

## 某堆积体开挖后的稳定性三维数值模拟研究

朱继良<sup>1</sup>, 张诗媛<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059; 2. 四川大学生命科学学院, 成都 610065)

**摘 要:** 野外现场工作发现, 坝前堆积体边坡为深切冲沟型崩塌式堆积体, 由下伏基岩和松散的堆积物组成; 在1 360~ 1 450 m 高程之间, 堆积体有一个较为明显的收口转向特征, 这有利于增加其稳定性; 在野外工作的基础上, 通过采用目前较为通用的三维有限元软件(3D- Flac), 分别对其稳定性采用基座有位移和基座无位移等两种不同的方法进行数值模拟研究, 结果表明: (1) 堆积体的主应力分布主要受岩性控制, 其前缘的收口效应改善了主应力状态, 增加了它的稳定性; (2) 堆积体的潜在滑动面为堆积体与其下伏基岩接触部位的一定范围内; (3) 堆积体的位移表现为向坡外(临空面方向)滑移, 且中前缘的位移量相对较大; (4) 堆积体的整体稳定性较好, 在1 387~ 1 610 m 高程之间的堆积体有可能发生局部的中浅层破坏; (5) 两种模拟分析方法有较强的对比性和吻合性。因基座无位移法比较直观, 所以建议对分析堆积体的变形与破坏情况时, 采用后者。

**关键词:** 水电站; 堆积体; 三维数值模拟; 稳定性

**中图分类号:** TV 689 11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2005)06-0238-04

## Study on the Stability of a Talus Slope after Excavation by Using 3D Numerical Modeling

ZHU Ji-liang<sup>1</sup>, ZHANG Shi-yuan<sup>2</sup>

(1. Environment and Civil Engineering Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. School of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** A conclusion is drawn on site that it is a incised gully collapsing talus slope consisting of bedrock and unconsolidated deposit. There are evidence close up and turnaround between 1 360~ 1 450 m elevation which are contributed to its stability. The data that by using 3D numerical modeling (3D- Sigma and 3D- Flac) show that (1) Stress field of the talus slope is main weight field, its stress distribution is mainly controlled by lithology, its front zone's close up changes stresses state and improves the stability of talus slope; (2) Latent sliding surface is the interface of talus and the bedrock and above it in some height; (3) The displace is toward to limit surface, and the middle-front part of the talus slope is large; (4) It is wholly stable, but it maybe occurs middle-superficial layer failure between 1 387~ 1 610 m elevation; (5) The results have good correlation and concordance, because the latter one is visual, in order to understand its deformation and failure, it is suggested to use it.

**Key words:** hydroelectric station; talus slope; 3D numerical modeling; stability

在建的某水电站位于澜沧江中游, 是澜沧江中、下游河段梯级电站的龙头电站, 为梯级开发的关键性工程。大坝选用双曲拱坝坝型, 坝高292 m, 为世界之最。水库总库容为151.32亿m<sup>3</sup>, 具有多年调节性能, 总装机容量为4 200 MW, 多年平均发电量为188.9亿kW·h<sup>[1,2]</sup>。堆积体位于大坝的上游侧, 距大坝最近处的直线距离约120 m。堆积体内布置有凤小公路、高低两层缆机平台、坝顶公路、电站进水口等重要建筑物。由于堆积体天然边坡较陡, 且对其中部进行了大土方开挖, 它一旦失稳, 将会对该水电站大坝等重要建筑物造成毁灭性的破坏, 所以开挖后堆积体的稳定性如何? 一直备受有关部门的关注<sup>[3]</sup>。作者等在野外现场勘察的基础上, 采用3D- Flac 软件, 用不同的

计算分析方法对其进行模拟分析<sup>[4]</sup>, 并比较其异同点。在此基础上, 提出了一个较为合理的计算方法, 其结果与野外调研的结论相验证。

### 1 堆积体概况

#### 1.1 堆积体地质概况

冲沟主要是在F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub>断层基础上冲刷而形成。开挖前, 平面形态微向上游突出, 呈长条形(图1)。纵向长度约840 m, 横向宽度为130~ 160 m, 铅直厚度20~ 30 m, 局部达42 m, 总方量约1.76×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>; 开挖后, 平均形态似长舌形, 总方量约1.3×10<sup>6</sup>

