



全国普通高校通信工程专业规划教材

微波技术基础一本通

——概要、答疑、题解、实验、自测

全绍辉 曹红燕 编著

清华大学出版社



2013

全国普通高校通信工程专业规划教材

微波技术基础一本通

——概要、答疑、题解、实验、自测

全绍辉 曹红燕 编著

北方工业大学图书馆



C00338977

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书涵盖了微波技术基础的概要、答疑、例题详解、习题解答、实验实践、自测题等内容。前5章的每章内容分为四部分,包括基本概念、理论、公式,常见问题答疑,例题详解,习题解答。第6章为微波技术实验,包括一组分类开放式实验和四组常规波导测量线实验。附录A中收集了七套“微波技术”课程的自测题(附参考答案),附录B中包含了三组网络分析仪实验,附录C给出了波导测量线实验的详细操作步骤和提示。本书教学和教辅相关的所有资料均在微波学堂网(wbxt.buaa.edu.cn)更新和下载,并可实时在线答疑。

本书可以作为“微波技术”课程的学习指导书和实验实践指导书,同时也可以作为微波技术基础知识整体学习和复习的简易教程。另外,本书还可供电磁场与微波技术专业的从业人员,如微波工程师、射频工程师、天线工程师等作为工具书参考和查用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

微波技术基础一本通:概要、答疑、题解、实验、自测/全绍辉等编著. —北京:清华大学出版社, 2013.8

全国普通高校通信工程专业规划教材

ISBN 978-7-302-30810-2

I. ①微… II. ①全… III. ①微波技术—高等学校—教材 IV. ①TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 287440 号

责任编辑:梁颖 薛阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁毅

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.75 插 页:1 字 数:400千字

版 次:2013年8月第1版 印 次:2013年8月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:33.00元

产品编号:049945-01

前言

对于一门课程的初学者,尤其是大学本科阶段的学生而言,在学习过程中通常会关心或遇到以下几方面的问题。

- (1) 这门课程讲授的重点内容是什么?能否给出一个学习概要或大纲?
- (2) 课程初学时经常遇到一些疑难问题,迫切需要专业解答。
- (3) 是否有课程的典型例题详解?能否给出各类题目的求解思路?
- (4) 是否有课后习题或作业题参考答案?以检查自己解题是否正确。
- (5) 课程是否有实验?实验该怎么做?在课程学习基础上,能否提供一些与个人长远发展深造及实际工程科研结合紧密的实验实践题目?
- (6) 课程考试要考什么?能否提供一些模拟试题?

在“微波技术”课程教学中,当然也存在上述问题,而针对这些问题,本书均进行了完整的覆盖和解答,希望能对大学中“微波技术”课程的初学者和社会上“微波技术”课程的自学者提供帮助。

本书涵盖了微波技术基础的概要、答疑、例题详解、习题解答、实验实践、自测题,其编写主要参考了编者于2011年4月出版的《微波技术基础》以及北京航空航天大学“微波技术”课程的实验实践安排,同时也借鉴了国内外其他知名教材及同类书籍的编排方式。

全书包括6章。前五章的每章内容分为四部分,包括基本概念、理论、公式,常见问题的答疑,例题详解,习题解答。第6章为微波技术实验,包括一组分类开放式实验和四组常规波导测量线实验。附录A中收集了七套“微波技术”课程的自测题(附参考答案),附录B中包含了三组网络分析仪实验,附录C给出了波导测量线实验的详细操作步骤和提示。

概要部分是对“微波技术”课程主要内容的总结,包含了微波技术基础课程的主要基本概念、理论、公式,并进行简练明确的解释、说明。这部分内容可以有效地帮助读者对微波技术基础有一个快速、系统、全面的把握和学习,掌握关键要点及各部分的关系,提高课程学习和复习的效率。

