

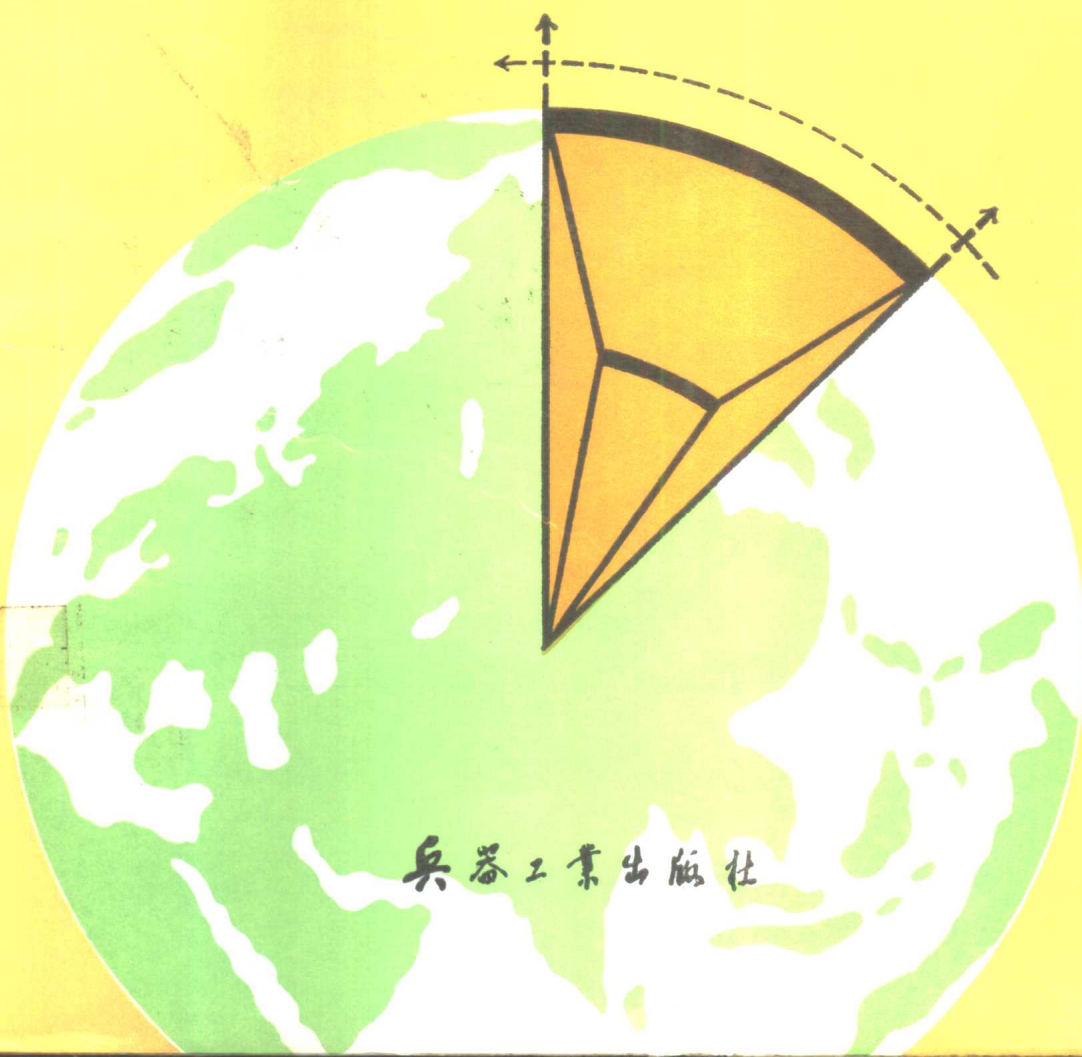
COMPUTATIONAL ENGINEERING GEOLOGY

计算工程地质学

理论 · 程序 · 实例

THEORY
PROGRAMMES
EXAMPLES

中国兵器工业勘察研究院 黄运飞 冯静 编著



兵器工业出版社

中国科学院地质研究所
工程地质力学开放研究实验室

计算工程地质学

理论·程序·实例

黄运飞 冯 静 编著

兵器工业出版社

(京)新登字 049 号

内容简介

计算工程地质学是本书首次提出的一门边缘学科,它是工程地质学与计算机科学、数学、力学交叉发展的结果。全书共分五篇二十三章。第一篇为工程地质体的特征,包括土体、岩体及其赋存环境;第二篇为工程地质信息处理方法,主要是统计分析、随机模拟、回归分析与曲线拟合、时间序列分析、趋势面分析、灰色系统分析、分形理论、结构面的调查及分析;第三篇是工程地质力学计算方法,包括有限差分法、有限单元法、边界单元法、离散单元法及位移反分析法;第四篇介绍了工程地质综合分析方法,有工程地质计算机制图、专家系统及数据库;第五篇为地质工程问题,包括地基基础工程,边坡工程及地下工程。

