

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

机械动力学

(第二版)

Machinery Dynamics

(Second Edition)

张 策 主编



高等教育出版社

TH113/19=2

2008

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

机械动力学

(第二版)

Machinery Dynamics

(Second Edition)

张 策 主编



高等教育出版社

内容简介

本书是在第一版的基础上修订而成的, 主要阐述机械动力学的理论和方法。全书除绪论外, 包括四篇: 机械刚体动力学、机械振动学基础、机械弹性动力学、数值方法与常用软件。本书可作为硕士研究生课程和高年级本科生选修课程的教材, 也可供高等工科院校的教师和从事机械设计和研究的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械动力学/张策主编. —2 版. —北京: 高等教育出版社, 2008.1

ISBN 978-7-04-023064-2

I. 机… II. 张… III. 机械学-动力学-高等学校-教材 IV. TH113

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 190103 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	薛立华	封面设计	李卫青
责任绘图	朱 静	版式设计	史新薇	责任校对	殷 然
责任印制	韩 刚				

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landracom.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landracom.com.cn
印 刷	北京中科印刷有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
		版 次	2000 年 4 月第 1 版
开 本	787×960 1/16		2008 年 1 月第 2 版
印 张	28.75	印 次	2008 年 1 月第 1 次印刷
字 数	480 000	定 价	48.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23064-00

第二版前言

作者自 20 世纪 80 年代初在国内率先开始了连杆机构弹性动力学的研究工作, 后来又将研究领域扩大到其他机构和机械系统的动力学。结合研究工作, 作者较多地学习和探讨了整个机械动力学的发展历史, 研究了目前机械动力学分析方法与动态设计方法的整体状况, 并将自己对机械动力学发展历史和现状的认识融入到教学中, 对机械动力学教材的体系、内容和一些重要学术问题形成了自己的观点, 主要有:

1. 在机械动力学发展历程中先后形成且目前仍并存着四种分析方法: 静力分析 (static)、动态静力分析 (kineto-static)、动力分析 (dynamic) 和弹性动力分析 (elastodynamic)。这些分析方法有着不同的基本假定, 代表着不同时期所达到的分析水平, 因此对这些分析方法不应孤立地加以介绍, 而应当将它们给予历史的、系统的阐述。

2. 这四种分析方法和相应的设计方法可以划分为两大部分: 机械刚体动力学和机械弹性动力学。这样一种划分可以清晰地同类问题组织到一起, 也便于引导学生认识同类问题在基本假定、力学模型、求解方法等方面的共性。尤其在今天, 机械弹性动力学迅速发展, 这样一种划分有利于深化认识、加速进一步的研究。

上述观点形成了本教材在体系上的特点。本教材第一版分为三篇: 机械刚体动力学、机械振动学基础、机械弹性动力学。这一体系在第二版中基本保持不变。

本教材融入了近 20 年来机械动力学飞速发展所取得的最新成果 (包括本课题组的成果)。

我国的本科生教材一般其 80% 以上的内容都在课堂上讲授, 而研究生教材则不应如此, 它应编写得较为丰满, 有更多的内容可供学生选读和参考, 也可供研究人员参考。本教材的第一版是在讲义的基础上成形的, 因而虽然搭起了基本架构, 注意了内容的简练与适合教学, 但却不够丰满。在第二版中主要作了如下修改:

1. 对各章内容适当扩充, 提供了较多关于发展动态的介绍, 增加了参考文献。

2. 增加了两章——齿轮传动弹性动力学、行星齿轮传动弹性动力学; 增加了一篇——数值方法与常用软件, 扼要地介绍了动力学微分方

程的数值解法和机械系统运动学和动力学、有限元分析等常用软件。

本书由张策主编，参加本书编写的有：孙月海（天津大学）编写了第十二章，杨玉虎（天津大学）编写了第十章的大部分内容，常宗瑜（青岛海洋大学）编写了第十五章的大部分内容，冯志友（天津工业大学）编写了第十六章，王世宇（天津大学）编写了第十三章的大部分内容，姚燕安（北京交通大学）编写了第十四章部分内容，孟宪举（河北理工大学）提供了第十七章的素材，张策（天津大学）编写了其余章节，并负责全书的统稿。

