

JIXIE ZHENDONG JILI JI KONGZHI JISHU

机械振动机理 & 控制技术

陈虹微/著



“国家一级出版社”



中国纺织出版社

“全国百佳图书出版单位”

机械振动机理 及控制技术

陈虹微/著



内 容 提 要

振动可分为有害的振动和有用的振动两大类。为了最大限度地抑制有害的振动,有效地利用有用的振动,首要的任务是弄清振动的机理,揭示和了解振动的内在规律及其外部影响因素。因此,对振动的机理进行研究是一项十分迫切的任务,在此基础上,进一步采取有效措施,对振动与波施行有效的控制及利用,以便防止和减轻它对人类生活和生产所造成的有害影响,或者使有用的振动与波更好地为人类服务。本书对机械振动机理及控制技术进行了系统研究,主要内容包括:机械振动概论、单自由度系统的振动、两自由度系统的振动、多自由度系统的振动、弹性体振动、随机振动简介、振动控制技术。本书结构合理,条理清晰,内容丰富,是一本值得学习研究的著作。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动机理及控制技术 / 陈虹微著. -- 北京:
中国纺织出版社, 2019.1

ISBN 978-7-5180-3514-4

I. ①机… II. ①陈… III. ①机械振动—原理②机械
振动—振动控制 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 071336 号

责任编辑:姚 君 责任印制:储志伟

中国纺织出版社出版发行

地址:北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码:100124

销售电话:010-67004422 传真:010-87155801

<http://www.c-textilep.com>

E-mail: faxing@c-textilep.com

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://www.weibo.com/2119887771>

北京虎彩文化传播有限公司印制 各地新华书店经销

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本:710×1000 1/16 印张:18.5

字数:274 千字 定价:81.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

前 言

振动是自然界和工程技术中十分普遍的物理现象,发展到现在其内容不仅仅局限于物体或系统在其平衡位置附近的往复运动,而是变得越来越广泛了。随着国民经济的发展和现代工业对工程质量、产品精度及其可靠性方面要求的不断提高,许多工程技术领域,如航空航天、能源化工、机械制造、交通运输、工程材料、土木建筑、核工业等,在机电装备设计和运行过程中都会遇到大量振动问题,振动理论已成为科研人员和工程技术人员正确进行产品设计、结构优化以及开发新产品等必备的基础知识。

振动可分为有害的振动和有用的振动两大类。为了最大限度地抑制有害的振动,有效地利用有用的振动,首要的任务是弄清振动的机理,揭示和了解振动的内在规律及其外部影响因素。因此,对振动的机理进行研究是一项十分迫切的任务,在此基础上,进一步采取有效措施,对振动与波施行有效的控制及利用,以便防止和减轻它对人类生活和生产所造成的有害影响,或者使有用的振动与波更好地为人类服务。

本书内容:第1章概论,叙述了人类生活及工程中的振动问题、机械振动的基本概念、机械振动的分析、简谐振动;第2章叙述了单自由度系统的振动,包括无阻尼、有阻尼的自由振动和受迫振动原理,重点是建立起振动学基本概念及对其重要性的认识;第3章叙述了两自由度系统的振动,包括无阻尼自由和受迫振动的原理;第4章阐述了多自由度系统的振动,着重介绍了系统振动微分方程的建立,求固有频率和主振型的方法,主坐标与正则坐标,并列举了若干应用实例;第5章介绍了弹性体振动,包括杆的纵向振动、均质圆轴的扭转振动、梁的横向振动等;第6章简要介绍随机振动,着重介绍了随机过程,单自由度和多自由度系统对随机激励的响应;第7章介绍振动控制的基本技术。

本书主要有如下特点:①突出实践性,讲解振动问题从工程

实际情况出发;②考虑普遍性,为使读者较全面地掌握振动系统的特点及其建模和求解方法,本书系统地介绍了单自由度、二自由度和多自由度的振动问题,既突出重点又照顾一般;③重视实用性,在了解物理本质的基础上分析工程实际振动问题,通过应用进一步加深对理论的理解。

