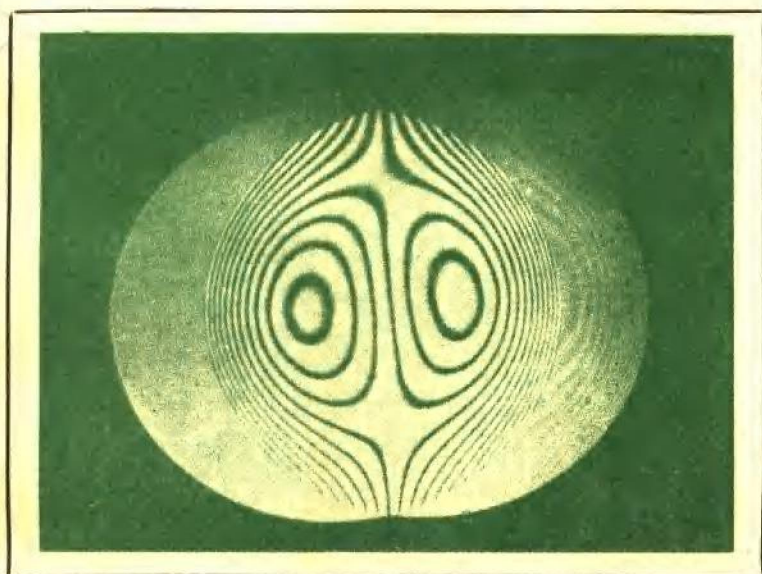


光学车间检验

OPTICAL SHOP TESTING

〔墨〕 D. 马拉卡拉 主编



机械工业出版社

本书对从经典的光学零件检验法到现代化的计算机全息技术和干涉条纹扫描技术作了系统、全面的阐述，对各种光学检验方法也作了精辟的理论分析和实例说明。书中提供了大量原理图和实例以及许多有价值的参考文献。

本书是广大光学零件加工和检验人员不可多得的、有价值的参考书，也是大专院校光学专业师生的教学参考书。

Optical Shop Testing

Daniel Malacara

John Wiley & Sons, Inc. 1978

* * *

光学车间检验

〔墨〕 D. 马拉卡拉 主编

白国强 薛君敖 译
洪 涛 李星健

曹根瑞 苏大图 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 $15 \frac{1}{8}$ · 字数 392 千字

1983年8月北京第一版·1983年8月北京第一次印刷

印数 0,001—3,900 · 定价 2.25 元

*

统一书号：15033·5500

著 者

- J. H. 布朗宁——(美)贝尔电话实验室
A. 科尼约-罗奇格兹——(墨西哥)国家天体物理研究所
I. 果兹尔——(美)基特峰国家天文台
P. 哈里哈兰——(澳)国家计量实验室
D. 马拉卡拉——(墨西哥)国家天体物理研究所
S. 马立克——(法)巴黎大学光学实验室
M. V. R. K. 默蒂——(印度)巴克巴哈巴哈原子研究中心光谱部
R. H. 诺布尔——(墨西哥)国家天体物理研究所
A. 奥夫纳——(美)珀金-埃尔默公司
C. 罗丘多利——(墨西哥)国家天体物理研究所
J. 欧捷达-卡斯坦达——(墨西哥)国家天体物理研究所
W. T. 威尔福德——(英)皇家学院技术光学系
J. C. 怀扬特——(美)亚利桑那大学光学中心
-

译者的话

一百多年来,光学零件的检验技术一直为光学工作者广泛应用。随着光学技术和相关技术的不断发展,光学零件的检验方法也不断改进,从经典的牛顿光圈检验法发展到今天的计算机全息检验技术和干涉条纹扫描技术。

虽然光学零件的检验方法种类繁多,应用也很普及,光学工作者也积累了丰富的实践经验,但是,在本书出版之前,还没有一本系统地、全面地论述光学零件检验技术的书籍。因此,我们将这本书译出,供我国广大光学工作者参考。

本书的作者都是从事光学零件检验工作多年的世界著名的光学专家。他们把牢固的理论和丰富的实践经验相结合,对从经典的目测检验法到现代化的计算机全息技术和干涉条纹扫描技术都作了详尽的论述。书中提供了大量理论推导公式和实际检验装置图,每一章的后面都附有大量参考文献,可供读者进一步了解各种检验方法的演变过程和技术细节。

