图书在版编目（CIP）数据

生物力学导论／陶祖莱主编．—天津：天津科技翻译出版公司，2000．1
（生物医学工程学丛书：6／顾方舟主编）
ISBN 7-5433-0217-9

Ⅰ．生… Ⅱ．陶… Ⅲ．生物力学 Ⅳ．Q66

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第 56723 号

出　　版：天津科技翻译出版公司
出 版 人：边金城
地　　址：天津市南开区白堤路 244 号
邮政编码：300192
电　　话：022-23693561
传　　真：022-23369476
E - mali：tsttbc @ public．tpt．tj．cn
印　　刷：南开大学印刷厂印刷
发　　行：全国新华书店
版本记录：850×1168　32 开本　22　印张　543 千字
2000 年 1 月第 1 版　2000 年 1 月第 1 次印刷
印数　1000 册
定价　38.50 元

第一章

生物力学概说

生命运动是包括机械运动、电磁运动、化学运动等在内的多种运动形式的综合，而以位移为特征的机械运动规律的研究，是力学的本分。因此，对生命现象的认识必然涉及很多力学问题，这就是生物力学的主题。为了使读者对于生物力学的内涵和特点有一个比较全面的了解，本章拟从'纵'——历史的发展，和'横'——覆盖的范围两个方面，对生物力学作一概述。

第一节　历史的源流

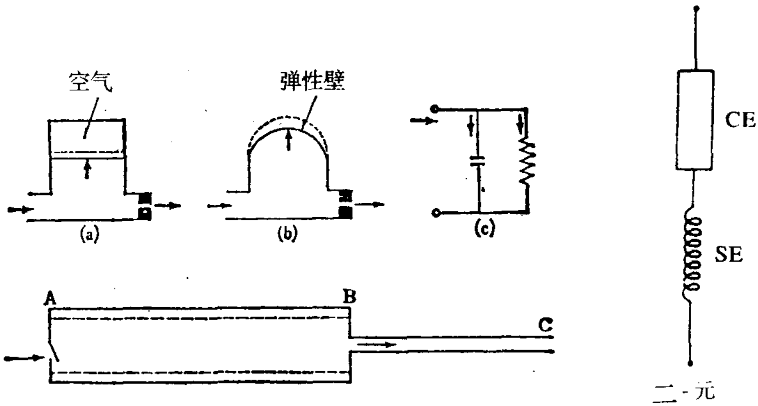
作为一门独立的学科，生物力学兴起于本世纪 60 年代中、后期。但是，人们对生命运动的力学问题的研究却由来已久，至少可以追溯到古希腊亚里士多德时代。在现代科学的发展史上，很多伟大的科学家都曾经在这个领域里留下了不朽的足迹。伽里略(1564～1642 年)首先测量了心率，并用单摆的长度来表征心搏周期；哈维(1578～1658 年)测定了心室的容量，并算出了每小时内心脏搏出的血液的流量，进

而在不知道有毛细血管存在的情形下，提出了血液循环假说（1628年）。这实际上是质量守恒定律的一个天才的应用，它蕴含着流体力学的一条基本规律——流动连续性原理。G·A·Borelli 在他的名著《论动物的运动》（1680 年）中，提出了一系列关于动物（包括人）肢体运动的力学模型，并进行了分析。牛顿在 1700 年左右首先测定了动脉和静脉的血压，并论述了动脉弹性在生理功能方面的意义。还值得一提的或许是数学分析的奠基人笛卡尔，他曾经提出过一个包括神经活动在内的动物模型，试图用力学的方法来概括生命运动的规律，结果固然是失败的，但作为一种大胆的探索，于今仍不无启示。

18 世纪以来，许多杰出的力学家对于生命运动中的力学现象作了更深入的探讨，并借此推动了力学的进展。L. Euler 提出了关于脉搏在动脉内传播的基本方程；T. Young 建立了关于声带发声的弹性力学理论，力学中常用的杨氏模量就是他为此而提出的。不仅如此，在《论血液的运动》（1808 年）一文中，他首先论述了脉搏波传播的速度和动脉血管弹性的关系，并导出了公式。J. Poiseuille 通过实验仔细地观测了血液流过毛细血管时的阻力，建立了 Poiseuille 定律，而这一定律正是尔后粘性流体力学发展的基石。

