



**\*\* 学位论文**

# **3D-FSM•DDM 间接边界元数值系统及其在矿山工程中的应用研究**

**Research on the 3D-FSM•DDM IBEM Numerical System  
and Application in Mining Engineering**

作者 XXX

导师 XXX 教授

山东科技大学  
二〇一七年五月

中图分类号\_\_\_\_\_

学校代码\_\_\_\_\_

UDC\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

山东科技大学

**\*\* 学位论文**

**3D-FSM•DDM 间接边界元数值系统及其在矿山工程中的应用研究**

Research on the 3D-FSM•DDM IBEM Numerical System and  
Application in Mining Engineering

作 者\_\_\_\_\_

入学时间\_\_\_\_\_

导 师\_\_\_\_\_

职 称\_\_\_\_\_

副导师\_\_\_\_\_

职 称\_\_\_\_\_

申请学位\_\_\_\_\_

所在学院\_\_\_\_\_

学科（类别）\_\_\_\_\_

方向（领域）\_\_\_\_\_

答辩日期\_\_\_\_\_

提交日期\_\_\_\_\_

# 学位论文使用授权声明

本人完全了解山东科技大学有关保留、使用学位论文的规定，同意本人所撰写的学位论文的使用授权按照学校的管理规定处理。

作为申请学位的条件之一，学校有权保留学位论文并向国家有关部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版；有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库发表，并可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版；允许学校档案馆和图书馆保留学位论文的纸质版和电子版，可以使用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文；为教学和科研目的，学校档案馆和图书馆可以将公开的学位论文作为资料在档案馆、图书馆等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。

（保密的学位论文在解密后适用本授权）

作者签名：

日 期： 年 月 日

导师签名：

日 期： 年 月 日

# 学位论文原创性声明

本人呈交给山东科技大学的学位论文，除所列参考文献和世所公认的文献外，全部是本人攻读学位期间在导师指导下的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：

年 月 日

# 学位论文审查认定书

研究生                      在规定的学习年限内，按照培养方案及个人培养计划，完成了课程学习，成绩合格，修满规定学分；在我的指导下完成本学位论文，论文中的观点、数据、表述和结构为我所认同，论文撰写格式符合学校的相关规定，同意将本论文作为申请学位论文。

导师签名：

日期

## 摘 要

边界元法与有限元法相比,具有输入数据少、降低问题维数、所占计算机内存少、计算省时、计算精度高及可求解连续场点等优点;尤其对于无限域问题它是严密成立的。因此,对于大量实际问题,尤其是大区域岩土工程问题,边界元法比有限元法更具优越性。

在导师等前人已研究、开发的 FSM•DDM 间接边界元法 (IBEM) 数值计算系统的基础上,进一步完善了三维弹性问题的 3D-FSM•DDM 边界元数值系统;开发了多介质 3D-FSM•DDM 边界元数值子系统;研究并开发了考虑节理滑移和张开情况下的 3D-FSM•DDM 耦合的 IBEM 分析子系统;研究了考虑地形及构造应力影响下,基于 3D-FSM 间接边界元法的初始地应力场的反演分析方法,并开发了相应数值子系统;针对 3D-FSM•DDM 数值系统主程序,初步开发了配套的 3D-FSM•DDM 边界元前、后处理子系统。

上述 3D-FSM•DDM 间接边界元数值系统经开发完善后将会形成具有独立知识产权的大型三维边界元应用软件,以期对相关研究及应用做出贡献。关键词:间接边界元法 (IBEM); 应力不连续法 (FSM); 位移不连续法 (DDM); 节理岩体; 多介质

**关键词:** 间接边界元法 (IBEM); 应力不连续法 (FSM); 位移不连续法 (DDM); 节理岩体; 多介质

# Abstract

Compared with the Finite Element Method (FEM), the Boundary Element Method (BEM) has many advantages, such as decreasing data input quantity, reducing the dimensions of the question, occupying the fewer computer memory, saving the time of computation, having the higher computation precision and solving continuous field point. It is established strictly to the infinite field question. So the BEM has the superiority to many actual problems, especially for the far field Rock and Soil engineering projects.

This article has consummated the elastic 3D-FSM•DDM IBEM numerical simulation system more completely based on the results which is researched and developed by the predecessors. And it also has researched and developed several 3D-FSM•DDM numerical simulation subsystem, i.e. the multi-medium 3D-FSM•DDM numerical simulation subsystem; the 3D-FSM•DDM coupling IBEM analysis subsystem with considering the joint slip and separation; the initial ground stress back analysis method and usable program based on the 3D-FSM IBEM with considering the influence of terrain and tectonic stress; the 3D-FSM•DDM BEM preprocessing subsystem and post-processing subsystem adapting to the master program of 3D-FSM•DDM IBEM numerical system.

