

中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆技术专业委员会编

国际岩土锚固与灌浆新进展

熊厚金 主编



中国建筑工业出版社

中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆专业委员会编

国际岩土锚固与灌浆新进展

熊厚金 主编



中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书纳入包括原国际岩石力学学会主席 C. Fairhurst 教授,国际土力学及基础工程学会主席 M. Jamiolkowski 教授,原国际隧道学会主席 E. Broch 教授,德国岩石工程学会主席 W. Witteke 教授和中国工程院副院长、中国科学院院士、中国工程院院士潘家铮教授,中国科学院院士、国际岩石力学学会副主席孙钧教授等国际知名学者、专家在内的论文 26 篇。涉及中、日、意、美、德、挪威等国的灌浆与锚固工程技术最新的有关理论和工程实践成果,其中有举世瞩目的中国三峡工程、日本青函海底隧道、挪威格约维克奥林匹克山洞体育场、德国爱德砌石坝、意大利比萨斜塔等工程加固的实践经验。这些论文反映了当前国际在灌浆与锚固技术方面的应用、发展动态与主要成就,是中外学者在这一领域中的最新成果。

本书可供从事岩土工程的专业技术人员及有关高等院校学生使用。

责任编辑:石振华

特约编辑:颜明志

中国岩石力学与工程学会岩石锚固与注浆专业委员会编
国际岩土锚固与灌浆新进展
熊厚金 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市二二〇七工厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 字数: 481 千字

1996 年 5 月第一版 1996 年 5 月第一次印刷

印数: 1—1600 册 定价: 50 元

ISBN7-112-02778-0
TU·2134(7888)·

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序 言

不知始于何时,“凝聚力”这个概念已经深深地渗透到人类活动的各个领域。在工程设计中,凝聚力是工程建筑物稳定和安全使用的象征。在岩土工程中,凝聚力更有其独特的重要的工程意义。自从一百多年前水泥问世以来,“锚固”与“灌浆”就逐渐发展成为岩土工程实践中行之有效、应用最广泛的加强凝聚力的两种好方法。在不良的复杂地质条件、环境条件的限制以及工程本身的特殊要求等许多不利条件下常使设计者别无选择的余地;而在另外一些并非罕见的场合,锚固与灌浆则又扮演了“救命者”的角色。虽不说是能“上补青天,下填沧海”,但往往能较为完善地解决一些常见的岩土工程稳定与安全问题。

锚固与灌浆是两种既独立而又关系密切、相辅相成的施工工艺和岩土加固技术,它们有时独立使用,有时又联合应用。由于它们能在原位对岩土进行加固或改性,充分挖掘岩体的潜力,使一定范围内的岩土体成为工程结构不可分割的组成部分,因此,多年来一直受到岩土工程界的高度重视。

本书共纳入论文 26 篇,主要选自 1994 年 12 月在广州召开的“国际锚固与灌浆工程技术研讨会”上宣读的论文,其中包括中国科学院院士、中国工程院副院长、院士潘家铮教授,国际岩石力学学会主席 C. Fairhurst 教授,国际土力学及基础工程学会主席 M. Jamiolkowski 教授以及哈秋龄、梁炯璠、谢量瀛、E. Broch、W. Witteke、米倉亮三、持田豊、中西涉等著名学者、专家在内的论文,其余的文章也均系出自锚固与灌浆行业知名人士的手笔。论文涉及中、日、意、美、德、挪威等国的锚固与灌浆工程技术最新的有关理论和工程实践成果,包括举世瞩目的中国三峡工程、日本青函海底隧道、挪威格约维克奥林匹克山洞体育馆、德国爱德砌石坝、意大利比萨塔等工程加固的实践经验。这些论文在一定程度上反映了当代锚固与灌浆工程技术的新水平。从这些文章中读者可以看到作者严密的理论分析、创造性的技术开发、明智的决断和完美的技巧,从中得到很好的启示。

最后,还应该指出:我国的同行通过全国性学术团体和技术协作网的努力,将锚固与灌浆这两类极具潜力的工程技术紧密结合,这在学术上可说是一大贡献,在技术上也将更有利于这两项技术的发展。

希望本书的问世能够为岩土工程事业的有志者和广大同行提供有益的参考。

孙 钧

中国科学院院士
国际岩石力学学会副主席
国际岩石力学学会中国国家小组主席
中国岩石力学与工程学会理事长
同济大学教授

Foreword

From time out of mind, the concept—"the force of cohesion" has already penetrated into every field of human activities.

