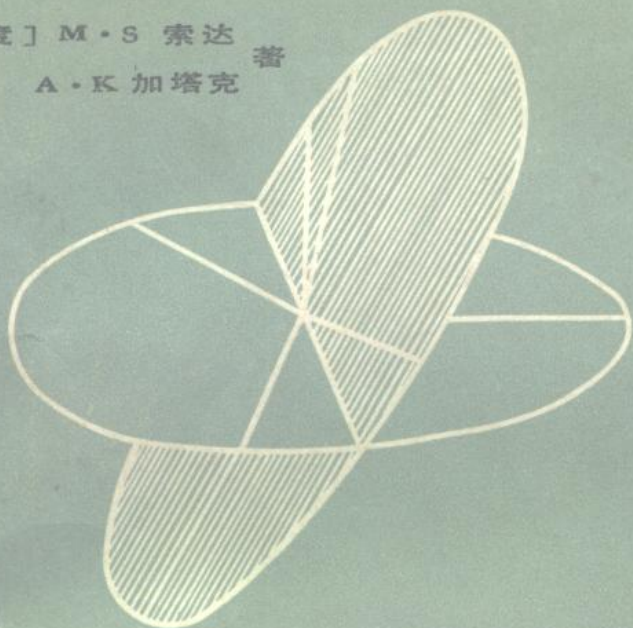


[印度] M·S 索达 著  
A·K 加塔克



# 非均匀光波导

连汉雄 焦其祥 译  
叶培大 校

人民邮电出版社



# 非均匀光波导

[印度]M·S·索达 A·K·加塔克 著

连汉雄 焦其祥 译

叶培大 校

人民邮电出版社

M. S. Sodha

and

A. K. Ghatak

Inhomogeneous

Optical Waveguides

1977 Plenum Press, New York

### 内 容 提 要

非均匀波导包括非均板状波导和非均匀光波导。本书系统地阐述了非均匀波导的理论，同时也阐述了均匀板状波导和均匀光波导的理论。在附录中还叙述了光波导的制造方法。

应用波动理论，采用近似法求解波动方程是本书分析非均匀波导的主要方法。

本书可供微波与光波科技人员、物理工作者、大学有关的教师和研究参考。部分内容也可作为大学有关专业的教材。

### 非 均 匀 光 波 导

[印度] M. S. 索达 A. K. 加塔克 著

连汉雄 焦其祥 译 叶培大 校

\*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

\*

开本：787×1092 1/32 1982年4月第一版

印张：10 页数：160 1982年4月天津第一次印刷

字数：229千字 印数：1—2,900册

统一书号：15045·总2536—无6162

定价：1.05元

# 一 些 说 明

为了便于读者阅读，先作一些说明，不妥之处，请指正。

## (一)

光波导种类繁多，但普通的有三种：平板（即薄膜）波导，由三层平板形的介质组成，中间一层折射率最高，上下两层的小；带状波导，形状类似于微波里的微带，电磁波比较集中在带线里传输；圆柱形波导，主要是光纤，包括芯子和外面的敷层，把光纤组成光缆时，光纤敷层外面还加外套。

对于平板波导和光纤来说，又分两大类，一类的芯子里折射率均匀，称为均匀波导。又因为在边界处，折射率呈阶梯突变，所以又称为阶梯折射率波导。另一类芯子里的折射率渐变，是非均匀的，称为非均匀波导，或称渐变折射率波导。以光纤而言，在芯子的中心折射率最大，沿半径往外逐渐减小，可以按某些规律来渐变，目前作的是所谓抛物线形的变化规律，目的是减小模式色散。

光波导的最重要的应用是光纤通信，现已达到实现阶段。

因为光纤通信近期内采用非均匀光波导，以多模传输信息，于是这种波导在一段时期内成为集中讨论研究的问题。

光纤传输的主要问题有（1）模式分析（2）传输特性。模式分析是一个基本问题。传输特性主要包括衰减和色散。此外，为了设计通信系统，必须研究光纤的脉冲响应（或频率响应）。又由于光纤在制造、成缆、敷设等等过程中产生几何方

面和折射率方面的畸变，使多模传输时，模式之间发生耦合，因而影响了传输特性，所以模式耦合与传输特性的关系也是一个重要问题。此外，还有温度、辐射等等对光纤的影响问题。

