成人高等教育教材

光纤通信技术

GUANGXIAN TONGXIN JISHU

孙学康 张金菊等编

北京邮电大学出版社

光纤通信技术

孙学康　张金菊　　等编

北京邮电大学出版社

·北京·

内容提要

本书是根据邮电函授教学指导委员会审议通过的教学大纲编写的.书中较全面地介绍了光纤通信系统中各部分的工作原理,简单介绍了光纤通信中的测量技术及光缆线路的施工与维护,论述了SDH光传输设备的类型和结构,并对光放大器及一些新型的光通信系统进行了介绍.本书在编写上力图做到条理清晰,对较复杂的数学推导注意讲清推导思路,力求便于自学.

本书是高等函授教材,也可作为工程技术人员的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信技术/孙学康等编著.—北京:北京邮电大学出版社,2001.3

ISBN 7-5635-0425-7

Ⅰ.光… Ⅱ.①孙…②张…③高…④刘… Ⅲ.光纤通信 Ⅳ.TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第86542号

书　　名:光纤通信技术
作　　者:孙学康　张金菊等
责任编辑:王守平
出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路10号)
　　　　邮编:100876　电话:62282185　62283578
　　　　网址:http://www.buptpress.com
经　　销:各地新华书店
印　　刷:北京市忠信诚胶印厂
印　　数:1-6000册
开　　本:787 mm×1092 mm 1/16　印张:21.125　字数:525千字
版　　次:2001年3月第1版　2001年3月第1次印刷
书　　号:ISBN 7-5635-0425-7/TN·192
定　　价:35.00元

前　　言

自从1987年在邮电高等函授中开设“光纤通信原理”课程以来，随着光纤通信技术的迅速发展，我们先后编写了四个版本的光纤通信原理教材.

这次由于教学计划的改变，将原光纤通信原理、光缆工程和光纤测量三门课合并，为此重新编写了本教材.在编写中，除了包括上述三门课中相应内容外，还注意到应使它具有便于自学的特点.

本书涉及到光纤通信领域中的主要内容及其较新的进展.其中：

第1章简单介绍了光纤通信的基本概念、特点以及光纤通信系统的基本组成.

第2章论述了光纤的结构与分类、光纤的导光原理、光纤的传输特性以及光缆的结构与分类.

第3章论述了光源、光电检测器的工作原理及光端机的构成.

第4章论述了强度调制－直接检波光通信系统的结构、系统性能指标和光缆线路的施工与维护.

第5章论述了光纤参数的测量、光端机的光接口和电接口的指标测量、光纤通信系统的指标测量.

第6章论述了SDH光传输设备的类型和结构、SDH传输系统的结构及其性能指标.

第7章论述了光放大器的结构、工作原理和特性指标.

第8章论述了各种复用方式的工作原理、特点及其中的关键技术.

第9章论述了相干光通信的基本原理和相关关键技术.

第10章论述了全光通信的概念及其中的非线性效应、光交换和光孤子技术.

由于以波动理论分析光纤时需要有“场”的理论基础，为此，在本书的开始扼要地编写了一段电磁场理论的基础知识，作为学习本书的预备知识.

本书的第1,2,7章是由张金菊同志编写；第3章及预备知识是由高炜烈同志编写；第4,6,8,9,10章是由孙学康同志编写；第5章是由刘勇同志编写.全书由张金菊同志统编.

我们要感谢为本书的编写作过贡献的北京邮电大学李玲教授和蒋佩璇教授，还要感谢长春邮电学院的朱大成教授以及南京邮电学院、西安邮电学院、北京邮电大学函授学院的为本书的编写、出版付之帮助的各位同事.

由于时间紧迫，学识有限，不妥、错误之处请不吝指正.

