

光学显微镜简史

唐玄之 李明

(南京农业大学基础科学学院, 南京 210014)

在历史发展过程中, 显微镜分为单式显微镜和复式显微镜。现今所称的显微镜均是指复式显微镜。

1 单式显微镜的发展

单式显微镜就是现今的放大镜。它的起源是从使用透镜观察昆虫之时算起, 这大约是在15世纪中叶^[1]。1625年, 斯泰卢蒂(Francesco Stelluti)用5倍和10倍的放大镜(即单式显微镜)详细描绘出了蜜蜂各部分的图形, 由意大利猗猗学院(Academy of Lynx Eye)出版^[2], 这是有关显微镜研究的第一部著作。

由于初期的复式显微镜有严重的缺陷, 荷兰的列文虎克(Antony Van Leeuwenhoek, 1632—1723)将其毕生精力放在发展单式显微镜上, 并将它用于生物观察。这个传奇式人物终于成了显微镜学家和微生物学的开拓者。他开过布店, 并是“司法厅的一名普通勤杂人员”。其实他担任过数目惊人的多项工作。这些挂名职务显然只花去他少量的时间, 却把大量时间花在制造显微镜和显微镜观察的业余爱好上。他学吹玻璃、磨透镜、炼制金属、制作显微镜等。他的显微镜是一个很小的透镜装在两片金属(大多数是银制, 有三分则用黄金制成)的小窝之中。被观察的标本粘附在透镜之下的玻璃上。他对标本的观察十分仔细, 标本看过之后, 仍留在原玻璃上, 以便过了一段时间再观察。这样他就得不断制作显微镜, 以观察新的标本。他逝世后留下247个显微镜和172个透镜^[3], 但后来全都失散了。制作透镜的材料有玻璃、宝石、钻石等。最小透镜的焦距只有5mm左右, 直径不到3.2mm, 其放大率可达300倍, 分辨率

为 $1\mu\text{m}$, 他从1673年起的50年内用荷兰文向英国皇家学会写了372封信, 由其友人解剖学家格拉夫(R. de Graaf, 1641—1673)等先后译出120个片断, 发表于《皇家学会哲学学报》上。他还被选为皇家学会会员和巴黎科学院的通讯成员。

我国清初孙云球《镜史》中的“存目镜”, 李约瑟认为乃是单式显微镜^[4]。

对复式显微镜的缺点较为了解的英国植物学家布朗(Robert Brown, 1773—1858), 于1827年使用300倍的单式显微镜, 发现了在物理学上很有名的“布朗运动”(小颗粒的随机热运动), 后来又于1833年发现了细胞核。

2 复式显微镜的发展

以下所讲的“显微镜”都是指“复式显微镜”。

显微镜的发明者直到现在尚不能完全确定。英国人迪格斯(Thomas Digges, 1543—1595)在其父亲的《缩放术》一书的前言中指出, 将凸透镜和凹透镜组合以增大放大率。但是, 一般认为荷兰的两位眼镜制造商詹森(Hans Janssen and Zacharias Janssen)约于1590年发明了显微镜。文献上或说他们是父子, 或说是兄弟^[5]。扎哈里耶斯·詹森在直径约5cm, 长约30cm^[6]的三节锡管的两端, 分别装上凸透镜和凹透镜(滑动调焦), 组合成一台复式显微镜。另一位荷兰人德雷贝尔(C. Drebbel, 1572—1634)约在同期设计了一个更好的仪器, 因此伽利略将显微镜的发明权归之于他。伽利略于1610年也制作了一个显微镜, 并用来观察一个昆虫。因此有人认为是伽利略发明了显微

镜。天文学家开普勒在1611年的《屈光学》一文中阐明了显微镜的光学原理。1625年意大利的费伯(Giovanni Faber)将此仪器称为“microscope”。

李约瑟认为,我国孙云球制作的“察微镜”是复式显微镜。我国黄履庄(1656—?)于1675—1685年期间也制造过显微镜。我国使用“显微镜”一词,就目前所知,最早出现于李渔(1611—1679)的小说《十二楼·夏宜楼》(成书于清顺治15年,即1658年)中。他写道:“所以叫做显微,以其能显至微之物而使之光明较著也”。但李渔所说的乃是单式显微镜,因为书中所说的“大似金钱,下有三足”,与现今的座式放大镜大致相似。