与此相平行，不少优秀的生理学家从生理功能出发，为生命运动的力学规律的研究开辟了一条新的途径。与牛顿同时代的 S. Hales 测量了马的动脉血压和动脉血管的膨胀特性。他认为动脉血管扩张在生理上的功能类似于消防机的气腔，它可以使心脏泵出的间歇性的血液射流变为平稳的连续流动，使得机体组织得到平稳的血液灌注。此外，他还提出了血液流动的外周阻力的概念，并指出，这种阻力主要来自组织中的微血管。在此基础上 O. Frank（1899 年）提出了关于动脉系统功能的“风箱”（Windkessel）模型，把动脉系统看作一个带有终端阻抗的弹性腔（风箱），如图 1－1(a)所示。半个多世纪以来“风箱”模型一直是循环生理学的基础，在今天的生物力学中，依然发挥着重要的作用。E. H. Starling 研究

了通过毛细血管壁的水分的输运，提出了著名的 Starling 定律，并由此出发对人的体液平衡作了分析。A. Krogh 则进一步建立了微循环的力学模型，并因此而获诺贝尔奖。更值得一说的是，A. V. Hill 关于肌肉收缩规律的研究。Hill 通过蛙缝匠肌挛缩实验，建立了骨胳肌的功能模型，如图 1－1(B)所示。它由一个收缩元(*CE*)和一个弹性元(*SE*)串联而构成。*SE* 的弹性反映肌肉在静息状态下的力学性质，而 *CE* 则表征肌肉能动收缩的力学规律。这一创造性的工作使 Hill 荣获诺贝尔奖。而且，一直到目前为止，Hill 模型依然是肌肉力学的主要基础。



(A)　　(B)

(A)关于动脉系统功能的 Windkessel 模型

(B)关于骨胳肌功能的 Hill 模型

图 1－1

应该强调指出，Windkessel 模型和 Hill 模型从本质上来讲属于“黑箱”模型，是控制论的典型方法，尽管在 Frank 和 Hill 年代，控制论尚未诞生。这种方法最大的优点是：它可以不管对象的实际构造和复杂的内部过程，只考虑我们所关心的对象的宏观行为，并掌握这种宏观行为的规律。这种方法对于像生命运动这样的复杂

过程来说是十分有用的。然而，这种方法也有它的先天缺陷，那就是它的主观任意性。对于同一对象、同一功能目标，(“黑箱”)模型不是唯一的。因而借助于“模型”所得到的“规律”，不可避免地带有(建模者)的主观色彩，因而具有任意性。以 Windkessel 模型为例，可以用一个弹性腔来模拟动脉系统的功能，也可以用两个或者更多的弹性腔来表征动脉系统；这些弹性腔，可以串联，也可以并联，或两者兼而有之。显然，“模型”有多种可能的选择。因而，借助于 Windkessel 模型，通过实验得到的关于动脉系统功能特性的参数(比如说，动脉血管的顺应性等)，是因模型具体的构成而异的，是不唯一的，因而它(们)并非动脉系统特性的真实反映。

正因为如此，在本世纪 50 年代，当航天医学需要对人们的心血管系统的功能特性有更准确的了解时，人们发现，Windkessel 模型不能满足需要，因而很自然地将目光转向以确定性、定量准确性为其固有特色的力学。因此，在 50 年代中，G. Karreman(1952 年)、G. W. Morgan & J. P. Kiely(1954 年)、G. W. Morgan & W. R. Ferranti(1955 年)以及 J. R. Womersley (1955 年，1957 年)等，用流体力学的方法对动脉血管里的血液流动作了深入的分析，把血液动力学(Haemodynamics)建立在一个更为理性的基础之上，开现代生物力学之先河。这里，还有一段小小的故事。在生物力学兴起之后，人们发现 J. R. Womersley 所作的理论分析，K. Witzig 早在 1914 年就完成了。不过他的工作未和动脉血管里的血液流动问题结合起来，更没有和生理学家的实验观测相印证，因而鲜为人知，只能束之高阁。这段小插曲，对于生物力学工作者来说，应该是有所启迪的。

