

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1章 绪论	1
1.1 引言-从数据挖掘谈起	1
1.2 双边聚类技术	3
1.2.1 “同时聚类”需求的产生	3
1.2.2 双边聚类问题的诞生	3
1.3 本文的主要贡献与创新	3
1.4 本论文的结构安排	3
第2章 时域积分方程基础	5
2.1 时域积分方程的类型	5
2.2 空间基函数与时间基函数	5
2.2.1 空间基函数	5
2.2.2 时间基函数	5
2.2.2.1 时域方法特有的展开函数	6
2.2.2.2 频域方法特有的展开函数	6
2.3 入射波	6
2.4 本章小结	7
第3章 时域积分方程数值方法研究	8
3.1 时域积分方程时间步进算法的阻抗元素精确计算	8
3.2 时域积分方程时间步进算法阻抗矩阵的存储	8
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	8
3.2.2 数值算例与分析	8
3.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解	9
3.4 本章小结	10
第4章 全文总结与展望	11
4.1 全文总结	11
4.2 后续工作展望	11
参考文献	12

目录

致 谢	14
外文资料原文	15
外文资料译文	17

第1章 绪论

1.1 引言-从数据挖掘谈起

现如今，我们处于一个充满数据的时代。在每一天我们使用计算机、手机时候，都有大量数据产生，接着被以各种形式记录、保留下来。许多数据都给我们生活提供着极大的便利，比如根据用户的音乐的历史记录，音乐软件能推荐更多的适合该客户口味的音乐；再比如当我用键盘输入这段文字的时候，中文输入软件根据词库里的数据，将键入的字母序列转换为一段段可能性最大的中文词汇或句子。在经济学、医学、生物学、社会科学等学科中，海量的数据无时无刻不在产生，然而如何合理地利用这些数据，使其提供我们需要的信息，成为了现在各个领域面临的问题。

在这样多领域的需求下，数据挖掘（Data Mining，缩写：DM）这门交叉学科应运而生。通常来说，数据挖掘是数据库知识发现（Knowledge-Discovery in Databases，缩写：KDD）中的一个步骤，其目的是在大量的数据中自动搜索隐藏于其中的特殊信息，从而为之后的分析决策提供理论依据。下面将简要介绍下数据挖掘的主要步骤：

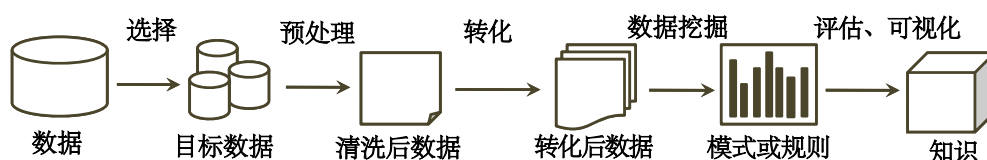


图 1-1 数据挖掘主要步骤图

- **数据采集** 所有工作开始之前，首先需要采集数据，包括确定数据种类、范围等，然后对数据进行初步选择，挑选出合适的数据库。
- **数据预处理** 该过程包括对原始数据的处理，包括数据整合、去除噪声等。
- **数据转化** 对数据进行完预处理后，需要决定数据合适表示，例如特征选筛等。
- **数据挖掘** 这个过程中，人们采用各种方法，例如聚类、分类、关联规则分析等方法来发掘数据中的有用的信息。

