小运动范围内作用的非常大的力，以使工件变形或切断。

曲柄滑块机构的第三个例子是图 1.1.3 所示的飞球调速器。质量较大的球与铰接在转动轴

上的臂杆相连，与轴一起转动。连杆铰接在球的臂杆和受到约束而沿轴移动的轴环上。球的臂杆、连杆、轴环和轴形成两个作空间运动的曲柄滑块机构。整个机构以轴的角速度 ω 转动。随着轴速的增加，作用在球上的离心力使球向外抛，引起轴环向上移动，从而使图 1.1.3 所示距离 s 增加。

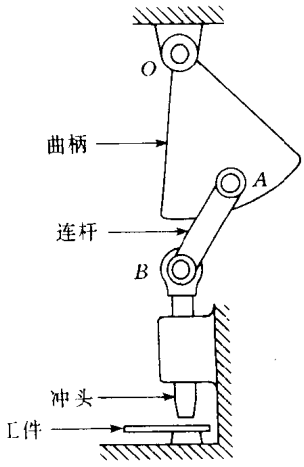


图 1.1.2 冲压机构

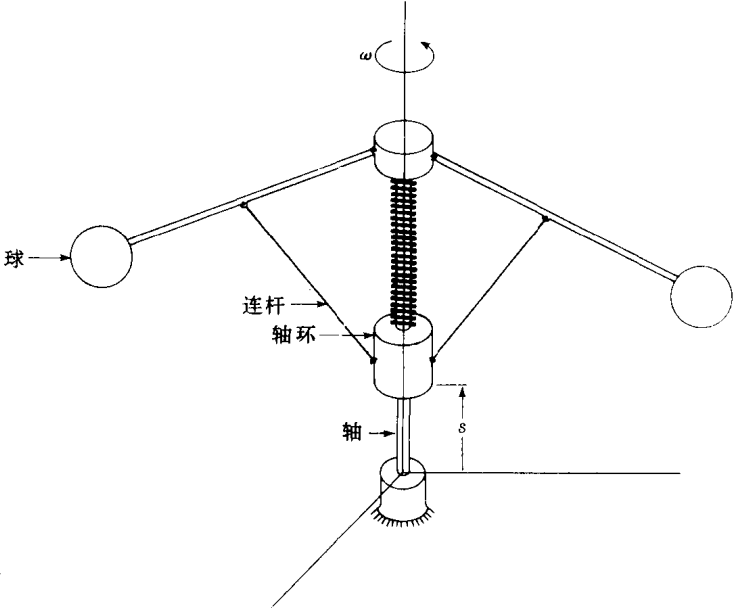


图 1.1.3 飞球调速器

飞球调速器用来控制发动机的工作速度。有一种机构可使轴环位置 s 与驱动转动轴的内燃发动机的燃料进给相配合。这种机构被设计成：在发动机所要求的速度状态下，球上的离心力与作用在机构上的重力和弹簧力在轴环处于给定高度时达到平衡状态。如果作用在发动机上的载荷增加（例如，车辆遇到小斜坡或割草机遇上高的草丛），使轴的角速度 ω 减小，则球将下落，轴环向下移动。将轴环位置与燃料进口相联接的机构可提供附加燃料，进而使发动机加速，球上的离心力增加，球便升高到额定高度，将燃料进给减少到额定值。这是曲柄滑块机构的典型应用。

在机械设计中经常遇到的另一种机构是四杆机构，如图 1.1.4 车辆悬挂装置的应用所示。车辆每边的悬挂装置连杆机构由上、下控制臂等组成，控制臂用转动副铰接在车架和车轮组件上。这种机构允许车轮组件相对于车架运动，并通过悬挂螺旋弹簧和减振器将道路的力传递给车架，如图 1.1.4 所示。要精心设计控制臂和附件的尺寸，以使车轮在车辆摇晃时尽可能保持与地面近乎垂直的位置。悬挂弹簧和阻尼器要设计得使车辆行驶平稳，并使得即使在轮胎和路面间的力产生急剧变化的情况下，传递给车架的载荷变化仍很小。

图 1.1.5 所示的风挡刮水器机构是四杆机构的另一种应用，该机构将电动机驱动的曲柄的转动转换成风挡刮水器的往复运动。曲柄和左摇杆铰接在车架的点 A 和点 B。曲柄连杆铰接在曲柄上的点 C 和左摇杆上的点 D。曲柄、曲柄连杆、左摇杆和车架组成一个四杆机构。因为点 B 到点 D 的距离大于点 A 到点 C 的距离，所以曲柄整周转动仅使左摇杆摆动，左风挡刮水器完成所要求的往复运动。精心选择各杆尺寸，可产生所要求的运动范围。由铰接在车架上点 G 的