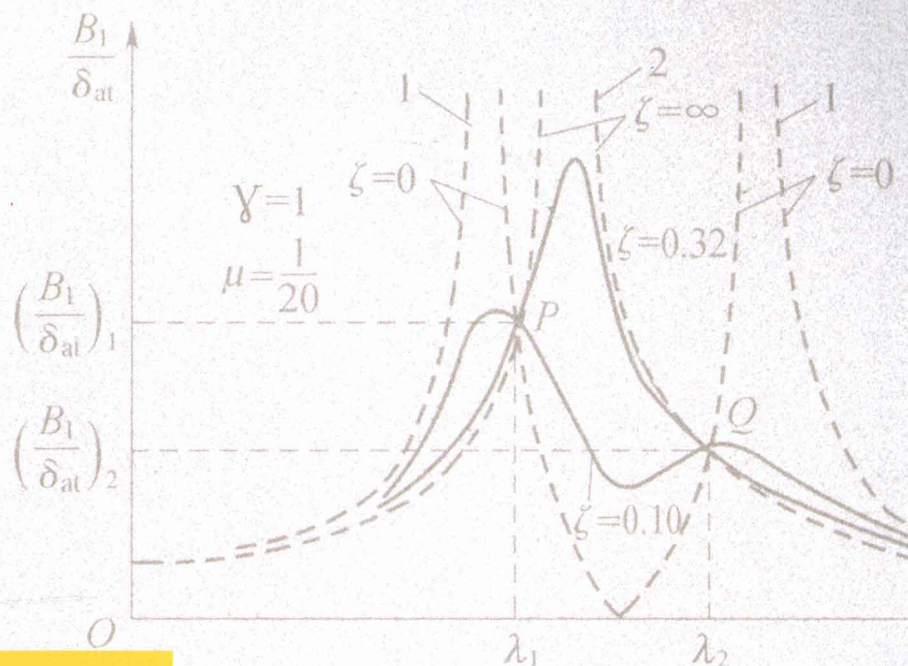




GONGCHENG JIXIE DONGLIXUE 工程机械动力学

张梅军 曹勤 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

内 容 简 介

《工程机械动力学》是研究机械振动、工程机械内部动力、减振降噪和动态设计的一门技术。它可分为基础知识、工程实际应用和拓展知识三大类内容,基础知识部分包括概论、单自由度系统的振动、多自由度系统的振动和工程机械动力学建模四章;工程实际应用部分主要包括工程机械的过渡过程、工程机械的振动过程、工程机械传动系动力学、工程机械行驶系动载荷及行驶平顺性和动力学实测方法五章;最后简要介绍了非线性动力学作为整个线性系统的拓展。

本书可供高等院校机械及相关专业研究生和教师使用,也可作为从事相关专业的技术人员研究参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械动力学/张梅军,曹勤编著. —北京:国防工业出版社, 2012. 4

ISBN 978-7-118-08030-8

I. ①工... II. ①张... ②曹... III. ①工程机械-机械动力学 IV. ①TH2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 047858 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 402 千字

2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 50.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

工程机械是机械装备工业的重要组成部分,它主要指用于工程建设的施工机械的总称,主要由驱动装置、传动装置、工作装置等部分组成。目前广泛用于建筑、水利、电力、道路、矿山、港口和国防等各个工程领域。

工程机械作为一组特殊的机械装备,其行驶路面条件差,工作环境恶劣;结构复杂、机械质量大、惯性大,导致机械内部动力影响尤为严重。机械动力产生动载荷,致使机械极易损坏,降低机器的使用寿命,而且随着工程机械不断向高速化、自动化、小型化发展,机械动力的影响更加突出,目前基于传统的机械静态设计方法已经不能满足工程机械系统行驶安全性要求。因此,研究工程机械动力学不仅对于降低机械动载荷、保障机械安全,而且对于改善机械内部结构、减振降噪等都有着十分重要的意义。

本书作为工程机械及相关专业的一门专业基础教材,是在总结多年教学经验的基础上,吸收了前人的研究成果,结合多年来理论研究、实验应用编写而成。本书编写过程中兼顾了知识的理论性和实际应用的可操作性,全书内容分为基础知识、工程实际应用和拓展知识三个层次。基础知识部分是本课程入门知识,主要由机械振动理论和工程机械动力学建模组成;工程实际应用主要由振动理论知识在工程机械上的应用分析和实测应用分析两部分:包括工程机械动力学过渡过程、工程机械振动过程、工程机械传动系动力学、工程机械行驶系动力学和动力学实测法;最后以非线性动力学作为全书的拓展知识,目的在于借助非线性动力学解决实际线性动力学无法解决的难题。本书以机械振动为基础知识,并又可作为机械动态分析及设计的基础。

全书主要由张梅军编著和执笔,曹勤主审、校对和参编,在教材编写过程中参阅了大量文献和资料,在此向被引用文献的作者表示深深的感谢!