编　者

2000年2月

目　　录

前　言

预备知识

0.1　两种基本的研究方法 …… 1
0.2　矢量分析概述 …… 2
0.3　麦克斯韦方程组 …… 5
0.4　电磁波的波动现象和简谐时的波动方程 …… 7
0.5　均匀平面电磁波在均匀理想介质中传播 …… 9
0.6　均匀平面波在两理想介质交界面的反射和折射 …… 11
0.7　导行波和辐射波 …… 14
小　结 …… 20
复习思考题 …… 21

1　概述

1.1　光纤通信的基本概念 …… 22
1.2　光纤通信的主要特点 …… 23
1.3　光纤通信系统的基本组成 …… 23
1.4　光纤通信技术的发展趋势 …… 24

2　光纤与光缆

2.1　光纤的结构和分类 …… 26
2.2　阶跃型光纤 …… 28
2.3　渐变型光纤 …… 41
2.4　单模光纤 …… 51
2.5　光纤的传输特性 …… 57
2.6　光纤的温度特性和机械特性 …… 67
2.7　光缆的结构与种类 …… 69
2.8　简单介绍几种特殊光纤 …… 74
小　结 …… 77
复习思考题 …… 77
习　题 …… 78

3　光端机

3.1　光 源 …… 79

3.2 光源的调制 …… 97
3.3 光纤通信中的线路码型 …… 101
3.4 光发射机 …… 106
3.5 光电检测器 …… 112
3.6 光接收机 …… 118
小　结 …… 129
复习思考题 …… 130
习　题 …… 131

4 光纤通信系统

4.1 系统结构 …… 132
4.2 光纤数字通信系统的性能指标——误码率和抖动 …… 150
4.3 设计光纤通信系统时有关指标的计算与分析 …… 154
4.4 传输系统的可靠性 …… 165
4.5 光纤通信系统的施工与维护 …… 173
小　结 …… 183
复习思考题 …… 183
习　题 …… 183

5 光纤及光纤通信系统的测量

5.1 光纤参数的测量 …… 185
5.2 光端机的测量 …… 197
5.3 光纤通信系统的测量 …… 208
小　结 …… 216
复习思考题 …… 216
习　题 …… 217

6 同步数字体系

6.1 同步数字体系的产生 …… 218
6.2 SDH 复用结构 …… 223
6.3 SDH 设备 …… 227
6.4 SDH 传输系统及其安全性问题 …… 241
6.5 SDH 光传输系统的性能指标——误码和抖动性能 …… 252
小　结 …… 255
复习思考题 …… 255
习　题 …… 256

7 光放大器

7.1 光放大器的分类 …… 257

7.2 掺铒光纤放大器的结构 …… 258
7.3 掺铒光纤放大器的工作原理 …… 259
7.4 掺铒光纤放大器的特性指标 …… 260
7.5 掺铒光纤放大器在光纤通信系统中的应用 …… 262
小 结 …… 264
复习思考题 …… 264

8 多信道复用技术

8.1 复用技术的基本概念 …… 265
8.2 光波分复用技术 …… 267
8.3 密集波分复用技术 …… 275
小 结 …… 283
复习思考题 …… 283

9 相干光通信系统

9.1 相干光通信技术的基本原理 …… 284
9.2 光发射机 …… 286
9.3 光接收机 …… 287
9.4 相干光通信系统中的几个技术问题 …… 289
小 结 …… 296
复习思考题 …… 296

10 全光通信

10.1 全光通信的概念及关键技术 …… 297
10.2 光纤的非线性效应 …… 300
10.3 光弧子通信 …… 308
10.4 光交换技术 …… 317
小 结 …… 324
复习思考题 …… 324

邮电高等函授《光纤通信技术》教学大纲 …… 325

邮电高等函授 通信工程本科/通信技术专科 专业《光纤通信技术》教学进程表 …… 328

参考文献 …… 330

预备知识

内容提要

深入学习光纤理论，掌握电磁场的基本知识显然是必须的．主要内容有：

有关矢量及矢量分析的知识；

电磁场的基本方程；

电磁波的波动现象和波动方程；

均匀平面波在均匀理想媒质中的传播；

均匀平面波在两理想介质交界面上的反射和折射；

电磁波的全反射现象；

导行波的概念．

0.1 两种基本的研究方法

分析光导纤维（光纤）的导光原理有两种基本的研究方法．

0.1.1 几何光学方法

几何光学方法又称射线理论方法．采用这种方法的条件是，光波波长 λ 要远小于光波导（光纤就是一种光波导）的横向尺寸．这样，人们就可以近似认为光波波长为零（$\lambda \to 0$），于是，光的衍射现象就可以忽略，光的发射角可近似看为是零．从而，可以将光看成为一条射线．

