



装备科技译著出版基金



CRC Press
Taylor & Francis Group

自适应 光学原理

(第3版) •

Principles of Adaptive Optics
(3rd Edition)

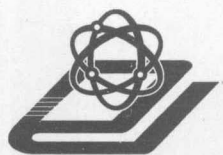
[美] 罗伯特·K·泰森 著

马浩统 王三宏 许晓军 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

自适应光学原理

(第3版)

Principles of Adaptive Optics, 3rd Edition

[美] 罗伯特·K·泰森 著

马浩统 王三宏 许晓军 亓波 习锋杰 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军-2013-195 号

图书在版编目 (CIP) 数据

自适应光学原理：第3版/ (美) 罗伯特·K. 泰森 (Robert K. Tyson) 著；马浩统等译. —北京：国防工业出版社，2017.12

书名原文：Principles of Adaptive Optics (3rd Edition)

ISBN 978-7-118-11149-1

I. ①自… II. ①罗… ②马… III. ①自适应性—光学—研究 IV. ①O436

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 046221 号

Principles of Adaptive Optics, 3rd Edition

By Robert K. Tyson

ISBN: 978-1-4398-0858-0

©2011 by CRC Press

All Rights Reserved. Authorized translation from English language edition published by CRC Press, a member of the Taylor & Francis Group LLC.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版。版权所有，侵权必究。

National Defense Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版由国防工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 防伪标签，无标签者不得销售。

本书简体中文版由 Taylor and Francis Group, LLC 授权国防工业出版社独家出版发行。版权所有，侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15¼ 字数 302 千字

2017 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 79.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010) 88540777

发行邮购：(010) 88540776

发行传真：(010) 88540755

发行业务：(010) 88540717

献给佩吉，安迪，奇普，柯雅和蔡斯

序 言

自 1997 年第 2 版《自适应光学原理》出版以来,自适应光学的开发和应用得到了爆炸性的发展。天文台正在自适应光学技术的帮助下产生出卓越的科学成果,而不再是像 20 世纪 90 年代那样开发第一代自适应光学系统时的情况了。诸如微机械变形镜和噪声极低的探测器等许多器件正在这一领域引发一场革命。尽管其工作原理在本质上说仍没什么变化,但是这些原理的应用和复杂性却发生了戏剧性的增长。

自适应光学在工业和医学领域的应用也有了快速增长,这些进步包括:自由空间光通信中的激光传输、激光熔融中的光束控制及医学视网膜成像。这一版跟上一版一样,主要目的是将近年来发展的新内容编撰进来,并将一些新的文献也增补进来。目前在多学科领域以书籍、期刊和会议论文集的形式存在着 10000 多种出版物,我尽量引用了当前最新的、贡献较大的或者影响力巨大的论文。我真诚地向那些没有在参考文献中予以提及的人士致歉。如果您愿意资助我在未来几年的研究的话,我将会在第 4 版中的显著位置向您致谢。

罗伯特·K·泰森(Robert K. Tyson)

北卡罗莱纳州夏洛特市(Charlotte, North Carolina)

前 言

自适应光学(AO)是过去20年光学成像领域最令人兴奋的进展之一。虽然早在1953年就由豪瑞斯·巴布科克(Horace Babcock)提出了概念设计,但是这个学科一直只是个科学上的奇思妙想,直到为了军用目的投入巨资发展之后,它才变为了现实。在20世纪80年代后期,天文学家为位于智利拉西拉(La Silla)的欧洲南方天文台的3.6m望远镜制造了第一台19单元AO系统,之后这个学科才又一次兴盛起来。现在,世界上所有大型望远镜都配备了尖端的AO系统,并且出现了大量缩写字母代号来命名为天文观测开发的不同种类的AO,如:激光导星自适应光学(LGSAO)、多层共轭自适应光学(MCAO)、激光层析自适应光学(LTAO)、地面层自适应光学(GLAO)、极端自适应光学(XAO)和多目标自适应光学(MOAO)。下一代直径达30m的地基望远镜所配备的AO系统的变形镜将具有5000多个致动器。