本书在撰写时参考了大量的同类书籍及文献资料,在此对这些作者表示衷心的感谢。

由于作者水平所限以及时间仓促,书中错误之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

编 者

2018年9月

目 录

第 1 章 机械振动概论	1
1.1 人类生活及工程中的振动问题	1
1.2 机械振动的基本概念	6
1.3 机械振动的分析	9
1.4 简谐振动	14
第 2 章 单自由度系统的振动	31
2.1 单自由度系统振动概述	31
2.2 单自由度系统振动微分方程的建立	34
2.3 单自由度系统无阻尼自由振动	37
2.4 固有频率与等效参数	41
2.5 单自由度系统有阻尼自由振动	54
2.6 单自由度系统受迫振动	61
第 3 章 两自由度系统的振动	82
3.1 两自由度系统振动概述	82
3.2 两自由度系统振动微分方程的建立	84
3.3 两自由度系统的自由振动	92
3.4 两自由度系统的受迫振动	101
第 4 章 多自由度系统的振动	112
4.1 多自由度系统振动概述	112
4.2 多自由度系统振动微分方程的建立	114
4.3 固有频率和主振型	134
4.4 主坐标与正则坐标	146
4.5 多自由度系统的自由振动	152

4.6 多自由度系统的受迫振动	159
第 5 章 弹性体振动	175
5.1 弹性体振动概述	175
5.2 波动方程的一般解法	176
5.3 杆的纵向振动	177
5.4 均质等截面圆轴的扭转振动	186
5.5 梁的横向振动	190
5.6 梁的响应	199
第 6 章 随机振动简介	204
6.1 随机振动概述	204
6.2 随机过程	206
6.3 单自由度系统对随机激励响应	226
6.4 多自由度系统对随机激励响应	230
第 7 章 振动控制技术	236
7.1 振动的主动控制和被动控制	236
7.2 振源控制	248
7.3 隔振技术	251
7.4 阻尼减振技术	261
7.5 动力吸振器	273
参考文献	286

第 1 章 机械振动概论

机械或结构系统在其平衡位置附近的往复运动称为机械振动。机械振动是一种物理现象,它的强弱可以通过系统的位移、速度或加速度来表征。机械振动的种类有很多,广泛存在于机械系统中。19 世纪后期,人们在工程实践中遇到大量灾害性机械振动问题,由此引发了对机械振动问题的研究。

1.1 人类生活及工程中的振动问题

1.1.1 人类生活及工程中的振动问题

无论是在人类生存的生活环境,还是在社会环境中,振动无处不在。不仅仅在人类生活的物质世界中存在着振动,人类自身的许多器官及循环系统也都处在持续的振动之中。在很久以前,人类就认识到了振动所带来的坏处,并与之展开了百折不挠的斗争,以期能够克服或者预防振动所带来的危害。然而振动也能够带给人类生活有益的一面,例如,人类可以利用振动的规律和特征,生产和制造为人类生活带来便捷的振动机械。

我们知道,对大多数机械而言,振动对其性能都会产生不良影响、带来危害。例如,如机床的振动会降低机械加工的精度、加大其表面粗糙度,汽车会因共振而产生疲劳断裂,飞机会因颤振而坠毁,铁塔会因风振而倒塌,高压输电线会因自振而断裂,石油钻机振动引起噪声污染,海洋轮船的振动恶化了承载的条件,地震、暴雨、台风等造成巨大的经济损失等。

然而,人们也可以利用机械振动原理,设计制造各种机器设

备和仪器仪表。例如,利用钟摆振动原理制造钟表;利用石油泥浆振动筛分重晶石;利用振动还可以完成破碎粉磨、成形、整形、冷却、脱水、落砂、光饰、沉拔桩等各种工艺过程,出现了各种类型的振动机械,如图 1-1 所示为部分振动机械产品。

