東南大學
SOUTHEAST UNIVERSITY

操作系统实验报告

姓名：任杰文

学号：09013430

东南大学计算机科学与工程学院

School of Computer Science & Engineering

Southeast University

二0一六年六月四日

实验四

一、 实验内容：

通过实验，理解 LRU 页面置换算法的算法思想及其实现方法，比较各种实现算法的复杂度和实现难度，体会 LRU 算法与各种近似算法间的区别，并进而加深对虚拟内存概念的理解。

二、 实验目的：

通过实验，理解 LRU 页面置换算法的算法思想及其实现方法，比较各种实现算法的复杂度和实现难度，体会 LRU 算法与各种近似算法间的区别，并进而加深对虚拟内存概念的理解。

具体要求：

1. 应实现如下算法：LRU 的计数器实现(counter implementation)，LRU 的栈实现（stack implementation），Additional-Reference-Bits Algorithm，Second chance Algorithm。

2. 测试程序可参考如下结构：

while(已测页面数<要求测试页面数)

{

1）随机产生新的访问页号

2）调用算法决定是否需要置换页面，如需要，调整内存相关状态，更新页错误数

}

三、 设计思路及流程图

（1） 为比较四个不同的 LRU 算法的的性能表现，设计了一个 LRU 类，包含四种不同的 LRU 算法，LRU 类通过四个变量初始化：页码最大编号 maxNumOfPages;引用串长度 lenOfRS；内容物理帧数 int numOfMemFrames;附加引用位算法的时间单元 int timeUnitForRefBit;调用 bool genRS();生成长度为 lenOfRS，最大编号为 maxNumOfPages-1 的引 vector<int> refStr;再调用公共接口函数 vector<double> sim_4_algorithm_of_LRU();返回四个 LRU 算法对于同一引用串的页错误率。

（2） 本实验旨在比较各 LRU 算法的页错误率，在判断某页是否在内存中时，通过遍历查找，各个函数的时间复杂度都为 O（N*M），N 为物理帧的大小，M 为引用串长度。实际上可以用堆、二叉平衡树，哈希等方法，以空间换时间，降低时间复杂度。

（3） 对于附加引用算法中，可能有多个页表项有相同的最小历史位，此时采用 FIFO 方法选择。由于算法需要在规定时间间隔内定时产生中断，然后将引用位转移到 8 位字节的最高位。时间同过模拟的方法，将其规定时间间隔通过一定的测试实例数表示。通过计数模拟系统定时中断。

