

工程力学基础

[德]K·马格努斯 H·H·缪勒 著

张维 等译



北京理工大学出版社

工 程 力 学 基 础

[德] K·马格努斯 H·H·缪勒 著
张 维 等译

北 京 理 工 大 学 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学基础/(德)马格努斯等著;张维等译. —北京:北京理工大学出版社, 1997. 7

ISBN 7-81045-276-2

I. 工… I. ①马… ②张… II. 工程力学 N. TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第06060号
著作权合同登记号 图字:01-96-1609号

(C) B. G. Teubner, Stuttgart, 1990; Originally published in German as Grundlagen der Technischen Mechanik, 6. edition.

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路7号)

邮政编码100081 电话(010)68912824

各地新华书店经售

国防科工委印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 9.875印张 255千字

1997年7月第一版 1997年7月第一次印刷

印数:1—3500册 定价:18.00元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

中译本前言

带着惊喜的心情得知我与 Müller 先生合著的《工程力学基础》被译成了中文。当然我希望这本著作对中国工程师的授课也将证明是适用的。

为了能在两年的基础课程的范围内了解包含许多分支，并不断扩展的工程力学，这本教科书的内容只能集中于那些重要的且随时间变化较小的基本内容。这一基本思路证明是对的，因此本书能在德国出了六版。我们希望通过译作者的工作又以新的语言出现的这部著作证明是有用的。

Kurt Magnus

1994 年 11 月 28 日

译 者 的 话

K·马格努斯教授与 H·H·缪勒博士编写的《工程力学基础》德文版中译本在北京理工大学出版社支持下问世了。这本教材是在马格努斯教授多年教学讲义的基础上,经过反复修改而成的,既是他们教学经验的总结,也是教学与科学研究成果的反映。本书适合于对工程力学要求较高的专业,亦可供其他专业参考,与之配套的还有一本习题题解。

本书包括理论力学、材料力学,还有弹性、塑性力学、工程流体静力学以及连续介质力学的一些初步概念。内容广泛,深入浅出,在三百页的书中包括这么多内容,在我国教科书及教学体系中是没有先例的,即使在国际上,包括德国的工程力学教科书也是绝无仅有的,是体现“少而精”的典范,代表了德国高等工程教育中工程力学的一种教学思想。此书取材精深、选题新颖、阐述严谨、学时紧凑等方面对我国当前正在进行的教学改革是很有借鉴意义的。我们组织翻译此书的目的正在于此。希望通过它能引起广大工程力学教育工作者对工程力学教改的兴趣,共同推动我国教学改革。

因为时间关系,本书由下列五同志分头承译:张维(前言、引论、第3章)、陆明万(第1、2章)、苏铭德(第4、7章)、姚振汉(第5章、第6章6.1~6.5)、任文敏(目录、第6章6.6~6.9、公式符号一览表、汇总)。在专业术语上尽可能采用《力学名词》(科学出版社1993版)的统一规定。但由于时间仓促,在遣词、语气、风格等方面仍有差别,敬请读者鉴谅。我们对译文进行了互校,尽力忠于原作,力求文字通顺,尽管如此,由于水平所限,时间短,错误与不妥之处仍难避免,恳望读者不吝指正。

最后，我们要感谢北京理工大学副校长赵学仁教授，中国力学学会教育工作委员会主任、清华大学徐秉业教授及北京理工大学出版社领导的大力支持，感谢出版社编辑同志们的辛勤劳动。

张 维 谨识

1994 年 3 月于清华园

序 言

工程力学如同数学、物理和设计学一样均属于技术科学基础。尽管由物理早已提供的基础——“经典力学”没有什么变化，但自过去的几十年以来，工程力学的教学却经历了多方面的转变。看看丰富多彩的教科书目录就可以明显地看到：其所涉及的内容已极大地扩大，讨论的重点也有所转移，最后处理问题的方法已部分地彻底改变，对此，首先应感谢由新的现代的计算机提供的可能性。由于这些发展使人可以理解，教科书多半都大大增加了篇幅，有一部分甚至像百科全书。如果教师想在有限的时间内为学生以后的学习打好牢固的基础，他就面对着选择教学内容的问题。