本书不仅可以作为光学零件加工工作者的案头参考书,而且可供高等院校光学专业师生教学参考。

虽然光学零件检验技术在我国已有近百年的历史,但是,至今我国的光学技术术语中还有许多没有统一。这就给我们翻译本书带来一定困难。对于这些尚未统一的术语,我们没有冒昧确定,而是仔细斟酌,既不能使译名意思曲解,又不能与其它术语的实义混淆,还要考虑我国广大光学工作者的习惯。

本书第一、二、九、十、十二和十三章由白国强译;第三、四、五和六章由薛君敖译;第七、十一、十四和十五章由洪涛译;第八章由李星健译;附录一至四由曹根瑞译。曹根瑞和苏大图负责全书校对工作;白国强负责本书的总校和译名统一工作。

由于我们水平有限,译文中必然有不少错误和不妥之处,敬请读者指正。

前 言

编写本书有两个目的。第一个目的是把光学车间里能够使用的所有检验光学零件和光学系统的方法都搜集在一本书里。这样就能够容易地对这些检验方法进行比较,并选用其中优点最多的一种方法。书中各章都是由从事这方面工作的专家们撰写的,他们不仅使用而且还经常改进这些检验方法。

本书的第二个目的是讲述光学检验方法的变化特性。多年来从事光学零件抛光和表面修琢的光学工作者也担负着光学零件检验的责任。他们通常使用一些半定量的,但是比较简单的检验方法,例如斐索检验法、傅科检验法和朗奇检验法等等。这些检验法至今仍起着一定的作用。然而,由于现在采用了电子检测器、激光器或是全息图作为检验仪器的组成部分,以及在分析大量数据时使用了计算机,因而提高了检验精度并且缩短了检验时间。从事光学检验的人员未必就是光学专家,但是他们受过使用这些新技术的训练。本书打算有助于这些训练并且帮助光学行家与协助他们工作的新技术专家们之间建立共同语言。他们在一起就能够研制出更好的光学系统。由于书中讲述了各种检验方法的物理原理,所以这本书还可以作为讲授光学检验和干涉量度学课程的教课书。

本书的所有重点都放在光学零件和光学系统加工阶段所使用的检验方法方面,而不是把重点放在获得最终计算值方面,因此,没有论述如光学传递测量仪器等。书中的符号尽量统一。书中使用了数学公式,但是对文献中引用的冗长的推导没有重复论述。

本书共分十五章。第一章至第七章讲述了所有对光学检验方法有用的干涉仪。第八章至第十章讨论了能够用几何学解释,也能够用物理学解释的检验方法。例如傅科检验法、朗奇检验法和

哈特曼检验法；其中包括作为傅科检验法物理原理通则的调相检验法(泽耐克和立奥检验法等等)。第十一章讲述了著名的星点检验法。第十二章和第十三章介绍了两种最新的检验技术，即全息术和干涉条纹扫描技术。第十四章讲述了一些用于在象非球面一样的系统球差中获得补偿检验的补偿器。最后一章即第十五章介绍了测定光学系统中某些参量的方法，例如测定曲率半径、焦距和角度的方法。

书末的四个附录提供了在光学检验中一些极有用和很必需的数学资料和光学资料。

编写这本书是A.科尼约和我长期以来的梦想。《Applied Optics》1975年5月号上发表的我和默蒂博士合编的大量主题文献目录是我们朝这个方向迈出的第一步。现在我的梦想变成了现实。感谢所有参与编辑和出版这本书的各界人士。