本书系统阐述了非均匀波导的基本理论。前已述及，非均匀波导包括非均匀的板状波导和非均匀光纤。但本书也简述了均匀板状波导和均匀光纤的理论。附录里也叙述了制造方法，没有讨论到的有带状波导。传输特性方面则缺衰减、脉冲响应以及光纤弯曲和几何随机性畸变等问题。

本书数学用得得多，这在定量或稍深入的分析时是不可避免的。但是所用的数学并不是很特殊的，是一些偏微分方程和常微分方程严格解和近似解问题。

本书可以供物理工作者、微波与光波科技人员、大学有关教师、有关的研究生等作参考。部分内容也可作为大学有关专业的教材。

在阅读本书以前，如没有读过光波导方面的书，则可以结合更基本的一些书一起阅读。

## (二)

对于均匀和非均匀波导以及其它光波导元部件的分析方法有两大类：一为射线光学，即几何光学，它对简单问题例如均匀板状波导可以求解，对于非均匀波导，可以提供光波传输的图像，帮助想像理解，帮助实验等等。另一类为波动理论，即解波动方程，它的主要内容是模式分析理论。

应用波动理论，除了对均匀板状波导及均匀光纤可以作严格解以外，对其它似乎都要用不同方法作不同程度的近似。例如对于非均匀波导可以用标量近似法、 $WKB$ 法、梯级近似法、变分法及微扰法等。到现在为止，还没有严格解。前两种近似

方法可以得出封闭形式的公式，后几种大都要用计算机作数字运算。

本书很少应用射线光学，主要是求解波动方程。这是本书的一种风格。采用的近似法有（1）标量近似（2）近似的矢量解。它们都是假设折射率作抛物线变化，也把芯子作为无穷，不考虑边界的影响，即所谓的似透镜近似。

对于偏离抛物线变化的光纤，主要介绍了微扰法。其它关于WKBJ、变分法等也有所讨论。实际上，方法很多，作者很难一一详细阐述。只能按照该书的系统以及作者的爱好选择一、二种。

其它解法，读者如有兴趣或有需要，可以阅读：

（1）WKBJ法。它的优点是不同于抛物线分布（即平方律分布），同时它也考虑了一些边界的作用，能得出简单有用的计算公式，<sup>[1][2]</sup>这有利于对工程计算。

缺点是对低次模，和对邻近截止的模式计算不准。

（2）一种不同于本书的标量近似法，它的分析似较本书的更为方便<sup>[3]</sup>。但是注意标量近似仅对抛物线分布的光纤而言的。

（3）考虑边界条件的严格数字计算，考虑边界条件的近似计算，矢量分析与标量分析的比较等，可参阅〔4〕〔5〕〔6〕。

标量近似对于远离截止的模式是相当正确的。

矢量分析和标量分析的比较，给出了线极化标量模式 $LP_{\infty}$ 与精确矢量模式 $HE_{mn}$ 、 $EH_{mn}$ 、 $TE_{0n}$ 、 $TM_{0n}$ 之间的对应关系。这对工程技术人员也有用。

---

\* “一些说明”部分，请参阅“补充参考文献”，在本书最后。

### (三)

实现光通信的第一个重要问题是如何降低光纤的衰减问题。光纤从最初的每公里几千分贝降到每公里20分贝 (1970), 又逐渐降低到每公里0.47分贝 (1976) (波长为1.2微米)。不论多模或单模波导, 均可作到每公里小于0.5分贝<sup>[7]</sup>。

不论均匀或非均匀的光纤, 产生损耗的原因有<sup>[8]</sup>:

- (1) 材料吸收损耗;
- (2) 材料散射以及芯子与敷层的交界面散射;
- (3) 由弯曲及随机性畸变所产生的辐射;
- (4) 外套损耗。

材料吸收包括物质固有的损耗, 以及杂质如跃迁金属(铁、铜、铬等)和 $\text{OH}^-$ 离子所产生的吸收, 现在两者均可以作到极低。

材料散射包括物质本征散射和掺杂不均匀引起的散射, 它们均与波长的四次方成反比。

交界面散射实际上是光纤直径沿轴作随机性的变化, 使传输模式的一部分功率变成为辐射模式, 引起附加损耗。

弯曲有两类。一类是有意的, 是必需的; 一类是在制造、成缆、施工等过程中引进的随机性微弯。

弯曲也使传输模的一部分功率变成辐射模, 产生损耗。

分析弯曲辐射的文章甚多, 但结果在性质上相似, 即曲率半径作线性变化时, 辐射损耗并不作线性变化而作指数函数的变化, 曲率半径小到一定程度, 损耗会突然增大。此外, 不论那一种分析都是近似的, 其结果(即辐射损耗)均比实验值为大。