\* 收稿日期: 2005-01-10

作者简介: 朱继良(1976-), 男, 博士生, 研究方向: 岩土体稳定与城市地质环境。

m<sup>3</sup>。

堆积体开口线最高点高程为1 520 m,最低点高程1 250 m左右。以1 420 m 高程(凤小公路)为界形成上下两级陡坡,1 420 m 以下平均坡度为40°;以上平均坡度为43°。开挖总方量4.05 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>,约占总体积的23%。

堆积体中上部下伏基岩为M<sup>IV-1</sup>层的黑云花岗片麻岩,中下部(大体上在1 380 m 以下)为角闪斜长片麻岩(M<sup>IV-2</sup>),厚度100~ 120 m,抗风化能力较黑云花岗片麻岩弱;堆积体(Q<sub>co1</sub>)主要由碎石、块石、孤石夹粉土组成。

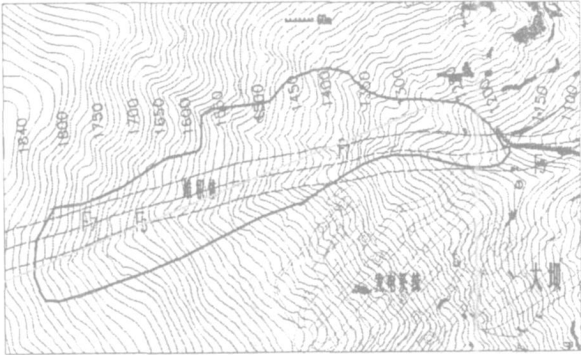


图1 堆积体开挖前平面图

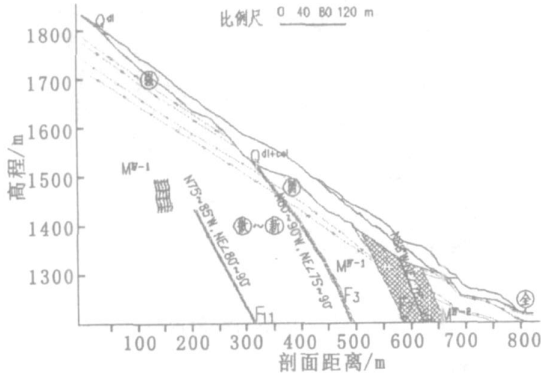


图2 堆积体典型剖面图

堆积体下伏基岩中有一条EW 向展布的坝区规模最大的区域性大断层,即F<sub>7</sub> 断层。它西起秀山村北侧,往东沿沟延伸,过澜沧江经饮水沟至龙台路南侧尖灭,全长约5 0 km,产状N 80°~ 90°W /N E 80°~ 82°;破碎带一般宽约3 8~ 5 0 m,影响带宽度达20~ 30 m,带内可见2~ 3 个主破裂面。从最新揭露情况看,堆积体中下部残留体基本上沿F<sub>7</sub> 断层带发育的深槽分布。

堆积体内地下水为孔隙水,堆积体本身渗透性强。旱季堆积体内基本上无地下水,雨季坡体内地下水变动频繁,总体较低。地下水主要受大气降水补给。

工程区的地震烈度为Ⅷ度。设计采用的参数为地震峰值加速度为0.169 g。

1.2 堆积体边坡结构特征及地质分析

堆积体上部(1 360 m 以上)纵向方位为N 72.7 E,横向宽度一般在116~ 160 m 之间,其中在高程范围1 380~ 1 570 m 之间,其横向宽度最大,为150~ 165 m;下部纵向方位转为S 78.8 E,横向宽度在70~ 85 m 之间。从地形特征上,在1 360~ 1 450 m 之间,堆积体有一个较为明显的收口转向特征(图1),这种收口转向特征有利于堆积体的稳定。

