

色度学与彩色电视

〔德〕海因维希·朗格著

中国电影出版社



SEDUXUE·YU·CAISEDIANSHI

73-46242
435

色度学与彩色电视

〔西德〕海因维希·朗格 著

张永辉 王宽相

译

邱成忠 徐淑敏

吴 贤 伦 校



中国电影出版社

1985 北京

8610691

Heinweg Lang
Farbmetrik und Farbfernsehen

R. Oldenbourg Verlag München Wien

1978

DH 87/32

内 容 说 明

本书主要是为电视技术工程师编写的一本全面、系统论述色度学的专业书籍。作者从物理学、心理学和生理学诸方面分析了色度学的主要任务、各方面的研究成果及其在彩色电视技术中的应用。该书的编排特点是将色度学的理论问题与彩色电视中的技术问题分编阐述，以便满足读者的不同要求。

除电视技术人员外，本书还可供电影、照明、录象等有关专业人员阅读、参考。

责任编辑：巩 智

封面设计：颜 黎

色度学与彩色电视

〔西德〕海因维希·朗格 著

张永辉 王宽相 译
邱成忠 徐淑敏

中国电影出版社出版

北京展望印刷厂印刷 新华书店发行

开本：850×1168毫米 1/32 印张：16 $\frac{1}{2}$ 插页：2 字数：310,000

1985年9月第1版北京第1次印刷 印数：1—10,000册

统一书号：15061·206 定价：3.90元

译 者 序

本书作者——海因维希·朗格(Heinwig Lang)工学博士是西德罗伯特·博施有限公司电视设备部的专家。作者根据多年研究彩色电视色度学问题的实践经验,编写成这本密切结合彩色电视来论述色度学的著作。除了直接阐述色度学在电视和电影技术中的应用以外,本书还以很大篇幅专门探讨彩色视觉、彩色照明等问题,广泛涉及电视、电影、辐射物理学、光度学、生理学、心理学、照明技术等门学科。该书在阐述方式上有独特之处;材料丰富,概念清楚,论证严谨,深入浅出;章节安排上也别具一格,可供多方面的读者选择阅读。

本书的主要对象,是从事彩色电视科研、生产和维护工作的工程技术人员,电视台、电影制片厂以及其他有关专业人员;但也可供大专院校有关专业的师生、从事彩色视觉心理和生理研究的专业人员参考。

在翻译过程中,译者力求行文准确流畅,并且纠正了原书的几十处差误,除少数重大改动酌加译注外,其他则未予注明。由于译、校者才识有限,译文差误在所难免,欢迎读者批评指出。

译文尽可能采用国内的标准术语和通用术语,但由于各部门、各学科对同一事物多种称谓的现象由来已久,故本译文主要以广播电视、电影部门通用习惯术语为据。其次,鉴于我国习用术语多自英语国家引入,因而有些术语未按德文直译。对部分译名的取舍,还酌加了译注。

电影和电视两门技术已有互相渗透融合的趋势，我国的电影事业和广播电视事业更有共同前进的必要。希望这本书能对此起些推动作用，感谢中国电影出版社为译、校者提供略尽微薄之力的机会。

译 者

1981年8月

前 言

彩色电视技术已成为综合大学和工科高等学校通信技术专业的必修课程，现已有了一大批这方面的德文著作。但是，只有先了解了光辐射的物理性能和随之产生的彩色感觉之间的关系后，人们才能弄懂彩色电视重现系统的作用方式。阐明这种关系即是色度学的任务。在彩色电视实践中，当摄象时，尤其是在完善及评价彩色电视系统的彩色重现时，会提出唯有色度学才能解答的问题。并且，只有具备确切的视觉特性知识(如察觉彩色和亮度差异的能力)，才能深入地理解彩色电视信号的编码技术。所以，人眼视觉的这些特性同样也是色度学的研究任务。