本书理论简明扼要,重点突出实用算法及计算机软件,总共附录了 FORTRAN、LISP、dBASEIII 语言编写的 40 多个实用软件。这些软件基本上覆盖了工程地质学中的主要问题。

本书可供国防、水电、城建、冶金、交通、矿山、海洋、环保等部门的工程地质或岩土工程勘测、设计、科研、施工技术人员阅读以及大专院校师生参考。

书中所附源程序及实例数据文件合录于三张 360K 软盘中,需要者请与作者联系。

计算工程地质学 理论·程序·实例

黄运飞 冯 静 编著

责任编辑 任 燕

兵器工业出版社出版发行

(北京海淀区车道沟 10 号)

北京昌平百善印刷厂印装



开本: 787×1092 1/16 印张: 23.75 字数: 578 千字

1992 年 11 月第 1 版 1992 年 11 月第 1 次印刷

印数: 1-1000 定价: 25.00 元

ISBN 7-80038-563-9/P·1

作者简介

黄运飞，中国兵器工业勘察研究院高级工程师、总工助理，中国科学院工程地质力学开放实验室客座副研究员。1963年9月生于四川邻水。1983年获重庆大学矿山工程物理学学士；1986年获重庆大学岩石力学工学硕士，导师杨维怀；1989年获中国科学院地质所工程地质理学博士，导师孙广忠、王思敬。参加完成的“岩体结构力学研究”获中国科学院1990年度自然科学一等奖；曾负责完成一项国家七五重点攻关课题及两项中科院工程地质力学开放研究实验室课题；1986年提出了地下洞室维护的“围岩弱化法”新观念；1991年负责完成了“密云水库引水隧洞及水下岩塞爆破口的工程地质勘察及评价”工作。现主要从事岩土工程、计算机应用研究及工程勘察实践。发表学术论文20余篇。



作者简介

冯静，中国兵器工业勘察研究院工程师，1965年3月生于四川成都。1985年重庆大学资源环境工程系（原采矿工程系）本科毕业，1988年获重庆大学岩石力学工学硕士，导师杨维怀，杨志法（中国科学院地质所）。主要从事计算工程地质学研究，发展了图谱位移反分析方法，并在国内几个大型工程应用中应用。发表科技论文近十篇，其中“位移反分析方法及其实用化研究”一文获兵器工业部首届青年论文三等奖。参加完成的中科院工程地质力学开放研究实验室课题“粘弹性位移反分析原理及方法”获该室优秀科研成果奖。负责完成了京城大厦（地上52层，地下4层）深基础的开挖回弹与沉降分析。

序

案头出现了一部巨著。这就是两位年青人的处女作“计算工程地质学”。他（她）们的努力进取和刻苦钻研精神确实感人。

计算机的发展给整个科学技术带来了巨大的变革，人类社会由此进入到信息时代。计算机科学为各个学科和领域开辟了前进的道路，展示了发展的远景。

工程地质学要进入工程的设计、施工和运行管理，只有采用最先进的计算技术，才能发挥地质研究的优势，将极其复杂的地质体系特征用大量数据表征出来，达到定量评价和预测的目标。舍此，别无它法。现在年青人赶上了，他（她）们把地质理论和信息、通过计算手段，带入工程的实际应用，这是尤其值得称赞的。

预期“计算工程地质学”会开花结果，成为联系工程地质学理论和实践的纽带，从而促进工程地质学的新发展。

王思敬

一九九二年十月廿四日

前言

工程地质发展到今天,在国民经济建设中发挥着越来越大的作用,尤其是计算机技术在工程地质中的应用,使传统的工程地质学产生了质的飞跃。本书首次提出《计算工程地质学》这门边缘学科,旨在推进工程地质学的发展。