从伽里略、Borelli、牛顿到 Morgan、Womersley，从哈维、Hales 到 Frank、Starling、Krongh、Hill，人们分别从力学和生理学两方面出发，研究了生命现象中的一些重要的力学过程，并取得了很大的成功。但从本质上来讲，只是用力学的方法来研究有关的生命现象，或者是立足于生理学(生物学)观点和方法，来考察生物组织的

力学功能，二者（生物学和力学）并没有真正结合起来。作为一门独立的学科，生物力学的兴起的标志，是将力学的方法和生物学（生理学、解剖学等）的方法有机地结合起来，形成一套独特的方法学体系。这是本世纪60年代以后的事。在这方面，冯元桢、钱煦、B. M. Zweifach、S. S. Sobin、J. Lighthill、R. Skalak 和毛昭宪等，作出了卓越的贡献。

第二节　背景和需要

生物力学为什么兴起于本世纪60年代？它是怎样兴起的？除了对于未知世界的不倦的探索，这一人类的永恒追求外，生物力学在60年代兴起，是有其特定的背景的。

首先是需要。生物医学的进步使得人类基本上战胜、控制了多种传染性疾病，人类的健康水平有了很大的提高。然而，诸如心脑血管疾病和癌症之类的疾病，依然严重地威胁着人类的健康和生命；一些常见病、多发病（如腰背痛等）则不仅给人们带来了痛苦，而且直接造成了经济损失。据美国一个专家委员会调查，美国每年因肌肉－骨胳系统的疾病而造成的直接损失达 5.9×10^9 美元（Future Research Needs in Biomechanics，1986年）。这些疾病的预防、诊断和治疗，要求人们对其有关的病理生理过程有更准确的定量的认识，对此，生物力学是必不可少的基础。比如，动脉粥样硬化总是发生在动脉血管的弯曲、分枝部位，而这里的血管组织和其它地方是一样的。显然，粥样斑块的形成和发展，与当地的血流动力学因素密切相关。这种关系和规律的研究，正是生物力学的一个重要课题。又如，现已查明，癌肿药物治疗效率不高的根源是病灶部位药物输运的生理屏障，而这又是由癌肿微循环及传质的规律决定的。再如，腰背痛之类骨胳——肌肉系统的常见病，和人们在生活和工作中的习惯姿势以及环境条件有密切的关系，这里的关键就在于人体有关组织内部的应力分布。这些问题的解决，也离不开生物力学。

然而，这仅仅是问题的一方面。另一方面是，随着医疗仪器装备日益现代化，医疗费用急剧上升。而这种趋势若不扭转，则整个社会医疗保险体制的崩溃是指日可待的。有鉴于此，人们设想用工程的方法来控制医疗费用的恶性膨胀，因为，“工程”一词，本身就包含着经济的因素在内。故生物医学工程(BME)应运而生。而众所周知，生物力学是生物医学工程的基础，这和空气动力学、结构力学等与航空工业的关系相仿佛。当年 Wright 兄弟的飞机飞上天的时候，空气动力学尚未建立；但飞机能成为人们普遍使用的运输工具，能够形成庞大的产业，那是离不开空气动力学的。与此类似，当年第一个人工心瓣(球瓣)装进病人体内的时候，首要的是‘手艺’(手术等)，而真正的人工心瓣的合理的设计和制造，以及人工心瓣产业的形成，则必须以人工心瓣流体力学的研究为基础。因此，可以这样说，生物力学之所以兴起于 60 年代，一个重要的背景就是生物医学工程学科和产业发展的需要。