假若电视技术人员要想了解色度学，或者至少了解对他来说是特别重要的那部分内容，那么他将感到现有的条件是相当差的。有关色度学的教程和文献一向甚少。在彩色电视技术教科书中色度学问题仅占很少篇幅。物理教科书虽然讨论物理光学，但是并不讨论色度学，只有一本书例外，即贝格曼-舍费尔(Bergmann-Schäfer)著的《实验物理学教科书》(1974年版)。有关色度学的入门专论截至前不久仍旧不多。假若人们不想去学习英语的色度学文献的话，那么就只能从有关标准(首先是德国工业标准 DIN 5033《彩色测量》)中得到必要的知识。这类标准事实上很长时间以来起着教科书的作用，原因是其中一些旧日的恰当陈述有一部分是确切的，但是所用术语已经过时了。自从M·里希特(Richter)著的《色度学入门》(1976年版)一书问世以来，至少有

了一部介绍有关色度学的最重要范畴的著作。但是,该书把彩色电视技术只作为色度学的应用范围之一来叙述。

著者从事彩色电视技术色度学问题的研究约有十年的经历,深知许多工程师对这一领域抱有极大兴趣。因此,一部关于色度学的著作,尤其是一部讨论色度学在彩色电视技术中应用的专著,肯定不会是多余的。著者希望,这样一本书对于不从事彩色电视技术工作的人来说也将有所裨益。一方面,本书可以作为色度学的入门读物,正因为如此,著者确信,本书密切结合彩色电视的好处就在于,这可使色度学的基本原理显得十分直观;另一方面,对于当今非常重要的各种彩色重现方法,可以通过本书概览一下它们的可能性、实施界限和存在的问题。

著者曾经同一些同行、各家电视机构和慕尼黑广播技术研究所(IRT)的工程师们,以及同彩色专业标准委员会(FNF)和电影技术专业标准委员会(FAKI)下设的各分委员会的工程师们,进行了卓有成效的合作和多次令人激动的讨论,不然本书是难以写就的。豪斯德费尔(Hausdörfer)博士、珀奇(Poetsch)先生、拉沙特(Laschat)先生和诺伊豪斯(Neuhaus)先生等几位同行审阅过个别编章的手稿。对于这些辛勤劳动和许多有益的指教,谨在此表示感谢。特别要感谢绘制了本书全部插图的比肯迈尔(Birkenmeyer)女士。著者就职的罗伯特·博施(Robert Bosch)有限公司电视设备部从一开始就对写书计划表示支持。对此以及对R·奥尔登堡(Oldenbourg)出版社将本书列入出版计划,均深表谢意。

海因维希·朗格
(Heinwig Lang)

1977年12月

导 言

色度学和通信技术

彩色电视技术是通信技术的一个分支。黑白电视仅传送二维亮度分布，而彩色电视技术则必须解决二维彩色分布的传输问题。为此，需要拥有一支能够重现各种彩色的显象管。假定我们要重现柠檬在日光照射下的黄色，那么摄象管就须具有“识别”来自柠檬的光线为黄色的能力。这就是说，它必须刚好记录下该光线的特征，即能在人眼中引起与柠檬表面同一黄色感觉的那类光线的特征。这类特征被编码成电信号传送到电视接收机，并用来使其荧光屏上产生的光线看起来与柠檬表面发出的光线相同。

人们把能引起彩色感觉的光线称做彩色刺激。在技术上重现一种彩色的关键在于：a) 没有必要非在显象管上重现出同一的彩色刺激，而只要看起来一样即可；b) 无需了解何种彩色刺激引起何种彩色感觉，而只需知道哪些彩色刺激能引起同样的彩色感觉。

因此，实现彩色重现系统的一个重要的前提条件，是要弄清楚看起来相同的彩色刺激之间共同的特征，并能将彩色刺激分为看起来相同的若干组(沙伊布纳，1969年)。

这种分组工作就是色度学最主要的任务之一。解决这个问题的重要前提在于确认下述事实：混合三种给定彩色刺激，原则上可以产生与任何一种彩色刺激看起来相同的效果。这一点对彩色

重现具有重要意义，因为仅仅通过三种彩色刺激的微量混合，即可取代我们周围世界里可能存在的各种各样的彩色刺激。

以电子方法重现彩色的具体任务是：

1. 在摄像机中将看起来相同的彩色刺激分别归之于一组；
2. 以电信号的形式将各组彩色刺激的特征传送到电视接收机；
3. 用这些信号控制电视接收机，使之重现出有关各组的彩色刺激。

