

光學儀器理論基礎

Д.Н.ДОБРОВИНСКИЙ 著

高 志 新 譯
趙 伊 君 校

中國人民解放軍軍事工程學院

一九五六年二月

原 序

本教材內所敘述的是光學儀器一般理論而不涉及其用途。在講述理論問題之前，先簡要地敘述了一下蘇聯光學儀器發展史。

由於很多光具組是目視光具組，需要與眼睛共同使用，所以本書按照同類書籍的慣例，對眼睛的基本特性也有專門一章來加以討論。

本書可能有很多缺點，因而歡迎讀者提出批評和建議，並致以謝意。

著 者

目 錄

第一章 蘇聯光學儀器發展史簡述

第二章 幾何光學基本定律

§ 1. 光學儀器理論和幾何光學	33
§ 2. 發光點與光線 光束	36
§ 3. 光的直線傳播和獨立傳播定律	38
§ 4. 光的折射和反射定律	39
§ 5. 全反射	44

第三章 最簡光具組

§ 6. 通過平面系統時光的折射 平面平行板	47
§ 7. 通過稜鏡在其主截面內的折射	51
§ 8. 平面鏡和平面鏡系統	55
§ 9. 球面鏡	59
§ 10. 反射稜鏡	64
§ 11. 例題	73

第四章 光束通過球面系統內球面時的折射

§ 12. 符號規則	83
§ 13. 通過一個球面時的折射 三角公式	84
§ 14. 細光束通過一個球面折射後所成的軸外物點的像	90
§ 15. 共軸球面系統	93
§ 16. 通過共軸球面系統近軸區的光路的計算 例題	96
§ 17. 子午面內光路的三角計算 計算表格	100

第五章 理想光具組理論

§ 18. 基本定義	107
------------	-----

§ 19. 主平面、焦點和焦距	111
§ 20. 像的形成 橫向放大率 牛頓公式	113
§ 21. 對於主點的線段的方程式	116
§ 22. 幾個光具組合成一個複雜光具組 光路的計算	118
§ 23. 角放大率和軸向放大率	122
§ 24. 一個折射球面（近軸區內）	128
§ 25. 透鏡	134
§ 26. 由幾個在空氣內透鏡所組成的光具組的屈光本領	141
§ 27. 根據角度和高度計算通過折射球面系統光路用表格 例題	145
§ 28. 例題	150

第六章 光具組內光束的限制

§ 29. 光具組的光闌的概念	165
§ 30. 孔徑光闌 光瞳	166
§ 31. 視場光闌 光窗	169
§ 32. 空間在平面內的像 像的比例 清晰深度	171
§ 33. 例題	178

第七章 實際光具組的像差

§ 34. 實際光具組像差的概念	183
§ 35. 光具組的球面像差	185
§ 36. 對於軸外點光具組的單色像差 像散和場曲	196
§ 37. 畸變	203
§ 38. 慧形像差 正弦條件	206
§ 39. 光具組的色差	209