本书将走另一条路：在明确以基础为限的指导思想下，提供工程力学的一种结构骨架，即使在各种时兴变化和岁月转移的条件下，在今后发展的时代里，它也不应有太大变化。愿意采用这一骨架的教师即应负起责任，在这一框架内用现实的应用例题予以补充，以便使课程适合于变化的需要或不同的专业方向。本书的目的不是为了那些以工程力学做为次要课程的专业学生使用，而恰恰相反，它试图为那些需要深入学习力学知识的工程专业提供一本有用的教科书。在这里，重点放在引入重要的基本定律和处理方法。不企图完整地介绍内容而是指出向更高阶段发展的道路，并且希望读者由那里可以顺利地找到与此衔接的力学分支的接轨处。

本书主要包括在四个基础学期内讲授的内容，并通过其内容编排又适当介绍了整个高等工科教学相关的知识。为适应本书的目的，表达的方式必须少而精。所举例题多数是为了更好地论述或使讲述的内容更深入一步而插入的。愿意对讲授内容勤学苦练

的读者应参考“工程力学习题集”^①。此习题集与本书相互配合。为了检查学习，在每章最后还集中了一些问题，对这些问题均应由记忆或短时间的思考即可回答。也不难通过翻阅本书找到答案。

书中全部使用所规定的国际标准单位(SI单位)。公式中的符号也均尽可能地采用国际标准组织(ISO)的建议或是根据它而制订的德国标准委员会的建议。

本书是两作者多年长期合作的实践成果。本书的完成应感谢研究所的各位助教，学生助理及听讲的学生。本书是在讲义试用基础上，经过吸收各方面的建议、修改定稿的。因此，我们希望，这一综合既能对克服教科书一直存在的内容臃肿的缺点和在教学中如何选择内容有所贡献，又能使在教学改革中，“工程力学”课程在各类教学计划中协调地安排。

在新版中^②，对已发现的错误均已改正并在许多易于误解之处作了更确切的叙述。在有些地方，对证明作了简化或撤除了受限的假设。这些都是在第一版问世后，大家提的非常宝贵的批评和建议的基础上修改的。在此表示衷心感谢。请求大家继续用批评和建议给我们以支持。同时，希望在各学期的数学教学水平要配合力学教学的需要。

K·马格努斯， H·H·缪勒
(Kurt Magnüs), (Hans Heinrich Müller)
于慕尼黑/西根 1987 年秋

① 见 Müller/Magnus: Übungen zur Technischen Mechanik, 第二版, 共 292 页。

② 译者注: 本中文版按 1990 第 6 版订正。

目 录

引 论	(1)
1 矢 量	(6)
1.1 矢量的概念和表示方法	(6)
1.2 矢量代数的运算规则	(7)
1.3 约束矢量系	(14)
1.3.1 约束矢量的矩	(14)
1.3.2 约束矢量系的等效	(14)
1.3.3 两个共面约束矢量系的简化	(16)
1.3.4 一般约束矢量系的简化	(19)
1.4 力学中的矢量	(20)
1.4.1 力和力矩	(20)
1.4.2 矢径、速度矢量、角速度矢量	(21)
1.4.3 静力学和运动学间的比拟	(22)
1.5 问题	(23)
2 空间静力学	(24)
2.1 力、力系和平衡	(24)
2.1.1 力的概念和单位	(24)
2.1.2 经验事实和原理	(25)
2.1.3 力旋	(26)
2.1.4 平衡条件	(28)
2.1.5 力的分类	(31)
2.2 重力和重心	(32)
2.2.1 重力、重心和质心	(32)