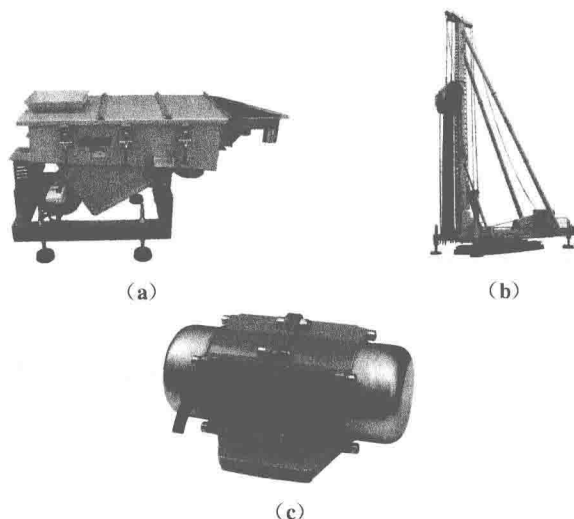


图 1-1 振动机械

(a)振动筛选机;(b)振动打桩机;(c)振动电动机

在工程实际中,还会出现共振、自激振动、不平衡惯力、非线性振动等问题。

(1)共振

当外部激振力的频率和系统固有频率接近时,系统将产生强烈的振动,这种振动甚至可能造成构件的失效或系统的破坏。例如,1940 年美国塔可马(Tacoma)吊桥因风载引起共振而毁于一旦。在机械设计和使用中,对系统共振问题多数情况下是应该防止或采取控制措施的。例如,隔振系统和回转轴系统应使其工作频率和工作转速在各阶固有频率和各阶临界转速的一定范围之外。尽管如此,机械系统在启动和停机过程中,仍然要通过共振区,仍有可能产生较强烈的振动,所以必要时仍须采取抑制共振的减振、消振措施。

在近共振状态下工作的振动机械,就是利用弹性力和惯性力

基本接近于平衡以及外部激振力主要用来平衡阻尼力的原理工作的,因而所需激振力和功率较非共振类振动机械显著减小。

(2)不平衡惯性力

不平衡惯性力的存在是旋转机械和往复机械产生振动的根本原因,为减小机械振动,应采取平衡措施。转子中心与回转中心不重合时,旋转状态下就会产生不平衡力,在不平衡力的作用下,转子就会产生振动。高速旋转的汽轮机、压缩机等旋转机械,由于旋转质量的不平衡、轴承的刚度、滚珠的缺陷、滑动轴承的油膜振荡等因素的影响都会引起振动。动平衡是旋转机械平衡的重要手段,如图 1-2 所示为一汽轮机转子动平衡试验台。

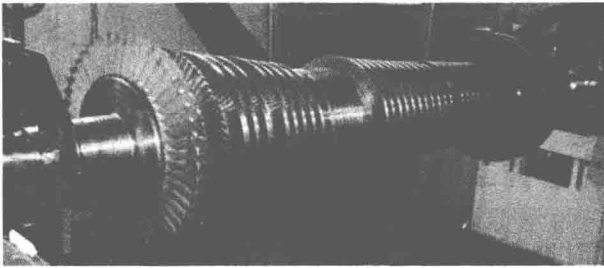


图 1-2 汽轮机转子动平衡试验台

(3)非线性振动

如果一个机械振动系统的质量不随运动参数而变化,系统的惯性力、阻尼力、弹性恢复力分别与加速度、速度、位移呈线性关系,能用常系数线性微分方程描述的振动系统统称为线性振动系统。凡是不能简化为线性振动系统的都称为非线性振动系统。

在减振器设计中涉及的摩擦阻尼器和黏弹性阻尼器均为非线性阻尼器。自激振动系统和冲击振动系统也都是非线性振动系统。实际上客观存在的振动问题几乎都是非线性系统。

(4)自激振动

自激振动有机床切削过程的自振、低速运动部件的爬行、滑动轴承的油膜振荡、传动带的横向振动、液压随动系统的自振等。自激振动对各类机械及生产过程都是一种危害,应加以控制。例如,齿轮的自由振动与自激振动,齿与齿之间的撞击是一种瞬态

激振,它将使齿轮产生自由衰减振动,振动频率就是齿轮的固有频率。另外,齿与齿之间的摩擦在一定条件下也会诱发自激振动,自激振动与齿面加工质量及润滑条件有关,自激振动的频率接近齿轮的固有频率。这些都是诱发齿轮轮齿发生破坏的原因,如图 1-3 所示。

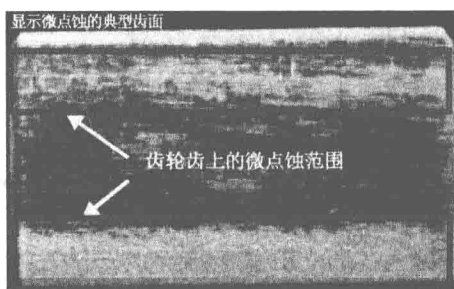


图 1-3 轮齿点蚀

1.1.2 研究工程振动问题的途径

从远古时期起,人们就注意到可以利用振动制作乐器。随着对振动现象认识的深入和普及,利用振动已逐渐成为一个新的工程分支。目前,已有上百种利用振动的机械和一系列应用振动为人类造福的新技术。

过去,人们在设计机械或结构时,通常只采用静态设计,也就是只考虑静载荷和静特性,经常发生试制的产品有效载荷小,振动和噪声水平高的现象,无法满足要求,再采取局部措施进行补救。这种设计是不完善的,具有事故的隐患。