第八章 光具組的光強度

§ 40. 概論	225
§ 41. 光度學的單位	228
§ 42. 光具組的光強度（普遍情況下）	233
§ 43. 沿着像平面的照度	238

§ 44. 光具組內光的損失	240
----------------------	-----

§ 45. 光學零件的透光	248
---------------------	-----

第九章 眼睛和視覺

§ 46. 概論	255
----------------	-----

§ 47. 眼睛的調節和會合	259
----------------------	-----

§ 48. 眼睛光學機構的缺陷及其分類與校正	261
------------------------------	-----

§ 49. 眼睛的感受性 適應	263
-----------------------	-----

§ 50. 分辨本領 (視覺敏銳度)	266
----------------------------	-----

§ 51. 視覺隨時間的發展	270
----------------------	-----

§ 52. 雙目視覺和單目視覺	271
-----------------------	-----

§ 53. 儀器與眼睛的共同作用 主觀放大率 放大鏡	277
----------------------------------	-----

第十章 望遠光具組理論

§ 54. 望遠光具組的基本性質	283
------------------------	-----

§ 55. 望遠光具組的光強度	289
-----------------------	-----

§ 56. 光具組的分辨本領	292
----------------------	-----

§ 57. 通過望遠光具組觀察時成像空間的清晰深度	294
---------------------------------	-----

§ 58. 開普勒望遠鏡	304
--------------------	-----

§ 59. 位於物鏡和目鏡共同焦平面上的集光鏡的作用	310
----------------------------------	-----

§ 60. 伽利略望遠鏡	314
--------------------	-----

§ 61. 地上望遠鏡	318
-------------------	-----

§ 62. 具有階躍可變放大率的望遠鏡	328
---------------------------	-----

§ 63. 具有連續可變放大率的望遠鏡	335
---------------------------	-----

第一章

蘇聯光學儀器發展史簡述

蘇聯光學儀器發展史可以分為兩個時期。

第一個時期是革命前的時期。這個時期的基本特點是俄國學者有許多研究和發明，保證了俄國科學在許多光學儀器製造理論和實際問題上取得權威地位。但是這些研究和發明却不曾得到廣泛的推廣，當時的科學家和技師都是單人匹馬地進行工作。

第二個時期是蘇維埃時期。這個時期的特點是科學在蘇聯獲得了真正的發展，科學受到了社會主義國家的廣泛支持，在蘇聯建立了強大的光學機械工業，光學儀器製造業空前地發展起來。

革命前俄國光學儀器主要依賴於國外進口。在蘇聯時期國內開始大量生產各種各樣的光學儀器，充份滿足了全國的需要。

在俄國，對光學予以廣泛的注意是從彼得時代開始。衆所週知：這個時代的特點是在經濟和軍事上加以深思謀劃，並進行了廣泛的改革。彼得一世懂得，要實施改革就必需有大量受過教育的人材；他更懂得，如果俄國科學不發展，則有變成文化發達國家附庸的危險。因而於1724年1月24日頒佈了關於建立科學院及其附屬大學和中學的命令。彼得早在科學院建立前，就確定了科學院的機構，規定「觀察藝術」，即光學，應和其他科學一樣，在科學院系統內佔據重要地位。

科學院於1725年成立，當時彼得一世已經逝世了。雖然由於他的逝世，使彼得所擬定的科學院組織計劃未能完全實現，但在科學院成立伊始，仍舊建立了光學研究所和光學工場。

這個光學工場存在了幾達一世紀，在俄國光學發展史上留下了不可磨滅的痕跡。工場的首任領導者是幹練的技師依萬·葉利塞耶維奇·別遼耶夫(Иван Елисеевич Беляев)。他是在彼得逝世後，葉卡得琳娜一世(Екатерина I)即位後轉到科學院光學工場的。因為葉卡得琳娜一世對於「工藝技術」不感興趣，封閉了別遼耶夫和考洛索夫(Колосов)所工作的皇家光學工場。別遼耶夫工場從建立初期起，便致力於製造各種光學器械：望遠鏡、顯微鏡、眼鏡、各種光學玻璃、反射鏡以及其他一切供物理學者實驗用的光學器械。И. Е. 別遼耶夫死後(1729年)，他的兒子依萬·依萬諾維奇·別遼耶夫(Иван Иванович Беляев)(1714—1784)繼續領導這個工場，他還吸收他的兄弟 А. И. 別遼耶夫也參加工場的工作。此後不久，科學院各部門的工場都統由當時俄國機械和工具製造最卓越的專家之一，彼得大帝的戰友及其遺志最忠實的執行者安得烈·康士坦丁諾維奇·那爾托夫(Андрей Константинович Нартов)(1694—1756)領導，這時科學院光學工場的設備便更加充實和完善了。此後工場所生產的儀器不僅供給科學院學者們需要，而且開始出售。

1769年，著名的發明家和機械學家依萬·彼得洛維奇·庫里賓(Иван Петрович Кулибин)(1735—1818)被聘請到科學院工場工作，他在科學院服務了三十多年。滿懷熱情的庫里賓把工場的工作提高了許多倍。在這段時期中，俄國技師們進行了歷史性的製造消色差顯微鏡的初次嘗試。科學院工場及其他稍晚所成立的各場以它們的工作，基本上完成了彼得一世所提出，在俄國發展光學技術的任務。此後巨大的任務，乃是深刻地研究光學理論。

在這個問題上也正如在光學的其他許多方面一樣，天才的俄國學者米哈依爾·瓦西里耶維奇·羅蒙諾索夫(Михаил Васильевич Ломоносов)有着無比偉大的功績。