- **结果评估与可视化** 最后，需要对得到的结果进行解释与评估，并可视化为易于人理解的形式，在这之后有可能需要重新进行挖掘。

这其中，**数据挖掘**是从数据中学习知识的最关键的步骤，因此很多时候，数据挖掘泛指从数据中学习知识的过程。数据挖掘的大量算法可以按照目的分为以下四类：

- **分类(Classification)** 分类算法的目的是为特定变量确定类别或者标签，比如根据近年来我国的经济的发展情况来确定房价是涨还是跌。一般来说，分类首先用历史数据作为训练集，学习出目标函数，然后用学到的目标函数来预测新来的未知数据点的类别。常见的分类算法有 kNN [1],决策树[2],支持向量机[3]等。
- **聚类(Clustering)** 聚类算法的目的是将数据分为许多类，使得相似的数据分在同一类中，不相似的数据分布在不同的类中，比如菜农可以根据一批辣椒的形状、辛辣程度将其聚拢成不同类别销售。常见的聚类方法有 k -means[4], *spectral clustering*[5] 等方法。
- **关联规则分析(Analysis of Association Rule)** 关联规则分析的目的是从数据中发现经常出现的模式，一个经典的例子是人们从超市的大量销售记录中发现买尿布的人也常常买啤酒。经典的关联规则分析方法有：*Apriori*[6], *DBSCAN*[7]和 FP -growth[8]等。
- **奇异点检测(Outlier Detection)** 奇异点检测的目的是发现数据集中存在的奇异点，即与大多数点不相似的少数数据点，比如邮件代理公司会根据正常邮件与垃圾邮件的特征对比，来为用户标记垃圾邮件。通常来说大多数聚类算法都可以作为奇异点检测算法。

相对于数据挖掘的其他算法，聚类的知识目前还不够系统化。一个重要原因是聚类不存在客观标准：给定数据集，总能从某个角度找到以往算法未覆盖的某种标准从而设计出新算法[9]。但聚类技术本身在现实任务中非常重要，近些年关于聚类的新算法在数据挖掘、机器学习、人工智能的顶级会议乃至《自然》和《科学》上都频出不穷。本文也将提出一种全新的基础聚类算法，在此之前，先引入由特殊需求引入的新型聚类技术：双边聚类技术。

1.2 双边聚类技术

聚类技术有很多变种，其中双边聚类（Co-Clustering，或Bi-Clustering，Two-

mode clustering) 就是一种, 其致力于突破传统聚类的限制, 在两个空间中同时进行聚类, 从而创造更好的应用价值。现在首先来谈谈双边聚类是什么, 随之引入一个正式的双边聚类的问题描述。

1.2.1 “同时聚类”需求的产生

在传统的聚类中, 对于一个数据集, 总是给定一个特征空间, 对数据集进行聚类。比如在传统的“用户-商品”推荐系统 (Recommendation System) 中, 想对用户进行聚类, 那就要将各种商品作为特征集, 通过不同用户喜欢的商品集合的异同来判断用户之间的相似性, 从而最终达到对用户聚类的目的。同样的, 如果想对商品集合进行聚类, 那反之得将商品集合作为数据集, 用户作为特征集, 对商品进行聚类。至于聚类的目的, 对同一个用户簇可以推荐相同的商品, 而同一个商品簇可以归类到一起进行管理, 这是后话了。

同样的, 对于文本挖掘 (Text Mining), 大量的词汇和文档也可以组成两个空间, 将其中一个空间作为特征集, 对另外一个进行聚类, 此类例子还有很多。那么, 有的时候, 我们不禁发问: 能否同时对两个空间进行聚类? 比如在推荐系统中同时对用户集合和商品集合进行聚类, 于是在得到相似的用户群组的同时, 得到该群组喜欢的商品集合! 同样地, 在文本挖掘中我们是否可以在得到相似的文本集的同时, 得到该文本集包含的词汇集?

要是这种两个空间“同时聚类”的问题能够解决, 那么在大量应用中将得到极好的结果和可解释性, 甚至颠覆传统聚类方法的价值, 从而为科研和生产提供全新的方向。事实上, 现在已经有大量的双边聚类算法诞生并且投入应用, 先来看看最初的双边聚类算法是怎么出现的。

1.2.2 双边聚类问题描述

双边聚类问题诞生于生物信息学中的基因表达问题 (Gene Expression Profiling) 上, 简单来说, 近年来生物信息检测技术的进步为科学家们提供了大量的基因表达数据, 关于, 可以用一个“基因-样本”的矩阵来表示。