几何光学方法就是基于这种观点，对光射线在光波导中的传播、反射、折射等问题进行分析．显然，这种方法直观、简单．

0.1.2 波动光学方法

波动光学方法又称波动理论方法．这种方法的根据是：认为光波是一种波长很短的电磁波，电磁波的传播、反射、折射等等规律应服从电磁场理论．因此，所谓波动光学方法就是根据电磁场理论对光波导中的基本问题进行分析、求解的方法．显然，相对于几何光学方法来讲，波动光学方法是一种严格、全面的分析方法．当然，学习的难度相对要大一些，抽象些．

本书对光纤传输特性的分析，更多的是使用波动光学方法．如前所述，这种方法的基础是电磁场理论．因此，在学习光纤之前需要首先对电磁场理论本身有一个起码的了解．

下面，先从掌握电磁场理论所必需的有关矢量分析入手．

0.2 矢量分析概述

0.2.1 矢量与数量

数量——又称标量.在数学上将只有大小的量称为数量.如电位、温度、能量等.

矢量——又称向量.在数学上将既有大小又有方向的量称为矢量.例如电场强度、磁场强度、力、速度等.矢量的表示方法可以用一个黑体字母,例如用 $\boldsymbol{F}$ 来表示力,也可以用一个白体字母上方加一个箭头来表示,如 $\vec{F}$.本书采用黑体字母来表示矢量.

0.2.2 单位矢量

单位矢量——它是一个矢量,但它的模值(大小)等于1,在本书中用黑体 $\boldsymbol{e}$ 来表示.单位矢量的下标表示单位矢量所指的方向.例如,$\boldsymbol{e}_{\mathrm{n}}$ 即代表指向 n 方向的单位矢量.$\boldsymbol{e}_x$,$\boldsymbol{e}_y$,$\boldsymbol{e}_z$ 分别代表直角坐标系中在 x,y,z 方向上的单位矢量.

0.2.3 矢量与它的分量间的关系

矢量可以用它的分量的矢量和来表示.例如,在直角坐标系中矢量 $\boldsymbol{A}$ 与它的三个分量 $\boldsymbol{A}_x$,$\boldsymbol{A}_y$,$\boldsymbol{A}_z$ 之间关系为

$$\boldsymbol{A} = A_x\boldsymbol{e}_x + A_y\boldsymbol{e}_y + A_z\boldsymbol{e}_z \tag{0-2-1}$$

将这种关系画出来即如图 0-2-1 所示.

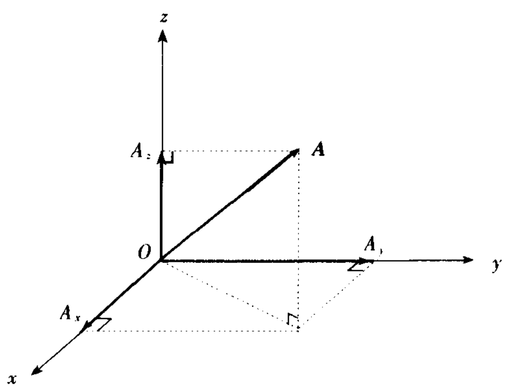

图 0-2-1 矢量与其各分量间的关系

0.2.4 场的概念 数量场 矢量场

1. 场的概念

所谓场,就是指物理量在空间或一部分空间中的分布.例如,电位在空间的分布就称为电位场;温度在空间的分布就称为温度场等等.

2. 数量场　矢量场

如果分布在空间的物理量是数量，那么这种场就称为数量场(又称标量场)，例如电位场；如果在空间分布的物理量是矢量，那么这种场就称为矢量场(又称向量场)，例如，力场、速度场、电场强度场、磁场强度场等.

弄清了上述情况以后，人们需要进一步了解这些场的有关特性，例如，一个数量场在哪个方向上增加最快？一个矢量场的发散强度和涡旋强度怎样？这样，就需研究数量场的梯度，矢量场的散度、旋度.再进一步，在本课程中为了研究光在光导纤维中电磁场存在的模式(电磁场的分布状态)、传输特性等一系列问题，就要求解光导纤维中电磁波所满足的方程(波动方程)，而这个方程就是利用物理课中学过的麦克斯韦方程组以及矢量场的散度和旋度来得到的.