计算工程地质学的提出和发展是工程地质学与计算机科学、数学、力学交叉发展的必然结果。事实上,从工程地质学诞生之日起,就一直在致力于把数学、力学中的有关成果用于解决工程地质中的实际问题。随着计算机技术的发展,以数学、力学理论为基础,以工程地质分析为指导,以计算机技术为手段,成功地解决了我国国民经济建设中的许多重大工程地质问题,在这一过程中,逐步形成了计算工程地质学的雏形。

本书编著的一个很重要的目的在于向读者提供一套解决工程地质主要问题的计算机软件,以推动我国计算机在工程地质中的应用。书中附录的大量实用软件,相信会对读者在工程地质软件的应用、开发及改进中起到一定的帮助作用。

本书由黄运飞、冯静等编著,其中,黄运飞编著了第0、二、三、五、六、八、九、十一、十二、十四、十五、十七、二十一、二十二章;冯静编著了第一、四、七、十三、十六章;梁金火编著了第十八、十九章;化建新编著了第二十章,开发了21.3的软件;庞仁久编著了第十章。全书最后由黄运飞、冯静修改定稿。

常士骝教授、孙广忠教授、尤大鑫教授等工程地质界前辈审阅了本书的初稿,提出了许多宝贵的建议,尤其是孙广忠教授,对作者的学术思想的形成有着巨大的影响。另外,在本书的写作及相关软件开发过程中,曾得到国内外众多朋友的协助和支持,尤其需要特别感谢的有朱合华博士、蔡诚基博士(澳)、舒德明博士(澳)、邢纪波博士、熊顺成博士、王芝银副教授、何满潮博士、张文彬博士(美)、刘传伟讲师以及中国兵器工业勘察研究院赵术强工程师、毕安君工程师等。

中国科学院工程地质力学开放研究实验室为本书资助了部分出版费,《军工勘察》杂志社为本书的出版给予了大量的帮助,兵器工业出版社的任燕编辑对本书的初稿提出了许多有益的建议和修改意见,对此,作者深致谢意。

衷心感谢王思敬教授为本书题写了序言。

由于作者水平有限,书中定有不妥之处,敬请读者诸君不吝赐教。

编著者

1992.10 于北京

目 录

第0章 绪论	1
0.1 当今工程地质的特点	1
0.2 工程地质学与计算机科学	3
0.3 工程地质学与现代数学力学	5
0.4 计算工程地质学的基本原理	6

第一篇 工程地质体的特征

第一章 土体	11
1.1 土体的物质组成	11
1.2 土的结构	14
1.3 土的物理、水理性质	18
1.4 土的渗透性	21
1.5 土的固结与压缩	26
第二章 岩体	38
2.1 岩体结构	38
2.2 岩体变形	42
2.3 岩体破坏机制及破坏判据	50
第三章 地质体的赋存环境	57
3.1 地应力	57
3.2 地下水	65

第二篇 工程地质信息处理方法

第四章 工程地质数据统计分析	70
4.1 观测数据的检验及预处理	70
4.2 统计量	73
4.3 统计分析	75
第五章 随机模拟(Monte-Carlo 法)	83
5.1 Monte-Carlo 法	83
5.2 随机数的生成	84
5.3 随机变量的产生方法	85
第六章 回归分析与曲线拟合	89
6.1 回归分析的基本原理	89

6.2 逐步回归分析方法	93
6.3 非线性函数的拟合	97
第七章 时间序列分析	101
7.1 时间序列模型	101
7.2 模型识别及参数估计	102
7.3 预报	104
7.4 时间序列分析中的几个问题	105
第八章 趋势面分析	109
8.1 趋势面分析的基本模型	109
8.2 趋势面分析中的几个问题	113
8.3 趋势面分析程序 TREND 及滑坡分布趋势分析	115
第九章 灰色系统方法	119
9.1 生成数的运算	119
9.2 GM 模型	120
9.3 预测精度分析及检验	123
9.4 灰色预测程序 GM1 及其应用	124
第十章 工程地质中的分形理论和方法	127
10.1 分形几何的基本概念	127
10.2 岩体和土体的分形结构模型	129
10.3 分维的计算方法	133
10.4 应用	135
第十一章 岩体中的结构面调查及分析	141
11.1 结构面调查技术	141
11.2 结构面聚类分析	141
11.3 结构面几何参数概率模型	144
11.4 岩体结构 Monte-Carlo 模拟	146
11.5 应用	147

