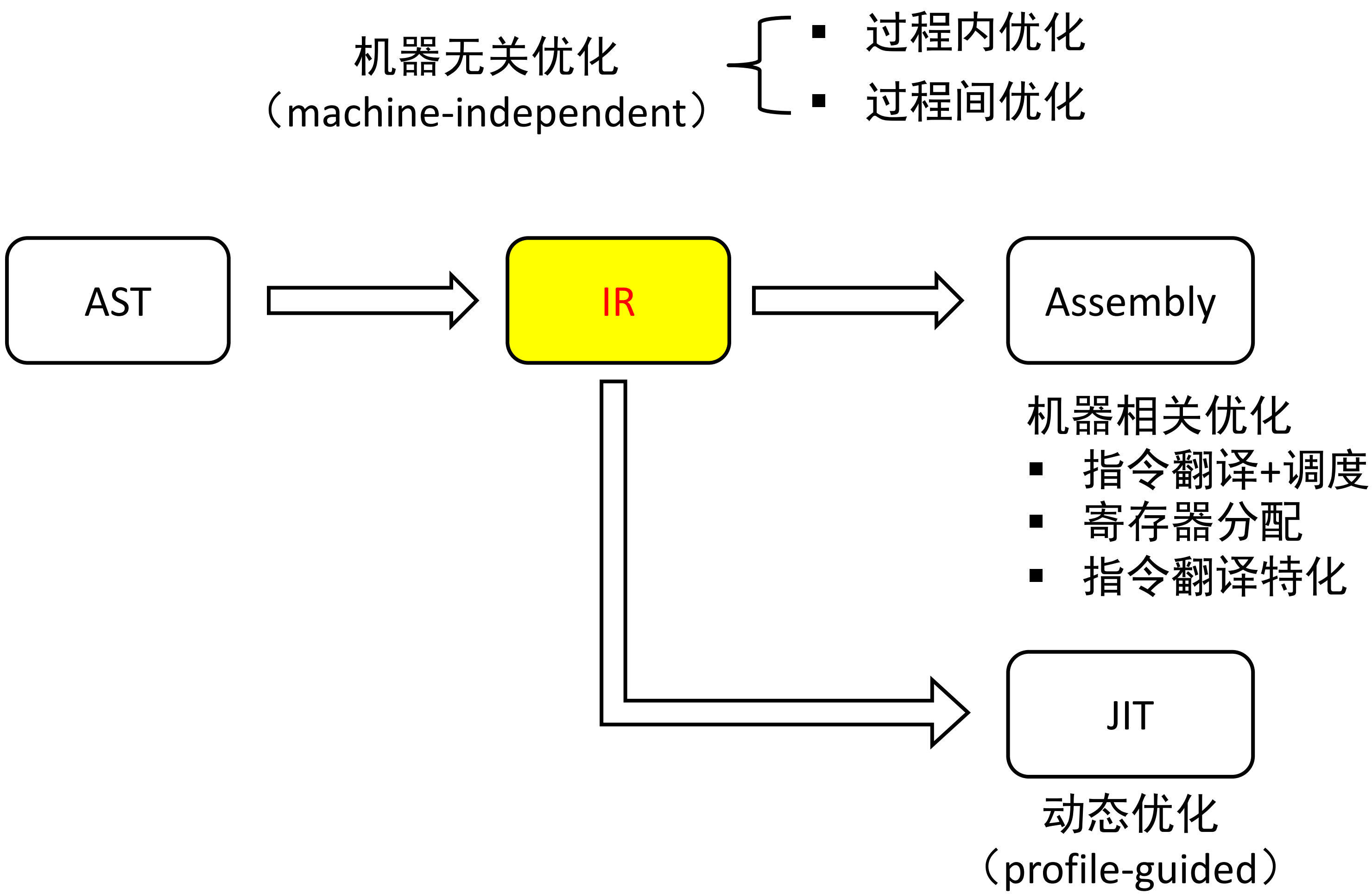
COMP130014.02 编译

# 第九讲：IR过程内优化

徐 辉

xuh@fudan.edu.cn

# 优化策略



机器无关优化
（machine-independent）
过程内优化
过程间优化
AST
IR
Assembly
机器相关优化
指令翻译+调度
寄存器分配
指令翻译特化
JIT
动态优化
（profile-guided）