为与本书配合, 读者可参阅[9][10]。前者分析均匀波导的

弯曲辐射，后者在前者的基础上，用同样的方法分析非均匀波导的弯曲。

光纤的微弯是一个重要问题，一般每公里会增加一个到几个分贝，特别严重的会达100个分贝，〔11〕、〔12〕。

有些文献曾估计1978年光缆的总损耗，包括沿途的联结损耗在内，低于每公里5分贝。到1980年可降到每公里3分贝以下，到1985年为每公里2分贝。这是因为光纤本身的损耗微乎其微，估计最低可达0.2分贝/公里，光纤随机性畸变所产生的附加损耗也微不足道，以及联结损耗也下降到很小的缘故。

关于光纤一般损耗的分析可参阅〔8〕。

由于光纤的发展很快，而本书是1977年出版的，因此在这里提到的不免与书上提的有不一致的地方。

#### (四)

光纤的色散又是一个重要问题。由于色散，使输入脉冲在传输过程中展宽，脉冲之间彼此重叠，产生码间干扰，增加误码率，减小通信容量。

光纤色散的种类有三，为：

(1) 材料色散。这是材料本身的折射率随频率而变，于是光波各频率的群速不同，引起色散。近期发现纯硅石在波长为1.27微米无色散，其它掺杂硅石如锗硅石 ( $\text{GeO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ )，磷硅石 ( $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{SiO}_2$ ) 等在波长邻近1.3微米也无色散。

(2) 模式间色散。光纤传输多模时，各模在同一频率下的传输常数 $\beta_{mn}$ 不同，于是群速不同，引起色散。

(3) 波导色散。它是波导模式本身的色散。每一个模式本身的群速随频率而变，引起色散。

光源并不是单色的。光源带宽宽，会增加材料色散和波导

色散的严重性。

对于多模传输，模式间色散是一个主要问题。非均匀波导的目的就在于减小这种色散。

为了进行比较，一般引用一个参量，叫做脉冲响应宽度的均方根值 $\sigma$ 。它的普遍表示式为：

$$\sigma^2 = \langle (\tau - \langle \tau \rangle)^2 \rangle$$

$\tau$ 代表群时延，即 $\frac{1}{c} \frac{\partial \beta}{\partial k}$ ， $\beta$ 为传输常数； $k$ 为自由波数量； $c$ 为光速， $\frac{1}{c} \frac{\partial \beta}{\partial k}$ 亦即为群速的倒数； $\langle \rangle$ 代表平均，或即数学期望。

如果用WKBJ法，在最优的折射率分布 $\alpha_{opt} = 2 - 2.4\Delta$ 时， $\Delta$ 为芯子中心与敷层相对折射率差， $\alpha$ 为折射率变化的指数。<sup>\*</sup>最小的模式间色散为

$$2\sigma_{m(\min)} = Z \frac{n_1 \Delta^2}{10\sqrt{3} C}$$

$Z$ 为传输长度； $n_1$ 为芯中心的折射率； $m$ 代表模式； $\min$ 代表最小。

对于均匀波导， $\alpha = \infty$ ，而模式间色散为：

$$2\sigma_m = Z \frac{n_1 \Delta}{\sqrt{3} C}$$

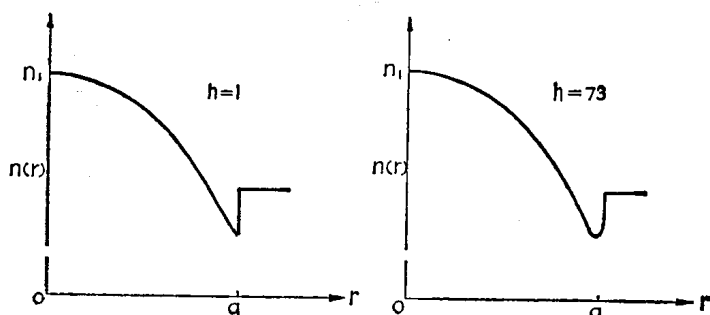
按照WKBJ法分析结果，如果 $\Delta = 0.01$ ，非均匀波导的脉冲响应的展宽可以小到均匀波导的1/1000。现在实际做到的差几十倍。