第三篇 工程地质力学计算方法

第十二章 有限差分法	149
12.1 数值方法概论	149
12.2 有限差分法基础	151
12.3 二维扩散型方程的有限差分法求解	156

第十三章 有限单元法	159
13.1 有限单元法的基本原理	159
13.2 典型工程地质问题的有限单元公式	165
13.3 非线性分析及方程组求解	168
13.4 岩土二维非线性有限单元分析程序	170
第十四章 边界单元法	185
14.1 弹性静力问题的直接边界单元法	185
14.2 弹性静力问题的间接边界单元法	188
14.3 二维静力直接法边界单元程序 PHIL	189
第十五章 离散单元法	197
15.1 概述	197
15.2 块体接触的本构模型	198
15.3 块体变形及破坏	200
15.4 水渗流效应	205
15.5 离散单元与边界单元的耦合	206
15.6 应用	207
第十六章 位移反分析方法	210
16.1 概述	210
16.2 位移反分析方法	213
16.3 位移反分析方法的应用	217

第四篇 工程地质综合分析方法

第十七章 工程地质计算机制图	220
17.1 图形元子程序	220
17.2 基本绘图子程序	224
17.3 等值线图	227
17.4 有限元分析的前后处理	240
17.5 节理裂隙统计图	246
17.6 工程勘察剖面图的绘制	249
17.7 工程地质编图新技术 GIS 简介	250
第十八章 专家系统方法	253
18.1 专家系统概述	253
18.2 知识库	256
18.3 推理机	258
18.4 数据库	263

18.5 专家系统实例	266
第十九章 数据库管理系统	269
19.1 数据库的建造	269
19.2 数据查询子系统的建造	273
19.3 数据维护子系统的建造	274
19.4 实例分析及程序	275

第五篇 地质工程问题

第二十章 地基基础工程	281
20.1 岩土参数的统计分析	281
20.2 地基土的承载力	282
20.3 地基土的应力分布	296
20.4 地基沉降计算	304
第二十一章 边坡工程	314
21.1 土质边坡	314
21.2 岩质边坡变形破坏特征	333
21.3 岩质边坡的稳定性计算	339
第二十二章 地下工程	345
22.1 围岩应力变形及破坏规律	345
22.2 围岩支护理论及其发展	347
22.3 围岩弱化法的原理及效果	348
22.4 岩石地下工程勘测资料的解释	358
附录 使用本书所附 FORTRAN 程序时应注意的几个问题	365
参考文献	366

软件目录

1. MEAN 计算均值	75
2. SIGM、SIGM1 计算标准差	75
3. XMID 求样本中位数	75
4. PROB 检验数据是否服从正态分布	82
5. RANDU 随机数产生	85
6. RANGEN 随机变量的产生	88
7. LINFIT 直线回归分析	91
8. STEPREG 线性逐步回归分析	96
9. CURFIT 任意曲线的拟合	99
10. ARN 时间序列分析	107
11. TREND 二维普通多项式趋势面分析	117
12. GM1 灰色系统预测	125
13. JCLASS 节理聚类分析	142
14. JMESH 岩体结构的 Monte-Carlo 模拟	148
15. FDM 二维扩散型方程的有限差分求解	158
16. FEMA 二维岩土非线性有限元分析主程序	176
17. PHIL 二维弹性静力直接法边界元分析	192
18. DXY DXY 类绘图仪图形元子程序	220
19. CAD Auto CAD 图形元子程序	222
20. CURPOT 绘散点图及拟合曲线	224
21. LPOT 实验数据的绘制	225
22. BAR 统计直方图	226
23. PD 三角法平面等值线图	231
24. CONTLN 网格法立体等值线图	238
25. DCFEM 有限元法的前处理	243
26. DNET 三角形和四边形网络图的绘制	244
27. STRESS 有限元法的后处理	245
28. ARROW 画箭头	245
29. DBOUN 画边界线	245
30. JMAP 节理统计图	248
31. JTRAN 节理实测数据转换	248
32. EXPERT 围岩稳定性预测的简易专家系统	266
33. SWELL 膨胀岩数据库管理程序	277
34. STAT 岩土参数统计	282
35. BC 查表法确定地基承载力	285
36. TBC 理论计算地基承载力	285
37. FLT 载荷试验	290

