

中国古代光学的格术

李志超 徐启平

(中国科学技术大学科学史研究室)

一、残存的信息

“格术”一词在古文献中唯见于沈括的《梦溪笔谈》一次，有关原文如下：

“阳燧照物皆倒，中间有碍故也，算家谓之格术。如人摇橹，橹为之碍故也。若鸢飞空中，其影随鸢而移；或中间为窗隙所束，则影与鸢遂相违，鸢东则影西，鸢西则影东。又如窗中楼塔之影，中间为窗隙所束，亦皆倒垂，与阳燧一也。阳燧面洼，以一指迫而照之则正，渐远则无所见，过此遂倒。其无所见处，正如窗隙、槽泉、腰鼓碍之，本末相格，遂成摇橹之势。故举手则影愈下，下手则影愈上，此其可见。（阳燧面洼，向日照之，光皆聚向内。离镜一、二寸，光聚为一点，大如麻菽，著物则火发，此则腰鼓最细处也。）”

从这不到二百字的文章，可得到下列信息：

1. 格术是一种数学，应有定量运算操作，但没有留下任何算例；2. 格术处理的对象是“形”，摇橹算作力学，成像是光学，用于处理这些物理问题的格术可以说是“数学物理方法”；3. 槽绕其支点“橹”转动，“本”和“末”的位移可由交叉直线两边的相似三角形计算，推之于小孔成像则演变为二维图像的比例相似几何学，我们可称之为“格术几何”。

在光学上，格术有深刻的物理意义。

二、格术与光学

格术在几何光学成像方面是最基本的物理规律。小孔成像已不必说，透镜、反射镜成像也一样，总有一个或几个格术几何关系存在。作

为“碍”的可以是：(1)透镜的光心[图 1(a)]，(2)反射镜的曲率中心[图 1(b)]，(3)焦点(图 2)。根据物理教科书中的几何光学成像作图

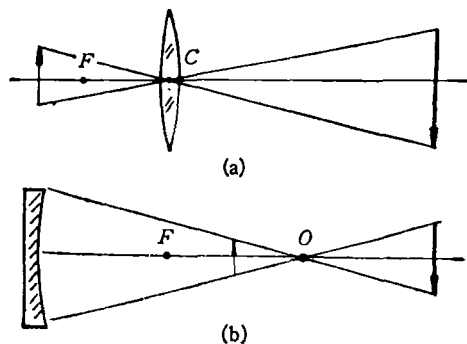


图 1 从光心或曲率中心投影的物与像的格术几何

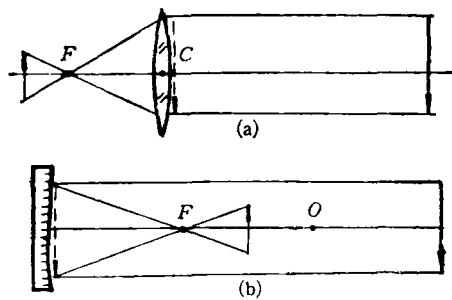


图 2 从焦点投影的物与像的格术几何

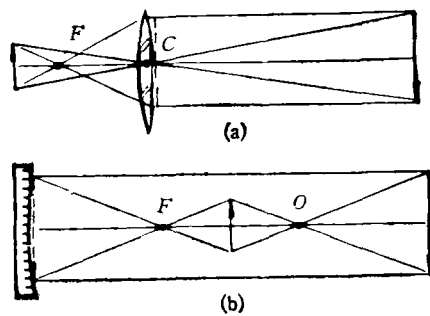


图 3 两次格术操作作图法

法,很容易找到这些关系,其中(1)和(2)的情况不必说了.情况(3),如把物以焦点为“碍”投影在镜面或透镜面上,则所得像的大小和倒正都对,只是像的位置还未定.其实,完整的成像作图法不过是连用两次格术操作,如图3.先用焦点为“碍”,在镜面上求像,便先知其大小和倒正;再用光心或曲率中心为“碍”,取其投影大小与镜面上一致处,即是像所在位置,也即从镜面上画出与光轴平行的线,与过光心或曲率中心的线相交处是像位.