将彩色刺激分组、确定各组的特征以及通过所谓加色法重现这些组所代表的彩色刺激，均为“初等”色度学所要研究的对象。我们将在第一到第三章叙述它的梗概。

为了解决上述课题，色度学不能只局限于从物理学上说的彩色刺激，而必须同时深入探讨其心理学方面——彩色感觉。此外，从生理学上认识人眼的功能，可以说对于色度学具有重大的意义。因此，色度学在自然科学与技术学科中的归属问题是件难办的事。在德国大学里，主要由光学技术研究所从事该领域的科研教学工作，再有就是医学院校，他们主要研究彩色视觉的生理方面。深入研究彩色量度技术问题的中心是设在柏林的联邦材料测试中心(BAM)色度学专业小组。色度学对于涉及广义的彩色重现的各个技术领域，诸如颜料化学、彩色摄影、套色印刷以及彩色电视技术等，都具有特殊的重要性。

色度学和彩色电视

就基本原理而言，我们的彩色电视制式是美国大约在二十五年前根据黑白电视制式发展而来的，而黑白电视技术在当时已经有三十年的历史了。历时如此之久方在荧光屏上重现出彩色电视图象的原因，恐怕不在于必须首先研究色度学的上述基本原理问题。胡果·格拉斯曼于1853年就阐述了解决这些问题的三条定律，其中第一条是，对每种给定的彩色刺激来说均可仅由三基色

刺激混合而模拟出看起来相同的彩色刺激。因此更确切地说，问题在于工艺方面，即必须把彩色电视摄象机所需的三部黑白摄象机合三为一，必须把彩色电视荧光屏所需的三个单色荧光屏合三为一，以及必须传输每个象素的三个信息而不是仅仅传输一个亮度信息，并且信号所取的形式要使播出彩色节目时，黑白电视接收机也能同时收看到黑白图象。

这些技术问题不属于本书的范围，它们在许多彩色电视技术论著中均有阐述。

本书准备首先讨论使彩色电视重现技术得以实现的色度学基础，然后阐述从演播室里景物的摄象到其重现在荧光屏上所出现的色度学问题。这些问题涉及彩色电视摄象的照明问题及其对被摄物体彩色的影响，摄象机内的分光与光电转换，以及电信号的处理、编码与解码。目前，彩色重现的计值问题距离彻底解决还差得很远；尚未解决的问题有，什么是“正确彩色重现”的确切定义以及对这种正确彩色重现的偏离如何进行测定和计值。其余的色度学问题则是彩色影片给彩色电视技术所造成的问题。最后，在论述我们的视觉器官处理刺激的生理过程时，将阐述色度学和彩色重现的普遍规律，同时还要论及生理过程与彩色电视信号处理过程之间令人惊异的相似性。

色度学术语

如同其他科学领域的术语一样，色度学的部分概念虽然来自口语词汇，但却通过尽可能严格的、不致引起误解的定义限制了它们的应用范围。“彩色”一词就是如此。这个词在口语中既表示彩色感觉(如“柠檬在日光下呈现黄色”)，又表示一种染料或颜料(如“一管黄色油画颜料”)。在色度学中，“彩色”仅仅表示彩色感觉，即感官知觉。倘若人们问及彩色这一概念的严格的科学定义，可在 DIN 5033 中找到如下的提法：彩色被视为“一种通过眼睛传导的感官印象，即一种视觉”。这种视觉的含义为：

“彩色是人眼对视野内均匀地呈现的那一部分的视觉，当用单眼凝视时，这一部分能与同时所看到的也属均匀的毗邻区域截然地区分开。”

这句话乍读起来肯定不好理解，但是读完第二章后，读者就会立即明白了。因此，我们在此仅提及两个重点问题。

第一点涉及眼睛的基本作用——这已在上述定义中说明，它并且表明了整个色度学的特点。这就是由眼睛来判断视野的两部分是否具有同样颜色，而两部分可能发出全然不同的彩色刺激。

眼睛这种决定性作用的后果是，色度学量度系统根本不能归诸物理量度系统。色度学的基本概念也很少由物理概念推导而来。这会使受过自然科学教育的人在初次接触色度学时，由于本身经验而发生某些困难。当他听到诸如“基色系数”、“色度”、“基色量”或“三色光谱响应值”等概念时，会试图询问这些名词所包含的物理量是多少——就象接触能用瓦计量的辐射流，能用毫微米计量的波长时那样。利用这些物理概念虽然可以说明彩色刺激，即落入眼帘的辐射，但不能说明彩色感觉的效果。为此，必须先引入一系列与辐射物理学无关的新概念（第一章和第二章），它们与辐射物理学的关系留到第三章中再来研究。