由于时间仓促,作者水平有限,对于本书中存在的一些错误和不足之处敬请读者批评指正。

编 者

2012.2.16

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 动力现象	1
1.2 动力学研究的内容	2
1.3 动力学研究的目的和方法	3
1.3.1 动力学研究的目的	3
1.3.2 动力学研究的方法	3
1.4 动力学的发展	4
第 2 章 单自由度系统振动	6
2.1 机械振动的基本知识	6
2.1.1 机械振动的概念	6
2.1.2 振动的动力学模型	7
2.1.3 简谐振动和周期振动	9
2.1.4 振动中的力学知识	10
2.1.5 振动系统的分类	12
2.2 运动方程的推导方法	12
2.2.1 牛顿运动方程或达朗贝尔原理	12
2.2.2 拉格朗日运动方程	13
2.2.3 哈密顿原理	14
2.3 单自由度系统的振动	16
2.3.1 单自由度系统的自由振动	16
2.3.2 单自由度系统的强迫振动	17
2.3.3 简谐激励下的响应	17
2.3.4 任意周期激励时的响应	21
2.4 几种常见施力函数的响应	22
2.4.1 阶跃激励的响应	22
2.4.2 按直线增长激励载荷下的响应	23
2.4.3 指数衰减载荷的响应	24
2.5 各种激励下响应的求法	25
2.5.1 参数变易法	25
2.5.2 用拉普拉斯变换法求响应	27
2.5.3 用卷积积分求响应	27
2.5.4 传递矩阵法	28

2.6	脉冲激励和任意激励下的响应	28
2.6.1	脉冲激励下的响应	28
2.6.2	任意激励下的响应	30
第3章	多自由度系统的振动	31
3.1	多自由度运动方程的建立	31
3.1.1	牛顿法	31
3.1.2	拉格朗日方程法	32
3.1.3	影响系数法	33
3.2	无阻尼自由振动的响应	38
3.3	坐标耦合与解耦	44
3.3.1	坐标耦合	44
3.3.2	主坐标	44
3.3.3	主振型的正交性	45
3.3.4	模态矩阵正交性证明	46
3.3.5	解耦	48
3.4	多自由度振动系统的动力响应——动力响应下的实模态分析	49
3.4.1	无阻尼振动系统	49
3.4.2	有阻尼振动系统	50
3.4.3	模态分析法	51
3.5	求固有频率的近似方法	52
3.5.1	瑞利法	53
3.5.2	邓克莱法	56
3.5.3	霍尔茨法	60
3.5.4	逐次平方法	63
3.5.5	矩阵迭代法	66
3.5.6	集中质量法	68
第4章	工程机械动力学建模	72
4.1	建立动力学模型时应考虑的因素	72
4.1.1	建模时需找出主要影响因素	72
4.1.2	计算模型的类型决定于动力学过程的性质	73
4.1.3	动力学等效系统	73
4.2	等效质量和等效转动惯量转化	75
4.2.1	连续分布质量的转化——集中质量法	75
4.2.2	不同传动轴上质量(转动惯量)的转化	76
4.2.3	考虑弹簧质量时的当量质量(瑞利法)	80
4.2.4	转动惯量的测量	82
4.3	等效力和等效力矩	83
4.3.1	在机械中的力	83
4.3.2	等效力和等效力矩	85