为此，下面来研究数量场的梯度，矢量场的散度、旋度等问题.

0.2.5　数量场的梯度

1. 梯度的概念

在一个数量场中(例如一个描述电位分布的场)，所谓场中某点的梯度，是指在该点沿某个方向上具有最大的变化率(变化最陡)，那么，这个最大变化率就是该点梯度的值；这个具有最大变化率的方向就是梯度的方向.

显然，梯度本身既有大小又有方向，是一个矢量.一个数量场 u 的梯度(gradent)可缩写为 grad u.

2. 梯度的倒三角符号表示方法

所谓倒三角符号(称汉米尔顿算符，也称矢量微分算子)，它定义为如下一个矢量运算符号：

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\boldsymbol{e}_x + \frac{\partial}{\partial y}\boldsymbol{e}_y + \frac{\partial}{\partial z}\boldsymbol{e}_z \tag{0-2-2}$$

通过推导可得某个数量场 u 的梯度用倒三角符号表示为

$$\text{grad}\ u = \nabla u \tag{0-2-3}$$

即倒三角符号与 u 相乘.

0.2.6　矢量场的散度

1. 散度的概念

矢量场(例如由点电荷产生的电场)在某点的散度是指，场中某点单位体积矢量场发散的净通量.一个矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的散度(divergence)可缩写为 div $\boldsymbol{A}$.

2. 散度的倒三角符号表达式

根据散度的上述概念，可写出其数学的定义表达式，再经过推导，即可得到矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的散度用倒三角符号表示为

$$\text{div}\ \boldsymbol{A} = \nabla \cdot \boldsymbol{A} \tag{0-2-4}$$

即倒三角符号与 $\boldsymbol{A}$ 的点乘积.

0.2.7 矢量场的旋度

1. 旋度的概念

有些矢量场的矢量线是闭合(即首尾连接)的，例如，由恒定电流产生的磁力线就是这种情况.这种场是一种有涡旋的场，为了描写它的涡旋特性，人们引入矢量场旋度的概念.

矢量场旋度的大小是指场中某点单位面积上的最大涡旋量；其方向是具有最大涡旋时面积元的方向.一个矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的旋度(rotation)可缩写为 rot $\boldsymbol{A}$，也可写为 curt $\boldsymbol{A}$.

2. 旋度的倒三角符号表达式

根据上述旋度的概念，可写出它的定义表达式，再经过一段较长的推导，最后可得到矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的倒三角符号表达式为

$$\text{rot}\,\boldsymbol{A} = \nabla \times \boldsymbol{A} \tag{0-2-5}$$

即倒三角符号与 $\boldsymbol{A}$ 的叉积.

0.2.8 矢量恒等式

在有关的公式推导时往往会遇到如数量场 u 的梯度作散度运算；对矢量场 $\boldsymbol{A}$ 的旋度作散度运算等等.为了后面使用方便，将一部分运算结果列在下面，这种恒等式称为矢量恒等式.

$$\nabla \cdot (\nabla u) = \nabla^2 u$$
$$\nabla \times (\nabla u) = 0$$
$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$$
$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \boldsymbol{A}) - \nabla^2 \boldsymbol{A}$$

其中，u 为数量场，$\boldsymbol{A}$ 为矢量场；

∇^2称为拉普拉斯算符，在直角坐标系中为

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

在后面一节中，在将麦克斯韦方程组的积分形式推导为微分形式时，需要用到高斯散度定理和斯托克斯公式.

0.2.9 高斯(Gauss)散度定理

高斯散度定理描述了矢量场中矢量函数沿封闭曲面 S 的面积分，等于该矢量函数的散度对该曲面包围的体积的体积分，其表达式为

$$\int_S \boldsymbol{A} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S} = \int_V (\nabla \cdot \boldsymbol{A})\mathbf{d}V \tag{0-2-6}$$

(证明从略)

前面讲过，散度是描述矢量场中**一个点**上的特性，而高斯散度定理表达式左端描述的是矢量场 $\boldsymbol{A}$ **在一个范围**上的特性，因而，高斯散度定理的贡献是将一个矢量函数在一个范围上的特性与在一个点上的特性联系了起来.在数学上，就是将一个矢量函数的积分关系与微分关系联系了起来.