以上是用WKBJ法分析得出的结果。前已述及，这个方法有它的缺陷，所以有的用计算机辅助作最优化折射率剖面的

---

\* 对于平方律分布， $\alpha = 2$ 。

设计[13], 方法采用变分法。剖面的初始数值和经过73次运算后的最优分布如图(1)所示。



(a) 初始折射率剖面

(b) 经73次运算后优选的剖面

图(1)

如果传输的模式有10个(很少), 并且用均匀波导, 则最大的时延差 $\Delta\tau_{\max}$ , 即最早和最晚到达之差为30000微微秒/公里, 优选以后的结果 $\Delta\tau_{\max}$ 为30微微秒/公里。

如用公式来近似地表示该最优剖面, 则为

$$n^2(r) = n_1^2 \left[ 1 - 4.00 \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^{2.27} \right], \quad y = 0.3, 0 \leq r/a \leq 0.9$$

$$n^2(r) = n_1^2 \left[ 1 - 4.04 \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^{1.97} \right], \quad y = 0, 0 \leq r/a \leq 0.9$$

$a$  为芯子半径;  $y$  代表芯心与敷层材料色散差。

关于优选剖面的文献还有[14]、[15]

在这一节里有些提法也与本书不同。

## (五)

光纤的几何式折射率的随机性畸变, 产生模式耦合, 影响传输特性。

耦合的影响简言之减小色散, 这是因为各模式通过耦

合、群速得到了平均的缘故。但耦合要增加损耗，这是因为传输模式的一部分功率变成了辐射模式的缘故。

一般讲，要严格分析耦合问题，必须在给定的光纤畸变下，求解马氏方程。但是这往往比较复杂，也难于得出正确的结果，因为随机畸变的统计规律并不知道。为此，目前都采用多模光纤的耦合模式功率方程的方法。

假设模式为模式群而不是一个个精确模式，而且是连续的，又设耦合在左右两邻的模式群之间进行，其余的均略去，则如果 $P(p)$ 代表某模式群的功率， $d(p)$ 代表 $p$ 和 $p+1$ 群之间的平均耦合系数， $\gamma(p)$ 代表功率衰减系数，则沿线 $P(p)$ 的变化可表为：

$$\frac{\partial P(p)}{\partial z} + j\omega\tau P(p) = -\gamma(p)P(p) + \frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial p} \left[ p d(p) \frac{\partial P(p)}{\partial p} \right]$$

因为它含有模式功率扩散的意义，因此也称为扩散方程。它不是从马氏方程而是从直接的概念推导出来的。

解此式的边界条件为：

$$P(p) = 0, \quad p > p_c$$

$$P d(p) \frac{\partial P(p)}{\partial p} \bigg|_{p=0} = 0$$

前者是实验结果，表示到达某一个高次模式群 $p_c$ 时， $\gamma(p_c) = \infty$ ，而 $p_c$ 不一定等于可能传输的全部模式群。

后一个条件代表与 $p < 0$ 的模式没有功率耦合。事实上也没有 $p < 0$ 的模式。

原则上，如果知道群时延 $\tau(p)$ ，折射率变化的指数 $\alpha$ ，和功率衰减系数 $\gamma(p)$ ，则某模式群 $p$ 的功率耦合方程可解。

解的目标是求取各基带频率 $\omega$ ，在任何地点 $z$ 的总功率 $P_T(\omega, z)$ ，即总功率分布。

实际上假使能算出它，即可得到功率的频率响应。它的富氏变换就是脉冲功率响应。<sup>[18]</sup>

其次，计算总的功率衰减系数 $\gamma_T = -\frac{1}{P_T(0, z)} - \frac{d}{dz}P_T(0, z)$ ，其中 $P_T(0, z)$ 代表 $z$ 处的载波功率，即 $\omega = 0$ 的总功率。

