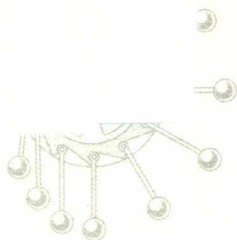


“十三五”国家重点图书出版规划项目
北京市科学技术协会科普创作出版资金资助

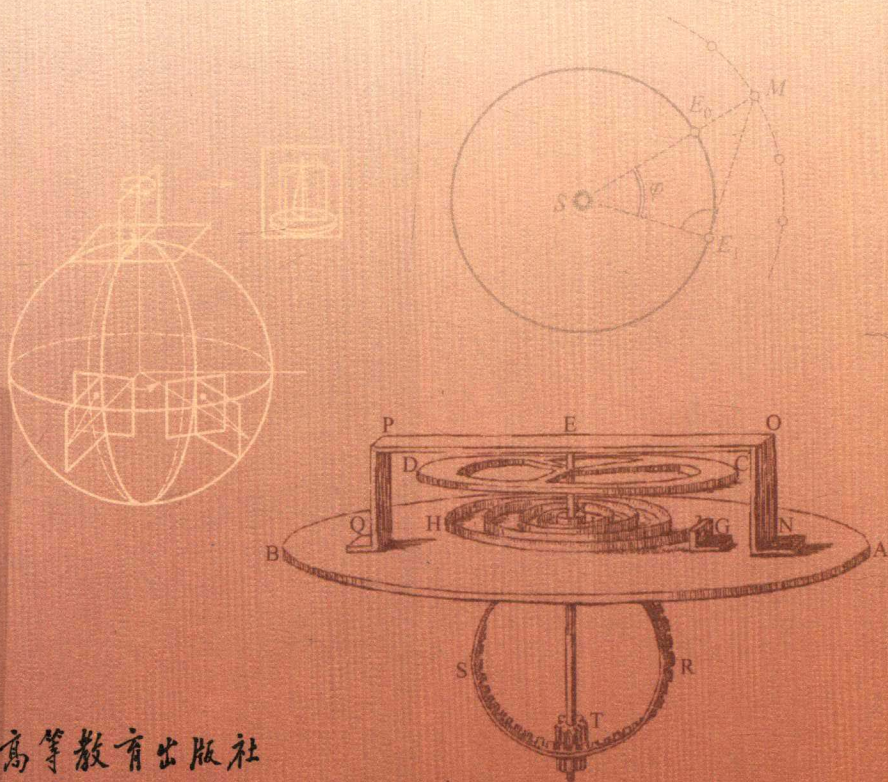
■ 大众力学丛书



武际可 著

伟大的实验与观察

——力学发展的基础



高等教育出版社

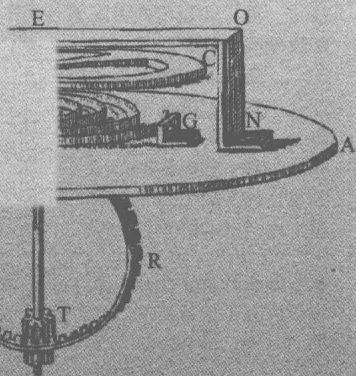
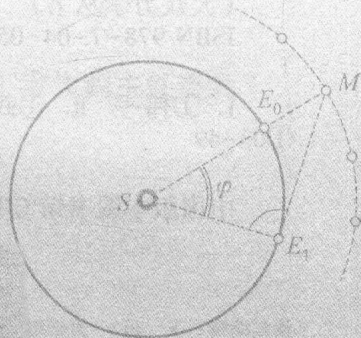
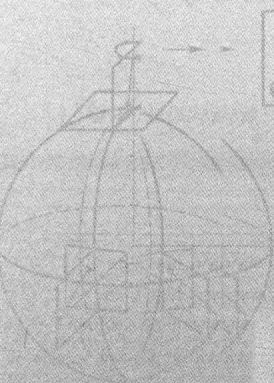
版规划项目
作出版资金资助

大众力学丛书

伟大的实验与观察

——力学发展的基础

武际可 著



高等教育出版社·北京

图书在版编目(C I P)数据

伟大的实验与观察：力学发展的基础 / 武际可著

· --北京：高等教育出版社，2018. 10

(大众力学丛书)