与用于天文观测的高端AO相伴发展的还有应用领域不断增多的低成本AO。直到10年前,人们仍认为AO是一门大科学:为了成功制造AO系统需要有专业的工程师团队。实际上,AO并不复杂,任何合格的大学毕业生都可以在几个月的时间内仅花费10000美元就可以制造出自己的AO系统。采用一个14单元的空间光调制器且花费不超过1美元的低成本AO系统就在某制造商开发的DVD播放机上得到了应用。

当鲍勃·泰森(Bob Tyson)的《自适应光学原理》这本书首次在1991年出版时,它马上就成为每位在此领域工作的人员的参考书。它对所有相关领域的无所不包的涉及、清晰的表述和对原始文献的大量引用确保了该书的成功。经过完全修订和更新后的第3版仍保留了原书的优点。每位从事AO的人员都应该在书架上放一本,要知道,像原版一样,它详尽的参考文献列表(超过900条)提供了对原始文献的极好的检索。

克里斯托弗·戴恩蒂(Christopher Dainty)

戈尔韦郡,国立爱尔兰大学(Natioanl University of Ireland, Galway)

作 者

罗伯特·K·泰森(Robert K. Tyson)是北卡罗来纳大学(UNC)夏洛特分校的物理学和光学副教授。他曾获得宾夕法尼亚州立大学的物理学学士学位和西弗吉尼亚大学的物理学硕士和博士学位。他已在自适应光学领域工作了30多年,并在这一主题讲授了很多课程,还写了许多书,本书是第7本。在1999年加入北卡罗来纳大学(UNC)夏洛特分校以前,他从事航空航天工业系统设计和战略防御高能激光武器系统的支持技术研究。

目 录

第 1 章 历史和背景	1
1.1 引言	1
1.2 历史	2
1.3 物理光学	4
1.3.1 带像差传输	5
1.3.2 带像差成像	7
1.3.3 波前表示	10
1.3.3.1 幂级数表示	10
1.3.3.2 泽尼克级数	11
1.3.3.3 泽尼克环形多项式	12
1.3.3.4 低阶像差模式	13
1.3.4 干涉	13
1.4 自适应光学中的术语	15
第 2 章 像差源	19
2.1 大气湍流	19
2.1.1 大气湍流描述	20
2.1.2 折射率结构常数	22
2.1.3 湍流效应	23
2.1.3.1 弗里德相干长度	24
2.1.3.2 闪烁	25
2.1.3.3 光束漂移或倾斜	26
2.1.3.4 高阶相位变化	28
2.1.4 湍流调制传递函数	31
2.1.5 多层湍流	31
2.2 热晕	32

2.2.1	热晕强度与临界功率	33
2.2.2	湍流、抖动与热晕	35
2.3	非大气类像差源	36
2.3.1	光学失调与抖动	36
2.3.2	大光学器件:分块与定相	37
2.3.3	热致光学畸变	38
2.3.4	制造与微小误差	40
2.3.5	其他像差源	41
2.3.6	航空器边界层湍流产生的像差	41
2.3.7	激光谐振腔与激光介质中的像差	42
第3章	自适应光学补偿	43
3.1	相位共轭	43
3.2	相位共轭限制	47
3.2.1	湍流倾斜或抖动误差	47
3.2.2	湍流的空间高阶误差	47
3.2.2.1	模式分析	47
3.2.2.2	区域分析:校正器拟合误差	48
3.2.3	湍流时域误差	49
3.2.4	传感器噪声限制	50
3.2.5	热晕补偿	51
3.2.6	非等晕	52
3.2.7	后处理	54
3.3	人工导星	54
3.3.1	瑞利导星	56
3.3.2	钠导星	59
3.4	导星激光器	60
3.5	限制因素综合	61
3.6	线性分析	61
3.6.1	随机波前	61
3.6.2	确定性波前	63
3.7	部分相位共轭	64
第4章	自适应光学系统	65
4.1	自适应光学成像系统	65
4.1.1	天文成像系统	65