D. 马拉卡拉

1977年9月于墨西哥

目 录

前言

第一章 牛顿干涉仪、斐索干涉仪和海丁格干涉仪	1
§ 1.1 牛顿干涉仪	1
§ 1.1.1 光源尺寸的要求	8
§ 1.1.2 几种合适的光源	10
§ 1.1.3 制作平面样板的材料	10
§ 1.1.4 估算最大误差的简单方法	11
§ 1.1.5 牛顿干涉仪的其它用途	12
§ 1.2 斐索干涉仪	16
§ 1.2.1 基本的斐索干涉仪	17
§ 1.2.2 液体基准样板	18
§ 1.2.3 检验近似平行平板	19
§ 1.2.4 用斐索干涉仪检验曲面	20
§ 1.2.5 对光源单色性的要求	22
§ 1.2.6 使用激光作光源的斐索干涉仪	23
§ 1.2.7 多光束斐索干涉仪	24
§ 1.2.8 检验大口径玻璃试样和熔凝石英试样的不均匀性	24
§ 1.2.9 检验三面直角棱镜和直角棱镜	25
§ 1.2.10 检验凹面或凸面	28
§ 1.2.11 准直透镜的质量要求	29
§ 1.3 海丁格干涉仪	31
§ 1.3.1 海丁格干涉仪的应用	32
§ 1.3.2 用激光作海丁格干涉仪的光源	32
§ 1.4 平面样板的绝对检验	35
参考文献	37
第二章 泰曼-格林干涉仪	40
§ 2.1 引言	40

§ 2.1.1 分光镜	42
§ 2.2 相干性要求	43
§ 2.2.1 空间相干性	45
§ 2.2.2 时间相干性	48
§ 2.3 泰曼-格林干涉仪的应用	50
§ 2.3.1 检验棱镜和衍射光栅	51
§ 2.3.2 检验透镜	53
§ 2.3.3 检验显微物镜	55
§ 2.4 不等程干涉仪	56
§ 2.4.1 几种特殊设计	57
§ 2.5 干涉图的拍摄	59
§ 2.6 典型干涉图及其分析	60
§ 2.6.1 任意波面的干涉图分析	65
参考文献	67
第三章 共光路干涉仪	70
§ 3.1 引言	70
§ 3.2 使用两块匹配散射板的伯奇干涉仪	70
§ 3.3 双折射分光镜	73
§ 3.3.1 萨瓦偏光镜	73
§ 3.3.2 渥拉斯顿棱镜	75
§ 3.3.3 双焦系统	76
§ 3.4 横向错位干涉仪	77
§ 3.4.1 萨瓦偏光镜的使用	77
§ 3.4.2 渥拉斯顿棱镜的使用	79
§ 3.5 双焦干涉仪	81
§ 3.6 桑德斯棱镜干涉仪	83
§ 3.7 点衍射干涉仪	85
§ 3.8 光学传递函数的测定	86
§ 3.8.1 扫描法	86
§ 3.8.2 自相关法	88
参考文献	91

第四章 横向错位干涉仪	92
§ 4.1 引言	92
§ 4.2 关于光源相干性的讨论	93
§ 4.3 横向错位干涉计量的理论简介	94
§ 4.3.1 关于初级象差的横向错位研究	97
§ 4.4 未知波面的计算	102
§ 4.5 平行光横向错位干涉仪(白光补偿)	105
§ 4.5.1 以雅满干涉仪为基础的横向错位干涉装置	105
§ 4.5.2 以迈克耳逊干涉仪为基础的横向错位干涉装置	107
§ 4.5.3 以循环干涉仪为基础的横向错位干涉装置	108
§ 4.5.4 以马赫-曾德尔干涉仪为基础的横向错位干涉装置	108
§ 4.6 会聚光横向错位干涉仪(白光补偿)	111
§ 4.6.1 以迈克耳逊干涉仪为基础的横向错位干涉装置	111
§ 4.6.2 以马赫-曾德尔干涉仪为基础的横向错位干涉仪	114
§ 4.7 应用激光器的横向错位干涉仪	117
§ 4.7.1 平行板干涉仪的其它应用	120
§ 4.8 其它类型的横向错位干涉仪	123
§ 4.8.1 基于衍射原理的横向错位干涉仪	124
§ 4.8.2 基于偏振原理的横向错位干涉仪	126
参考文献	128
第五章 径向错位干涉仪、旋转错位干涉仪、倒转错位干涉仪	130
§ 5.1 引言	130
§ 5.2 径向错位干涉仪	131
§ 5.2.1 单光程径向错位干涉仪	133
§ 5.2.2 双光程径向错位干涉仪	138
§ 5.2.3 激光径向错位干涉仪	141
§ 5.3 旋转错位干涉仪	144
§ 5.3.1 光源大小未补偿的旋转错位干涉仪	147
§ 5.3.2 光源大小补偿的旋转错位干涉仪	150
§ 5.4 倒转错位干涉仪	150
§ 5.4.1 几种倒转错位干涉仪	152