沙伊纳(C. Scheiner, 1575—1650)于1628年前后在开普勒设计的基础上,将目镜的凹透镜改为凸透镜,也可以进行显微投影。

第一台设计较好、性能较高的显微镜,是物理学家胡克(R. Hooke, 1635—1702)制作的。胡克将玻璃碎片在灯上拉成细丝,在丝的一端烧成一个小玻珠^[7]。将玻珠与细丝相连的一端磨成平面,这样得到的平凸透镜作为显微镜的物镜。他并在物镜之上加一块透镜,使用或移开这块透镜,并改变镜筒长度,就可改变显微镜的放大率。这实际上是变倍显微镜的雏形。胡克的目镜用一块大的凸透镜为场透镜,一块小的为眼透镜。胡克显微镜的照明方法也较好,用蜡烛为光源,用球透镜将光线聚焦在标本上。1663年,胡克受皇家学会的要求,担负起演示显微镜研究成果的课题。他将所研究的成果于1665年以《显微图志》(或“放大镜下微小物体的显微技术或某些生理学描述”)发表。在该书中第一次使用“细胞”一词。

胡克之后,显微镜目镜首先得到发展。现今生物显微镜中广泛使用的惠更斯目镜是惠更斯(C. Huygens, 1629—1695)在1684年(或1703)^[8,9]设计制成的。另一个有名的拉姆斯登目镜是拉姆斯登(J. Ramsden, 1735—1800)于1783年制成。

然而,显微镜的成像质量主要取决于物镜

的质量,所以显微镜的改进与发展,其本质上是物镜系统的改进与发展。但是,在复式显微镜发明之后的两个世纪中,尽管许多科学家和光学制造商作了许多的努力,他们用不同透镜及不同光阑的组合进行了种种尝试,却收效甚微。只是显微镜的机械结构和外形上有所改进而已。事实上,在许多情况下,制造的工艺标准反而有所下降。当时的显微镜物镜没有校正像差,镜径又小,球面像差和色像差严重,玻璃的质量也不高(有气泡、不均匀等)。因此显微镜给出的影像,扭曲而模糊不清。并且人为的视觉虚像又常见。所以那时的显微镜并不比今天的玩具显微镜高明多少。一些生物学家常误把虚像作为真像。例如,在细胞学说的形成和发展过程中,生物标本在显微镜中产生的虚像“小球”,曾被激烈地争论过。1823年,米尔恩-爱德华兹(Milne-Edwards)小球是关于“小球说”的最后一批报告之一。由于上述种种情况,使得当时的一些生物学家看不起用显微镜所做的观察工作,他们责斥显微镜^[10]。因此,直到18世纪末期,生物学家大都使用焦距极短的单式显微镜工作,而使用复式显微镜的则较少。前述的布朗直到19世纪30年代还在使用单式显微镜,并取得了不朽的成果。

显微镜发展的转机开始于1757年多隆德(John Dollond, 1706—1761)制作了第一台消色差望远镜之后。

伟大物理学家牛顿曾错误地认为透镜的色像差不可能被消除。因此他本人放弃研究折射望远镜,从而发明了反射望远镜(1668)。牛顿的见解使此项工作推迟了好几十年^[11]。1729年,霍尔(C.M. Hall, 1703—1771)^[12]提出,利用不同类型的玻璃制造透镜可能消除色像差,并于1733年制成了一个不太好的消色差透镜。1747年,大数学家欧拉(L. Euler, 1707—1783)用理论证明了消色差的可能性。多隆德终于在1757年制成了消色差望远镜,他因此被誉为消色差技术的发明者。其长子彼得(Peter Dollond, 1733—1820)为改进消色差望远镜而制成三胶合透镜。他还改进了当时流行的卡尔