答疑部分的课程疑难问题来源于教学实践,是在多年课程实践中对初学者各类答疑问题的汇总。在这部分内容中,针对一些初学者在学习经常提出的疑难问题,以问答的形式进行了解释、说明,使初学者对知识能理解得更深入,学习能更有针对性。

学好一门课程,必须完成大量课程练习题。本书除了给出一些习题的规范求解步骤和答案外,还针对一些微波技术基础的典型例题进行了详细求解和说明,可以帮助初学

者掌握正确的解题思路和方法。本书附录所提供的测试题则可以供学生检验学习效果。

“微波技术”课程是一门偏实践的基础课,因此在课程学习中应完成必要的实验实践。本书提供的微波技术实验主要以波导测量线实验为主(6.2节实验二到6.5节实验五),并辅助以信息收集、软件仿真、软件设计形式的分类开放式实验(6.1节实验一),也提供了与现代微波工程结合更紧密的网络分析仪实验(附录B)。上述实验实践安排有以下特点。

(1) 既包括软件仿真设计又包括硬件操作。

(2) 既包括典型的射频波段(3.2GHz以下,网络分析仪实验),又包括最常用的微波波段(X波段,测量线实验)。

(3) 既包含同轴线系统(网络分析仪实验),又包含波导系统(测量线实验)。

(4) 采用重复验证性实验(6.2节实验二到6.5节实验五,附录B的B1节实验一、B2节实验二)与自主设计实验(6.1节实验一、附录B的B3节实验三)相结合的方法。

(5) 实验实践安排与学生实际需求、科研工程实际问题接轨,增强了实验教学的实用性和前沿性。

综上所述,本书可以作为电子信息类、通信工程类各专业的“微波技术”课程的学习指导书和实验实践指导书,也可以作为一本微波技术基础知识整体学习和复习的简易教程。本书也可供无线通信和电磁场与微波技术专业的从业人员,如微波工程师、射频工程师、天线工程师作为工具书参考和查用。

在本书完成之际,特别要感谢董金明教授、林萍实副教授、何国瑜教授、吕善伟教授等前辈教师对编著者的无私帮助。感谢杨晓琳、刘西柯、石磊、王超、宋志滢、杨杭、谢永鹏、于同飞、刘琳、刘庆辉、樊勇、夏丰、李栋、石鑫、高成韬、赵英华、王正鹏、万亮、曹贤德、刘骁等研究生和本科生,他们为本书初稿的形成、编辑和修订做了大量工作。同时,也非常感谢历届“微波技术”课程上给予编著者大力支持和帮助的全体同学。

本书的编写和出版得到北京航空航天大学“十一五”规划教材立项、北京航空航天大学研究生精品课程建设项目(200904)、北京航空航天大学研究生教育与发展研究专项基金(201202)、国家自然科学基金项目(60771011)、质检公益性行业科研专项(201110005)的资助,特此致谢。

编著者热切希望通过本书与广大读者朋友交流微波技术的学习和教学方法,共同促进和提高微波技术的学习和教学质量。由于编著者水平有限,本书难免存在一些缺点和错误,敬请广大读者朋友批评指正。

本书教学和教辅相关的所有资料均在微波学堂网(wbxt.buaa.edu.cn)更新和下载,并可实时在线答疑。

编著者

2012.7



第 1 章 电磁场和电磁波基础	1
1.1 基本概念、理论、公式	2
1.1.1 自由空间场定律	2
1.1.2 物质中场定律	2
1.1.3 自由空间边界条件	3
1.1.4 不同物质交界面边界条件	3
1.1.5 自由空间本构关系和欧姆定律	3
1.1.6 简单媒质本构关系和欧姆定律	4
1.1.7 广义线性媒质本构关系和欧姆定律	4
1.1.8 无外加源条件下的场定律(时域)	4
1.1.9 波动方程(时域)	5
1.1.10 复振幅和瞬时量的转换	5
1.1.11 复矢量和瞬时矢量的转换	5
1.1.12 复数场定律(频域)	6
1.1.13 复数波方程(频域)	6
1.1.14 波数和波阻抗	7
1.1.15 相速度和相波长	7
1.1.16 群速度和群延时	8
1.1.17 媒质色散	8
1.1.18 自由空间中的波	8
1.1.19 理想介质中的波	9
1.1.20 导电媒质中的波	9
1.1.21 良导体中的波	9
1.2 常见问题答疑	10
1.3 习题解答	11
第 2 章 传输线理论	13
2.1 基本概念、理论、公式	14
2.1.1 研究对象——长线	14