4.4	等效刚度的转化	87
4.4.1	常见构件的刚度	87
4.4.2	弹簧的串并联	89
4.4.3	等效刚度转化	90
4.5	等效黏性阻尼的转化	92
4.5.1	等效黏性阻尼系数的确定方法	92
4.5.2	与速度平方成正比的阻尼	92
4.5.3	固体表面干摩擦阻尼	93
4.5.4	结构阻尼	93
4.5.5	黏性阻尼系数的实测法	94
4.6	系统识别和参数识别	97
4.6.1	单自由度系统参数识别	98
4.6.2	多自由度系统参数识别	101
第5章	工程机械的过渡过程	105
5.1	概论	105
5.1.1	动力学问题	105
5.1.2	机械的稳定运行	106
5.2	工程机械的起动、制动过程概述	106
5.2.1	起动过程概述	106
5.2.2	制动过程概述	107
5.2.3	起动和制动计算的相似性	108
5.2.4	过渡过程的动力系数	109
5.3	弹性对动力系统起动、制动的影响	109
5.3.1	钢丝绳悬挂系统	110
5.3.2	起动过程中传动系弹性的考虑	113
5.4	工程机械的堵转制动	114
5.5	工程机械过渡过程的一般情形	116
5.5.1	二质量单自由度系统	116
5.5.2	三质量二自由度振动系统	125
5.6	工程机械的冲击过程	130
5.6.1	起动时	130
5.6.2	制动	137
第6章	工程机械的振动过程	140
6.1	工程机械的自由振动	140
6.2	轮式工程机械的自由振动	143
6.2.1	轮式工程机械的模型	143
6.2.2	无弹性悬挂的二自由度系统的振动	144
6.2.3	弹性悬挂的二自由度系统的振动	145
6.2.4	车身的横向摆动	148

6.3	工程机械的强迫振动的振源	150
6.3.1	发动机的激励力矩	150
6.3.2	齿轮的振动源	153
6.3.3	轴承的振源	154
6.3.4	不平衡离心惯性力	155
6.4	铰接式工程机械动力学	155
6.4.1	铰接式机械的一般运动方程	155
6.4.2	铰接式机械的运动方程的讨论	158
6.5	工程机械强迫振动的应用	158
6.5.1	转子的平衡问题	158
6.5.2	系统的减振	160
6.5.3	机械隔振	165
第7章	工程机械传动系动力学	168
7.1	传动系弯曲振动模型和传递矩阵法基础知识	168
7.1.1	传动系弯曲振动模型	168
7.1.2	传递矩阵法基础知识	169
7.2	弹簧质量系统的传递矩阵法	170
7.2.1	场传递矩阵	171
7.2.2	点传递矩阵	171
7.2.3	系统传递矩阵	171
7.3	轴盘扭转振动系统的传递矩阵法	174
7.3.1	场传递矩阵	174
7.3.2	点传递矩阵	174
7.3.3	系统传递矩阵	175
7.3.4	链状结构扭转系统	179
7.4	梁上有集中质量的弯曲振动的传递矩阵法	181
7.4.1	连续梁段系统	181
7.4.2	质量 i 上作用有弹簧刚度 k_i 的弹性支座时的传递矩阵	183
7.4.3	各种特定边界条件下的传递矩阵法	184
7.4.4	弯曲系统中存在铰点时的传递矩阵法	187
7.5	传动系弯曲强迫振动的传递矩阵法	193
7.5.1	传动系弯曲振动振源	193
7.5.2	传动系弯曲强迫振动的传递矩阵法	195
第8章	工程机械行驶系动载荷及行驶平顺性	198
8.1	随机过程的基本概念	198
8.1.1	随机信号的样本和总体	198
8.1.2	概率密度函数和原点矩	199
8.1.3	平稳随机过程的定义	200
8.2	随机过程的描述	200

8.2.1	随机信号的幅域描述	200
8.2.2	相关函数	203
8.2.3	频域信息	205
8.2.4	位移、速度和加速度的关系	210
8.3	行驶系路面谱和行驶系动力学模型	212
8.3.1	行驶系路面谱	212
8.3.2	行驶系动力学模型	213
8.4	无弹性悬挂时行驶系垂直振动和纵向角振动响应计算	213
8.4.1	路面激励谱密度矩阵的确定	214
8.4.2	行驶系响应矩阵的计算	215
8.4.3	位移和加速度的响应谱矩阵	216
8.4.4	位移和加速度的响应均方值	217
8.5	有弹性悬挂时行驶系垂直振动和纵向角振动响应计算	218
8.6	行驶平顺性及其评价方法	219
8.6.1	行驶平顺性评价方法	219
8.6.2	倍频程和 1/3 倍频程	220
8.6.3	人体受到的振动	221
8.7	汽车振动舒适性研究实例	222
8.7.1	理论分析	223
8.7.2	频率响应特性测试	225
第 9 章	动力学实测方法	228
9.1	动力学实测系统	228
9.1.1	直接测量系统	228
9.1.2	激振测量系统	229
9.2	测振系统的安装	229
9.2.1	激振器的安装	229
9.2.2	被测机器的安装	231
9.3	动力学实测实例	231
9.3.1	机械临界转速的实测	232
9.3.2	根据输出测量求系统特性	234
9.4	实测信号的预处理	237
9.4.1	信号的剪切与编排	238
9.4.2	信号的采样过程	238
9.4.3	采样定理	239
9.4.4	信号的预检	240
9.4.5	窗函数	240
第 10 章	非线性动力学	242
10.1	非线性动力学的分类	242
10.1.1	惯性力为非线性的动力系统	242