本书各章后面列有相关的参考文献，全书的最后也给出了相关参考书。

真诚地欢迎学术界同仁和广大读者批评指正。

张 策

2007 年 7 月于天津大学

第一版前言

这本《机械动力学》是在作者多年来讲授研究生课程所用讲义的基础上撰写而成的。

为适应机械的高速化、轻量化、精密化和自动化,机械动力学在过去二三十年间得到了迅速的发展,不仅有大量的研究成果问世,而且早已成为发达国家机械工程专业本科生和研究生的重要课程。近十年来,我国许多大学也都将该课程列为机械工程类各专业研究生和本科生的重要选修课。

在机械动力学发展历程中,先后形成且目前仍并存着四种分析方法,即静力分析、动态静力分析、动力分析和弹性动力分析。这些分析方法有着不同的基本假定,代表着不同时期所达到的分析水平。本书试图对这些分析方法给予历史的、系统的阐述。

这四种分析方法和相应的设计方法可以划分为两大部分:机械刚体动力学和机械弹性动力学。用这样一种划分可以清晰地吧同类问题组织到一起,也便于引导学生认识同类问题在基本假定、力学模型、求解方法等方面的共性。尤其在今天,机械弹性动力学迅速发展,这样一种划分可能有利于深化认识,加速进一步的研究。

本书是基于上述对机械动力学体系的新认识来组织内容的。全书分为机械刚体动力学、机械振动学基础和机械弹性动力学三篇。机械刚体动力学篇介绍动态静力分析方法、动力分析方法和以这两种分析方法为基础的综合方法。机械弹性动力学篇介绍各种机构和机械系统的弹性动力分析方法和综合方法。机械振动学基础既作为学习机械弹性动力学的基础知识,同时它也有着独立的、重要的工程应用价值。

这本《机械动力学》主要用作机械学、机械制造等专业的研究生教材,也可供机械类专业的本科生和从事机械动力学教学、研究和设计的人员参考。

本书内容反映了作者多年来从事机构学和机械动力学研究中形成的独特的学术观点,纳入了作者和合作研究者以及研究生的一些研究成果(如博士研究生常宗瑜、姚燕安分别撰写了§5.3和§12.2)。此外,也纳入了国内外学者的一些研究成果。在此,向这些学者表示衷心的感谢。

机械工程学会机构学专业委员会副主任黄真教授认真地审阅了全书，并提出了宝贵的意见，特表示衷心的感谢。

由于国内外机械动力学领域的研究发展迅速，作者对近年发展之把握难免挂一漏万，真诚地欢迎学术界朋友和广大读者批评指正。

张 策

1999年6月于天津大学

目 录

绪论	1
§ 0.1 机械动力学的研究内容	1
§ 0.2 机械动力学的发展简史	4
§ 0.3 研究机械动力学的重要意义和本书内容简介	17
参考文献	19

第一篇 机械刚体动力学

第一章 平面机构的动态静力分析	23
§ 1.1 平面连杆机构的动态静力分析	23
§ 1.2 平面凸轮机构的动态静力分析	31
§ 1.3 工程实例——飞剪的动态静力分析	33
参考文献	37
第二章 平面机构的平衡	38
§ 2.1 概述	38
§ 2.2 质量代换法	40
§ 2.3 曲柄滑块机构的摆动力部分平衡	44
§ 2.4 平面连杆机构的完全平衡	47
§ 2.5 平面连杆机构的优化综合平衡	56
参考文献	60
第三章 单自由度机械系统动力学	61
§ 3.1 概述	61
§ 3.2 作用在机械上的力	62
§ 3.3 单自由度机械系统的动力学方程	65
§ 3.4 动力学方程的求解方法	74
§ 3.5 稳定运动状态的动力学分析	83
§ 3.6 周期性速度波动的调节	90
参考文献	95
第四章 多自由度机械系统动力学	96
§ 4.1 二自由度机械系统动力分析	96

