

新形态教材

普通高等学校机械类新形态规划教材

工程静力学

王科盛◎主编

知识点视频讲解
例题视频讲解



科学出版社

普通高等学校机械类新形态规划教材

工程静力学

王科盛 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要包括：静力学的公理、约束和约束力、平面汇交力系及力偶系、平面任意力系、空间力系问题及摩擦等内容。全书侧重对静力学知识点内涵的解析和知识点之间关联性的解读，为读者贯通静力学的关键问题。本书由浅入深的书写方式适合不同需求的读者，介绍知识之间的关联，培养从知识体系到解决工程问题的思路。

本书是一本以工程静力学为对象，帮助读者建立解决工程问题思维模式的教材。本书适合高等院校工科类大学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

工程静力学 / 王科盛主编. —北京：科学出版社，2019.11

普通高等学校机械类新形态规划教材

ISBN 978-7-03-062648-6

I. ①工… II. ①王… III. ①工程力学-静力学-高等学校-教材
IV. ①TB121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 231271 号

责任编辑：邓 静 张丽花 / 责任校对：郭瑞芝

责任印制：张 伟 / 封面设计：迷底书装

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>

北京捷迅佳彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2019 年 11 月第一次印刷 印张：7 1/2

字数：200 000

定价：39.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前言

本书内容主要来源于一线课堂教学。最初我只是把课堂教学的点滴记录下来，零零散散的，不成体系，慢慢随着时间的推移，一届届学生毕业了，我将这些独立的讲义编成了一本书。

这些年的课堂教学，让我有一个深切的体会，学生盼望老师帮助他们把支离破碎的知识点联系起来，老师的成就感之一也是帮助学生构建知识点背后的内在关联。这绝非是一蹴而就的事情，不过学习的愉悦之处也许就在于洞悉知识背后的内在关联吧！

本书内容并没有打破传统的静力学知识体系布局，依然按照静力学的知识点逐一介绍，这样可以保证读者在看书的时候与课堂教学体系保持一致，有利于边学、边看书、边理解。本书的不同之处在于侧重知识脉络发展的讨论，用探讨式的问题牵引静力学知识的学习，目的就是让读者发现不同知识点之间的内在关联，体会人们是怎么开展工程问题分析的。从一个“跟”学者逐步向一个“领”学者迈进，唤起对工程问题的好奇与探索兴趣。

在网络和信息迅猛发展的今天，想要获得单纯的知识并非难事。教师、同学、图书馆、网络慕课、朋友圈、喜马拉雅听书等，太多的地方都可以获得知识，静力学更不例外。碎片化的知识获取已经变成当下普遍的学习模式。培养能够静下心来构建碎片化知识之间关联的能力，应该是未来的一种核心竞争力。

静力学是一门非常有用的学问，人们日常生活中常见的物品、桥梁、房屋等无一不与其相关。同时，静力学也是一个可以锻炼和培养构建碎片化知识点之间

关联的绝佳练武场。知识点多、知识点的理论性和抽象性强是静力学的显著特点，想要轻而易举地把这些知识关联起来并非易事。在学习静力学的时候，如果单纯地做题，而不深入思考知识点之间的内在关联，不构建解决工程问题的思维模式，不从现有知识中提出问题，那就浪费了静力学这块宝藏，学习完了也只能窥见一片片叶子而不能看见整棵大树。

本书侧重于静力学知识的分析、解读和关联，希望读者通过阅读本书可以更深刻地理解静力学重要知识的内涵及其关联关系，把碎片化的知识点整合起来，同时培养和构建解决工程问题的基本思维。另外，本书每一章配有相应的视频资料，读者在阅读时可以通过视频资料来加深理解。

王科盛

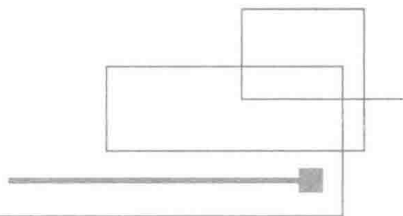
2019年7月于成都

目录

第 1 章 静力学公理	1
1.1 静力学公理引入	1
1.2 静力学公理体系	2
1.2.1 公理 1 力的平行四边形法则	2
1.2.2 公理 2 二力平衡条件	3
1.2.3 公理 3 加减平衡力系公理	3
1.2.4 公理 4 作用与反作用公理	6
1.2.5 公理 5 刚化原理	6
1.3 静力学的几个关键问题	7
1.4 静力学的两种研究路径	8
第 2 章 约束和约束力	9
2.1 约束与约束力概述	9
2.2 典型的约束	11
2.2.1 柔索类约束	11
2.2.2 光滑接触面约束	12
2.2.3 光滑圆柱铰链约束	14
2.2.4 活动铰链支座	16
2.2.5 其他约束	17
2.3 初探受力分析	22
2.3.1 受力分析概述	22
2.3.2 受力分析的方法	22
第 3 章 平面汇交力系及力偶系	31
3.1 汇交力系概述	31
3.2 平面汇交力系的解析法	36
3.2.1 平面汇交力系的解析法说明	36
3.2.2 力在坐标轴上的投影与分力	37

