

电子科技大学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

博士学位论文

DOCTORAL DISSERTATION



论文题目 XXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXX

学科专业 XXXXXX
学 号 XXXXXXXXXXXXXX
作者姓名 XXXXXX
指导老师 XXX 教授

分类号_____密级_____

UDC 注 1 _____

学 位 论 文

XXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXX

(题名和副题名)

XXXXXX

(作者姓名)

指导老师

XXX 教授

电子科技大学 成都

(姓名、职称、单位名称)

申请学位级别

博士

学科专业

XXXXXX

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 日

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。

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

A Doctoral Dissertation Submitted to
University of Electronic Science and Technology of China

Discipline:	XXXXXXXXXXXX
Author:	XXXXXX
Supervisor:	Prof. XXX
School:	XXXXXX

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

作者签名：_____ 日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日

论文使用授权

本学位论文作者完全了解电子科技大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权电子科技大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____ 导师签字：_____

日期：_____ 年 _____ 月 _____ 日

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。

针对这些问题，论文围绕 XXXXXX 展开研究，取得了如下研究成果：

- (1) 研究成果 1 的描述。
- (2) 研究成果 2 的描述。
- (3) 研究成果 3 的描述。

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.

Aiming at these problems, the thesis focuses on XXXXXX, and achieves the following research results:

- (1) Descriptions on result 1.
- (2) Description on result 2.
- (3) Description on result 3.

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
1.1 研究工作的背景与意义	1
1.2 时域积分方程方法的国内外研究历史与现状	1
1.3 本文的主要贡献与创新	1
1.4 本论文的结构安排	1
第二章 时域积分方程基础	2
2.1 时域积分方程的类型	2
2.2 空间基函数与时间基函数	2
2.2.1 空间基函数	2
2.2.2 时间基函数	3
2.2.2.1 时域方法特有的展开函数	3
2.2.2.2 频域方法特有的展开函数	3
2.3 入射波	3
2.4 本章小结	4
第三章 时域积分方程数值方法研究	5
3.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算	5
3.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储	5
3.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征	5
3.2.2 数值算例与分析	5
3.3 本章小结	6
第四章 毕业论文其他格式参考	7
4.1 如何撰写公式	7
4.2 如何撰写一个枚举列表	7
4.3 如何写一个大表格	7
4.4 如何写一个算法伪代码	7
4.5 本章小结	8
第五章 时域积分方程数值方法研究	9
5.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算	9
5.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储	9
5.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征	9
5.2.2 数值算例与分析	9

5.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解	10
5.4 本章小结	10
第六章 全文总结与展望	11
6.1 全文总结	11
6.2 后续工作展望	11
致 谢	12
参考文献	13
攻读博士学位期间取得的成果	14

缩略词表

缩略词	英文全称	中文全称
TD	Target Domain	目标领域
SD	Source Domain	源领域

主要符号表

符号	说明
$R^{m \times n}$	$m \times n$ 维的实数空间
$C^{m \times n}$	$m \times n$ 维的复数空间

第一章 绪论

1.1 研究工作的背景与意义

计算电磁学方法^[1-6]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）^[7,8]及其快速算法多层快速多极子（MLFMA）^[9]方法、有限元（FEM）^[1,3]方法、自适应积分（AIM）^[5]方法等，这些方法是目前计算电磁学商用软件^①（例如：FEKO、Ansys 等）的核心算法。

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 [14]。

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

介绍本文的组织结构，各章节之间的关系，尤其是后面涉及的应用领域的研究呈现出并列关系，

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：

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

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2-1所示）。

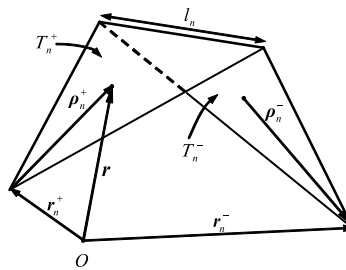


图 2-1 RWG 基函数几何参数示意图

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

时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

$$\mathbf{r}_{i,j} = \begin{cases} 1, f(\mathbf{x}^i; \mathbf{w}) \cdot f(\mathbf{x}^j; \mathbf{w}) \geq u(\lambda), \\ 0, f(\mathbf{x}^i; \mathbf{w}) \cdot f(\mathbf{x}^j; \mathbf{w}) < l(\lambda), 1 \leq i, j \leq n. \\ f(\mathbf{x}^i; \mathbf{w}) \cdot f(\mathbf{x}^j; \mathbf{w}), \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2-2)$$