了解历史，是为了瞄准未来，把握现在。对于生物力学的未来发展来说，除了学科发展本身的内在逻辑和具体的需求之外，必须注意以下几个基本事实。其一，就世界范围而言，生物医学工程已经形成了庞大的产业，这个产业的经济前景是十分诱人的。据美国一个专家委员会的估计，到 2000 年，美国生物医学工程产业的年产值可达 $4\times10^{10}\sim4\times10^{11}$美元，与那个时候生物化学工程产业的年产值约略相当。这预示着生物力学的未来发展具有广阔的实用前景。其二，生物医学工程的实际发展违背了它的初衷，医疗费用不但未因生物医学工程的发展而得到控制，反而因为越来越多的高技术装备的采用而急剧膨胀，生物医学工程产业的经济增长和医疗费用的恶性膨胀，形成了鲜明的对照。这对生物医学工程的未来发展提出了更为严峻的要求，那就是它必须以社会医疗费用的有效控制为其首要的目标，也就是说未来的生物医学工程必须是“省钱”的生物医学工程。作为生物医学工程的基础之一，生物力学的发展也应该服从于这一目标的要求。其三，现代医学基本上是生

物医学，从生物医学模式向生物—心理—社会三者相结合的综合医学模式的转变，是未来医学发展的必然趋势。以医学为其出发点和归宿的生物力学的发展，也必须适应未来医学模式转变的需要。

第三节　全景鸟瞰

如前所述，生物力学的兴起是以现代医学的需要和生物医学工程的发展为背景的。但是，生物力学本身的内涵是非常宽的。它涉及从生物大分子、细胞、亚细胞组织到生物个体乃至群体的各个层次的生命运动。为使读者对于生物力学有一全景式的概略的了解，现将当今生物力学所涉及的主题，尽可能按其目标和层次罗列于下。

一、以人（高等哺乳动物）的生命运动为核心的生物力学——背景和目标：医学、生物医学工程、体育、人—机工效等。

<u>活组织的力学性质——生物流变学</u>

· 骨和软骨；
· 软组织（韧带、腱、皮肤、血管等等）；
· 肌肉力学（骨胳肌、心肌、平滑肌）；
· 血液流变学（全血、血浆、血细胞、凝血血栓形成等等）；
· 血液微流变学；
· 临床血液流变学；
· 体液的粘弹性（关节滑液、粘液等等）；
· 人工代用材料。

<u>器官力学</u>

· 器官、组织的功能、应力和生长；
　骨重建；
　零应力状态和残余应力；
· 肺力学；
· 心脏力学；
　人工心瓣；

左心辅助泵；

· 颅脑—脊柱力学；

· 运动关节力学；

人工关节；

假肢；

· 感觉器官力学；

耳蜗力学。

循环动力学

· 大血管流体力学；

· 微循环力学；

· 毛细血管—组织间质的物质输运；

· 淋巴流动；

· 组织间质液的流动；

· 左心室—动脉血液相互作用；

· 肺血流；

· 冠脉血流动力学；

· 肾脏内部的血循环；

· 肝血流；

· 脑血流。

呼吸力学

· 上呼吸道流体力学；

· 气管树内气流的阻力及其分布；

· 末梢支气管内的对流—扩散；

· 气血交换；

· 高频、低潮气量呼吸术。

泌尿流动

· 蠕动流；

· 可瘪管流动。

系统动力学

· 心血管系统动力学；

· 呼吸系统动力学；

· 体液平衡系统分析。

运动生物力学

· 体育运动生物力学；

人—机—环境系统生物力学

· 职业生物力学；

· 人—机工效学。

细胞力学

· 细胞膜的力学性质；

· 原生质流动；

· 应力对细胞形态、生长、功能的影响。

创伤力学

· 器官的组织冲击损伤的机理和耐限；

· 软组织的创伤和愈合；

· 骨折及其愈合。

二、绿色植物生物力学——背景和目标:农业及农业工程,生存环境工程等等。

绿色植物的生理流动

· 蒸腾流和易位流；

· 植物的呼吸；

· 土壤渗流和根系吸收。

植物组织和机体的力学性质

声波对植物生长的影响

植被流体动力学

农业工程中的生物力学问题

三、生物技术和生物化学工程中的流体力学问题——背景和目标:从实验室(生物技术)到产业(生物化学工程)的模化、放大,生物反应器的设计和运行的优化.高效的分离、纯化技术、生物处