3.3	平面力对点的矩及合力矩定理	40
3.3.1	平面力对点的矩	40
3.3.2	平面汇交力的合力矩定理	42
3.4	平面力偶系	45
3.4.1	平面力偶系的基本性质	45
3.4.2	平面力偶系的合成和平衡条件	50
第4章	平面任意力系	53
4.1	平面任意力系及力的合成定理	53
4.1.1	力的平移定理	54
4.1.2	力对点的矩和力偶	55
4.1.3	平面任意力系的合力	56
4.2	平面任意力系的简化	57
4.2.1	平面任意力系的简化结果	57
4.2.2	平面任意力系的合力矩定理	58
4.3	平面任意力系的平衡方程	62
4.4	平衡方程的其他形式	64
4.5	平面任意力系的计算	65
4.6	平面桁架问题	76
4.6.1	桁架的假设	79
4.6.2	静定桁架和静不定桁架	80
4.6.3	平面桁架杆件内力的计算方法	81
第5章	空间力系问题	89
5.1	简单的空间力系问题	89
5.2	空间力的分解	90
5.3	空间力对点的矩	91
5.4	空间力对轴的矩	93
第6章	摩擦	95
6.1	摩擦及其分类	95
6.2	摩擦的基本问题	96
6.2.1	静摩擦力	97
6.2.2	摩擦自锁	98
6.2.3	滚动摩阻	100
6.2.4	摩擦力参与的静力学简单计算	104
	参考文献	111

第 1 章 静力学公理



1.1 静力学公理引入



公理和定理

工程力学的静力学部分所解决的根本问题是研究工程结构在平衡状态下的受力分析、受力简化方法，并提出求解的手段，指导人们开展系统性的工程问题分析与设计。应该说，工程静力学是一个绝佳的工程师系统性思维的范例。那么，该如何开始一个系统性工程静力问题的学习呢？首先，从工程力学的基石开始谈起。

万丈高楼平地起，盖楼需要坚实的地基。工程静力学也是同样，为了构建一个理性而系统的工程分析过程，人们建立了静力学公理体系：静力学公理是人类在长期的实践和经验中对力学现象进行概括和总结的真知灼见，它是人们对力的基本性质的抽象和提炼。必须强调的是公理不是证明得到的结论，而是人们在生产和生活中长期积累的经验总结，又经过实践的反复检验，被认为是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

让我们来看看静力学的五个公理，大家也可以仔细体会每个公理在日常生活中的具体应用，思考前人是如何概括、凝练和表述问题的。

1.2 静力学公理体系

1.2.1 公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一个点的两个力，可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向由这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1-1 所示。

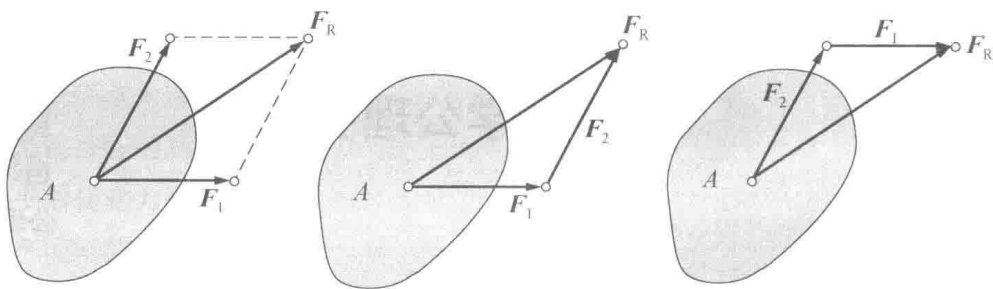


图 1-1 力的合成——平行四边形(三角形)法则示意

这个公理给出了力合成的根本方法，它告诉我们如何把两个力等效成为一个力。这里提到“作用在物体上同一点的两个力”提示我们要注意这个公理所说的是“物体”和“两个力”并且“作用在同一点”，而不局限于“刚体”、不是“若干个力”和“作用在不同点”。