再次求脉冲响应展宽的均方根值 $\sigma(z)$

不论总功率 $P_T(\omega, z)$ 和脉冲展宽 $\sigma(z)$ 的暂态均与激发的波形有关。

比较带普遍意义的解法，即可以应用到各种耦合机构和各种不同的始端激发的解法见文献[18]、[19]。

$z$ 相当长而到达稳态时，不论输入脉冲形状如何，均将得：

(1) 如果脉冲展宽比输入脉冲宽得很多的话，输出脉冲将近似地为高斯形。

(2) 总功率的衰减趋近常数。

(3) 脉冲展宽与 $\sqrt{z}$ 成正比。

总结结果是由于模式耦合，产生附加损耗和减小色散。

实际计算问题尚多。前已述及，随机性畸变的统计特性不知道，此外，在光源带宽很窄，调制带宽较宽的情况下，各模式群的功率还不一定能直接相加以得出 $P_T(\omega, z)$ 来。

脉冲功率响应和脉冲功率基带频率响应有不少地方用实验来测定<sup>[28]</sup>。

## (六)

用非均匀波导作多模传输是有它的优点的，这来源于尺寸大，光纤芯子直径达几十微米，例如50—60微米、公差要求松一些，发送端激发容易一些，连接损耗小一些等等。至于光纤本身的损耗，多模和单模都可以作到每公里0.5分贝以下。缺点是有模式间色散，经过剖面的设计可以减小，再进一步作精密控制，还可以减小。所以近期内，有人估计在1983年以前，还将应用这种非均匀波导作中距离、短距离，大、中、小容量的通信。

用均匀波导作单模传输、无模式间色散。近期又发现波长在1.3微米附近，无材料色散，衰减又低，这就使这种传输方法具有很大的潜力。有人估计，用 $\lambda = 1.25$ 微米，光源的带宽 $2\sigma_\lambda = 10 \text{ \AA}$ ，具有的潜在能力达2500千兆比/秒·公里，即两者之间的距离为1000公里时，还能传输每秒2.5千兆比<sup>[19]</sup>。

缺点是尺寸小，如 $\lambda = 8.5$ 微米以下，芯子一般只有几个微米，例如4—10微米，这就发生了一系列的困难，亦即单模传输的缺点就是多模传输的优点。

为了减小这种困难，想法增加芯子的尺寸。最简单的办法是加长波长。所以说近期关于在较长波长上无材料色散和损耗小的发现，增加了实现长距离大容量通信的可能性。

为了增大芯子尺寸，人们还设想其它许多方法，如采用“W”形折射率剖面<sup>[20]</sup>，双标量模（包括 $HE_{11}$ 、 $TE_{01}$ 、 $TM_{01}$ 、 $HE_{21}$ 四只精确模）的传输等等<sup>[21]</sup>。

再次是关于集成光路问题。所谓集成光路是指应用导波技术设计制造的光元部件，亦即以光波导（平板光波导、带状光波导等）为基本结构的光学元部件，不是仅限于一般集成电路

或微波混合集成电路把许许多多的元部件集成在一起才算集成电路。可能应用到光纤通信方面的有外调制器、方向耦合器、滤波器、分并路器等等。这就是与微波相对应的一套元部件（顺便提一下实际上光波导、光集成等等都是从微波技术的基础上发展起来的）。但是它们的质量指标，还远远落后于微波元部件。此外，还有一个光纤通信是否需要极大的通信容量而迫切需要集成光路的问题。因此，集成光路应用到光纤通信方面可能还需要等待一段较长的时期。

但是，带状光波导已经很好地应用在半导体激光器上，帮助它得到大的进展。

最后，关于光纤的制造问题，本书上说得较少。现在仍然用两种方法，一为CVD或MCVD法，即化学气相沉积法或改良化学气相沉积法，以制作高纯度的石英光纤。另一为双坩埚法，用来制作多组分光纤，即从更常规的玻璃来制作光纤的<sup>[8] [22]</sup>。

叶培大

一九八〇年十二月

北京邮电学院

## 序 言

在“平方律”媒质中，亦即在介电常数随空间按平方变化为特征的媒质中，电磁波的传播曾经是电磁场理论研究中一个受喜爱的课题。然而，随着介电常数沿径向作平方变化的玻璃纤维的制造，以及这种纤维用于光成像和光通信，这个课题也已表现出实际上的重要性。在这种非均匀光波导中关于传播、分辨率和脉冲失真的实验结果和理论比较，把这个领域置于坚固的基础之上，并且促进了进一步的工作。