新的设计思想是在市场经济推动下萌芽、生长和发展起来的,要求在产品的设计、制造、使用和维护各阶段都全面考虑其静、动态特性,以满足高技术指标的要求。其中,振动问题的处理是新设计路线的重要内容,对运载工具、机电产品的研制成败往往起决定性作用。新的设计路线通常称为振动工程设计路线。图 1-4 体现了这一设计路线的产品研制过程。

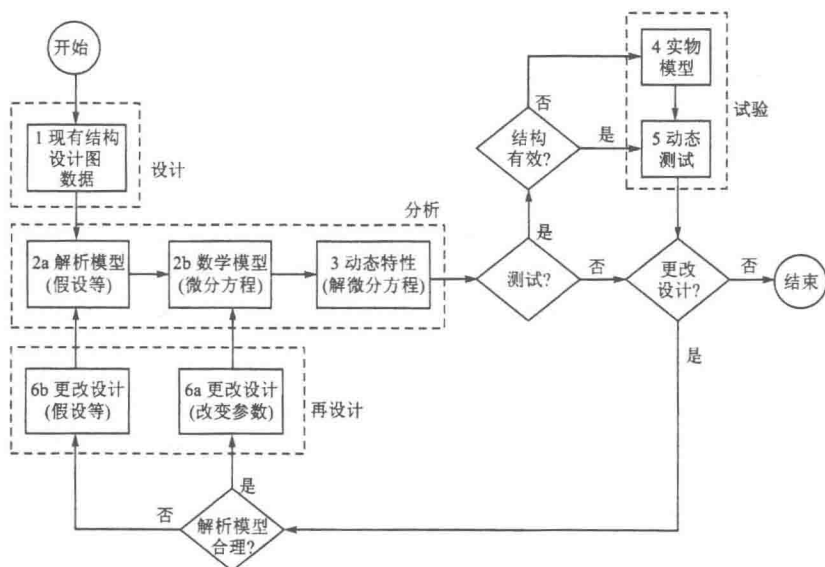


图 1-4 产品研制中的振动问题处理

机械振动分析的问题大致可分为如图 1-5 所示的三类。

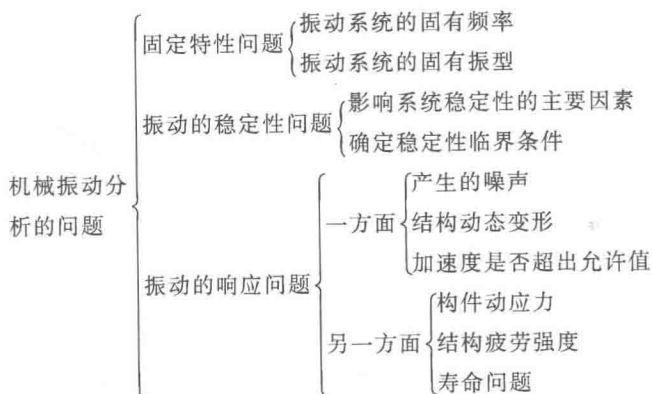


图 1-5 机械振动分析的问题

1.2 机械振动的基本概念

1.2.1 机械振动及机械振动系统的概念

机械振动是一种特殊形式的机械运动,可以解释为:机器或结构物在其静平衡位置附近随时间变化做往复变化的现象。可以产生机械振动的力学系统称为振动系统,简称系统。简化后的单自由度弹簧—质量系统力学模型见图 1-6。

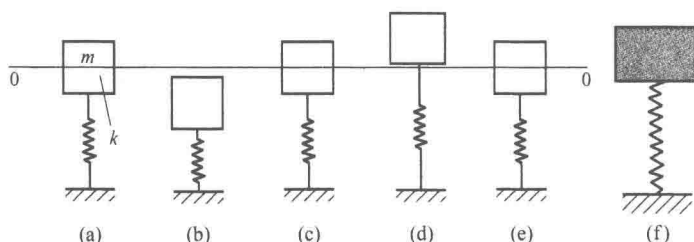


图 1-6 弹簧—质量系统力学模型

当物体处于静力平衡位置时,见图 1-6(a),物体的重力与支持它的弹簧的弹性恢复力相互平衡,其合力 $F=0$,所以物体处于静止状态,物体的速度 $v=0$,加速度 $a=0$ 。