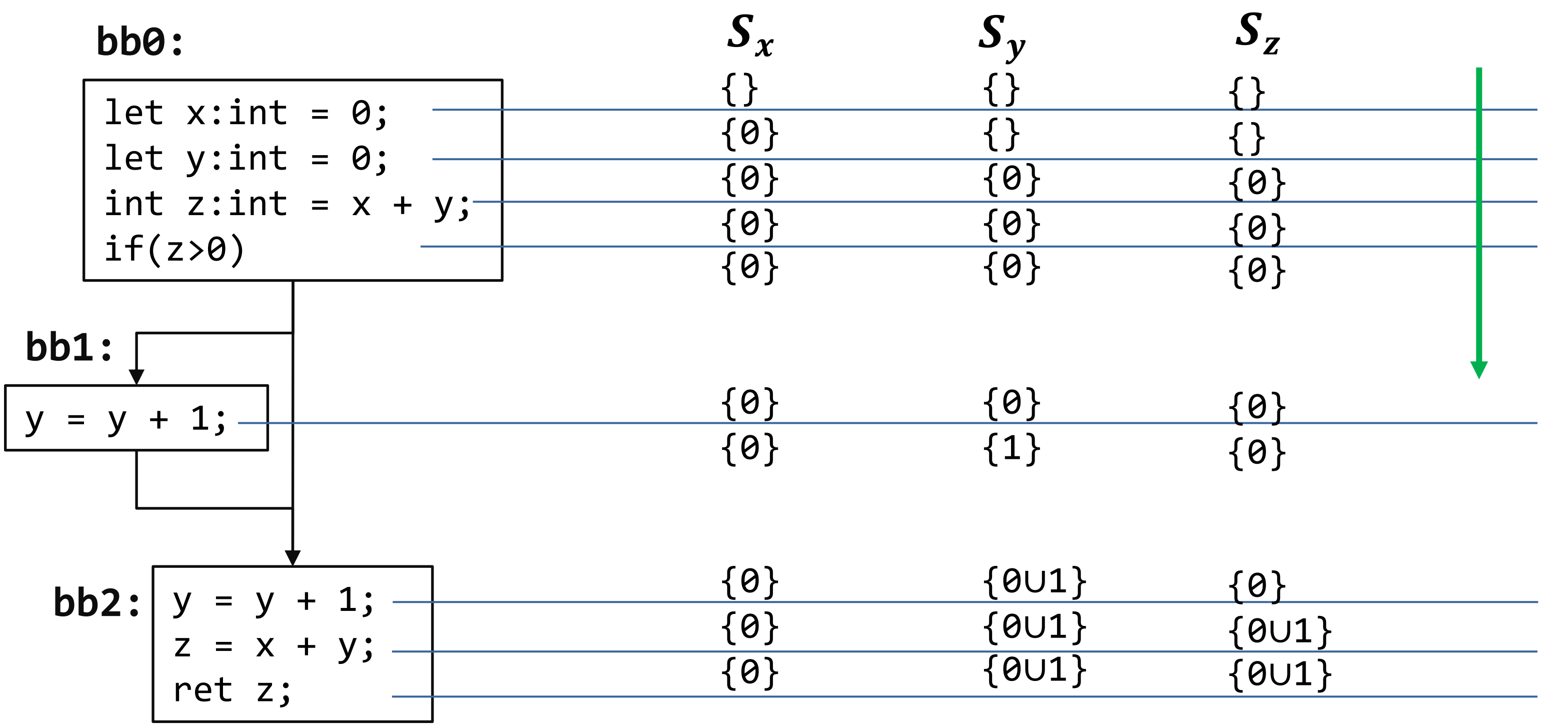
# 过程内优化

- 一、常量传播优化
- 二、冗余代码优化
- 三、循环优化
- 四、更多优化思路

# 一、常量传播优化

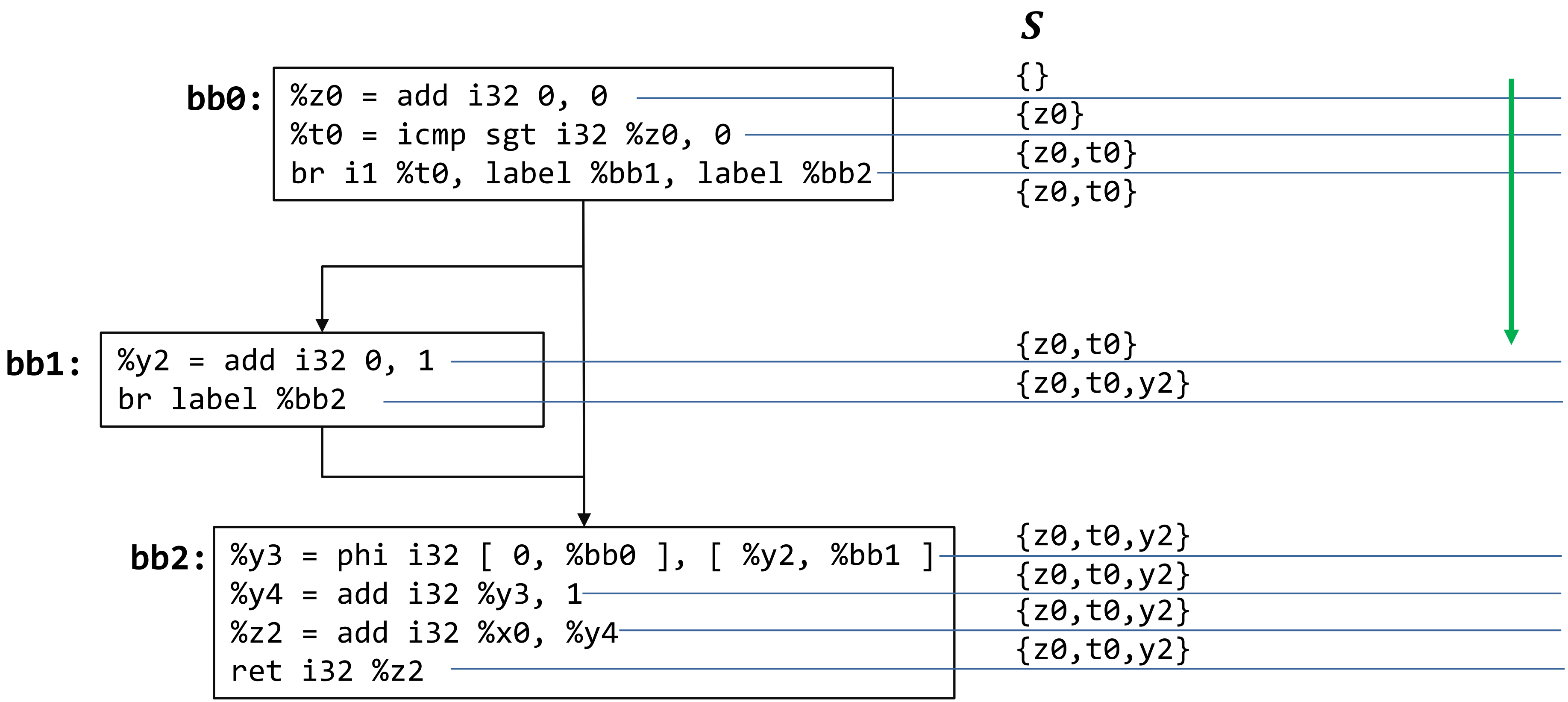
# 常量分析问题

- 分析变量/寄存器x在特定程序节点p是否为常量



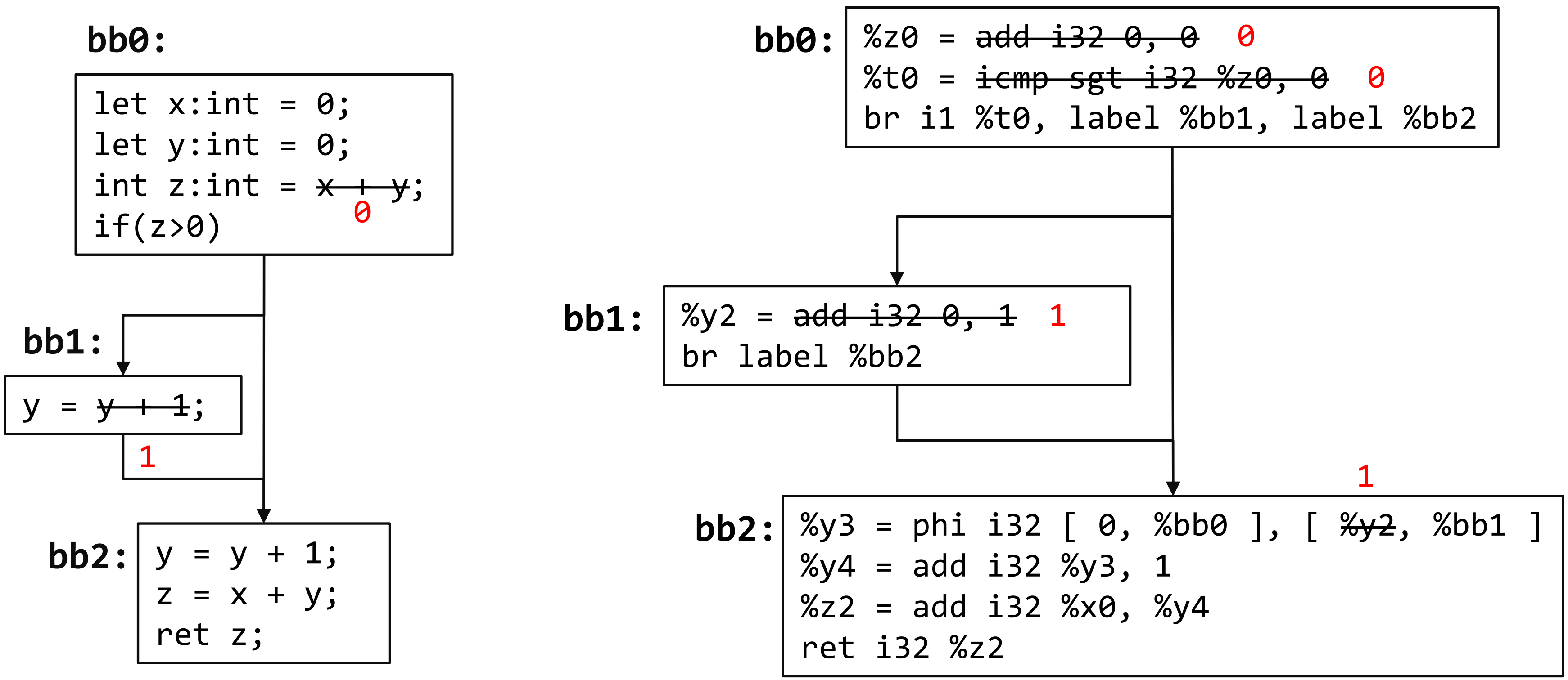
# 基于SSA的常量分析

- 分析哪些寄存器内容为常量



# 主要思想：在编译时完成常量相关的计算

- 常量传播：识别常量并将相应的变量替换为常量
- 常量折叠：编译时完成对常量表达式的计算



# 继续优化...

**bb0:**

```
%z0 = 0
%t0 = 0
br i1 0, label %bb1, label %bb2
```

**bb1:**

```
%y2 = 1
br label %bb2
```

**bb2:**

```
%y3 = phi i32 [ 0, %bb0 ], [ 1, %bb1 ]
%y4 = add i32 %y3, 1
%z2 = add i32 %x0, %y4
ret i32 %z2
```

删除不可达代码块

```
ret i32 1
```

常量分析优化

# 指令合并

- 两条二元运算指令满足一定条件时可以合并：
  - 指令1：一个运算数为常量，另一个为变量
  - 指令2：一个运算数为常量，另一个为指令1的运算结果

```
y = x + 1
y = y + 2
z = y + 3
```