Ⅱ

参考文献	155
第六章 多光束干涉仪	157
§ 6.1 发展简史	157
§ 6.2 多光束干涉计量技术的精度	160
§ 6.3 多光束斐索干涉仪	163
§ 6.3.1 干涉条纹的形成条件	163
§ 6.3.2 斐索干涉测量法	168
§ 6.4 等色序条纹	171
§ 6.5 多光束干涉测量技术中如何减小干涉条纹的间隔值	174
§ 6.6 平行平面法布里-珀罗干涉仪	175
§ 6.6.1 薄膜厚度的测量	176
§ 6.6.2 表面平面度偏差	176
§ 6.7 用法布里-珀罗干涉仪产生的托兰斯基干涉条纹	181
§ 6.8 检验曲面用的多光束干涉仪	183
§ 6.9 耦合干涉仪和串联干涉仪	184
§ 6.9.1 耦合干涉仪	184
§ 6.9.2 串联干涉仪	186
§ 6.10 全息多光束干涉仪	187
参考文献	187
第七章 多通干涉仪	192
§ 7.1 双通干涉仪	192
§ 7.1.1 象差的分离	192
§ 7.1.2 相干条件的简化	195
§ 7.1.3 提高精度的双通干涉仪	197
§ 7.2 多通干涉仪	199
参考文献	204
第八章 傅科刀口法、细丝法及调相法	205
§ 8.1 引言	205
§ 8.2 傅科检验法和刀口检验法	205
§ 8.2.1 说明	205
§ 8.2.2 几何原理	210
§ 8.2.3 物理原理	217

§ 8.3 细丝检验法	224
§ 8.3.1 几何原理	228
§ 8.3.2 物理原理	229
§ 8.4 普拉兹克-盖维俄拉检验法	230
§ 8.4.1 几何原理	232
§ 8.5 调相检验法	234
§ 8.5.1 泽耐克检验及其与斯马特干涉仪的关系	234
§ 8.5.2 利奥特检验法	239
§ 8.5.3 沃尔特检验法	240
§ 8.6 瑞奇-康芒检验法	243
参考文献	246
第九章 朗奇检验法	250
§ 9.1 引言	250
§ 9.1.1 发展简史	250
§ 9.2 几何原理	251
§ 9.2.1 初级象差的朗奇图	253
§ 9.2.2 非球面的朗奇图	259
§ 9.2.3 补偿朗奇光栅	261
§ 9.3 波面形状的测定	263
§ 9.3.1 普通情况	263
§ 9.3.2 旋转对称的表面	267
§ 9.4 物理原理	269
§ 9.4.1 数学分析	269
§ 9.4.2 物理原理与几何原理的关系	275
§ 9.5 朗奇检验法的实际应用	276
§ 9.6 其它几种有关的检验	280
§ 9.6.1 同心圆环格栅	280
§ 9.6.2 扫描朗奇检验法	280
§ 9.6.3 边带朗奇检验法	281
§ 9.6.4 洛厄检验法	282
参考文献	283

第十章 哈特曼检验法及其它光阑检验法	287
§ 10.1 引言	287
§ 10.2 原理	289
§ 10.3 光阑的类型	294
§ 10.3.1 哈特曼径向光阑	294
§ 10.3.2 螺旋式光阑	296
§ 10.3.3 矩形列阵检验法	297
§ 10.4 哈特曼检验装置	301
§ 10.5 数据处理	303
§ 10.6 迈克耳逊检验法和加德纳-贝尼特检验法	309
§ 10.7 小结	310
参考文献	311
第十一章 星点检验法	313
§ 11.1 小象差的星点检验原理	314
§ 11.1.1 没有象差的艾里图形	315
§ 11.1.2 离焦的艾里图形	317
§ 11.1.3 多色光	322
§ 11.1.4 有中心障碍物的光学系统	323
§ 11.1.5 小象差效应	324
§ 11.2 带有小象差的实际情况	326
§ 11.2.1 期望的效应	326
§ 11.2.2 星点检验的光源	328
§ 11.2.3 星点检验用光学系统的安排	330
§ 11.2.4 显微镜物镜	333
§ 11.2.5 星点检验能否定量	334
§ 11.3 有大象差的星点检验	335
§ 11.3.1 球差	335
§ 11.3.2 纵向色差	337
§ 11.3.3 轴对称性	337
§ 11.3.4 象散	337
§ 11.3.5 畸变	337
§ 11.3.6 非补偿检验法	338

