

三维问题位移反分析的实用化研究

THE PRACTICAL STUDY OF DISPLACEMENT BACK ANALYSIS
FOR 3 DIMENSION PROBLEM

冯 静 杨 维 怀 杨 志 法
Feng Jing Yang Weihuai Yang Zhifa

(机械电子工业部) (重庆大学) (中国科学院地质研究所)
综合勘察研究院

摘 要 本文介绍了一种简便实用的方法——图谱一位移反分析方法。其基本思想是将图谱(由有限元边界元等数值法计算结果建立的数据库)用于位移反分析,从而方便迅速地进行现场位移反分析,求得所需的岩体特性参数,如弹性模量 E ,地应力分量 P 、 Q 、 τ 等,对于三维问题,尤其显示出它的优越性,本文结合三峡三斗坪坝址试验洞,用图谱一印双值位移反分析法进行了试验,取得了可靠的结果。

关键词 图谱;弹性模量;数值计算/位移反分析;实用化研究
中国图书资料分类法分类号 TU451

ABSTRACT A simple, practical method-TUPU-Displacement Back Analysis Method——(TUPU-DBAM) is introduced in this paper. Its basic principle is to apply TUPU (data base from the results by FEM or BEM, etc.) to DBA, so as to perform displacement back analysis in situ quickly and conveniently, to obtain rock property parameters needed, such as elastic modulus E , ground stress components, etc. It has many advantages especially to the 3-D problem. An application of this method in situ is given in the end.

KEY WORDS icones altalas; modulus of elasticity; numerical computation/ displacement-back-analysis; practical study.

一、前 言

随着地下工程项目的增多,地下工程的设计计算、施工及其稳定性评价也显得日益重要。而选择适当的岩体特性参数是其关键,它直接影响到计算结果的可靠性。为了获得这些

本文于1988年8月31收到

参数,通常需要进行现场试验或实验室试验,但这些试验普遍存在着费用昂贵,周期长等问题,而且难以取得准确的参数,因此,迫切需要发展新的方法。

随着系统论、信息论和控制论的问世,以及计算机的普及和数值计算方法的发展,并结合大量的工程实践,人们提出了位移反分析方法,十几年来,这种方法得到了迅速的发展,不论是平面问题,还是空间问题,也不论是弹性问题,还是弹塑性问题,甚至粘弹塑性问题,都有过专门的研究并提出了一系列的理论方法。实践证明,这种方法是可靠的,但基于有限元等数值计算的位移反分析方法,虽然比试验方法省事省时,但上机计算工作量大,上机费用贵,尤其是三维问题。因此,对于一般工程来说,由于地质条件等的复杂性,要求有足够数量的分析,但同时由于工作量和费用方面的原因,又不允许进行大量的分析,这一矛盾在位移反分析法中尤为突出。本文介绍的图谱方法正是为了解决这个矛盾,使位移反分析方法进一步实用化。

二、图谱方法及图谱

(一) 图谱方法

图谱方法是指:对于那些能作弹性均质假定的实际工程,根据弹性条件下工程围岩的应力、位移与各种荷载、弹性模量、尺寸因素等的关系,由与之相似的图谱推算实际地下工程毛洞的应力和位移的方法,它以相似原理和线弹性理论为基础。

图谱是利用有限元等数值计算方法,对标准问题进行计算,由此计算结果而形成的数据库,它包括应力图谱和位移图谱,本文只用到位移图谱。

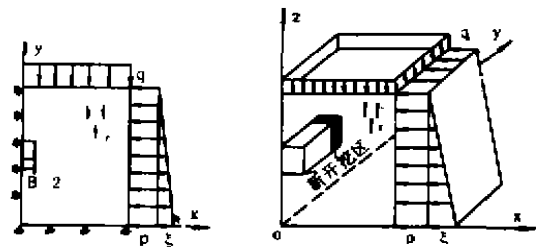
所谓标准问题,是指在实际工程的基础上,抽象出具有确定的洞型、尺寸、岩体特性参数,荷载等问题。

使用图谱方法可以把一个复杂的问题转变或简单的四则运算,因此,只要有相应的图谱,就可以直接在现场快速地完成实际工程的应力、位移分析,并用以指导现场施工和监测工作,从而进行稳定性评价。同时为进行二维和三维的位移反分析提供工具。图谱方法的应用,可以大大节省有限元等分析方法所需的时间和经费,具有可观的经济效益。