爲了瞭解羅蒙諾索夫在俄國光學發展方面無比偉大的功績，必須瞭解他在全部自然科學發展上的作用，哪怕這種瞭解是一般的。羅蒙諾索夫是18世紀卓越的、學問淵博精於各方面的學者。根據別林斯基精闢的評價：他的天才體現了俄羅斯民族的偉大創造才能。他是俄國頭等的物理學家、化學家、天文學家、地理學家、地質學家、歷史學家和頭等的俄羅斯語言研究者。

偉大的俄國詩人普希金這樣描述羅蒙諾索夫：「羅蒙諾索夫將非凡的意志和非凡的理解力結合在一起，他把一切文明薈萃於一身。他的心靈充滿了澎湃的熱情，這熱情全部寄託在對科學的渴望和憧憬上。歷史學家、雄辯家、機械學家、化學家、礦物學家、藝術家和詩人；他嘗試了一切，他涉獵了一切…」（註）。

別林斯基也是這樣地讚譽羅蒙諾索夫：「在北冰洋的海濱上，羅蒙諾索夫像北極光一樣放射出輝光。這是多麼燦爛奪目、美麗繽紛的輝光！他以他自己證實了人類的萬能：人類可以適應任何自然條件，天才可以戰勝那與人爲敵的命運給人類所鋪設的任何障礙；最終他證實了俄羅斯人民能夠完成一切偉大而美好的事業。」（註）

謝爾蓋·依萬諾維奇·瓦維洛夫（Сергей Иванович Вавилов）院士指出：我們科學院只是通過了М.В.羅蒙諾索夫，才獲得了它的生命和意義。

附帶說一下：俄國科學之父和奠基者М.В.羅蒙諾索夫的一生活動，是在與一切反動勢力、閉關自守主義者、僧侶們和那意欲在彼得一世死後將科學院攫爲已有的德國官員們極尖銳的鬥爭中進行的。這是一場爭取俄國科學走上獨立與繁榮；爭取俄國科學保持特色；爭取俄國人民獲得文明的、激烈的也是正義的鬥爭。

（註）見「物理科學的成就（УФН）」XLI卷1期，3~4頁。

羅蒙諾索夫和那些阻礙俄國文明發展的僧侶們進行了頑強的搏鬥，捍衛着被僧侶們目為「邪說異端」的科學。他堅持不渝地呼籲說：「不許僧侶們干涉那些爲了幸福和文明而宣揚自然界真理的學者們，尤其是不許僧侶們在傳教中辱罵科學。」（註一）

羅蒙諾索夫認爲培養本國的科學人材是促進俄國科學走上繁榮的重要條件。他那充滿愛國心意的號召：「現在奮起吧！用你們的功績來證實俄羅斯的土地會培養出多少自己的、睿智的柏拉圖和涅夫頓（Невтон）吧！」是非常出色的。

羅蒙諾索夫科學創造活動的特色在於其獨立性，思想上超衆的勇敢，涉獵科學問題的廣度，解決科學問題的深刻、透澈，對於科學和當代實際任務的有機聯繫。

羅蒙諾索夫在他多方面的科學活動中，認爲光學和化學是分不開的，因而光學成爲他所喜好研究的科學中之一門，並且終生加以研究不已。羅蒙諾索夫在其給「瓦立非然實驗物理學（Вальфийнская экспериментальная физика）」第二版（1760年）的題詞中寫道：「我對於探究顏色的成因經常比對於其他一切物理研究都更感興趣，這特別是由於它跟我的首要本行化學有關的緣故。」（註二）

按年代算來，其第一部光學著作大概是1741年呈給彼得堡科學院題爲「關於反射光線引燃器的研究」的科學研究報告。在這篇研究報告中所敘述的儀器是由若干片將太陽光光束反射到一組透鏡上去的反射鏡組成，這組透鏡排列成圓形，其焦點均位在圓心處。羅蒙諾索夫所發明的這種會聚太陽光線的儀器，顯示出他在幾何光學方面充份的知識。