38. PMT 旁压测试	292
39. FSD 地基土的应力计算	302
40. RREAME 非均质土质边坡稳定分析程序	325
41. SARMA Sarma 法边坡分析	342

第 0 章 绪论

计算工程地质学(Computational Engineering Geology)是工程地质学与计算机科学、数学、力学相结合而逐步发展起来的一门边缘学科。它使用工程地质学、数学、力学及计算机科学中的有关方法来研究工程地质问题,其中特别强调计算机技术在工程地质学中的应用。本章主要叙述当代工程地质学的特点及工程地质学与计算机科学、数学、力学的相互关系,着重论述计算工程地质学的基本原理及方法,应用计算工程地质学来解决工程地质实际问题的基本思路及需要特别注意的几个问题。

0.1 当今工程地质的特点

0.1.1 工程地质学及其任务

工程地质学是地质学的一个分支,是调查、研究、解决与兴建各类工程建筑有关的地质问题的科学。

按孙广忠先生的观点,工程地质学的任务主要是查清工程地质条件和解决好“地质工程”(Geoengineering 或 Geological Engineering)问题,或者说是“防灾”。传统工程地质学的主要任务是查清工程地质条件,今天的工程地质工作则以工程地质环境研究来概括更恰当些,这里所说的环境包括大环境及建筑物座落的小环境。

为了保证工程的稳定性,首先必须了解场地条件,以进行相应的建筑物结构设计。不同的工程地质条件对各类工程又会产生不同的工程地质问题,需要进行专门的研究,以保证工程建设的安全性、经济性和正常运行。随着人类工程和经济活动规模扩大,引起地壳岩石圈自然平衡的破坏也就越来越严重,形成灾害性地质作用,危及人类的安全与生活环境,使得人们不但要关心工程本身的稳定性,还必须注意工程对环境地质的影响。因此,工程地质学研究的内容和范围也在不断扩大,它不仅要保证建筑物的兴建和持久稳定性提供地质科学依据,而且已成为研究人类工程活动与其周围地质环境相互作用和影响的科学。工程地质学已由条件工程地质学(研究工程地质条件)、问题工程地质学(研究工程地质问题),向环境与灾害工程地质学转化与发展,研究的领域无论从广度上和深度上都在随着工程规模的扩展而快速地扩展。

我国工程地质学基本上是在建国初期从前苏联引进的。经过 40 多年来的努力,随着大规模社会主义建设的发展,我国已拥有一支基本能适应国家基本建设需要,并开始走向世界的工程地质工作队伍,同时形成与发展了具有我国特色的工程地质科学体系。

治淮工程、南京长江大桥工程、葛洲坝水电枢纽工程、大瑶山 14km 铁路隧道、采深达 400~500m 的大型露天矿、开滦煤矿超千米深度的采煤井巷、苏南和广东核电站及各大城市超高层建筑等一系列大型工程的兴建,都显示了我国工程地质勘测工作的水平。

任何大型工程所需研究的工程地质问题,归纳起来,主要包括三个方面的内容,即区域稳定性、地质工程稳定性和环境影响评价。

区域稳定性主要指内力作用引起的构造活动,特别是断裂活动、地表活动对工程建设地区稳定性的影响。地质工程指地基、边坡、地下工程等,其稳定性主要表现为人类开挖

和堆积引起地质体变形与破坏对工程安全的影响程度。在进行地质工程稳定性评价时, 必须将地质体改造方案、技术可能性及经济合理性几个因素都考虑进去。

环境影响评价是研究人类工程活动对环境造成的影响, 为合理利用和保护环境提供工程地质依据。它是从环境安全角度着眼, 从广阔的区域研究入手进行综合性研究, 对环境变化作时间、空间和规模上定性与定量的预测预报以寻求相应的对策。

0.1.2 当今工程地质学的基本课题

0.1.2.1 能源

(1) 水电建设 我国水能资源居世界首位, 但已开发利用的水利能源仅占总量的 8% 左右, 而世界上工业发达国家水利能源开发已达 40%, 有的高达 90%。兴建大型水电工程, 下列几个主要问题显得非常突出和重要: 区域地壳稳定性、坝基稳定性、大跨度高边墙地下厂房围岩稳定性、库岸稳定性和环境地质影响问题。现在的高坝坝高基本上是 250m, 国际上已达 300m, 对于这么高的大坝, 很多问题都会出现。