依据传统的聚类技术, 我们可以将基因进行聚类, 如1-2所示; 也可以将样本

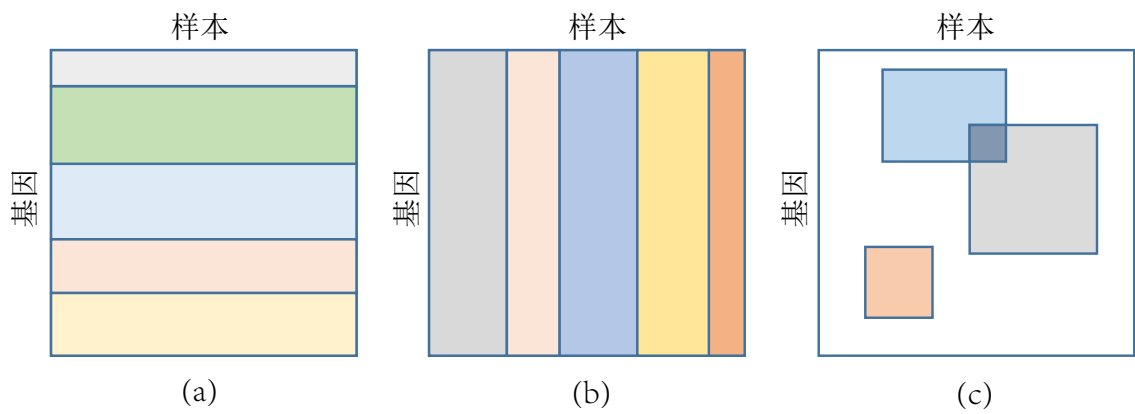


图 1-2 数据挖掘主要步骤图

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：

.....

第2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^①。

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：

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

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）。

.....

2.2.2 时间基函数

.....

① 脚注序号“①,……,⑩”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“.”。

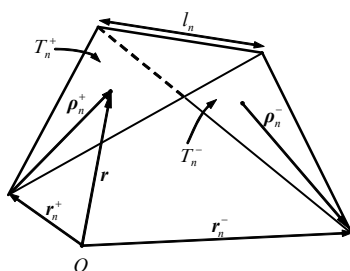


图 2-1 RWG 基函数几何参数示意图

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 $E_0 = \hat{x}$, $a_n = -\hat{z}$, $f_0 = 250MHz$, $f_w = 50MHz$, $t_w = 4.2\sigma$ 时, 调制高斯脉冲的时域与频域归一化波形图。

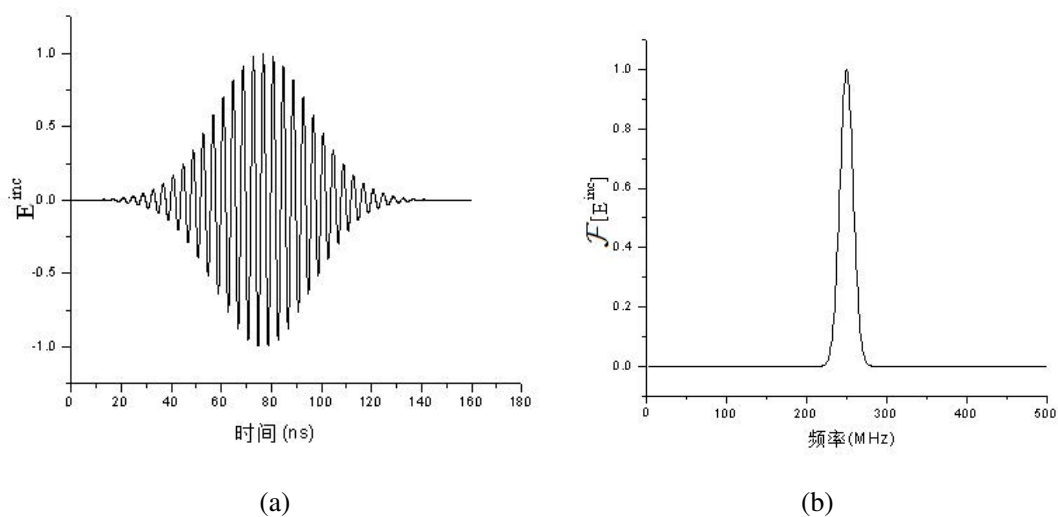


图 2-2 调制高斯脉冲时域与频率波形

(a)调制高斯脉冲时域波形; (b)调制高斯脉冲频域波形

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3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^[10]，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