2.2.2 重心的位置	(35)
2.3 平面力系的图解法	(37)
2.3.1 力多边形和索多边形	(37)
2.3.2 矩和平衡	(39)
2.4 物体的支承和支座反力	(41)
2.4.1 支承的一般性质	(41)
2.4.2 平面内的支承静力学	(43)
2.5 梁的内力和内力矩	(49)
2.5.1 内力的截面力旋	(49)
2.5.2 特殊情形——平行力系	(51)
2.5.3 索多边形在梁静力学中的应用	(54)
2.6 桁架	(56)
2.7 索静力学	(58)
2.8 虚功原理	(62)
2.9 摩擦力	(65)
2.9.1 摩擦现象与摩擦力	(65)
2.9.2 摩擦定律的应用、自锁	(67)
2.10 问题	(70)
3 弹性静力学	(72)
3.1 应力和应变	(72)
3.1.1 应力状态	(72)
3.1.2 应变状态	(79)
3.1.3 应力状态与应变状态的关系	(82)
3.2 拉伸和压缩	(85)
3.3 圆轴的扭转	(87)
3.4 梁的近似理论	(91)
3.4.1 二次面积矩	(91)
3.4.2 梁的应力分布	(94)
3.4.3 挠度曲线	(99)
3.4.4 剪应力的影响	(104)
3.5 简单载荷情况的叠加	(106)

3.5.1	偏心受拉或受压杆	(106)
3.5.2	强度理论	(108)
3.6	弹性静力学的能量法	(109)
3.6.1	麦克斯韦尔定理、卡氏定理和 Menabrea 定理	(110)
3.6.2	变形能	(112)
3.6.3	应用	(114)
3.7	屈 曲	(117)
3.7.1	屈曲方程及其解	(117)
3.7.2	欧拉屈曲	(120)
3.7.3	压杆的计算	(122)
3.8	壳体薄膜理论	(123)
3.9	问 题	(127)
4	流体静力学	(130)
4.1	流体特性与假设	(130)
4.2	水静压力	(131)
4.2.1	压力为位置的函数	(131)
4.2.2	重流体内的压力分布	(132)
4.2.3	水静压力方程的应用	(134)
4.3	浮 力	(137)
4.3.1	阿基米德原理	(137)
4.3.2	浮力公式的应用	(138)
4.4	浮 体	(139)
4.5	一般体积力的平衡	(141)
4.6	空气静力学	(143)
4.7	问 题	(145)
5	运动学	(146)
5.1	点的运动	(146)
5.1.1	速度和加速度	(146)
5.1.2	不同坐标系中的速度和加速度	(148)

5.1.3	运动的图形表示法	(150)
5.1.4	质点运动学的基本问题	(153)
5.2	质点系的运动	(155)
5.3	刚体运动学	(156)
5.3.1	刚体的一般运动	(157)
5.3.2	刚体运动的特殊情况	(160)
5.3.3	刚体运动的解析描述	(164)
5.4	相对运动	(167)
5.5	问 题	(171)
6	动力学	(173)
6.1	动力学的基本概念	(173)
6.2	动力学基本方程	(176)
6.2.1	历史概述	(176)
6.2.2	动量定理和重心定理	(178)
6.2.3	动量矩定理	(182)
6.2.4	能量定理	(185)
6.3	刚体动力学	(188)
6.3.1	刚体的动量和动量矩	(188)
6.3.2	刚体的惯性特性	(191)
6.3.3	刚体的动能	(197)
6.3.4	刚体的转动	(199)
6.4	重心运动动力学	(208)
6.4.1	有心力场中的轨道运动	(208)
6.4.2	有阻力时的运动	(214)
6.4.3	变质量系统的运动	(217)
6.5	相对运动动力学	(219)
6.6	振 动	(223)
6.6.1	摆的振动	(224)
6.6.2	振动的分类	(228)
6.6.3	单自由度线性振子的自由振动	(229)
6.6.4	强迫振动	(234)