佩珀 (Edmund Culpeper, 1660—1740) 显微镜和卡夫 (John Cuff, 1708—1772) 显微镜。

多隆德的消色差透镜一开始只能用于望远镜。显微镜的物镜很小,消色差特别困难,故消色差显微镜出现得比较晚。直到 1791 年,阿姆斯特丹的业余爱好者、骑兵上校比底尼德尔 (F. Beedsnijder) 才制成消色差显微镜,质量相当好,但不能消球色。1807 年阿姆斯特丹的光学仪器商狄杰尔 (Harmanus Van Deije, 1738—1809) 制成消色差显微镜,在市场出售。法国物理学家塞利格 (Selligue) 于 1824 年提出了一个为高倍显微镜消色差的方法,即把几个低倍消色差物镜用螺旋推动以联合使用,这样就可避免制造十分短的焦距的物镜而又能得到较高倍率的消色差物镜。法国文森特·薛瓦利埃 (Vincent Chevalier, 1770—1841) 与其子查尔斯 (Charles Chevalier, 1804—1859) 在显微镜的消色差上做过许多工作。根据塞利格的方法, V. 薛瓦利埃于 1825 年制成了消色差显微镜。 C. 薛瓦利埃于 1834 年制成的消色差显微镜还附有反射物镜、聚光镜及偏光元件等。生物学家普尔基涅 (J. E. Purkinje, 1787—1869) 于 1832 年说服他自己所在的工作单位的布雷斯劳 (Breslau) 大学当局购买了一台新的消色差显微镜,他还采用达盖尔 (L. B.M. Daguerre, 1789—1851) 刚发明不久的摄影方法制成了第一张显微照片。

英国科学家利斯特 (Joseph Jackson Lister, 1786—1869) 在 1830 年向皇家学会宣读了一篇题为“论显微镜的改进”的论文。文中指出,由火石玻璃制成的凹透镜和由冕牌玻璃制成的凸透镜组成的消色差物镜存在着一对齐明点 (aplanatic foci)。在齐明点上,像点球差也被消除了。由此他设计出一种由两组这种消色差透镜组成的低倍显微镜物镜。1840 年,在他指导下制成了这种物镜,现仍在广泛使用,称之为“利斯特物镜”。这是显微镜发展史上又一个转折点:使得物镜的制造从全凭经验进入到按理论设计的阶段,使得显微镜从“科学的玩具”成为真正的科学仪器并促使其发展。

意大利的阿米奇 (Giovani Battista Amici, 1786—1863) 于 1818 年制成没有色差的反折射显微镜(物镜中带有反射元件)。利用这台显微镜,他对于轮藻细胞中原生质循环的知识取得明显的进展,使他一举成为知名的光学家和植物学家。他在 1855 年设计成功一种消色的中倍显微镜物镜,现在仍在广泛使用,叫做“阿米奇物镜”。阿米奇还指出了盖玻片的厚度对成像质量的影响。罗斯 (A. Ross) 于 1837 年制成校正环 (correction collar)。它是装在物镜筒部分的环状装置,用来微调透镜间的距离,以消除盖玻片所产生的像差。

在显微镜的发展过程中,德国物理学家阿贝 (Ernst Abbe, 1840—1905) 起过特别重要的作用。而阿贝在科学上的成就只有联系到蔡司公司的创立和兴旺,才能为人们所充分认识。1846 年 11 月^[13],德国耶拿大学机械系的机械师卡尔·蔡司 (Carl Zeiss, 1816—1888) 离开大学,建立一个作坊,开始只生产和修理大学用的仪器。同时他还开设了一个小店,出售机械和光学仪器。1847 年他开始生产显微镜。为提高显微镜的性能,蔡司深感自己的理论素养不够,乃多方寻求帮助。最后于 1866 年开始与阿贝进行合作。经过 10 年努力,原本小规模蔡司厂发展成为国际上有名的企业,阿贝也成了公司的合伙人。

光学正弦条件是在 1873 年由阿贝和亥姆霍兹各自独立发现的。阿贝检查了当时凭经验制造出来的显微镜之后,发现那些质量好的物镜,其工作位置都是符合正弦条件的。这样就揭示了制造优良物镜的秘密。1873 年阿贝从他的成像理论推导出了众所周知的关于显微镜分辨距离的公式。公式中的“数值孔径”这个名词也是由阿贝首先引用的。

在 17 世纪,胡克曾经注意到,当观察水中生物时,如果物镜的前透镜与水相接触,以致于在透镜和标本之间没有空气,则观察到的像特别清楚。1812 年,英国的布鲁斯特 (David Brewster, 1781—1868) 建议将显微镜前部分浸没在一种液体中。1850 年阿米奇利用这

个原理进行显微镜观察,发现浸没液体的折射率与透镜的折射率愈接近则效果愈好。后来阿贝对大约 300 种液体进行试验,发现香柏油(cedarwood oil)效果最好。下一步就是改进物镜设计,以与香柏油相适应。阿贝于 1878 年设计成功浸没物镜。这是阿贝对显微镜事业的重要贡献之一。