4.1.2	视网膜成像	67
4.2	光束传输系统	68
4.2.1	本地环路光束净化系统	69
4.2.2	其他可供选择的设计	70
4.2.3	各种方法的优缺点	73
4.2.4	自由空间激光通信系统	73
4.3	非传统自适应光学	74
4.3.1	非线性光学	74
4.3.2	弹性光子散射:简并四波混合	75
4.3.3	非弹性光子散射	76
4.3.3.1	拉曼散射和布里渊散射	76
4.4	系统工程	80
4.4.1	系统性能要求	83
4.4.2	待补偿光束性质	83
4.4.3	波前参考光束性质	84
4.4.4	光学系统集成	84
第5章	波前传感	86
5.1	直接测量相位	87
5.1.1	衍射图样的不唯一性	87
5.1.2	根据光强确定相位信息	88
5.1.3	模式和区域传感	90
5.1.3.1	倾斜与波前的测量动态范围	92
5.2	直接波前传感——模式法	92
5.2.1	波前倾斜的重要性	92
5.2.2	倾斜测量	95
5.2.3	聚焦度传感	98
5.2.4	高阶像差的模式传感	100
5.3	直接波前传感——区域法	100
5.3.1	波前传感的干涉测量法	100
5.3.1.1	干涉法	101
5.3.1.2	剪切干涉仪原理	107
5.3.1.3	剪切干涉仪的实际操作	109
5.3.1.4	横向剪切干涉仪	109
5.3.1.5	旋转和径向剪切干涉仪	113
5.3.2	夏克-哈特曼波前传感器	114

5.3.3	曲率传感	117
5.3.4	金字塔波前传感器	118
5.3.5	方法选择	118
5.3.6	相关跟踪器	119
5.4	间接波前传感方法	119
5.4.1	多抖动自适应光学	120
5.4.2	像清晰化	124
5.5	波前采样	125
5.5.1	光束分束器	126
5.5.2	孔栅	127
5.5.3	分时复用	127
5.5.4	反射光楔	129
5.5.5	衍射光栅	129
5.5.6	复合采样器	131
5.5.7	采样器灵敏度	133
5.6	探测器和噪声	134
第6章	波前校正	138
6.1	倾斜模式校正	140
6.2	高阶模式校正	140
6.3	分块镜	141
6.4	变形镜	142
6.4.1	驱动技术	144
6.4.2	驱动器影响函数	144
6.5	双压电校正镜	148
6.6	薄膜镜和微机械镜	149
6.7	边缘驱动镜	150
6.8	大型校正光学系统	151
6.9	特殊校正器件	151
6.9.1	液晶相位调制器	152
6.9.2	空间光调制器	152
6.9.3	铁磁流体变形镜	153
第7章	重构和控制	154
7.1	引言	154
7.2	单通道线性控制	156
		XI

7.2.1	基本控制工具	157
7.2.2	传递函数	157
7.2.3	比例控制	161
7.2.4	一阶和二阶滞后	161
7.2.5	反馈	162
7.2.6	控制系统的频率响应	163
7.2.7	数字控制	168
7.3	多元自适应光学控制	170
7.3.1	线性方程的解	170
7.4	直接波前重构	173
7.4.1	波前斜率求相位	173
7.4.2	根据波前斜率求模式	177
7.4.3	根据波前模式求相位	179
7.4.4	根据波前模式求模式	179
7.4.5	用连续相位驱动区域校正器	180
7.4.6	用连续相位驱动模式校正器	181
7.4.7	用模式相位驱动区域校正器	181
7.4.8	用模式相位驱动模式校正器	182
7.4.9	间接重构	182
7.4.10	用波前模式驱动模式校正器	182
7.4.11	用波前斜率驱动区域校正器	183
7.5	线性控制之外	184
第8章	方程纪要	186
8.1	大气湍流波前表达式	187
8.2	大气湍流振幅表达式	188
8.3	自适应光学补偿表达式	188
8.4	激光导星表达式	190
参考文献		191

第1章 历史和背景

1.1 引言

自适应光学是一门利用光信号所穿过环境的信息来改善其性能的科学科学与工程学科。此处的光信号可以是激光束也可以是最后形成图像的光。信息提取和以受控形式施加校正的工作原理构成了本书的内容。

与该简单定义不同,各种各样的定义使得创新成为了本领域一个令人期望且必不可少的特质。从数光年之外的星系所发射的光束中提取信息是目前人类所面临大挑战^[47,524]。而对功率大到足以融化大多数人造物体的光束施加校正更是推动了这项技术水平的进步。自适应光学还在变化、成长。在受动态像差限制的光学系统中,它已成为一项必不可少的技术。

