寄存器分配-图着色

徐 伟

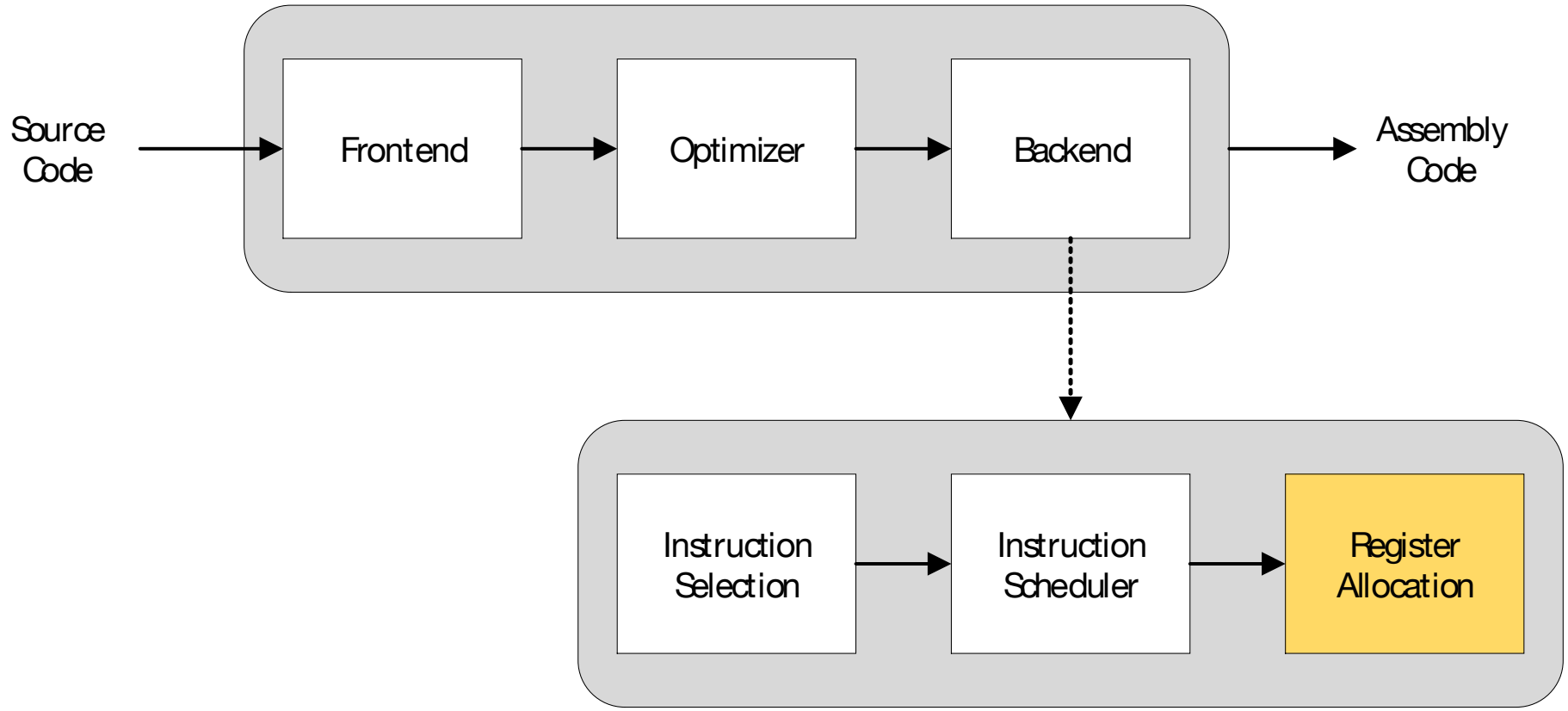
国家高性能计算中心(合肥)、信息与计算机国家级实验教学示范中心

先进技术研究院、计算机科学与技术学院

2025年5月29日

寄存器分配

- 寄存器是CPU中的稀有资源，如何高效的分配这一资源是一个至关重要的问题。



寄存器分配

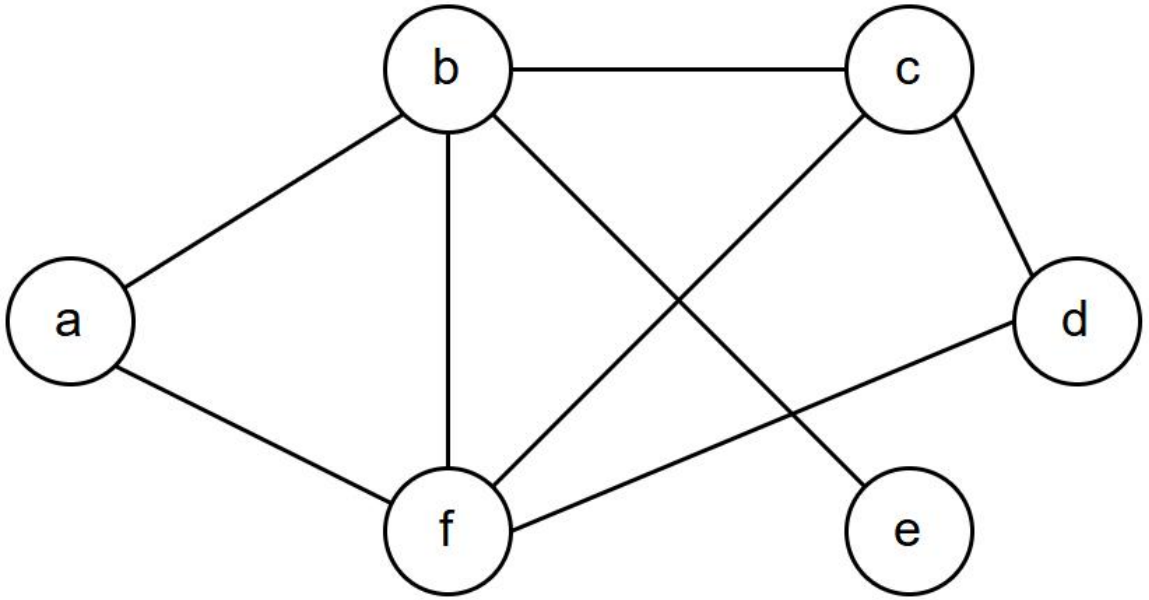
图着色算法

- 最经典的寄存器分配算法之一
- 将寄存器分配问题转化为图的节点着色问题
- 该算法适用于复杂的控制流程和循环结构，但计算复杂度较高

图着色问题

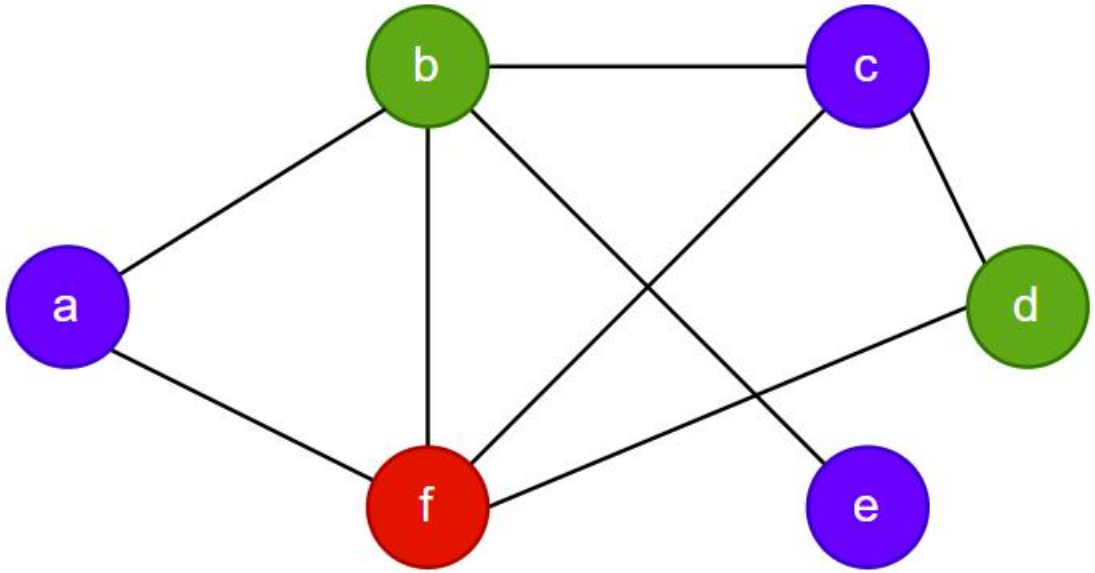
图着色算法

- 图中一共6个结点，被边相连的结点表示有相邻的关系
- 有相邻关系的结点不可以被染成同一种颜色
- 至少需要多少种颜色完成图着色?