§ 4.2 二自由度机械手的动力学问题	104
§ 4.3 机器人操作机的动力学问题简介	109
参考文献	114

第二篇 机械振动学基础

第五章 单自由度系统的振动	117
§ 5.1 单自由度系统的自由振动	117
§ 5.2 单自由度系统的受迫振动	123
参考文献	139
第六章 二自由度系统的振动	140
§ 6.1 二自由度系统振动方程的建立	140
§ 6.2 二自由度系统的无阻尼自由振动	145
§ 6.3 二自由度系统在简谐激励下的受迫振动	154
第七章 多自由度系统的振动	157
§ 7.1 多自由度系统的振动方程	157
§ 7.2 多自由度系统振动方程的解耦理论	161
§ 7.3 用振型叠加法求系统对激励的响应	168
§ 7.4 机械振动理论的进一步介绍	171
参考文献	173
第八章 基于有限元法的振动分析	174
§ 8.1 有限元法简介	174
§ 8.2 一维单元——杆单元和梁单元	176
§ 8.3 二维单元与平面问题的有限元法	187
参考文献	198

第三篇 机械弹性动力学

第九章 轴和轴系的振动	203
§ 9.1 概述	203
§ 9.2 轴系的扭转振动固有频率计算	204
§ 9.3 轴的横向振动临界转速计算(传递矩阵法)	211
§ 9.4 轴的横向振动临界转速计算(有限元法)	218
§ 9.5 转子动力学概述	221
参考文献	223
第十章 凸轮机构弹性动力学	224

§ 10.1 概述	224
§ 10.2 高速凸轮机构常用运动规律	225
§ 10.3 凸轮机构的动力学模型	237
§ 10.4 凸轮机构的弹性动力分析	241
§ 10.5 凸轮机构的动力学设计	250
§ 10.6 工程实例: 高速分度凸轮系统的动力学分析	253
参考文献	263
第十一章 连杆机构弹性动力学	265
§ 11.1 概述	265
§ 11.2 单元运动微分方程的建立	270
§ 11.3 系统运动微分方程的形成	280
§ 11.4 机构的弹性动力分析	284
§ 11.5 连杆机构的综合与弹性动力响应的抑制	291
参考文献	298
第十二章 齿轮传动弹性动力学	300
§ 12.1 概述	300
§ 12.2 齿轮传动的动态激励	301
§ 12.3 直齿圆柱齿轮传动的扭转振动模型	305
§ 12.4 直齿圆柱齿轮传动的弯曲-扭转振动模型	310
§ 12.5 齿轮传动动力学发展动态综述	319
参考文献	323
第十三章 行星齿轮传动弹性动力学	324
§ 13.1 直齿行星传动的平移-扭转动力学模型	324
§ 13.2 直齿行星传动的纯扭转动力学模型	336
§ 13.3 相位调谐理论与行星传动基本参数的选取	343
参考文献	354
第十四章 机械系统弹性动力学	356
§ 14.1 桥式起重机提升系统的动态过程分析	356
§ 14.2 轧钢机的动态过程分析	361
§ 14.3 从系统弹性动力学出发进行凸轮轮廓曲线设计	365
参考文献	371
第十五章 含间隙机械系统的动力学问题	372
§ 15.1 概述	372
§ 15.2 考虑运动副间隙影响的连杆机构动力分析	373
§ 15.3 含间隙分度凸轮机构的动力学问题	382

§ 15.4 含间隙机械系统的非线性特性研究简介	385
参考文献	388

第四篇 数值方法与常用软件

第十六章 求解常微分方程组的数值方法	395
§ 16.1 龙格-库塔法	395
§ 16.2 刚性微分方程的求解	400
参考文献	404
第十七章 常用机械动力学软件简介	405
§ 17.1 常用的动力学分析软件——ADAMS 和 RecurDyn	406
§ 17.2 常用的有限元分析软件——ANSYS 和 ALGOR	410
参考文献	415
附录	416
附录 I 平面连杆机构运动分析的子程序	416
附录 II 求解超越方程的二分法和线性插值法	428
附录 III 关于横越冲击特性值的推导	429
附录 IV 常用简谐组合运动规律	430
附录 V 行星传动啮合刚度变动量的计算	433
附录 VI 轮齿变形的计算	434
附录 VII 齿轮传动振动方程中的矩阵和列阵	436
参考文献	438
索引	439

绪 论

§ 0.1 机械动力学的研究内容

机械原理是一门以机械为研究对象的科学，它由机构结构学、机构运动学和机械动力学三部分组成。

机构结构学讨论机构的组成原理，研究机构运动的可能性和确定性。

机构运动学不考虑机构中力的作用，仅从几何的观点来研究机构各构件和构件上的点的运动参数——位移、轨迹、速度、加速度等的求解——运动学分析 (kinematic analysis)，以及仅从运动角度设计新机构的方法——运动学综合 (kinematic synthesis)。