即使现在可用物理仪器来进行色度学的例行测量，而无需借助眼睛，色度学的基本概念仍然与物理学无关。虽然用三色光谱响应曲线（第三章）可以从测量技术和计算上掌握一个彩色刺激的彩色坐标，该曲线可模拟眼睛对辐射的计值，但是该过程决不可能逆转，即不可能从彩色坐标确定自然界的辐射分布。

我们要指出的与“彩色”一词定义有关的第二点将涉及这样的情况：按此定义，即使是白色、灰色或黑色区域也必须说成是一种彩色。这与彩色一词在口语中的用法有些不一致。平时人们往往只把具有色调的视觉称为“彩色的”，例如：带红色的、带绿色的、带黄色的等等。色度学中则与之不同，把具有色调的称为“五彩”颜色，把白色、灰色和黑色称为“非五彩”颜色。因此，色

度学中的五彩并非指口语中常说的彩色或多色，而是指非五彩的对应面。

基于这一理由，有几位色度学家喜欢用“五彩电视”一词，而不用彩色电视（并且相应地使用五彩摄影、五彩印刷等名词，例如M·里希特 1976 年的著作），因为它与黑白电视的区别在于能传输五彩颜色。但是，彩色电视这一概念已经在口语中约定俗成，因此不可能再用另外一个术语来取而代之。

为此，著者并不力求以“较为恰当”的概念来替换口语中以及专业上约定俗成的概念，即使著者认为原有术语并不特别合适的那些地方也保留不动。在有疑问的情况下，则常以德国工业标准术语为准。然而在彩色电视技术中有些地方情况特殊，已混杂了与色度学中意义相偏离的一些术语。

一个典型的例子是色度信号(Farbartsignal)一词，它在彩色电视技术的各种论著中都是表示副载波色差信号(Chrominanzsignal)，以便与英语中的 chrominancesignal 一词对应。然而德语术语色度(Farbart)对应于英语 chromaticity 一词，英语中与 chromaticity 意义不同的 chrominance 一词在德语固有词汇中没有相应的名词。在这种情况下，德语中用外来语 Chrominanz 和 Chrominanzsignal 两名词肯定比用易于引起误解的所谓 Farbartsignal 来得恰当（第十八章）。

最后，著者还想谈谈“彩色混合”这个重要术语，它在讨论彩色和彩色重现时都起着重要作用。人们大多把它理解成颜料的混合，并由此想到画箱，例如混合黄、蓝两色水彩即可得到绿色。通过颜料的组合产生新的颜色，虽然是彩色重现工艺的重要基础（如套色印刷和彩色摄影，见第二十二章），但是从物理学和色度学上描述这个过程却十分复杂。与此不同，色度学是以“加色法”为基础的，这是彩色刺激的组合，亦即与颜料之混合严格区分的彩色光辐射的组合（第一章）。在彩色电视荧光屏上，以三基色合成其余各种彩色时运用的就是这种加色法。因此，彩色电视系

统极为适合用来生动地说明色度学的基本原理。

本书结构

色度学建立在加色法的原理之上和彩色电视系统是一种加色法重现系统这两个事实,可使人们直接在彩色电视荧光屏上了解色度学的基本原理,而荧光屏是外行人也都十分熟悉的一种设备。著者试图在本书的结构中考虑到这种教学法的长处。

第一章中讨论彩色电视荧光屏上的加色法。第二章叙述两种彩色刺激在何种条件下进行比较时,才能判定它们是否显得相同。第三章要确定彩色刺激怎样才属于看起来相同的同一类这一物理学特征,就此解决了第二章所述的彩色重现的主要问题。