图着色问题

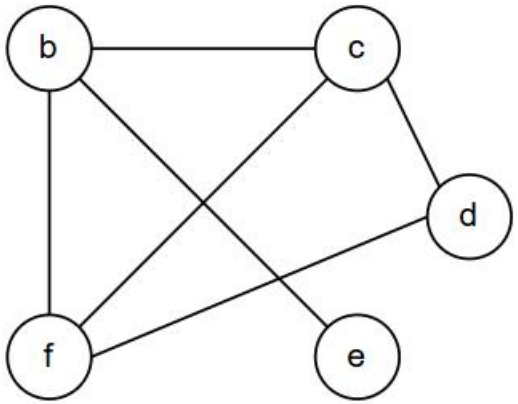
- 假设一共有红绿蓝3种颜色可供选择，一个可能的染色的结果
- 若用3个颜色可完成着色，可以称此图为3可着色图



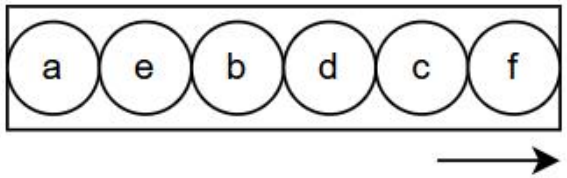
图着色问题

❑判断图为k可着色图的算法

- 将度低于k的节点依次删除（同时有关的边也删除），节点入栈
- 重复第一步，直到所有节点都被删除，则为k可着色图



将度低于3的结点删除，同时有关的边也进行删除，
加入栈中，这里删除了a

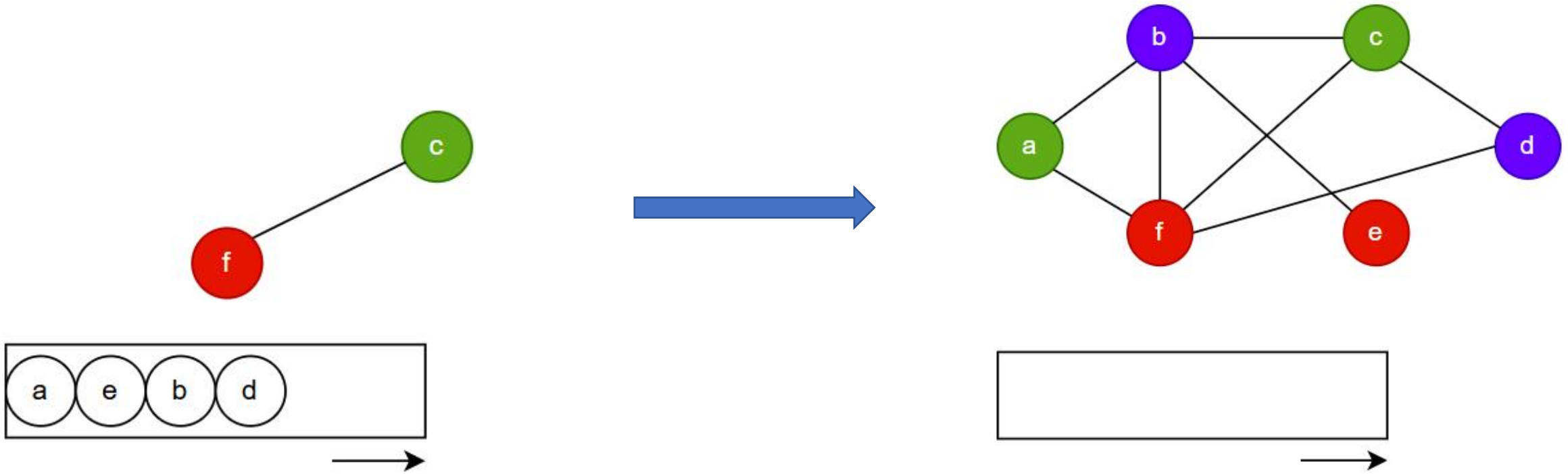


重复操作，直到所有结点放入了栈中
此时图已经为空

图着色问题

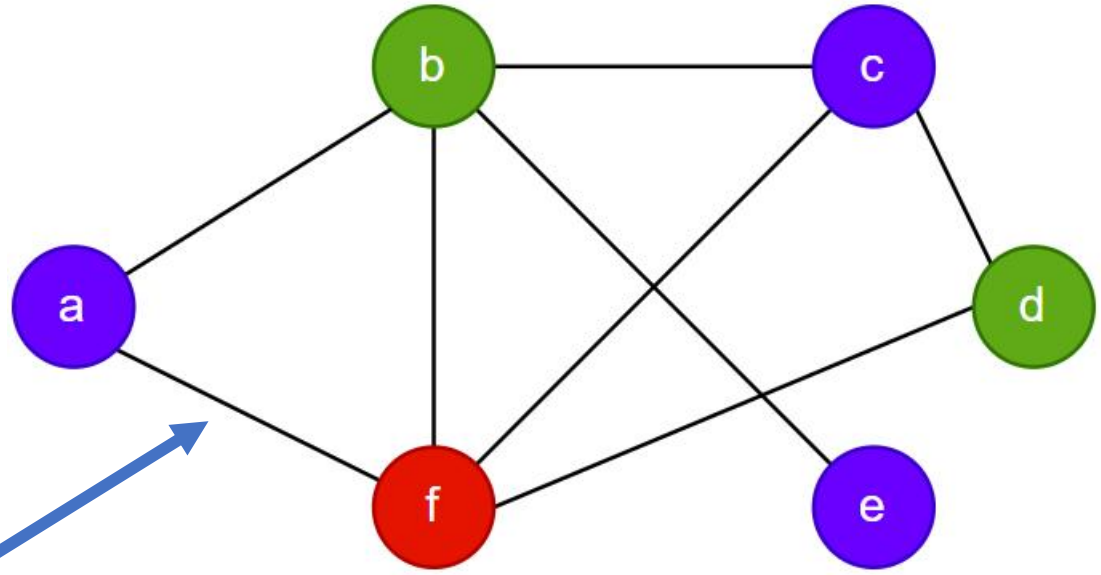
❑图着色

- ■从栈中将结点取出，取出时进行着色
- ■如果两者有连接关系，那么不可以染成同样的颜色



利用图着色进行寄存器分配的思路

- 寄存器分配也是类似思路
- 图中的节点可以被看作是中间代码中的虚拟寄存器/变量
- 颜色可以被看作是物理寄存器，每个物理寄存器对应一种颜色
- 分配物理寄存器就是对结点进行着色