ISBN 978-7-04-050669-3

I. ①伟… II. ①武… III. ①力学-通俗读物 IV.

①03-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 229974 号

策划编辑 王 超 责任编辑 王 超 封面设计 赵 阳 版式设计 于 婕
插图绘制 于 博 责任校对 殷 然 责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京市大天乐投资管理有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	850mm×1168mm 1/32		http://www.hepmall.cn
印 张	5.5		
字 数	130 千字	版 次	2018年10月第1版
购书热线	010-58581118	印 次	2018年10月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	32.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 50669-00

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

陈立群 戴世强⁺ 刘延柱 佘振苏 隋允康

王振东 武际可^{*} 叶志明 张若京 仲 政

朱克勤 朱照宣

(注：后加^{*}者为主任委员，后加⁺者为副主任委员)

中国力学学会《大众力学丛书》

总 序

科学除了推动社会生产发展外，最重要的社会功能就是破除迷信、战胜愚昧、拓宽人类的视野。随着我国国民经济日新月异的发展，广大人民群众渴望掌握科学知识的热情不断高涨，所以，普及科学知识，传播科学思想，倡导科学方法，弘扬科学精神，提高国民科学素质一直是科学工作者和教育工作者长期的任务。

科学不是少数人的事业，科学必须是广大人民参与的事业。而唤起广大人民的科学意识的主要手段，除了普及义务教育之外就是加强科学普及。力学是自然科学中最重要的一个基础学科，也是与工程建设联系最密切的一个学科。力学知识的普及在各种科学知识的普及中起着最为基础的作用。人们只有对力学有一定程度的理解，才能够深入理解其他门类的科学知识。我国近代力学事业的奠基人周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀先生和其他前辈力学家非常重视力学科普工作，并且身体力行，有过不少著述，但是，近年来，与其他兄弟学科（如数学、物理学等）相比，无论从力量投入还是从科普著述的产出看来，力学科普工作显得相对落后，国内广大群众对力学的内涵及在国民经济发展中的重大作用缺乏有深度的了解。有鉴于此，中国力学学会决心采取各种措施，大力推进力学科普工作。除了继续办好现有的力学科普夏令营、周培源力学竞赛等活动以外，还将举办力学科普工作大会，并推出力学科普丛书。2007年，中国力学学会常务理事会决定组成《大众力学丛书》编辑委员会，计划集中出版一批有关力学的科普著作，把它们集结为

《大众力学丛书》，希望在我国科普事业的大军中团结国内力学界人士做出更有效的贡献。

这套丛书的作者是一批颇有学术造诣的资深力学家和相关领域的专家学者。丛书的内容将涵盖力学学科中的所有二级学科：动力学与控制、固体力学、流体力学、工程力学以及交叉性边缘学科。所涉及的力学应用范围将包括：航空、航天、航运、海洋工程、水利工程、石油工程、机械工程、土木工程、化学工程、交通运输工程、生物医药工程、体育工程等等。大到宇宙、星系，小到细胞、粒子，远至古代文物，近至家长里短，深奥到卫星原理和星系演化，优雅到诗画欣赏，只要其中涉及力学，就会有相应的话题。本丛书将以图文并茂的版面形式，生动鲜明的叙述方式，深入浅出、引人入胜地把艰深的力学原理和内在规律介绍给最广大范围的普通读者。这套丛书的主要读者对象是大学生和中学生以及有中学以上文化程度的各个领域的人士。我们相信它们对广大教师和研究人員也会有参考价值。我们欢迎力学界和其他各界的教师、研究人員以及对科普有兴趣的作者踊跃撰稿或提出选题建议，也欢迎对国外优秀科普著作的翻译。

丛书编委会对高等教育出版社的大力支持表示深切的感谢。出版社领导从一开始就非常关注这套丛书的选题、组稿、编辑和出版，派出了精兵强将从事相关工作，从而保证了本丛书以优质的形式亮相于国内科普丛书之林。