10.1.2	阻尼力为非线性的动力系统	243
10.1.3	弹性力为非线性的动力系统	244
10.2	非线性振动方程的数值解法	245
10.2.1	平均加速度法	245
10.2.2	线性加速度法	247
10.3	非线性方程的图解方法	249
10.3.1	奇点	249
10.3.2	极限环	250
10.4	单自由度非线性运动方程的分析求解法	253
10.4.1	直接积分法	253
10.4.2	分段积分法求分段线性的非线性运动方程	254
10.5	单自由度非线性方程的近似求解法	255
10.5.1	微振动法	255
10.5.2	简谐平衡法	256
10.5.3	等价线性化方法	256
10.5.4	缓慢改变幅值法	259
10.5.5	用等效平均矩法求等效刚度系数 k_e	260
10.5.6	小参数法	260
10.5.7	参数变易法	262
10.6	非线性系统的某些物理性质	263
10.7	非线性动力学的发展	266
10.7.1	混沌理论	266
10.7.2	分形	267
10.7.3	奇异吸引子	268
参考文献		270

第1章 绪 论

随着机械不断向高速化发展,机械内部动力对机械的影响越来越明显,对于工程机械来说,由于其行驶路面条件差,工作环境十分恶劣,动力影响尤为突出。因此,研究工程机械动力学对于降低机械动载荷、保障机械安全,以及改善机械内部结构、减振降噪,都有着十分重要的意义。

1.1 动力现象

机器在运行过程中,特别是在起动、制动和路面不平时更为显著的一个共同特点就是机器产生颠簸或振动,这种颠簸或振动就是机械的动力现象。

挖掘机回转、接触地面、卸土时都会产生较为明显的振动,有较明显的动力过程;在日常生活中,动力现象也可经常看到,如地震时房屋、建筑物、地面的振动;风吹动下建筑物、大桥、高烟囱的振动;乘电梯时的颤动;坐公共汽车的颠簸等。

我们可以通过乘坐公共汽车与坐在家里比较来感受动力现象的存在。坐在家里有平稳、舒适之感,坐在家里时人体可得到休息、解除疲劳;而坐在车上时有颠簸之感,特别是长距离坐车后会感到疲劳,这种颠簸就是动力现象,这种疲劳就是动力现象在人体上的反应。

因此,不论是日常生活还是在机械工作过程中,动力现象是普遍存在的,特别对于工程机械,由于其工作条件恶劣,行驶路面条件差,其动力现象就更为严重。

动力现象不仅存在于日常生活及一切工作的机械中,而且动力现象的存在会对机械产生严重的危害,其主要表现有:

- (1) 动力现象产生动载荷,如冲击载荷,可使机器容易损坏,降低机器的使用寿命;
- (2) 动力现象降低机器的使用性能,如机床加工精度受到机床本身动力的影响,使机械加工产品质量降低,生产出次品甚至废品;
- (3) 动力现象使人容易产生疲劳,例如振动及振动引起的噪声对人体产生负面影响,降低人的工作效率;
- (4) 动力现象会危及人身安全,由于机械动力会导致机械突然损坏,危及人身安全,如飞机故障、汽车制动失灵等,特别是在机械产生共振时动力现象的危害尤为突出。

动力现象虽然有不利的一面,但也有有利的一面,动力现象的有效利用可造福人类。如利用动力现象设计出各种动力机械,振动压路机、振动筛、振动锤等;利用动力现象进行振动切削,使加工工件的加工表面精度更高;机械故障诊断、乐器发音等都是利用动力现象的结果。