(二) 基本假定及公式

本文假定:(1)图谱所计算的洞体都是没有任何支护的毛洞,但也适用于很薄的喷层支护的洞体或少数刚度不大的普通锚杆支护的洞体;(2)所选力学模型为均质各向同性的弹性体。

地下工程围岩的应力和位移决定于多方面的因素,只有找出它们之间的联系,才能建立图谱的基本计算公式,从而根据图谱推算各种复杂的实际工程的应力场和位移场。本文主要考虑了地应力场、自重应力场、岩体弹性模量、泊松比反洞体尺寸这几种因素,并根据相似原理和线弹性理论,推导了图谱计算公式,图谱模型见



(a) 二维图谱模型 (b) 三维图谱模型

图 1

图1。我们把图谱视为模型，实际洞体视为原型，从而得出原型与模型的应力和位移分别有如下关系：

$$\{\sigma\} = n_E n_r \{\sigma_0^r\} + n_r \{\sigma_0^p\} + n_r \{\sigma_0^q\} + n_E \{\sigma_0^\xi\} \quad (2-1)$$

$$\{\delta\} = \frac{n_B n_r}{n_E} \{\delta_0^r\} + \frac{n_B n_p}{n_E} \{\delta_0^p\} + \frac{n_B n_q}{n_E} \{\delta_0^q\} + \frac{n_B n_\xi}{n_E} \{\delta_0^\xi\} \quad (2-2)$$

式中： $\{\sigma\}$ 、 $\{\delta\}$ ——实际洞体的应力、位移分量；

$\{\sigma_0^r\}$ 等分别为在荷载 r_0 等单独作用下相应图谱的单元应力；

$\{\delta_0^r\}$ 等为相应的节点位移；

n_B 、 n_E 等为相似常数，它们分别为原型（下标 H ）与模型（下标 M ）的相应值之比：

几何相似常数： $n_B = B_H/B_M$

应力相似常数： $n_\sigma = \sigma_H/\sigma_M = \tau_H/\tau_M$

应变相似常数： $n_\epsilon = \epsilon_H/\epsilon_M = r_H/r_M$

位移相似常数： $n_\delta = \delta_H/\delta_M$ ， $\delta = \{u \ v \ w\}$

弹模相似常数： $n_E = E_H/E_M$

容重相似常数： $n_r = r_H/r_M$

荷载相似常数： $n_p = p_H/p_M$ ， $p = \{p \ q \ \xi\}$

(三) 三维问题的弹性有限元图谱

1. 计算模型的建立

结合本文的应用实例，建立了三维弹性有限元图谱，图谱计算模型如图(b)所示。

(1) 洞型断面及剖面划分

以实际洞体为根据，洞体断面为正方形，边长3米，以Z轴为对称轴，取高为3米，宽为1.5米，洞深22米，沿洞轴方向的剖面划分以开挖进尺为依据，共布置13个剖面，剖面内的网格划分考虑了测点的位置，每个剖面的网格划分相同，一共有1378个节点，1056个六面体单元，如图2、3所示。

(2) 荷载及约束条件

如图1所示，考虑了常用的四种荷载 p_0 、 q_0 、 ξ_0 和 r_0 ，并取其标准值为： $p_0 = q_0 = -10.0 \text{ MPa}$ ， $\xi_0 = -1.0 \text{ MPa}$ ， $r_0 = 25 \text{ KN/m}^3$ 。

约束条件：沿洞轴方向，前后两面为 y 方向约束，左侧面因对称假定给以 x 方向约束，底面为 z 方向约束。

2. 计算及图谱

利用三维有限元程序，对上述四种荷载的作用情况分作四次计算，求得在 p_0 、 q_0 、 ξ_0 和 r_0 单独作用下的应力和位移。为了模拟开挖影响，要求每种情况计算两次，一次是开挖至