当物体受到向下的冲击力作用时,合力大于 0,物体在冲击力的作用下向下运动,弹簧被压缩。随着弹簧压缩长度的增长,弹簧的恢复力越来越大,物体向下运动的速度越来越小。当物体的运动速度 $v=0$ 时,物体运动到最低位置[图 1-6(b)所示位置],此时弹簧的恢复力比物体的重力要大,所以物体受到的合力 F 的方向向上,物体产生向上的加速度 a ,物体即转而向上运动。

当物体返回到平衡位置[图 1-6(c)所示位置]时,它所受的重力与弹簧弹性力的合力 F 又为零。但由于物体的运动速度此时不为 0,物体依然向上运动,弹簧被拉伸。随着弹簧拉伸长度的增长,弹性恢复力渐渐增大且方向向下,此时物体受到的合力方向

向下,物体的速度减小。当物体向上的速度减为0时,物体运动到最高位置[图1-6(d)所示位置],此时由于被压缩弹簧的弹性恢复力与重力的合力 F 大于惯性力,物体又开始向下运动,直至再次回到平衡位置[图1-6(e)所示位置]。此后,由于惯性的作用,物体继续向下运动,重复前面的运动过程。如此物体在其平衡位置附近做往复运动。当系统内无阻尼存在时,这种往复运动将进行无穷次。

①一次振动。物体从平衡位置开始向下运动,然后向上运动,经过平衡位置再继续向上运动,然后又向下运动回到平衡位置[从图1-6(a)到图1-6(e)]。

②周期振动——物体在相等的时间间隔内做往复运动。

③周期。物体完成一次振动所占用的时间,即往复一次所需的时间间隔(T)。

周期振动(图1-7)可用时间的周期函数表达为

$$x(t) = x(t + nT) \quad (n = 1, 2, \dots)$$

④频率。单位时间内振动的次数,它是周期的倒数,其表达式为

$$f = \frac{1}{T} \quad (1/\text{s 或 Hz})$$

⑤非周期振动(图1-8)不可用时间的周期函数表达。

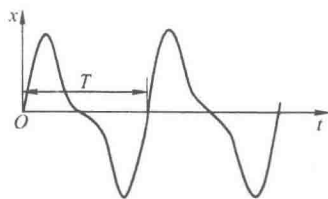


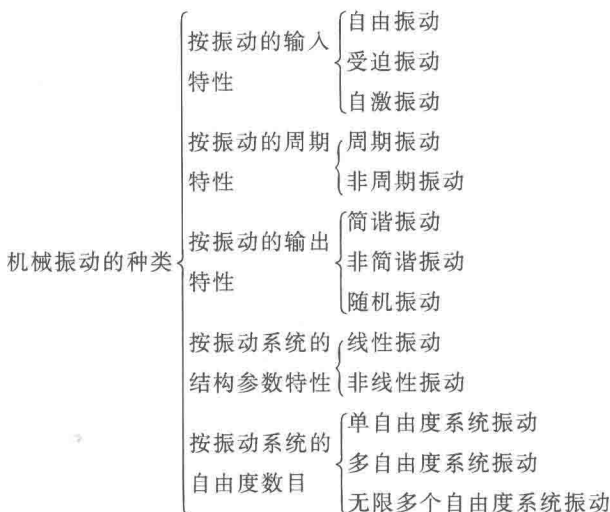
图 1-7 周期振动



图 1-8 非周期振动

1.2.2 分类

机械振动可根据不同的特征分为不同的种类,如图1-9所示。



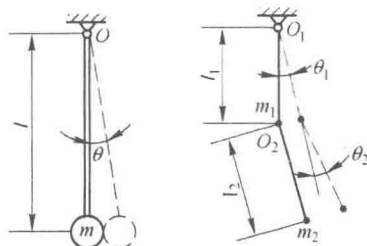
1.2.3 自由度数与广义坐标

振动系统数字模型的建立、运动微分方程的建立，都必须先确定系统的自由度数和描述系统运动的坐标。

物体运动时，受到各种条件的限制。这些限制条件称为约束条件。物体在这些约束条件下运动时，用以描述振动系统的运动规律所必需的独立坐标数目，称为该振动系统的自由度数。如只需要一个独立坐标就可以描述其运动规律的系统称为单自由度振动系统；需要两个独立坐标才能描述清楚其运动规律的系统称为二自由度振动系统，如图 1-10 所示；决定其位置需要三个独立坐标才能描述其运动规律的系统的自由度数为 3；由 n 个相对位置可变的质点组成的质点系，描述其运动规律需要的自由度数为 $3n$ 。