1.2 动力学研究的内容

动力学是研究物体运动的变化与作用于物体上的载荷之间相互关系的学说,它主要描述物体运动的变化与引起运动变化的诸力之间的关系。动力学研究的是可变形体,机械、机器、建筑物、零件、构件以及人体等都是可变形体,都属于动力学研究范畴。

工程机械动力学研究的对象是工程机械,它可分为挖掘机械、铲土运输机械、工程用起重运输机械、桩工机械、压实机械、公路路面机械和铁路线路机械、凿岩机械和风动机械、钢筋混凝土机械八类。不管哪一类机械都可以分成动力装置、传动装置、工作装置三个主要的组成部分。

(1) 动力装置:如发动机、电动机等,它们是产生动力、能量的装置,主要起着换能的作用。

(2) 传动装置:如齿轮装置、液压系统等,它们主要用于传递系统的能量。

(3) 工作装置:如挖掘机的挖斗、推土机的铲刀、汽车的轮胎等,它们主要完成机械做功过程。动力装置、传动装置和工作装置组成了机械系统(图 1.1)。

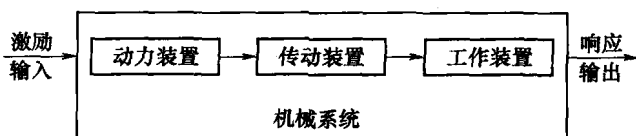


图 1.1 机械系统的组成

系统(System)是相互有联系的结构组成的体系,机械系统一般是由质点、刚体、弹簧、阻尼器等相互有联系的结构组成的体系,实际工作中,可将整个机械作为一个系统看待,也可将某个部件,看作一个系统。如工作装置、传动装置、动力装置或其中某个部件。

实际的机械系统并不是独立存在的,它与周围“环境”之间相互联系、相互影响、相互作用,这就是系统的激励(Excitation)和响应(Response)。激励也称输入(Input),它是指系统受到的外来影响和干扰;响应也称输出(Output),它是系统对外界激励的反应。以汽车为例,激励可以是人的操作,也可以是路面不平。人的操作有加大油门、转动方向盘和刹车等,相应的响应有汽车加速、汽车转向和制动等;对于路面不平激励,汽车的响应则是产生上下颠簸。

因此,动力学研究的内容主要是机械系统、激励、响应三者之间的关系,研究包括以下几个方面的内容。

1. 响应分析

响应分析是在已知系统参数和激励的情况下求系统的响应问题,它包括求出系统的位移、速度、加速度和力等的响应,求出机械的最大内力,为计算机器或结构的强度、刚度、允许的振动能量水平提供依据。

2. 系统设计

系统设计是在已知系统激励和响应的情况下设计合理的系统参数,以满足对动态响应或其他输出的要求。

3. 系统识别

系统识别是已知系统激励和响应的情况下求出系统参数,以便了解系统的特性。

系统设计和系统识别都是在已知系统激励和响应情况下求系统的参数,但系统识别是在有系统存在,但不清楚的情况下,通过激励和响应了解系统的特性;而系统设计是在无系统的情况下,设计出系统的参数,进而设计出系统。

4. 环境预测

环境预测是在已知系统的响应和系统特性参数情况下,确定系统的输入激励,以判别系统的环境特性。例如,求取工程机械受到的地面不平激励,海洋平台受到海浪激励、地震时建筑物受到的地震力大小、内燃机和化工容器内受到的高热、腐蚀、高压等激励,都是环境预测的内容。

1.3 动力学研究的目的和方法

1.3.1 动力学研究的目的

研究工程机械动力学的目的主要是为了了解工程机械系统动力特性,探究工程机械产生动力现象的原因和规律,以及动力现象对机器及人体产生的影响和危害,寻求控制和减少工程机械动力现象的途径。因此,在从事工程机械动力学研究中,主要为了达到以下目的:

- (1) 确定机械系统的固有频率,合理设计机器,预防共振的发生;
- (2) 分析或测量现有结构动态参数,评价现有结构系统的动力特性;
- (3) 诊断和预报结构系统的薄弱环节,为改进现有结构提供依据;
- (4) 控制、消除和减少动力影响,达到减振、降噪的目的;
- (5) 合理利用机械的动力现象,创造性地设计动力机械,造福人类及社会;
- (6) 正确分析人机关系,进行机械舒适性研究。