.....。如表3-1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。.....。

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 x 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。

表 3-1 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

存储方式 时间步长	非压缩存储方式	完全 压缩存储方式	基元函数 压缩存储方式
0.4ns	11.96 MB	5.59 MB	6.78 MB
0.5ns	10.17 MB	5.06 MB	5.58 MB
0.6ns	8.38 MB	4.65 MB	4.98 MB

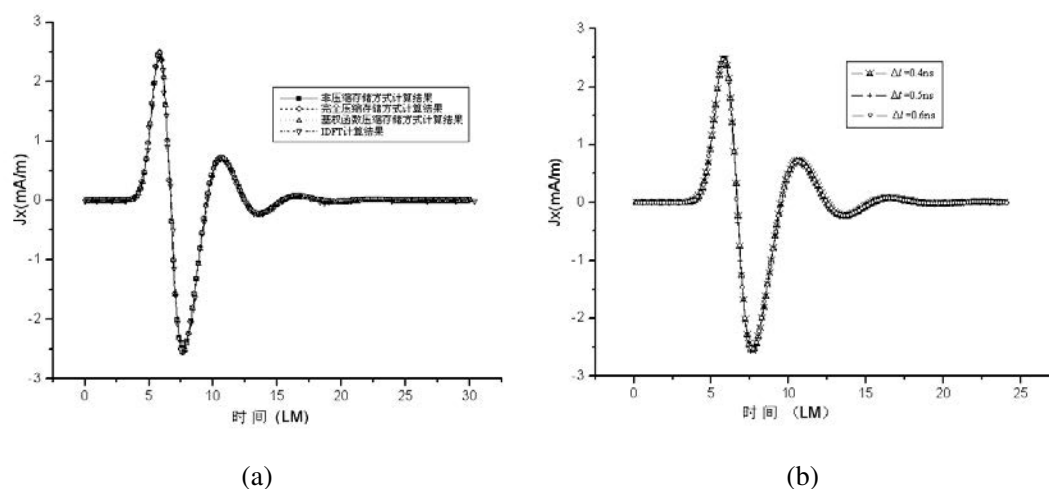


图 3-1 $2m \times 2m$ 的理想导体平板中心处感应电流 x 分量随时间的变化关系

(a)不同存储方式的计算结果与IDFT方法的结果比较；(b)不同时间步长的计算结果比较

3.3 时域积分方程时间步进算法矩阵方程的求解

.....

定理 3.3.1 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 首先, 由于.....

.....

根据....., 结论得证。

3.4 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4章 全文总结与展望

4.1 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。

.....

4.2 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：

.....

参考文献

- [1] L. E. Peterson. K-nearest neighbor[J]. Scholarpedia, 2009, 4(2):1883
- [2] J. R. Quinlan. Induction of decision trees[J]. Machine learning, 1986, 1(1):81–106
- [3] C. Cortes, V. Vapnik. Support-vector networks[J]. Machine learning, 1995, 20(3):273–297
- [4] J. A. Hartigan, M. A. Wong. Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics), 1979, 28(1):100–108
- [5] A. Y. Ng, M. I. Jordan, Y. Weiss, et al. On spectral clustering: Analysis and an algorithm[J]. Advances in neural information processing systems, 2002, 2:849–856
- [6] R. Agrawal, R. Srikant, et al. Fast algorithms for mining association rules[M]. Proc. 20th int. conf. very large data bases, VLDB, 1994, 487–499
- [7] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise.[M]. Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96), 1996, 226–231
- [8] J. Han, J. Pei, Y. Yin. Mining frequent patterns without candidate generation[M]. ACM Sigmod Record, 2000, 1–12
- [9] V. Estivill-Castro. Why so many clustering algorithms: a position paper[J]. ACM SIGKDD explorations newsletter, 2002, 4(1):65–75
- [10] 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
- [11] 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
- [12] X. F. Liu, B. Z. Wang, W. Shao. 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
- [13] 竺可桢. 物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1973, 56–60
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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