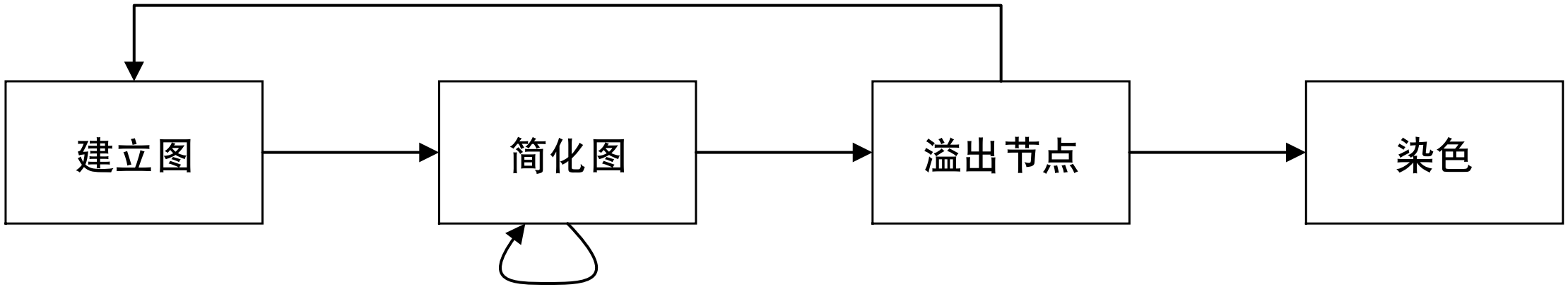
边代表了两个虚拟寄存器不可以分配到同一个物理寄存器

寄存器图着色

❑算法步骤

■建立图

- 根据每个变量的活跃区间建立寄存器干涉图
- 图中节点对应其活跃变量，活跃区间互相冲突的节点之间建立边

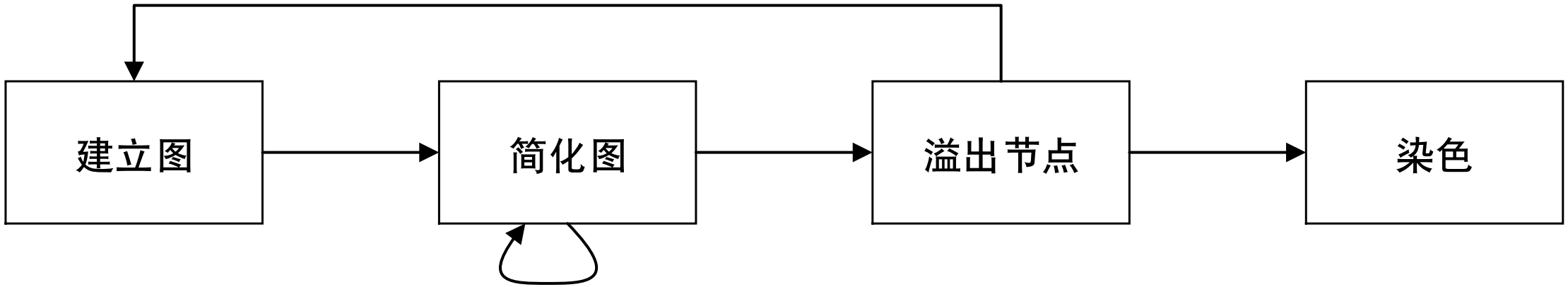


寄存器图着色

❑算法步骤

■ 简化图

- ➢ 图中的节点遍历
- ➢ 如节点度少于k（可用的物理寄存器的数量），则将节点及邻边从图删除，并将节点压入栈
- ➢ 重复步骤直到图中所有节点度数大于等于k，或者得到空图为止

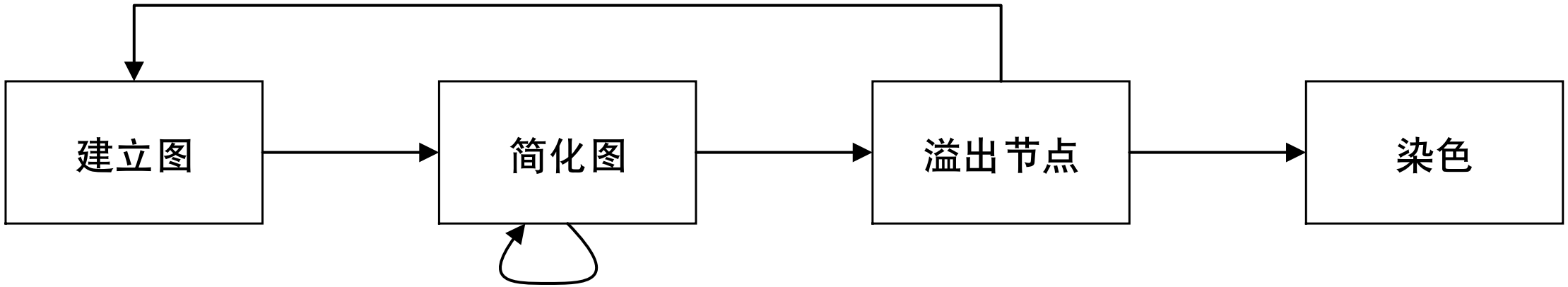


寄存器图着色

❑算法步骤

■溢出节点

- ➢ 如简化最后图非空，需要选择一节点溢出（放入内存）
  - ◆ 节点选择
    - ✓ 比较简单的实现是选择删除在代码中出现次数较少的节点
    - ✓ 根据综合代价选择
- ➢ 重新建立图和化简图

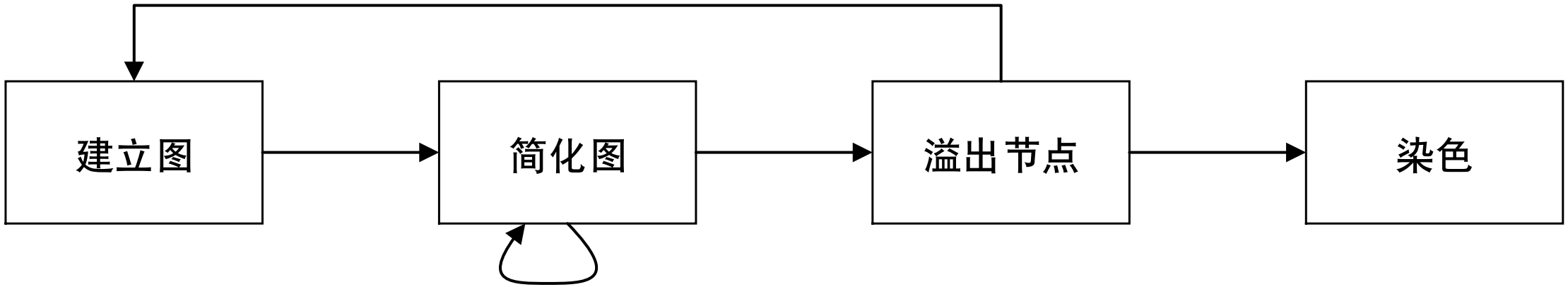


寄存器图着色

❑算法步骤

■ 染色

- 算法按栈中节点出栈顺序进行图着色
- 图中的所有节点染上有且只有一种颜色



寄存器图着色示例

- 假设系统存在5个寄存器

```
int main(void){
        int a;    int b;
        int c;    int d;
        int e;    int f;
        int g;    int h;
        int k;
        a = 1;
        b = 2;
        c = 3;
        d = a+b;
        e = 2*d;
        g = d+e;
        k = d+e+2;
        f = e+d/2;
        h = k+g+d+f;
        return d;
}
```

C代码

```
target triple = "x86_64-pc-linux-gnu"
declare i32 @input()
declare void @output(i32)
declare void @outputFloat(float)
declare void @neg_idx_except()
define i32 @main() {
label_entry:
0  %op11 = add i32 1, 2
2  %op13 = mul i32 2, %op11
4  %op16 = add i32 %op11, %op13
6  %op19 = add i32 %op11, %op13
8  %op20 = add i32 %op19, 2
10  %op23 = sdiv i32 %op11, 2
12  %op24 = add i32 %op13, %op23
14  %op27 = add i32 %op20, %op16
16  %op29 = add i32 %op27, %op11
18  %op31 = add i32 %op29, %op24
20  ret i32 %op11
```