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

2008年4月

目 录

Contents

序言

1

谈谈实验与观察 / 1

给我支点，我就可以举起地球——漫谈杠杆原理
/ 7

2

斯蒂文的尖劈 / 15

3

第谷的观测与开普勒的行星运动定律 / 23

4

伽利略的斜面上下落实验 / 36

5

碰撞问题 / 41

6

玻意耳的抽气筒 / 52

7

惠更斯的摆钟 / 60

8

郑玄的弓和胡克的弹簧 / 75



- 9 丹尼尔·伯努利的流体动力学 / 83
- 10 焦耳的热功当量实验 / 96
- 11 称量地球的人——卡文迪许的万有引力实验
/ 113
- 12 雷诺提出了一个连上帝也皱眉头的难题：湍流
/ 122
- 13 傅科的转动指示器 / 131
- 14 金属会疲劳？ / 145
- 15 结构工程师和骨科医生的产儿——沃尔夫定律
/ 154

序言

Preface

谈谈实验与观察

实验与观察是科学方法的一个重要的方面。17 世纪的近代科学革命，就是从系统的实验和观察开始的。

为了比较深入地了解实验和观察，以及它们在科学方法中的地位，我们需要把话说得长一点，先从什么是科学和什么是科学方法开始谈起。

通俗说来，科学方法就是摆事实、讲道理两个方面。所谓摆事实，就是这里要讲的实验与观察。而讲道理就是严格的逻辑推理，包括演绎推理和归纳推理，还包括数学计算和论证。用科学方法去探索客观规律的过程，以及所得到的规律本身，综合起来就称为科学。

进一步，我们要问，究竟什么是科学所要探索的客观规律呢？一般地说，当我们研究的对象在条件变化时，它保持不变的性质，就是我们所要研究的“规律”。特别是对于力学和物理学来说，我们最关心的客观规律，就是当时间和空间变化时，客观物质及其运动保持的不变性质。例如，在近地面处空气阻力可以忽略的条件下抛出物体的运动轨迹是一条抛物线，这个事实，无论是在北京、罗马、纽约，今天、明天、还是在一千年以前做实验，而且无论是向什么方向抛出，都是不变的。这个事实是相对



时间、空间的变化不变的。我们在力学和物理学中研究的内容大致都是满足这个条件的。

自然会产生这样的疑问，哲学家告诉我们——世间的一切事物不都是发展变化着的吗？不是说运动是永恒的规律吗？科学既然是研究客观世界的，为什么不是去研究运动和变化，却更关心那些在时空变化中不变的事物呢？不错，科学是要研究客观事物的发展变化。不过，变与不变是任何事物的两个方面，为了认识事物的变化，首先要了解它有哪些方面是不变的。比方说，我们研究一个人，他每天每时都在变化，例如身高、体重，一些细胞死掉了，又有一些新生的细胞，每一个瞬时之后，这个人就不完全是前一个人。不过，这个人还是有许多没有变的，例如，他的名字、他的父母、他的出生地、他的指纹等等。幸好有许多方面是没有变的，我们研究和认识他（她）才成为可能。如果这一切每时每刻都在变，我们对他（她）便是不可认识的了。所以，为了研究事物的变化，首要的事情是研究它的不变的性质，这样我们才能追踪它，把握它。

我们回过头来谈科学方法的两个方面。推理在古时候，也称为思辨。思辨和推理发展得比较早。各国在古代都有认识世界的思辨推理的发展，我国在春秋战国时代，有名家、墨家、道家等，通过思辨推理达到新的认识。庄子的“一尺之杵，日取其半，万世不竭”达到朴素的对极限的认识。

思辨推理，有它自己的规律，即逻辑学和数学，特别是早期几何学的发展。而逻辑学的发展需要有民主的环境。古希腊由于有六七百年的贵族民主政治，所以在各地区中，其逻辑学的发展独占鳌头。因此关于自然科学的思辨推理也得到了空前丰富的结果。物质的元素说、物质最小单位的原子说、数学上的极限理论的萌芽等，莫不是思辨推理的辉煌成果。

由于思辨推理的发展，便形成对一切问题寻根问底的方法和知识门类，这就是哲学。

然而，人类的知识毕竟不是单靠思辨推理能够完全积累起来的。单靠思辨推理，有时会把我们引到荒诞不经的地步，如“腐草化萤、腐肉生蛆”、“天堂”、“地狱”、“生死轮回”，等等。