成像过程中的格术特性的解说并不复杂:像的定义自然地要求像与物之间成点对应的空间变换关系,格术是满足这一要求的最简单的空间变换——点投影变换.

如再深入到波动光学去解释也不复杂:几何光学成像元件都是些特殊的衍射变换元件,它们的空间傅里叶变换谱是 δ 函数.我们已经知道,任何衍射变换造成的图像都符合伍小平公式^[1],物点的相对移动与像点移动的关系

$$\Delta l_o + \Delta l_i = 0, \quad \Delta m_o + \Delta m_i = 0,$$

$$\Delta\left(\frac{1}{\rho_o}\right) + \Delta\left(\frac{1}{\rho_i}\right) = 0,$$

式中 l_o, m_o 是物的一点相对于变换面的两个正交的方向余弦, l_i, m_i 则是像的一点的对应量.自然,它们都要以变换面上某点 C 为入射点(图4).这公式说明,若把物分解为许多点,从一个

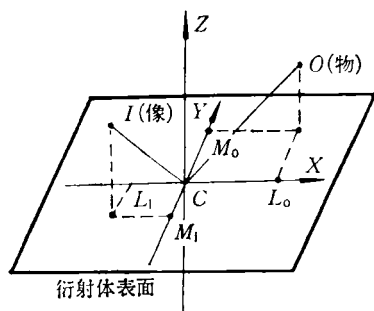


图4 伍小平公式的图解

$$OC = \rho_o, \quad IC = \rho_i$$

$$\frac{L_o C}{\rho_o} = l_o, \quad \frac{M_o C}{\rho_o} = m_o,$$

$$\frac{L_i C}{\rho_i} = l_i, \quad \frac{M_i C}{\rho_i} = m_i,$$

M, L 是 O 和 I 的投影点

点移向另一个点,则对应的像点的移动从角度变化来说, $\Delta(l_o, m_o) = -\Delta(l_i, m_i)$,正就是“本末相格”,是相等相反的关系.三个等式的第三个中的 ρ_o 和 ρ_i 各为物距和像距,故该式与透镜成像公式对应.

这组公式包含几何光学,又广于几何光学.它还包括更一般的衍射过程,如光栅、波带片、全息片、漫反射面等.不仅包括形成 δ 函数空间光场分布的情况(如透镜成像,此时不必为单色光),也包括把一点变成一片光强分布的情况(如全息片、漫散射、离焦的像,此时只对单色相干光适用).所以,伍小平公式是光学的基本定律,而其中一半是格术.

三、古代成像论

对成像现象,早在《墨经》已有叙述.其中虽未明确提到格术一类的概念,但它也是以格术为主要方法的.这观点以前已有^[2]提及.《墨经》中最值得注意的光学内容是凹镜成像,而其关键则是“中”这个概念.“经文”：“鉴洼，景一小而易，一大而正，说在中之外内。”即是说：凹镜的像，一种是缩小而倒置的，一种是放大而正立的，原因是位于“中”的内外不同。“经说”的解释是：“中之内：鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小。而必正，起于中，缘正而长其直也。中之外：鉴者近中，则所鉴大，景亦大；远中，则所鉴小，景亦小。而必易，合于中而长其直也。”即是说：像的大小由物与“中”的距离决定，越近则像越大，越远则像越小。请注意，这里并没说：“中之外，必小”，而是“必易”。“起于中”就是以“中”为起点，向物连直线，延伸至镜面即得像的大小。“合于中”就是由物出发，通过“中”连直线，延伸至镜面即得像的大小。这种几何操作无疑是符合格术意义的。

然而，“中”到底是曲率中心还是焦点？前人有说墨家的“中”是曲率中心与焦点相混的概念^[3]，但从墨家的几何学知识测度，这“中”当为一明确的几何点，其定位是不会含混的。若说