IR

寄存器图着色示例

❑变量活跃区间

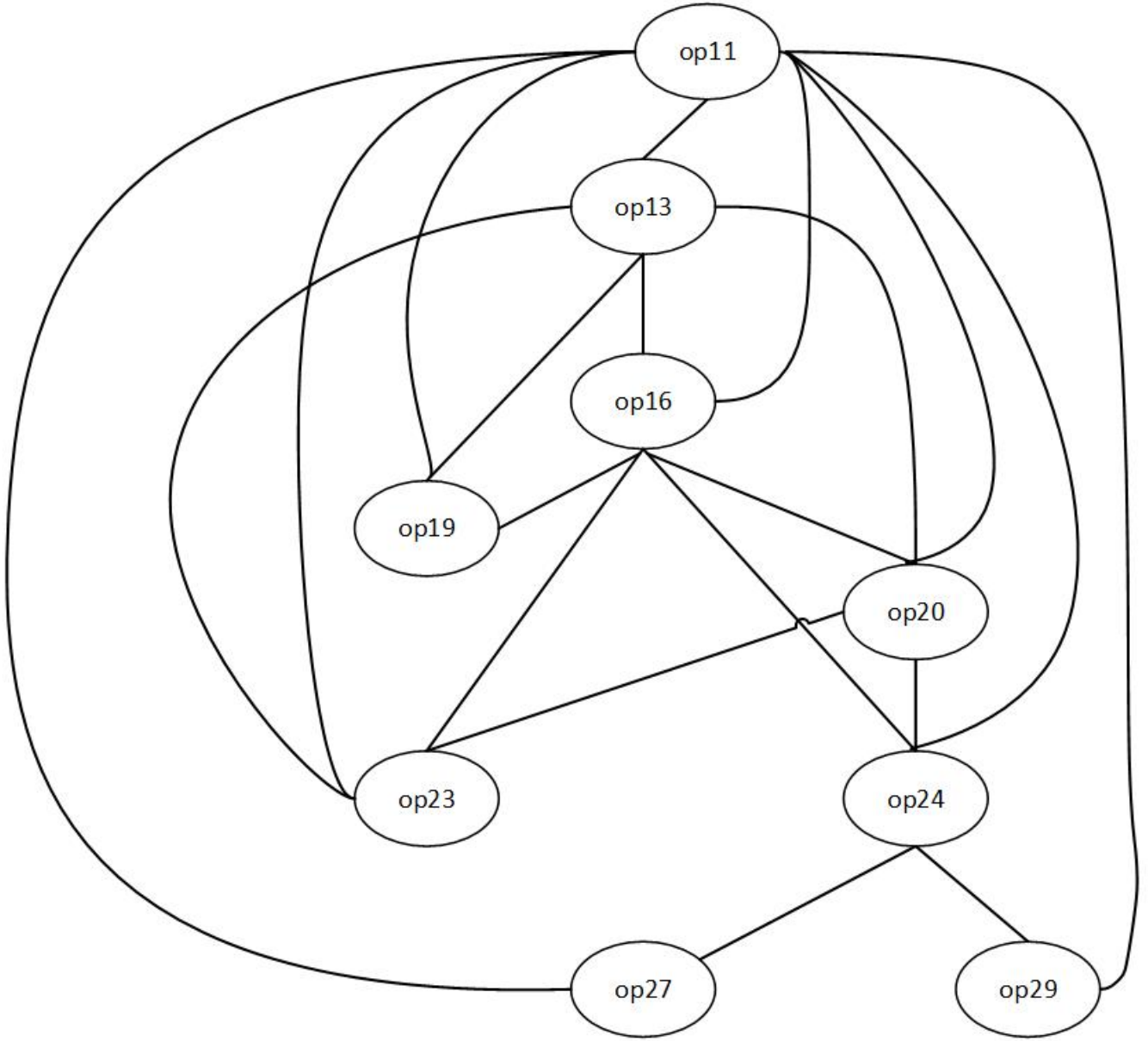
变量	活跃区间
%op11	[1,21)
%op13	[3,13)
%op16	[5,15)
%op19	[7,9)
%op20	[9,15)
%op23	[11,13)
%op24	[13,19)
%op27	[15,17)
%op29	[17,19)

```
target triple = "x86_64-pc-linux-gnu"
declare i32 @input()
declare void @output(i32)
declare void @outputFloat(float)
declare void @neg_idx_except()
define i32 @main() {
label_entry:
0  %op11 = add i32 1, 2
2  %op13 = mul i32 2, %op11
4  %op16 = add i32 %op11, %op13
6  %op19 = add i32 %op11, %op13
8  %op20 = add i32 %op19, 2
10  %op23 = sdiv i32 %op11, 2
12  %op24 = add i32 %op13, %op23
14  %op27 = add i32 %op20, %op16
16  %op29 = add i32 %op27, %op11
18  %op31 = add i32 %op29, %op24
20  ret i32 %op11
```

寄存器图着色示例

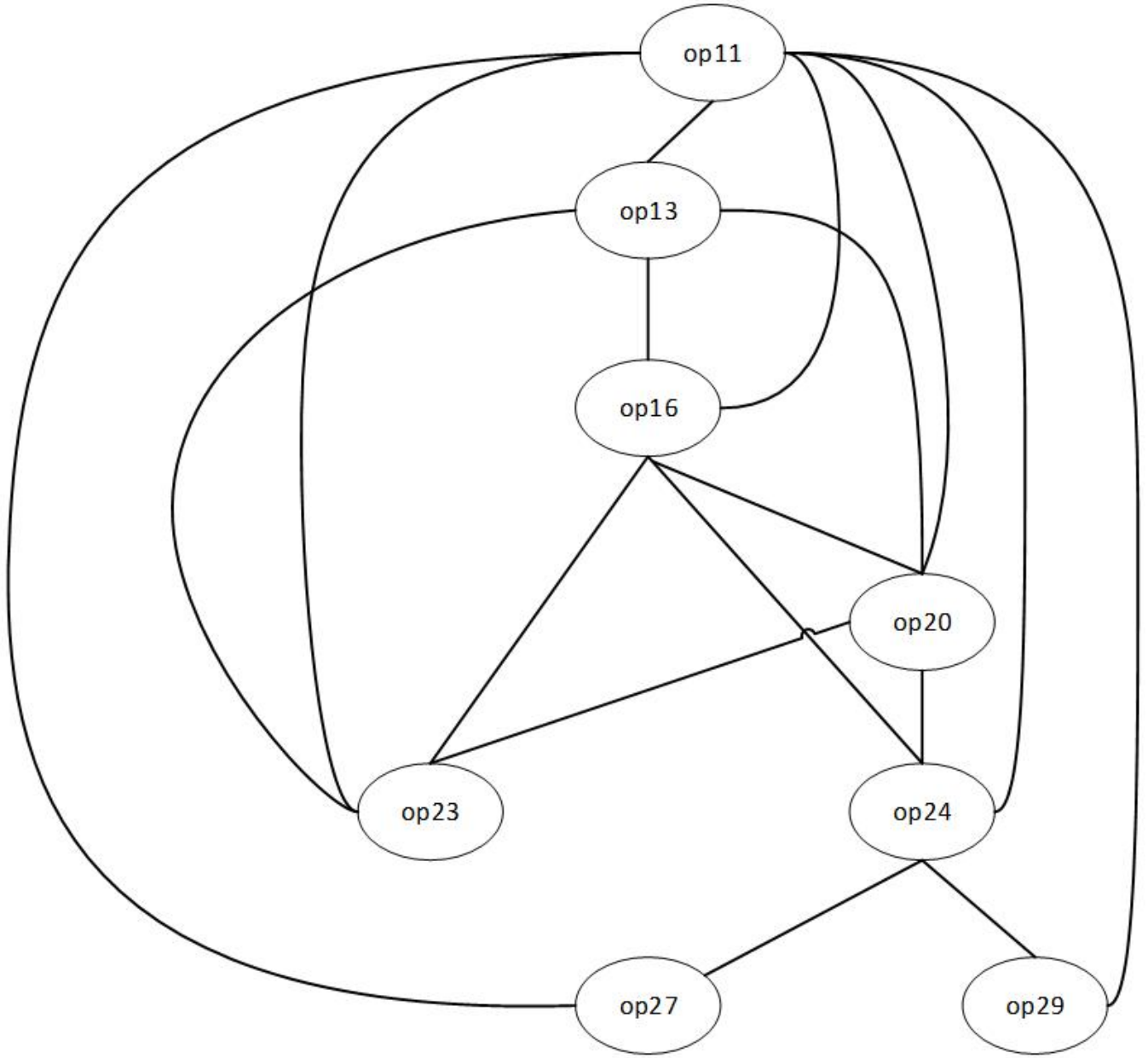
- 建立干涉图

变量	活跃区间
%op11	[1,21)
%op13	[3,13)
%op16	[5,15)
%op19	[7,9)
%op20	[9,15)
%op23	[11,13)
%op24	[13,19)
%op27	[15,17)
%op29	[17,19)



