

李有堂 著



高等机械系统动力学 ——原理与方法



科学出版社

(TH-1083.31)

高等机械系统动力学 ——原理与方法



科学出版社互联网入口
机械与土木工程分社
联系电话: 010-64006601
E-mail: peiyu@mail.sciencep.com
销售分类建议: 机械工程

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-062908-1



9 787030 629081 >

定价: 150.00 元

高等机械系统动力学

——原理与方法

李有堂 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书为适应现代机械产品和结构的动力学分析及动态设计需要,结合作者多年的科研实践和机械系统动力学教学实践撰写而成。全书共7章,主要阐述高等机械系统动力学的原理与方法。第1章绪论。第2章动力学问题的数学基础,主要包括张量分析、积分变换等。第3章动力学问题的力学基础,主要包括拉格朗日方法、哈密顿方法、变分原理、机电系统动力学方程等。第4章系统运动稳定性原理,主要包括二阶定常系统、保守系统、线性系统、周期变系数系统的稳定性等。第5章刚性动力学原理,主要包括刚体运动学方程、刚体动力学方程、刚体的一般运动等。第6章弹性动力学原理,主要包括应力张量、应变张量、弹性动力学的基本方程、弹性动力学问题的基本解法等。第7章塑性动力学原理,主要包括塑性动力学的本构关系理论、弹塑性系统的动力响应、刚塑性动力学的原理等。

本书可作为机械工程及相关设计与制造专业研究生教材,也可供现代制造领域相关高级技术人员、研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高等机械系统动力学:原理与方法/李有堂著. —北京:科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-062908-1

I. ①高… II. ①李… III. ①机械工程-动力学-高等学校-教材
IV. ①TH113

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第245883号

责任编辑:裴育李娜 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东 / 封面设计:蓝正

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年11月第一版 开本:720×1000 B5

2020年1月第二次印刷 印张:30 1/4

字数:597 000

定价:150.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着现代工业和科学技术的快速发展,智能制造、工业 4.0 等先进制造技术使制造业日新月异,机械产品与设备日益朝着高速、高效、精密、轻量化和自动化方向发展,良好的结构动态性能要求已成为产品设计中的重要优化指标之一。在高速、精密机械设计中,为了保证机械的精确度和稳定性,需要对结构进行动力学分析和动态设计。现代机械设计已经从为实现某种功能的运动学设计转向以改善和提高机器运动和动力特性为主要目的的动力学综合分析与设计。可见,机械系统动力学对现代机械设计有着重要且深远的意义,对机械行业的发展起着关键性的作用。

力学是现代自然科学的基础学科,是现代工程的基础支柱。系统动力学问题对机械设计的动态特性和机械运动规律具有重要影响。因此,一位优秀的机械产品设计师或工程师,首先应该掌握扎实的力学知识,尤其是动力学知识。目前,机械工程等领域的人才培养,虽然对动力学知识有所涉及,但距离现代设计的要求还有差距。为了实施中国制造“三步走”发展战略,实现从中国制造到中国创造、建设制造业强国的目标,需要培养大批全面掌握机械系统动力学的高端人才。动力学问题内容广泛,涉及一些特殊的数学基础和力学原理。针对现代机械产品设计的动力学分析和动态设计要求,作者结合多年的科学研究与研究生课程教学实践撰写本书。

本书主要阐述高等机械系统动力学的原理与方法,涉及动力学问题的数学基础、力学基础和各类动力学原理。第 1 章绪论,主要讨论动载荷、动力学问题的特征、固体材料的动力特性等问题。第 2 章动力学问题的数学基础,主要包括张量分析、黎曼卷积、积分变换等。第 3 章动力学问题的力学基础,主要涉及基本概念与原理、拉格朗日方程、哈密顿方程、变分原理、机电系统动力学方程等。第 4 章系统运动稳定性原理,主要讨论二阶定常系统、保守系统、线性系统、周期变系数系统的稳定性等。第 5 章刚性动力学原理,主要涉及刚体的有限转动、刚体运动学方程、刚体动力学方程、刚体的定点转动、刚体的一般运动等。第 6 章弹性动力学原理,主要包括应力张量、应变张量、弹性动力学的基本方程、弹性动力学问题的基本解法和互易定理等。第 7 章塑性动力学原理,主要涉及高应变率下塑性变形的微观机制、塑性动力学的本构关系理论、弹塑性系统的动力响应、刚塑性动力学的一般原理和广义原理等。