In engineering project designing, the force of cohesion is the symbol of stability and safety of constructions. In geotechnical engineering, the force of cohesion is of unique and more important engineering significance. Since the coming out of cement more than one hundred years ago, "Anchoring" and "Grouting" have gradually developed into two effective and most widely used methods strengthening the force of cohesion of rock and soil in geotechnical engineering practice. More often than not, there is almost no alternative choice but anchoring or grouting for designers because of restriction of the poor and complicated geologic conditions, the environmental conditions, and the special requirements of projects. And on some other occasions that were in fact not rarely met, anchoring and grouting played also the role of rescuer. Although we cannot yet say that they can "mend the blue sky above, fill the green sea below", frequently, anchoring and grouting can be used to satisfactorily deal with some common geotechnical engineering problems indeed.

Anchoring and grouting are different, but closely related and complementary with each other two reinforcing methods for geomaterials, which are employed sometimes independently, sometimes jointly in geotechnical engineering. Because they can reinforce or improve the original rock and soil and make full use of their own capacity, they have been paid high attention by the circles of geotechnical engineering.

This book compiles a total of 26 papers mainly selected from those presented to the International Symposium on Anchoring and Grouting Techniques held in Guangzhou, China in

December 1994, including those written by some famous learners and specialists such as professor Pan Jiazheng, the Vice-director of Chinese Academy of Engineering, academician of Chinese Academy of Sciences; professor C. Fairhurst, the President of International Society for Rock Mechanics; professor M. Jamiolkowski, the President of International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering as well as Ha Qiuling, Liang Jinjun, Xie Liangying, E. Broch, W. Witteke, Ryoza Yonekura, Yutaka Mochida, Wataru Nakanishi etc. The other papers were all written by well known experts in the circles of anchoring and grouting. The papers reflect the latest related theories and practice of achievements in anchoring and grouting engineering projects including the Three Gorges Project in China which is attracting worldwide attention, the Seikan Tunnel in Japan, the Gjøvik Olympic Mountain Hall in Norway, the Eder Masonry Dam in Germany as well as the leaning tower of Pisa in Italy etc. All these papers represent the new level of today's anchoring and grouting techniques to some extent. Readers will see writers' rigorous theoretical analyses, creative technology development, wise determinations and perfect techniques, and obtain useful benefits from these papers.

Finally, it should also be pointed out herein that it can be said a contribution to the academic research and is favourable to the development of anchoring and grouting techniques for Chinese colleagues to tightly integrate these two very potential engineering techniques with each other through the effort of national academic societies and the technological cooperation network.

I hope that this book will provide useful reference for our colleagues and the readers who have made up their mind to engage in geotechnical engineering.

Sun Jun

Academician of Chinese Academy of Sciences,
Vice-President of International Society for Rock Mechanics,
President of Chinese National Group ISRM,
Director of Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering,
Professor of Tongji University.

编 者 的 话

科学探索和工程实践都是一种向高峰攀登的过程。科学研究是一种高度复杂而又难以捉摸的活动,探索者无疑地要经受艰苦的磨炼和进行艰苦的学习,需要从前人的经验和成就中吸取营养,本书的编辑正是为了这样一个目的。

本书汇集了国内外岩土工程知名人士的 26 篇论文,主要选自 1994 年 12 月在广州召开的“国际锚固与灌浆工程技术研讨会”上宣读的论文,其余各篇则系由锚固与灌浆行业的有经验的专家和知名人士撰写,全书的译校工作均由本专业的知名学者或工程师担任,译文的质量是比较高的。1994 年 12 月广州国际锚固与灌浆会议在国际上反响很大,认为是一次意义重大的、高水平的会议,国际岩石力学学会的《动态》杂志为此作了专门报导,国内同行也给予了高度的评价。本书出版必将促进锚固与灌浆的进一步发展。作者们从不同的角度和不同的工程实践,论述和反映了“锚固”与“灌浆”这两类极具潜力的工程技术。全书融理论与实践、技术性与学术性为一体,把这两类专业技术的新水平生动地展现在广大读者的面前,可以期望和预料,它对那些攀登高峰的勇士们将获得有益的启迪。对岩土工程与基础工程行业的广大工程技术人员,科研教学人员等也有很好的参考价值。