当系统受到约束时，其自由度数为系统无约束时的自由度与约束条件数之差。对于 n 个质点组成的质点系，各质点的位移可用 $3n$ 个直角坐标 $(x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n)$ 来描述。当有 i 个约束条件时，约束方程为

$$f_k(x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, i)$$



(a) 单自由变振动系统 (b) 二自由变振动系统

图 1-10 单自由度振动系统与二自由度振动系统

为了确定各质点的位置,可选取 $N=3n-i$ 个独立的坐标:

$$q_j = q_j(x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n) \quad (j=1, 2, \dots, N)$$

来代替 $3n$ 个直角坐标。这种坐标叫做广义坐标。在广义坐标之间不存在约束条件,它们是独立的坐标。因为选取了个数为自由度 N 的广义坐标,运动方程就能写成不包含约束条件的形式。

1.3 机械振动的分析

1.3.1 建立振动力学模型

实际的振动系统往往是很复杂的,给研究解决振动问题带来很大困难。因此,在处理实际工程问题时,必须根据所研究问题的实际情况,抓住系统中的主要影响因素,忽略那些次要的因素,把复杂的振动系统加以合理地简化和抽象,研究起来就方便多了。有时候对那些不能够研究的复杂问题,经过简化以后就能够研究解决了。经过简化抽象以后的振动系统,在振动学上称为力学模型。

实际的机械结构是非常复杂的,为了对其进行振动分析,必须结合研究的目的,抓住主要因素,略去一些次要因素,将实际结构简化和抽象为振动力学模型。简化的程度取决于结构复杂程度和分析的目的。

如由一辆载有骑乘人员的自行车构成一机械振动系统,自行

车又可大致拆分为轮胎、车轮、车架和座椅。在行驶的过程中,由于路面起伏不平,自行车会产生振动。这个振动系统可以简化为一个简单的单自由度振动模型,如图 1-11(a)所示,该模型由系统的等效质量元件、等效弹性元件(弹簧)和等效阻尼元件组成。系统的等效质量 m_{eq} 考虑了骑乘人员的质量 m_p 、车轮的质量 m_w 和车架的质量 m_f ;系统的等效弹簧刚度系数 k_{eq} 考虑了座椅的刚度系数 k_s 、车架的刚度系数 k_f 和轮胎的刚度系数 k_t ;系统的等效阻尼系数 c_{eq} 则考虑了座椅的阻尼系数 c_s 、车架的阻尼系数 c_f 和轮胎的阻尼系数 c_t 。为了更真实地模拟这个振动系统,可以把骑乘人员的质量 m_p 、座椅的刚度系数 k_s 和阻尼系数 c_s 以及轮胎的刚度系数 k_t 和阻尼系数 c_t 分别表示出来,从而得到图 1-11(b)所示的二自由度系统模型。如果还考虑车架的质量 m_f 、刚度系数 k_f 和阻尼系数 c_f ,则可以得到图 1-11(c)所示的三自由度振动系统模型。实际上,振动系统的力学模型简化不止这几种形式,可以根据研究目的和实际需要合理进行简化。

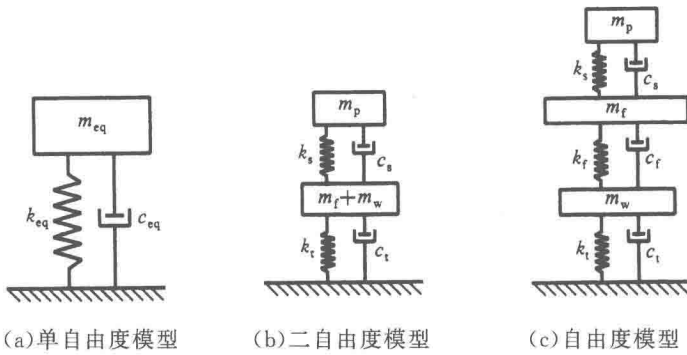


图 1-11 载人自行车的力学模型

如图 1-12(a)所示的单圆盘转子系统,当圆盘在其静平衡位置附近产生横向振动时,转轴的弹性很大,系统弹性变形主要是转轴产生的,所以可将转轴当作无质量的弹性体处理,其弹性刚度 k 为圆盘所在位置时转轴的刚度。对质量为 m 的圆盘,由于其弹性很小,则可认为是一个没有弹性的集中质量。这样,图 1-12(a)所示的单圆盘转子系统即被简化为图 1-12(b)所示的力学模型。