本书相关研究工作得到国家自然科学基金、教育部“长江学者和创新团队发展计划”、兰州理工大学红柳一流学科建设和研究生精品课程建设计划的支持，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者
2019年6月
于兰州理工大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 系统与机械系统	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 机械系统	1
1.1.3 系统组成	2
1.2 动载荷	2
1.3 动力学问题的特征	3
1.4 固体材料的动力特性	4
1.5 动力学问题类型	6
第 2 章 动力学问题的数学基础	7
2.1 张量代数	7
2.1.1 指标记法与常用符号	7
2.1.2 并矢与缩并	10
2.1.3 坐标、基矢量、度量张量和坐标转换	15
2.1.4 正交曲线坐标系下的基矢量及其张量分量	23
2.1.5 张量及其表示法	25
2.1.6 张量的代数运算、商法则	28
2.1.7 二阶张量的迹、矩阵与行列式	31
2.1.8 特殊的二阶张量	33
2.1.9 二阶张量的不变量	39
2.1.10 张量的特征值和特征矢量	40
2.1.11 凯莱-哈密顿定理	41
2.1.12 一阶张量(矢量)的物理分量	42
2.1.13 二阶张量的分解	43
2.2 张量分析	45
2.2.1 张量函数及其导数、链规则	45
2.2.2 梯度、散度、旋度	51
2.2.3 克里斯托费尔符号	56
2.2.4 协变导数、逆变导数	57
2.2.5 双重微分算子的运算、不变性微分算子	58

2.2.6	内禀导数、曲率张量	60
2.2.7	积分定理、广义积分定理	63
2.2.8	非完整系物理标架下的微分算子	65
2.2.9	两点张量场	74
2.3	黎曼卷积与泊松括号	76
2.3.1	黎曼卷积	76
2.3.2	泊松括号	77
2.4	数学变换	79
2.4.1	勒让德变换	79
2.4.2	辛变换与辛算法	81
2.5	积分变换	86
2.5.1	傅里叶变换	86
2.5.2	拉普拉斯变换及其数值反演	89
2.5.3	梅林变换及其卷积公式	92
2.5.4	汉克尔变换	93
第3章	动力学问题的力学基础	94
3.1	基本概念与动力学定理	94
3.1.1	运动、位形、状态变量、约束及其分类	94
3.1.2	自由度与广义坐标	97
3.1.3	虚位移原理	100
3.1.4	动力学基本定理	111
3.1.5	影响系数、势能及其广义坐标表达、动能及其广义坐标表达	114
3.1.6	达朗贝尔原理	118
3.2	拉格朗日方法	121
3.2.1	动力学普遍方程	121
3.2.2	拉格朗日方程	124
3.2.3	能量积分与循环积分	135
3.2.4	拉格朗日乘子法与劳斯方程	137
3.2.5	阿佩尔方程与凯恩方程	141
3.2.6	尼尔森方程	148
3.3	哈密顿方法	151
3.3.1	哈密顿方程	151
3.3.2	保守系统的首次积分	159
3.3.3	泊松方法与分离变量法	162
3.3.4	积分哈密顿方程的雅可比方法	170
3.3.5	离散哈密顿原理与保结构算法	173