堆积体主要由碎石、块石、孤石夹粉土组成,块石、孤石直

径0.3~ 5 m 不等,块石、孤石含量在20%~ 35%。堆积体中块石、孤石以骨架形式存在,间隙中一般充填碎石、粉土,结构较紧密,与下伏基岩接触面不存在相对软弱夹层。堆积体铅直厚度一般为20~ 30 m,沿纵向和横向变化较大,在堆积体下部,沿F<sub>7</sub> 断层内形成了堆积体深槽。基覆界面起伏较大(图2),沿纵向形成一陡一缓的界面形态。从底滑面形态特征上看,在1 360~ 1 450 m 之间的收口特征较为明显。堆积体下伏基岩主要为全、强风化卸荷岩体,强风化带铅直厚度一般为10~ 50 m。堆积体中下部,F<sub>7</sub> 断层破碎带主导了堆积体的空间展布特征。

2 模型的建立

模型以正北方向为X 轴正方向,以正东方向为Z 轴的正方向,以铅直向上为Y 轴的正方向(见图3)。其范围包括整个堆积体,高程为海拔高度1 000~ 1 840 m。即其大小为410 m(宽,沿X 轴) × 1 000 m(长,沿Z 轴) × 840 m(高,沿Y 轴)。因主要考虑堆积体的变形与破坏情况,对堆积体以外的岩性作了相应的简化,按单一岩性进行考虑,所以F<sub>7</sub>、F<sub>3</sub> 断层在建模时进行了适当的概化,没有进行考虑,只是在该部位的物理力学性质上做了一些调整(降低了其物理力学参数),对整个堆积体的变形与破坏来说,计算结果偏安全。

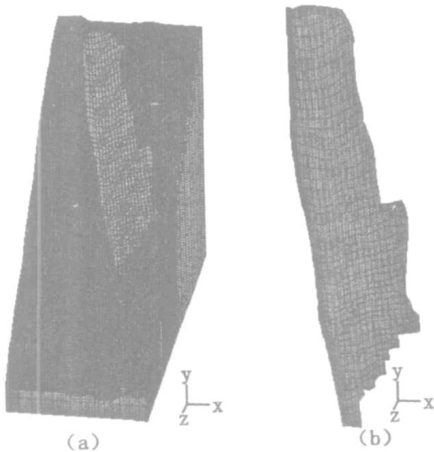


图3 三维计算模型图注:(b)为堆积体形态

模型的力学边界采用两侧面(X 方向)、前后缘侧面(Z 方向)及底面(Y 方向负方向)单向约束。模型共划分19 380 个单元和84 708 个节点。

在模拟计算中,采用两种不同的计算方法。其一,堆积体下的下伏基岩材料按弹性,堆积体的岩性则采用弹塑性;其二,堆积体下的下伏基岩假定为刚性,没有位移产生,即认为为零位移底座。堆积体的岩性同样采用弹塑性。这两种方法的计算工况均为天然情况。

3 力学参数的选取

堆积体边坡由基岩和松散的堆积物组成,基岩的力学参数参照本区Ⅱ类岩体,堆积体的参数由试验和工程经验类比所得。计算模型中,所需体积模量、剪切模量系由弹性模量和泊松比换算而来(式、式)。计算模型中力学参数取值如表1 所示。

体积模量(K)和剪切模量(G)的换算公式见下式<sup>[5]</sup>:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$
 (1)

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$
 (2)

式中:  $K$ ——体积模量;  $G$ ——剪切模量;  $E$ ——弹性模量;  
 $\nu$ ——泊松比。

4 结果分析

随着迭代的不断进行, 系统的不平衡力逐渐降低, 而最终趋于一种平衡状态。因此, 堆积体最终也会趋于稳定, 并保持一种平衡状态。当迭代到6 393 时步, 前者的系统达到平衡; 当迭代到10 473 时步时, 后者的系统达到平衡。

表1 岩土体物理力学参数取值表

名称	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$\gamma/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/\text{MPa}$	$\varphi/^\circ$	$\tau/\text{MPa}$
基岩	20000	0.23	0.026	1.8	52	1.0
堆积体	500	0.32	0.023	0.05	36	0

