

主持人语

科学是当代最显著的支配性力量,对当代政治、经济、军事和社会生活都有决定性的影响。然而,对这种仿佛突如其来、不可思议的力量,人们还缺乏足够的反思和理解。事实上,无论现代科学看起来是多么独步天下、自主生长,它本质上仍然是人类的文化现象,有其深刻的人文根源和社会历史条件。唯有深刻地理解科学的人文根据,才能正确评价科学对人类社会的意义和价值,在科学及其技术一日千里的发展中,不致迷失方向。从人文的视角透视科学,是在科技昌明时代紧迫的思想任务,也是我们开办这个专栏的宗旨。

科学的人文研究是一个广阔的学术领域,科学史和科学哲学是它们的核心学科。目前,中国的科学史学科比较注重中国古代科技史的研究,比较注重中国近现代科技史料的收集和整理,而对科学的源头即希腊古典时期、中世纪和近代科学发端期研究较少。中国的科学哲学学科比较注重当代科学理论的逻辑结构分析,引介当代科学哲学家的新理论、新见解,而较少从现象学的视角直面现代科学技术的观念预设、哲学前提和意向构造。弥补这些缺失,将成为本栏的内容特色。

随着学术队伍的扩编,由于对学术训练的制度性约束不足,当代中国学术失范现象严重。本栏目也希望在强化学术论文的规范方面做些努力。

——吴国盛

希腊力学的性质和传统初探

张卜天

(中国科学院自然科学史研究所,北京 100190)

摘要:希腊力学应当分成理论和实践两部分。力学的理论部分自古以来就被认为是一门数学学科,而力学的实践部分则主要涉及人工物的构造和操作,讨论的是如何完成自然本身不可能完成的事情,从而为人的目的服务。在某种意义上,力学与物理学是完全对立的,但力学又把数学运用于自然物。希腊力学可以分为四种传统:亚里士多德传统、阿基米德传统、希腊化时期的理论传统和希腊化时期的技术传统。与天文学史与光学史不同,力学史是各种迥然不同的论题和问题的历史,是不同学科之间、理论与实践之间的关系史。力学问题在不同的学科和概念传统中以不同的方式得到处理。

关键词:希腊力学;从属科学;《力学问题》;阿基米德;希罗;帕普斯

中图分类号:N02 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-5919(2014)03-0132-11

根据现代的理解,“力学(mechanics)是对运动、引起运动的力或彼此平衡的力的研究。经典力学原则上可以分为运动学(kinematics)、动力学(dynamics)和静力学三部分。运动学只讨论运动

的过程,而不考虑运动的原因。它从几何学的角度来研究和描述一切可以设想的运动、经过的路径、速度、加速度等等。动力学结合引起运动的力来讨论运动过程……静力学则研究力的组合及其

收稿日期:2014-01-10

作者简介:张卜天,男,河南驻马店人,中国科学院自然科学史研究所副研究员。

基金项目:国家社科基金青年项目“机械论的起源、演变及其问题研究”(11CZX020)的阶段性成果。

等效,其结果首先适用于平衡问题,但也可用于运动问题”。^①大致可以说,动力学考察的是运动的原因,侧重物体运动与所受力的关系;运动学考察的则是运动的结果或运动本身,不讨论运动的原因或与所受力的关系,侧重对运动的时空变化的数学描述。运动学和动力学是力学的分支,我们对此太过熟悉,以致会想当然地认为对运动的研究属于力学,而且都要用数学语言来表达。于是我们看到,力学史著作在涉及西方古代的内容时,讨论的主要是亚里士多德对运动的看法和后人归纳出来的几条所谓的“动力学定律”,并把阿基米德对重心的确定、杠杆原理和浮力定律归入“静力学”。这其实相当不恰当而且很危险,因为用这样的力学观来写作古代力学是把现代的看法强加于古人,根本无法让人看清力学这门学科的复杂含义以及后来在概念和文化上发生的深刻变化。事实上,“kinematics”一词是由法国物理学家安培(André Marie Ampère, 1775 - 1836)在19世纪创造的,而“dynamics”一词则是由德国哲学家莱布尼茨(Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646 - 1716)在17世纪末创造的,虽然这两个词都来源于希腊词,但它们的含义与现代教科书上的定义有很大不同。^②要想弄清楚 mechanics 的复杂演变,改变这种辉格的编史状况,最重要的一环在于深入理解希腊人是怎样看待力学这门学科的性质和特征的。这种认识在我国还基本属于空白,甚至连一篇研究原本意义上西方古代力学的文章都没有。造成这种局面的原因主要是对相关论题背后的哲学背景和学科分类缺乏基本的了解。出于此种考虑,本文尝试对希腊力学的性质和传统作初步的探讨,希望能对学界的认识有所帮助。需要指出的是,虽然 mechanics 的含义在历史上发生了很大转变,在近代之前的很多场合下将它译成“机械学”而不是“力学”要更为贴切,但为了保持语

词本身的统一性,而且它并非在所有情况下都与机械有关,所以我们在下文中仍把 mechanics 译为“力学”而非“机械学”。

一、希腊力学的范围和知识分类

1. 力学的创始人

表示“力学”的希腊词 *mēchanikē* 来自希腊名词 *mēchanē*。后者的含义极为广泛,既有“机械、工具、装置”之义,也有“技巧、方法、巧妙的设计”之义。而 *mēchanikē* 的含义则要具体得多,主要被当作一个专业术语使用,指的是某个学科分支。力学的起源并不很清楚,它作为一门学科大概成型于公元前4世纪中叶。据说柏拉图的朋友、毕达哥拉斯主义者阿基塔斯(Archytas, 约前428 - 约前347)第一次发展出了一个被称为“力学”(ta *mēchanika*)的领域,这主要源于公元3世纪的希腊哲学家传记作者第欧根尼·拉尔修(Diogenes Laertius)对阿基塔斯的记载:

他第一次运用数学原理将力学系统化,并且第一次将仪器运动引入了几何图解,试图在倍立方过程中通过半圆柱体来把握两个比例中项。^③

罗马帝国早期的希腊传记作家普鲁塔克(Lucius Mestrius Plutarch, 约46 - 120)在《希腊罗马名人传》(*The lives of the Noble Grecians and Romans*)的《马塞卢斯传》(*Marcellus*)中则提到欧多克斯(Eudoxus)和阿基塔斯是力学的创始人:

欧多克斯和阿基塔斯是这一著名的、备受称赞的力学技艺最早的创始人。他们用这种技艺优雅地阐明了几何学真理,并从实验上令感官满意地证实了那些用词语和图形难以证明的结论。^④

2. 希腊力学的范围

虽然力学学科的一些要素,比如杠杆和秤、轮

① *Dictionary of Physics*, 4 vols., London: Macmillan Publishers, 2004, p. 1430.

② Meli, D. B., *Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, The Johns Hopkins University Press, 2006, p. 8.

③ Diogenes Laertius, *Lives and Opinions of Eminent Philosophers*, 8.83, 转引自 Berryman S., *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009, p. 88.

④ Plutarch, *Plutarch's Lives*, Vol. 2, trans. by John Drydeden, Cosimo Classics, 2008, p. 186, 并参考 *A Source Book in Greek Science*, p. 315 英译文。

和轴、滴漏计时器和虹吸管的使用,无疑要早于公元前 4 世纪,但建立一门学科却不仅需要使用某些技术,而且还需要某种统一性的观念,能够对共同特性有某种察觉。然而,很难看出希腊力学学科所包含的不同要素之间有什么共同特性。力学之所以被渐渐视为一门学科(一个知识领域),也许仅仅是因为人们认识到利用某些工具可以产生否则就无法产生的结果,而且其中一些工具以类似的方式起作用。^①

希腊力学包含着广泛的活动,既有思想上的,也有动手的,既有阿基米德用力与重量之间的一种精确的定量关系来表达杠杆定律,也有建造起重机和自动机这样的机械装置。希腊力学文本往往缺乏哲学上的融贯性,力学实践者总是对特定的问题得出具体而零碎的解决方案,而没有试图提出系统的理论来解释这些解决方案是否总体上可靠。根据对希腊力学有过相当深入研究的科学史家西尔维娅·贝里曼(Sylvia Berryman)的看法,力学领域的显著特征似乎是,它的题材都在“做”某种东西。但力学并不能涵盖所有技术或工具,而是可以用来指称她所谓的“起作用的人工物”(working artifacts)这一新范畴。贝里曼认为,力学的主要题材包括:提升重物或移动流体的工具;投掷物体的弹射工具;模仿生命体的工具;显示天体相对运动的工具等等。很难察觉这些题材背后的统一要素,但力学学科似乎集中于功能而不是形式,比如杠杆是功能型的,而一根与之形态相同的棍子却不是力学的题材。^②

这种看法与古希腊人的一些说法是比较符合的,比如古代晚期的希腊数学家亚历山大里亚的帕普斯(Pappus of Alexandria,约 290 - 约 350)有一段非常著名的话:

在所有[力学或机械]技艺中,从实际功用来说最重要的是:(1)机械制造者的技艺,古人称他们为

机械师[或译“力学家”],凭借机械,他们用很小的力就能克服很大重物的自然倾向,将其提升到高处。(2)武器制造者的技艺,他们也被称为机械师[或译“力学家”]。他们设计了弹射器,将石头和铁以及类似物体所制成的投射物投掷到很远的距离。(3)严格的所谓工具制造者的技艺。例如,他们制造提水器,更容易把水从很深的地方提上来。(4)那些制造奇妙结果的人的技艺,他们也被古人称为机械师[或译“力学家”]。他们有时运用空气压力,就像希罗(Hero)在其《气体力学》(*Pneumatica*)中那样;有时用绳索来模拟生命体的运动,就像希罗在《自动机》(*Automata*)和《平衡》(*Balancings*)中那样;有时用浮在水上的物体,就像阿基米德在《论浮体》(*On Floating Bodies*)那样,或者用水来计时,就像希罗在其显然与日晷理论有关的著作《水钟》(*Hydria*)中那样。(5)制球者的技艺,他们也被称为机械师[或力学家]。他们知道如何用水的匀速圆周运动来构造天的模型[并且操作它]。^③

此外,新柏拉图主义的最后一位代表人物希腊哲学家普罗克洛斯(Proclus, 412 - 487)在其《关于欧几里得〈几何原本〉第一卷的评注》(*Commentary on the First Book of Euclid's Elements*)中区分了力学的几个分支:

此外还有被称为“力学”的科学,它是关于可感知的具体形式的研究的一部分。其中包括制造有用的武器的技艺,比如阿基米德设计的机械据说是用来防御叙拉古的围攻者的;还有制造奇妙结果的技艺,它所发明的一些形体的运动有时来自于风,比如克特西比奥斯(Ctesibius)和希罗所描述的那些形体,有时来自于重量,重量的不平衡和平衡分别导致运动和静止,正如《蒂迈欧篇》所表明的,有时来自于通过绳索来模仿肌腱和生命体的运动;力学还包括一般意义上的平衡科学以及对所谓重心的研究,还有阿基米德所发展出来的制造模仿天界旋转的球体的技艺,以及一般而言涉及物体运动的任何技艺。^④

① Berryman S., *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*, Cambridge: Cambridge University Press, 2009, p. 54.