3.3.6	哈密顿系统的辛性质	178
3.4	变分原理	180
3.4.1	泛函与变分、欧拉方程	181
3.4.2	高斯原理	184
3.4.3	哈密顿原理	188
3.4.4	实路径、可能路径与虚路径	192
3.4.5	利用哈密顿原理推导运动方程	193
3.4.6	变分问题的直接方法	194
3.5	机电系统动力学方程	197
3.5.1	电路方程	197
3.5.2	电磁场的广义力	198
3.5.3	拉格朗日-麦克斯韦方程	199
第 4 章	系统运动稳定性原理	202
4.1	运动稳定性的基本概念	202
4.1.1	系统的平衡状态与给定运动	202
4.1.2	扰动方程	203
4.1.3	稳定性的定义	204
4.2	二阶定常系统的稳定性	205
4.2.1	系统的轨线与平衡状态	205
4.2.2	偏差	206
4.2.3	稳定性相关概念	207
4.2.4	线性系统平衡点的分类总图	211
4.2.5	极限环	212
4.2.6	方向场和相图	213
4.3	保守系统的稳定性	214
4.3.1	保守系统的能量积分	215
4.3.2	保守系统的相轨迹	215
4.3.3	静态分叉	217
4.3.4	保守系统的平衡位置稳定性	219
4.3.5	耗散力对平衡位置稳定性的影响	221
4.3.6	陀螺力对平衡位置稳定性的影响	222
4.4	李雅普诺夫直接方法	224
4.4.1	定号、半定号和不定号函数	224
4.4.2	李雅普诺夫定理	224
4.4.3	拉格朗日定理	228
4.5	线性系统的稳定性	230

4.5.1	线性系统的基本解	231
4.5.2	线性系统的稳定性准则	232
4.5.3	李雅普诺夫一次近似理论	234
4.5.4	劳斯-赫尔维茨判据	239
4.5.5	开尔文定理	241
4.6	周期变系数系统的稳定性	246
4.6.1	弗洛凯定理	247
4.6.2	希尔方程	249
4.6.3	马蒂厄方程	249
第 5 章	刚性动力学原理	252
5.1	刚体的有限转动	252
5.1.1	有限转动张量	252
5.1.2	欧拉角	255
5.1.3	卡尔丹角	256
5.1.4	欧拉参数	260
5.1.5	罗德里格斯参数	264
5.2	刚体运动学方程	265
5.2.1	无限小转动矢量	265
5.2.2	角速度与角加速度	267
5.2.3	转动坐标系中的矢量导数	267
5.2.4	角度坐标表示的运动学方程	269
5.2.5	方向余弦表示的运动学方程	271
5.2.6	欧拉参数表示的运动学方程	272
5.3	刚体动力学方程	274
5.3.1	刚体的动量矩	274
5.3.2	刚体的质量几何	275
5.3.3	刚体的动能和加速度能	279
5.3.4	欧拉方程	281
5.3.5	轴对称刚体的欧拉方程	283
5.4	无力矩刚体的定点转动	287
5.4.1	动力学方程的初积分	287
5.4.2	潘索的几何解释	288
5.4.3	永久转动的稳定性	289
5.4.4	解析积分	291
5.4.5	自由规则进动	292
5.4.6	最大轴原则	294

5.4.7	无力矩陀螺体的定点运动	295
5.4.8	受微弱力矩作用的摄动方程	297
5.5	重力场中轴对称刚体的定点转动	300
5.5.1	动力学方程的初积分	300
5.5.2	极点轨迹	301
5.5.3	受迫规则进动	303
5.5.4	永久转动的稳定性	304
5.5.5	一次近似稳定性条件	305
5.6	刚体的一般运动	306
5.6.1	刚体对动点的动量矩定理	306
5.6.2	动力学方程	308
5.6.3	刚体在平面上的纯滚动	310
5.6.4	刚体在平面上的带滑动滚动	313
第 6 章	弹性动力学原理	317
6.1	应力张量	317
6.1.1	应力张量的概念	317
6.1.2	过一点的任意面元上的应力矢量	320
6.1.3	应力张量的混合分量	320
6.1.4	应力张量的主方向、主值、不变量	321
6.1.5	最大剪应力、八面体剪应力	323
6.1.6	偏应力张量	325
6.1.7	应力张量的物理分量	326
6.1.8	大变形的应力张量	327
6.2	应变张量	329
6.2.1	应变张量的概念	329
6.2.2	应变张量与位移矢量的关系	331
6.2.3	应变张量的几何意义	332
6.2.4	小变形应变张量、转动张量	334
6.2.5	应变张量的性质	335
6.2.6	应变张量的物理分量	336
6.2.7	变形前后体元及面元的变化	337
6.3	弹性动力学的基本方程	339
6.3.1	几何方程	339
6.3.2	运动方程	342
6.3.3	边界条件和间断条件	345
6.3.4	本构方程	348