参考文献	339
第十二章 全息术和莫尔条纹技术	341
§ 12.1 引言	341
§ 12.2 使用实全息图的干涉仪	342
§ 12.2.1 波前存储	343
§ 12.2.2 无损检验	344
§ 12.2.3 全息样板	347
§ 12.3 应用综合全息图的干涉仪	349
§ 12.3.1 基本方法	349
§ 12.3.2 误差原因	351
§ 12.3.3 用计算机全息图得到的结果	353
§ 12.3.4 与普通补偿光学零件结合	354
§ 12.3.5 对计算机全息图检验法前景的预计	356
§ 12.4 双波长干涉测量法	357
§ 12.4.1 基本技术	357
§ 12.4.2 检验毛玻璃表面	360
§ 12.4.3 电子探测技术	361
§ 12.5 莫尔干涉测量法	362
§ 12.5.1 基本原理	363
§ 12.5.2 实验装置	363
§ 12.5.3 实验结果	366
参考文献	367
第十三章 条纹扫描干涉仪	369
§ 13.1 条纹扫描技术	369
§ 13.2 干涉条纹的同步检测	370
§ 13.3 扫描泰曼-格林干涉仪	380
§ 13.3.1 基本原理	380
§ 13.3.2 系统误差	382
§ 13.3.3 波面的探测	383
§ 13.3.4 波面处理	384
§ 13.3.5 绝对校准	386
§ 13.3.6 半径测量	387

§ 13.3.7 透镜检验	389
§ 13.4 扫描式横向错位干涉仪	391
§ 13.5 测长干涉仪	392
§ 13.6 莫尔条纹扫描技术	395
参考文献	395
第十四章 使用补偿器的零检验法	397
§ 14.1 历史回顾	397
§ 14.2 多尔式补偿器	399
§ 14.3 奥夫纳补偿器	402
§ 14.3.1 折射式奥夫纳补偿器	402
§ 14.3.2 反射式奥夫纳补偿器	405
§ 14.4 用于二次凹面的其它补偿检验法	410
§ 14.5 欣德尔检验法	413
参考文献	416
第十五章 一些参数的测定	417
§ 15.1 长度的测定	417
§ 15.1.1 曲率半径的测量	418
§ 15.1.2 象方顶焦距和焦距	422
§ 15.1.3 光学零件的厚度	422
§ 15.2 角度的测量	423
§ 15.2.1 分度圆盘	423
§ 15.2.2 曲尺	424
§ 15.2.3 比较标准	425
§ 15.2.4 制造公差	428
§ 15.3 装配容差	431
参考文献	434
附录	436
附录 1 光学面及其特性	436
附录 2 泽耐克多项式及波面拟合	443
附录 3 波象差的分类	460
附录 4 几种常用的补偿检验光路	465

第一章 牛顿干涉仪、斐索干涉仪和海丁格干涉仪

M. V. R. K. 默蒂

牛顿(Newton)干涉仪、斐索(Fizeau)干涉仪和海丁格(Haidinger)干涉仪是适合光学加工工作者使用的三种最简单、最有效的检验仪器。在光学加工车间里装备这三种干涉仪并不困难,用这三种仪器可以进行光学零件的常规检验。检验的精确度可达几分之一光波长。虽然这些仪器的应用和解释是简单的,但它们的物理原理都涉及到对物理光学有一定程度的了解。本章将全面研究这三种干涉仪,并介绍用激光作光源的近况。