② Berryman S., *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*, pp. 56 - 57.

③ Pappus, *Mathematical Collection* VIII. 1 - 2, 转引自 *A Source Book in Greek Science*, p. 184; Thomas I. ed., *Greek Mathematical Works*, Volume II, *From Aristarchus to Pappus* (Loeb Classical Library No. 362), pp. 617 - 618.

④ Proclus, *A Commentary on the First Book of Euclid's Elements*, trans. by Glenn R. Morrow, Princeton University Press, 1992, pp. 33 - 34.

3. 希腊力学的知识分类:理论的和实践的

要想涵盖如此众多的不同领域和内容,应当区分两大类力学知识:(1)理论知识,比如力与重量等抽象概念之间的一组关系,有时会以演绎形式表达出来,这类知识大都通过书写的文本来传播;(2)实践知识,涉及对技术的应用,是实践者在职业活动中获得的,这类知识大都通过口传。^①这一区分是非常必要的,许多关于力学内容和范围的误解都源于对这种区分没有清楚的认识。但需要注意的是,有充分证据表明,力学的理论知识与实践知识在古代是相互影响的。有时是理论知识在先而后影响实践,有时则是实践知识在先而后影响理论。

事实上,“理论的”(或“理性的”)力学与“实践的”(或“手工的”、“应用的”)力学之间的区分在古代即已出现。根据帕普斯的说法:

希罗学派的力学家告诉我们,力学科学可以分成理性(λογικόν, theoretical)部分和手工(χειρουργικόν, manual)部分。理性部分包括几何学、数论(arithmetic)^②、天文学和物理学,手工部分则包括金属加工、建筑、木工、粉刷以及任何与手有关的技能。他们说,如果一个人从小就受过上述理论分支的训练,在上述技艺中实践过,而且还拥有多才多艺的心智,那么他将是杰出的建筑师和机械设计的发明者。^③

牛顿深知这一著名区分,他在《自然哲学的数学原理》序言中便提到了帕普斯的说法:

古人把力学分为两部分:理性的和实践的,理性力学通过证明来严格进行,而实践力学则包含所有手工技艺,整个力学学科便是由此而得名的。^④

二、希腊力学的归类

从以上内容来看,古人对希腊力学的范围并没有统一和一致的说法。关于希腊力学的归类也是如此。接下来我们只能挑选希腊人的一些重要说法来讨论,以期对希腊力学的归类有所认识。需要注意的是,以下内容主要涉及希腊力学的理论部分,而不涉及实践内容。

1. 亚里士多德的看法

柏拉图虽然在其著作中大量运用了与当时的技艺和手艺的类比,但并未提到力学技艺(mēchanikē technē)或力学实践者(mēchanikos),而且力学也不是其《理想国》(Republic)中列举的数学学科之一。^⑤

关于力学的归类,最有影响的是亚里士多德的看法。就认识论地位而言,亚里士多德把力学看成一门介于数学和物理学之间的“从属科学”(subordinate science)。从属科学的原理和证明依赖于更高的科学。从属科学处理事实知识,更高的科学则提供证明性的知识。在《物理学》中,亚里士多德列举了三门从属科学,即光学、和音学(harmonics)和天文学:

接下来要考虑的是数学家与物理学家有何差异;因为自然物包含着面和体,线和点,而这些都是数学的主题。

数学家虽然也讨论面、体、线、点,但不是把它们作为自然物的界限,也不是作为这些物体显示出来的特性来讨论的。数学家是把它们从物体分离出来讨论的。因为在思想中它们是可以同物体的运动分

① Schiefsky, M. J., Theory and Practice in Heron's *Mechanics*. In *Mechanics and Natural Philosophy before the Scientific Revolution*, eds. W. R. Laird and S. Roux. Springer, 2008, p. 15.

② arithmetic 一词一般会被译为“算术”,但这会让我们想起加、减、乘、除的四则运算。而对于古代来说,这种译法是错误的,它最合适的译法应为“数论”,因为 arithmetic 在古代专指关于数的理论,而表示四则运算的词为 logistic,把它译为“算术”是最恰当的。关于数论与算术的区别,古代有许多非常明确的表述,比如参见 Plato, *Republic*, VII, 522c, 525a, 526b, 另见 Thomas Heath, *A History of Greek Mathematics*, Vol. 1, Dover Publications, 1981, pp. 13-16.

③ Pappus of Alexandria, *Mathematical Collection* VIII. 1-2, 转引自 *A Source Book in Greek Science*, pp. 183-184 以及 Thomas I. ed., *Greek Mathematical Works*, pp. 615.

④ Newton, I., *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*, University of California Press, trans. by I. Bernard Cohen and Anne Whitman, 1999, p. 381.

⑤ Berryman S., *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*, p. 57.