衷心感谢:

国际岩石力学学会、国际土力学及基础工程学会、国际隧道学会的主席及有关学者、专家专门撰文或译校或亲自参加会议;

中国岩石力学与工程学会及岩石锚固与注浆技术专业委员会及有关部门的领导和同行为会议成功所做出的贡献;

对本书成功地出版做出贡献的各位作者、译校人员和编辑出版人员;

为本书出版给予巨大支持的孙钧教授、梁炯望教授、谢量瀛教授、周维垣教授、王泳嘉教授、蒋国澄教授及林天健高级工程师。

错漏之处,敬请读者、作者们给予指正。

编者 熊厚金

1995 年 11 月

目 录

1. C. Fairhurst	
岩土工程中锚固的数值研究	1
2. 孙 钧	
中国岩土工程锚固技术的应用与发展	27
3. 潘家铮 包银鸿	
中国坝工灌浆的成就	33
4. 熊厚金	
中国化学灌浆的成就	41
5. E. Broch, A. M. Myrvang, G. Stjern	
大型岩石洞室的支护	
——包括(GJ ϕ VIK)奥林匹克山洞体育馆	51
6. 梁炯望	
我国岩土工程预应力锚索的发展与问题	62
7. W. Wittke, D. Schröder	
提高爱德(EDER)砌石坝的稳定性	69
8. 周维垣 杨若琼	
高压灌浆力学机理	82
9. 米倉亮三(Yonekura Ryoza)	
化学灌浆在地下工程中的新进展	91
10. 哈秋齡、譚日陞	
三峡工程基础处理灌浆的研究	101
11. 持田 豊(Yutaka Mochida)	
青函隧道的灌浆与锚固	114
12. 谢量瀛 胡万毅	
北京地铁西单站管棚注浆与支护结构综合作用	
机理分析	142
13. 王新杰 王元湘	
注浆技术在我国地铁工程中的应用	153
14. S. Bondioli and U. Castellotti	
灌浆与高压喷射灌浆在地铁工程中的实践	165
15. 王泳嘉	

拉格朗日元法及其在锚固工程中的应用	177
16. 李咸亨 谢宗荣	
柔性锚定体之非线性有限元分析	184
17. P. Grasso, M. A. Mahtab, 徐书林、哈秋龄、傅冰骏	
用预加固技术改善隧道及人工开挖边坡的稳定性 ...	191
18. 殷跃平 梁炯望	
长江三峡链子崖危岩体防治工程预应力锚索设计 ...	200
19. 朱维申 张玉军	
锚杆加固围岩的效应及其在三峡船闸高边坡中 的应用	209
20. D. A. Bruce, P. J. Nicholson	
用后张岩锚加固混凝土坝	218
21. D. Costanzo, M. Jamiolkowski, R. Lancellotta and M. C. Pepe	
比萨(PISA)斜塔的特征描述	227
22. D. A. Bruce and G. Dugnani	
美国灌浆实践的进展	253
23. 杜嘉鸿 张士旭	
中国高压喷射注浆技术的应用现状及新进展	269
24. 林天健	
灌浆施工控制理论与工艺	275
25. 中西 涉(Wataru Nakanishi)	
高压喷射超前排桩——MJS 工法	285
26. 熊厚金	
化学灌浆的明天——浅谈 21 世纪化学灌浆的 发展战略	296