第二编论述为在显象端获得彩色电视图象而在摄象端所需的专用技术手段。首先是谈光电接收器(第四章)。为保证准确的彩色重现,光电接收器必须满足很特殊的光谱条件(第五章)。这种光谱条件可借助于分光器来达到(第六章)。彩色电视飞点扫描器和彩色电视摄象机的信号产生是靠上述组件的协同工作,这也就是本编末两章所要讨论的内容。叙述时,著者注意到尽量不重复其他彩色电视技术论著中已阐明的問題。本书的安排是基本上只讲到信号产生的光电变换为止,至于摄象管到显象管之间的信号处理,则只述及一些与彩色重现直接有关的方面。

第三编为色度学领域的梗概,它虽与信号产生并无直接关系,但在摄取与重现彩色时均起着重要作用。为此,在第九章中介绍了表明彩色多样性的矢量空间,从而解决了同荧光屏彩色系统的紧密联系问题。第十章论述了超出初等色度学范畴的亮度概念,这是第十一章中叙述标准基色量系统所需要的。在讨论了光源(第十二章)与非自发光表面彩色亦即所谓物体色(第十三章)之间的关系后,在第十四章中叙述高等色度学的几个问题,即关于彩色差别计值以及关于彩色电视系统彩色重现性能的定量特征的前提等问题。

第四编叙述人眼的辨色功能。本编是论述色度学时所必不可少的，因为要搞清其基本原理必须明白视觉的生理过程，即落入眼睛的光辐射如何转换为神经兴奋，继而由视神经传导到大脑的过程。

此外，最近研究彩色视觉生理时发现，人眼对刺激的处理与彩色电视系统中信号的产生和处理之间有着惊人的相似性（第十六章和第十七章）。著者认为，从事彩色重现工作的技术人员对这些基本上来自近二十年内的研究成果会极感兴趣，因而有详加叙述的必要。但是，著者同时也意识到本人在这方面不能胜任，倘若行家认为有些地方太片面或过分简单，那就得请读者原谅了。

最后一编论述彩色电视技术中几个特殊的色度学问题。第十八章给出编码原理的色度学解释。该章特别加以说明的是前面所提到的与彩色视觉生理现象相似的相似性。第十九章和第二十章论述摄象机的特殊类型。虽然单管摄象机（第二十章）的图象质量很受限制，但就某些用途来说，人们对它越来越感兴趣了。第二十一章阐述彩色电视传输系统的彩色重现性能的测量。最后两章论述彩色影片在彩色电视技术中的作用，以及由减色法与加色法彩色重现系统相串接而引起的色度学问题。

从本书结构可知，本书主要为电视技术工程师而编写。根据著者的经验，这样地说明彩色电视的色度学问题，比起更多地从电子技术和传输技术着眼作说明而将色度学问题作为补充的叙述方法看来要好，后一种叙述法给色度学所留的篇幅太少。鉴于这种原因，著者特别注意讲清色度学和光度学的基本概念。本书末附有该书所用的符号索引。与本书的导引性特点相一致，在文献索引①中优先收录了有关领域的综述性著作，当然首先是德文文献。在本书行文中直接引用了其研究结果的那些著作均列在索引中。

① 由于排版原因，该索引未附。——编者

仅对色度学感兴趣、而不对它在彩色电视技术中的应用感兴趣的读者，可在读完第一编或加上第二编第四、五章后，直接转入第三编及随后的第四编。诚然，由于本书着重于彩色电视技术，因此对色度学的某些方面未予论述，例如各种彩色系统——奥斯特瓦尔德 (Ostwald) 彩色系统、孟塞尔 (Munsell) 彩色系统和 DIN 6164 彩色系统。

另外，熟悉色度学的人想要了解它在彩色电视技术中的应用的话，主要可到第二编和第五编中去寻求知识。不过，第一编中色度学基本概念的介绍方法与众不同，这也许会引起这些读者的兴趣。

彩色学简史

本书篇幅有限，不能详述彩色学历史。这是一部充满了引人入胜的故事的发展史，其间进行过激烈的争论，涌现了许多专家，内中多数在其他科学领域也有建树。从某种意义上说，这一发展史是在物理学、化学、医学、心理学和艺术之间的一个空白科学领域中进行的演变。若将彩色学史料压缩到最近限度，则应提及几个人的名字。