为此，人们需要把思辨推理所得到的结果与实际发生的情况进行对照，这便是实验与观察。把推理与实验和观察结合起来，这就是近代科学方法的开始。14世纪，实验作为一种独立的科学认识手段进入认知方法论的领域，这也标志着科学脱离哲学而独立成为认知世界的知识体系。

最早的实验是一种名叫“假想的实验”或被称为“思想实验”，实际上还是属于思辨的范围。它是把思辨与推理得到的结果与经验相对照。如16世纪荷兰物理学家斯蒂文(Simon Stevin, 1548—1620)通过假想的搁置于光滑楔形体上的链条实验，得到了不平行的三力平衡条件，从而奠定了静力学的基础。而伽利略最著名的假想实验是他对亚里士多德关于重物比轻物下落快的驳斥。他想象一块重的石头和一个轻的球，用绳子绑在一起，然后从塔上扔下来。如果球下落得比石头慢，它必然会阻碍石头的正常下落而使它变慢。但另一方面，球和石头一起比单独的石头重，因而应当下落得比单独的石头快。由此推出，只有它们是以相同的速度下落才可能避免这一矛盾。

有些自然发生的过程，是无法进行实验模拟的。如天体的运动。人们对自然的观察起源也很早，最古代的天文学知识都是由观察天象积累的。但只靠观察而没有严格的推理，只能够形成“天圆地方”和托勒密“地心说”等基于直观得到的自然界的模型。只有凭借严密的思辨推理，包括数学论证和计算，和已有的观察相结合，才会产生哥白尼“日心说”的新理论。“以太”是一种思辨推理的产物，依靠这种概念，推动了光的波动说的发展，也促进了弹性力学和流体力学的发展。人们曾经设计过许多实验，想测量它的物理常量，不过经过综合各种实验的矛盾和严格推理思辨的结果，终于否定了它的存在。



值得指出的是，作为推理的一种形式的归纳推理，是在实验和观察充分发达之后总结出来的思辨形式，大约是16世纪之后逐渐形成的。

人类大量并系统地进行科学实验，大致是从英国学者培根(Francis Bacon, 1561—1626)开始的。他把实验作为自然科学的基本方法，认为人的感官有一定的局限，容易发生主观和片面的错误，只有深入地进行科学实验，才能弥补感官的缺陷，保证感觉经验的可靠性。培根是一个系统地制定了认知的归纳法的哲学家。他认为，归纳法是最可靠的方法。他把归纳法叫做“新工具”。他在1620年出版了一本书《新工具》，书中系统论证了归纳法。他在1626年出版的另一本关于自然史的著作《木林集》(Sylva Sylvarum, 英文译为 A Natural History in Ten Centuries, 中文经常译为《十个世纪的自然史》，在后来的版本中，出版商把《新工具》也纳入了其中)，该书的最早版本一共有十章，每章有100个自然段，培根把每个自然段称为一个实验，所以全书一共介绍了1000个实验。书中所介绍的实验比较庞杂，分类也不十分严密。但培根毕竟是最早介绍科学方法和实验的重要性并且介绍了许多实验和观察的作者。所以有人称培根为现代“科学实验之父”。

实际上，从严格意义上进行科学实验的，应当提到的是两位科学家。一位是意大利的伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)，另一位是英国的玻意耳(Robert Boyle, 1627—1691)。严格而精密的现代实验应当是由他们开始的。

伽利略在1638年出版的《关于两门新科学的对话》中系统地介绍了他研究物体下落运动的实验和关于梁的强度的实验，并且得到了落体的等加速运动等的结论。这本书是人类历史上对物体运动认真进行实验和理论研究的开始。

玻意耳1660年出版了一本书，书名为《关于空气弹簧及其效果的新物理实验》(New Experiments Physico-mechanical Touching

the Spring of the Air and its Effects), 书中介绍了有关空气性质的实验 43 个, 其中包含了他得到的人类历史上第一个关于物性的定律——玻意耳定律。