时域积分方程时间步进算法的阻抗元素直接影响算法的后时稳定性，因此阻抗元素的计算是算法的关键之一，采用精度高效的方法计算时域阻抗元素是时域积分方程时间步进算法研究的重点之一。

2.2.2 时间基函数

2.2.2.1 时域方法特有的展开函数

2.2.2.2 频域方法特有的展开函数

2.3 入射波

如图2-2(a)和图2-2(b)所示分别给出了参数 $E_0 = \hat{x}$, $a_n = -\hat{z}$, $f_0 = 250\text{MHz}$, $f_w = 50\text{MHz}$, $t_w = 4.2\sigma$ 时，调制高斯脉冲的时域与频域归一化波形图。

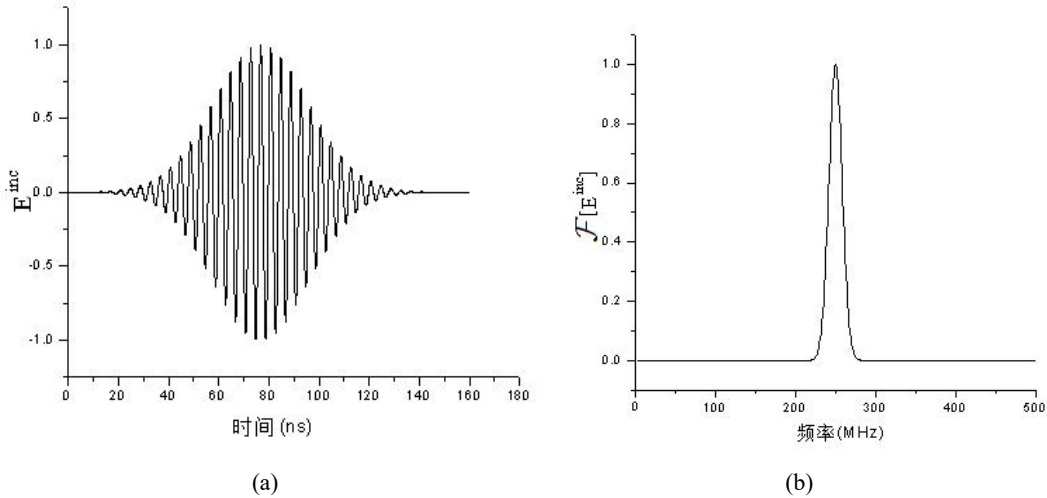


图 2-2 调制高斯脉冲时域与频率波形，时域阻抗元素的存储技术也是时间步进算法并行化的关键技术之一，采用合适的阻抗元素存储方式可以很大的提高并行时间步进算法的计算效率。

时域阻抗元素的存储技术^[7]也是时间步进算法并行化的关键技术之一，采用合适的阻抗元素存储方式可以很大的提高并行时间步进算法的计算效率。

2.4 本章小结

本章首先从时域麦克斯韦方程组出发推导得到了时域电场、磁场以及混合场积分方程。

第三章 时域积分方程数值方法研究

3.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算

时域积分方程时间步进算法的阻抗元素直接影响算法的后时稳定性，因此阻抗元素的计算是算法的关键之一，采用精度高效的方法计算时域阻抗元素是时域积分方程时间步进算法研究的重点之一。

3.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储

时域阻抗元素的存储技术也是时间步进算法并行化的关键技术之一，采用合适的阻抗元素存储方式可以很大的提高并行时间步进算法的计算效率。

3.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征

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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

3.2.2 数值算例与分析

如图3-1(a)所示给出了时间步长选取为 0.5ns 时采用三种不同存储方式计算的平板中心处方向的感应电流值与 IDFT 方法计算结果的比较。如图3-1(b)所示给出了存储方式为基权函数压缩存储方式，时间步长分别取时平板中心处方向的感应电流计算结果，从图中可以看出不同时间步长的计算结果基本相同。

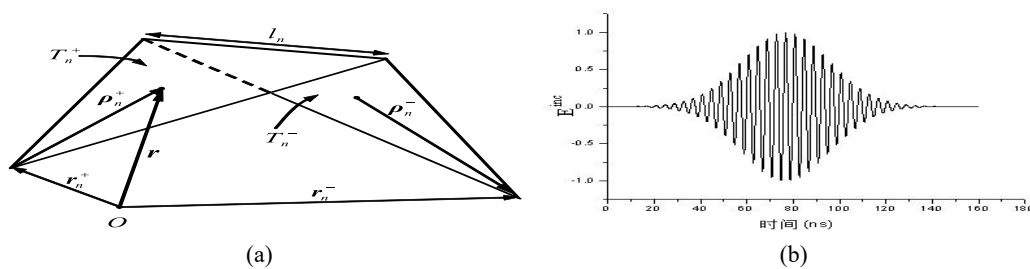


图 3-1 感应电流计算结果。(a)感应电流值与 IDFT 方法计算结果；(b)感应电流计算结果率

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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