（註一）見「物理科學的成就」XLII卷1期，8頁。

（註二）見Б.Н.門舒特金（Б.Н.Меншуткин）著「М.В.羅蒙諾索夫的一生（Жизнеописание Михаила Васильевича Ломоносова）」第3版，147~148頁。

1752年，羅蒙諾索夫開始了關於眼鏡的著述。他對眼鏡的評價是以前俄國任何人所從未有過的。羅蒙諾索夫以詩歌形式寫給И.И. 舒瓦洛夫(И.И.ШуваЛОВ)的一封信可證明這點。在信中他敘述了眼鏡對於科學、技術、藝術和日常生活的重大作用。有一段這樣說：

「隨着我們生活歲月的增長，
眼睛愈來愈失掉光彩，黯然衰弱。

.....
「朦朧不靈的感覺，
再也體會不到自然界和藝術的美妙。
大哉，心的悲哀！
讀書的能力也消失殆。
寂寞啊，這漫長無盡的黑夜；
苦悶啊，這付身上的鏽鏽。
在這惱人的歲月裡，
憂鬱代替了歡笑。
在這痛苦中，
只有眼鏡才能令快樂重又回到我們的懷抱。
它妙手回春，
使我們重獲視覺。」

在結尾時說：

「我何必耗費整年的時光，
來搜求讚美眼睛的詞藻。
讚美的詞句已經足夠了。
我要開始我的工作，
用實踐來頌揚它的無上美妙。」

羅蒙諾索夫在研究玻璃美術工藝品所使用的顏料和在熔製玻璃，尤其是熔製色玻璃方面，進行了巨大的工作。在他的實驗日誌內記載了數千次玻璃熔製實驗的經過。他的實驗工場製出了非常出色用色玻璃拼鑲的肖像和圖畫，其中一幀「坡爾塔瓦

(Полтава)大會戰」現仍保存在列寧格勒科學院內。

1752年，羅蒙諾索夫發明並在工場製出了一種用來看出光線通過液體時折射的器械。

羅蒙諾索夫還發明了一種觀查黑暗中目標用的夜用望遠鏡。這個發明在他的光學工作中具有原則性的重要意義。按照他的定名叫作「光線會聚器」，用來在夜間分辨岩礁和海岸。1756年5月13日，科學院的會議上曾討論了羅蒙諾索夫的發明。夜用望遠鏡長2呎3吋(約700公厘)，物鏡比目鏡大很多。根據現存資料看來，這個夜用望遠鏡的原理在於通過它觀查物體時，比用普通白晝用望遠鏡時的視角增大許多，從而大大地提高了眼睛的分辨本領，因而能夠使人們在夜間觀察目標。

在這次會議的記錄中寫道：「羅蒙諾索夫示出了光線會聚器(按照他自己的叫法)，該器由科學院工場製成。此器為一長約2呎3~4吋的筒狀物。有一小鏡片(目鏡)和一用來聚光的大鏡片(物鏡)。此器製造的目的是供在夜間分辨岩礁和船舶用。由全部實驗看到，用此器分辨暗室內的被觀查目標比不用此器時要清晰得多。但這只是在近距離上所得到的結果，用在海上遠距離時其結果如何尚不能確定。不過羅蒙諾索夫認為他可以保證此器在海上無疑也是適用的。」

羅蒙諾索夫的創造在科學院中引起了爭論，這個爭論繼續了三年之久。反對者有格里紹夫(Гришов)、波波夫(Попов)、魯莫夫斯基(Румовский)，而特別是艾比努斯(Эпинус)。他們主要的反對意見是認為羅蒙諾索夫似乎有些自不量力，硬要放大夜間像的亮度；另一種反對意見是認為用普通的天文望遠鏡也能獲得同樣結果。

我們在這裏不來闡述這個爭論的科學內容，僅僅指出一點，就是用現代觀點看來，羅蒙諾索夫的正確性是毋庸置疑的。現在大家都知道：在夜間低照度的條件下觀察時，放大暗的發光體的像，就相當於增加眼睛的分辨本領，由此便可瞭解此鏡的放大作用

了。羅蒙諾索夫的偉大功績就在於他以實驗確定了望遠鏡的放大率對夜間觀查的巨大意義。

羅蒙諾索夫的另一項判斷，即不是任何望遠鏡都能充作夜用望遠鏡也是正確的。夜用望遠鏡應當具有高度的透光性、大的入射光瞳和與夜間眼睛瞳孔差不多大小的出射光瞳。此外，如果這種望遠鏡僅只在夜間使用，則無需高度地校正球面像差和色差。