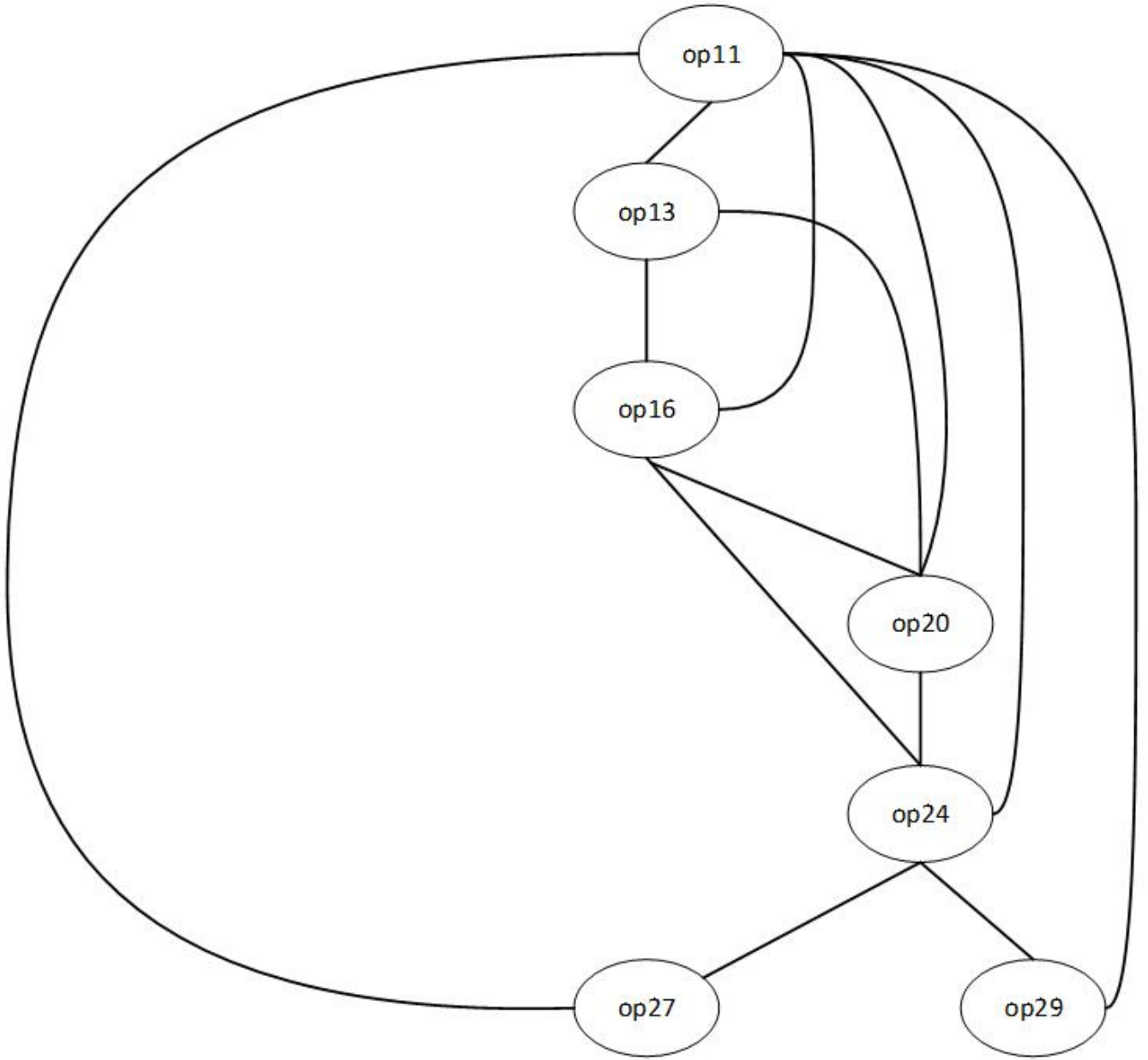
寄存器图着色示例

- 化简图
  - 删除%op19



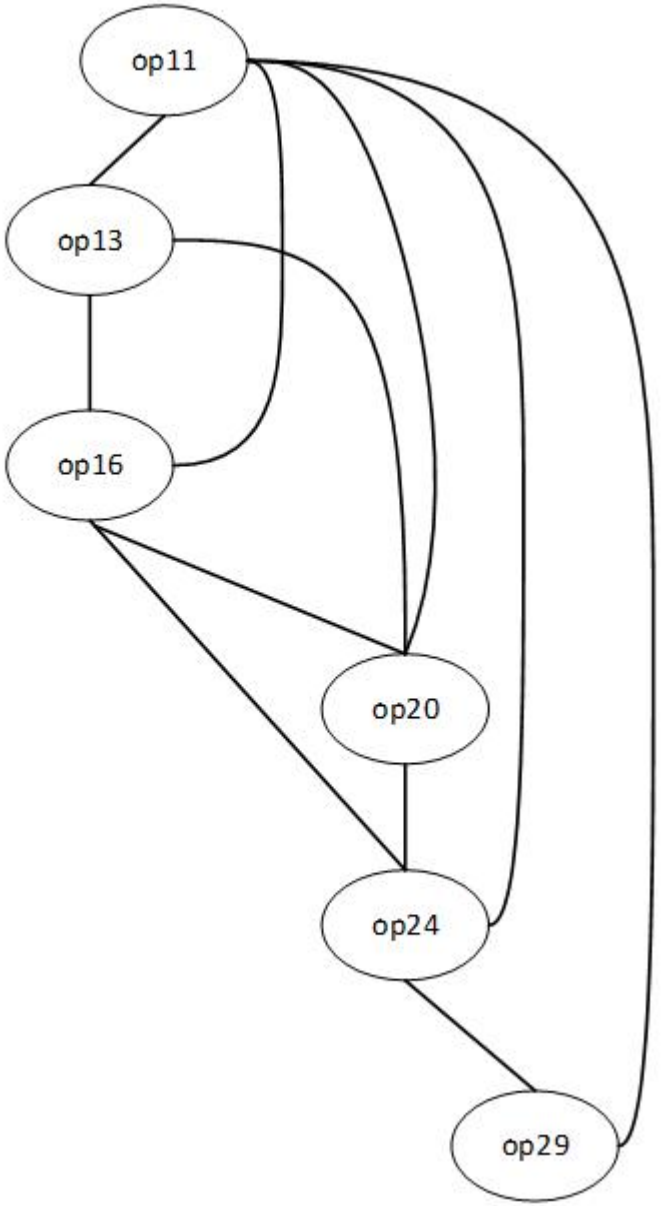
寄存器图着色示例

- 化简图
  - 删除%op19
  - 删除%op23



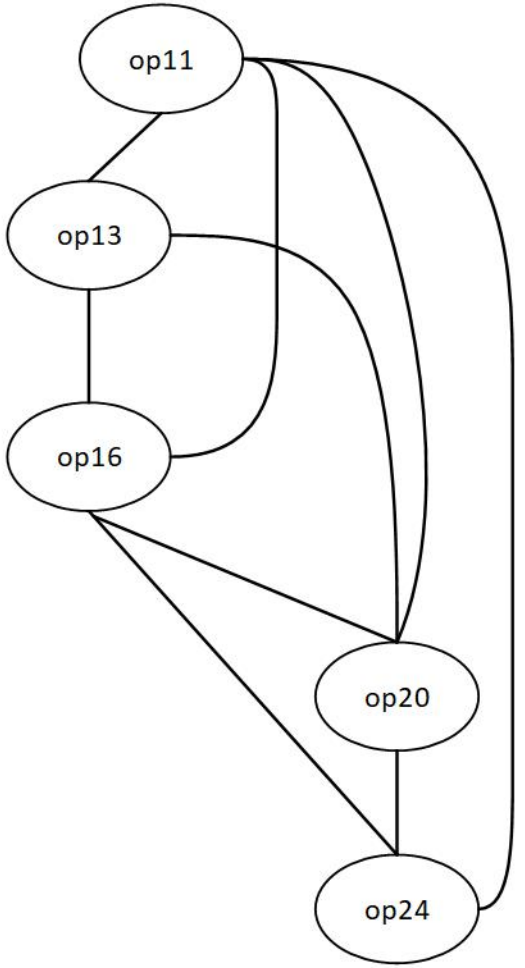
寄存器图着色示例

- 化简图
  - 删除%op19
  - 删除%op23
  - 删除%op27



寄存器图着色示例

- 化简图
  - 删除%op19
  - 删除%op23
  - 删除%op27
  - 删除%op29



寄存器图着色示例

- 化简图
  - 删除%op19
  - 删除%op23
  - 删除%op27
  - 删除%op29
  - 再将%op13，%op16，%op20，%op24，%op11删除，并压入栈中
  - 最后得到一个空图