自适应光学的发展一直在不断演进。不存在某个唯一的自适应光学**发明者**。有成百上千的研究人员和工程技术人员,在过去的35年里,对自适应光学的发展做出了贡献。这其中既有大的跨越也有很多微小的进步。对传输一束无畸变的光束或者接收一幅无畸变的图像^[71]的需求已使得自适应光学领域成为了一门独立的科学与工程学科。

显然,自适应光学演化自对波传输的理解。对物理光学的认识受益于用于光控制的新材料、新电子器件和新方法的发展进步。自适应光学涉及许多工程学科。本书将聚焦于对**工作原理**的阐述,以便为需要使用自适应光学方法的工程界所用。这个工程界范围很大,其领域涉及众多在有关光学、电子控制和材料科学的文章中常可发现的议题范围。本书目的是浓缩这些大量的文献,并为这些年来发展出的工作原理提供应用的方法。

如果将一切有关主动控制一束光的原理都视作自适应光学的话,那么这个领域确实非常广。不过,对该界定做最常采用的限制后可以引出如下的定义方法:自适应光学以**实时闭环方式**对光进行控制。因此,自适应光学是涉及面更广泛的学科——**主动光学**的一个子学科。文献中经常混淆和交叉使用这两个术

语^①, 本书中的一些例子表明: 为解决某些问题, 也常常需要考虑开环方法的使用^[672]。

人们还注意到了对自适应光学界定的其他限制。鉴于本书的宗旨, 除纯相位相干校正之外, 自适应光学还包含其他方式的校正。如许多技术是采用强度校正方式来控制光, 还有些其他技术是在不同的瞳共轭面上进行多次校正。非相干成像当然也在自适应光学的研究领域内。

动物视觉系统是一个自适应光学应用的例子。眼睛能够适应不同环境来改善其成像质量。眼-脑组合成的主动聚焦“系统”是自适应光学的一个完美实例。大脑有意识或无意识地对图像做出解释、确定校正量, 然后通过眼睛的晶状体或角膜等部分的生物力学运动施加校正。当晶状体被挤压时, 离焦就得到了校正。眼-脑系统还能跟踪目标的方向, 这是一种倾斜模式的自适应光学系统。虹膜能够根据亮度而开合, 这展示了一种强度控制模式的自适应光学系统; 眼睛周围的肌肉还能挤出具有孔阑效果的“眯眼”, 它是一种有效的空间滤波和相位控制机制。这里的例子属于闭环和纯相位校正。

对外行关于“什么是自适应光学?”这一问题, 尽管不完全准确但却最简单的答案是: “它是一种当光偏离焦点后能自动保持聚焦的方法。”每个有视觉力的人都能理解何时物体没有聚焦: 图像不再清晰锐利, 而是很模糊。如果我们观察未聚焦的光, 那么我们要么会移到一个光聚焦的位置, 要么不需移位但会施加校正使光束聚焦。这就是我们的眼睛经常采用的工作原理。聚焦感的适应过程是一个学习过程, 而校正(称为调节)是一个习得反应。当校正达到人眼的生物物理极限时, 我们就需要外界帮助了, 那就是校正镜片。我们眼睛的持续校正是一种采用光学方式执行的闭环自适应过程。因此它也被称为自适应光学系统。

1.2 历史

一些综述性文章的作者^[320, 603]都引用公元前215年阿基米德(Archimedes)摧毁罗马舰队的例子作为自适应光学的早期应用。当罗马攻击舰队驶近守卫锡拉库扎(Syracuse)的军队时, 士兵们站成一排以便将太阳光聚焦在船的侧面。通过抛光他们的盾牌或者某种别的“取火镜”并适当地定好各自的位置, 成百上千的光束被导向船侧一个很小的区域上。其产生的强度显然足够高, 从而点燃了战船, 击败了侵略者。阿基米德所用的“取火镜”法极具创新性;

^① 威尔逊(Wilson)等人^[869]用带宽来加以区分。他们把工作于1/10Hz以下的系统称为主动的, 而把工作于1/10Hz以上的系统称为自适应的。这个定义在天文界得到广泛采用。