⇩

```
y = x + 1
y = x + 3
z = x + 6
```

```
%y0 = add i32 %x0, 1
%y1 = add i32 %y0, 2
%z0 = add i32 %y1, 3
```

⇩

```
%y0 = add i32 %x0, 1
%y1 = add i32 %x0, 3
%z0 = add i32 %x0, 6
```

# 思考：指令合并数据流分析算法实现

- 面向非SSA形式源代码或Gimple IR
- 面向非 SSA形式LLVM IR（使用load/store）
- 面向 SSA形式LLVM IR

# 二、冗余代码优化

# 删除死代码：优化代码体积

- 代码块不可达：条件语句恒真或恒假
- 无用计算：缺少use的def
- …

# 全局值编号（Global Value Numbering）

- 相同的运算（运算符、运算数）只算一次即可

```
%y0 = add i32 %x0, 1
%y1 = add i32 %x0, 1
%z0 = add i32 %x0, 1
```

```
%y0 = add i32 %x0, 1
%y1 = %y0
%z0 = %y0
```

非LLVM IR；必须以指令开头

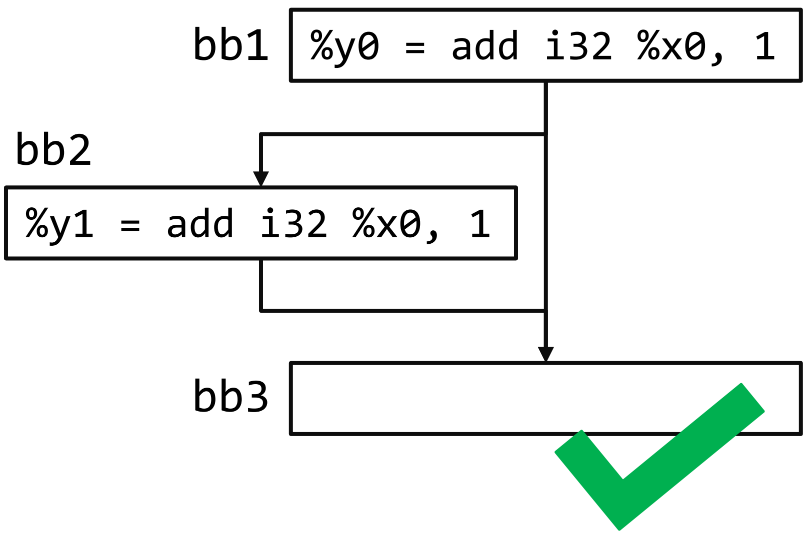
等价LLVM IR

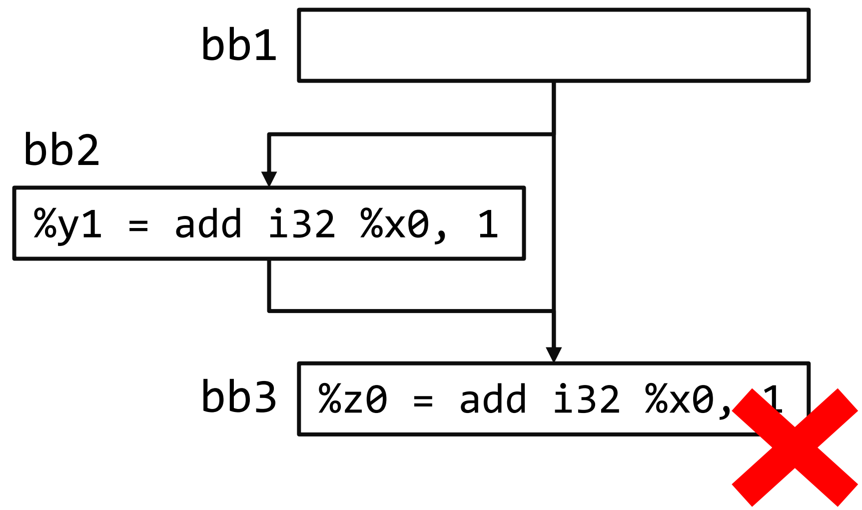
```
%y0 = add i32 %x0, 1
%x0 = bitcast i32 %y0 to i32
%y0 = bitcast i32 %y0 to i32
```

或直接替换USE(%y1)为USE(%y0)