四、 源程序

```
#include <vector>
#include <list>
#include <limits>
#include <ctime>
#include <algorithm>
using namespace std;

//counter算法页表项
struct TabItemForCounter{
	int pageID;
	int counter;
	TabItemForCounter ( int ID, int c){
		pageID = ID;
		counter = c;
	}
};
//附加引用位算法，二次机会算法页表项
struct TabItemForRB{
	int pageID;
	bool refBit;
	unsigned char hisbis;
	TabItemForRB ( int ID, bool c){
		pageID = ID;
		refBit = c;
		hisbis = 0;
	}
};
class LRU
{
public:
	LRU();
	LRU( int a, int b, int c,int d = 10);
	~LRU();
	//返回给定参数下，以同一随机产生的引用串测试的4钟LRU算法的页错误率
	vector<double> sim_4_algorithm_of_LRU();
	//用随机数生成引用串
	bool genRS();

	//LRU计数器实现
	int LRU_Counter();
	//LRU栈实现
	int LRU_Stack();
	//LRU附加位实现
	int AdditionalReferenceBits();
```

```
        //LRU二次机会实现
        int SecondChance();
public:
        //最大页号，引用串长度，物理帧数，引用串
        int maxNumOfPages;
        int lenOfRS;
        int numOfMemFrames;
        vector<int> refStr;
        //附加引用位算法的时间单元
        int timeUnitForRefBit;
};
LRU::LRU(){}
LRU:: ~LRU(){}
LRU::LRU( int a, int b, int c,int d)
{
        maxNumOfPages = a;
        numOfMemFrames = b;
        lenOfRS = c;

        timeUnitForRefBit = d;
        genRS();
}
bool LRU::genRS()
{
        refStr.resize(lenOfRS);
        srand( time(0) );
        for( vector<int> ::iterator it = refStr.begin(); it != refStr.end(); *(it++) = rand() % maxNumOfPages);
        return true;
}

vector<double> LRU::sim_4_algorithm_of_LRU()
{
        vector<double> res(4,-1);
        res[0] = (double)LRU_Counter() / lenOfRS;
        res[1] = (double)LRU_Stack() / lenOfRS;
        res[2] = (double)AdditionalReferenceBits() / lenOfRS;
        res[3] = (double)SecondChance() / lenOfRS;
        return res;
}

//时间O（n^2）,空间O（n）
int LRU::LRU_Counter()
{
        //页表，页错误数，逻辑时钟
```

```
        vector<TabItemForCounter> pageTab( numOfMemFrames, TabItemForCounter(-1,-1) );
        int pageFaultNum = 0;
        int logTimCnt = 0;

        for(    vector<int> ::iterator RSit = refStr.begin();RSit !=    refStr.end(); ++RSit,++logTimCnt)
        {
                //查找请求帧号
                vector<TabItemForCounter> ::iterator it = pageTab.begin();
                //找到最小counter的帧并替换该帧，设置改帧counter为当前logTimCnt
                int minCounter = numeric_limits<int>::max();
                int toReplaceFrameID = -1;
                for( ; it != pageTab.end() && it->pageID != *RSit; it++){
                        if ( it->counter < minCounter ){
                                toReplaceFrameID = it - pageTab.begin();
                                minCounter = it->counter;
                        }
                }
                //当前请求帧是否在内存中
                if( it == pageTab.end() ){
                        ++pageFaultNum;
                        pageTab[toReplaceFrameID].pageID = *RSit;
                        pageTab[toReplaceFrameID].counter   = logTimCnt;
                }else{
                        it->counter = logTimCnt;
                }
        }
        return pageFaultNum;
}

//时间O（n^2）,空间O（n）
int LRU::LRU_Stack()
{
        //初始化页码栈
        list<int> pageStack( numOfMemFrames, -1);
        int pageFaultNum = 0;
        //遍历引用串
        for(    vector<int> ::iterator RSit = refStr.begin();RSit !=    refStr.end(); RSit++)
        {
                list<int>::iterator it = find( pageStack.begin(), pageStack.end(), *RSit );
                //当前页是否在内存
                if( it != pageStack.end() ){
                        pageStack.push_front( *it);
                        pageStack.erase( it );
                }else{
```

```
                pageFaultNum++;
                pageStack.erase( --it );
                pageStack.push_front( *RSit);
            }
        }
        return pageFaultNum;
}

//时间O（n^2）,空间O（n）
int LRU::AdditionalReferenceBits(    )
{
        vector<TabItemForRB> pageTab(   numOfMemFrames, TabItemForRB(-1,false));
        int pageFaultNum = 0;
        int timeCnt = 0;
        int nextpos = 0;

        //遍历引用串
        for(    vector<int> ::iterator RSit = refStr.begin();RSit !=    refStr.end(); RSit++,timeCnt++)
        {
            //每个时间单元更新历史位
            if ( timeCnt == timeUnitForRefBit )
            {
                timeCnt = 0;
                for( vector<TabItemForRB> ::iterator it = pageTab.begin(); it !=    pageTab.end(); ++it )
                {
                    it->hisbis = it->hisbis >> 1;
                    it->hisbis = it->refBit == true ? it->hisbis | 0x80 : it->hisbis;
                    it->refBit = false;
                }
            }
            vector<TabItemForRB> ::iterator it = pageTab.begin();
            for( ; it != pageTab.end() && it->pageID != *RSit; it++){
            }

            //当前请求帧是否在内存中
            if( it == pageTab.end() ){
                ++pageFaultNum;
                //找到最小历史位的页并替换该页
                int minhis = numeric_limits<int>::max();
                int toReplaceFrameID = -1;
                for( int i = 0; i < numOfMemFrames; i++)
                {
                    int cur =    (nextpos+i ) % numOfMemFrames;
                    //用九位比较
```

```
                if ( (int)pageTab[ cur ].hisbis + pageTab[ cur ].refBit * 256 < minhis ){
                    toReplaceFrameID = cur;
                    minhis = (int)pageTab[cur ].hisbis + pageTab[ cur ].refBit * 256 ;
                }
            }
            nextpos = (toReplaceFrameID + 1 ) % numOfMemFrames;
            pageTab[toReplaceFrameID] = TabItemForRB(*RSit,true);
        }else{
            it->refBit = true;
        }
    }
    return pageFaultNum;
}

//时间O（n^2）,空间O（n）
int LRU::SecondChance()
{
    vector<TabItemForRB> pageTab(   numOfMemFrames, TabItemForRB(-1,false) );
    int pageFaultNum = 0;
    int nextpos = 0;

    //遍历引用串
    for(    vector<int> ::iterator RSit = refStr.begin();RSit !=    refStr.end(); RSit++)
    {
        vector<TabItemForRB> ::iterator it = pageTab.begin();
        for( ; it != pageTab.end() && it->pageID != *RSit; it++){
            if( it->pageID == *RSit )
                break;
        }
        //当前请求帧是否在内存中
        if( it == pageTab.end() ){
            ++pageFaultNum;
            while(   pageTab[nextpos % numOfMemFrames].refBit == true )
            {
                pageTab[nextpos % numOfMemFrames].refBit = false;
                nextpos = (nextpos+1) % numOfMemFrames;
            }
            pageTab[nextpos] = TabItemForRB(*RSit,true);
            nextpos = (nextpos+1) % numOfMemFrames;
        }else{
            it->refBit = true;
        }
    }
    return pageFaultNum;
```

```
}
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include "LRU.h"
using namespace std;

int main()
{
	//freopen("in.txt","r",stdin);
	int maxNumOfPages;
	int numOfMemFrames;
	int TestNum;
	int timeUnitForRefBit;
	vector<double> pageFaultNum(4,0);

	while (true)
	{
		cout<<"最大页编号：";
		cin>>maxNumOfPages;
		cout<<"内存物理帧数：";
		cin>>numOfMemFrames;
		cout<<"测试序列长度：";
		cin>>TestNum;
		cout<<"附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认）：";
		cin>>timeUnitForRefBit;

		LRU testLRU(maxNumOfPages,numOfMemFrames,TestNum, timeUnitForRefBit);
		pageFaultNum = testLRU.sim_4_algorithm_of_LRU();
		//格式对齐输出
		cout<<"\n四种算法的页错误率（精度为位小数）：\n"
			<<setw(15)<<"计数器"
			<<setw(15)<<"栈"
			<<setw(15)<<"附加引用位"
			<<setw(15)<<"二次机会"<<endl;
		cout<<setprecision(9)<<fixed
			<<setw(15)<<pageFaultNum[0]
			<<setw(15)<<pageFaultNum[1]
			<<setw(15)<<pageFaultNum[2]
			<<setw(15)<<pageFaultNum[3]<<endl;

	}
	return 0;
}
```