6.3.5	应变协调方程	353
6.4	弹性动力学问题的基本解法	359
6.4.1	弹性动力学问题的应力解法方程	359
6.4.2	弹性动力学问题的位移解法方程	366
6.5	初值-边值问题的分类及其解的唯一性	369
6.6	弹性动力学的哈密顿变分原理	372
6.7	弹性动力学的互易定理	374
第 7 章	塑性动力学原理	376
7.1	高应变率下塑性变形的微观机制	377
7.2	塑性动力学的本构关系理论	379
7.2.1	屈服函数与加载函数	379
7.2.2	应变率无关理论	383
7.2.3	过应力模型理论	387
7.2.4	拟线性本构方程	390
7.2.5	Bodner-Partom 理论	391
7.2.6	随机过程模型理论	393
7.3	弹塑性系统的动力响应	397
7.3.1	理想弹塑性系统	398
7.3.2	理想刚塑性系统	410
7.3.3	弹性线性强化系统	414
7.3.4	弹黏塑性系统	418
7.4	间断面的传播、力和运动边界条件	422
7.5	刚塑性动力学的一般原理	427
7.5.1	虚速度原理	427
7.5.2	哈密顿型的变分原理	430
7.5.3	刚塑性体位移限定定理	435
7.5.4	刚塑性动力学的最小值原理	441
7.6	刚塑性动力学的广义原理	451
7.6.1	刚塑性体的极值原理	451
7.6.2	刚塑性体的广义变分原理	459
7.6.3	初值边值问题的广义变分原理	468
7.6.4	解的唯一性定理	471
	参考文献	473

第 1 章 绪 论

1.1 系统与机械系统

运动是物质存在的形式，是物质的固有属性。机械运动是物质运动的最简单形态，是指物体的空间位置或物体的一部分相对于其他部分空间位置随时间变化的过程。将动力学研究对象的质点系称为动力学系统，或简称系统。机械系统动力学是研究机械在运行过程中的受力情况，以及在这些力作用下的运动状态的一门学科。

1.1.1 系统

系统可定义为一些元素的组合，这些元素之间相互关联、相互制约、相互影响，并组成一个整体。从此定义来看，系统是由多个元素组成的，单一元素不能构成系统。系统的概念范围很广，大到天体系统，小到微观系统。

按照受力性质，系统可以分为静态系统和动态系统。

按照应用性质，系统一般可分为工程系统和非工程系统两类。工程系统有机械系统、电气系统、气动系统和液压系统等；非工程系统有经济学系统、生物学系统、星球系统等。

1.1.2 机械系统

机械系统是由一些机械元件组成的系统，如平面连杆机构系统、由凸轮元件组成的凸轮机构系统、由齿轮元件组成的齿轮系统等。这些元件常常与电气系统、液压系统等结合，组成一种新的系统，如机械和电气结合形成的机电一体化系统、机械和液压结合形成的机液控制系统等。