3.3 本章小结

本章首先研究了时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算技术，分别采用 DUFFY 变换法与卷积积分精度算法计算时域阻抗元素，通过算例验证了计算方法的高精度。

第四章 毕业论文其他格式参考

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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

4.1 如何撰写公式

行内公式可以参考这样的形式 $O(n_1 \cdot (n_1 + m))$ 。如果需要对公式进行编号，可以参考公式 (4-1)。

$$\beta_i^j = H_i^T K_k^{-1} (K_k^{-1} + C_m \delta h^T \delta h) \quad (4-1)$$

跨行的公式可以参考公式 (4-2)。

$$\begin{aligned} \beta_i^j &= H_i^T K_k^{-1} (K_k^{-1} + C_m \delta h^T \delta h) \\ &= H_i^T K_k^{-1} (K_k^{-1} + C_m \delta h^T \delta h) \end{aligned} \quad (4-2)$$

向量的写法参考公式 (4-3)。

$$w_i = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & 0 & P_4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

4.2 如何撰写一个枚举列表

有时候需要撰写一个列表，列表的格式可以参考下面这种：

- (1) 描述 1；
- (2) 描述 2；
- (3) 描述 3；
- (4) 重复 (2) 和 (3)。

4.3 如何写一个大表格

有时候表格的表头比较复杂，具体需要用到 `multirow` 和 `multicolumn` 这两个环境，写法可以参考表4-1。

4.4 如何写一个算法伪代码

原模板没有如何写伪代码，这里提供一个例子，如算法4-1。需要注意的是，算法格式不跨行显示，所以需要根据大小调整在文中的位置。建议写完后根据文

表 4-1 一个表格示例。

XX	XXXXXX						
XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX
XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX	XX

字占页情况调整下相应的位置。

算法 4-1 如何写一个算法

输入:

data := 输入数据;

输出:

Out := 输出数据;

```

1: Initialization 初始化;
2: for for 循环的条件 do
3:   if if 的条件判断句, 例如  $|data| < k$  then
4:     If 语句中需要执行的程序;
5:   else
6:     例外情况需要执行的语句;
7:   while while 循环的判断条件 do
8:     while 循环的操作;
9:   end while
10:  end if
11: end for
12: return Out;

```

4.5 本章小结

本章首先研究了时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算技术, 分别采用 DUFFY 变换法与卷积积分精度计算法计算时域阻抗元素, 通过算例验证了计算方法的高精度。

第五章 时域积分方程数值方法研究

5.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算

时域积分方程时间步进算法的阻抗元素直接影响算法的后时稳定性，因此阻抗元素的计算是算法的关键之一，采用精度高效的方法计算时域阻抗元素是时域积分方程时间步进算法研究的重点之一。

5.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储

时域阻抗元素的存储技术也是时间步进算法并行化的关键技术之一，采用合适的阻抗元素存储方式可以很大的提高并行时间步进算法的计算效率。

5.2.1 时域积分方程时间步进算法产生的阻抗矩阵的特征

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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

5.2.2 数值算例与分析

如表5-1所示给出了时间步长分别取 0.4ns、0.5ns、0.6ns 时的三种存储方式的存储量大小。

表 5-1 计算 $2m \times 2m$ 理想导体平板时域感应电流采用的三种存储方式的存储量比较。

时间步长	非压缩存储方式	完全压缩存储方式	基权函数压缩存储方式
0.4ns	5.59 MB	6.78 MB	6.78 MB
0.5ns	10.17 MB	5.58 MB	5.58 MB
0.6ns	8.38MB	4.98 MB	4.98 MB

如图5-1(a)所示给出了时间步长选取为 0.5ns 时采用三种不同存储方式计算的平板中心处 x 方向的感应电流值与 IDFT 方法计算结果的比较，……。如图5-1(b)所示给出了存储方式为基权函数压缩存储方式，时间步长分别取 0.4ns、0.5ns、0.6ns 时平板中心处 x 方向的感应电流计算结果，从图中可以看出不同时间步长的计算结果基本相同。

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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