科学实验是经得起重复、推敲和责难的。值得一提的是对于玻意耳的实验, 曾经有一些十分著名的学者(包括当时英国著名哲学家霍布斯)反对, 并由此引起一场论战。其实质是反对者认为思辨才是客观真理的标准, 并且对实验进行多方指责。论战的结果, 一方面帮助玻意耳更加完善了自己的实验, 另一方面, 以反对者失败而告终。实验最终登上了科学的殿堂。并且真理的最后审判者应当是实验和观察。

本书简要介绍了在整个力学发展史上 15 个伟大的实验与观察。其中大部分实验是由著名的科学家一人指导之下完成的, 也有一些实验是经过几代人继承来完成的, 像卡文迪许关于万有引力的测量, 就是在改进前人装置基础上完成的。特别是对于一种现象的观察, 绝不是一人之力所能完成的, 例如对金属疲劳现象的观察。不管怎样, 这些实验和观察所得到的结论是经得起重复检验的。它们已经成为全人类在认知自然中得到的最宝贵的财富。可以毫不夸张地说, 这些实验与观察, 奠定了现代力学最重要的基础。

从这些简要介绍中可以认识到, 有价值的实验和观察, 是同严密的推理思辨紧密结合的产物。不论是在这些实验之前的计划和设计, 还是在实验和观察之后的解释和总结, 几乎每一个环节都需要缜密的推理思考。只有这样, 才能够得到科学发展中的重要理论和定律。

人类最近三四百年的历史证明, 近代科学的所有进展莫不是思辨推理和观察实验相结合的产物。我们平常说的科学发展中的假设与求证, 无非是不断进行思辨推理和观察实验的某些环节。

所以爱因斯坦说过: “西方科学的发展是以两个伟大的成就为基础的, 那就是: 希腊哲学家发明的形式逻辑体系(在欧几里



得几何学中)，以及通过系统的实验发现有可能找出的因果关系（在文艺复兴时期）。”爱因斯坦在 1953 年说的这段话，很精辟地概括了科学方法的最根本的方面，即思辨推理与观察实验。

值得提到的是，在重视观察与实验的同时，从 19 世纪开始，在哲学上出现了一种称为“实证主义”或“实证哲学”的流派。该流派虽然非常重视观察和实验，在这一点上，对当时的科学发展是有推动作用的，而且起过非常重要的作用。但是当把观察实验强调到不适当的程度，从而反对合理的思辨推理，事情就会走向反面。到了 20 世纪初，尽管原子的大小、质量都可以借助实验和推理间接地准确地得到，可是一些实证学者就是不承认。著名物理学家、哲学家、心理学家马赫就是其中之一，他说：“你真的看到它了吗？”。这种只有眼见为实的态度，实际上在一定程度上阻碍了科学的发展。在今天，借助于实验，并且依靠推理，我们可以认识寿命只有一亿亿分之一秒的基本粒子的存在。在探求极为遥远的天体、极为微小的世界、极为古老的秘密时，我们还是要用思辨推理和观察实验相紧密结合的方法。思辨推理和观察实验缺一不可，把其中之一强调到不适当的程度，也是不可行的。

1

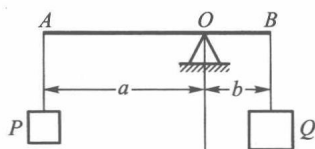
Section

给我支点，我就可以举起地球

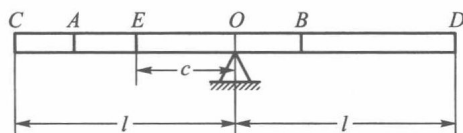
——漫谈杠杆原理

主标题的这句话据说是古希腊学者阿基米德 (Archimedes, 公元前 287—公元前 212) 说的。他的根据就是他系统研究并精确推理得到的杠杆原理。

上过初中的人，都会在物理课上学过杠杆原理。这个原理是说，一根刚性的无重量的杆 AB (如图 1-1(a)) 支点为 O ， A 端作用力 P ， B 端作用力 Q ， AO 长度是 a ， BO 长度是 b ，则它平衡的



(a)



(b)