# GVN应用：公共子表达式（可用表达式）

- 该表达式在存在支配关系的两条指令中重复出现



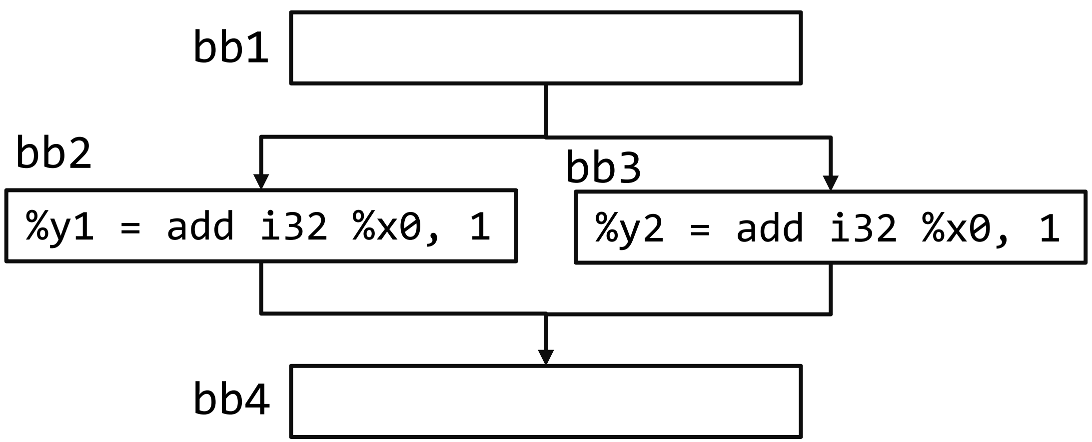




弱公共子表达式

逆向数据流分析 => 代码提升

# GVN应用：繁忙表达式

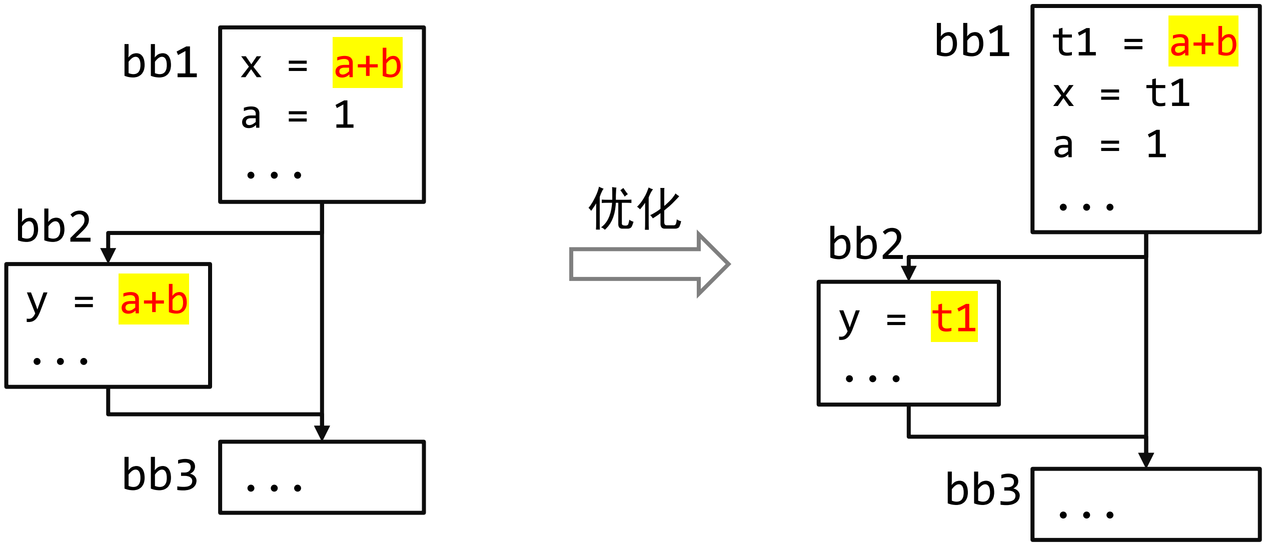
- 不同代码分支中都存在的表达式
- 可以优化代码体积



# 思考：基于GVN的优化算法实现

- 面向非SSA形式源代码或Gimple IR
- 面向非 SSA形式LLVM IR（使用load/store）
- 面向 SSA形式LLVM IR

# 公共子表达式分析：面向非SSA形式Gimple IR




- 正向遍历控制流图
  - 如遇到指令：x = a + b
    - $\mathrm{Gen(n)} = \{< \mathrm{a+b} >\}$
    - $\mathrm{KILL(n)} = \{< \varepsilon >: \text{表达式}\varepsilon\text{包含}x\}$
  - ...

$$\mathrm{IN}(n) = \bigcap_{n' \in \mathrm{predecessor}(n)} \mathrm{OUT}(n')$$

# 三、循环优化

# 循环中的不变代码

- 出现位置：循环条件、循环体中都可能出现

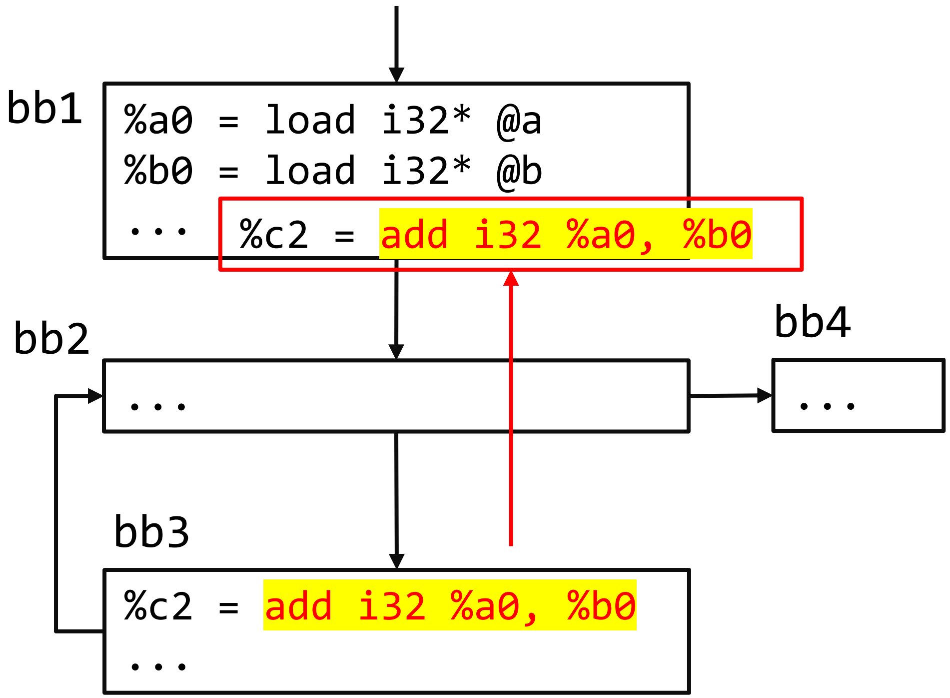
```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list = ...;
for i in 1..100 {
    let t = (a + b)*i;
    s.push(t);
}
```

```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list = ...;
for i in 1..s.len() {
    let t = (a + b)*i;
    s[i] = t;
}
```

```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list = ...;
for i in 1..100 {
    let t = foo();
    s.push(t);
}
```

```
let a = ...;
let b = ...;
let s:list = ...;
for i in 1..s.len() {
    let t = s.pop();
    s[i] = t;
}
```

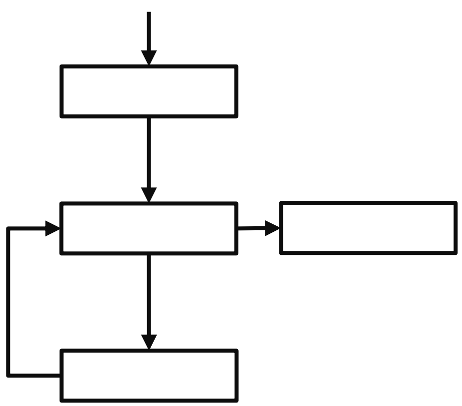
# 循环不变代码



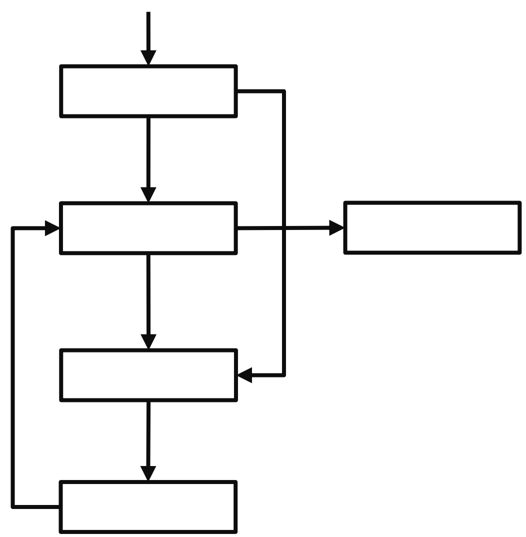

- 检测循环不变代码
  - 操作数定义自循环外部
  - 如何检测循环？
- 前移到循环外部
  - 支配节点

# 自然循环（natural loop）

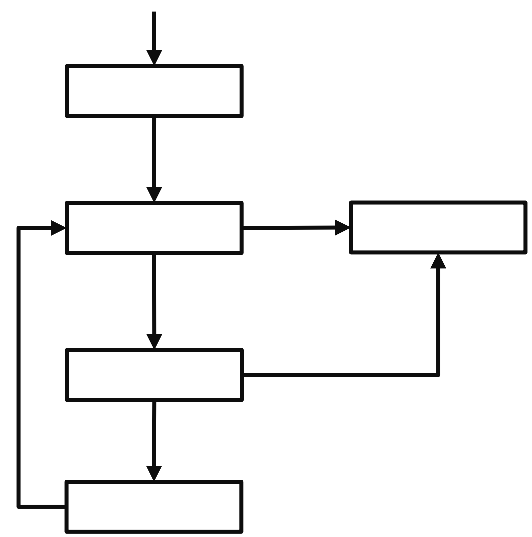
- 一个循环是自然循环的条件：
  - 有唯一的入口（支配所有节点）
  - 返回入口节点的返回边
- 一般正常的控制流语句形成的环：while、if-else、for
  - goto语句会造成非自然循环