五、 时间空间复杂度分析

四种算法实现如上代码所示：

1. LRU 计数器法：页表通过线性表结构定义，页表项中包括页号和计数器值。定义如下：
   vector<TabItemForCounter> pageTab(numOfMemFrames,TabItemForCounter(-1,-1));
   查找页表时，通过线性遍历页表项，比较是否有目标页；
   综上：空间复杂度为 O（N），时间复杂度为 O（N*M），其中 N 为物理帧的大小，M 为引用串长度。
2. LRU 栈法：页表通过双向链表结构定义，如下：
   list<int> pageStack(numOfMemFrames, -1);
   查找页表时，通过线性遍历页表项，比较是否有目标页；
   综上：空间复杂度为 O（N），时间复杂度为 O（N*M），其中 N 为物理帧的大小，M 为引用串长度。
3. LRU 附加引用位法：页表通过线性表结构定义，页表项中包括页号、引用位和历史位。如下：
   vector<TabItemForRB> pageTab(numOfMemFrames, TabItemForRB(-1,false));
   查找页表时，通过线性遍历页表项，比较是否有目标页；在给定时间单元后，遍历页表，更新历史位
   综上：空间复杂度为 O（N），时间复杂度为 O（N*M），其中 N 为物理帧的大小，M 为引用串长度。
4. LRU 二次机会法：页表通过线性表结构定义，页表项中包括页号、引用位。如下：
   vector<TabItemForRB> pageTab(numOfMemFrames, TabItemForRB(-1,false));
   查找页表时，通过线性遍历页表项，比较是否有目标页；
   综上：空间复杂度为 O（N），时间复杂度为 O（N*M），其中 N 为物理帧的大小，M 为引用串长度。
5. 实现难度：栈法最简单，附加引用位最复杂；

六、 实验结果以及结果分析

（一） 实验结果：

为方便数据统计和分析，添加重定向语句：

```
freopen("in.txt","r",stdin);freopen("out.txt","w",stdout);
```

修改输出格式：

```
while(cin>>maxNumOfPages>>numOfMemFrames>>TestNum>>timeUnitForRefBit){
cout<<"最大页编号："<<maxNumOfPages<<endl;
cout<<"内存物理帧数："<<numOfMemFrames<<endl;
cout<<"测试序列长度："<<TestNum<<endl;
cout<<"附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认）："<<timeUnitForRefBit<<endl;
```