彩色学是同几位大物理学家的名字紧密相连的。在这方面，第一位应该提到的是伊萨克·牛顿 (1642~1727)，他在 1704 年发表的光学著作中系统地阐述了关于光谱颜色的实验。任何一本物理学教科书中都叙述了牛顿用玻璃棱镜和一束分选出的阳光所做的三项实验：第一是将白光分解为光谱；第二是用第二个棱镜证明了各单一谱色无法再行分解；第三是借助一片透镜可将全体谱色重新合成未被分解为光谱的那种白光（加色法）。不过，这些教科书均未提及牛顿所叙述的另一项关于色度学而不是关于物理学的同样重要的实验，那就是牛顿用黄谱色和红谱色混合出一种橙色，它与光谱中的橙色外观一样。由人眼观看时，与两种谱色混合起来的颜色无法区别的第三种谱色，位于光谱中前两种谱色

之间。牛顿由此指出，根据一种彩色感觉（例如色调）无法推知该光线的光谱组成。这一色度学上的基本概念至今仍未成为受过自然科学教育的隔行业人们的普遍知识。

在牛顿把光作为微粒辐射来探讨的时候，托马斯·杨(1773~1829)促使光的波动理论取得了突破，该理论按数量顺序区分光谱中的各单色辐射。然而，他对彩色学的最重要的贡献（就目前所知，他并非是第一个）在于提出了下述推测，即人眼中有三种不同的感光单元，它们对不同光谱区段的光感觉也各不相同。

物理学家和数学家胡果·格拉斯曼(1809~1877)于1853年阐述的加色法原理已经在前面提到了。光的电磁波理论创始人詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(1831~1879)用三基色加色法第一次测量了三色光谱响应曲线，也就是说，求得了用这些基色混配出各谱色所需的混合分量。

数学家、物理学家和生理学家赫尔曼·冯·亥姆霍兹(1821~1894)和他的学生们将这种测量工作继续下去，并且促使它得到显著改进。为了说明这些响应曲线和混合规律，亥姆霍兹采用了托马斯·杨的设想，他认为视网膜上的三种感觉细胞具有不同的光谱灵敏度，它们共同造成彩色视觉。这个杨-亥姆霍兹的彩色视觉理论现今已被实验充分证明（第十六章）。

要提及的最后一位著名物理学家是埃尔温·施累丁格他在著述波动力学之前发表过一些关于彩色学的论著，一方面涉及最佳彩色的理论，另一方面对色度学给出了确定的理论数学模型。

除了这些令人钦佩的物理学巨擘之外，对科学有着全然异样认识的一些人物也给彩色学以重要的推动。约翰·沃尔夫冈·冯·哥德(1749~1832)就是其中之一，他的内容最为丰富的著作并不是诗篇，而是《彩色学》。他的论点同牛顿的彩色学极其对立，他的彩色学不仅独特而且其中重要部分就是试图反驳牛顿的观点，今天看来这种尝试则仅仅具有科学史的意义了。在其《彩色学》“导论”的第一部分，记叙了他所做的称之为“生理色”的观察，

其中包括对彩色现象所进行的丰富观察，如正残留象、负残留象、彩色联立对比和彩色发暗等。正因为如此，该著作的这个部分成了视觉的经典学说之一。当时的物理彩色学无法将这种伤脑筋的主观观察纳入自身的系统，长时间回避这项任务，而把这些现象表述为“错觉”。哥德所观察到的关于人眼视觉能力现象的重要性，直到很久以后人们才认识到。

在彩色学方面与物理学家成对立面的第二位重要人物是生理学家埃瓦尔德·赫林（1834~1918）。他提出对立色理论，与杨-亥姆霍兹的彩色视觉三基色理论相抗衡；并且由此引起了一场长达几十年的争论。他摒弃后者，因为后者对一系列基本现象无法解释，例如对非五彩色的特殊感觉特性，以及一般人称之为四纯色或四原色（红、黄、绿、蓝）的现象，而不是象三基色理论所预期的三色现象。对立色理论一开始就遭到物理学家的否定，因为人们无法想象人眼在吸收光线时进行这一模式的生理过程，而这正是赫林为解释他的理论而假设的先决条件。

二十世纪所做的生理研究工作实际上以惊人的程度使这两种理论都得到了证实，认为三基色理论能说明人眼处理刺激的第一阶段，对立色理论能说明第二阶段。第十五章到第十七章将叙述生理学家取得的这些新近研究成果的一部分。