自然循环



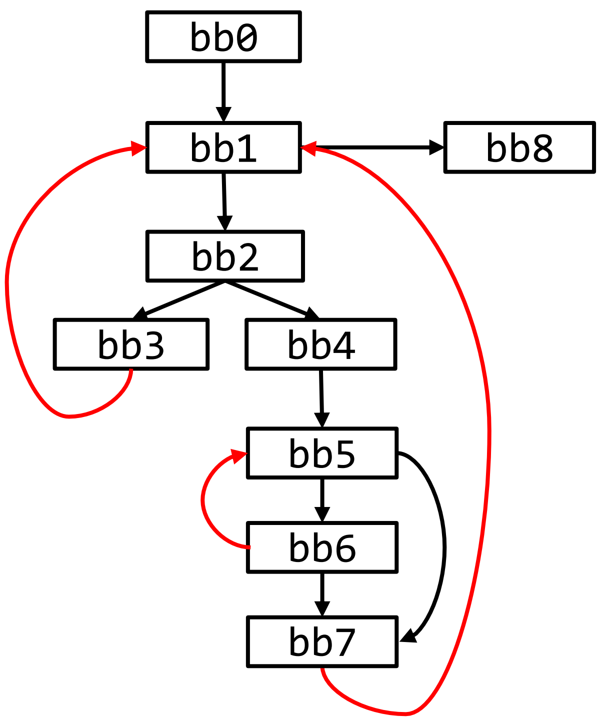
非自然循环



自然循环

# 自然循环的性质

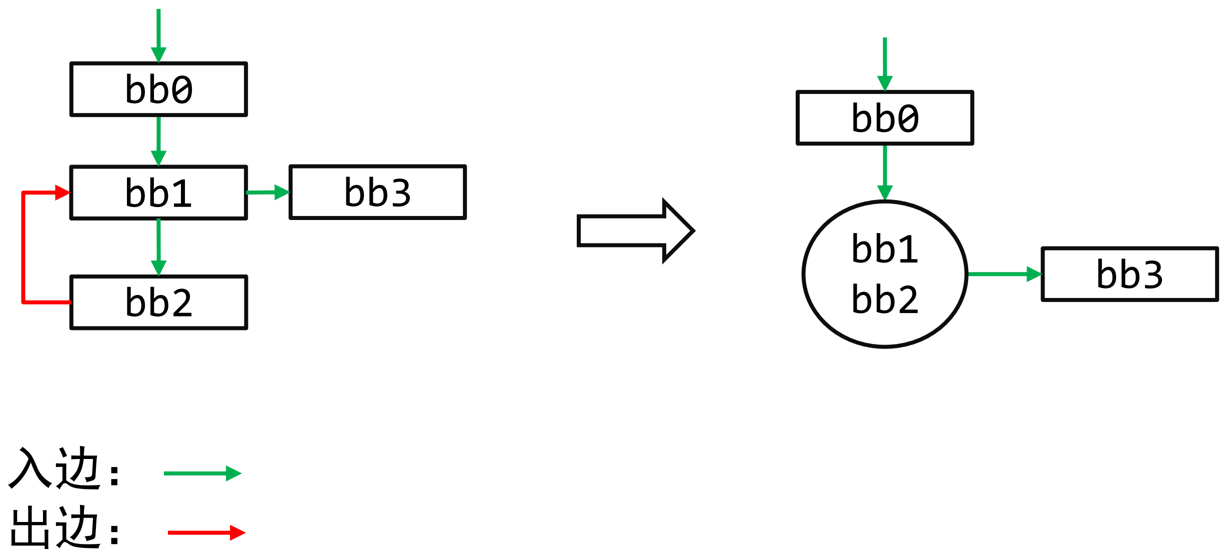
- 两个自然循环之间不相交：相切、嵌套、分离
- 两个首节点相同的自然循环：嵌套、相切
- 自然循环标识：每条返回边对应一个自然循环




bb3->bb1：1-2-3
bb6->bb5：5-6
bb7->bb1：1-2-4-5-6-7

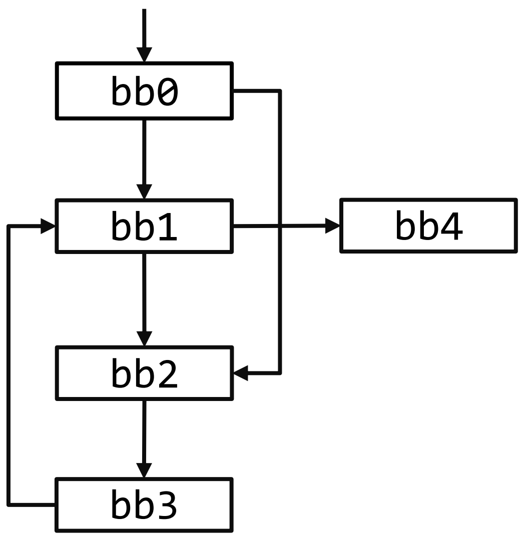
# 可规约控制流图：Reducible CFG

- 可规约CFG的所有循环都是自然循环
- 边可以分为前进边和返回边两个不交集=>可以缩环

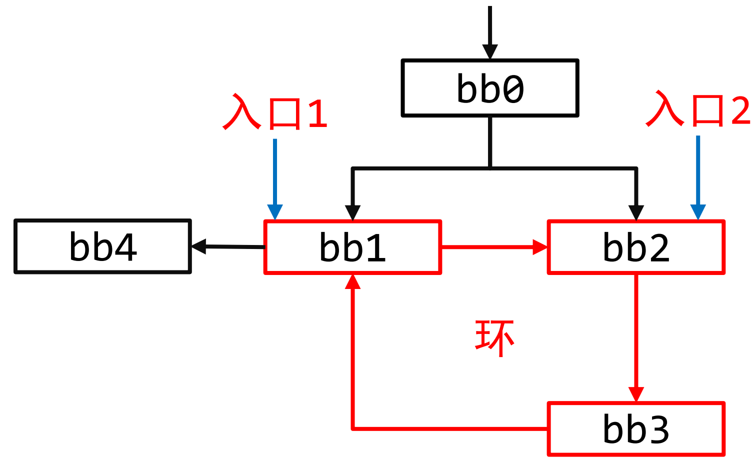


# 不可规约控制流图

- 无法确定循环入口和返回边




非自然循环



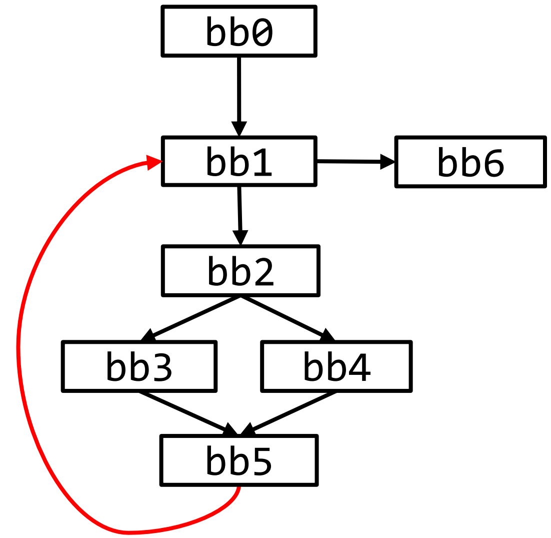

同态图
isomorphic

# 自然循环检测：基于支配关系

1） 遍历CFG=>支配关系矩阵

2） 比对图邻接表=>检测返回边

3） 识别每一条回边对应的环




| | bb0 | bb1 | bb2 | bb3 | bb4 | bb5 | bb6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| bb0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| bb4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| bb5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| bb6 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