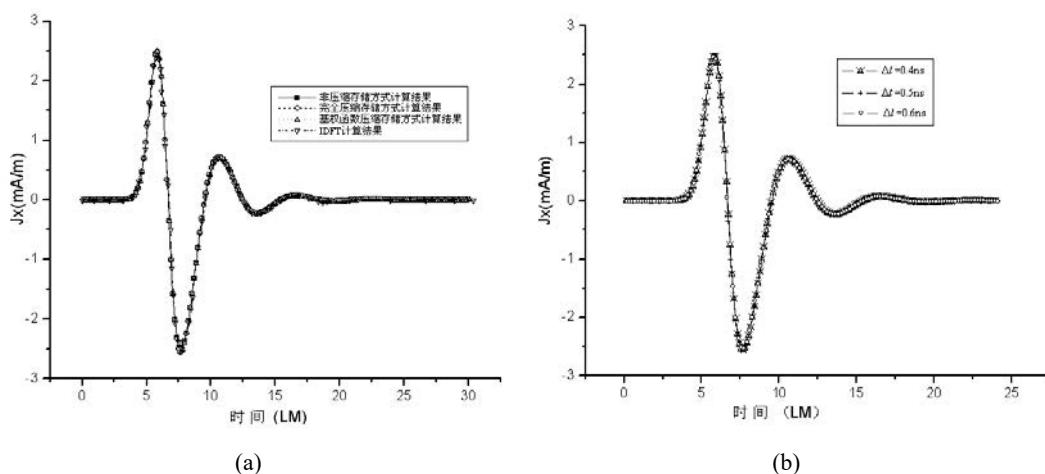


图 5-1 $2m \times 2m$ 的理想导体平板中心处感应电流 x 分量随时间的变化关系

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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

5.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解

定理 5.1 如果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。

证明: 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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。 ■

推论 5.2 时域积分方程方法的研究近几年发展迅速，在本文研究工作的基础上，仍有以下方向值得进一步研究。

引理 5.3 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时间步进算法的阻抗矩阵特征相同。

5.4 本章小结

本章首先研究了时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算技术，分别采用 DUFFY 变换法与卷积积分精度计算法计算时域阻抗元素，通过算例验证了计算方法的高精度。

第六章 全文总结与展望

6.1 全文总结

本文以时域积分方程方法为研究背景，主要对求解时域积分方程的时间步进算法以及两层平面波快速算法进行了研究。

6.2 后续工作展望

时域积分方程方法的研究近几年发展迅速，在本文研究工作的基础上，仍有以下方向值得进一步研究：

致 谢

艰难苦恨繁霜鬓，潦倒新停浊酒杯！

参考文献

- [1] 王浩刚, 聂在平. 三维矢量散射积分方程中奇异性分析 [J]. 电子学报, 1999, 27(12): 68-71
- [2] X. F. Liu, B. Z. Wang, W. Shao, et al. A marching-on-in-order scheme for exact attenuation constant extraction of lossy transmission lines[C]. China-Japan Joint Microwave Conference Proceedings, Chengdu, 2006, 527-529
- [3] 竺可桢. 物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1973, 56-60
- [4] 陈念永. 毫米波细胞生物效应及抗肿瘤研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2001, 50-60
- [5] 顾春. 牢牢把握稳中求进的总基调 [N]. 人民日报, 2012 年 3 月 31 日
- [6] 冯西桥. 核反应堆压力容器的 LBB 分析 [R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1997 年 6 月 25 日
- [7] 肖珍新. 一种新型排渣阀调节降温装置 [P]. 中国, 实用新型专利, ZL201120085830.0, 2012 年 4 月 25 日
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准 --量与单位 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994 年 11 月 1 日
- [9] M. Clerc. Discrete particle swarm optimization: a fuzzy combinatorial box[EB/OL]. http://clere.maurice.free.fr/ps0/Fuzzy_Discrere_PSO/Fuzzy_DPSO.htm, July 16, 2010

攻读博士学位期间取得的成果

发表论文

- [1] X. XX, X. XX, X. XX. XXXXXXXXXXXXXXXX[J]. XXXXXXXXXXXX, 2018, 2018:1-17 (SCI, IF X.XXX)
- [2] X. XX, X. XX, X. XX. XXXXXXXXXXXXXXXX[J]. XXXXXXXXXXXX, 2018, 2018:1-17 (SCI, IF X.XXX)

著作

写自己的著作

主研/参研项目

- [1] 参与, 编号: XXXXXXXXXXXX, 四川省科技厅, XXXXXXXXXXXX
- [2] 参与, 编号: XXXXXXXXXXXX, 四川省科技厅, XXXXXXXXXXXX
- [3] 参与, 编号: XXXXXXXXXXXX, 四川省科技厅, XXXXXXXXXXXX