本书的目的是在非均匀光波导知识的主要方面提供一个统一的观点。不可避免地，对均匀介质波导也要作些简短的讨论，因为它是理解非均匀波导的基础。以本书某些章作为基础的短课程已提供给德里IIT的研究生，并且接受得还是好的。我们认为，尽管这本书有不可避免的数学性质，但是却始终将实验结果和理论作比较，并且叙述了制造技术（附录A和B），从而使得本书具有了普遍的吸引力。

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 引言 .....                | 1  |
| 第二章 平板波导的模式分析 .....         | 4  |
| 2.1 引言 .....                | 4  |
| 2.2 一般理论的考虑 .....           | 6  |
| 2.3 一种简单的平面波导 .....         | 12 |
| 2.3.1 TE 模式 .....           | 12 |
| 2.3.2 TM 模式 .....           | 17 |
| 2.4 非对称波导 .....             | 25 |
| 第三章 介电常数连续变化的平面波导 .....     | 31 |
| 3.1 平方律媒质 .....             | 32 |
| 3.1.1 模式分析 .....            | 32 |
| 3.1.2 核 .....               | 37 |
| 3.1.3 抛物线方程法 .....          | 43 |
| 3.2 指数变化的折射率 .....          | 45 |
| 3.2.1 TE 模式 .....           | 48 |
| 3.2.2 TM 模式 .....           | 51 |
| 3.3 关于 p-n 结的连续介电常数模型 ..... | 52 |
| 3.4 摘要 .....                | 57 |
| 第四章 加敷层的介质圆柱波导 .....        | 58 |
| 4.1 射线分析 .....              | 59 |
| 4.2 贝塞尔方程的解 .....           | 60 |
| 4.3 模式分析 (近似理论) .....       | 64 |
| 4.3.1 坡印亭矢量 .....           | 74 |
| 4.4 严格的模式分析 .....           | 76 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 第五章 非均匀圆波导 .....                                  | 85  |
| 5.1 模式分析 .....                                    | 86  |
| 5.1.1 核 .....                                     | 90  |
| 5.1.2 偏离轴的点上垂直入射的高斯光束的传播 .....                    | 93  |
| 5.1.3 射线的路径: 一般处理 .....                           | 95  |
| 5.1.4 近焦点的三维强度模型 .....                            | 99  |
| 5.1.5 吸收的影响 .....                                 | 102 |
| 5.2 抛物线方程的近似 .....                                | 104 |
| 5.2.1 $K_2$ 与 $z$ 无关时, 方程式(5.96)的解 .....          | 111 |
| 5.2.2 对于特定的依赖于 $K_2(z)$ 的解析解和在锥形自聚焦纤维中的射线路径 ..... | 115 |
| 5.2.3 自聚焦透镜的分辨率 .....                             | 124 |
| 5.2.4 气体透镜聚焦 .....                                | 125 |
| 5.2.5 在自聚焦纤维中随机不均匀性的影响 .....                      | 130 |
| 5.3 对一般非均匀媒质的考虑 .....                             | 133 |
| 5.4 摘要 .....                                      | 138 |
| 第六章 非均匀圆波导的矢量理论 .....                             | 139 |
| 6.1 任意非均匀性的一般解 .....                              | 139 |
| 6.2 一种平方律媒质的解 .....                               | 147 |
| 6.3 任意剖面的渐近解 .....                                | 153 |
| 6.4 近似法 .....                                     | 156 |
| 6.5 微扰法 .....                                     | 156 |
| 6.5.1 有数层的平方律媒质的微扰理论 .....                        | 158 |
| 6.5.2 由外扩散技术构成的平面波导的微扰理论 .....                    | 161 |
| 6.5.3 在一种自聚焦纤维中, 当计及高次项时的微扰理论 .....               | 162 |
| 6.5.4 为研究似透镜媒质中 $\nabla k$ 项的影响的微扰理论 .....        | 163 |
| 6.6 WKB法 .....                                    | 167 |
| 6.7 变分法 .....                                     | 172 |