1.3.2 动力学研究的方法

动力学研究的方法一般有两种,一种是理论研究方法,另一种是实验研究方法。

理论研究方法是把研究对象——机械或机器(图 1.2a)简化为数学—物理模型(图 1.2b),再对数学—物理模型进行分析研究,从而得出具有普遍性的结论,作为以后分析和改进实际机械的依据。

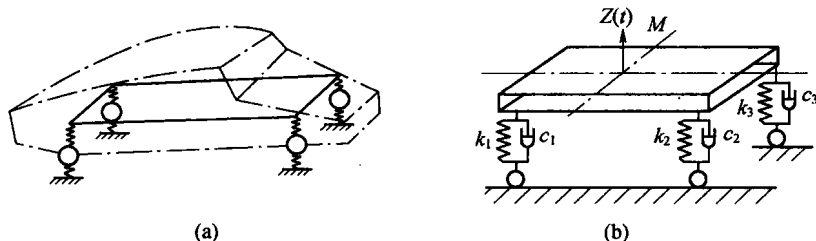


图 1.2 理论研究建模

实验研究方法是在一定的工作条件(工况)下,用特定的仪器对样机、机器或缩尺模型进行测量(图 1.3),利用测量结果分析机器设计时采用的假设和方案是否合理,找出机器中的薄弱环节和设计上不合理的地方,作为改进机械结构的依据。

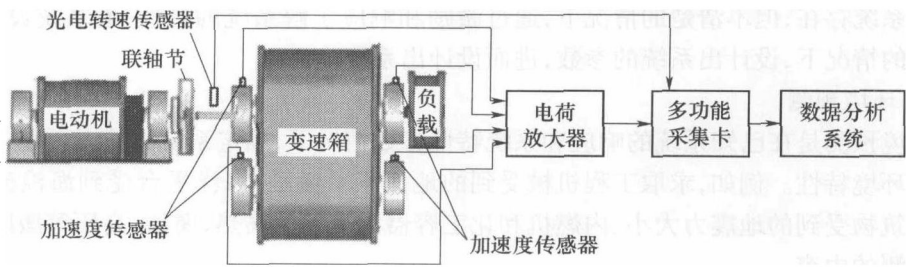


图 1.3 实验研究测量

1.4 动力学的发展

动力学的发展主要有以下几个方面：

1. 复杂机械和多体系统的动力学建模与仿真

多体系统是对一般机械系统最为全面的完整抽象、高度概括和有效的描述,是分析和研究机械系统最优模型形式。多体动力学是在当代先进制造技术、航空航天工业、人体和假肢等科学技术推动下发展起来的一门高新学科。

目前,动力学建模与仿真在轿车悬架多体系统动力学模型、悬架和转向系统动力学性能、虚拟物体简化悬架结构、建立悬架运动学模型、汽车悬架动力学研究方面较为突出。

2. 机械系统动力学分析与设计

目前机械动力学领域研究的一个热点是动态优化设计,它与传统优化设计只考虑静强度问题相比,动态优化设计从已有结构的动力特征出发,设计一个结构使其具有预定的动力特性。其中结构优化中最富有挑战性的研究领域是动力学拓扑优化,结构拓扑的改进可大大改善结构的静、动态性能。

3. 机械系统主动控制和智能控制

研究机械动力学的最终目的主要有两个方面：

- (1) 控制机械振动,防止因振动造成机械的损害;
- (2) 利用振动有利的特性。

传统的控制方式一般是被动控制,根据机械动力响应的分析结果,发现问题时对机械采取相应的修改措施。与被动控制相比,主动控制是以采用机械总振能最小为目标进行寻优控制;智能控制是采用人工智能技术进行控制。

4. 模态分析方法和系统识别

模态分析是在承认实际结构可以运用“模态模型”来描述其动态响应的条件下,通过实验数据的处理和分析,寻求其“模态参数”的一种参数识别方法。

模态分析把复杂的实际结构简化成动力学模型,大大简化了系统的数学运算,通过实验测得实际响应来寻求相应的模型或调整预想的模型参数,使其成为实际结构的最佳描

述,进行响应计算。

5. 结构动力学修改

结构动力学修改内容包括灵敏度分析、模态参数修改(正问题)和反问题。

(1) 灵敏度分析是找到改变质量、刚度和阻尼引起模态频率、阻尼变化最敏感点的位置、最敏感参数;