When the 3D-FSM•DDM IBEM numerical simulation system is consummated, it will be a large-scale application software of 3D-BEM with the independent intellectual property rights. It will make the contribution to the correlation research and the application.

**Keywords:** Indirect boundary element method (IBEM); Fictitious stress method (FSM); Displacement discontinuity method (DDM); Joint element; Multi-medium

---

# 目 录

1	L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X 介绍 .....	1
1.1	L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X 是什么 .....	1
1.2	为什么用 L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X .....	2
1.3	怎样用 L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X .....	3
2	图表公式排版 .....	4
2.1	图 .....	4
2.1.1	单幅图 .....	4
2.1.2	多幅图 .....	5
2.2	表 .....	6
2.3	公式 .....	6
2.3.1	单个公式 .....	7
2.3.2	多个公式 .....	7
	参考文献 .....	10
	致 谢 .....	11

声 明



# CONTENTS

1 Introduction of L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X .....	1
1.1 What.....	1
1.2 Why .....	2
1.3 How .....	3
2 Figures, Tables and Equations .....	4
2.1 Figures .....	4
2.1.1 Single Figure .....	4
2.1.2 Multiple Figures.....	5
2.2 Tables .....	6
2.3 Equations .....	6
2.3.1 Equations.....	7
2.3.2 Subequations .....	7
References .....	10
Acknowledgements.....	11
Declarations	



图清单

图序号	图名称	页码
psnr	10	20
ssim	10	21

---

## 表清单

表序号	表名称	页码
psnr	10	20
ssim	10	21

## 变量注释表

变量	注释	初现页
psnr	10	20
ssim	10	21

# 1 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 介绍

## 1 Introduction of L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

本章对 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 排版系统做一个简要介绍，希望没有使用过 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的同学对 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 有一个初步认识。

### 1.1 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 是什么

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 是一款排版软件，和其它排版软件 (例如 Word) 相比，L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 具有非常明显的优势和不足。其最大的优势是高质量、高水准的专业排版效果；最大的缺点是使用门槛高，需要具备一定的编程基础<sup>①</sup>。对于习惯于抽象思维的科技人员而言，与精美的排版效果相比，L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的确缺点是微不足道的，只要经过短时间 (一周足已) 的学习和实践，就可以编写出高质量的科研论文。

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的基础是 T<sub>E</sub>X，T<sub>E</sub>X 诞生于 20 世纪 70 年代末到 80 年代初，用来排版高质量的书籍，特别是包含数学公式的书籍。有趣的是，这样一款排版软件并非在排版业界产生，而是由著名计算机科学家 Donald Ervin Knuth (中文名高德纳) 在修订其七卷巨著《计算机程序设计艺术》时设计的。

虽然 T<sub>E</sub>X 功能非常强大，但是多达 900 多条的排版命令让排版人员使用起来非常不便。因此 20 世纪 80 年代初，Leslie Lamport 硕士给 T<sub>E</sub>X 编写了一组自定义命令宏包，并取名为 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X，其中 La 是其姓名的前两个字母。L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 拥有比原来的 T<sub>E</sub>X 更为规范的格式命令和一整套预定义的格式，可以让完全不懂排版技术的学者们很容易地将书籍和文稿排版出来。L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 一出，很快风靡全球，在 1994 年 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> 完善之后，现在已经成为国际上数学、物理、计算机等科技领域专业排版的事实标准，相关专业的学术期刊

<sup>①</sup> 因为 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的资源非常丰富，有许多模板可以使用，这些模板已经为用户定制好了排版格式，所以单纯从使用的角度看，使用 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的门槛其实并不算高。

---

也都采用  $\text{\LaTeX}$  作为投稿格式。

## 1.2 为什么用 $\text{\LaTeX}$

虽然论文排版是一项基本技能，但是从实际情况看，同学们经常被各种格式整得晕头转向。加之 Word 排版不够美观，版本管理麻烦，排版效率低下，因此开发  $\text{\LaTeX}$  论文模板非常重要。国际上许多著名的出版机构和学术期刊都有自己的  $\text{\LaTeX}$  模板，国内外许多高校也有自己的硕博论文  $\text{\LaTeX}$  模板。事实上， $\text{\LaTeX}$  已经成为科技出版行业的国际标准，特别是数学、物理、计算机和电子信息学科。