目录

2.1.2	长线	14
2.1.3	集总参数电路和分布参数电路	15
2.1.4	分布参数电路处理办法	15
2.1.5	匹配与失配	15
2.1.6	特性阻抗	16
2.1.7	传播常数——传输线的传播特性参量	17
2.1.8	无耗双导体传输线相位常数与周围媒质波数关系	17
2.1.9	传输线的三种典型工作状态：行波、驻波、行驻波	17
2.1.10	传输线方程	18
2.1.11	传输线电压、电流解	19
2.1.12	传输线的阻抗变换性	21
2.1.13	短路线与开路线	21
2.1.14	通过传输线开路 and 短路计算其特性阻抗	21
2.1.15	传输线工作状态参量	22
2.1.16	阻抗圆图	22
2.1.17	导纳圆图	23
2.1.18	四分之一波长匹配器	24
2.1.19	单支节匹配器	24
2.1.20	双支节匹配器	25
2.1.21	传输功率	26
2.2	常见问题答疑	27
2.2.1	长线相关问题	27
2.2.2	圆图及匹配相关问题	28
2.2.3	其他问题	30
2.3	例题详解	31
2.4	习题解答	39
第3章 波导理论		71
3.1	基本概念、理论、公式	72
3.1.1	研究对象——导波与波导	72
3.1.2	分离变量——时空分离	72

3.1.3	矢量分解——纵横分离	73
3.1.4	分离变量——纵横分离	73
3.1.5	分布函数和传播因子	74
3.1.6	纵向场法——用纵向场分量表示全部横向场分量	74
3.1.7	边界条件	75
3.1.8	分离变量——横向谐振原理	75
3.1.9	模式(波型)	76
3.1.10	矩形波导的模式	76
3.1.11	圆波导的模式	77
3.1.12	模式的导通和截止	78
3.1.13	几种波长定义和关系	79
3.1.14	模式简并	79
3.1.15	传播特性参量	80
3.1.16	各种传输线主模	80
3.1.17	矩形波导主模	81
3.1.18	圆波导的三种常用模式	83
3.1.19	波导色散	84
3.1.20	色散波	84
3.2	常见问题答疑	84
3.2.1	导行波相关问题	84
3.2.2	矩形波导相关问题	87
3.2.3	圆波导相关问题	89
3.3	例题详解	89
3.4	习题解答	93
第4章 微波网络		113
4.1	基本概念、理论、公式	114
4.1.1	研究对象——微波结	114
4.1.2	微波等效电路原理	114
4.1.3	单模波导等效为双导线	114
4.1.4	微波元件等效为网络	115

目录

85	4.1.5	网络参量之电路参量	116
85	4.1.6	阻抗参量	116
85	4.1.7	导纳参量	116
85	4.1.8	转移参量	117
85	4.1.9	电路参量的归一化	117
85	4.1.10	网络参量之波参量	118
85	4.1.11	进波和出波	118
85	4.1.12	散射参量	118
77	4.1.13	传输参量	118
85	4.1.14	各种网络参量的转换关系	119
85	4.1.15	互易性(可逆性)	119
85	4.1.16	对称性	120
88	4.1.17	无耗性	121
88	4.1.18	互易无耗网络	121
18	4.1.19	网络外特性参量	122
88	4.1.20	电压传输系数	122
48	4.1.21	插入衰减	122
48	4.1.22	插入相移	122
48	4.1.23	输入驻波比	122
48	4.1.24	参考面移动对网络参量的影响	123
78	4.2	常见问题答疑	123
88	4.2.1	等效特性阻抗相关问题	123
88	4.2.2	S参量相关问题	124
88	4.2.3	其他问题	125
	4.3	例题详解	126
	4.4	习题解答	128
111	第5章	微波元件	141
111	5.1	基本概念、理论、公式	142
111	5.1.1	短路活塞	142
111	5.1.2	匹配负载	142