0.2.10 斯托克斯(Stokes)公式

斯托克斯公式描述矢量场中,矢量 $\boldsymbol{A}$ 沿闭合周界 l 的线积分,它等于这个矢量的旋度沿场中以 l 为周界的曲面的面积分,其表达式为

$$\oint_l \boldsymbol{A}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_S (\nabla \times \boldsymbol{A})\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{0-2-7}$$

(证明从略)

显然,斯托克斯公式与高斯散度定理有类似的意义,读者可通过类比看出,这里不再赘述.

0.3 麦克斯韦方程组

光波既然是一种电磁波,那么,它必然要服从电磁场的基本规律.而一切宏观电磁现象应遵循的基本规律又是麦克斯韦方程组,因此,光波在光导纤维中的传输一定服从麦克斯韦方程组,即电磁场的基本方程.

这样,当用波动理论来研究光在光纤中的传输问题时,显然应从麦克斯韦方程组出发.这也正是为什么在一些"光纤通信"的书中,对光纤分析时出现电场强度 $\boldsymbol{E}$ 和磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 这类电磁场参量的原因.

0.3.1 麦克斯韦方程组的积分形式

由物理学中的电磁学知识知道,麦克斯韦方程组的积分形式(即一切宏观电磁现象在一个范围内应满足的规律)为

$$\oint_l \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_S \left(\boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}\right)\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{0-3-1}$$

$$\oint_l \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = -\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} \tag{0-3-2}$$

$$\oint_S \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = 0 \tag{0-3-3}$$

$$\oint_S \boldsymbol{D}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = q \tag{0-3-4}$$

式中, $\boldsymbol{E}$——电场强度矢量;
$\boldsymbol{H}$——磁场强度矢量;
$\boldsymbol{B}$——磁感应强度矢量;
$\boldsymbol{D}$——电位移矢量;
$\boldsymbol{J}$——电流密度矢量;
q——自由电荷的电量.

另外,在各向同性的媒质[1]中,$\boldsymbol{D}$ 与 $\boldsymbol{E}$,$\boldsymbol{B}$ 与 $\boldsymbol{H}$ 存在如下关系

---

[1] 所谓各向同性是指在介质中,不论在什么方向加电场和磁场,介质的参量 μ 和 ϵ 的数值均保持不变.

$$D = \varepsilon E \tag{0-3-5}$$

$$B = \mu H \tag{0-3-6}$$

式中，ε——称为介质的介电常数；

μ——称为介质的磁导率.

方程组中各式的物理意义为：

式(0-3-1)——电场随时间变化，将产生变化磁场. 同时，传导电流也将产生磁场. 这个方程式称为全电流定律.

式(0-3-2)——表示变化磁场，将感应出变化电场. 这个方程称为电磁感应定律，又称为法拉第定律.

式(0-3-3)——表示磁力线是闭合的，无头无尾的. 这个方程称为磁通连续性定理.

式(0-3-4)——表示电位移矢量与源(自由电荷)之间的关系. 这个方程称为高斯定律.

0.3.2 麦克斯韦方程组的微分形式

所谓微分形式是指在一个点上电磁场应遵循的规律.

首先将积分形式的麦克斯韦方程组中的(0-3-1)式推导为相应的微分形式.

将斯托克斯公式中的 $\boldsymbol{A}$ 换为 $\boldsymbol{H}$，则有

$$\oint_l \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_S (\nabla \times \boldsymbol{H})\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

将上式代入全电流定律式(0-3-1)中，经简单推导即可得到

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}$$

同理，将斯托克斯公式中的 $\boldsymbol{A}$ 换为 $\boldsymbol{E}$，再代入式(0-3-2)中经推导，即可得到电磁感应定律的微分形式

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

由高斯散度定理，并将式中 $\boldsymbol{A}$ 换为 $\boldsymbol{B}$，有

$$\oint_S \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S} = \int_V (\nabla \cdot \boldsymbol{B})\mathrm{d}V$$

将上式代入(0-3-3)中，经简单推导即可得到磁通连续性定理的微分形式

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$$

同理，由高斯散度定理，并将式中 $\boldsymbol{A}$ 换为 $\boldsymbol{E}$，再代入式(0-3-4)中，经简单推导即可得到高斯定理的微分形式

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho$$

式中 ρ 为体电荷密度(单位体积中自由电荷的电荷量).