采用  $\text{\LaTeX}$  排版主要有以下优点：

1. 排版质量高：主要体现在对版面尺寸的严格控制，对字距、行距和段距等间距的松紧适度掌握，对数学公式的精细设计，对插图和表格的灵活处理，对代码和算法的优美呈现，等等。
2. 安全稳定：自发布以来  $\text{\TeX}$  和  $\text{\LaTeX}$  没有发现系统漏洞，不会出现死机或者系统崩溃而导致编写的内容来不及保存。
3. 灵活方便： $\text{\LaTeX}$  的源文件是纯文本文件，文件大小比 Word 小很多，不会因为文档的增加而导致文档打开、编辑、保存和关闭等操作变慢。因为  $\text{\LaTeX}$  在编译时才将所有源文件和图表汇总，故撰写内容时可以随意增删章节和图表。并且和大部分程序设计语言一样， $\text{\LaTeX}$  具有注释功能，作者可以在源文件任何地方添加注释，而不会影响最终生成的文档。
4. 格式和内容分离： $\text{\LaTeX}$  将文档格式和文档内容分开处理，作者只要选择合适的模板，就可专心致志地撰写文档内容，文档的格式细节则由  $\text{\LaTeX}$  模板统一规划设置。特别是文献管理能力非常强大，这给撰写像硕士论文一样需要大量引用参考文献的文档提供了很大便利。

5. 免费开源：L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 软件完全免费，源代码也全部公开，并且相应的配套软件也都采用开源的方式。

无论你是因为羡慕 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 漂亮的输出结果，还是因为要给学术期刊投稿而被逼上梁山，都不得不面对这样一个事实：L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 是一种并不简单的排版软件，不可能只点点鼠标就弄好一篇漂亮的文章。还得拿出点搞研究的精神，通过不断练习，才能编排出整齐漂亮的论文。一旦你掌握了如何使用 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 撰写出精美漂亮的论文时，你会发现你的决定是明智的，你的投入是值得的。

### 1.3 怎样用 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

本模板在 Windows + MikTeX + Texmaker 平台下开发，采用 XeLaTeX 编译。本模板可从 GitHub 上免费下载：[https://github.com/leekunhwee/XJTU\\_Thesis\\_LaTeX\\_2021](https://github.com/leekunhwee/XJTU_Thesis_LaTeX_2021)（**注意**：由于国内对 GitHub 网站的屏蔽，可能需要通过科学上网方法或多次刷新方可打开）。打开网站后，点击页面上名为“Code”的绿色按钮，然后点击“Download ZIP”即可下载本模板的源文件。

本模板使用教程及常见问题解决方法请参考：<https://zhuanlan.zhihu.com/p/388415963>

本模板的源文件通过主目录下的 `main.tex` 统一管理，`setup` 文件夹中存放格式定义和封面、摘要、目录等内容，`body` 文件夹中存放论文正文章节的源文件，`appendix` 文件夹中存放附录、致谢和声明等内容。

本模板只提供论文的格式定义，不提供 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的详细使用方法。因为 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的资源非常丰富，大家可以在网上查找资料并参与讨论，这样学习效率更高。我关注的两个网站是：<http://bbs.ctex.org/forum.php> 和 <http://www.latexstudio.net>；参考的两本书是“The Not So Short Introduction to L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub>”和“LaTeX2e 完全学习手册”。

---

## 2 图表公式排版

## 2 Figures, Tables and Equations

虽然本模板不涉及  $\text{\LaTeX}$  的详细使用方法，但是为了方便大家使用本模板撰写学位论文，本章对论文写作中经常用到的图、表、公式等内容的排版方法做一个简单的介绍。

### 2.1 图

插图须紧跟文述。在正文中，一般应先见图号及图的内容后再见图，一般情况下不能提前见图，特殊情况须延后的插图不应跨节。

$\text{\LaTeX}$  中所使用的图片通常为 PDF 格式，图片应大小适宜，主题明确，层次清楚，金相组织类的照片一定要有比例尺。

图应具有“自明性”，即只看图、图题和图例，不阅读正文，就可理解图意。图中的标目是说明坐标轴物理意义的项目，它是由物理量的符号或名称和相应的单位组成。物理量的符号由斜体字母标注，单位的符号使用正体字母标注，量与单位间用斜线隔开。例如： $I/A$ ， $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $F/N$ ， $v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  等等。

