

电 子 科 技 大 学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

# 硕士学位论文

MASTER THESIS



论文题目      时域积分方程时间步进算法及其快速算法

---

学科专业      无线电物理

学      号      201421040223

作者姓名      王稳

指导老师      赖生建    副教授

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

UDC 注 1 \_\_\_\_\_

# 学 位 论 文

时域积分方程时间步进算法及其快速算法

(题名和副题名)

王稳

(作者姓名)

指导老师

赖生建 副教授

电子科技大学 成都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别 硕士 学科专业 无线电物理

提交论文日期 \_\_\_\_\_ 论文答辩日期 \_\_\_\_\_

学位授予单位和日期 电子科技大学 年 月

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

评阅人 \_\_\_\_\_

注 1: 注明《国际十进分类法 UDC》的类号。

# **The Time Marching Scheme of Time Domain Integral Equation and Corresponding Fast Algorithm**

**A Master Thesis Submitted to  
University of Electronic Science and Technology of China**

**Discipline:** Radio Physics

**Author:** Wang Wen

**Supervisor:** Dr. Shengjian Lai

**School:** School of Physical Electronics

## 摘 要

为了适应日益增长的宽带信号和非线性系统的工程应用，用于分析瞬态电磁散射问题的时域积分方程方法研究日趋活跃。本文以时域积分方程时间步进算法及其快速算法为研究课题，重点研究了时间步进算法的数值实现技术、后时稳定性问题以及两层平面波算法加速计算等，主要研究内容分为四部分。

.....

**关键词：** 时域电磁散射，时域积分方程，时间步进算法，后时不稳定性，时域平面波算法



## ABSTRACT

With the widespread engineering applications ranging from broadband signals and non-linear systems, time-domain integral equations (TDIE) methods for analyzing transient electromagnetic scattering problems are becoming widely used nowadays. TDIE-based marching-on-in-time (MOT) scheme and its fast algorithm are researched in this dissertation, including the numerical techniques of MOT scheme, late-time stability of MOT scheme, and two-level PWTD-enhanced MOT scheme. The contents are divided into four parts shown as follows.

**Keywords:** time-domain electromagnetic scattering, time-domain integral equation (TDIE), marching-on in-time (MOT) scheme, late-time instability, plane wave time-domain (PWTD) algorithm



## 目 录





## 第一章 绪 论

### 1.1 研究工作的背景与意义

计算电磁学方法<sup>[1,2,3,4,5]</sup>从时、频域角度划分可以分为频域方法与时域方法两大类。频域方法的研究开展较早，目前应用广泛的包括：矩量法（MOM）<sup>[2,3]</sup>及其快速算法多层快速多极子（MLFMA）<sup>[3]</sup>方法、有限元（FEM）<sup>[2,3]</sup>方法、自适应积分（AIM）<sup>[3]</sup>方法等，这些方法是目前计算电磁学商用软件<sup>①</sup>（例如：FEKO、Ansys 等）的核心算法。由文献<sup>[1,2,3]</sup>可知

### 1.2 时域积分方程方法的国内外研究历史与现状

时域积分方程方法的研究始于上世纪 60 年代，C.L.Bennet 等学者针对导体目标的瞬态电磁散射问题提出了求解时域积分方程的时间步进（marching-on in-time, MOT）算法。

### 1.3 本文的主要贡献与创新

本论文以时域积分方程时间步进算法的数值实现技术、后时稳定性问题以及两层平面波加速算法为重点研究内容，主要创新点与贡献如下：

### 1.4 本论文的结构安排

本文的章节结构安排如下：

---

① 脚注序号“①，……，⑨”的字体是“正文”，不是“上标”，序号与脚注内容文字之间空 1 个半角字符，脚注的段落格式为：单倍行距，段前空 0 磅，段后空 0 磅，悬挂缩进 1.5 字符；中文用宋体，字号为小五号，英文和数字用 Times New Roman 字体，字号为 9 磅；中英文混排时，所有标点符号（例如逗号“，”、括号“○”等）一律使用中文输入状态下的标点符号，但小数点采用英文状态下的样式“.”。

## 第二章 时域积分方程基础

时域积分方程（TDIE）方法作为分析瞬态电磁波动现象最主要的数值算法之一，常用于求解均匀散射体和表面散射体的瞬态电磁散射问题。

### 2.1 时域积分方程的类型

### 2.2 空间基函数与时间基函数

利用数值算法求解时域积分方程，首先需要选取适当的空间基函数与时间基函数对待求感应电流进行离散。

#### 2.2.1 空间基函数

RWG 基函数是定义在三角形单元上的最具代表性的基函数。它的具体定义如下：

$$f_n(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+ = \frac{l_n}{2A_n^+} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_+) & \mathbf{r} \in T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^- = \frac{l_n}{2A_n^-} (\mathbf{r}_- - \mathbf{r}) & \mathbf{r} \in T_n^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-1)$$

其中， $l_n$  为三角形单元  $T_n^+$  和  $T_n^-$  公共边的长度， $A_n^+$  和  $A_n^-$  分别为三角形单元  $T_n^+$  和  $T_n^-$  的面积（如图??所示）。



图 2-1 RWG 基函数几何参数示意图

由于时域混合场积分方程是时域电场积分方程与时域磁场积分方程的线性组合，因此时域混合场积分方程时间步进算法的阻抗矩阵特征与时域电场积分方程