“中”是曲率中心,如图 1(b)的 O 点,虽然在格术关系上很明显,但于中之内而又在焦点之外的情况说不通,这里不是“小而易”,是“大而易”。以前解说谓:墨家即以人面为物,自己照自己,故不能观察这区间成像的情况。这种说法有牵强之处。这种观察是要用低曲率凹镜的,而低曲率凹镜制造难度大,精度要求高。所以,按理说,古代凹镜应多是沈括所见的一、二寸焦距之物,出土早期文物的阳燧也确是这样。这种凹镜更适合沈括的照指观察,而在“中之内”照面就嫌太近了。如说“中”是焦点,如图 2(b)的 F ,虽仍有“易”而不“小”之难,可是在这里,“经说”给出了解决出路。“经说”讲像的大小时,对中之内和中之外一视同仁,而讲像的倒正却明确地区分开,并各用了一个“必”字。由此可见,“经文”与“经说”之间有所出入。这启示我们:两者的作者不是一人。如果“经说”的作者是作经人的弟子,则他们对“中”的理解不应有分歧,那么就只能按言之较详的“经说”定之为焦点了。显然,弟子比先生前进了一步,把像的大小说得更精确了。

《梦溪笔谈》就没有这种模糊性,沈括明确说“碍”是日光会聚之点,是焦点。沈括和墨家一样,都是以格术方法把像投在镜面上来求其大小和倒正,都不能决定像的精确位置。也就是说,同现代几何光学作图法相比,他们是一次格术操作,而不是二次格术操作。

把像投在镜面上的想法,在思路上是自然的,因为成像是镜面的功能,看像总是向镜面方向看去。但我们却不能因此就说墨家和沈括不知另有像距,因为他们会从平面镜看到像距。如《墨经》讲平镜那一条就明确说了像的远近和运动。而凹镜,至少在近镜处应与平镜相似。不过他们都没达到研究凹镜像距的地步。

从方法、内容、结果各方面而言,沈括几乎与墨家完全一致,沈括的进展是叙述详细、明确。在像的大小方面他说得虽然不多,但他既已说到了“格术”,自然意味着有了半精密定量的几何光学作图方法。这在十一世纪当然是了不起的成就。

四、中国方法

沈括的知识水平虽然无法与近代相比较,但是他似乎不费力气就抓到了成像现象的最基本的共性,从而在这一点上使他远远超过了同时代的外国学者。其中,最值得我们推敲的是他的研究方法。

沈括在光学上只不过是观察和粗略的分析,他对光和像的本性也没有探讨,而他的“格术成像论”却是一种广泛性综合理论,来源于简单的类比、归纳。把小孔成像的直观模式推之于凹镜成像并非小事。小孔是有形的具体实物,而凹镜之“碍”(或墨家的“中”)则完全立于虚空之中。给人启示的赋形过程只有日光之会聚。“碍”这个抽象概念的提出,表现了沈括的高超的抽象思维能力。近代物理学史上凡有伟大成就的物理学家,无不表现出这种能力。爱因斯坦说过:“知识不能单从经验得出,而只能从抽象思维和观察事实的两者比较中得出。”这话对沈括的光学成就而言非常合适。

沈括的方法启发我们:在探讨基本科学规律时,如已有丰富坚实的具体知识当然最好,但即使这个前提条件不充分,仅靠很粗略的了解,未必不可抓到问题的核心实质。事实上,一个科学领域或一个科学命题开发之初,总是知之甚少,但却不可因此而废综合探索之功。做这种事是前沿科学的必要而重大的任务。

沈括的治学风格带有中国古代学者的一般特点。他们是儒生,自然科学不是他们的主业。以孔夫子的学问体系为模范(其实墨家也差不多),儒生是以经天济世的政治伦理学为正宗,他们中间有人间或搞点自然科学,正如有人搞诗艺和书画,是辅业。至于医卜星相,是为术者,其社会地位和影响不能与儒生相比。儒生统治的中国知识界自然很少有大量工作的分析物理学研究,多的只是零星的高谈阔论。虽然高谈阔论易流于空泛,但若不离实际,倒也易收明察大体之效。沈括是成功的典型。而这种