(2) 模态参数修改(正问题)是通过改变一些点的质量、刚度和阻尼,对结构进行动力修改,计算出新的模态频率、阻尼和振型。

(3) 动力修改的反问题是改变模态频率或阻尼,反推出指定位置需要改变的模态参数。

6. 非线性动力学理论及其工程应用

非线性科学研究的前沿和热点是非线性动力学理论及工程应用,应用非线性动力学的理论揭示事物动态过程现象的本质和机理,具有十分重大的理论和应用价值。非线性的理论研究主要涉及揭示非线性动力系统分岔和混沌;非线性应用方面主要涉及非线性系统的失稳机理、分岔与混沌运动、机械的稳定性、故障诊断、综合治理技术、动力学设计方法等。

第2章 单自由度系统振动

机械振动分析是工程机械动力学的理论基础,通过机械振动分析可以正确认识和掌握机械振动的研究方法和基本规律,积极发挥和利用振动的有利方面,消除和抑制振动的不利方面,为工程机械动力学研究打下良好的基础。

2.1 机械振动的基本知识

2.1.1 机械振动的概念

机械振动(Mechanical Vibration)是指机器或结构物在静平衡位置的上下两种状态之间交变的现象。如单摆的振动、车辆行驶时和工程机械工作时的颠簸、风吹动下建筑物和桥梁的颤动、地震时房屋及地面的晃动等。

实际机器和结构物都可以简化为由若干个“无质量”的弹簧和“无弹性”的质量所组成的模型,这种模型称为弹簧质量系统,如图 2.1 所示是一个最简单的仅包含一个弹簧 k 和一个质量 m 的振动系统。

从运动学观点来看,机械振动是指机械系统的某些物理量(位移 x 、速度 v 或加速度 a) 在某个数值附近随时间 t 的变化关系,如图 2.2 所示是几种典型的机械振动曲线。

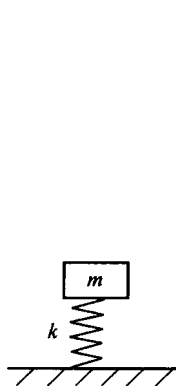


图 2.1 简单振动系统

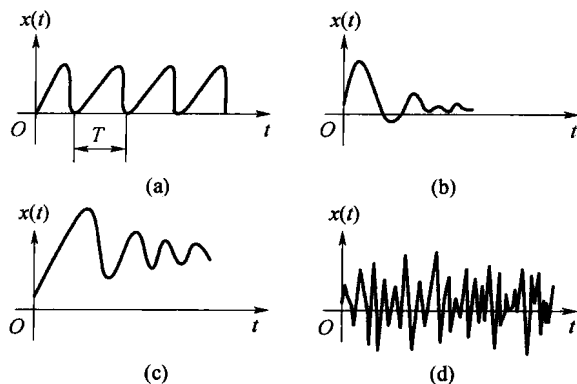


图 2.2 几种典型的机械振动曲线

图 2.2(a) 表示在相等的时间间隔 T 内做往复交变运动,这种运动称周期运动,其中,往复一次所需的时间间隔 T 称为周期,周期振动可用时间的周期函数表示为

$$x(t) = x(t \pm T) \quad (2-1)$$

图 2.2(b) 表示机械系统受到冲击或爆炸时产生的振动;图 2.2(c) 表示旋转机械超载过程中产生的振动,它们没有一定的周期性,但仍为时间的确定性函数,称为非周期

振动。

图 2.2(d) 是车辆行驶时或工程机械工作时的振动,它不能以确定的函数形式表示出来,也无法预知在未来任一指定瞬时 t 时振动物理量 x 的大小,运动不是时间 t 的确定性函数,称为随机振动,随机振动需用数理统计方法才能进行分析。

在许多情况下,机械振动是有害的,由于机械振动,降低了机器动态精度和使用性能,如机床振动降低了工件的加工精度;军械振动影响瞄准;由于机械振动,使人容易疲劳,降低了人的工作效率,如乘坐长途公共汽车使人感到疲劳;机械振动产生噪声,影响人的身心健康;机械振动使机器产生动载荷,使机器容易损坏,降低了机器的使用寿命;有时振动甚至会危及人身安全,如大桥会因共振而毁坏,烟囱因振动而倒塌,飞机因颤振而坠毁都会危及人身安全。