- [17] 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
- [18] M. Clerc. Discrete particle swarm optimization: a fuzzy combinatorial box[EB/OL]. http://clere.maurice.free.fr/pso/Fuzzy_Discrere_PSO/Fuzzy_DPSO.htm, July 16, 2010

致 谢

在攻读博士学位期间，首先衷心感谢我的导师 XXX 教授，……

……

The Name of the Game

1.1 xxx

1.1.1 xxx

1.1.1.1 xxxx

1.2 xxx

1.2.1 xxx

1.2.1.1 xxxx

English words like ‘technology’ stem from a Greek root beginning with the letters $\tau\epsilon\chi\ldots$; and this same Greek word means *art* as well as technology. Hence the name \TeX , which is an uppercase form of $\tau\epsilon\chi$. \TeX (actually \TeX), meaning of $\tau\epsilon\chi$

Insiders pronounce the χ of \TeX as a Greek chi, not as an ‘x’, so that \TeX rhymes with the word blecchhh. It’s the ‘ch’ sound in Scottish words like *loch* or German words like *ach*; it’s a Spanish ‘j’ and a Russian ‘kh’. When you say it correctly to your computer, the terminal may become slightly moist.

The purpose of this pronunciation exercise is to remind you that \TeX is primarily concerned with high-quality technical manuscripts: Its emphasis is on art and technology, as in the underlying Greek word. If you merely want to produce a passably good document—something acceptable and basically readable but not really beautiful—a simpler system will usually suffice. With \TeX the goal is to produce the *finest* quality; this requires more attention to detail, but you will not find it much harder to go the extra distance, and you’ll be able to take special pride in the finished product.

On the other hand, it’s important to notice another thing about \TeX ’s name: The ‘E’ is out of kilter. This logo displaced ‘E’ is a reminder that \TeX is about typesetting, and it distinguishes \TeX from other system names. In fact, \TeX (pronounced *tecks*) is the admirable *Text EXecutive* processor developed by Honeywell Information Systems.

Since these two system names are Bemer, Robert, see TEX, ASCII pronounced quite differently, they should also be spelled differently. The correct way to refer to T_EX in a computer file, or when using some other medium that doesn't allow lowering of the 'E', is to type '—TeX—'. Then there will be no confusion with similar names, and people will be primed to pronounce everything properly.

此名有诗意

1.1 xxx

1.1.1 xxx

1.1.1.1 xxxx

1.2 xxx

1.2.1 xxx

1.2.1.1 xxxx

英语单词“technology”来源于以字母 $\tau\epsilon\chi$...开头的希腊词根；并且这个希腊单词除了 technology 的意思外也有 art 的意思。因此，名称 TEX 是 $\tau\epsilon\chi$ 的大写格式。

在发音时， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 的 χ 的发音与希腊的 chi 一样，而不是“x”，所以 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 与 blecchhh 押韵。“ch”听起来象苏格兰单词中的 loch 或者德语单词中的 ach；它在西班牙语中是“j”，在俄语中是“kh”。当你对着计算机正确读出时，终端屏幕上可能有点雾。

这个发音练习是提醒你， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 主要处理的是高质量的专业书稿：它的重点在艺术和专业方面，就象希腊单词的含义一样。如果你仅仅想得到一个过得去——可读下去但不那么漂亮——的文书，那么简单的系统一般就够用了。使用 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 的目的是得到最好的质量；这就要在细节上花功夫，但是你不会认为它难到哪里去，并且你会为所完成的作品感到特别骄傲。

另一方面重要的是要注意到与 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 名称有关的另一件事：“E”是错位的。这个偏移“E”的标识提醒人们， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 与排版有关，并且把 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 从其它系统的名称区别开来。实际上，TEX(读音为 tecks)是 Honeywell Information Systems 的极好的 Text EXecutive 处理器。因为这两个系统的名称读音差别很大，所以它们的拼写也不同。在计算机中表明 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 文件的正确方法，或者当所用的方式无法降低“E”时，就要写作“TeX”。这样，就与类似的名称不会产生混淆，并且为人们可以正确发音提供了条件。