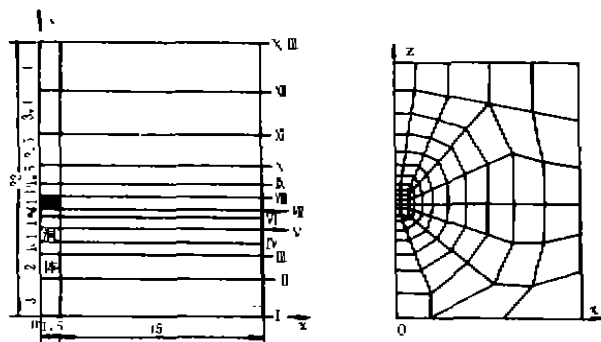


图2洞体轴向剖面划分 图3剖面及其网格划分

原掌子面，一次是开挖至新掌子面，两次计算结果之差代表一步开挖行起的围岩位移（这里称作开挖位移）。计算中取 $E_0 = 5 \times 10^8 \text{ Mpa}$ ， $\mu_0 = 0.3$ 利用所得结果，按一定方式建立数据库文件，即位移图谱，并取名为TP301。

三、三维问题的弹性有限元图谱一位移反分析

——三峡三斗坪坝址岩体特性参数的确定

为了搞清三斗坪坝址岩体应力状态及强度特征，于86年初在坝址3008平洞深262.5米石壁向下游 105° 方向开了3号试验洞，在开挖过程中进行了位移量测，本节将以此作为反分析的应用实例，根据该洞体的开挖位移实测资料 and 上节建立的图谱TP301，用图谱一位移反分析方法进行了计算，获得了所需的初始水平地应力分量和岩体的弹性模量。

(一) 试验洞体的地质条件概述

根据地质编录资料，该洞揭示前震旦系闪云斜长花岗岩新解岩体，完整块状结构，沿长大裂隙风化较明显。洞深5.5m处出露一细粒黑云斜长花岗岩脉（ $260^\circ \angle 80^\circ$ ），宽0.8~1米，脉体新鲜完整，与围岩呈混融接触。全洞统计有139条裂隙，其中以NE-NEE最为发育，其次为NNW向，裂隙以高倾角为主，见图4

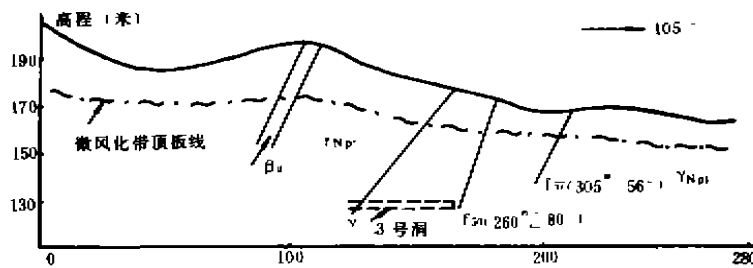


图4 试验洞体区域地质剖面

(二) 现场量测

1. 现场量测系统的布置

试验洞断面为 $3 \times 3 \text{ m}^2$ 的正方形，洞深为22.4米，沿试验洞共布置了4个测试断面，各断面间距为1米，见图5中的I、II、III、IV。每个断面的洞顶及左右两壁各打了一个 $\phi 56 \text{ mm}$ 的钻孔，孔深3米左右，作为伸长计测试安装孔，如图6所示。

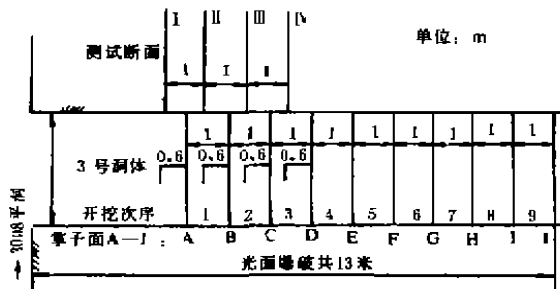


图5 开挖断面及测试断面

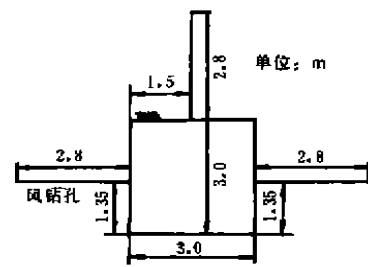


图6 测杆布置示意图

2. 量测仪器及测读方法

(1) 量测仪器

在本次量测验中，考虑到量测精度，位移量，仪器的防振防砸及造价等多方面的因素，选用了中科院地质所研制的TLE型传液式伸长计来量测位移，又因岩石坚硬完整并且采用了光面爆破，所以用了单点式的，以便于安装和减少对施工的干扰。