然而,现在人们对此方法的细节不甚了解^[144,743]。对于这种是否采用了反馈环路或相位控制从没有介绍过,但是锡拉库扎确实幸存了下来。

自适应光学的应用一直受到技术可行性的限制。即使那些最伟大的物理学家们也未曾预见到它的效用。艾萨克·牛顿(Isaac Newton)在1730年写作了《光学》一书,其中对天文学受大气湍流限制的问题他也未找到解决方法^[559]。

即使望远镜制造理论最终能够完全付诸实践,也仍会存在望远镜无法突破的特定界限。这是因为,我们仰望星体所透过的大气总是处于抖动状态中,这一点可以由高塔投影的颤动和恒星的闪烁看出。但是当通过大口径望远镜观察时,这些星体并不闪烁。其原因是:穿过孔上不同位置的光线在彼此独立地抖动,通过它们不同且有时恰好相反的颤动,这些光线会一起同时落在眼底的不同点上,而且它们的震颤运动非常快也非常混乱,以致彼此无法被察觉分开。所有这些被照明的点组成了一个亮点,这个亮点由那些大量颤动点混乱地构成且彼此通过非常短暂而快速的颤动不易察觉地混合起来,从而使得星体看起来比它自身要大一些,且整体没有任何颤动。与短望远镜相比,长望远镜会使物体显得更亮也更大,但是它们不能消除大气抖动所引起的光线混乱。唯一的补救方法就是采用最清澈宁静的大气,云层之上的高山之巅或许可以找到这样的大气。

1953年巴布科克^[45]提出:受波前传感器驱动的可变形光学元件可用于补偿影响望远镜成像的大气畸变。按照我们今天对这个领域的界定,这篇论文看来是关于自适应光学应用的最早文献。林尼克(Linnik)描述了置于大气中的信标是如何能够用于探测扰动的^[466]。尽管林尼克的论文是我们现在称之为“导星”的第一篇文献,但是由于他的设想早于激光的发明,因此直到20世纪90年代早期才被开发激光导星的西方科学家知晓。

涉及自适应光学的工程学科的发展遵循普遍的技术发展规律。当问题出现后,就去寻找解决方法。这个领域内具有导向性的研究经常受助于周边学科的创新和发明。对衡量光学问题的限度并控制其结果的需要常常随当时的电子技术或计算机能力的公认“最高水平”而定。

未采用实时波前补偿的其他方法也获得了成功应用,如散斑干涉法^[441,662]或混合了自适应光学与图像后处理的复合技术。罗格曼(Roggemann)与威尔士(Welsh)对这些方法做了研究^[672]。

哈迪(Hardy)的一篇综述^[320]对主动光学和自适应光学历史做了非常精彩的记叙,并描述了1978年时该技术的发展水平。前30年的发展在本书及巴布科克^[46]、哈迪^[322]、格林伍德(Greenwood)与普瑞默曼(Primmerman)^[309]、本尼迪克特(Benedict)等^[77]及其他人^[794]的综述中都进行了详细的描述。1991年美国军方将其在自适应光学研究中所做的很多工作解密^[257,632]。涉及激光导星^[210]的研究得以公开及讨论,从而促进了天文学界相

关研究工作的发展^[229]。

科学期刊和技术团体持续发布着新的技术和结果。除了技术发展和外场验证之外,天文望远镜上红外自适应光学系统的首批结果也于1991年得以公布^[526]。世界各地其他系统的结果也在持续公布中。天文成像中一个令人兴奋的进步的例子示于图1.1。自适应光学的历史还在不断地续写着。