理过程的自动控制和在线检测,空间制药等等。

· 生物反应器内的流动、传质和传热;

· 应力对细胞、微生物生长和功能的影响;

· 生物制品分离过程中的流体力学问题;

· 流动应力对生物大分子结构和功能的影响。

四、动物的运动——目标和背景:仿生工程技术,生物学中一些理论问题的定量分析等等。

<u>鸟类和昆虫的飞行</u>

<u>水生动物的游泳力学</u>

· 泳动模式的进化和形态演变;

<u>微生物的运动</u>

<u>陆生物的运动</u>

由此可见,生物力学的内容是非常宽非常广的。目前,"一"是生物力学的主体;"三"是正在崛起;绿色植物生物力学具有很大的吸引力,但目前做得不多。

作为生物医学工程丛书之一,本书的范围限于此,然而,即使在这一范围内,也不可能作全面的论述。作为一本导引性的读物,本书的目的在于:通过一些成功的范例,以阐明生物力学的特点和方法,说明生物力学是怎样提出问题和解决问题的,并指出其条件和限止。因而重于背景的介绍和概念的阐述,重于方法的论证和条件的说明,重于新概念和新思想的探讨,而不追求论述的严密性和完整性。

参　考　文　献

冯元桢. 生物力学. 科学出版社,1983

陶祖莱. 生物流体力学. 科学出版社,1984

Fung. Y. C. Biomechanics. Mechanic Propesties of Living Tissues. Spring－Verlag，1981

U. S. National Committee on Biomechanics: Future Research Needs in Biomecha- nics. Calspan Co，Buffalo，1986

第二章

生物力学的力学基础

以医学、生物医学工程为其出发点和归宿的生物力学，是建立在解剖学、生理学和力学的基础上的。这里所述，仅限于它的力学基础，包括运动和力、连续介质力学基本原理、本构关系、相似性原理、生物传质的基本知识等。对于一门分析的、定量的科学来说，数学的表达是必不可少的，也是最精炼、最准确的表达形式。然而，数学只是工具，它的灵魂在于它所表达的物理概念和生物学内涵。

第一节　运动和力

"生命在于运动"，运动就离不开力的作用，就要遵循力学的基本规律。对于生命现象所涉及的以位移为特征的机械运动来说，即使是细胞和亚细胞组织，其尺度也尚未超出牛顿力学有效的范围。故生物力学，尤其是医用生物力学，目前仍然属于牛顿力学的范畴。

任何科学理论都是以一些公约性的基本概念为基础而建立起来的。牛顿力学的

理论体系是建立在时间(绝对时间，t)、空间(欧几里德空间)和质量(m,表征物质的多少)这三个公约性的基本概念之上的。

为了定量地描述运动(机械运动)，引进笛卡尔坐标系$\{x, y, z\}$(或$\{xi\}$，$i = 1, 2, 3$)。设质量为 m 的质点，在时刻 t 的位置为(x, y, z)，而在$(t + \mathrm{d}t)$时刻(dt 为无限小量)的位置为$(x + \mathrm{d}x, y + \mathrm{d}y, z + \mathrm{d}z)$，则在此时间间隔内质点移动的距离为 $\mathrm{d}s$:

$$\mathrm{d}s = (\mathrm{d}x^2 + \mathrm{d}y^2 + \mathrm{d}z^2)^{\frac{1}{2}} \tag{2.1.1}$$