机械振动有时也是有益的,它可造福于人类。如利用振动原理能使乐器发出美妙动听的音乐;利用振动原理可制造人们所需的动力机械,如振动筛、振动压路机、混凝土振动器、振动成型机、振动输送机和振动夯土机等;振动的应用还在不断扩大,如利用振动进行切削加工能提高工件的精度;利用振动信号进行机械故障诊断等。

因此,研究机械振动的目的就是要认识和掌握振动的基本规律,利用振动的有利方面,消除和抑制振动的不利方面。

2.1.2 振动的动力学模型

分析机器和结构物的振动时,一般将机械振动分为激励 (Excitation)、系统 (System) 和响应 (Response) 三部分,它们之间的关系如图 2.3 所示。

激励也称输入 (Input),它是机器或结构物受到的外来的干扰或影响;响应也称输出 (Output),它是机器或结构物对外来激励的反应;而系统则是我们讨论的对象——机器或结构物。机械振动系统一般用惯性、复原性和阻尼三个基本要素来度量。

1. 惯性和质量

惯性 (Inertia) 是使物体目前运动状态持续下去的作用,从能量角度来看,惯性是保持系统动能的要素,机械由于质量运动而产生惯性,因此,惯性的大小可用质量 (Mass) 来表示。

另一方面,质量是表示力和速度关系的元件,在动力学模型中,认为质量是绝对不变的刚体,若对质量施加一个力 F ,应用牛顿定律,质量就施加一个与力 F 同方向的加速度,对于直线运动,力和加速度关系 (图 2.4) 为

$$F = m\ddot{x}$$

式中:惯性力为 $-m\ddot{x}$ 。

因此,质量是刚体所具有的惯性的一种度量,称刚体的质量。

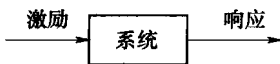


图 2.3 机械振动

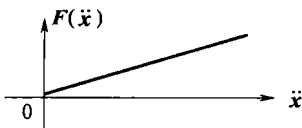


图 2.4 力和加速度的关系

2. 复原性和弹簧

复原性(Restoration)是使物体的位置回复到平衡状态的作用,从能量观点来看,它是储存系统势能的要素,典型的复原性元件是弹簧(Spring),它所产生的恢复力 F 是位移 x 的函数

$$F = F(x)$$

如图 2.5 所示是恢复力 $F(x)$ 与 x 的关系图。

特别是当线性弹簧时,恢复力是位移的线性函数

$$F = -kx$$

式中:比例常数 k 称为弹簧常数或弹簧刚度。

图 2.5(a)所示是线性弹簧的符号,图 2.5(b)所示是线性弹簧的弹簧力和位移之间的关系。

在扭转振动中弹簧常数常用 k_t 表示,扭转振动产生的广义力为扭矩,广义位移为角位移。

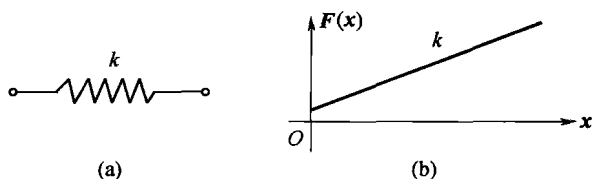


图 2.5 线性弹簧

3. 阻尼和阻尼器

阻尼(Damping)是阻碍物体运动的阻抗作用,从能量角度来看,阻尼是能量耗散的要素,表示了力和速度的关系

$$F = F(\dot{x})$$

即当它的一端受到力 F 的作用时,它的另一端必产生一大小相等、方向相反的力,称为阻尼力。特别在黏性阻尼情况下,阻尼力 F 是速度 $\dot{x}$ 的线性函数

$$F = -c\dot{x}$$

式中: c 为比例常数,称为黏性阻尼系数,简称阻尼系数。

黏性阻尼元件可用如图 2.6(a)所示的阻尼器来表示,如图 2.6(b)所示是线性阻尼力与速度之间的关系曲线。

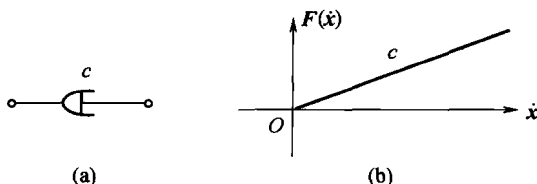


图 2.6 黏性阻尼