离开来的。……物理对象不如数学对象那样可以被分离开来。

数学的那些更加物理的分支,如光学、和音学和天文学,则提供了进一步的证据。在某种意义上,这些学科与几何学正好相反:几何学研究物理的线,但不是作为物理的[来研究],光学研究数学的线,但不是作为数学的[来研究],而是作为物理的[来研究]。^①

而在《形而上学》和《后分析篇》中,亚里士多德又补充了第四门从属科学,即力学:

同样的论述适用于和音学和光学,因为两者都没有把其对象作为视线或作为声音来研究,而是作为线和数来研究。力学也是以同样方式进行的。^②

但是,不能把证明转移到另一个属中,除了我们提到的那些例外,即把几何证明应用于力学或光学中的定理,或者把数论证明应用于和音学中的定理。^③

原因与事实还以另一种方式相区别,那就是当它们分别由不同学科来研究时。这发生在问题彼此之间形成从属(subordinate)关系的情形中,比如光学问题从属于几何学,力学问题从属于立体几何学,和音学从属于数论,观测数据从属于天文学。^④

这四门科学都从属于一门纯粹的数学科学(数论或几何),从中导出它们的证明,而其主题却在某种意义上是物理的或可感的。就力学而言,其原理来源于几何学。亚里士多德的这种分类在整个中世纪都被继承下来。由于这些学科占据着数学与自然哲学或物理学之间的位置,中世纪的亚里士多德主义者一般把它们称为“中间科学”(scientiae media)。

2. 普罗克洛斯的看法

普罗克洛斯也把力学归于数学的一个分支,他对数学学科的分类与亚里士多德的大体相同。

在《关于欧几里得〈几何原本〉第一卷的评注》中,他说:

但其他人,比如盖米诺斯(Geminus),认为数学应作不同的划分;他们认为一部分数学只涉及可理解对象(intelligibles),另一部分数学则涉及可感知对象(perceptibles)并与之相接触。当然,他们所谓的可理解对象是指灵魂凭借自身所唤起、并且脱离具体形式(embodied forms)来沉思的那些对象。他们认为,数论和几何学是讨论可理解对象的数学的两种首要的和真正的部分;而关注可感知对象的数学则包括六门科学:力学、天文学、光学、测地学(geodesy)^⑤、音程理论(canonicals)和算术(logistics)。^⑥

3. 普鲁塔克的记述

在《马塞卢斯传》中,普鲁塔克在指出欧多克斯和阿基塔斯是力学的创始人,并且用力学技艺阐明了几何学真理之后又说:

例如,给定两线求其两个比例中线是构造几何图形时常会碰到的问题,这两位数学家[指欧多克斯和阿基塔斯]在解决这个问题时都借助于构造性的工具,使其适用于他们所需要的某些曲线和线段。但柏拉图对此表示愤慨,并对此予以猛烈抨击,说它毁掉和消灭了几何学纯粹的卓越性,使几何学从无形的理智对象回到了可感对象,并且求助于物质(这种帮助非得卑躬屈膝败坏堕落才能获得)。由于这种抨击,力学渐渐与几何学分离开来,并且在很长一段时间里被哲学家所拒绝和忽视,成为一种军事技艺。^⑦

根据普鲁塔克的记述,欧多克斯和阿基塔斯常用力学工具或仪器来解决几何问题,但由于柏拉图的抨击和指责,力学渐渐与几何学分离开来。不过,根据某些科学史家的研究,普鲁塔克说这一

① Aristotle, *Physics*, II. 2, 19b23 - 31.

② Aristotle, *Metaphysics*, XIII, 1078a14 - 17.

③ Aristotle, *Posterior Analytics*, I, 76a23 - 25.

④ Ibid. I, 78b34 - 40.

⑤ 这里的测地学是指一般意义上的测量(mensuration),即对表面和体积的实际测量,而不仅仅是土地测量。盖米诺斯说:“测地学的功能不是测量一个圆柱或圆锥,而是测量被视为圆锥的土堆和被视为圆柱的井”。参见 Proclus, *A Commentary on the First Book of Euclid's Elements*, p. 32.

⑥ Proclus, *A Commentary on the First Book of Euclid's Elements*, p. 31.

⑦ Plutarch, *Plutarch's Lives*, Vol. 2, p. 186, 并参考 *A Source Book in Greek Science*, p. 315 英文译文。

程序把力学引入了几何学,这可能会产生误导。古代对力学的分类中没有任何分支涉及用物体或工具来构造数学图形。普鲁塔克这段话可能更多地反映了他本人的关切而不是柏拉图的关切。^①

三、希腊力学[的理论部分] 与自然哲学或物理学的关系

由以上可以看出,根据希腊人的观点,至少力学的理论部分基本上是数学的一个分支,它从属于几何学。而力学的实践部分则主要涉及对机械等人工物的构造和操作,讨论的是如何完成自然本身不可能完成的事情,从而为人的目的服务,比如用杠杆或滑轮将重物提升一段距离。希腊力学的这种性质在古代力学中最早也是最有影响的著作——[伪]亚里士多德的《力学问题》(*Mechanica* 或 *Mechanica Problemata*)^②的开篇表达得很清楚,这段话很能帮助我们理解希腊力学的性质及其与数学和物理学的关系。

在17世纪之前,研究一般运动和变化的科学被称为自然哲学(*philosophia naturalis* 或 *physiologia*)或物理学(*physica*),其理论基础是亚里士多德的学说。这里的运动不仅包括位置运动(*motus localis*)或位移,而且包括质的变化(*alteratio*),即增强(*intensio*)或减弱(*remissio*),以及量的变化,即增大(*augmentatio*)或减小(*diminutio*)。亚里士多德意义上的自然哲学或物理学是研究自然物的理论科学,所谓自然物,是指运动和变化的本原在其自身之中。那么,力学的内容是什么呢?《力学问题》的开篇便暗示了自然哲学或物理学与力学的区分:

合乎自然(*kata physin*)但我们不知其原因的现象会使人好奇,为了人的利益、通过技艺(*tekhnē*)违

反自然地(*para physin*)产生的现象也是如此。在许多情况下,自然产生的结果不合人的利益;因为自然总是单纯以同一方式运作,而对我们有用的东西却以多种方式变化。因此,当我们必须产生一种违反自然的结果时,我们会因为困难而不知所措,故而必须借助于技艺。因此之故,我们把帮助我们应对这些困难的那部分技艺称为力学技艺(*mēkhanē*)。正如诗人安提丰(*Antiphon*)所说,“被自然战胜的事物,我们凭借技艺来掌控”。我们遇到小的控制大的、轻的移动重的以及诸如此类的各种情况时,就称之为力学问题(*mēkhanika*)。^③

也就是说,《力学问题》的目的是为了解释违反自然而发生的、为了人的利益而通过技艺产生的奇妙结果。这其中隐含着力学与自然哲学或物理学的对立:物理学研究的是受运动和静止的内在本原支配的自然物,只解释遵循自然而发生的事物,而不考虑对人的用处。因为自然只以一种方式起作用,但对人有利的事情却以诸多方式而发生。而力学研究的则是受到强迫的、按照自己的本性本来不会这样做的物体。力学不讨论自然运动,而是讨论违反自然的运动。像用较小的力移动较大的重量这样的结果是非自然的,因为它违反了亚里士多德的物理假设,即推动力必须大于它所移动的重量。在这个意义上,力学与物理学是完全对立的。

虽然力学在某种意义上是违反自然或违反物理学的,但《力学问题》又暗示,力学问题也在一定程度上涉及自然哲学,因为在力学问题中,自然提供了题材(*about-what*),数学提供了解释(*how*):

它们与物理学问题既不完全相同,也并非完全分离,而是在数学思辨和物理思辨方面有某种共同之处,因为要用数学来表明现象“如何”发生,用自

① 参见 Berryman S., *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*, pp. 89–91.

② 在17世纪以前,人们一直认为《力学问题》的作者是亚里士多德。现在我们知道,他的作者应当是亚里士多德学派中的某个人,可能是吕克昂(Lyceum)的第三位领导者斯特拉托(Strato,约前335—约前269)。但在中世纪和近代早期,这部著作一直被归于亚里士多德。为了简便,在本文中我们依然称之为亚里士多德的《力学问题》。

③ Aristotle, *Mechanica Problemata*, 847a10–847a24.

然研究来表明现象“与何物相关”。^①

于是,在这部最早的力学著作中,我们找到了力学与物理学之间含混甚至悖谬的关系的起源。一方面,力学关注的是违反自然或超乎自然而产生的结果;另一方面,力学又把数学运用于自然物。^②的确,《力学问题》把力学产生的所有奇妙结果都归结为秤的运动,而秤的运动又通过圆的奇妙性质而得到解释:

关于秤的事实可以归结为圆,关于杠杆的事实可以归结为秤,而其他几乎一切机械运动的问题都可以归结为杠杆。^③

这里的力学与亚里士多德在别处所说的“从属科学”——天文学、光学、音学是类似的,这就为力学在中世纪和文艺复兴时期像天文学、和音学、几何光学、“重量科学”(scientia de ponderibus)等学科那样,成为一门介于数学与自然哲学之间的“中间科学”埋下了伏笔。

四、希腊力学传统

我们大体上可以把希腊力学分为四种传统:亚里士多德传统、阿基米德传统、希腊化时期的理论传统和希腊化时期的技术传统。这种划分既考虑了时间顺序,又顾及了力学的理论部分与实践部分。^④但它仍然相当粗糙,只能反映出希腊力学的一部分内容和特点。

1. 亚里士多德传统

亚里士多德传统以《力学问题》为代表,其讨论主要是定性的。《力学问题》是现存最早的力学文本,其主题是用技艺来移动重物,为人的利益服务。它最早对机械做理论处理,并尝试把机械的操作归结为一条原理。前面我们说过,《力学问题》把力学产生的所有奇妙结果都归结为秤的运动,而秤的运动又通过圆的奇妙性质而得到解释。这其中最主要的性质是:旋转半径上的一点的运动速度正比于它与中心的距离。^⑤秤的性质依赖于这条原理,而杠杆的性质又依赖于秤。这种依赖链条把秤在认识论上置于杠杆之前,因为秤被视为一种分析仪器而不是一种机械,而杠杆则被视为一种机械,运用秤的原理来起作用。这一区分(秤是仪器而杠杆是机械)在整个16世纪都持续着。需要强调的是,杠杆与秤的区分并非秤是静态的而杠杆是动态的,因为它们都依赖于同一条圆周运动的基本原理。^⑥

紧接着,《力学问题》用35个问题集中讨论了能以秤和杠杆所遵循的原理来起作用的工具,除秤和杠杆外,还包含了滑轮、轮、楔子、舵、钳子、桅杆和桨等(但没有提到螺旋),也包含了其他一些主题,比如对抛射体运动的讨论^⑦,对复合运动的分析^⑧。以及自然中似乎以类似方式发生的一些情形,如潮水把卵石磨圆^⑨,物体在漩涡中的运

① Aristotle, *Mechanica Problemata*, 847a24 – 847a 29.