寄存器图着色示例

- 染色
  - 按照入栈的

%op23

%op27

%op29

%op13

%op16

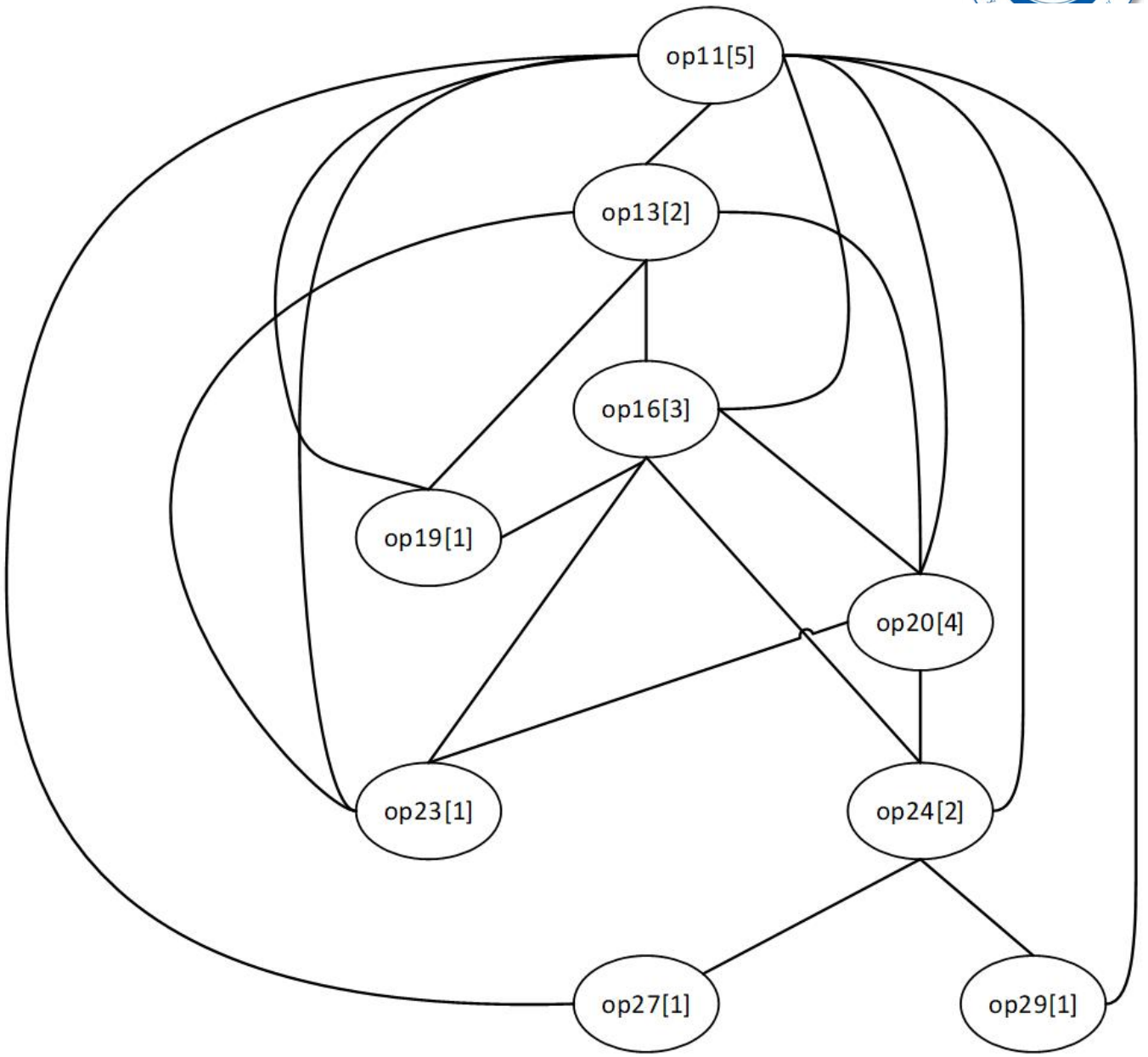
%op20

%op24

%op11的出栈顺序

相邻节点不赋予相同颜色的规则

进行着色，可以得到一张5-着色图



寄存器图着色示例2

- 假设系统存在5个寄存器

```
int main(void){
        int a;    int b;
        int c;    int d;
        int e;    int f;
        int g;    int h;
        int k;    int i;
        a = 1;  b = 2;
        c = 3;
        d = a+b;
        e = 2*d;
        g = d+e;
        k = d+e+2;
        i = d+e/2;
        f = e+d/2;
        h = k+g+d+f+i;
        return d;
}
```

C代码

```
target triple = "x86_64-pc-linux-gnu"
declare i32 @input()
declare void @output(i32)
declare void @outputFloat(float)
declare void @neg_idx_except()
define i32 @main() {
label_entry:
0   %op12 = add i32 1, 2
2   %op14 = mul i32 2, %op12
4   %op17 = add i32 %op12, %op14
6   %op20 = add i32 %op12, %op14
8   %op21 = add i32 %op20, 2
10  %op24 = sdiv i32 %op14, 2
12  %op25 = add i32 %op12, %op24
14  %op28 = sdiv i32 %op12, 2
16  %op29 = add 732 %op14, %op28
18  %op32 = add i32 %op21, %op17
20  %op34 = add i32 %op32, %op12
22  %op36 = add i32 %op34, %op29
24  %op38 = add i32 %op36, %op25
26  ret i32 %op12
}
```