备注:  $\gamma$ ——容重,  $c$ ——内聚力,  $\varphi$ ——内摩擦角,  $\tau$ ——抗拉强度。

通过3D-Flac 的两种不同方法对堆积体的稳定性进行数值模拟分析, 结果表明(主要从主应力、剪应变增量和位移等方面<sup>[6,7]</sup>对其进行分析说明):

4.1 主应力

两种数值模拟结果均显示(图4a, 图4b), 以下若不作特别说明的, 前者均指模型底座有位移产生的模拟结果图; 后者均指底座为刚性, 即零位移的模拟结果图)。

在量值上, 主应力主要受岩性控制, 软弱或松散的堆积体有屏蔽效应, 使应力发生锐减, 所以, 在基岩与堆积体的接触部位及其附近的一定范围内应力分异现象较为明显: 基岩内为高应力区, 堆积体内为相对低应力区。剖面上, 自下而上, 堆积体内的主应力值呈逐渐减小的趋势; 平面上, 堆积体的中部(1 387~1 610 m 高程范围内) 其值相对较大, 也较为集中, 而前后缘则相对较小。

在方向上, 自下而上, 主应力迹线开始发生偏转, 最大主应力逐渐平行于地表, 与此同时, 最小主应力则逐渐与地表相垂直; 平面上, 在堆积体前缘部位可见明显的收口效应, 最大主应力的方向分别向槽沟和上游侧发生偏转, 而基岩内的最大主应力方向则基本上保持不变。这种明显的收口效应, 对堆积体的稳定性起着非常重要的作用。

稍有不同的是, 前者在量值上略比后者大, 这主要与其下伏基岩考虑的不同模式有关。

4.2 剪应变增量

可根据剪应变增量的大小来判断堆积体的(潜在)滑动面(带): 剪应变增量较大(绝对值)的部位, 则为其(潜在)滑动面(带), 变形破坏也多沿此处发生; 剪应变增量较小或基本上没有发生变化的部位, 一般不会有潜在滑动面产生, 因此, 这些部位也不会发生较大的变形或破坏。

从图5(a)和图5(b)可知: 从表面上看, 剪应变增量在堆积体中部的数值较大, 表明堆积体的中部稳定性较小, 是堆积体最有可能先发生破坏的部位。前者与后者相比, 在中后缘也出现了一个较为明显的应变增量区, 这主要与其下伏的基岩产生一定的位移有关; 从剖面上看, 堆积体与基岩接触部位的剪应变增量较大, 特别是在堆积体的中部, 这种现象尤为明显, 可以清楚地看到在基覆界面上的一定范围内(10 m) 有一条红色的条带, 即剪应变增量增高带, 它是堆积体最有可能发生破坏的部位。

总之, 在量值上, 两者基本上相等; 在增量较大的部位上, 无论从表面还是从剖面上, 两者总体上均表现为堆积体的中部(1 387~1 610 m 高程) 是最有可能发生破坏(局部失稳) 的部位。

4.3 位移

从位移图上可以看出, 两者的差别较大: 图6(a)显示: 在堆积体后缘表面(部) 的整体位移较大(可达29 cm), 而前缘的位移则较小(约4 cm), 即堆积体的位移从后缘至前缘有逐渐减小的趋势。同样, 堆积体内部的位移表现为由内至外(由下而上), 呈逐渐减小的趋势。出现这种现象的原因, 主要是一方面, 在自重应力的影响下, 堆积体的时效变形; 另一方面, 是受堆积体下部或内部的潜在滑动面的影响; 图6(a)显示: 堆积体的位移总体表现为前后缘及上下游两侧缘的位移量较小, 而堆积体中部(1 387~1 610 m 高程) 的位移量较大, 其位移量可达5 cm 之多, 该位移量的产生, 主要与其底部(局部为坡体内部) 潜在滑动面(带) 有关。此外, 也与其坡体物质组成有关。