#### 2.1.1 单幅图

图的大小一般为宽 6.67 cm× 高 5.00cm。特殊情况下，也可宽 9.00 cm× 高 6.75cm，或宽 13.5 cm× 高 9.00cm。总之，一篇论文中，同类图片的大小应该一致，编排美观、整齐。如图 2-1 所示。



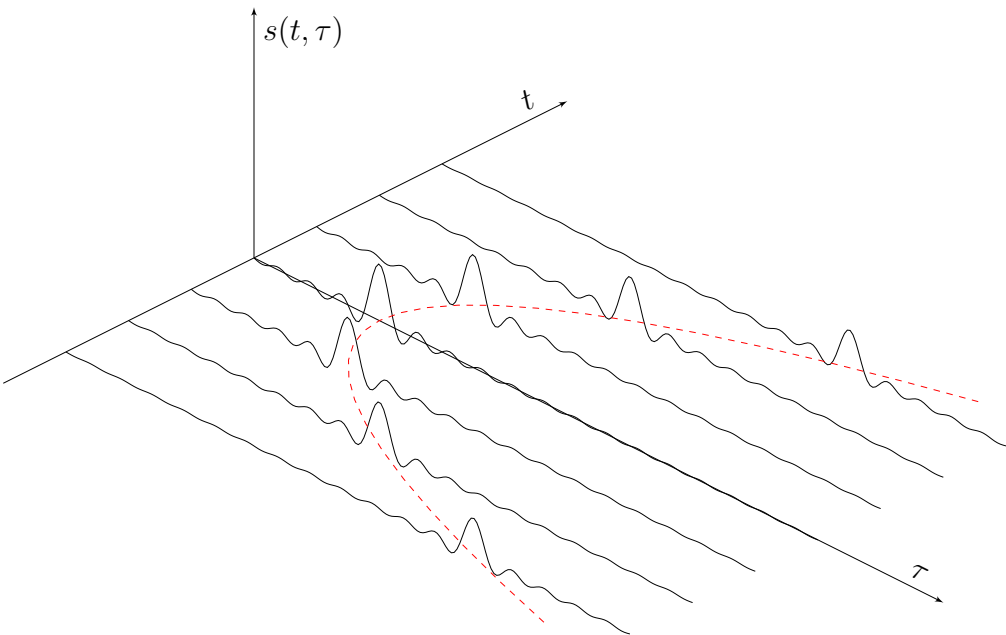


图 2-1 雷达回波信号 (注意：图注是五号字)

2.1.2 多幅图

如果一幅图中包含多幅子图，每一幅子图都要有图注，并且子图用 (a)、(b)、(c) 等方式编号，且各分图的分题注直接列在各自分图的正下方，总题注列在所有分图的正下方中，如图 2-2 所示。



(a) 灰色的交大校徽

(b) 蓝色的交大校徽

图 2-2 交大校徽

## 2.2 表

表格的设计应紧跟文述。表的编排一般是内容和测试项目由左至右横读，数据依序竖读，应有自明性。若为大表或作为工具使用的表格，可作为附表在附录中给出，论文中的表格参数应标明量和单位的符号。

表中各物理量及量纲均按国际标准 (SI) 及国家规定的法定符号和法定计量单位标注。

表格要求采用三线表，与文字齐宽，顶线与底线线粗是  $1\frac{1}{2}$  磅，中线线粗是 1 磅。表格必须通栏，即表格宽度与正文版面平齐，如表 2-1 所示<sup>①</sup>。

表 2-1 表题也是五号字

组号	DOA / °	带宽 / MHz	INR / dB
1	-30	20	60
2	20	10	50
3	40	5	40

在三线表中可以加辅助线，以适应较复杂表格的需要，如表 2-2 所示。

表 2-2 模态参数

方向	模态阶数	固有频率 / Hz	阻尼比 / %	模态刚度 / $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
X	1	500	2.11	$1.2345 \times 10^7$
	2	800	3.11	$1.3579 \times 10^7$
Y	1	500	3.11	$1.5432 \times 10^7$
	2	900	5.11	$1.2468 \times 10^7$

## 2.3 公式

在  $\text{\LaTeX}$  中，行内公式用  $\$ \$$  符号括起来。行间公式应另起一行，居中编排，较长的公式尽可能在等号后换行，或者在“+”、“-”等符号后换行。公式中分数线的横线，