输入文件 in.txt，给定最大页编号为 1000，引用串长度为 100000，附

加引用位算法时间单元为处理 5 个页，通过改变物理帧数，比较四种算法页错误率，in.txt 内容如下：

```
1000
50
100000
5

1000
100
100000
5

1000
150
100000
5

1000
200
100000
5

1000
250
100000
5

1000
300
100000
5

1000
350
100000
5

1000
400
100000
5

1000
450
```

100000
5

1000
500
100000
5

1000
550
100000
5

1000
600
100000
5

1000
650
100000
5

1000
700
100000
5

1000
750
100000
5

1000
800
100000
5

1000
850
100000
5

1000
900
100000
5

1000
950
100000
5

1000
1000
100000
5

输出文件 out.txt 内容如下：

最大页编号：1000
内存物理帧数：50
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.950290000 0.950290000 0.950600000 0.950280000
最大页编号：1000
内存物理帧数：100
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.899210000 0.899210000 0.899330000 0.899590000
最大页编号：1000
内存物理帧数：150
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.848880000 0.848880000 0.848830000 0.848500000
最大页编号：1000
内存物理帧数：200

测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器	栈	附加引用位	二次机会
0.800900000	0.800900000	0.800350000	0.800740000

最大页编号：1000
内存物理帧数：250
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器	栈	附加引用位	二次机会
0.752650000	0.752650000	0.752850000	0.752370000

最大页编号：1000
内存物理帧数：300
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器	栈	附加引用位	二次机会
0.700580000	0.700580000	0.701800000	0.700870000

最大页编号：1000
内存物理帧数：350
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器	栈	附加引用位	二次机会
0.648490000	0.648490000	0.647430000	0.647760000

最大页编号：1000
内存物理帧数：400
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器	栈	附加引用位	二次机会
0.599970000	0.599970000	0.600030000	0.600020000

最大页编号：1000
内存物理帧数：450
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器　　栈　　附加引用位　　二次机会

0.551910000　　0.551910000　　0.552940000　　0.552340000

最大页编号：1000

内存物理帧数：500

测试序列长度：100000

附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器　　栈　　附加引用位　　二次机会

0.501090000　　0.501090000　　0.498930000　　0.499270000

最大页编号：1000

内存物理帧数：550

测试序列长度：100000

附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器　　栈　　附加引用位　　二次机会

0.450890000　　0.450890000　　0.451470000　　0.450640000

最大页编号：1000

内存物理帧数：600

测试序列长度：100000

附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器　　栈　　附加引用位　　二次机会

0.403570000　　0.403570000　　0.404780000　　0.403070000

最大页编号：1000

内存物理帧数：650

测试序列长度：100000

附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器　　栈　　附加引用位　　二次机会

0.351200000　　0.351200000　　0.352340000　　0.351940000

最大页编号：1000

内存物理帧数：700

测试序列长度：100000

附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

计数器　　栈　　附加引用位　　二次机会

0.303130000　　0.303130000　　0.303430000　　0.302770000

最大页编号：1000

内存物理帧数：750

测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.254400000 0.254400000 0.255150000 0.253650000
最大页编号：1000
内存物理帧数：800
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.204480000 0.204480000 0.204840000 0.205330000
最大页编号：1000
内存物理帧数：850
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.156770000 0.156770000 0.156400000 0.156260000
最大页编号：1000
内存物理帧数：900
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.107680000 0.107680000 0.107490000 0.105940000
最大页编号：1000
内存物理帧数：950
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：
计数器 栈 附加引用位 二次机会
0.058050000 0.058050000 0.058070000 0.058560000
最大页编号：1000
内存物理帧数：1000
测试序列长度：100000
附加引用位算法时间单元（用处理页数表示，默认 10）：5