CONTENTS

1. SOME NUMERICAL STUDIES OF ANCHORING IN GEOTECHNICAL ENGINEERING	
C. Fairhurst	1
2. THE APPLICATION AND DEVELOPMENT OF ANCHORING TECHNIQUES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING IN CHINA	
Sun Jun	27
3. CHINA'S ACHIEVEMENTS IN DAM — ENGINEERING GROUTING	
Pan Jiazheng and Bao Yinghong	33
4. CHINA'S ACHIEVEMENTS IN CHEMICAL GROUTING TECHNOLOGY	
Xiong Houjin	41
5. SUPPORT OF LARGE ROCK CAVERNS, INCLUDING THE GJØVIK OLYMPIC MOUNTAIN HALL	
E. Broch, A. M. , Myrvang, and G. Stjern	51
6. DEVELOPMENT AND PROBLEMS OF PRESTRESSED ANCHOR CABLES FOR GEOTECHNICAL ENGINEERING IN CHINA	
Liang Junjun	62
7. UPGRADING THE STABILITY OF THE EDER MASONRY DAM	
W. Wittke and D. Schröder	69
8. THE MECHANICAL MECHANISM OF HIGH PRESSURE GROUTING	
Zhou Weiyuan and Yang Ruoqiong	82
9. RECENT CHEMICAL GROUT ENGINEERING FOR UNDERGROUND CONSTRUCTION	
Yonekura Ryoza	91
10. GROUTING RESEARCH ON THE FOUNDATION TREATMENT IN THE THREE GORGES PROJECT	

	Ha Qiuling and Tan Risheng	101
11.	GROUTING AND ANCHORING IN THE SEIKAN TUNNEL	
	Yutaka Mochida	114
12.	THE MECHANISM ANALYSIS OF THE COMPREHENSIVE ACTIONS BY THE CONDUIT RACK, GROUTING, SUPPORTING STRUCTURE IN XIDAN STATION OF BEIJING SUBWAY	
	Xie Liangying and Hu Wanyi	142
13.	APPLICATION OF GROUTING TECHNIQUE IN CHINESE METRO ENGINEERING	
	Wang Xinjie and Wang Yuanxiang	153
14.	GROUTING AND JET GROUTING EXPERIENCES FOR M. R. T. SYSTEMS IN URBAN AREAS	
	S. Bondioli and U. Castellotti	165
15.	LAGLANGIAN METHOD AND ITS APPLICATION IN ANCHORING ENGINEERING	
	Wang Yongjia	177
16.	NONLINEAR FEM ANALYSIS OF FLEXIBLE ANCHORS	
	Li Xianheng and Xie Zongrong	184
17.	STABILITY IMPROVEMENT OF TUNNELS AND ARTIFICIALLY-CUT SLOPES USING A PRE-REINFORCED TECHNIQUE	
	P. Grasso, M. A. Mahtab, Xu Shulin, Ha Qiuling and Fu Bingjun	191
18.	ANCHORING ENGINEERING FOR LIANZIYA DANGEROUS ROCKMASS CONTROLLING IN THE THREE GORGES OF THE YANGTZE RIVER	
	Yin Yueping and Liang Jiongjun	200
19.	EFFECT OF SUPPORTING SURROUNDING ROCKS BY BOLTS AND ITS APPLICATION TO HIGH SLOPE OF THREE GORGES FLIGHT LOCK	
	Zhu Weisheng and Zhang Yujun	209
20.	THE STABILIZATION OF CONCRETE DAMS BY POST-TENSIONED ROCK ANCHORAGES	
	D. A. Bruce and P. J. Nicholson	218
21.	LEANING TOWER OF PISA DESCRIPTION OF THE BEHAVIOUR	

	D. Costanzo, M. Jamiolkowski, R. Lancellotta and M. C. Pepe	227
22.	INNOVATIONS IN AMERICAN GROUTING PRACTICE D. A. Bruce and G. Dugnani	253
23.	THE STATE AND RECENT DEVELOPMENT OF JET GROUTING IN CHINA Du Jiahong and Zhang Shixu	269
24.	THEORY AND TECHNOLOGY FOR CONSTRUCTION CONTROL IN GROUTING WORKS Lin Tianjian	275
25.	METRO JET SYSTEM Wataru Nakanishi	285
26.	THE FUTURE OF CHEMICAL GROUTING — AN ELEMENTARY INTRODUCTION TO THE DEVELOPMENT STRATEGY CONCERNING THE CHEMICAL GROUTING OF THE 21ST CENTURY Xiong Houjin	296

1. 岩土工程中锚固的数值研究*

C. Fairhurst^①

〔提要〕 岩土材料和问题有许多特点,诸如大规模的非均质和不连续性,象节理和断层以及流体和固体岩石的耦合作用,岩体的强度未知等,再有是数据有限,特别在建设前知之不多。所有这些特点表明需要采用一种与用于人造材料不同的设计方法。