任何机械，在存在运动的同时，都要受到力的作用。

机械动力学 (machinery dynamics) 是研究机械在力作用下的运动和机械在运动中产生的力，并从力与运动的相互作用的角度进行机械的设计和科学的科学。

机械动力学和机构运动学一样，研究分析与综合两方面的问题。

动力学分析，就是研究现有机件在力作用下的运动和机械在运动中产生的力。所谓“现有机件”既可能是指已经在运行的机械，也可能是指仅由运动学综合而设计出的机械方案。

动力学综合 (更多地被称为动力学设计)，就是从力与运动的相互作用的角度来设计新机械或对现有机件进行改进，使之达到给定的运动学、动力学要求。

动力学分析是动力学综合的基础。

一、动力学的分析方法按功能分类

机械动力学的分析过程，按其功能不同，可分为两类问题：

1) 动力学反问题 (inverse dynamics)：已知机构的运动状态和阻力 (力矩)，求解应施加于原动构件上的平衡力 (力矩)，以及各运动副中的反力 (即已知运动求力)。

2) 动力学正问题 (forward dynamics)：给定机器的输入力 (力矩) 和阻力 (力矩) 的变化规律，求解机器的实际运动规律 (即已知力求

运动)。

现以一个牛头刨床(图 0.1.1)为例来说明动力学正问题和动力学反问题在设计阶段的应用。在牛头刨床的设计过程中,首先根据刨床工作的特点选择了这个特定的六杆机构,并完成了其运动学设计,确定了电动机的转速、各级传动的传动比和各构件的基本几何尺寸。为确定电动机的功率和验算构件的强度和轴承的寿命,就需要根据牛头刨床承受的切削力等载荷求出应施加于原动构件上的平衡力矩和各运动副中的约束反力,也即要求解动力学反问题。在求解动力学反问题时做了一个假定,即认为电动机和六杆机构的曲柄都是等速回转的。而实际上,电动机输出的驱动力矩 M 并不能严格地等于求解动力学反问题所算出的平衡力矩。因而,曲柄并不能严格地保持等速回转这一假定,而存在角速度的周期性波动。这一角速度波动对刨削加工不利,对牛头刨床的强度和寿命也是不利的,需要通过安装飞轮加以控制。这就需要根据电动机的机械特性和牛头刨床的负载,来计算机器的实际运动规律,也即求解动力学正问题。

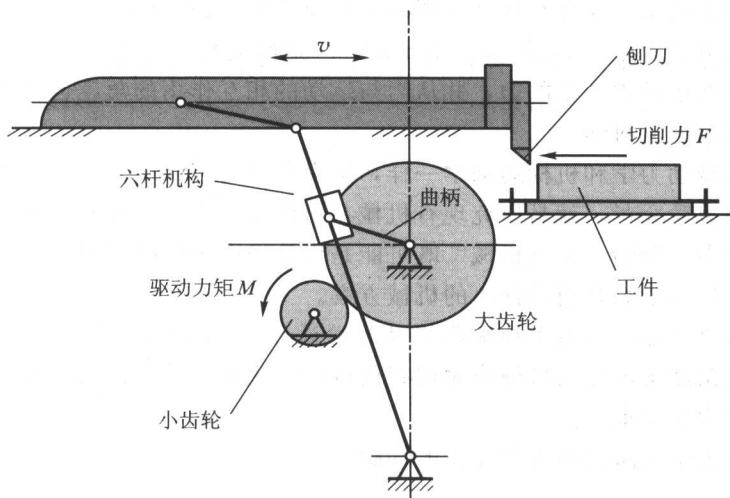


图 0.1.1 牛头刨床

再以机器人为例加以说明。在机器人(图 0.1.2)的分析中,首先要根据机器人手部应完成的工作,进行轨迹规划,即给定机器人手部的运动路径以及路径上各点的速度和加速度。然后,通过求解动力学反问题,求出应施加于各主动关节处的驱动力矩的变化规律。动力学反问题在机器人分析中至关重要,它是机器人控制器设计的基础。若已知各关节的驱动力矩,要求解手部的真实运动,则需要求解动力学正问题,它