支配关系矩阵

AND

| | bb0 | bb1 | bb2 | bb3 | bb4 | bb5 | bb6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| bb0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| bb2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| bb3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| bb4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| bb5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

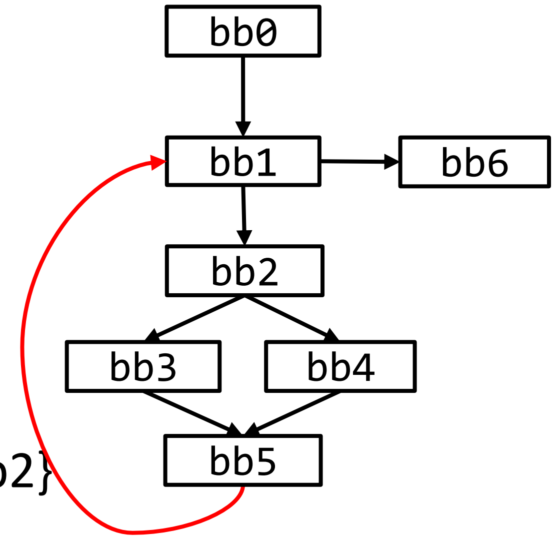
临接表

bb1支配bb5，存在边bb5->bb1

# 自然循环检测：基于支配关系

3) 识别每一条回边对应的环

- 初始化：S={bb1, bb5}
- 到达bb5且bb1支配：S={bb1, bb5, bb3, bb4}
- 到达bb3且bb1支配：S={bb1, bb5, bb3, bb4, bb2}




| | bb0 | bb1 | bb2 | bb3 | bb4 | bb5 | bb6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| bb0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| bb4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| bb5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| bb6 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

支配关系矩阵

AND

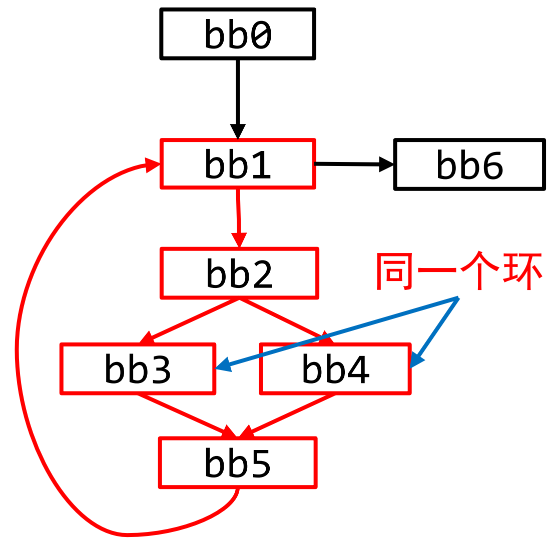
| | bb0 | bb1 | bb2 | bb3 | bb4 | bb5 | bb6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| bb0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| bb2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| bb3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| bb4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| bb5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| bb6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

临接表

bb1支配bb5，存在边bb5->bb1

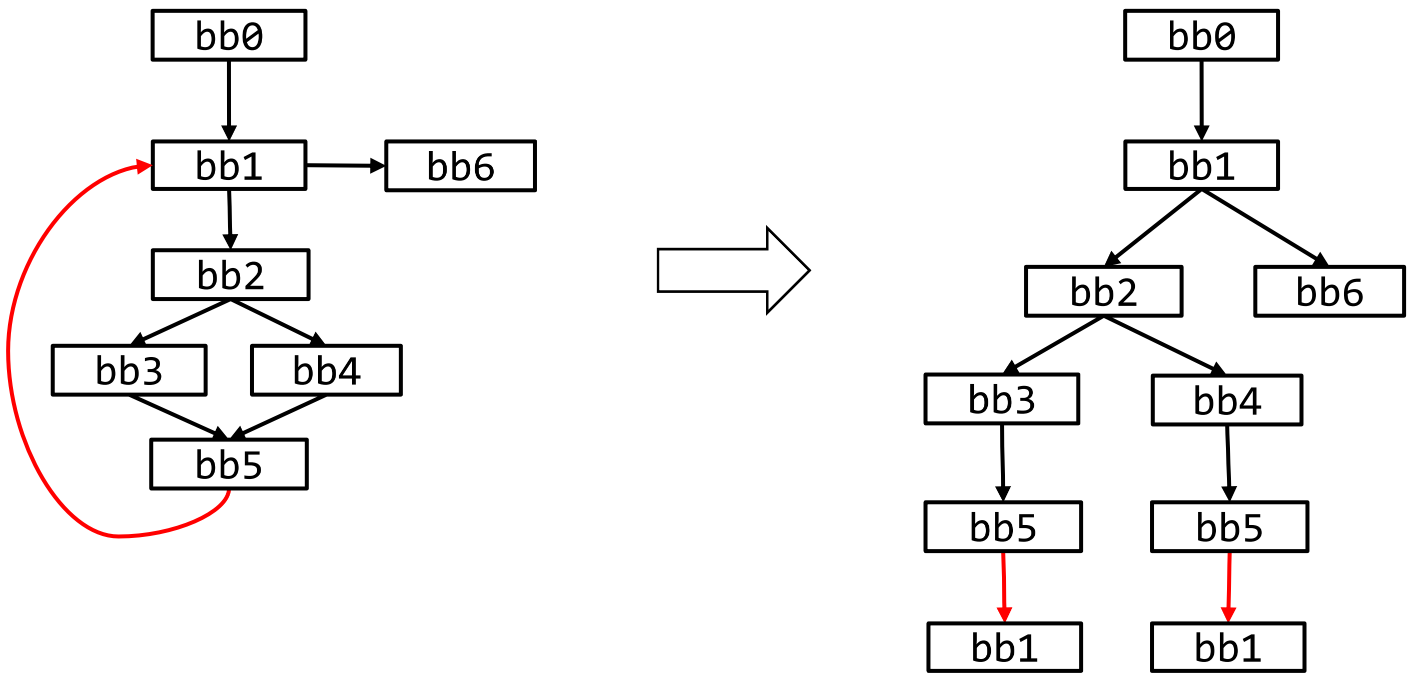
# 自然循环检测：深度优先搜索

```
stack s;
Visit(v) {
    s.push(v);
    for each w in OUT(v) {
        if s.contains(w) { //找到回边
            AddLoopback(w,v);
        } else {
            Visit(w);
        }
    }
    s.pop()
}
AddLoopback(v,w) {
    new = CreateLoop(top n items of s until w);
    old = Findloop(v, w)
    merge(old,new)
}
```