图 1-1

大众
力学
丛书



条件是

$$Pa = Qb \quad (1.1)$$

如果把 P 称为力, a 称为杠杆的力臂, 把 Q 称为重, b 称为重臂。则这个平衡条件可以简单地总结为: 力乘以力臂等于重乘以重臂。

深究一步, 要问这个规律是怎样来的, 说来话长。

人们可以回答说, 通过实验得到的。在中学的教材上, 也是让学生通过亲自做实验得到这个结论的。例如, 要学生在杠杆平衡的条件下, 称量重物的质量 P 、 Q , 再用尺子量出力臂和重臂的长度 a 、 b , 然后把它们相应地相乘, 确定是不是相等。其实, 这只能够说是一种验证。我们要问, 你验证了几组数据, 都是对的, 你怎么能够由此就下结论说这个公式是普遍对呢? 即对无论 P 、 Q 和 a 、 b 取什么值, 只要满足公式, 就一定平衡呢?

这个问题不止我们在发问, 在几千年以前古人早已经在发问了。而且他们有各种不同的巧妙的回答。我们就来介绍古希腊著名的力学家阿基米德是怎样回答这个问题的。

阿基米德要从一个最为简单的事实作为根据, 由它开始做推论。他认定的最简单的事实是: 一根均质的直杆, 它的重心一定是在直杆的中点。进一步, 一个物体的重心相当于物体所受的重力都集中作用在这一点。这个事实可以看作是一个实验结论, 也可以看作是千百年经验的总结。于是可以看作我们进行论证的公理。图 1-1(b) 画的就是这种情形, 长度为 $2l$ 的均质直杆 CD , 重心在它的中点 O , 因此在这一点支撑, 这根杆就是平衡的。

现在, 我们换一个角度来看这根杆。用 E 点把 CD 分为两部分 CE 和 ED , 两段的重量分别为

$$P = \rho g(l-c), \quad Q = \rho g(l+c), \quad (1.2)$$

其中 ρ 为杆的密度, g 为重力加速度。而 $l-c$ 和 $l+c$ 分别为两根杆的长度。

CE 段长度的一半是 $(l-c)/2$ ，ED 段长度的一半是 $(l+c)/2$ 。所以，由图可见

$$\text{CE 段的重心 } A \text{ 与支点 } O \text{ 的距离 } a = (l-c)/2 + c = (l+c)/2, \quad (1.3a)$$

$$\text{ED 段的重心 } B \text{ 与支点 } O \text{ 的距离 } b = (l+c)/2 - c = (l-c)/2. \quad (1.3b)$$

我们已经把图 1-1(b) 的均质直杆的平衡，转换为图 1-1(a) 的杠杆平衡问题了。把上面得到的 P 、 Q 、 a 、 b 代入杠杆平衡的条件，的确有

$$Pa = Qb = \rho g(l-c)(l+c)/2.$$

看来给了一个均质直杆，我们能够找到许多(实际上是无穷多)如图 1-1(b) 的杠杆平衡系统与之等价，因为分点 E 的位置可以随意确定。现在，如果给了一个已经处于平衡的杠杆如图 1-1(a)，也就是已知满足(1.1)式的 P 、 Q 、 a 、 b ，我们还能够找到一个如图 1-1(b) 的均质直杆的平衡与之对应。

首先由(1.2)和(1.3b) $P = \rho g(l-c) = 2\rho gb$ ，可以得到 $\rho g = P/2b$ 。

进一步，由式(1.2)，把两个式子相加，得 $P+Q = 2\rho gl$ ，再把两个式子相减，得 $Q-P = 2\rho gc$ 。从这两个式子很易于得到 $l = (P+Q)/2\rho g$ 和 $c = (Q-P)/2\rho g$ 。

无疑，均质直杆的支撑比起一般的杠杆原理要简单得多。但是后者却可以通过严格的逻辑推演由前者得到，而前者是通过人们的实验和长期经验总结得出的可靠结果。这种从简单可靠的结果推演出比较复杂的情形，在整个科学发展史上曾经是最重要的方法。欧几里得的平面几何、一直到后来伽利略、牛顿(Sir Isaac Newton, 1642—1727)关于物体运动的研究，一直都是沿着这种精神做学问。无怪乎，美国科学史家理查德·S·威斯特福尔说：“两个主题统治着 17 世纪的科学革命——柏拉图、毕达哥拉斯传统和机械论哲学。”意思是，由柏拉图和毕达哥拉斯开创的几何