(2) 核电工程 世界石油现有储藏量在 2000 年后仅够开采几十年, 世界能源结构正进入由石油为主向非石油能源过渡时期。核能利用, 特别是在缺少能源地区发展核电是解决能源问题的重要途径之一。核电对水文地质工程地质研究的要求多集中在区域稳定性、核废料储存 (暂存和长期存放条件) 和环境污染评价方面。例如, 苏南核电站研究了厂址周围 300km 范围内活动断层特性和分布规律, 并结合深部地壳结构特征提出抗震设计的动力参数 (加速度、周期、地基持续时间) 以及核废料暂存洞室的封闭和渗透条件等基本问题和资料。

(3) 煤炭与石油开发 煤、气体是我国主要能源 (约占 70%), 露天煤矿采掘比已达到 1:6, 采掘深度向四五百米深部发展。这种高边坡坡角变化, 其经济效益一度就可达 1000 万美元。井巷采煤深达千米, 长壁采煤作业跨度达 140m, 都会不同程度地遇到高地应力 (岩爆)、高地温、软岩井巷变形、坚硬岩石顶板破坏、突水、瓦斯突出等问题, 地面上还可能引起地面塌陷。石油构成了 14% 的能源, 一口千米采油井耗资 30 万元, 而井损事故率较高, 有的油田一天高达 1.5 口。目前, 石油开发已逐步向海洋发展。我国近海陆架区面积为 $2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。其中, 水深小于 200m 的沉积盆地面积为 $8.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。故海洋工程地质也急待加强和发展。

0.1.2.2 城镇建设

社会的进步和国家的工业化必然带来人口的增长。因此, 世界人口都市化以及城市建设向高空和地下发展已成为一个自然的趋向。随着中小城市的加速形成, 大城市的建设向高空发展, 即兴建超高层建筑; 也向地下发展, 即修建地铁和地下商场及公共设施。因此, 使原本只是对一般地基土勘测的城市工程地质工作极大地复杂化了。高、重、大的建筑, 一般每层可增加荷载 12~15kPa, 还须考虑风力、地震力等水平荷载, 其抗震要求势必增高。尤其是深基础工程, 当在水位以下时, 降水、护坡等问题是较为严重的, 如果处理不好就会出事故。

地铁建设中最重要的是围岩失稳和水害。为了解决这两大问题, 选择线路方案,

特别是确定理想通过地层是非常重要的。这个工作做好了,施工和运行就不会对环境造成严重影响,不会出现大的问题。

0.1.2.3 矿产资源和国防工程

矿产资源和国防工程建设中的工程地质问题与能源建设项目的问题大致相似,以地下工程居多,需要评价地下工程和坑道的围岩稳定性。军事上有时需选取地下一定深度内的无水区作试验坑道和抗爆良好的工程点。因此,需研究岩土体的抗爆性能。露天矿是矿产资源开发的重要技术之一,矿山边坡的规模也相当大,自然斜坡有不少已超过 1000m。人工斜坡,如矿山边坡,国内已达 500m。在国外,如新西兰有一铜矿是建在山洼中,开掘露天矿后,连同上部削坡达 1000 余 m。这些工程规模是相当大的,由此引起的工程地质问题,尤其环境问题也是极为复杂的。

0.1.2.4 交通运输

交通先行,动力紧跟,然后方为厂址选择。所以,交通工程地位的重要性不言而喻,铁路与公路的桥梁隧道,河、海运输的码头工程在其中占居重要地位。例如,成昆铁路全长 1000 余 km,隧道总长约占总程的 50%,遇到各种不同的地质灾害,做了大量的工程地质工作。

从上述可知,当今工程建设的特点是朝着高、深、大、难方向发展,对工程地质工作的要求也越来越高,工程中出现的工程地质问题越来越复杂,但基本的问题主要有:①区域环境工程地质评价。②地质工程稳定性。③环境影响评价。从总体上看可归结为一个地质灾害防治问题。

0.1.3 工程地质学的分科及其与其他学科的关系

工程地质学是在地质学与工程建筑学、矿山工程学的边缘上形成和发展起来的学科,它与许多自然科学和技术学科具有紧密联系。工程地质学通过分化、综合过程的影响已成为一门包括有数个分科的学科。工程地质学的分科及与其他学科的关系见图 0.1.1 所示,其中用~符号相连的即为工程地质学的分科。本书提出的计算工程地质学是工程地质学、土力学、岩体力学、数学、计算机科学等交叉发展而逐渐形成的边缘新兴学科。