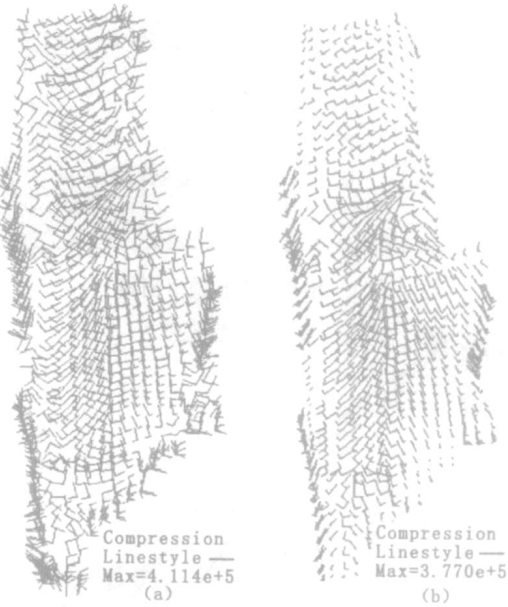


图4 主应力迹线图(俯视图)

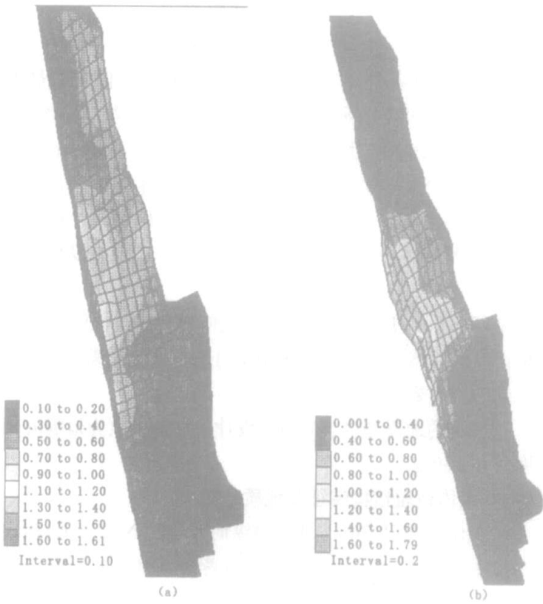


图5 剪应力(变增量)等值线图

从整体变形来看, 两者总体上均表现为向河谷方向变形(滑移) 的趋势, 且表面(浅部) 的位移量大于底部(深部) 的位移量; 此外, 两者的前缘均具有明显的收口效应, 是由于堆积体前

缘过窄, 受其前方基岩的阻挡, 以致使其位移不能很好的向下传递, 才导致其向下滑移量变小, 与此同时, 其方向也有所改变, 只沿前缘较窄处向河谷方向运动。堆积体的这种收口效应对坡体的稳定性起着重要的改善(控制)作用。

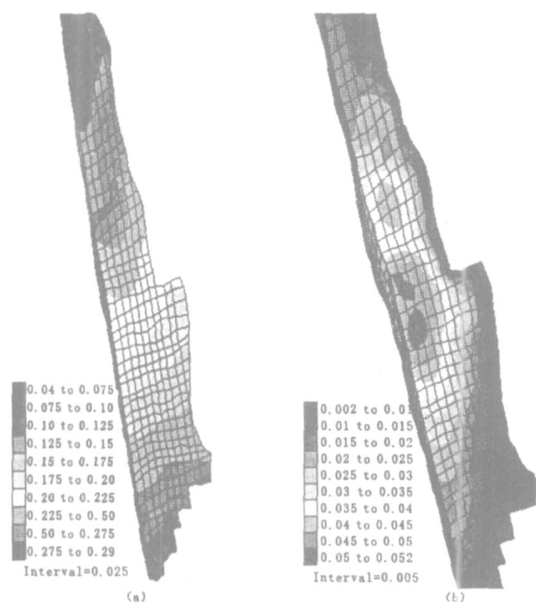


图6 合位移( $U$ )等值线

从位移量上来看, 堆积体的中部附近(1 387~ 1 610 m 高程)为主要变形或破坏区, 有可能发生部分的变形或破坏, 其破坏边界为堆积体与基岩接触面及附近的一定范围, 破坏深度一般为10~ 20 m。此外, 堆积体前后缘也可能有零星的浅表部破坏, 其深度一度不超过5 m。