<sup>①</sup> 注意：图表中的变量与单位通过斜线 / 隔开。

长短要分清，主要的横线应与等号取平。

公式后应注明编号，公式号应置于小括号中。写在右边行末，中间不加虚线。

公式下面的“式中：”两字左起顶格编排，后接符号及其解释；解释顺序为先左后右，先上后下；解释与解释之间用“；”隔开。

公式中各物理量及量纲均按国际标准（SI）及国家规定的法定符号和法定计量单位标注，禁止使用已废弃的符号和计量单位。

### 2.3.1 单个公式

$\text{\LaTeX}$  最强大的地方在于对数学公式的编辑，不仅美观，而且高效。单个公式的编号如式 (2-1) 所示，该式是正态分布的概率密度函数<sup>[7]</sup>，

$$f_Z(z) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{|z-\mu|^2}{\sigma^2}\right) \quad (2-1)$$

式中： $\mu$  是 Gauss 随机变量  $Z$  的均值； $\sigma^2$  是  $Z$  的方差。

### 2.3.2 多个公式

多个公式作为一个整体可以进行二级编号，如式 (2-2) 所示，该式是连续时间 Fourier 变换的正反变换公式<sup>[7]</sup>，

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-2a)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2-2b)$$

式中： $x(t)$  是信号的时域波形； $X(f)$  是  $x(t)$  的 Fourier 变换。

如果公式中包含推导步骤，可以只对最终的公式进行编号，例如：

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_{\text{smi}} &= \alpha \left[ \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{v}(\theta_0) - \frac{1}{\sigma_n^2} \mathbf{v}(\theta_0) + \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{u}_i^H \mathbf{v}(\theta_0)}{\lambda_i} \mathbf{u}_i \right] \\ &= \frac{\alpha}{\sigma_n^2} \left[ \mathbf{v}(\theta_0) - \sum_{i=1}^N \mathbf{u}_i^H \mathbf{v}(\theta_0) \mathbf{u}_i + \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_n^2 \mathbf{u}_i^H \mathbf{v}(\theta_0)}{\lambda_i} \mathbf{u}_i \right] \end{aligned}$$

---

---


$$= \frac{\alpha}{\sigma_n^2} \left[ \mathbf{v}(\theta_0) - \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i - \sigma_n^2}{\lambda_i} \mathbf{u}_i^H \mathbf{v}(\theta_0) \mathbf{u}_i \right] \quad (2-3)$$

## 参考文献

参考文献格式应符合国家标准 GB/T-7714-2005 《文后参考文献著录规则》。中国国家标准化管理委员会于 2015 年 5 月 15 日发布了新的标准 GB/T 7714-2015 《信息与文献参考文献著录规则》。因为二者的差别非常小，所以采用了新的标准。标准的 BiBTeX 格式网上资源非常多，本模板使用了李泽平开发的版本，该版本提供了多种参考文献的排序规则。学校硕士学位论文规范指定了两种排序方法：一是按照文献的引用顺序进行排序，二是按照作者姓氏加出版年份进行排序。本模板采用第一种排序规则，第二种排序规则的使用方法请参考文献 [?]。

# 作者简历

## 一、基本情况

姓名: \*\*\* 性别: 男民族: 汉出生年月: 1965-07-23 籍贯: 山东省潍坊市

1. 1983.09-1987.07 山东矿业学院学士
2. 1990.09-1993.07
3. 2001.09-2007.05 山东科技大学博士学习阶段
- .....

## 二、攻读学位期间发表学术论文情况

1. \*\*\*, 三维 FSM•DDM 边界元法 [J]. 岩土力学, 2004 (9): 47-51.
2. \*\*\*, \*\*\*, 三维非稳态热传导问题的边界元法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004(18): 3168-3173.
- .....

## 三、攻读学位期间获奖情况

1. \*\*\*, 等. 矿业类专业课程体系整体优化与实践 (国家级教改项目, 编号:1282B05012).2005: 获山东省优秀教学成果一等奖; 2005: 获国家级教学成果二等奖;
2. ....

## 四、攻读学位期间研究项目情况

1. 矿井工作面突水地球物理场相应与动态监测基础研究. 国家自然科学基金, 编号: 50774051, 参加人员;
2. ....



---

## 致 谢

致谢中主要感谢导师和对论文工作有直接贡献和帮助的人士和单位。致谢言语应谦虚诚恳，实事求是，字数不超过 1000 汉字。

用于盲审的论文，此页内容全部隐去。