是机器人动态仿真的基础。

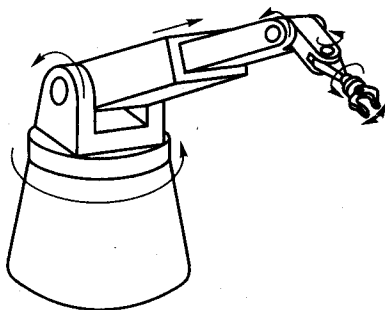


图 0.1.2 机器人

二、动力学分析方法按水平分类

还可以按分析方法的水平对动力学分析过程作另一种分类。

二百年来,尤其是近几十年来,人们对生产率的不断追求,使机械的运转速度不断地提高;而与此同时,人们又总是希望机械能轻巧一些,材质的改善使得构件的截面可以设计得更小一些,以减轻重量,节约材料,节约能源。速度高了,机械中的惯性力大大增加,而构件柔度加大,则使得系统更容易产生振动。振动降低了机械的精度和寿命,恶化了劳动条件,振动噪声污染了环境。机械产品高速化、轻量化、精密化、大功率化的趋向不断促进着机械动力学的发展。

力学理论的发展、计算机在设计领域的应用则为不断进步的动力学分析方法提供了理论基础和实现手段。

由于动力学研究的复杂性,人们常常引入一些假定,使问题简化。随着生产实践的发展,对动力学分析的准确度提出了新的要求;而科学技术的发展,为动力学分析提供了新的理论和手段。因而,动力学研究发展的总趋向是:逐步地将这些假定抛弃,日益地使分析更接近客观实际情况,使动力学分析方法的水平逐步提高。

在机械动力学发展历史上,先后提出了四种不同水平的分析方法:静力分析、动态静力分析、动力分析、弹性动力分析。在当代机械的分析与设计中,这四种分析方法也仍然都有所应用。

1. 静力分析 (static analysis)

对低速机械,运动中产生的惯性力可以忽略不计。对机械的运动过程中的各个位置,可用静力学方法求出为平衡机械的载荷而需在原动构件上施加的力(力矩),以及各运动副中的反作用力。这样一种分析方法称为静力分析。这是历史上最早出现的机械的力分析方法。对许多速

度不太高的机械, 现在仍用静力分析方法来计算原动机的功率, 进行构件和运动副的承载能力计算。

2. 动态静力分析 (kineto-static analysis)

根据达朗贝尔原理, 将惯性力和惯性力矩计入静力平衡方程来求出为平衡静载荷和动载荷而需在原动构件上施加的力 (力矩), 以及各运动副中的反作用力。这样一种分析方法称为动态静力分析。在这种分析方法中, 为求出惯性负荷需要先知道构件的加速度和角加速度。因此在进行动态静力分析之前首先要进行运动分析。在进行运动分析时假定原动构件按某一给定的理想运动规律运动, 例如, 对作回转运动的原动构件一般均假定为作等速回转运动。由于采用了“原动构件等速回转”这一假定, 在动态静力分析中便不涉及原动机的特性, 因而这在本质上还是一种理想化运动状态下的力分析。动态静力分析应用在动力学反问题中。对许多速度较高的机械, 多用动态静力分析代替静力分析。

3. 动力分析 (dynamic analysis)

在力的作用下, 机械并不能维持“原动构件等速回转”这种理想化的假定。尽管这种假定在许多情况下是允许的, 但在工程实践中也常常要求知道原动构件和机械系统的真实运动。进行“动力分析”的目的, 就是要求出在外力作用下机械的真实运动。它应用于动力学正问题中。

在动力分析中, 抛弃了对原动构件运动规律的理想假定, 因而自然地要把原动机包括在机械系统之内来进行分析。所以动力分析的对象是整个机械系统, 在许多文献中也常将它称为“机械系统动力学”。

静力分析和动态静力分析的数学模型均归结为一个代数方程组的求解, 而动力分析则需要求解微分方程或代数-微分混合方程。

4. 弹性动力分析 (elasto-dynamic analysis)

在上述三种分析方法中, 构件均被假定为刚性的。随着机械向轻量化方向发展, 构件的柔度加大, 传统的将构件作为刚体的研究方法不再适用。在这种情况下, 出现了计入构件弹性的动力分析方法——弹性动力分析。