(下转第 765 页)

第十七届国际科学史会议在美国加州举行

四年一度的国际科学史会议今年在美国举行。来自世界各地的近千名专家、学者参加了这次具有重要历史意义的学术活动。

1985年7月31日,会议在加州大学柏克莱分校隆重开幕。本届会议主席 J.L. Heilbron 与 R.Hahn 分别用英语、法语宣读了开幕词。接着柏克莱分校副校长 R. B. Park 代表东道主向会议表示祝贺,他还简单地介绍了该校在科学研究方面所取得的成就。国际科学史与哲学协会主席 E. N. Hiebert, 联合国教育科学及文化组织代表 R. Pakkas 在贺词中都强调了国际性合作的必要性。美国科学院代表 F. Segrè 也向大会表示祝贺。名著《科学革命的结构》的作者 T. S. Kuhn 在本次会上发表了精彩的演说,他回顾了第十届国际科学史会议(1962年在美国举行)以来科研重点变化的过程指出,过去许多论文探讨近代科技史,而这

次会议上有一半论文将是研究科学对公共、社会的影响。他还指出,现在科技史的任务之一是帮助那些对科学外行的人了解科学。

历时一周多的本届会议分专题演讲与科学讨论两种形式,共有一百多组(前者21组,后者79组)。物理方面分16组,共有论文78篇,内有研讨《墨经》和(清)郑复光的光学成就。诺贝尔奖金获得者 D. Glaser 还应邀作了生物物理方面的报告。中国科学史专家席泽宗、柯俊、何丙郁(香港)、程贞一(美国)等人参加了会议。此外还有数十位中国学者在会上报告了论文。会议期间,海峡两岸的炎黄子孙亲切交谈,交流了学术,大家为文明古国对世界科学所作出的伟大贡献而感到自豪。

(王兴五 王锦光)

1986年第1期《物理》内容预告

超导电性方面的研究机会(M. Tinkham 等);重费米子系统及其超导电性(章立源);穆斯堡尔谱学在低温研究中的应用(夏元复);液晶彩色显示(洪熙君等);点缺陷引起的黄昆漫散射;合金玻璃结构中的化学短程有序(黄胜涛);氧、氮磁性之差及其利用(赵 琢);

磁粉的一些物理问题(罗河烈);发散束 X 射线双元素靶的制备(范得培等);用 APPLEII 微处理机控制任意函数的变温过程(赵世富等);强迫振动变频扭摆内耗仪的研制和应用(文亦汀等);表面和界面电子显微学(吴自勤)。

(上接第 739 页)

量可减少数倍。(4)本回路有统一的接地点,因而运行安全可靠。(5)本回路可应用于所建议的 NSP 装置。NSP 装置与 GBH-1 装置一样,其主场线圈均由围绕环形真空室的 24 匝矩形线圈组成,如将每匝线圈均分为两部分,并分别作为两支路中的负载,由于真空室内、外部分

线圈间的互感不同,因而两支路中的电感不同,但对外回路作些调整或将线圈非对称地剖开,使两支路中的电参数对称,这样,本回路就可应用于 NSP,使 NSP 的结构十分紧凑和简化。

作者对邓希文和邓志林所做的有益讨论及对刘赤子为本实验进行的机械加工,表示衷心感谢。

(上接第 758 页)

风格在许多领域(如中医)有着明显的表现。

格术光学可称得上是我国古代物理学一大成就。清末学者邹伯奇著《格术补》,书的内容是全面的光学,未见从格术本身作出什么阐发。但他以“格术”名其书,足见他已悟到格术在中国古代光学中的重要意义。

参 考 文 献

- [1] 伍小平、何世平、李志超,物理学报,29-9(1980),1142.
- [2] 李志超,镜子的世界,安徽科学技术出版社,(1983),61-65.
- [3] 钱临照,物理通报,1-2(1951),97.