将上面四个表达式写在一起，即为麦克斯韦方程组的微分形式

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{0-3-7}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{0-3-8}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{0-3-9}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{0-3-10}$$

0.3.3 复数形式的麦克斯韦方程组

由微分形式的麦克斯韦方程组(0-3-7)~(0-3-10)以及倒三角符号的定义公式(0-2-2)可以想像,如果真的直接利用麦克斯韦方程组的微分形式进行运算,那么所遇到的将是有4个自变量的偏微分方程.例如,在直角坐标系中是 x,y,z,t 这样4个自变量.显然,这将给运算带来困难.

但是,如仔细考虑将会发现,这里面的自变量 t 是有可能暂时去掉的.因为,如果所研究的时变电磁场中的源 $\rho,\boldsymbol{J}$ 随时间作简谐变化,①那么 $\boldsymbol{E},\boldsymbol{D},\boldsymbol{B},\boldsymbol{H}$ 也将随时间作简谐变化,经过推导(类似于交流电路中的办法),式(0-3-7)~(0-3-10)的微分形式的麦克斯韦方程组就变化为如下形式

$$\nabla \times \dot{\boldsymbol{H}} = \dot{\boldsymbol{J}} + \mathrm{j}\omega\dot{\boldsymbol{D}} \tag{0-3-11}$$

$$\nabla \times \dot{\boldsymbol{E}} = -\mathrm{j}\omega\dot{\boldsymbol{B}} \tag{0-3-12}$$

$$\nabla \cdot \dot{\boldsymbol{B}} = 0 \tag{0-3-13}$$

$$\nabla \cdot \dot{\boldsymbol{D}} = \dot{\rho} \tag{0-3-14}$$

式中 $\dot{\boldsymbol{E}},\dot{\boldsymbol{D}},\dot{\boldsymbol{B}},\dot{\boldsymbol{H}}$ 都是复数形②(类似于交流电路中的 $\dot{U},\dot{I}$),这就是复数形式麦克斯韦方程组微分形式.

从式中看出,方程中自变量 t 被消掉了,从而使方程从4个自变量变为3个,这对运算当然是十分有利的.

同理,还可以得到积分形式麦克斯韦方程组的复数形式,这里不再写出来.

光波在光纤中传输时,光波中的 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 就应满足该方程式.然而由式又可看出,这种关系是不便于求解的.因为在一个表达式中既有 $\boldsymbol{E}$ 又有 $\boldsymbol{H}$,因此,为了求解还需进一步推导,这就是下一节将讨论的问题.

0.4 电磁波的波动现象和简谐时的波动方程

0.4.1 电磁波的波动现象

由麦克斯韦方程组中的式(0-3-1)看出,时变电场可以激发出时变磁场;由式(0-3-2)看出,时变磁场又可以激发出时变电场(也就是物理学中讲的磁场变化会激发出感应电动势).当然这个新产生的变化电场又将激发出变化磁场;这个变化磁场又将激发出变化电场……如此这样不断地循环下去,变化电场和变化磁场之间就这样互相激发,互相支持,前者可以是后者的源.显然,在这种过程中电磁场就可以脱离最初的激发源,而由变化电场和变化磁场互相激发,像波浪一样,一环一环的由近及远地传播出去,从而形成了电磁波的传播现象.

---

① 如果不是简谐变化则可用傅里叶变换,将非简谐波分解为简谐波来处理.

② 按照习惯,复数形式中 $\dot{\boldsymbol{E}}$、$\dot{\boldsymbol{D}}$、$\dot{\boldsymbol{B}}$、$\dot{\boldsymbol{H}}$ 上的小圆点可以不标注出来.