从工程应用的角度来考虑，把研究和处理的对象定义为一个工程系统。例如，对于一台机械设备，一般由下列三大部分组成：动力装置、传动装置和工作装置。而将每一部分作为对象来研究时，就形成一个系统，即动力系统、传动系统和执行系统，如图 1.1.1 所示。对图 1.1.1 中的传动系统，在机床和车辆中大多数是齿轮传动箱，而齿轮传动箱要完成传递动力的任务，需要齿轮箱内部各元件如齿轮、轴、轴承等协调配合来完成工作，不得出现卡死、干涉等现象。除了系统中各元件(元素)协调工作之外，系统与系统之间也必须协调工作，才能完成机械设备分配给系统的任务。

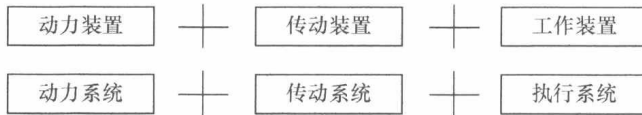


图 1.1.1 机械设备的系统组成

1.1.3 系统组成

在研究和分析一个系统时，常用“信号”这一物理量来描述。

信号是在系统之间连接通道中“流动”着的物理变量，是一个“动态”量。例如，对于图 1.1.2 所示的车辆传动系统， M_1 是动力源(发动机)输入给传动系统的转矩， M_2 是经过系统后输出给执行系统(驱动车轮)的转矩。由于输入转矩 M_1 较小，而输出转矩 M_2 较大，故转矩 M 经过传动系统后由小变大，是一个动态量，可视为信号。同样，转速 n 也可看成一个信号。由于发动机输入的转速 n_1 较高，而经过传动系统后输出给驱动车轮的转速 n_2 较低，所以转速 n 是一个动态量。也就是说，传动系统的作用是减速增矩，转矩 M 和转速 n 都可以作为信号来处理。

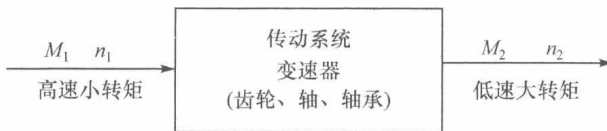


图 1.1.2 车辆传动系统

1.2 动载荷

物体在外部载荷作用下将会改变其原有的形状和运动状态，物体内各部分之间的相互作用力也随之发生变化。这些变化统称为物体对于外部作用的响应。物体承受的载荷多种多样，根据引起物体响应的不同，可将载荷分为静载荷和动载荷。**静载荷**是指加载过程缓慢，物体由此而产生的加速度很小，惯性效应可以略去不计，因而在此加载过程中可以认为物体的各部分随时都处于静力平衡状态。如果在加载过程中能使物体产生显著的加速度，且由加速度引起的惯性力对物体的变形和运动有明显的影响，这类载荷称为**动载荷**。动载荷有周期性、非周期性和短时强载荷等类型。例如，金属切削机床所受的切削力，车辆的碰撞，海浪、水下爆炸对舰船的冲击，空气流动、飞行物对飞机的影响等。动载荷大致可表示为图 1.2.1 所示的五种类型。