而在此时间间隔内质点的位移则为 $\mathrm{d}\underset{\sim}{s}$,* $|\mathrm{d}\underset{\sim}{s}| = \mathrm{d}s$，它不仅有大小，而且有方向性，从点$(x, y, z)$指向点$(x + \mathrm{d}x, y + \mathrm{d}y, z + \mathrm{d}y)$。这种物理量称为向量(又称矢量)，而诸如距离 $\mathrm{d}s$ 之类只有大小，不计方向的量，则称之为标量。

由此可得质点在 t 时刻的速度为 $\underset{\sim}{v}$:

$$\underset{\sim}{v} = \frac{\mathrm{d}\underset{\sim}{s}}{\mathrm{d}t} \tag{2.1.2}$$

速度 v 随时间的变化率则为加速度 a:

$$a = \frac{\mathrm{d}\underset{\sim}{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2\underset{\sim}{s}}{\mathrm{d}t^2} \tag{2.1.3}$$

在牛顿力学体系里，力的概念是通过牛顿定律引进的。设力为 F，则牛顿第二定律告诉我们:

$$\underset{\sim}{F} = ma = m\frac{\mathrm{d}\underset{\sim}{v}}{\mathrm{d}t} \tag{2.1.4}$$

此即力的定义。据此，若 $\underset{\sim}{F} = 0$，则 $\underset{\sim}{V}$ 不变(作匀速直线运动)，这就是牛顿第一定律。若有两个质点 I 和 J 发生相互作用，设质点 J 作用于质点 I 的力为 $\underset{\sim}{F}_{IJ}$，而质点 I 作用于质点 J 的力为 $\underset{\sim}{F}_{JI}$，则牛

顿第三定律告诉我们:

$$\underset{\sim}{F}_{IJ} = -\underset{\sim}{F}_{JI} \tag{2.1.5}$$

* ～ 表示向量

即作用力和反作用力大小相等，方向相反。必须注意，它们是作用在不同的质点上的。

牛顿三定律的核心是牛顿第二定律，它有多种表述方式。比如(2.1.4)可写做：

$$\underset{\sim}{F} + (-m\underset{\sim}{a}) = 0 \tag{2.1.6}$$

这里$(-ma)$称为质点的惯性力。用这种形式表述的牛顿第二定律，通常称为达朗贝尔(D' Alembert)原理。考虑到质点的质量m是个常量，(2.1.5)亦可改写为：

$$\mathrm{d}(m\underset{\sim}{v}) = \underset{\sim}{F}\,\mathrm{d}t \tag{2.1.7}$$

§2.1.1　质点系动力学和刚体动力学基础

任一物体均可看做是由许多个质点构成的一个系统，质点之间存在着相互作用。设质点总数为K，作用于第I个质点的外力为$\underset{\sim}{F}_I^{(e)}$，且内力$F_{JI}=0$，则作用于第$I$个质点的力为$F_{\cdot I}$

$$\underset{\sim}{F}_I = \underset{\sim}{F}_I^{(e)} + \sum_{J=1}^{K-1}\underset{\sim}{F}_I \tag{2.1.8}$$

此方程适用于每一个质点，则K个这样的方程给出了该质点系运动状态的总的描述。

显然，要掌握质点系运动的具体规律，必须知道质点之间相互作用力F_{IJ}的具体关系，这是由质点系的特性决定的，这就是所谓本构方程。

假若质点的数量很大(实际情形往往如此)，则运动方程组十分庞大，求解非常困难，此时必须另辟蹊径。

最简单的情形是系统内部各质点之间的距离在运动过程中保持不变，这种系统称为刚体，对刚体来说，不必深究其内部质点的相互作用，就可以用质点动力学的方法来描述它的运动。这里，需要引进两个基本概念，即质心$(C.G)$和力矩(M)。取笛卡尔坐标系(如图2－1所示)，设第I个质点(m_I)的位置为$r_i(x_I, y_I, z_I)$，则系统质心的位置为$r_{C.G}(x_{C.G}, y_{C.G}, z_{C.G})$：