§ 1.1 牛顿干涉仪

我们冒昧地把任何有两个表面相接触,并用单色光照明的装置都称为牛顿干涉仪。因此在大学的物理光学实验中用来产生牛顿环的类似装置也是一种牛顿干涉仪,不同的仅仅是由于其中一个表面离开接触点后存在大的空气隙,如图 1.1 所示。因此,有时需要用放大镜,甚至要用低倍率显微镜观察牛顿环。在光学车间里,我们一般将一个工作的平面样板与另一个基准样板的精密表面相比较,或是将一个球面与另一个弧度相同而弯曲面相反的标准球面相比较。在这种情况下,空气隙厚度一般都小于光的几个波长。在各种形式的牛顿干涉仪中,我们所关心的主要是通过观察和识别牛顿环来判定这个空气隙厚度的不均匀性。图 1.2 所示是观察牛顿环的一个简单装置。任何光源,例如钠灯、低压汞灯或氦灯都可以用作这种装置的光源。在某些情况下还可以使用普通钨丝白炽灯作光源。

我们首先观察一下两个完善的平面样板在相互接触而又有一

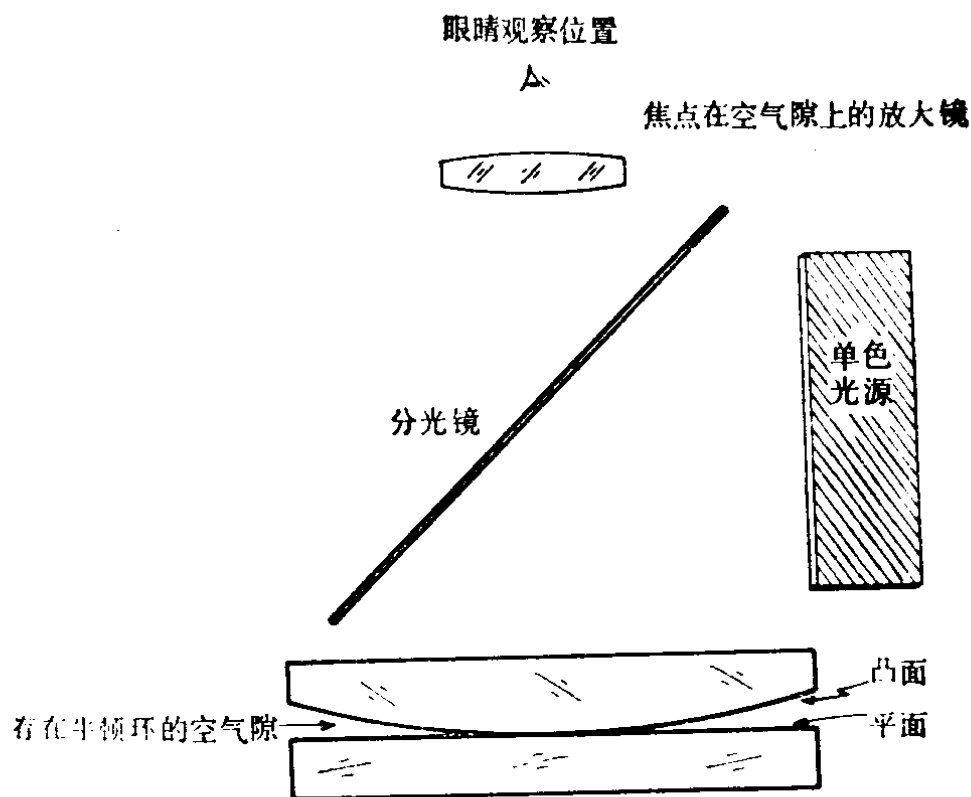


图1.1 观察牛顿环的装置

把焦距约为1米或2米的平凸透镜的凸面与一个平面样板的平面接触，并用单色光照明

个很小空气楔时所发生的现象，如图1.3所示。这个空气楔的左边薄右边厚。一般情况下，即使在薄的一边空气隙的厚度也不是零，而是无限小。除非在边缘处施加很大的压力，否则很难使薄的一边空气隙的厚度真正是零。因此，可以设想两个平面相交的交界线为一直线，如图1.3所示。用波长为 λ 的单色光垂直地入射到两个平面样板的结合处。设 α 为这两个平面之间的楔角，那么距两个平面交线为 x 位置的空气隙为 αx ，光程差为 $2\alpha x$ 。由于下层平面的反射使入射光发生位相 π 的变化，所以还应当把这个光程差的值再加上 $\lambda/2$ 。因此，在 x 位置上的光程差由 $(2\alpha x + \lambda/2)$ 求得。所以暗条纹可用下式表示