IR

寄存器图着色示例2

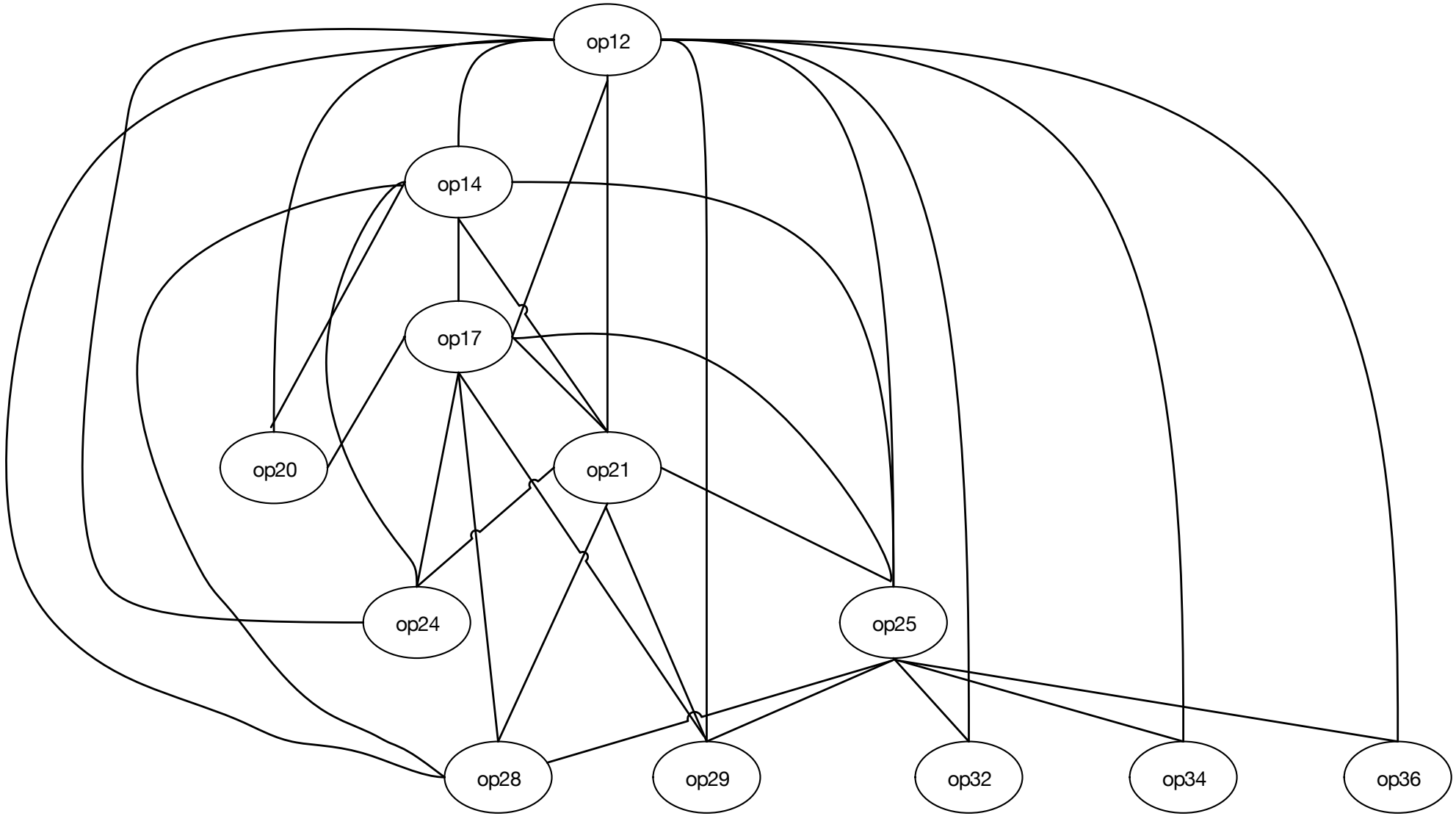
❑变量活跃区间

变量	活跃区间
%op12	[1,27)
%op14	[3,17)
%op17	[5,19)
%op20	[7,9)
%op21	[9,19)
%op24	[11,13)
%op25	[13,25)
%op28	[15,17)
%op29	[17,23)
%op32	[19,21)
%op34	[21,23)
%op36	[23,25)

```
target triple = "x86_64-pc-linux-gnu"
declare i32 @input()
declare void @output(i32)
declare void @outputFloat(float)
declare void @neg_idx_except()
define i32 @main() {
label_entry:
0   %op12 = add i32 1, 2
2   %op14 = mul i32 2, %op12
4   %op17 = add i32 %op12, %op14
6   %op20 = add i32 %op12, %op14
8   %op21 = add i32 %op20, 2
10  %op24 = sdiv i32 %op14, 2
12  %op25 = add i32 %op12, %op24
14  %op28 = sdiv i32 %op12, 2
16  %op29 = add 732 %op14, %op28
18  %op32 = add i32 %op21, %op17
20  %op34 = add i32 %op32, %op12
22  %op36 = add i32 %op34, %op29
24  %op38 = add i32 %op36, %op25
26  ret i32 %op12
}
```