注：刚体是在运动中和受力作用后，形状和大小不变，而且内部各点的相对位置不变的物体。



思考：

(1) 二力合成定理难道真的不能证明吗？能否在网络上搜索一下人们关于这个问题的已有讨论，看看人们是如何确定形成这个公理的？

(2) 在我们的日常生活中有没有二力合成定理应用的案例呢？

1.2.2 公理2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力,使刚体处于平衡的充要条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上,如图1-2所示两力。

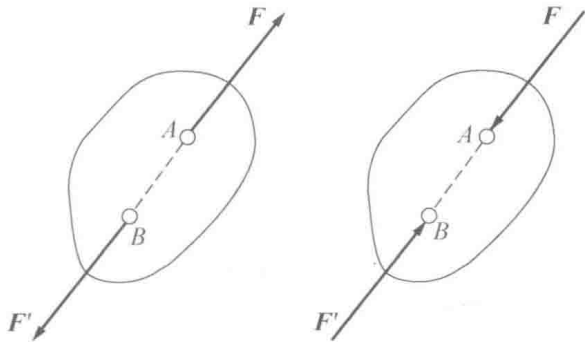


图 1-2 二力平衡公理

这个公理给出了刚体在两个力作用下保持平衡状态的条件,就是必须共线反向。



思考:

(1) 刚体是在运动中和受力作用后形状和大小不变,而且内部各点的相对位置不变的物体。这个公理所提到的刚体能否是一般的物体呢?比如拔河用的绳子能用这个公理吗?

(2) 现实生活中存在刚体吗?如果对于会变形的物体,这个公理还成立吗?我们生活中什么样的结构可以认为是刚体呢?

1.2.3 公理3 加减平衡力系公理

在已知力系上加上或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用。

这一公理是研究力系等效替换与简化的重要依据。有了可“加”可“减”的能力,就可以对力系开展有的放矢的研究了。

思考:

这一公理又是对刚体而言，为什么一般的物体不能成立呢？

根据上述公理 2 和公理 3，可以推导出如下两个重要推论。

推论 1 力的可传性

作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线滑移到刚体内任意一点，并不改变该力对刚体的作用效果。

图 1-3(a) 所示为一个刚体，在 AB 作用线上，可以把这个力 F 移动到 B 点吗？答案是肯定的，但是需要应用加减平衡力系公理来证明。如图 1-3(b) 所示，在 B 位置增加一对平衡力 F_1 和 F_2 ，并且令该力的大小恰好等于力 F 。此时， F 和 F_2 构成了一对新的平衡力，根据加减平衡力系公理，可以减去这对新组成的平衡力，其等效结果如图 1-3(c) 所示，这样也就将原来的力 F 移动到了 B 位置。

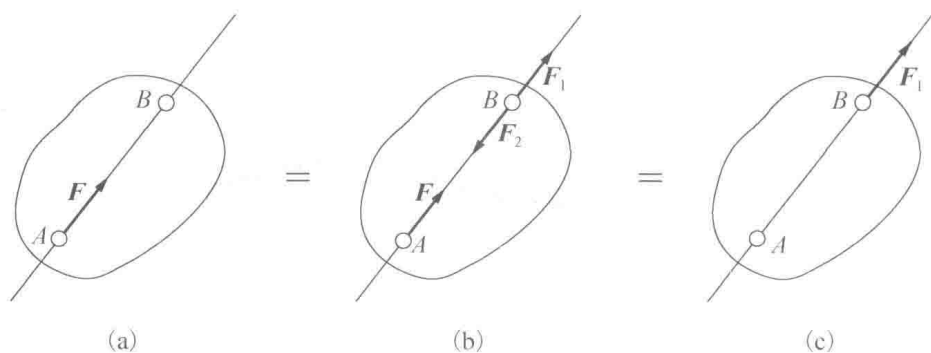


图 1-3 利用加减平衡力系公理证明力的可传性

思考:

力的可传性原理也是对刚体而言的，对于真实的工程构件可以应用吗？比如钢梁结构件或者拖拽的柔绳？

推论2 三力平衡汇交定理

若刚体受三个力作用而平衡，且其中两个力的作用线相交于一点，则此三个力必共面且汇交于同一点。

证明：

这个定理的证明需要用到前面介绍的力的合成公理和二力平衡公理。首先，图 1-4(a) 所示的一个任意刚体受到 F_1 、 F_2 和 F_3 三个力作用而平衡，且 F_1 和 F_2 两个力的作用线相交于 A 点，将 F_1 和 F_2 进行合成，得到图 1-4(b) 中的力 F ，在这种等效情况下，刚体处于平衡，又只受到两个力的作用，那么这两个力必然大小相等，方向相反，作用在同一条直线上，也就是说 F_3 一定通过 F_1 、 F_2 的汇交点 A ，至此定理得证。