$$2\alpha x = n\lambda \quad (1.1)$$

式中 n 是整数，而亮条纹可用下式表示

$$2\alpha x + \frac{\lambda}{2} = n\lambda \quad (1.2)$$

以上两式表示等距直条纹系统，两个相邻的亮条纹或暗条纹的间

距 d 等于

$$d = \frac{\lambda}{2\alpha} \quad (1.3)$$

因此，当两个完善的平面样板接触在一起构成一个小的空气楔，并用单色光照明时，就会观察到如图 1.3 所示的干涉条纹。

现在考虑一个表面是光学平面，而另一个表面不是光学平面时所产生的牛顿环是什么形状。有些情况是可能发生的，而事实上也确实存在着。如当我们开始制作一个平面时，最初并不清楚是否是平面，结果制作的表面可能变成了大曲率半径的球面。这就需要用一个基准平面不时地检验加工表面，了解其平直度偏差。现在研究一个大曲率半径 R 的球面与平面样板接触时出现的情况。球面的弛垂度为 $x^2/2R$ ，其中 x 是从对称中心起测量的距离。因此，光程差(OPD)可由 $(x^2/R + \lambda/2)$ 求出，并且暗条纹的位置可用下式表示

$$\frac{x^2}{R} = n\lambda \quad (1.4)$$

因此，从中心到第 n 个暗条纹的距离为

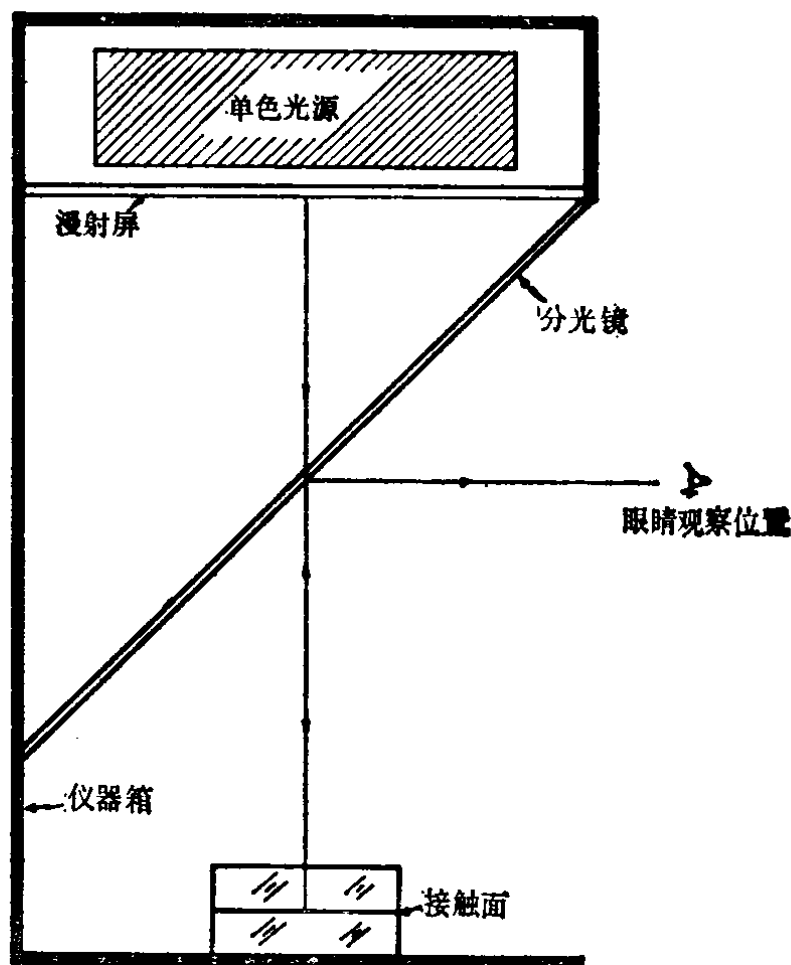


图1.2 光学车间里观察牛顿环的简单装置

用这种装置可以检验平面和大曲率半径的球面