② Laird, W. R. and Roux, S., eds. *Mechanics and Natural Philosophy before the Scientific Revolution*, Springer, 2008, p. 3.

③ Aristotle, *Mechanica Problemata*, 848a13 – 848a 15.

④ 这种划分参考了著名力学史家德雷克(Stillman Drake)和梅利(Domenico Bertoloni Meli)的论述,但也有所调整。参见 Drake, S. and Drabkin, I. E., eds. and trans. *Mechanics in Sixteenth-Century Italy: Selections from Tartaglia, Benedetti, Guido Ubaldo, and Galileo*, Madison: University of Wisconsin Press, 1969, pp. 5 – 7 以及 Meli, D. B., “Mechanics”, In *The Cambridge History of Science*, vol. 3. eds. by Katharine Park and Lorraine Daston, Cambridge University Press, 2006, 634 – 636.

⑤ 问题 31 – 34, 参见 Aristotle, *Mechanica Problemata*, 848a16 – 848a19.

⑥ Laird, W. R., *The Scope of Renaissance Mechanics*, *Osiris* 2, 1986, p. 47.

⑦ Aristotle, *Mechanica Problemata*, 858a2 – 858b4.

⑧ 问题 23, 参见 Aristotle, *Mechanica Problemata*, 854b16.

⑨ 问题 15, 参见 Aristotle, *Mechanica Problemata*, 852b29.

动①,要想从坐姿站起来肢体需要成的角度②等等。③这35个问题可以概括如下:④

(1)为什么较大的秤要比较小的秤更准确(即更敏感)?

(2)为什么秤从上面支撑时会寻求平衡位置,从下面支撑时却不是这样?

(3)为什么杠杆能以较小的力移动重物,尽管杠杆本身也附加了重量?

(4)为什么船中央的桨手对船的运动贡献最大?

(5)为什么舵虽然很小,却能移动大船?

(6)为什么帆桁端升得越高,船走得就越快?

(7)为什么风向不利时要缩船尾的帆而松船头的帆?

(8)为什么球体和圆形物体最容易移动?

(9)为什么用更大的圆更容易快速提起和拉动物体?

(10)为什么无重物时要比有重物时更容易使秤移动?

(11)为什么滚轴比马车更容易传送重物?

(12)为什么用投掷器抛出的抛射体要比用手扔出的移动更远?

(13)为什么较长的手柄更容易移动绞盘?

(14)为什么双手距离膝盖位置相等,且离得越远,放在膝盖上的棍子就越容易折断?

(15)为什么海滩上的鹅卵石是圆的?

(16)为什么木料越长就越不结实,抬起时越弯得厉害?

(17)为什么用楔子能产生很大的力,劈开很大的物体?

(18)为什么用两个滑轮能减少提升或拉动的气力?

(19)为什么静止的斧子不能砍木头,而挥动的斧子却能劈开它?

(20)为什么杆秤能用小重量称量重物?

(21)为什么牙医用钳子而不用手拔牙?

(22)为什么胡桃钳能毫不费力地弄碎坚果?

(23)为什么菱形的点所描绘出的线不等长?⑤

(24)为什么两个同心圆在绕同一中心滚动时会描绘出等长的线?

(25)为什么要把床制成长是宽的两倍?

(26)为什么长木料从中间抬最容易?

(27)为什么较长的木料更难抬到肩上?

(28)为什么井的转动式杠杆使用了配重?

(29)为什么两人抬梁时,靠近中间的人感觉更重?

(30)人坐着站起时为什么足向后肩向前移动?

(31)为什么运动物体要比静止物体更容易移动?

(32)为什么物体抛出后还不停止运动?

(33)为什么物体在不伴有推动力的情况下还能运动?

(34)为什么抛出的物体不能运动很远,而与抛物者有关?

(35)为什么物体在漩涡中最后会移到中心?

2. 阿基米德传统

这里理解的阿基米德传统主要以阿基米德的《论平面的平衡或其重心》(*On Plane Equilibrium*)和《论浮体》(*On Floating Bodies*)这两部力学著作作为代表,其讨论是纯数学的和精确定量的。他使力学服从于纯粹的几何推理和严格的数学证明,成为后世许多著作的模板,比如他会把天平横梁假设成一条数学的线,把重物抽象成一个带有重量的点等等。而阿基米德发明的螺旋提水器、起重机、投石机、聚光镜还有其他许多机械则属于技术传统。在《论平面的平衡或其重心》中,阿基米德依赖于重心概念,对杠杆原理给出了严格的公理化证明,此前没有任何力学著作具有如此的几何严格性。《论浮体》则提出了流体静力学中的

① 问题35,参见 Aristotle, *Mechanica Problemata*, 858b4.

② 问题30,参见 Aristotle, *Mechanica Problemata*, 857b21.

③ Berryman S., *The Mechanical Hypothesis in Ancient Greek Natural Philosophy*, pp. 106 – 107.

④ 这35个问题的列表参见 Rose and Drake, “The Pseudo – Aristotelian Questions of Mechanics”, pp. 71 – 72.