弹性动力分析的难度远远超过前三种分析方法。机械动力学可以划分为两大部分——机械刚体动力学和机械弹性动力学。

§ 0.2 机械动力学的发展简史

古代的机械是用人力、畜力和水力来驱动的, 动力制约了机械的速度。因此, 在古代机械的制作中主要考虑运动的实现, 而基本未涉及动

力学。

近代以来,机械动力学的发展可大体分为两个阶段:第一次工业革命到20世纪中叶,可称为早期发展阶段;第二次世界大战以后,可称为近期发展阶段。

一、机械动力学的早期发展

(一) 历史背景

1. 生产力不断提高的要求推动着机械动力学的发展

1769年,瓦特(Watt)改进了蒸汽机。动力的变革极大地推动了机器的广泛使用,引发了第一次工业革命。1832年,法拉第(Faraday)发明了电动机,引发了第二次工业革命,世界进入了电气化时代。1876年,奥托(Otto)发明了内燃机。

1797年,完全由金属制成的车床在英国问世,它已是现代车床的雏形。19世纪中叶,通用机床的各种类型已大体齐备;到19世纪末,自动机床和大型机床出现。

1855年,贝赛麦(Bessemer)发明了转炉炼钢方法。

动力的变革,材料和加工手段的进步,全面地推动了机械制造业的迅速发展,使大幅度提高机器的速度和功率成为可能。由于不断提高生产率的需要,机器速度提高的趋势二百多年来从未停止。机械的高速化,始终是机器理论发展的重要推动力之一,更是机械动力学发展的第一推动力。

同样是由于不断提高生产率的需要,机械的大功率化和自动化成为另外两个重要的趋势。而由于提高产品质量的要求,机器的精密化程度也不断提高。

节约材料、节约能源要求减轻机器的重量,特别是车辆和飞行器的重量,这也一直是机械设计追求的目标之一。材质的改善使得机械的轻量化成为可能。

机械产品的高速化、大功率化、精密化和轻量化的趋向不断推动着机械动力学的发展。一方面,它推动着各种机构的演进与创新,促使机器中的传动装置不断发展和完善;另一方面,它推动了机械动力学分析水平的提高。

2. 力学理论为机械动力学的发展提供了坚实的理论基础

从15世纪中叶到18世纪下半期,是欧洲向资本主义发展的社会转型期。适应当时航海和工业的发展需要,天文学和力学发展起来。图0.2.1所示为奠定机械动力学理论基础的力学家。



图 0.2.1 奠定机械动力学理论基础的力学家

牛顿 (Newton) 总结了哥白尼、开普勒、伽利略等人的研究成果, 1687 年发表了著名的运动定律学说, 创立了经典力学。牛顿第二定律所描述的力、质量和加速度的关系是动力学的基本定律。经典力学的创立, 开辟了科学发展的新时代, 奠定了力学发展的基础, 也奠定了机械工程、土木工程等技术科学发展的基础。今天, 一切机械运动与力分析的理论, 全部都源于牛顿力学。

1765 年, 瑞士科学家欧拉 (Euler) 将牛顿的理论从质点扩展到刚体, 他所提出的欧拉公式是牛顿第二定律针对刚体定轴转动情况的扩展。1742 年提出的达朗贝尔 (D'Alembert) 原理将静力学中研究平衡的方法与牛顿第二定律相结合, 计入惯性力, 用来研究动力学问题。

在用牛顿第二定律研究一个复杂系统的动力学时, 要对系统中的各个物体分别建立方程, 这势必会引入不一定需要求解的未知约束反力, 使方程的联立求解变得十分麻烦。法国数学、力学家拉格朗日 (Lagrange) 于 1788 年出版了《Mécanique Analytique》(分析力学) 一书。他成功地将力学理论与数学分析方法结合起来, 建立了具有严谨数学结构的分析力学体系。拉格朗日方程是从能量观点上统一建立起来的系统能量和功之间的标量关系, 它既可使分析的步骤规范、统一, 又回避了未知的约束反力, 从而克服了直接用牛顿定律推导动力学方程的缺点, 成为研究约束系统动力学问题的一个普遍而有效的方法。在此基础上, 哈密顿 (Hamilton) 建立了微分方程的积分理论和力学的变分原理, 使分析力学的理论体系臻于完善。分析力学是在经典力学范畴内的一个分支, 是一种表达形式上的创新。

(二) 振动理论的建立与发展

机械振动理论是最早发展起来的机械动力学理论。对机械振动的研