5.1.3	扼流短路活塞原理	142
5.1.4	失配负载	143
5.1.5	理想衰减器	143
5.1.6	理想相移器	143
5.1.7	环形器	143
5.1.8	E-T 分支	143
5.1.9	H-T 分支	144
5.1.10	双 T	144
5.1.11	魔 T	144
5.1.12	定向耦合器	145
5.2	常见问题答疑	145
5.3	例题详解	146
5.4	习题解答	149
第 6 章	微波技术实验	154
6.1	实验 1 分类开放式实验实践	155
6.1.1	实验目的	155
6.1.2	实验选题和考评	155
6.1.3	信息收集类实验实践	156
6.1.4	软件设计类实验实践	156
6.1.5	软件仿真类实验实践	157
6.2	实验 2 测量线的使用及参量测量	158
6.2.1	实验目的	158
6.2.2	实验设备	158
6.2.3	实验原理	158
6.2.4	实验步骤	166
6.2.5	思考题	167
6.3	实验 3 阻抗匹配技术	168
6.3.1	实验目的	168
6.3.2	实验设备	168
6.3.3	实验原理	168

目录

6.3.4	实验步骤	170
6.3.5	思考题	171
6.4	实验4 金属销钉电纳的测量	171
6.4.1	实验目的	171
6.4.2	实验设备	172
6.4.3	实验原理	172
6.4.4	实验步骤	173
6.4.5	思考题	173
6.5	实验5 二端口微波网络参量测量	173
6.5.1	实验目的	173
6.5.2	实验设备	174
6.5.3	实验原理	174
6.5.4	实验步骤	178
6.5.5	思考题	179
附录A 自测题(附参考答案)		
A.1	自测题1	180
A.2	自测题2	183
A.3	自测题3	188
A.4	自测题4	191
A.5	自测题5	196
A.6	自测题6	200
A.7	自测题7	204
附录B 网络分析仪实验		
B.1	传输线基本概念和圆图实验	211
B1.1	阻抗圆图	211
B1.2	阻抗圆图用作导纳圆图	215
B.2	同轴电缆的常规测量	216
B2.1	驻波、插损测量	216
B2.2	特性阻抗 Z_0 的测量	220

B2.3 时域故障定位检查	222
B.3 自主设计实验	224
附录C 测量线实验步骤和提示	225
C.1 测量线及其使用	225
C.2 阻抗测量与阻抗匹配	226
C.3 金属销钉电纳的测量	229
C.4 二端口微波网络参量的测量	231
附录 D 微波实验常用数据表	236
主要参考文献	238

电磁场和电磁波基础

1.1 基本概念、理论、公式

1.1.1 自由空间场定律

设在自由空间良态域中,某点的电荷密度为 ρ ,电流密度为 $\vec{J}$ 。由源和其他场产生的电场强度为 $\vec{E}$,由源和其他场产生的磁感应强度为 $\vec{B}$ 。自由空间场定律描述纯粹的源 ρ 、 $\vec{J}$ 和它们所产生的场 $\vec{E}$ 、 $\vec{B}$ 之间的关系,有

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1a)$$

$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{J} + \frac{\partial \epsilon_0 \vec{E}}{\partial t} \quad (1.1b)$$

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \vec{E} = \rho \quad (1.1c)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.1d)$$