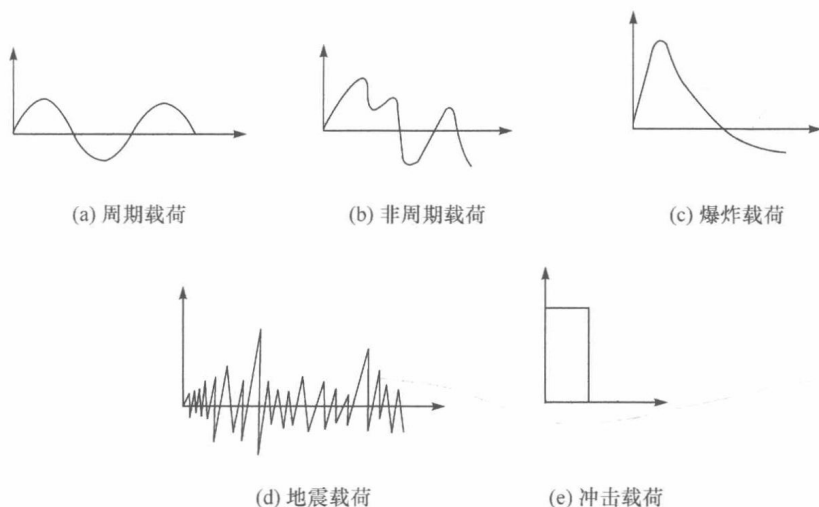


图 1.2.1 动载荷分类

同静载荷相比,物体对动载荷的响应在性质上存在很大的差异。在静力问题中,对于给定的载荷,响应具有单一的解。求解静态响应只需要考虑加载前的参考状态和加载后的变形状态之间的差异,这是由于略去了惯性效应,物体局部受到扰动后,整个物体各部分的响应立即完成,而不需要任何时间过程。在动力问题中,局部的扰动并不能立即引起离扰动源较远部分的响应,而且物体中每一点处的响应也将随时间变化。可见,动力学是研究惯性效应不能忽略的力学问题,虽然其控制方程仅比静力学方程多出了惯性项和时间变量,但相对而言,动力学问题不仅在数学求解上困难得多,而且其物理本质也复杂得多。

不同形式的载荷将引起系统的不同响应,且与材料性质、运动状态和系统的结构形式等密切相关。对于一般周期载荷和载荷强度、撞击速度不高的非周期载荷,需要重点分析系统的弹性振动问题,关注振动失稳和共振等问题。而对于爆炸载荷和冲击载荷等短时强载荷,作用时间很短,强度或者速度很高,输入系统的能量很大,引起系统的应力和变形比将超出弹性极限而进入塑性状态,因而需要研究系统的塑性动力响应、塑性波效应、塑性动力失效等问题。

1.3 动力学问题的特征

当弹塑性系统受到动载荷作用时,对于弹性体,当载荷的峰值不大于使系统进入塑性状态所需的载荷时,系统呈现弹性振动状态。对于弹塑性体,尽管外载荷的峰值远远超过静力极限载荷,但由于载荷作用的持续时间短,输入系统的能

量有限,且由于塑性变形的吸能效应,系统仍可处于许可的工作状态。

结构的动态稳定性包含材料失稳和运动失稳两个方面,材料失稳表现为材料的软化,运动失稳则考虑结构系统本身平衡和运动的稳定性。就运动稳定性而言,也有不同的原因,如参数共振、跟踪载荷、冲击载荷等。参数共振是指结构在周期力作用下产生的分叉现象,不论其分叉后路径是否稳定,如压杆在周期力作用下都产生横向振动且其幅度迅速增大。跟踪载荷是指载荷以静态作用,但系统是保守的,如压杆受一个沿杆端切向作用的力,这类问题需要作为一个动态稳定问题来考虑。

短时超强载荷或突加载荷作用下的结构稳定性是冲击屈曲问题的主要内容。如果所加载荷较小,系统将在其静力平衡位置附近振荡,且振幅较小。当载荷加大时,系统将偏离静力平衡位置而达到静力不平衡状态,运动将发散,这就是冲击屈曲。

1.4 固体材料的动力特性

固体材料在外力作用下,将会发生变形。对于各向同性材料,在静态载荷作用下,随着力的增加,先后发生弹性变形、塑性变形,直至断裂。图 1.4.1 是低碳钢在拉伸实验时的应力-应变曲线。

物体受动载荷作用与受静载荷作用后的反应不同。动载荷与静载荷并没有严格的分界线,可以认为使物体变形的应变率在 10^{-1}s^{-1} 以下为准静态加载;在 $10^{-1}\sim 10\text{s}^{-1}$ 为中等应变率状态;在 $10\sim 10^4\text{s}^{-1}$ 为高应变率状态。应变率越高,所需加载的速度越快,完成加载的时间越短。要实现应变率为 10^2s^{-1} ,则产生 1% 的应变,所需加载时间为 10^{-10}s 。在准静态加载时,产生 1% 的应变所需时间为 10s 以上。实现高应变率状态可以用分离式 Hopkinson 压杆装置的高速加载,要实现更高的应变率,则需要采用轻气泡或爆炸导致的平板撞击才可以实现。