由于最近个人计算机的不断发展,数值模拟遂成为成功的岩土工程设计的强有力的工具,它能直接强化设计过程并增加其它设计方法,例如物理模型,现场量测和经验分类方法的价值。

本文认为,有限差分法,至少对岩土工程设计而言,有着较其它数值模拟方法更大的优点。文中叙述了在采矿和土木工程中岩石加固的实际应用例子,讨论了包括连续介质和非连续介质的二维和三维的各种情况。文章的最后还简单评述了最近开发的“颗粒流”的数值程序。

1. 前言

国际岩石力学学会(ISRM)是由 L. 米勒(L. Müller)博士于 1962 年创建的。米勒是奥地利人,是一位岩土工程的国际顾问,从事大坝和岩石边坡的咨询工作。(他于 1986 年 6 月曾到三峡坝址访问过。)米勒博士创建学会的初衷是要集中注意于岩体强度不连续性的重要性以及建立力学的原则以估计与土壤不同的岩体原位的强度和变形性质。挑战仍然存在,在建立对节理岩体强度的可靠估值的可靠方法方面仍有很多工作要做。虽然在估算岩体的强度方面已经有了进步,但是不确定性仍然存在,因此通常需要审慎地利用已有的技术在一定程度上减少对强度估计的这种不确定性。主要有两个方面:

(1)岩石加固—主要用岩石锚固。

(2)岩石改性—主要用岩石灌浆。

因此,这次学术讨论会的主题—“岩石锚固与灌浆”,同岩石力学与工程以及国际岩石力

* 1994 年 12 月 7 日在中国广州锚固与灌浆技术国际学术讨论会上的特约报告。

① 1991~1995 年任国际岩石力学学会主席,教授。

学学会的宗旨非常吻合。

自 1962 年以来岩石力学的一个主要进展是引入计算机和数值模拟。正如预料的那样，在开始时岩石力学分析的进展在很大程度上有赖于在其它工程领域的进展，特别是力学在这些领域中的应用。岩石力学中数值模拟的最早应用集中于有限单元法——该法最初是为应用于结构材料变形性质的研究而开发的，材料的力学性质可以精确地加以确定，结构的范围也较岩石结构的范围要小得多。岩石设计的问题则大为不同。表 1-1 所示为岩石工程设计问题的特点。

岩土工程设计的特点 表 1-1

可变性和不确定性
主要是压应力——预应力‘结构’，开挖引起卸载或加载
大小尺寸和时间的变化范围大
地质条件复杂——三维，非均质，不连续性——断层、断裂、层面
岩体的强度和变形特性未知，‘峰值后’的性质重要
液体和固体的相互作用：耦合效应，水、油、气、热…
没有原型
边干边设计——即要根据开挖或建设时发生的不可预见的条件迅速改正设计
问题为数据有限
分析的主要目的为“理解机理”而非精确的定量计算

由于有以上这些差别，所以要有一种不同的设计方法可以概括为：“岩石力学问题是数据有限的问题，需要采用与其它工程领域不同的设计方法。”(Starfield 和 Cundall(1988))

“(在岩石力学中)通常认为只能从定性的数学模型中得到定量结论的观点看起来似乎奇怪，但这是由于我们无法更好地去描述岩石力学过程的原因。”(Detournay 等(1993)) 换言之，岩体的复杂程度达到这样的地步，以致当今最有力的分析和数值方法尚不能描述岩石变形的机理，因而只能从分析中得到对具有内在不确定性和多变性的岩体力学性质的定性的结论，即得到对物理过程的总的了解。然而，这种了解的价值对于设计来讲是至关重要的。一旦内在的机理清楚了，工程师就能根据预计条件的变化来进行设计。能否根据条件的变化来进行设计，是一个成功和经济的设计同费用高甚至会发生事故的设计的区别所在。

2. 岩石工程设计问题的数值模拟

如上所述，岩石工程中早期的数值模型主要系采用原为结构分析所开发的数值方法，其特点是：(a)所用材料的力学性质可以由实验室试验来确定，(b)整个结构的性能可以直接根据原型试验来确定。在很多场合，变形可以限制在线弹性范围内的小变形。在岩石结构中则往往必须考虑大变形、大应变和非线性，在很多场合中还要研究“峰值后强度”的变化，这时结构可能破坏而呈应变软化的状态。实际上即使岩石的强度为已知，也建议去考虑强度高估的效应。