夜用望遠鏡竟遭受到某些科學院院士的反對，使羅蒙諾索夫很苦惱，但這却不曾影響他創造新的光學儀器的努力。不久他又發明了一種光學河底海底觀察器，使用它可較一般觀察時深許多倍。因為可靠的材料沒有保存下來，所以現在只能猜測它大概是個在物鏡前很遠處裝有一片平面護鏡的望遠鏡。將此鏡插入水中時，可以除掉水面波浪所生的畸變影響，因而有利於向海底觀察。

羅蒙諾索夫大約發明了十幾種具有原則性意義的光學儀器。其中有航海儀器、反射望遠鏡、水平觀察鏡（一種可以圍繞自己的軸旋迴，以觀察水平面上情況的潛望鏡）和測量天體亮度的光度計等。

羅蒙諾索夫對光的性質和顏色的理論也很感興趣。他在1753年向科學院提出了一項他的實驗意圖：在真空中使弦振動，以檢驗與弦的振動同時是否有光發出。顯然這個實驗的結果是否定的，因為弦的機械振動和形成光源的振動比起來是太慢了。但是把光的性質與振動（波動）過程聯繫起來這一意圖是非常具有啓發性的。羅蒙諾索夫反對牛頓光的微粒說而擁護光的波動說。1756年7月1日，在科學院隆重的公開會議上，羅蒙諾索夫發表了一篇「論光的產生並由此提供顏色的新理論」。其中說：充滿全部空間的以太有三種可能的運動形式，即直線運動、圓週運動和波動運動。羅蒙諾索夫認為直線運動與牛頓的微粒說是同一種看法，這是為他所反對的；而圓週運動又是熱的起源；所以他認為只有波動運動才是光的成因。他的論文結論說：「直線運動之不

可能已獲證明。圓週運動是火與熱的起因，爲了使地上的物體生熱，以太必須進行圓週運動。既然以太不可能進行直線運動，而圓週運動又是沒有光的熱的起因，那麼就只剩下以太的第三種運動形式——波動運動了。也正是這種運動形成了光的起因。」（註）

彼得堡科學院院士朗那得·歐拉（Леонард Эйлер）（1707—1783）對光的性質和光學器械理論的研究也極爲注意。他的科學遺著中包括有60多種光學研究記錄和一部共分三卷的著作「屈光學（Диоптрика）」。

歐拉關於光的性質的觀點，早在其學位論文「論火的本質和性質（Диссертации об огне, его природе и свойствах）」中即已形成。他認爲：「火焰不斷地振擊着以太。這種振擊使特殊的彈性以太產生振動，而沿直線連續地傳播到四面八方。這種以太的振動就這樣成爲光線，正像空氣內的聲線一樣。」歐拉在其1746年所發表的題爲「光 and 色的新理論（Новая теория света и цветов）」關於光的性質的論文中，曾對牛頓光的微粒說予以尖銳的批判。在其共分三卷的著作「屈光學」中，對光學器械理論曾加以研究。「屈光學」一書自1769年印刷到1771年，書中完滿地闡述了理論光學和應用光學的問題，並以大量篇幅介紹了歐拉個人的研究成果，對自己四十年來的光學研究作了總結。

透鏡的消色差概念是歐拉在1747年首先形成的。這件歷史事實之所以值得提出，不僅是因爲消色差對計算和設計光學儀器具有重大意義，而且也是因爲在19和20世紀的歐洲書刊中，把消色差光具組的發明歸功於英國人多倫得（Dollond）之故。從牛頓時代起，人們就認爲不同介質內光的色散完全一樣，所以利用組合不同的介質來消除光具組，例如物鏡等的色差是不可能的。然而馳名大作「光學（Optics）」的著者——牛頓的結論却是錯誤。