3 特种显微镜的发展

阿贝在 1878 年设计制成油浸显微镜之后,显微镜的分辨本领已达到其理论极限($0.2\mu\text{m}$),而且在照明系统和机械结构等方面这时都已达到合理的定型。因此一些书中将这一年记为“第一台现代光学显微镜”的诞生^[14]。但在阿贝的现代显微镜制成之后,光学显微镜并未停止发展。除了阿贝在 1886 年制成复消色差物镜和伯格霍尔德(Boegehold)于 1950 年设计成功平场复消色差物镜之外,在 20 世纪的前半个世纪里,光学显微镜有如下两个方面的发展。第一,为了观察生物标本的不同结构,提供多方面信息而设计成(或改良)一些特种显微镜,如暗场显微镜、偏光显微镜、荧光显微镜、离心显微镜等。这一类显微镜我们称之为第一类特种显微镜。第二,仅为工作上的方便而设计成的一些特种显微镜,如倒置显微镜、体视显微镜、袖珍显微镜等。这一类显微镜,我们称之为第二类特种显微镜。在 20 世纪后半半个世纪中,还将激光和电子技术引入光学显微镜中。

3.1 第一类特种显微镜

3.1.1 暗场显微镜

暗视场显微镜由来已久。韦纳姆(F. H. Wenham)于 1853 年制成了简单的暗场聚光器,西登托普夫(H. F. W. Siedentopf, 1872—1940)和齐格蒙第(R. A. Zsigmondy, 1865—1929)于 1903 年采用了从单向侧面照明的暗场观察方法。暗场显微镜的进一步发展是沿着改进照明器的方向前进的。1907 年,西登托普夫制成一次反射抛物面型聚光器。他于 1908 年又为蔡司厂设计出心形面聚光器(cardioid dark

field c.), 同年蔡司厂还制成同心球面聚光镜。这些都是暗场显微镜中优良的聚光镜。

3.1.2 紫外显微镜

此显微镜的最初发展动力是为了提高分辨本领。因为波长为 $0.275\mu\text{m}$ 的紫外光为可见光的平均波长 $0.55\mu\text{m}$ 的一半,故预期紫外显微镜的分辨能力将提高一倍。早在 1904 年柯勒(A. Köhler, 1866—1948)等就制成了紫外显微镜。它的分辨本领虽有所提高,但不能达到预期的 $0.1\mu\text{m}$ 。而且技术非常复杂,价格昂贵,故问世之后不久,紫外显微镜就被限制在特殊的研究中使用了。由于生物中的核酸物质在 $0.260\mu\text{m}$ 处有强烈的吸收峰而对可见光则是透明的,故卡斯帕森(T. Caspersson, 1936)^[15]自本世纪 30 年代以来即用此法使富含核酸的物质在细胞内得以定位,并在细胞分裂中加以研究。现在,紫外显微镜在核酸研究中已成为重要的研究工具了。1941 年布伦伯格(E. M. Brumberg)第一次描述了“紫外彩色转移显微术”(ultraviolet colour translating microscopy)。用此法可用紫外显微镜制成无色透明标本的彩色图像^[16]。

3.1.3 偏光显微镜

丹麦的巴托林(E. Bartholinus, 1625—1698)于 1669 年发现冰洲石的双折射现象。惠更斯于 1677 年用光的波动理论来解释此现象。马吕斯(E. Malus, 1775—1812)于 1810 年发现反射光的偏振现象。光的“偏振”(polarization)一词也由他引入。费涅耳(A. J. Fresnel, 1788—1827)于 1821 年用光是横波的理论来阐明“偏振光的干涉”。而这种干涉正是在偏光显微镜中所看到的基本现象。1828 年英国人尼科耳(W. Nicol, 1768—1851)用方解石制成了尼科耳棱镜。这是大约一个世纪中产生和检验偏振光的主要偏光元件。1834 年 C. 薛瓦利埃制成的消色差显微镜中已附有偏光元件(polarizers)。1865 年英人柯林斯(C. Collins)根据哈利(G. Harley)博士的设计制成哈利型显微镜,其中附有尼科耳棱镜,可作为偏光显微镜使用。1928 年,兰德(E. H. Land, 1909—