2.1 显式有限差分法

由于认识到岩石和岩体的这种特点，明尼苏达大学的 P. Cundall 博士(以及最近和他在美国明尼苏达明尼阿波利斯 ITASCA 咨询集团公司的同事们)认为在岩石变形的模型中用显式的有限差分法可能较在其它领域中广泛应用的隐式的有限单元法为好。岩石力学的其

他研究者也有同样的想法。由于对显式方法和有限元法中常用的隐式方法经常引起误解,所以在表 2 中概括地列出了两者的比较。

有限差分法可能是给定初值和(或)边值求解微分方程组的一种最古老的数值方法,(例如,见 Desai 和 Christian, 1977)。在用有限差分法时,控制方程组中的导数直接用空间离散点的场变量(例如,应力或位移)的代数表达式来代替,这些变量在单元中是未定义的。

相反,有限元法的一个根本的要求就是在每个单元中场变量(应力,位移)要用一定的参数函数来描述。在有限元法的列式中,这些参数要根据误差项或能量项为最小的原理来确定。

这两种方法都要解一个代数方程组。虽然这两个方程组系用不同的方法得到,但是容易证明(在特殊情况下)彼此的结果是等同的。这样就无需去争辩有限元法和有限差分法孰者为好。

然而,长期以来某些“传统”的方法已成定势,例如,有限元法往往要将单元刚度矩阵组合成总体刚度矩阵,而有限差分法则一般不需要这样做,因为有限差分法在每一步都可以很容易地重新形成有限差分方程。虽然隐式的矩阵解法在有限元法中普遍采用,但是正如下面要解释的,在本文中所用的数值程序(见附录)却采用了显式的步进方法来求解代数方程。有限差分的其它格式也是常用的。这里要强调的是,不同格式总有各自的特点,但是使用的习惯可能更重要。

最后,还有一个疑窦需要加以消释。很多人(包括一些写教科书的人)相信有限差分法只适用于直角网格。这是不对的。Wilkins(1964)提出了一种方法可以对任何形状的单元推导有限差分。在本文采用的程序中就采用了这种方法。长期来对边界形状和材料性质分布的种种叙述遂产生了有限差分 and 直角网格不可分的这种错误的认识。用 Wilkins 方法则边界可以是任何形状,单元可以有任意的材料性质,就象有限单元一样。

2.2 显式的时间步进方法

虽然通常我们要求一个静力问题的解,但在列式中依然包括运动的动力学方程。理由之一是即使所模拟的物理系统是不稳定的也要保证数值方法的稳定。材料的非线性往往会导致系统的失稳,例如矿柱的突然破坏。在现实生活中,系统中应变能的一部分转变为动能,然后辐射出去消散掉。显式有限差分法直接模拟了这一过程,因其包括惯性项,动能产生又消散。相反,如果算式中不包括惯性项则需要另辟蹊径来处理物理的不稳定。这样即使可以防止数值不稳定,但是所取的路径可能不是真实的。包括全部的运动定律也是要有代价的,那就是它一定要有一些物理的感觉知道在做什么,程序并非是一个可以给出“解答”的“黑箱”。数值系统的性态应该有所解释。

图 1-1 所示为程序中的总的计算过程。先是用运动方程由应力和力求出新的速度和位移。然后由速度推导出应变率,并由此求得新的应力。一个时步为沿回线的一个循环。要理解的重要的事是在图 1-1 上的每一个框当控制在该框时要从保持固定的已知值更新所有的结点变量。例如,下面的框采用已经计算得到的速度值对每个单元计算新的应力。在框中操作时的速度视为冻结的量,即速度并不受新计算得到的应力的影响。这看起来是不合理的,因为我们知道如果应力变化了,它总会影响其邻域使速度变化。于是我们用了这样一个如此小的时步以致从物理上讲信息不可能在这期间由这一个单元传递到别的单元。(所有的材料都有其信息能得以传布的最大速度。)因为回线的一个循环只有一个时步,所以我们假定速度是