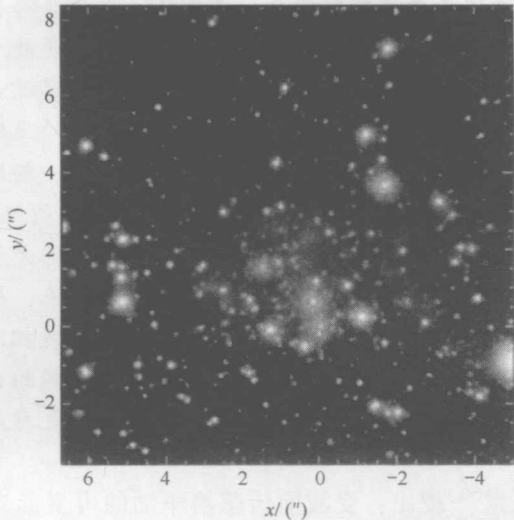


图 1.1 W·M·凯克 (Keck) 天文台自适应光学系统拍摄的仙后座中不规则矮星系 IC-10 的图像 (照片由位于加州莫菲特机场 (Moffett Field) 的美国国家航空和宇航局阿姆斯研究中心 SOFIA-USRA 授权提供。获准引自 W·D·瓦卡 (Vacca)、C·D·希伊 (Sheehy)、J·R·格雷厄姆 (Graham), 2007, Ap J 662, 272-283)

1.3 物理光学

自适应光学的工作原理基于一个前提:人们可以通过增加、移除或更换光学元件来改变一个光学系统的作用效果。对于人们感兴趣的大多数光学系统,衍射效应都是有害的。换言之,它们使得一束光在传输后或一个物体在成像后变得不同。当光束被传输时,无论是准直的还是聚焦的,我们通常希望所有的光都能到达接收器。类似的,对于一个成像系统,我们希望得到的图像能完全重现物体本身。然而衍射效应降低了图像质量,因为它们使传输过程发生了退化。我们不能消除衍射效应,因为它们是麦克斯韦定律决定的固有属性。我们所能做到的最好情况就是达到衍射极限。当机械缺陷或热致缺陷对图像或传输过程的破坏超过衍射极限时,虽然不能完全消除这些缺陷,但是我们还是可以尽力改变光学系统来补偿这些缺陷的。

1.3.1 带像差传输

当用于自适应光学时，对光传输的描述方法采用数学形式体系。实际上已经有成百上千卷文献对光传输进行了描述。波恩（Born）和沃尔夫（Wolf）^[89]的经典名著在描述光传输时明确地指出了瞳平面上光场的相位对最终“像”平面上光场的影响。

对一束波长为 λ 的相干光，在距离为 z 的像平面或焦平面上一点 P 处的光强是

$$I(P) = \left(\frac{Aa^2}{\lambda R^2} \right)^2 \left| \int_0^{12\pi} e^{i[k\Phi - r\rho\cos(\theta-\psi) - \frac{1}{2}u\rho^2]} \rho d\rho d\theta \right|^2 \quad (1.1)$$

式中：圆形光瞳的半径为 a ，坐标为 (ρ, θ) ；像平面上的极坐标为 (r, ψ) ；坐标 z 垂直于瞳平面； R 是从光瞳中心^①到 P 点的斜距； $k = 2\pi/\lambda$ ； $k\Phi$ 是相对于以焦平面原点为球心的完美球面的相位偏差（图 1.2）。为简化表达式，在焦平面上采用了如下的归一化坐标，即

$$u = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \right)^2 z \quad (1.2)$$

$$v = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{a}{R} \right) r \quad (1.3)$$

由于瞳平面上均匀电场的振幅为 A/R ，因此瞳平面上的光强 $I_{z=0}$ 为 A^2/R^2 。

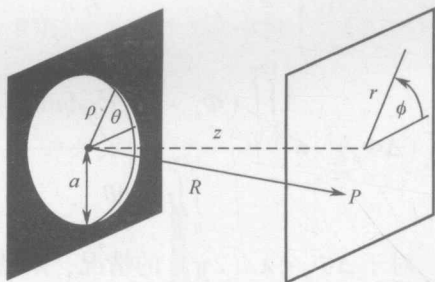


图 1.2 用于计算像差 Φ 的衍射的坐标系统

从自适应光学视角来看，上述表达式中最重要的物理量是 Φ ，该物理量经常直接被误称为相位。实际上它更常用的称谓是波前。符号 Φ 代表传输到 P 点之前出现在光学系统中的所有光程差。如果不存在像差，那么轴上 ($r=0$) 的光强最大，称作高斯像点。

$$I_{\Phi=0}(P_{r=0}) = \pi^2 \left(\frac{Aa^2}{\lambda R^2} \right)^2 = \left(\frac{\pi^2 a^4}{\lambda^2 R^2} \right) I_{z=0} \quad (1.4)$$

① R 也是完美聚焦于 P 点的波前球面的半径。