$\vec{J}$ 和 ρ 之间满足电荷守恒定律,即有

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.2)$$

1.1.2 物质中场定律

设在物质良态域中,某点的自由电荷密度为 ρ_f ,自由电流密度为 $\vec{J}_f$,物质极化强度为 $\vec{P}$,磁化强度为 $\vec{M}$ 。由源和其他场产生的电场强度为 $\vec{E}$,由源和其他场产生的磁感应强度为 $\vec{B}$ 。引入辅助物理量 $\vec{D}$ (电通密度矢量)、 $\vec{H}$ (磁场强度),分别定义为

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (1.3)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad (1.4)$$

则所有场量和源量满足的场定律为

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.5a)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_f + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.5b)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad (1.5c)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.5d)$$

实际上,上述各式适用于任何条件,包括自由空间和物质。 $\vec{J}_f$ 和 ρ_f 之间满足电荷守恒定律,即

$$\nabla \cdot \vec{J}_f = -\frac{\partial \rho_f}{\partial t} \quad (1.6)$$

1.1.3 自由空间边界条件

在自由空间中厚度无限薄的某曲面,假设其上存在面电流 $\vec{K}$ 、面电荷 η ,则在曲面两侧(均为自由空间)无限靠近该曲面位置的场量满足以下关系。

$$\hat{i}_n \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (1.7a)$$

$$\hat{i}_n \times \left(\frac{\vec{B}_1}{\mu_0} - \frac{\vec{B}_2}{\mu_0} \right) = \vec{K} \quad (1.7b)$$

$$\hat{i}_n \cdot (\epsilon_0 \vec{E}_1 - \epsilon_0 \vec{E}_2) = \eta \quad (1.7c)$$

$$\hat{i}_n \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (1.7d)$$

$\hat{i}_n$ 为曲面法线方向,从区域 2 指向区域 1,上述各式为自由空间的边界条件。 $\vec{K}$ 和 η 为任意可能的面电流密度和面电荷密度,二者由电荷守恒定律对应的电流的边界条件约束,即

$$\hat{i}_n \cdot (\vec{J}_1 - \vec{J}_2) + \nabla_s \cdot \vec{K} = -\frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (1.8)$$

1.1.4 不同物质交界面边界条件

假设不同物质交界面存在无限薄曲面,则在其两侧(分别为物质 1 和物质 2)无限靠近该曲面位置的场量满足不同物质交界面边界条件,有

$$\hat{i}_n \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (1.9a)$$

$$\hat{i}_n \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) = \vec{K}_f \quad (1.9b)$$

$$\hat{i}_n \cdot (\vec{D}_1 - \vec{D}_2) = \eta_f \quad (1.9c)$$

$$\hat{i}_n \cdot (\vec{B}_1 - \vec{B}_2) = 0 \quad (1.9d)$$

上式中的 $\vec{K}_f$ 和 η_f 为物质交界面上的自由面电流密度和面电荷密度。 $\vec{K}_f$ 和 η_f 具有假设的性质,一般并不存在。实际中可能存在 $\vec{K}_f$ 和 η_f 的典型情况如下。

(1) 在时变场条件下,理想导体表面可能存在 $\vec{K}_f$ 和 η_f ;

(2) 在静态场条件下,导体表面或不同导体交界面可能存在 η_f 。

1.1.5 自由空间本构关系和欧姆定律

在自由空间中,传导电流 $\vec{J}_c$ 为零,即有

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (1.10)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.11)$$

$$\vec{J}_c = 0 \quad (1.12)$$

1.1.6 简单媒质本构关系和欧姆定律

在简单媒质中,设媒质介电常数为 ϵ 、磁导率为 μ 、电导率为 σ ,则有

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (1.13)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.14)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (1.15)$$