⑤ 这个问题较为复杂,需要配合图形才能讲清楚。

阿基米德原理,即浸在液体中的物体受到竖直向上的浮力作用,浮力的大小等于该物体排开液体的重量,还给出了流体中不同形状物体的平衡条件。

3. 希腊化时期的理论传统

希腊化时期的理论传统以希罗(Hero of Alexandria,约10-约70)的《力学》(*Mechanics*)中的部分内容以及帕普斯(Pappus of Alexandria,约290-约350)讨论力学的《数学汇编》(*Collectiones mathematicae*)第八卷为代表。希罗的《力学》(*Mechanics*)分为三卷,完整版本只有9世纪的一个阿拉伯文译本。它关注的完全是机械的设计和制造,其开篇讨论的是用一套组装的齿轮来解决用给定力来移动给定重量这一问题。这部著作的核心理论目标是把所有复杂机械都归结为他所谓的五种典型的简单机械(杠杆、轮和轴、滑轮、楔子、螺旋),并且根据《力学问题》中的说法,把其中每一种都最终归结为秤。希罗对这五种简单机械的说明的核心是,如何用一条原理来解释为什么每种机械都能用较小的力移动较大的重量,因为这似乎违背了亚里士多德物理学的基本原理。如《力学》第二卷的开篇所说:

既然给定的重量被给定的力所移动的简单机械有五种,我们必须解释它们的形式、用途和名称,因为这些机械都可以归结为同一种本性,虽然它们在形式上非常不同。^①

希罗是通过将五种机械分别类比于两个同心圆而把所有机械归结为同一本性的。^②这与《力学问题》导言中把圆说成是所有力学现象的首要原因类似。这其中的关键是识别出这些简单机械与秤的相似性,“看出”每种机械如何是一种秤。于是,秤就充当了一种有可能对五种机械进行解释的模型,把它们的运作追溯到自然原理。因此,虽然五种机械产生的结果初看起来似乎很奇妙或悖谬,因此可能会被认为超出了关于自然知识的

物理学范围。但希罗表明,秤可以被用作模型,使五种机械(和其他力学现象)整合到自然哲学的解释框架中。^③一旦力学现象的原因被理解了,它们就成了物理学的一部分而不是对它的挑战。通过给出这种解释,希罗实际上消除了机械与自然之间表面的对立。希罗还用秤和斜面做例子挑战了亚里士多德的物理假定,即所有受迫运动都需要恒定的推动者。因为处于平衡状态的秤可以被随便多么小的力所推动,处于完全光滑的水平面上的重量也是如此。^④

希罗的《力学》虽然以各种版本在阿拉伯世界流传,但在中世纪的拉丁西方并不为人所知。帕普斯的《数学汇编》第八卷是专门讨论力学的,包含大量数学定理和对机械的描述,是古代力学的重要文献之一,其大部分内容可能都或直接或间接地来自于希罗的力学著作。它曾以“力学导论”为题作为独立的手册在古代晚期和阿拉伯世界广泛流传,但在17世纪前并没有传到拉丁西方。该卷的目标是阐明古人通过几何方法建立的命题以及他本人发现的一些有用的定理,不过在形式上要比前人更加简洁和具有逻辑次序。其中讨论的问题有:(1)对将给定的重量沿水平面移动所需的力和沿斜面向上移动同一重量所需的力进行比较;(2)求介于两条不等线段之间的两条比例中线;(3)有一给定齿数的齿轮,求作用于该齿轮的另一给定齿数的齿轮的直径并将其构造出来。^⑤

《数学汇编》的第八卷收录了对希罗《力学》的一个节选,对五种简单机械的构造和使用做了说明。帕普斯也主张一切机械都可以归结为五种简单机械,而它们又可以归结为秤。其关键段落落在结尾,帕普斯试图从杠杆那里看出所有简单机械的共同点,从而将力学系统化。简单机械也许有不同的形状或构形,但都可以归结为同一种原理。帕普斯说:

① Schiefsky, *Theory and Practice in Heron's Mechanics*, p. 22.

② Ibid., pp. 23-32.

③ Ibid., p. 17.

④ Laird, W. R. and Roux, S. eds. *Mechanics and Natural Philosophy before the Scientific Revolution*, p. 4.

⑤ Thomas Heath, *A History of Greek Mathematics*, Vol. 2, Dover Publications, 1981, pp. 429-430.

有五种机械,利用它们可以用给定的力移动给定的重量。我们将给出这些机械的形式、应用和名称。希罗和拜占庭的菲洛[Philo of Byzantium,约公元前2世纪]已经表明,这些机械虽然在外形上极为不同,但都可以归结为同一条原理。它们的名称是:轮和轴、杠杆、滑轮组、楔子和所谓的无限螺旋。^①

此外,《数学汇编》第八卷还提供了阿基米德所没有给出的一个重心定义,并试图确定斜面重物的平衡条件。

4. 希腊化时期的技术传统

希腊化时期的技术传统包括在亚历山大里亚出现的讨论实践力学或应用力学,也就是讨论机械的制造和使用而不是其理论的著作,比如亚历山大里亚的克特西比奥斯(Ctesibius of Alexandria)的著作(已经遗失),拜占庭的菲洛的《力学汇编》(*Mechanical Collection*),希罗的《自动机》、《论武器构造》(*On Artillery Construction*)和《论水钟》(*On Water-Clocks*),维特鲁威(Vitruvius,约公元前1世纪)的《建筑十书》(*The Ten Books on Architecture*)等等。与我们讨论的其他力学传统不同,技术传统没有时间限制。它是存在于一切时期的不断积累的知识体,主要是口传给工程师、武器制造者、建筑师和工匠,其中大部分内容不需要文献便可获得。^②概括起来我们可以看到希腊化时期的技术传统有两个显著特征:一是设计和制造武器,这是力学思想在希腊化时期得到运用和发展的主要领域;二是用自动机来模拟生命体的运动,其实用性体现在娱乐价值,或者产生奇妙效果为宗教服务。此外,实用力学还有一个分支是构造球体以展示天体的运动,从而为研究天文学服务。^③由于该传统所涉及的内容纷繁复杂,而且也不是本文讨论的重点,故这里不再详谈。