6.6.5 耦合振动	(239)
6.7 碰撞问题	(242)
6.7.1 假设与名词术语	(243)
6.7.2 基本关系	(244)
6.7.3 例题	(246)
6.8 分析力学方法	(248)
6.8.1 约束条件	(249)
6.8.2 达朗贝尔原理与第一类拉格朗日方程	(250)
6.8.3 第二类拉格朗日方程	(253)
6.9 问题	(258)
7 连续介质力学概述	(261)
7.1 基本概念一览	(261)
7.2 连续介质力学的本构关系	(263)
7.3 胡克体弹性理论的基本方程	(266)
7.4 塑性力学的例子	(270)
7.5 流体力学的基本方程	(274)
7.5.1 流动过程运动学	(274)
7.5.2 流动流体的运动方程	(276)
7.6 流体力学举例	(279)
7.6.1 不可压缩无粘性流体的一维流动	(280)
7.6.2 流体辐射时的作用力	(282)
7.6.3 粘性不可压缩流体的管流	(283)
7.6.4 宾厄姆液体的管流	(284)
7.7 问题	(286)
重要公式符号表	(288)
主题词索引	(290)

引 论

何为工程力学？

它将如何分类和分界？

工程力学的目的和它的典型解法？

每一个准备长时间地广泛应用工程力学的学生首先要对上述问题寻找答案。在这引论中先对此给以简要论述。

力学是物理的一个分支。作为一个分支，它致力于认识围绕着物质世界的相互运动关系和规律。Kirchhoff 给力学下的定义是“运动和力的科学”。这个领域是物理分支中最古老的、发展得最成熟，并且其大部分发展已告结束的分支。在力学中产生的概念，如力、功、能及动量等同样也对物理和工程的其他分支具有重大意义。力学中的方法有一部分可以直接用于物理和工程的其他领域。力学涉及到我们工程世界的各个领域，如机械工程、加工和工艺以及整个土木和交通工程均需利用力学所提供的基础。上面所指出的关系就涉及到“工程力学”。工程力学的目的是为工程结构的计算提供适当的方法。工程力学和物理力学均建立在同一基础上；但它们的研究目标及研究方法却有很大区别。物理是用归纳法，而工程力学则是用演绎的方法。按照对自然界或试验的观察，由观察的现象的排列序列而建立概念，物理陈述了物质运动的规律；但是如果由已知的规律，利用理论分析，导出一些推论，并据此对具体的机械系统（或力学系统）的性能做出预测，这就属于工程力学的演绎法了。它应向工程师提供完成他们的任务所需的准则。没有一个完善的理论，就难以做到这点。因而在工程力学中，理论就具有突出的重要意义。每个理论必须从一定的基本定律（公理或原理）出发，这就是力学区别于数学一些分支之处，是不能随意选择的。

这些基本定律其实是表达了经过千百年艰苦的道路,通过归纳经验所获得的最终认识,因此形成至今所积累经验的最集中的形式。当理论家将已知的事实综合起来并建立起假设时,他就开始离开了这个由经验形成的并建立在经验上的基石。他就用这些假设冲向一些尚未能积累经验的领域。如果他能用演绎的方法对一些特殊情况做出一些专门的预测,而这些预测又与对现实的观测没有矛盾,那时就可以说他的理论经受住了考验。

一种理论可以被认为是实际的映像。人们通过对实际现象简化并理想化的过程,建立起某种想象的模型,这种模型既不允许与我们对世界认识的一般规律矛盾,也不应与实际情况相矛盾。按照赫兹(Hertz)的说法,这类模型应在逻辑上是许可的,正确而简单。对于两种均可采用的模型,应优先考虑采用较为简单的一种。此外,这类模型还应是用数学可以表达的,以便用数学方法来描述该理论。就是这样,最后使可观察到的世界模拟成成套的公式系统。从这些系统,专家们可以看到一些通过直接经验往往无从察觉到的因果关系。因此,对于理论家来说,数学并不仅仅是一种思想的速记而已。

这一件数学外衣增加了初学力学的人的困难。如果他想成功地解决力学问题,他就必须既按照物理学的,又按照数学的思维方式进行。当人们分析一下求解力学问题所必需选择的道路时,就对这一点愈加看得清楚。这一过程可分下列几个步骤:

1. 确定问题的界限并予以表达;
2. 通过忽略次要因素,将问题予以简化,即创造一代替实物的力学模型,明确使该模型有效的假设;
3. 将模型转译成数学语言,即寻找出属于该力学模型的并尊重物理基本规律的数学模型;
4. 在数学范围内求解问题;
5. 将数学解反馈回力学范围;
6. 对结果的讨论和解释。

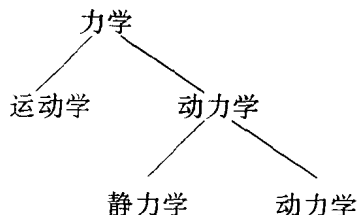
讨论应包括探讨所获得的解从物理角度看是否合理。如果这一点存在疑问，则多半应自第 2 点开始重新做起。在上述过程中，先后点出的物理和数学的思考顺序至少还应分阶段、平行地一起考虑。例如，当忽略次要因素后数学解得到简化或甚至才有可能求得解时，那只有从物理的角度考虑这些简化措施是否许可，才能使数学解建立在可靠的基础上。

经验告诉我们，上述过程的第二步往往造成较大困难。这是因为在讲课或习题课上多半不讲如何简化问题，一般情况下，此时只对实际例题直接给出了简化的模型。一个理想化很强的代替模型，使学生们看不到它后面所隐藏的实际情况。这一缺点可能不利于讨论所得的结果。下面通过一个实例再说明这些关系。为了更好地理解，首先需对力学的分科加以说明。通常习惯是将力学按照两种不同的办法划分，第一种分类是根据研究对象的物性划分的，它们是：

- 质点群和刚体的刚体力学；
- 弹性体的弹性力学；
- 塑性体的塑性力学；
- 液体和气体的流体力学。

上述范围之间的分界往往是模糊不清的。例如，弹性体的许多问题可以用刚体力学的方法处理。如果要强调所讨论介质的连续特性，人们又用连续介质力学来概括；它包括了除去刚体力学以外的所有其他各分支。

第二种办法是相应于下列格式按物理过程分类



运动学讨论各种运动，而动力学则讨论各种力的作用。动力学又进一步划分为对静止物体的力的平衡学(静力学)和主要研究力与运动共同作用时的问题(动力学)。

尽管从方法论的角度看，上述两种力学分类法均很有用，但它们常常在分析具体工程系统时还不够理想。事实上，很难想象存在着只由所谓“刚体”组成的结构(刚体力学)或者是只对它的运动(运动学)感兴趣的仪表。

因此，工程师首先面临的重要任务是对每个具体应用情况寻找一个对于所要解决的技术问题适用的代替模型。这个模型必须足够地简单，以便可以进行数学分析。创造一个模型的过程意味着要对物理问题抽象化并且同时集中于所探讨课题的某个问题上。这就要有意识地将一些次要因素省略。这种简化或理想化的合理与否，必须针对每一具体问题加以考查并提出根据。下面将以一辆汽车出现的各种工程问题为例，具体地加以讨论：

- 如人们对汽车的瞬间位置，所行驶的轨道或其速度有兴趣，则是一个运动学的问题。这时，对于汽车最简单的代替模型是一个质点。

- 如要求在已知的载荷下，汽车轮胎的受力情况，则是一个静力学问题。对于一辆三轮胎的汽车，则代替模型可设想为一有三支点的刚体就足够了。与此相反，对于一辆有四轮胎的汽车就必须选用一弹性体或一个支撑点在四个弹簧上的刚体做为代替模型(弹性静力学)。

- 如要计算汽车在弯道行驶时轮胎的受力，则问题属于动力学。应使用上述的同一模型。操纵机构的运动状况又属于运动学问题。这时的模型可以由一刚体系统组成。同一模型也可用来分析由方向盘向轮胎传递的静力学问题。

- 为了计算汽车适宜的弹簧系统(动力学)，可以采用一个由一刚体(车身)和四个质点(轮胎)所组成的模型。这四个质点通过弹簧与车身和路面相联接。如果还要考虑座位与车身之间的弹簧，