寄存器图着色示例2

- 建立干涉图



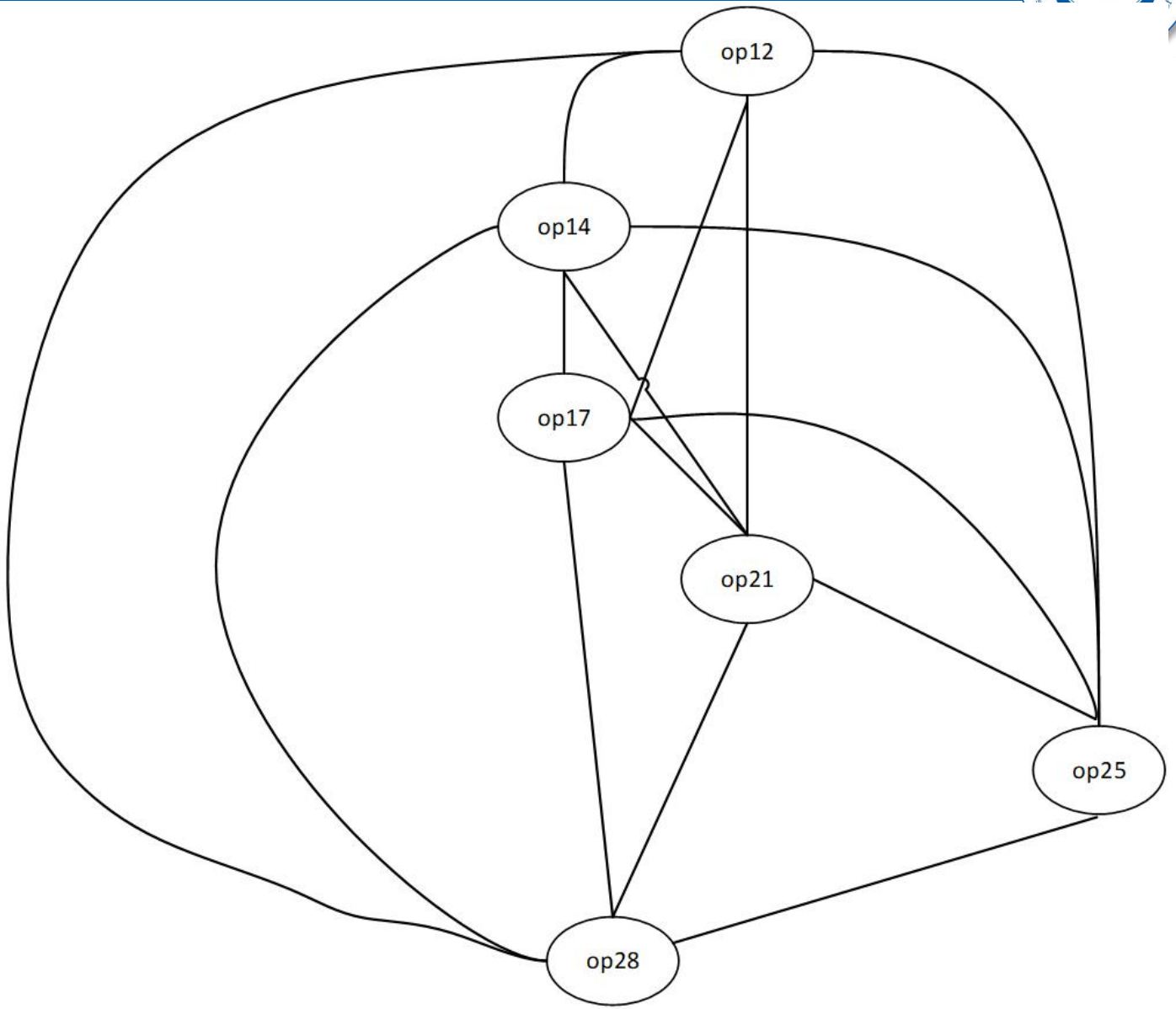
寄存器图着色示例2

- 化简图
  - 将度数小于5的节点

    %op20，%op24，%op29，

    %op32，%op34，%op36

    依次从图中删除



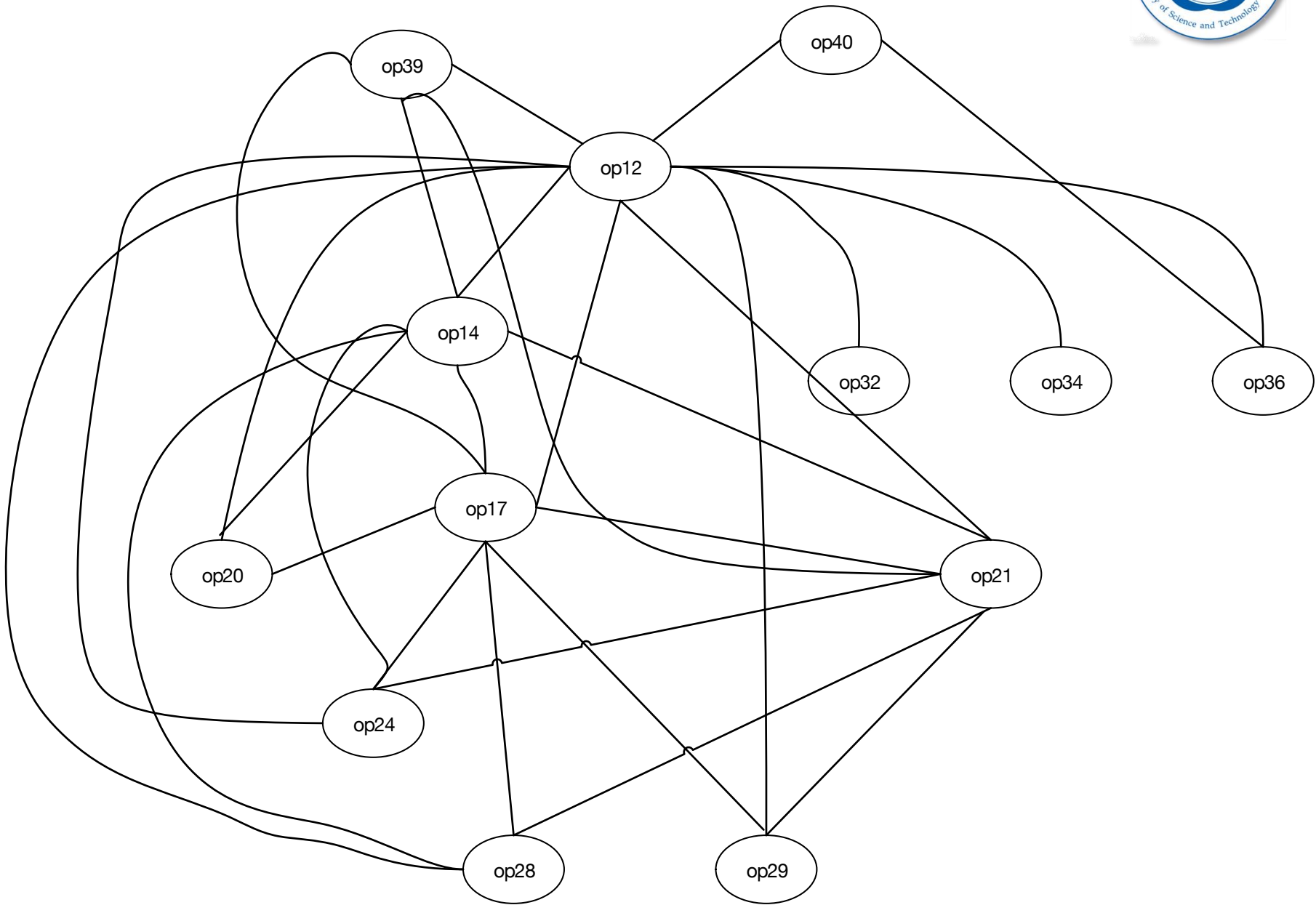
寄存器图着色示例2

- 溢出节点
  - 计算代价
  - 选择op25溢出

```
target triple = "x86_64-pc-linux-gnu"
declare i32 @input()
declare void @output(i32)
declare void @outputFloat(float)
declare void @neg_idx_except()
define i32 @main() {
label_entry:
        %op25 = alloca i32                      ;记录变量在栈上位置
0   %op12 = add i32 1, 2
2   %op14 = mul i32 2, %op12
4   %op17 = add i32 %op12, %op14
6   %op20 = add i32 %op12, %op14
8   %op21 = add i32 %op20, 2
10  %op24 = sdiv i32 %op14, 2
12  %op39 = add i32 %op12, %op24
        store i32 %op39, i32* %op25             ;保存变量到栈上
14  %op28 = sdiv i32 %op12, 2
16  %op29 = add 732 %op14, %op28
18  %op32 = add i32 %op21, %op17
20  %op34 = add i32 %op32, %op12
22  %op36 = add i32 %op34, %op29
        %op40 = load i32, i32* %op25            ;从栈上读取数据
24  %op38 = add i32 %op36, %op40
26  ret i32 %op12
}
```

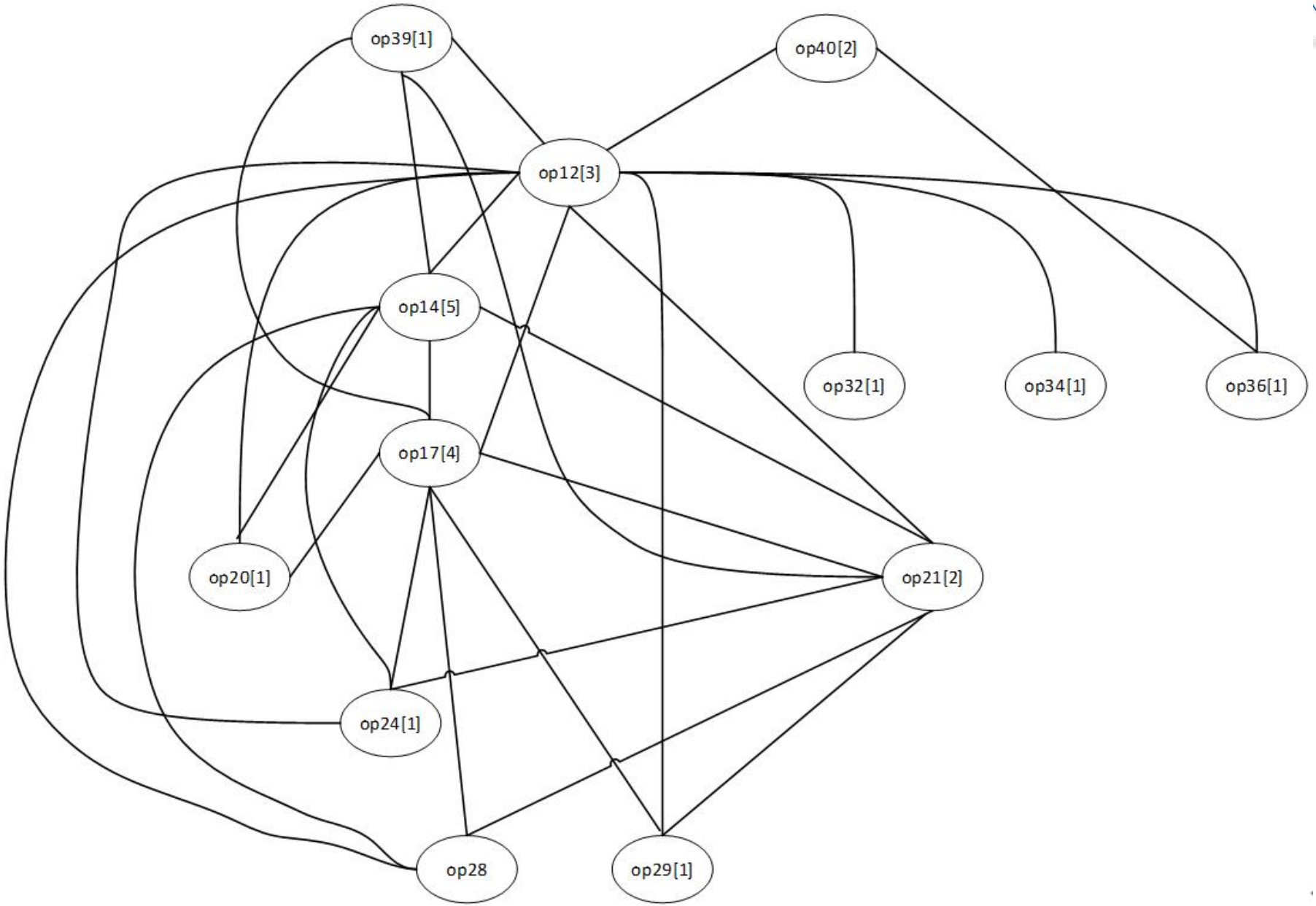
寄存器图着色示例2

- 建立干涉图
- 化简图



寄存器图着色示例2

- 染色



一起努力
打造国产基础软硬件体系！

徐伟

国家高性能计算中心(合肥)、信息与计算机国家级实验教学示范中心

先进技术研究院、计算机科学与技术学院

2025年5月29日