1968)发明了偏振片(polaroid)之后,现今绝大多数偏光显微镜中已用偏振片代替尼科耳棱镜了。

3.1.4 荧光显微镜

1575年,西班牙的内科医生和植物学家莫纳德斯(N. Monardes)第一次记录了荧光现象^[7]。17世纪,英国化学家波义耳及物理学家牛顿都曾观察到荧光现象。1852年,斯托克斯(G. G. Stokes, 1819—1903)在考察奎宁和叶绿素的荧光时,发现荧光的波长大于激发光的波长(斯托克斯定则)。荧光(fluorescence)这一术语也是他提出的。

1904年有人提出建立荧光显微镜的设想。1908年试制成功第一台荧光显微镜^[1]。它是用紫外光(或蓝紫光)照射含有荧光物质的标本,用显微镜观察标本的荧光像,从而阐明标本的荧光结构。1914年,有人用喹啉作染料处理纤毛虫以增加其荧光,开辟了荧光染色的道路。由此开辟了荧光显微术的广阔道路(如荧光免疫技术)。1938年,用含紫外光特别丰富的超高压汞灯为光源,为组织学、细胞学和微生物学等领域中的荧光染色方法奠定了基础。

3.1.5 相衬显微镜

一般显微镜之所以能看见样品中的细节,或者是由于标本中细节与周围背景对光的吸收程度不同,或者由于染过色而对光波有选择吸收。吸收会使光强减弱,即光波的振幅有变化,故此类物体叫做振幅物体(Amplitude object)。对于被检的活的生物组织通常无色透明,此时显微镜中标本上细节的像与背景没有明暗的差异(没有衬度),故不能被检出。如果标本中各部分的折射率(或厚度)不同,则光线经过标本时,各部分的透射光将产生光程差,因“光程”与“相位”成正比,因此透射光各部分之间有相位差。这类物体叫做“相位物体”(phase object)。因为人眼视觉不能看到相位的变化,故相位物体无法用一般的显微镜观察。1935—1936年间,荷兰物理学家塞尔尼克(Fritz Zernike, 1888—1966)发现了相衬法原理,并制成一种特殊装置(环状光阑和相板),用这些装置可使

相位差转变为光强差,使相位物体产生可见的影像。这就是相衬显微镜。蔡司厂于1936年生产出第一台相衬显微镜。塞尔尼克因此获得了1953年诺贝尔物理学奖。这是光学显微镜所获得的唯一的诺贝尔奖。由于刚发明相衬法之时,正值第二次世界大战之际,故直至1947年以后,相衬显微镜才广泛地应用于细菌学、生物学、医学等领域。1947年,Osterberk设计成功变偏光相衬显微镜(polaret)也叫变色相衬显微镜(variable colour phase microscope)。

3.1.6 干涉显微镜

干涉显微镜的名词是荷兰人西尔克斯(Sirks)于1893年提出的。萨亚尼克(G. Sagnac)在1911年描述了第一个双光束干涉显微镜。初期的工作是将干涉仪与显微镜结合起来使用。由于结合的方法不同,故干涉显微镜的种类也就各式各样。现今最广泛使用的是雅曼-列别杰夫型^[10]的干涉显微镜。这仪器是列别杰夫(A. A. Lebedef, 1893—1969)于1931年在雅曼(J. C. Jamin, 1818—1886)干涉折射计(1856)的基础上改制而成的。相衬显微镜出现之后,干涉显微镜更加蓬勃发展起来。1952年,诺玛斯基(G. Nomarski)发明了一种装置,现在叫做诺玛斯基装置。使用这一装置的仪器叫做诺玛斯基(微分)干涉(相衬)显微镜,或微分干涉相衬显微镜,简称DICM(differential interference Contrast microscope)。DICM不适宜于定量测定,但成像比相衬显微镜的清晰,且没有光轮(halo)出现。

3.1.7 离心显微镜

它是用来观察处于离心状态下的活机体的显微镜,是哈维(E. N. Harvey)和卢米斯(A. L. Loomis)在1930年发明的^[11]。

3.2 第二类特种显微镜

3.2.1 倒置显微镜

在细胞培养、组织培养和微生物研究中使用的倒置显微是史密斯(J. L. Smith)于1867

1) 五九一七五部队,荧光显微术,上海科学技术情报研究所(1976),1.