五、关于力学编史学的一些思考

和其他许多知识分支一样,力学也是发源于希腊。要想对力学的发展有原本的、实事求是的理解,就必须先对希腊力学的性质和传统有较为深入的认识。由以上讨论可以看出,希腊力学文本往往缺乏哲学上的融贯性,力学实践者总是对特定的问题得出具体而零碎的解决方案,而没有试图提出系统的理论来解释这些解决方案总体上是否可靠和正确。不过,希腊力学大体上可以分成理论的和实践的,理论部分的力学是一门数学学科,但又与自然哲学和物理世界有关联,它所讨论的是区别于自然物的人工物。要想深入理解希腊力学,需要涉及许多不同的学科、领域和传统。这对力学史的写作提出了更高的要求。

与天文学史或光学史不同,力学史是各种迥然不同的论题和问题的历史,它们在非常不同的学科和概念传统中以不同方式得到处理。因此,力学史家仅仅将这些问题及其解决方案从一个时代追溯到另一个时代,直至找出正确答案是不够的。确切地说,力学史在很大程度上是不同学科之间、理论与实践之间的关系史。^④科学史家梅利(Domenico Bertoloni Meli)在2006年出版的广受好评的著作《思考物件:力学在17世纪的转变》(*Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, 2006)便反映了这一新的力学编史思路。他在总结力学含义在17世纪的转变时说:

大约1600年,对运动(亚里士多德意义上的位置运动[local motion])的研究还处于力学科学的边缘,而到了1700年,它已是力学科学的中心。在17世纪,若干知识领域以及一些新的研究领域成了力学必不可少的组成部分,其中一些是传统上属于其他学科领域,比如天文学、光学、和声学、自然哲学

① Humphrey, J. W., Oleson, J. P., & Sherwood, A. N., *Greek and Roman Technology: A Sourcebook: Annotated Translations of Greek and Latin Texts and Documents* Routledge, 2006, p. 49.

② Drake, S. and Drabkin, I. E., eds. and trans. *Mechanics in Sixteenth-Century Italy: Selections from Tartaglia, Benedetti, Guido Ubaldo, and Galileo*, Madison: University of Wisconsin Press, 1969, p. 7.

③ Lloyd, G., *Greek Science after Aristotle*, W. W. Norton & Company, 1973, p. 93.

④ Laird, W. R. and Roux, S., eds. *Mechanics and Natural Philosophy before the Scientific Revolution*, pp. 10–11.

等等。……新的研究领域则包括材料的阻抗,水和流体的运动,碰撞,阻滞媒质中物体的运动,刚体的运动,等等。^①

根据以柯瓦雷为代表的科学革命史家所形成的编史学传统,近代力学诞生于惯性定律。因此,传统的力学史大都把注意力集中在惯性定律及其前提条件和后续影响上,而没有关注一些更具体的东西,特别是除望远镜和显微镜这样的“自然哲学仪器”之外的机械、工具等小物件。但梅利指出,“定律,尤其是像惯性定律这样抽象和理想化的定律,无法把握力学领域的复杂性。……对定律的过分重视无法表达学者们的实践活动以及他们所打交道的力学对象的特征和独特性。即使在书斋里工作时,学者

们也并不是只依赖于纸和笔,还往往要使用被制造出来加以检验的物件。……比如伽利略的摆、斜面、梁、滚动和抛射的球体,……托里拆利的打孔的水槽,梅森的振动弦、摆和滚动的球,笛卡儿的投石器,……惠更斯的旋轮线和碰撞摆,胡克的弹簧,牛顿的摆和用羊毛、玻璃、软木和钢制成的球体等等。……只有不仅关注抽象定律和原理,而且关注物质性的物件世界,才能给出更全面的力学图景”^②。从中我们看到,17世纪力学家所讨论的某些内容仍然在一定程度上延续着希腊力学传统。如果不了解希腊力学的性质和传统,就不可能深入理解力学的发展和演变。

A Preliminary Research on the Nature and Traditions of Greek Mechanics

Zhang Butian

(Institute for the History of Natural Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Greek mechanics should be divided into the theoretical part and the practical part. The theoretical part of mechanics has always been regarded as a mathematic discipline, while the practical part of mechanics mainly involves the construction and operation of artifacts, and deals with accomplishing what nature itself can't achieve in the interests of human beings. Although Greek mechanics was in some sense totally contrary to physics, it did apply mathematics to natural objects. Furthermore, Greek mechanics had four traditions: Aristotelian, Archimedian, theoretical tradition in the Hellenistic Age and technical tradition in the Hellenistic Age. Unlike the history of astronomy or optics, the history of mechanics is the history of a variety of disparate topics and problems that were treated in different ways within very different disciplines and conceptual traditions.

Key words: Greek mechanics, subordinate science, *Mechanica Problemata*, Archimedes of Syracuse, Hero of Alexandria, Pappus of Alexandria

(责任编辑 刘曙光)

① Meli, D. B., *Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*, pp. 6-7.

② Ibid., p. 2.