四种算法的页错误率（精度为 9 位小数）：

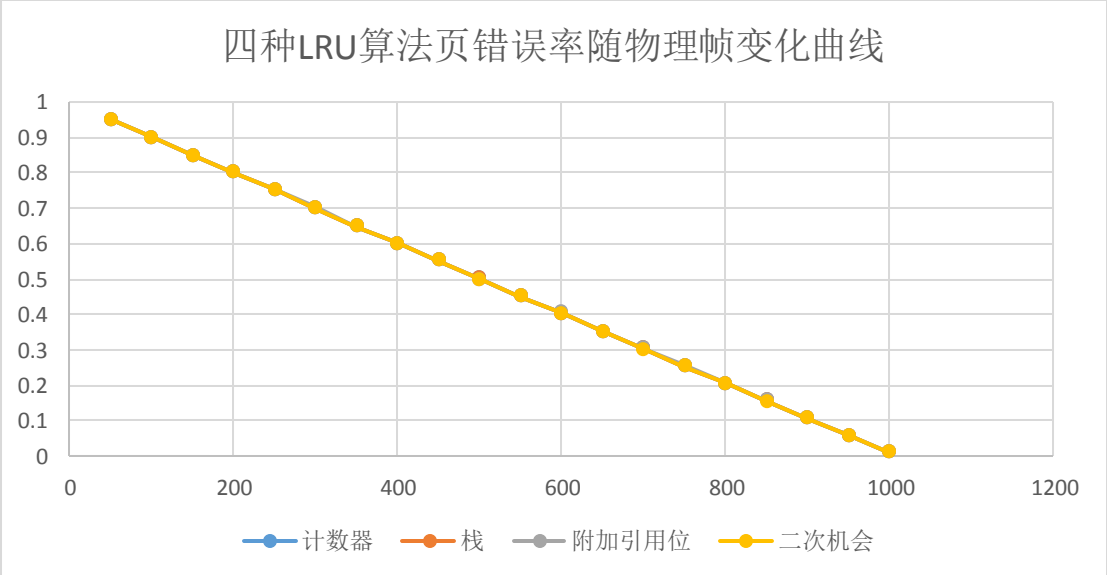
计数器	栈	附加引用位	二次机会
0.010000000	0.010000000	0.010000000	0.010000000

(二)　结果统计

通过 excel 表格统计分析数据：

物理帧数	计数器	栈	附加引用位	二次机会
50	0.95029	0.95029	0.9506	0.95028
100	0.89921	0.89921	0.89933	0.89959
150	0.84888	0.84888	0.84883	0.8485
200	0.8009	0.8009	0.80035	0.80074
250	0.75265	0.75265	0.75285	0.75237
300	0.70058	0.70058	0.7018	0.70087
350	0.64849	0.64849	0.64743	0.64776
400	0.59997	0.59997	0.60003	0.60002
450	0.55191	0.55191	0.55294	0.55234
500	0.50109	0.50109	0.49893	0.49927
550	0.45089	0.45089	0.45147	0.45064
600	0.40357	0.40357	0.40478	0.40307
650	0.3512	0.3512	0.35234	0.35194
700	0.30313	0.30313	0.30343	0.30277
750	0.2544	0.2544	0.25515	0.25365
800	0.20448	0.20448	0.20484	0.20533
850	0.15677	0.15677	0.1564	0.15626
900	0.10768	0.10768	0.10749	0.10594
950	0.05805	0.05805	0.05807	0.05856
1000	0.01	0.01	0.01	0.01

折线图（横坐标为物理帧数，纵坐标为页错误率）：



(三)　结果分析

实验结果发现，在给定最大页编号为 1000，引用串长度为 100000，附加引用位算法时间单元为处理 5 个页，通过改变物理帧数，发现随着物理帧数的增加，页错误率呈现线性下降趋势。

LRU 计数器与栈有完全一样的性能表现，而 LRU 近似算法的性能与

LRU 选法几乎一致，表示这两种近似算法可以很好的替代 LRU 算法，应用到实际场景中，以降低设计的复杂度和时间的开销。

分析原因：在随机生成的 0~999 页页号时，随机数产生任意数的概率相等，因而命中页表项的概率为(物理帧数/最大页编号);然而这样随机生成的引用串，不能很好的模拟真实的程序调用过程。程序的局部性无法在随机生成的数字串中体现出来，而计算机缓冲设置的合理前提，就是程序访问的局部特性。因而该随机串只能模拟一个程序的局部。对于没有局部性的调用，缓冲意义有限。

(四) 实验改进

该实验可通过生成具有局部性的引用串进行更真实的模拟。

算法的数据结构也可以由更好的替代，以达到更好的时间性能。

七、 实验体会

1. 通过该实验，更加深入的了解了 LRU 页置换算法及其近似算法的算法思想及其实现方法，加深了对虚拟内存的理解。
2. 在实际情况中，物理帧的数目与页错误率期望呈现反比例函数关系，本实验用随机数的方法生成引用串，不能很好的模拟计算机中对于页引用的实际情况。更确切的说，只能模拟一个局部的调页情况。因而随着物理帧数的增加，页错误率与其呈现线性关系。
3. 对于程序局部性是设置高速的合理假设前提有了更为深刻的认识。
4. 认识到实验分析对于深入理解和掌握知识的重要性。图表能够直观的呈现出数据间的关系，对于结果的分析大有裨益。