固体材料在高速载荷下会出现应变率效应、应变率历史效应和温度效应等一系列力学特性。

1. 应变率效应

许多金属材料在高速加载条件下,屈服极限明显提高,屈服的出现有滞后现象。图 1.4.2 为应变率效应的实验结果,从图中可以看出,应变率升高时,瞬时应力呈线性形式升高。屈服极限和瞬时应力随应变率提高而提高的现象,称为应变率效应。

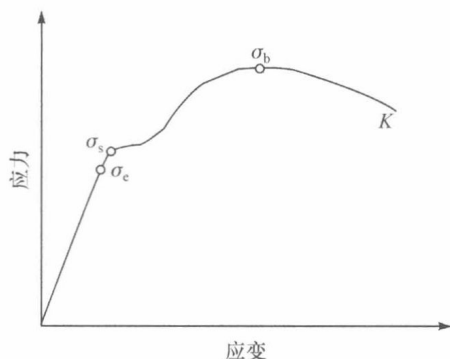


图 1.4.1 低碳钢在拉伸实验时的
应力-应变曲线

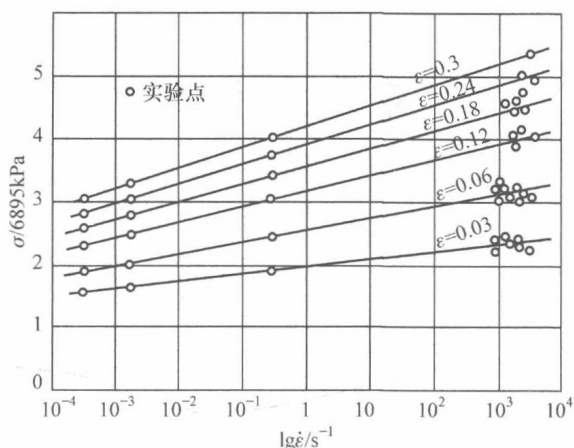


图 1.4.2 应变率效应

2. 应变率历史效应

对于同种材料，在给定的应变率下，应力-应变曲线是一定的。在加载过程中应变率改变，材料的应力-应变关系并不立刻遵守与改变后的应变率对应的应力-应变关系，即固体材料对应变率历史往往是有“记忆”的，称为应变率历史效应。

3. 温度效应

瞬时应力将随温度升高而降低，随着应变率的提高，材料的强化效应将有所降低，而破坏强度有所提高。图 1.4.3 是材料的温度效应，图中 I 区表示低应变率时，温度与应变率关系不大；II 区表示屈服应力随温度提高而降低，且呈线性变化；III 区表示实验未达区；IV 区表示在高应变率条件下，温度的升高引起屈服应力的急剧下降，且不再呈线性关系。

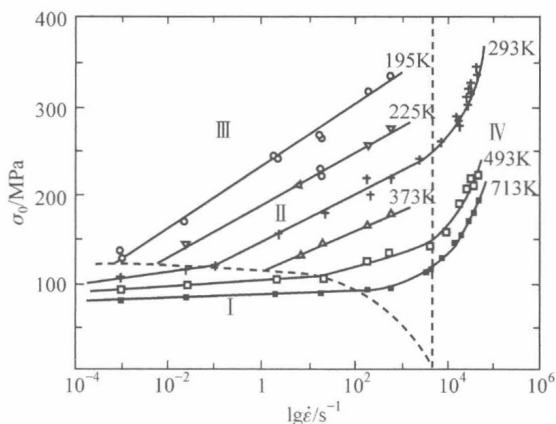


图 1.4.3 材料的温度效应