0.4.2 简谐时变场的波动方程——亥姆霍兹方程

上一段是从物理概念来解释电磁波的传播现象.但是,如果要定量讨论光波(电磁波)的传播,正如前面所讲,就需要根据复数麦克斯韦方程组的微分形式推导出只有 $\boldsymbol{E}$ 或只有 $\boldsymbol{H}$ 的波动方程,即亥姆霍兹(Helmholtz)方程式.推导过程如下:

条件:无源,即电磁波离开了最初的激发源,故 $\rho=0, \boldsymbol{J}=0$;传播的介质是理想(即不导电)、均匀、线性、各向同性的,即 μ, ε 是常数.再考虑到 $\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}$ 及 $\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E}$ 的关系,方程(0-3-11)~(0-3-14)就变为

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\mathrm{j}\omega\varepsilon\boldsymbol{E} \tag{0-4-1}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\mathrm{j}\omega\mu\boldsymbol{H} \tag{0-4-2}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{H}=0 \tag{0-4-3}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{E}=0 \tag{0-4-4}$$

这就是在简谐、无源、介质是理想、均匀、线性、各向同性条件下的麦克斯韦方程组的微分形式.

将式(0-4-2)两边取旋度,有

$$\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{E}=\nabla\times(-\mathrm{j}\omega\mu\boldsymbol{H})$$

根据矢量恒等式,等式左端可得

$$\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{E}=\nabla(\nabla\cdot\boldsymbol{E})-\nabla^2\boldsymbol{E}$$

因为是无源情况,故 $\nabla\cdot\boldsymbol{E}=0$,因此等式左端变为

$$\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{E}=-\nabla^2 E$$

等式右端:

$$\nabla\times(-\mathrm{j}\omega\mu\boldsymbol{H})=-\mathrm{j}\omega\mu(\nabla\times\boldsymbol{H})$$

将式(0-4-1)代入上式,可得

$$\nabla\times(-\mathrm{j}\omega\mu\boldsymbol{H})=-\mathrm{j}\omega\mu(\mathrm{j}\omega\varepsilon\boldsymbol{E})=\omega^2\mu\varepsilon\boldsymbol{E}$$

将上面对于等式左端、右端的推导结果合起来,即得到

$$\nabla^2\boldsymbol{E}+\omega^2\mu\varepsilon\boldsymbol{E}=0$$

若令

$$k^2=\omega^2\mu\varepsilon \tag{0-4-5}$$

则最后得到

$$\nabla^2\boldsymbol{E}+k^2\boldsymbol{E}=0 \tag{0-4-6}$$

同理,以式(0-4-1)为基础,经类似推导,可得关于 $\boldsymbol{H}$ 的方程:

$$\nabla^2\boldsymbol{H}+k^2\boldsymbol{H}=0 \tag{0-4-7}$$

式(0-4-6)及(0-4-7)就是著名的亥姆霍兹方程式.光波在光纤中传播就应满足这组方程.

k 的物理意义由后面的讨论中将会看到,是电磁波在自由空间传播时的相位常数,即电磁波每传播单位距离产生的相位变化.

0.4.3 方程求解前的说明

这个方程从数学上讲,是一个三维、二阶齐次偏微分方程;在实际问题中则对应于电磁波在自由空间传播应满足的关系,也对应于光波在光纤中传输应满足的关系,当然也对应于微波在波导管中传输应满足的关系,如此等等.这是因为这些情况都是电磁波离开了激发源

后传输的情况，即无源情况.

下面分析电磁波传播中最简单的情况——电磁波在自由空间传播时的情况，理应从求解这个亥姆霍兹方程入手.分析完最简单情况之后，再分析光波在光纤中的传输时，显然也应求解这个方程.如果要严格分析光在激光器的光学谐振腔中的状况，当然也应求解这个方程(在微波、卫星通信中也是这样).

但是，对于上述的这几种情况又有不同之处，即边界状况不同.自由空间传播时是没有边界的，在光纤中传输时是介质边界，在金属波导管中传输时，是金属导体边界……因此针对上述不同情况求解波动方程时所采用的方法和过程是有差别的.这点读者在后面的学习中会明显看到.