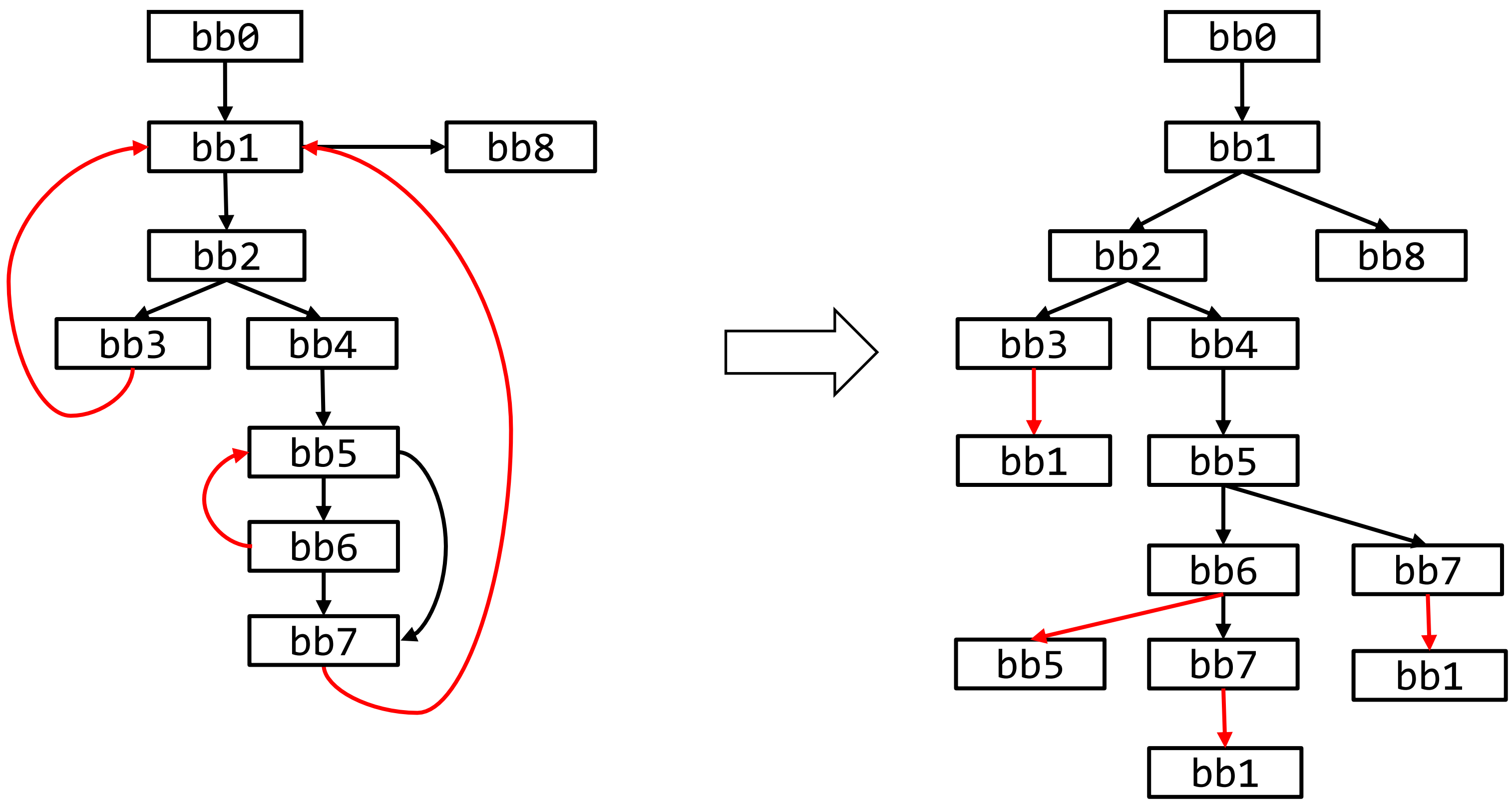


# 原理分析

- 找出到达每一个点的所有可能路径
- 基于该路径亦可计算支配树和支配边界



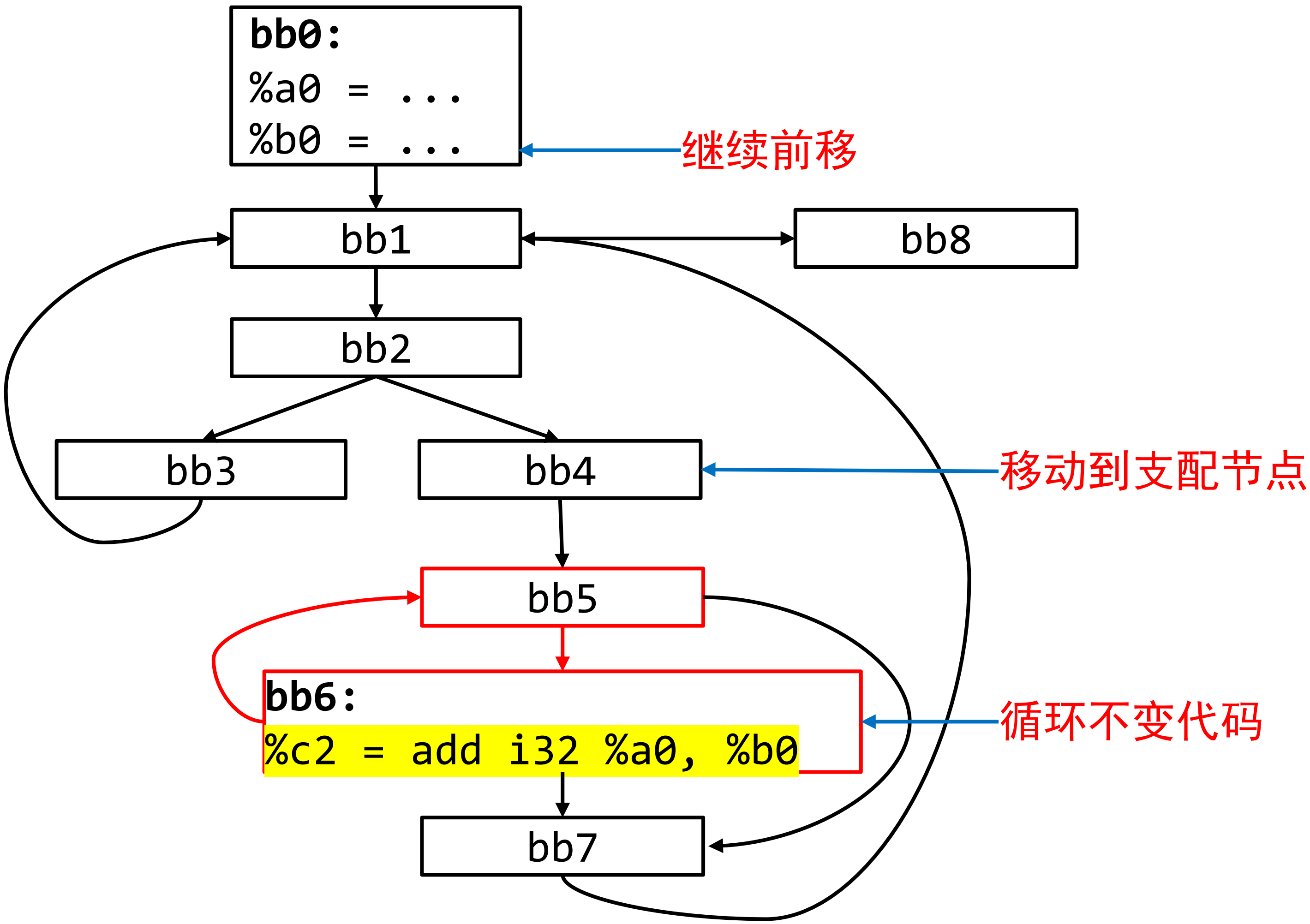
# 更多案例



bb0
bb1
bb8
bb2
bb3
bb4
bb5
bb6
bb7
bb0
bb1
bb2
bb8
bb3
bb4
bb1
bb5
bb6
bb7
bb5
bb7
bb1
bb1