1.1.7 广义线性媒质本构关系和欧姆定律

对于广义线性媒质,极化、磁化乃至传导的响应不是即时的, $\vec{D}$ 、 $\vec{B}$ 、 $\vec{J}_c$ 。不仅取决于 $\vec{E}$ 、 $\vec{H}$ 现在的值,还与 $\vec{E}$ 、 $\vec{H}$ 对时间的各阶导数有关,即可以表示为

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \mu_1 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu_2 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} + \dots \quad (1.16)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \epsilon_1 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \epsilon_2 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \dots \quad (1.17)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} + \sigma_1 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma_2 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \dots \quad (1.18)$$

根据后面介绍的复数场量和方程转换关系,式(1.16)、式(1.17)、式(1.18)对应的复数形式为

$$\dot{\vec{B}} = \mu \dot{\vec{H}} + (j\omega)\mu_1 \dot{\vec{H}} + (j\omega)^2 \mu_2 \dot{\vec{H}} + \dots = \dot{\mu} \dot{\vec{H}} \quad (1.19)$$

$$\dot{\vec{D}} = \epsilon \dot{\vec{E}} + (j\omega)\epsilon_1 \dot{\vec{E}} + (j\omega)^2 \epsilon_2 \dot{\vec{E}} + \dots = \dot{\epsilon} \dot{\vec{E}} \quad (1.20)$$

$$\dot{\vec{J}}_c = \sigma \dot{\vec{E}} + (j\omega)\sigma_1 \dot{\vec{E}} + (j\omega)^2 \sigma_2 \dot{\vec{E}} + \dots = \dot{\sigma} \dot{\vec{E}} \quad (1.21)$$

上述表达式与前面自由空间及简单媒质本构方程、欧姆定律对应的复数形式类似,但 $\dot{\epsilon}$ 、 $\dot{\mu}$ 、 $\dot{\sigma}$ 一般为复数。

1.1.8 无外加源条件下的场定律(时域)

在理想介质中,假设无外加源 $\vec{J}_f$ 和 ρ_f ,并且媒质均匀,则有

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.22a)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.22b)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (1.22c)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (1.22d)$$

1.1.9 波动方程(时域)

联立式(1.22a)~式(1.22d),可推导出只关于 $\vec{E}$ 或 $\vec{H}$ 的方程,即有

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.23a)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.23b)$$

其中 $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ 为媒质波速。上述两方程均为瞬时矢量波动方程,又称瞬时矢量亥姆霍兹方程。

1.1.10 复振幅和瞬时量的转换

当时谐量(或正弦量)的幅度和初相随空间 z 坐标变化时,对应瞬时量可表示为

$$u(z, t) = A(z) \cos[\omega t + \phi(z)] \quad (1.24a)$$

$$u(z, t) = \operatorname{Re}[A(z)e^{j\phi(z)}e^{j\omega t}] \quad (1.24b)$$

复振幅的模即为对应时谐瞬时量的幅度,辐角即为对应时谐瞬时量的初相,有

$$\dot{U}(z) = A(z)e^{j\phi(z)} \quad (1.25)$$

转换关系如图 1.1 所示。

1.1.11 复矢量和瞬时矢量的转换

对瞬时时谐矢量,其每一分量均满足瞬时标量的变换规则,对应的复数表示称为复矢量。其转换关系如图 1.2 所示。

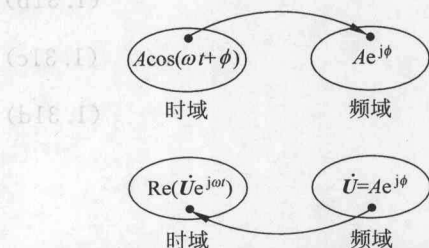


图 1.1 复振幅和对应瞬时标量的转换关系

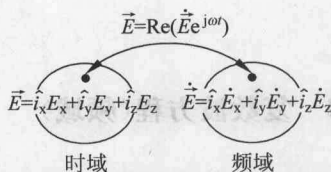


图 1.2 复矢量和对应瞬时矢量的转换关系

瞬时矢量及分量表示为