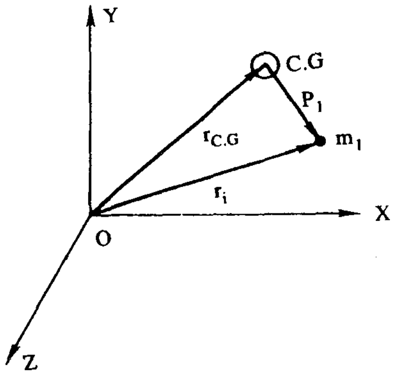


图2—1　笛卡尔坐标

$$\sum_{I}^{K} m_I z_I = m x_{C.G} \qquad m = \sum_{I}^{K} m_I$$

$$\sum_{I}^{K} m_I y_I = m y_{C.G} \qquad I = 1,\ 2 \cdots K \tag{2.1.9}$$

$$\sum_{I}^{K} m_I z_I = m z_{C.G}$$

一般情形下，外力的合力 $\sum_{I=1}^{K} F_I^{(e)}$ 的作用线不一定通过系统的质心(C,G)。此时，外力对系统的作用相当于一个通过质心的力 $\sum_{I=1}^{K} F_I^{(e)}$ 和一个力矩 M 的作用的总和(如图2—2所示)：

$$M = \sum_{I=1}^{K} r_I \times F_I^{(e)} \tag{2.1.10}$$

这里，×表示向量积。这样，外力作用下刚体运动状态的改变，可以用刚体质心的加速度 $\underset{\sim}{a}_{C.G}$ 和力矩 M 引起的刚体绕其质心的旋转运动的改变来表征。设刚体旋转角速度为 $\underset{\sim}{\omega}$，并以坐标$\{x_1,\ x_2,\ x_3\}$代替$\{x,\ y,\ z\}$，且约定脚标的重复表示求和，即：

$$a_i x_i = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 = \sum_{i=1}^{3} a_i x_i \tag{2.1.11}$$

则刚体运动方程为：

$$ma_{C.G} = \sum_I \underset{\sim}{F}_I^{(e)} \tag{2.1.12}$$

$$I_{ij}\frac{d\omega_j}{dt} = \sum_I \underset{\sim}{\rho}_I \times \underset{\sim}{F}_I^{(e)} \qquad (i,j=1,2,3) \tag{2.1.13}$$

这里，ρ_I 为质点 I 相对于质心 C,G 的位置向量，I_{ij} 为：

$$[I_{ij}] = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \tag{2.1.14}$$

$i=j$ 时，I_{ij} 称为惯量矩（相对于其质心），$i \neq j$ 时，I_{ij} 称为惯量积（相对于其质心），有：

$$\begin{aligned} I_{11} &= I_{xx} = \sum (y_y^2 + z_1^2)m_I, \cdots\cdots \\ I_{12} &= -I_{xy} = -\sum x_I y_I m_I, \cdots\cdots \end{aligned} \tag{2.1.15}$$

刚体运动

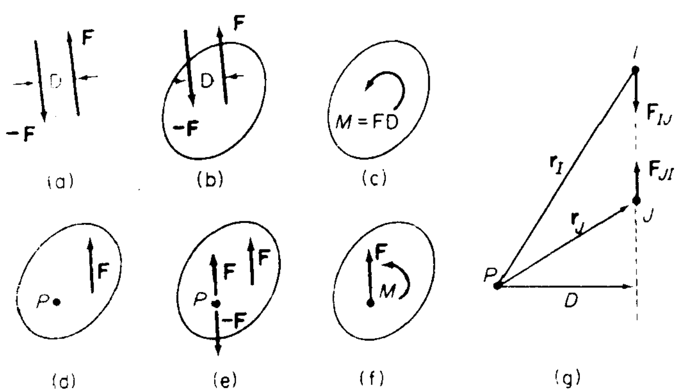


图2—2 刚体运动，力矩的概念

由(2.1.12)和(2.1.13)不难导出刚体平衡（运动状态不变）的条件是：

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum F_z = 0 \tag{2.1.16}$$