#### 参考文献

- [1] 黄润秋, 王士天, 胡卸文, 等. 澜沧江小湾水电站高拱坝坝基重大工程地质问题研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996
- [2] 成都理工大学, 昆明勘测设计研究院, 云南华能澜沧江水电开发公司联合课题组. 小湾工程边坡研究阶段报告(四)[R]. 2003
- [3] 王士天, 黄润秋, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001
- [4] 黄润秋, 许强, 陶连金, 等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] Itasca. FLAC3D version 2.0 User's manual[M]. Minneapolis: ICG, 1997.
- [6] 张倬元, 王士天, 王兰生, 等. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 134- 137, 321- 338
- [7] Hoek, 等. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗译. 北京: 煤炭工业出版社, 1983

(上接第237页)

(2) 切口深度影响淤砂长度, 随着切口深度的降低, 淤砂长度有逐渐减小的趋势。

(3) 在淤砂形态上, 三种切口闭塞状态下都有一个共同的特征: 在淤砂区的尾部, 有一个陡坡, 但陡坡的起点有随切口深度的减小而逐渐后退的趋势。

(4) 在淤砂形态上, 部分闭塞和不闭塞两种状态下还有一个共同的特征: 在淤砂区的前端, 都有一个缓坡, 但部分闭

#### 参考文献

- [1] 李三畏. 奥地利与台湾地区之砂防工程[J]. “中华水土保持学报”, 1986, 17(2): 15- 26
- [2] 水山高久, 阿部宗平, 矢岛重美. 狭缝拦砂坝流量系数与淤砂形状[J]. 新砂防, 1989, 42(4): 165- 167.
- [3] 池谷浩, 上原信司. 切口拦砂坝调节泥砂效果的实验研究[J]. 新砂防, 第114号, 1980, 3: 37- 44
- [4] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 156- 157.
- [5] 韩文兵, 欧国强. 水石流过梳子型切口坝拦砂性能试验研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 286- 288
- [6] 韩文兵. 泥石流切口坝、实体坝拦砂性能试验对比研究[D]. 成都: 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所, 2004. 10- 14

## 5 小结

野外现场调研与三维数值模拟结果表明:

(1) 堆积体边坡由下伏基岩与松散的堆积物组成, 堆积体与下伏基岩接触面不存在相对软弱夹层, 属深切冲沟型崩塌式堆积体。

(2) 堆积体平面与空间形态开挖前后均近似成长条形(状), 且堆积体在1 360~ 1 450 m 之间有一个较为明显的收口转向特征, 它利于增加堆积体的稳定性。

(3) 堆积体的主应力主要受岩性控制, 在堆积体与基岩接触的部位具有屏蔽效应, 主应力分异现象较为明显, 基岩为相对高应力区, 堆积体为相对低应力区。在堆积体内, 其中部的主应力较大, 但其前缘的收口效应改善了其应力状态, 增加了它的稳定性。

(4) 堆积体的潜在滑面为堆积体与其下伏基岩接触部位的一定范围内, 中前缘部位的潜在主滑面为基覆界面以上的10 m 处附近。

(5) 堆积体的变形总体表现为向临空面方向滑移, 且中部的位移量相对较大。

(6) 堆积体的整体稳定性较好, 不会发生大范围的变形或破坏, 但其中部(1 387~ 1 610 m 高程)为相对危险区, 有可能发生中浅层的小范围的变形或破坏。

(7) 两种模拟分析方法有较强的对比性和吻合性。总的来说, 后者对了解堆积体的变形破坏情况较为直观, 但安全储备有所偏低; 前者安全储备偏高, 对于设计治理措施显得过于保守。建议对分析堆积体的变形与破坏情况时, 采用后者, 即基座无位移的方法。

塞时缓坡坡顶(淤砂肩)位置大致相近; 但不闭塞时缓坡坡顶(淤砂肩)的位置有随切口深度的减小而变得距离坝址更近的趋势;

致谢: 在试验及分析过程中, 承蒙中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所游勇、吕娟、陈顺理、魏德元、柳金峰、岳丽霞、张秋英等老师和同学的大力帮助, 在此一并致谢!