图7为单点TLE型传液式伸长计的原理图，当接杆相对于容器产生位移 δ 时，小管中的液面将变化 L ，因为总的液体体积保持不变，它们之间有如下关系：

$$\delta = L/r$$

而 $K = (D/a)^2$

其中 D 、 d 分别为容器和小管的直径。

图8给出了仪器的安装示意图。

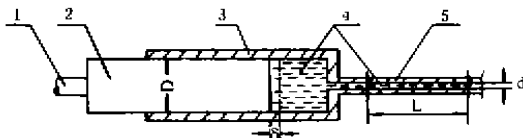


图7 单点TLE型传液式伸长计原理图

- 1. 接杆 2. 活塞 3. 容器
- 4. 液体 5. 小管

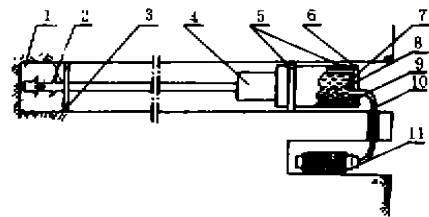


图8 单点TLE型传液式伸长计安装图

- 1. 砂浆 2. 钎头 3. 挡片 4. 活塞 5. 挡板
- 6. 保护套 7. 容器 8. 液体 9. 砂浆
- 10. 小管 11. 器读数

(2) 测读方法

试验洞采用光面爆破掘进，当开挖到预定的测试位置（洞深4米处的掌子面A）时，，停开挖，在断面I（A前）.6米处）埋设仪器，并读初始读数，然后继续开挖，进尺1米暂到掌子面B，读断面I仪器的读数，与初始读数之差即为开挖位移（一步开挖引起的围岩位移），第II、III、IV断面的测读方法与此相同。

表1给出了各量测断面上所测得的位移值，实际量测结果远比这里列出的多，但根据现场记录及反分析要求，我们对其进行了预先的处理，最后选出了表1所示的四组数据。

表1 I、II、III、IV各断面的开挖位移实测值(mm)

量测断面	右壁(水平)	左壁(水平)	拱顶(垂直)	备	注
I	-0.0040*	-0.0246	-0.0384	1. *	*—记录不详，不采用
II	-0.0228	-0.0208	-0.0138	2.	III断面测试失败
III	-0.0506			3.	负号表示位移指向洞内
IV	-0.0235	-0.0186*	-0.0280		

(三) 图谱—EP双值位移反分析及结果

1. 图谱—EP双值位移反分析方法

EP 双值位移反分析的目的是在弹性条件下，反演岩体弹性模量 E 和垂直于洞轴的水平地应力分量 P ，该法的基本原理是先凭经验给出 E 、 P 的初始值 E_1 、 P_1 ，再以实测位移值为标准，通过计算位移与实测位移的对比，对 E_1 、 P_1 值进行修正，最后逐步逼近真实的 E 和 P 。

图谱法与 EP 双值位移反分析法结合，由于图谱提供了节点在单一荷载作用下的位移，使反分析计算中不再进行有限元计算，从而加快了反分析的速度。图谱可以以表格的形式形成，使用时，从表格中查出所需的值；本文给出的图谱是以数据库方式建立的，这样就使整个方法统一在计算机下进行，达到了快速方便的目的，其流程框图如图9所示。

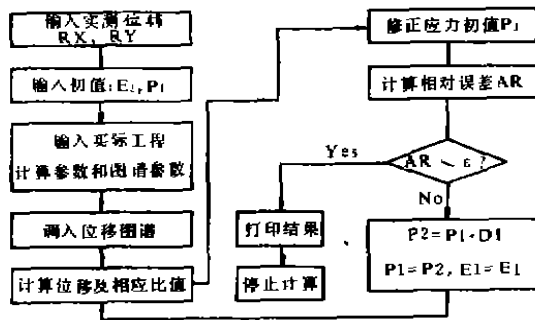


图9 图谱— EP 双值位移反分析程序流程框图

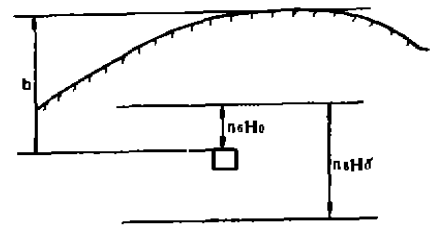


图10 测试断面计算条件

2. 反分析计算及结果

(1) 确定荷载条件:

容重 r : 根据现场资料, 取 $r = 26.5 \text{ KN/m}^3$;

作用于模型上边界的垂直荷载 q : 上覆岩层厚度在洞口为60米, 洞深19米处为49米, 故对处于其间的量测断面, 可近似取 $h = 55$ 米, 由图10可知: $q = -r(h - n_B H_0) = -1.06 \text{ Mpa}$;

ξ 值: 取 $\mu = 0.3$, 则 $\xi = -r n_B H_0' \frac{\mu}{1 - \mu} = -0.34 \text{ Mpa}$

(2) 结果

用表1给出的实测位移值进行了反演计算, 其结果见表2, 表3~表6分别给出了各组计算的情况。

表2 三斗坪坝址的 E 、 p 位移反分析结果

组号	实测位移 (mm)		结果 (Mpa.)	
	水平向 RX	垂直向 RY	水平地应力 P	弹性模量 E
1	-0.0246	-0.0384	-0.758	13871.93
2	-0.0228	-0.0138	-2.441	39958.90
3	-0.0208	-0.0138	-2.192	39759.03
4	-0.0235	-0.0286	-0.954	3568.95

平均值: $\bar{P} = -1.586 (\text{Mpa.})$ $\bar{E} = 24289.70 (\text{Mpa.})$

由表2可见, 初始水平地应力大致分布在 $-0.758 \sim -2.441 \text{ Mpa}$ 范围内, 其平均值为

-1.586Mpa弹性模量大致分布在3568.95~39958.90Mpa范围内,其平均值为24289.70Mpa实践证明,该结果可用的。

四 结 论

本文介绍的方法是基于有限元等数值计算基本公式的一种反向运算,假定被开挖洞体的岩体介质为各向同性的弹性均质体,并在假定泊松比和垂直初始应力为已知的条件下,由相邻测点间的一组相对位移值来求出整个初始地应力场和岩体弹性模量。对于三维问题的位移反分析法,由于引进了图谱的概念,使得它在实用上不仅成为可能,而且具有分析速度快。经费省等优点。经过在三峡三斗坪坝址所进行的位移反分析尝试,进一步说明了该方法的可靠性,作者认为这是值得在现场推广应用的。本文的工作得到了中国科学院工程地质力学开放研究实验室的资助,孙广忠教授给予了极大的帮助,在此深致谢意。

表 3

NO=1

• FOR TOW REAL DISP. MEASURED. REAL VERTI. DISP.= -.0384(MM)
 REAL HORIZ. DISP.= -.0246(MM)
 INPUT, RVD=-.0384(MM) YQPA= -.1184(MM) YQP1= -.1138(MM)
 RHD=-.0246(MM) XQPA= -.4231(MM) XQP1= -.2875(MM)
 CUTPUT:

STEP	HYPO. HOR. INIT. STR. ($\times 10^{-1} Mpa.$)	HYPO. ELA. MOULUS ($\times 10^{-1} Mpa.$)	TP. VERTI. DISPLACE (MM)	TP. HORIZ. DISPLACE (MM)	RELA. ERR. OF DISP. (%)
1	-40.00	50000.0	-.114	-.288	632.933
2	-10.14	366466.6	-.016	-.039	59.566
3	-8.12	156528.0	-.034	-.027	11.049
4	-7.71	142349.0	-.037	-.025	2.613
5	-7.60	139442.2	-.038	-.025	.672
6	-7.58	138719.3	-.038	-.025	.176

LEAST RELATIVE ERROR= .18(%)

• RESULTS, 6TIMES--HOR. INITIAL STRESS= -7.58($\times 10^{-1} Mpa.$)
 ELASTIC MODULUS = 138719.3.($\times 10^{-1} Mpa.$)

表 4

NO=2

- FOR TOW REAL DISP. MEASURED, REAL VERTI. DISP. = -0.0138(MM)
REAL HORIZ. DISP. = -0.0228(MM)

INPUT RVD = -0.0138(MM) YQPA = -0.1184(MM) YQPI = -0.1138(MM)

RHC = -0.0228(MM) XQPA = -0.4231(MM) XQPI = -0.2877(MM)

OUTPUT:

STEP	HOYO. HOR. INIT. STR. ($\times 10^{-1}$ Mpa.)	HYPO. ELA. MODULUS ($\times 10^{-1}$ Mpa.)	TP. VERTI. DISPLACE (MM)	TP. HORIZ. DISPLACE (MM)	RELA. ERR. OF DISP. (%)
1	-40.00	50000.0	-0.114	-0.288	943.240
2	-26.14	521619.9	-0.011	-0.028	20.954
3	-24.64	412964.7	-0.013	-0.023	2.953
4	-24.43	401207.7	-0.014	-0.023	.421
5	-24.41	399589.0	-0.014	-0.023	.060

LEAST RELATIVE ERROR = 0.03(%)

- RESULTS, 5TIMES -- HOR. INITIAL STRESS = -24.41($\times 10^{-1}$ Mpa.)
ELASTIC MODULUS = 399589.0($\times 10^{-1}$ Mpa.)

表 5

NO=3

- FOR TOW REAL DISP. MEASURED, REAL VERTI. DISP. = -0.0138(MM)
REAL HORIZ. DISP. = -0.0208(MM)

INPUT, RVD = -0.0138(MM) YQPA = -0.1184(MM) YQPI = -0.1138(MM)

RHD = -0.0208(MM) XQPA = -0.4231(MM) XQPI = -0.2877(MM)

OUTPUT:

STEP	HYPO. HOR. INIT. STR. ($\times 10^{-1}$ Mpa.)	HYPO. ELA. MODULUS ($\times 10^{-1}$ Mpa.)	TP. VERTI. DISPLACE (MM)	TP. HORIZ. DISPLACE (MM)	RELA. ERR. OF DISP. (%)
1	-40.00	50000.0	-0.114	-0.288	1003.905
2	-23.85	571972.7	-0.010	-0.026	25.298
3	-22.19	413791.0	-0.013	-0.022	3.609
4	-21.95	399581.4	-0.014	-0.021	.527
5	-21.92	397590.3	-0.014	-0.021	.078

LEAST RELATIVE ERROR = 0.38(%)

- RESULTS, 5TIMES -- HOR. INITIAL STRESS = -21.92($\times 10^{-1}$ Mpa.)
ELASTIC MODULUS = 397590.3($\times 10^{-1}$ Mpa.)

表 6

NO=4

• FOR TOW REAL DISP. MEASURED, REAL VERTI. DISP. = -0.0286(MM)
REAL HORIZ. DISP. = -0.0235(MM)

INPUT: RVD = -0.0286(MM) YQPA = -0.0360(MM) YQP1 = -0.0298(MM)

RHD = -0.0235(MM) XQPA = -0.0700(MM) XQP1 = -0.0489(MM)

OUTPUT:

STEP	HYPO.HOR. INIT.STR. ($\times 10^{-1}$ Mpa.)	HYPO.ELA. MODULUS ($\times 10^{-1}$ Mpa.)	TP.VERTI. DISPLACE (MM)	TP.HORIZ. DISPLACE (MM)	RELA.ERR. OF DISP. (%)
1	-40.00	50000.0	-0.030	-0.049	56.140
2	-20.03	78072.2	-0.019	-0.031	33.268
3	-13.96	50244.9	-0.023	-0.028	17.853
4	-11.63	41789.8	-0.026	-0.026	9.102
5	-10.58	38544.0	-0.027	-0.025	4.723
6	-10.07	37082.1	-0.028	-0.024	2.501
7	-9.80	36362.6	-0.028	-0.024	1.341
8	-9.66	35991.4	-0.028	-0.024	.725
9	-9.58	35794.9	-0.028	-0.024	.292
10	-9.54	35689.5	-0.029	-0.024	.214

LEAST RELATIVE ERROR = .21(%)

• RESULTS: 10TIMES -- HOR. INTIAL STRESS = -9.54($\times 10^{-1}$ Mpa.)ELASTIC MODULUS = 35689.5($\times 10^{-1}$ Mpa)

参 考 文 献

- [1] 王思敬, 杨志法, 刘竹华: 地下工程岩体稳定分析, 北京, 科学出版社, 1984, 254-259
- [2] 冯静, 数值法图谱—位移反分析方法及其在工程实际中的应用, 重庆大学硕士论文, 1988, 11-18, 46-50, 65-78