0.5 均匀平面电磁波在均匀理想介质中传播

本节将介绍求解亥姆霍兹方程中的最简单的一种情况，即平面电磁波在没有边界限制的无限空间中传播时方程的求解，并分析解答、研究它的传播特性，为后面研究光在光纤中的传输打下基础.

0.5.1 假设条件

为了使亥姆霍兹方程的求解更加简单，再进一步作一些理想情况的假设.

1. 所传播的电磁波等相位面(将电磁波中相位相同的点连起来构成的面)是一个平面.

2. 在这个等相位面上任意点的 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 的大小相等方向相同，即是一个均匀的平面波.若假设等相位面是处在 x-y 平面上，电磁波沿 z 方向传播，则在数学上上述假设就应表示为

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial x}=0;\quad \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial y}=0 \tag{0-5-1}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial x}=0;\quad \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial y}=0 \tag{0-5-2}$$

0.5.2 求解

将上述假设条件代入亥姆霍兹方程(0-4-6)及(0-4-7)，经过一番推导可得到

$$\frac{\mathrm{d}^2 \dot{E}_x}{\mathrm{d}z^2}+k^2\dot{E}_x=0 \tag{0-5-3}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 \dot{H}_y}{\mathrm{d}z^2}+k^2\dot{H}_y=0 \tag{0-5-4}$$

这就是均匀平面电磁波在均匀理想介质中传播时应满足的方程式，它们是一维齐次二阶常微分方程.

根据高等数学中常微分方程的理论，稍经推导可直接写出它们的解答是

$$\dot{E}_x(z)=E_{\mathrm{m}}^{+}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(kz-\Phi^{+})} \tag{0-5-5}$$

$$\dot{H}_y(z)=\frac{E_{\mathrm{m}}^{+}}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(kz-\Phi^{+})} \tag{0-5-6}$$

参照交流电路理论可知这个解答是复数形式.为了便于理解和分析,根据交流电路理论,还可写为瞬时值形式:

$$E_x(z,t) = E_m^+ \cos(\omega t - kz + \Phi^+) \tag{0-5-7}$$

$$H_y(z,t) = \frac{E_m^+}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}} \cos(\omega t - kz + \Phi^+)) \tag{0-5-8}$$

这就是根据亥姆霍兹方程解出的均匀平面波在均匀理想介质中传播时 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 应满足的关系.由式看出,它是一个随时间 t 作简谐变化的波,而且随着传播距离 z 的增加相位越来越落后.由物理概念可理解,这是一个入射波.当然,在数学上求解时还得出一项随距离增加相位超前的反射波,但因现在是在无限空间中传播,不存在反射波,故不写出来.

0.5.3 均匀平面波的传播特性

下面根据上述均匀平面波的数学表达式,分析它的传播特性.

1. 传播速度 v_p

如果让均匀平面波的数学表达式(0-5-7)中的相位部分保持不变,只研究在单位时间内,这个相位不变的点移动了多少距离,那么根据物理概念可知,这就是等相位面的传播速度 v_p.令

$$(\omega t - kz + \Phi^+) = 常数$$

将上式两边对时间 t 求导,稍加推导即可得到均匀平面波等相位面的传播速度 v_p 为

$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} \tag{0-5-9}$$

由式(0-4-5),知 $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$,再代入式(0-5-9),最后得到

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{0-5-10}$$

由式(0-5-10)可知,均匀平面电磁波在均匀理想介质中传播时,其等相位面传播的速度,只与介质参量 μ,ε 有关.

如果均匀平面电磁波是在真空中传播,则

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \approx 3\times 10^8\ \mathrm{m/s} \tag{0-5-11}$$

即是光速.这也是证明光波是电磁波的一个依据.

2. 相位常数 k

由式(0-5-7)和(0-5-8)看出,电磁波的相位为

$$(\omega t - kz + \Phi^+)$$

其中与距离 z 有关的为 kz,其意义是沿 z 方向传播了距离 z 时相位变化了 kz.因此,k 的物理意义就是均匀平面电磁波在无限大均匀介质中,每传播单位距离产生的相位变化,故称相位常数,又称波数.

由式(0-5-9)可得到

$$k = \frac{\omega}{v_p} \tag{0-5-12}$$