年制成的。

3.2.2 体视显微镜

法国的奥伯豪泽尔 (G. Oberhauser) 于 1840 年前后制成了解剖显微镜。许多厂商就加以仿制和改进。采用两个物镜和两个目镜的体视显微镜是蔡司厂在美国动物学家格里诺 (H.S. Greenough) 的激励下于 1896 年制成的, 现在许多书上称之为格里诺显微镜 (greenough microscope), 它实质上就是今天的小型体视显微镜。

3.2.3 袖珍显微镜

1665 年, Ginseppe Campani 做成了一个木制的小显微镜, 可视为袖珍显微镜的先驱。1776 年西森 (Jeremiah Sisson) 根据 Demainbray 的设计制成了袖珍显微镜。

参 考 文 献

- [1] S. Br., Encyc. Brit., Encyc. Brit. INC, 12(1980), 127.
- [2] L. N. 玛格纳著, 李难等译, 生命科学史, 华中工学院出版社, (1985), 213, 194, 214, 215, 229, 252, 266, 291, 294.
- [3] W. Bulloch, The History of Bacteriology, Dover Publications INC, (1938), 23.
- [4] 潘吉星主编, 李约瑟文集, 辽宁科学技术出版社, (1986), 533, 553, 536, 563, 550.
- [5] 王云五主编, 中山自然科学大辞典, (台)商务印书馆出版 ①生物学(李亮恭主编, 1974 年), 53; ②植物学(刘荣瑞主编, 1972 年), 8.
- [6] P. Gray(ed.), Encyc. of Microscope and Microtechnique. Van Nostrand Reinhold Co., (1973), 252, 253, 256, 258, 259, 257.
- [7] D. F. 霍恩著, 西北光学仪器厂译, 光学生产工艺, 科学出版社, (1984), 6, 82.
- [8] J. Vlk., Encyc. Brit., 15(1964), 435.
- [9] E. Grimsehl, et al, A Textbook of Physics, 4 (1933), 141.
- [10] L. N. 玛格纳著, 李难等译, 生命科学史, 华中工学院出版社, (1985), 289.
- [11] W. Burrells, Microscope Technique, Fountain Press, London, (1977), 7.
- [12] D. F. Horne, Optical Instruments and Their Applications, Adam Hilger, (1980), 16-18.
- [13] 德国蔡司厂著, 顾英译, 光学技术, No. 5(1987), 44.
- [14] Ю. А. 赫拉莫夫编著, 梁宝洪编译, 世界物理学家词典, 湖南教育出版社, (1988), 438, 428, 225, 381.
- [15] G. Oster et al (ed.), Physical Technique in Biological Research, Academic Press INC, III (1956), 402, 483.
- [16] J. Thewlis (editor-in-chief), Encyclopaedic Dictionary of Physics, Pergamon Press, 4(1961), 665.
- [17] 陈国珍等编著, 荧光分析法 (第二版), 科学出版社, (1990), 1.
- [18] 张鸿卿等主编, 细胞生物学实验方法与技术, 北京大学出版社, (1992), 11.
- [19] A. C. Giess, Cell Physiology, W. B. Saunders Company, (1979), 127.
- E. N. Harvey et al., Science, 72(1930), 42.
- E. N. Harvey, Science, 77(1932), 430

(上接第 448 页)

物质和运动不可分离, 反对经院哲学, 主张人们有怀疑宗教教义的自由, 因而被宗教裁判所判处死刑, 烧死在罗马百花广场。布鲁诺案件和教会为科学研究制定的道德准则都说明, 科学与宗教的合作是艰难的, 它们之间的斗争将会长期进行下去。

参 考 文 献

- [1] 伽利略蒙冤 360 年后获平反, 人民日报, 1992 年 11 月 2 日.
- [2] Paul Cardinal Poupard, Galileo Galilei: toward a resolution of 350 years of debate, Duquesne University Press, Pittsburgh, U. S.A., (1987), 197.
- [3] C.C. Gillispie, Dictionary of Scientific Biography, New York, Vol. 1, (1970), 587.
- [4] 伽利略, 关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话, 上海人民出版社, (1974), 2, 151.
- [5] 伽利略, 关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话, 上海人民出版社, (1974), 542.
- [6] 梁昆淼, 力学, 人民教育出版社, (1978), 149.
- [7] 罗马教廷为伽利略平反, 光明日报, 1992 年 11 月 2 日.