（註）見 Б.Н. 門舒特金著「М.В. 羅蒙諾索夫的一生」第3版，

的。大家知道，牛頓的消色差效應實驗沒有成功。他用浸液透鏡進行實驗，即在兩片相連接的彎月形透鏡間注滿水，這樣得出兩種彼此相異的介質。這個實驗之所以得出否定的結果，是因為牛頓襲用了當時慣例，在水中加入醋酸鉛，結果使醋酸鉛的水溶液和玻璃的色散相同之故。大家知道，牛頓的權威地位是如此之高，所以在歐拉以前人們都把牛頓的透鏡消色差不可能說奉為天經地義。

而歐拉就在這個問題上反對牛頓。他寫道：「用組合透明物質的方法是可以消除色差的。但是無論在理論上和實驗中都尚未達到完善地步，以致在事實上消色差尚未獲得成功……譬如眼睛，就沒有任何像差。這是由於眼睛具有很多種透明物質之故。」

雖然歐拉關於眼睛消色差的論斷是錯誤的，因為大家知道，眼睛的色差相當大，但用組合不同色散的介質來消色差這一思想却是正確的。歐拉以實驗證明了這一點。他也應用注滿不同液體的彎月形透鏡所組成的浸液透鏡作實驗。但是因為用浸液透鏡來消除光具組的色差頗不適於實用，所以只有在發明出熔製不同色散的光學玻璃後，才獲得了製造消色差儀器的基礎。

許多人把消色差觀念的建立歸功於多倫得，但是實際上多倫得對歐拉的提議却是抱着敵意的，只是後來纔不得不讓步。歐拉就此事曾這樣寫過：「我們的意見很快就受到已故的多倫得方面的猛烈攻擊，多倫得一直認為偉大牛頓的證明是如此之正確，認為它根本不會是錯誤的。他為了鞏固自己的見解，曾作過各種透明材料，尤其是各種玻璃的折射實驗。這些實驗却完全證實了我們的意見，於是多倫得乃不得不承認自己的錯誤。沒有疑問，正因這個重要發現才促使這位幹練的大師滿懷熱忱地從事於簡單透鏡的改進工作。」

1762年，彼得堡科學院舉行了懸賞競賽，題目是：「試用組合幾片透鏡的方法，消除或減少由於光線不同的折射及由於使用圓形鏡片而引起的像差，然後將理論與實驗予以印證」。歐拉參加

競賽的著作獲得了獎賞。競賽的問題不僅關係到由於光線不同折射而引起的像差（即色差），而且還關係到由於使用圓形鏡片而引起的像差（即球面像差）。這引起了人們的注意。

由上可見，二百年前光學在俄國就達到了光輝繁榮的地步。但很遺憾，這種繁榮並未能對光學在19世紀俄國農奴制度下進一步發展起什麼影響。

19世紀上半期的光學著作中，俄國物理學家瓦西里·符拉基米羅維奇·彼得洛夫（Василий Владимирович Петров）院士（1761—1834）關於發光的卓越著作、奧列斯特·依萬諾維奇·馬拉費也夫（Орест Иванович Малафеев）關於器械光學的卓越著作都是非常出色的。

В. В. 彼得洛夫院士對電學的研究是他的各種研究工作中最爲著名的。可能由於這個緣故，他關於發光的著作多年來未被人所知曉。但他立足於精確實驗基礎上的、關於各種物質發光的研究，直到今天仍值得被人們加以注意。

О. И. 馬拉費也夫是俄國卓越的器械光學方面的匠師，他曾設計出30幾種在當時爲完全新式的光學儀器。其中主要有反射望遠鏡和帶有轉像系統的望遠鏡。後者當時格外爲人所賞識，因爲它消除了18世紀望遠鏡的兩個主要缺點：由於放大率高而使鏡筒過長及所成的爲倒像。О. И. 馬拉費也夫在1827年創製出了這種獨特的、帶有稜鏡轉像系統的短筒正像望遠鏡（即地上望遠鏡）。過了21年以後，到1848年，意大利光學家保羅（Porro）才造出這種系統。但現在這種系統却冠以保羅二字，他實在是太不配了。每一個用過稜鏡雙目望遠鏡的人，都知道這種轉像系統是多麼有意義。

俄國著名數學家尼古拉·依萬諾維奇·樓巴切夫斯基（Николай Иванович Лобачевский）（1792—1856）在1842年所提出的對光的性質的見解也是很有功績的。他的見解中最卓越的一點就是結合了微粒說和波動說，建立了頗近於近代關於光的概