0.2 工程地质学与计算机科学

当今工程地质学不仅要处理复杂、高难度、大型的工程地质问题,而且要求工程地质工作快速、准确。在成果表述方面除了准确之外,还要求美观、信息量大、易读等特点。工程地质所具有的这些特点迫切地要求将计算机科学更多地引入到工程地质学研究中来。从数据采集、建模、分析、成图等各个环节,都需要计算机技术。因而,工程地质学的进一步发展需要解决好计算机应用这一重要问题,这在国内及国际的工程地质大会上都有明显的显示。

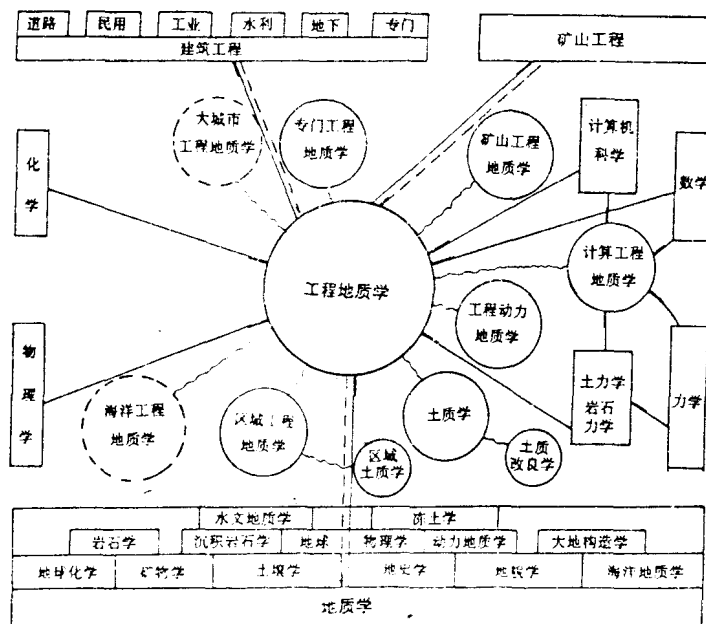


图 0.1.1 工程地质学的分科及其与其他学科的关系图

(据谢尔盖耶夫修改补充)

计算机在工程地质中的应用是随着计算机技术的发展而逐渐发展起来的，已引起了工程地质工作者越来越多的注意。过去，计算机应用多限于数值计算，如有限差分法、有限单元法、边界单元法、离散单元法等工程地质中的应用。这些计算方法确实为我们处理复杂的工程地质问题提供了很好的途径。但近年来，计算机应用已有明显的拓宽，从第六届国际工程地质大会的论文来看，已明显不同于历届工程地质大会数值模拟为主的势头。相应地，工程地质数据库、专家系统及制图技术得到更多研究者的重视，这是由当今工程地质特点所决定的。因工程地质工作不仅需要处理大量的观测数据，而且工程地质图件较多，这些工作以前主要由人工完成，现在借助于计算机来实现，因此，计算机在工程地质中的应用已深入到工程地质工作的各个环节，从野外工程地质调查（仪表）到勘测资料的处理、计算分析及成果表达，都留下了计算机应用深深的烙印。

计算机在工程地质中应用的程度是与计算机学科的发展分不开的。在计算机主要用作计算的年代，计算机在工程地质中的应用也只起到一个大型“计算器”的作用。但随着计算机技术的进步，数据库、专家系统、智能式计算机及 AutoCAD、GIS (Geographic Information System) 等的发展，计算机在工程地质中的应用也越来越活跃，它正在取代工程地质工作者完成更多的工作，其中以数据库、专家系统及计算机编图发展最为迅速。许多城市的工程地质数据库系统都已建立并逐步投入使用，各种专门的数据库，如隧道围岩分类的数据库、岩土体力学参数数据库、膨胀岩数据库等正在得到完善。各种新型实用的专家系统也开始在解决具体工程地质问题中发挥着一定作用，如罗国煜等以优势面理论为基础的斜坡稳定分析专家系统；殷跃平等开发的环境评价专家系统；张清、莫元彬等完成的隧道围岩分类专家系统；梁金火研制的隧道超前地质预报及煤与瓦斯突出预报；赵术强等正在研制的勘测报告编写的图文专家系统；戴华研制的工程地质专家系统工具等。这方面的研究开发工作发展很快，可以预言，过不了几年很多工程地质领域的问题都会出现相