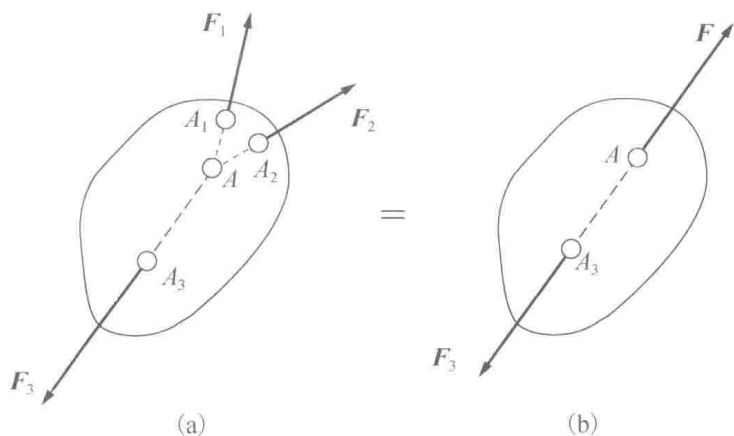


图 1-4 三力汇交定理的证明



思考：

(1) 三力汇交定理与三角形稳定结构有什么关联？生活中有没有这个定理的应用案例？

(2) 一定是三力汇交吗？有没有可能是四个、五个或者更多力汇交于一点而确保刚体保持平衡？

(3) 汇交于一点的力系一定是平衡的力系吗？

1.2.4 公理 4 作用与反作用公理

两个物体间的作用力与反作用力总是同时存在，且大小相等，方向相反，沿着同一条直线，分别作用在两个物体上。若用 F 表示作用力， F' 则为反作用力。

该公理表明，作用力与反作用力总是成对出现，但它们分别作用在两个物体上，因此不能视作平衡力。



思考：

(1) 这个定理就是牛顿的第三定律，它与前面的公理在对象上有哪些不同？（提示：刚体、物体）

(2) 作用力与反作用力有点类似“以眼还眼，以牙还牙”的方式，但两者肯定不同，你如何理解？

1.2.5 公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡，如果将此变形体刚化为刚体，其平衡状态保持不变。



图 1-5 拔河绳子受力示意图

这一公理提供了把变形体抽象为刚体模型的条件。如拔河游戏中的柔性绳索(图 1-5), 在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡, 可将绳索刚化等效为刚体, 其平衡状态不会改变。若绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下不能平衡, 这时的绳索则不能刚化为刚体。但对于刚体而言, 在上述两种力系(拉和压)的作用下都是平衡的。由此可见, 刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件, 而非充分条件。

刚化原理建立了刚体与变形体平衡条件的联系, 提供了用刚体模型来研究变形体平衡问题的可能。在刚体静力学的基础上考虑变形体的特性, 可进一步研究变形体的平衡问题。这一公理也是研究变形体平衡问题的基础, 刚化原理在力学研究中具有非常重要的地位。



思考:

能否举个生活中的案例说明一下这个公理?

1.3 静力学的几个关键问题

静力学是从哪里开始的?

静力学可以追溯到一个著名的历史人物阿基米德(公元前 287 年—公元前 212 年)。阿基米德对杠杆和浮力的研究是大家比较熟悉的, 其实这些研究的一个重要根基就是静力学。但是很遗憾, 阿基米德并没有就此而建立静力学体系。经过了大约 1800 年, 在公元 1600 年, 荷兰数学家西蒙·斯蒂文, 提出了平行四边形公理, 自此力可以合成了, 静力学的分析体系也逐步完善和建立了起来。所以, 现代意义的静力学其实也不过 400 来年。

什么是静力学呢?

静力学是一门研究关于物体受力和其保持平衡的科学。因此, 静力学的关键

就是平衡和力。学习的重点要放在理解平衡和分析受力上。

几乎所有工程力学教材的开篇都会从静力学公理开始，这是为什么呢？

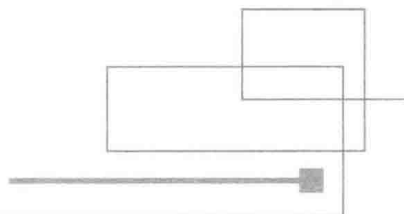
其实这里蕴含着人类进行理性思维的一个基本方法：在具体的生产实践中提炼出普遍适用的根本性经验，然后基于这些经验发展出一门学问，解决实际的问题。房子的基石奠定好了，修一栋好房子就知道从哪里开始了。

1.4 静力学的两种研究路径

静力学是经典力学的重要组成部分，其研究路径也是比较成熟和完备的。基本上来说静力学的研究有两条路径：一条路径是直接研究力的性质与平衡，本书就是沿着这样的思路展开讨论的；另一条路径是研究位移，并且把位移和外力在位移上做功联系起来，这就需要用到虚位移原理来讨论问题。

牛顿是完成第一条路径的核心人物，但就第二条路径来说，他却很难说有多少贡献。前者是从力而后者是从几何来分析静力问题的。或者从力学上来说，前者的核心是“平衡”，后者的关键是“虚功原理”。也许，初学者对上面的讨论会感到没有头绪。不用担心，继续学习动力学相关的知识（达朗贝尔原理、虚功原理），这些讨论自然可以理解。但是在本书的开篇说明静力学的研究路径是十分有必要的，也就是说本书所讨论的内容并不是解决静力学问题的唯一方法，还可以从另一条路径展开研究。

第2章 约束和约束力



2.1 约束与约束力概述



关于约束

首先，“约束”既可以作为名词也可以作为动词。作名词时，约束是一种具体的结构或物体，比如，铁轨限制火车轨迹，书桌限制书掉到地面，这两个例子中铁轨和书桌就是约束。当约束作为动词时，约束就是一种行为，比如限制运动或限制自由。也许你会马上想到约束你的人，比如大学里的辅导员老师、家长等，但是我们这里的约束行为不是来自于人，而是来自约束结构或物体。在工程力学里，会专门讨论一些典型的约束结构。有约束必然会有约束力，那么什么是约束力呢？顾名思义，当有了这样的约束结构，也就限制了物体的运动，这种限制需要用力来实现，所以就产生了约束力。那么我们为什么要讲约束呢？约束能起到什么作用呢？研究约束力又是做什么呢？

其实很简单，我们学习的是静力学，什么东西可以把结构固定不动实现“静”呢？约束就可以。若物体的运动受到其他物体的限制，这些构成限制的物体就称为约束。

如果没有约束，我们看到的世界就会乱成一团，房屋、高铁、汽车到处飞，这将是怎样的世界啊！典型的工程约束，比如：房顶受到钢筋立柱的限制而固定不动，汽车受到地面的支撑而在地面上行驶，转轴受到轴承限制而只能绕轴心转动等。

那么，有没有不受限制的物体呢？

通常，我们把不受限制的物体称为自由体，它们的运动不受任何限制，例如在空中飞行的炮弹、火箭等都可以认为是自由体。当然，如果把地心引力、空气阻力等因素算为约束，这些物体也是受到约束的。在这个宇宙当中，没有约束也许是一件很可怕的事情。总的来说，在我们周遭的这个世界里，绝对自由的物体几乎是不存在的。

那是不是可以说约束力就是约束产生的力呢？

这个表述其实是不太合适的，约束本身通常是不会产生力的，比如，铁轨是不会产生力的，是由于火车在上面行驶，有离开铁轨的运动趋势，铁轨限制其运动而产生了约束力。约束力的定义是：约束加给被约束物体的力称为约束力。用火车的例子来说明，火车这个被约束的物体不想被铁轨这个约束而束缚，想要“越轨”，那么铁轨这个约束此时就会给火车力的作用，这里的约束力是由于火车的运动而产生的，并不是铁轨自己具备产生力的能力。

我们以前在分析受力时，力都是有方向的，很自然地，约束力有方向吗？方向怎么确定？

一般来说，物体受到的力可以分为两类：一类是主动力，主动力是引起物体运动或使物体产生运动趋势的力，它是外驱力，如物体所受到的重力，人们敲钟时的锤击力。另一类是约束力，是对物体的运动或运动趋势起阻碍作用的力，通常是未知力。也就是说，约束力是由主动力引起的，它是一种被动的反作用力，所以约束力也称为约束反作用力，简称约束反力。那么它的方向也就和约束限制物体的运动或者运动趋势方向相反。

再举个例子说明：书放在桌子上，这里桌子是约束，重力是主动力，如果没有桌子的约束，书会掉到地上，那么这时的约束力呢，就是与物体的运动趋势方