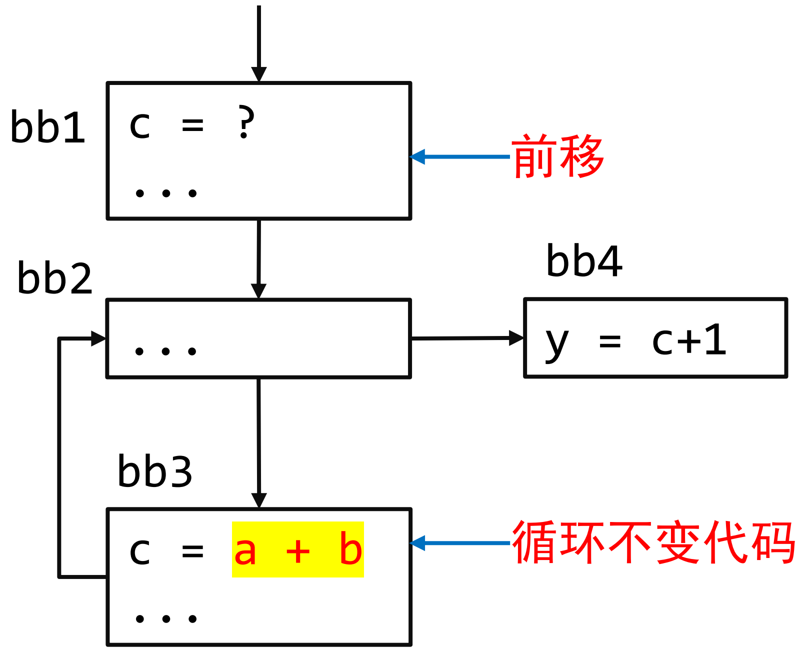
# 前移位置

- 单层循环：前移到最近的支配节点
- 多层循环：前移至不能移动为止

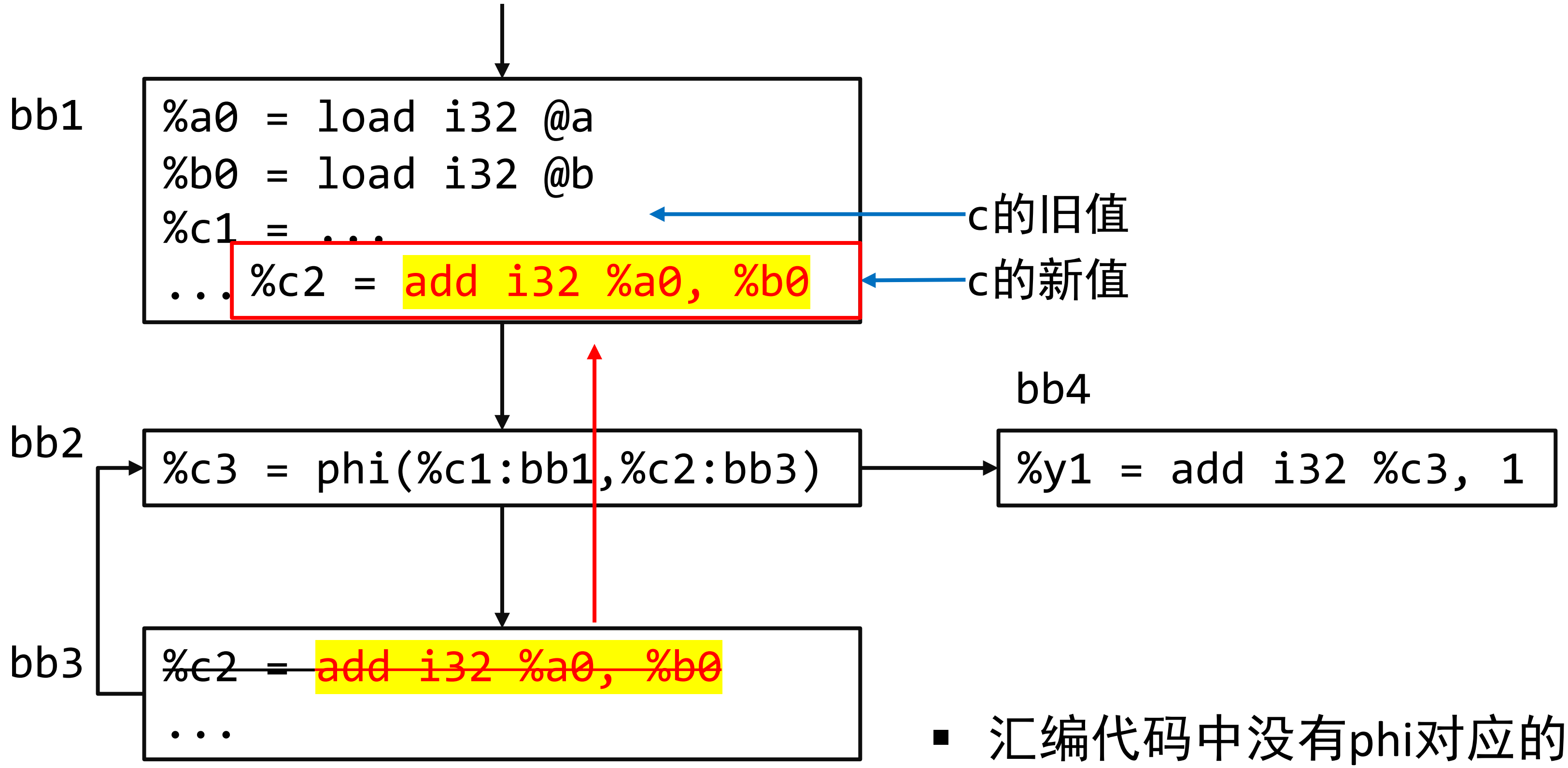


# 可能会有副作用？

- 如未进入循环，会错误修改x的值



# SSA形式会有副作用吗？




- 汇编代码中没有phi对应的指令
- 翻译汇编前用store替代phi

# 归纳变量

- 变量x的值每轮循环增加固定值，则称x为归纳变量
  - 基本归纳变量x
  - 依赖归纳变量y = ax + b，a和b为常量

```
for i in 1..100 {
    y = 10 * i + 1;
    s[i] = y;
}
```

⇨

```
t1 = 1;
for i in 1..100 {
    t1 = t1 + 10;
    s[i] = t1;
}
```

```
let i:int = 1;
while(i<100) {
    y = 10 * i + 1;
    s[i] = y;
    i = i + 1;
}
```

⇨

```
let i:int = 1;
let t1 = 1;
while(i<100) {
    y = t1 + 10;
    s[i] = y;
    i = i + 1;
}
```

# 基于IR识别归纳变量

bb0

```
%i0 = load i32* @i
br label %bb1
```

bb1

```
%i1 = phi i32 [%i0 %bb1], [%i2:%bb2]
%r0 = icmp slt i32 %i1, 100
br i1 %r0 label %bb2, label %bb3
```

bb3

bb2

```
%r1 = mul i32 %i1, 10
%y0 = add i32 %r1, 1
%p0 = getelementptr [n x i32],
      [n x i32]* %s, i32 0, i32 0
store i32 %y0, %p0
%i2 = add i32 %i1, 1
```

依赖归纳变量

翻译汇编代码后可能还有归纳变量

基本归纳变量

# 标量替换：Scala Replacement

- 使用标量替换循环内部的频繁内存读写操作
- 在IR层自动替换R[i][j]的难点？R[i][j]和i可能是alias

```
for i in 0..rowA {
    for j in 0..colB {
        for k in 0..colA {
            R[i][j] = R[i][j] + A[i][k]*B[k][j];
        }
    }
}
```

每次从内存或cache读写R[i][j]会影响性能

⇩

```
for i in 0..rowA {
    for j in 0..colB {
        t = R[i][j];
        for k in 0..colA {
            t = t + A[i][k]*B[k][j];
        }
        R[i][j] = t;
    }
}
```

使用临时变量替换，可直接使用寄存器中的值

# 四、更多优化思路

# 降低分支预测的代价

- Loop unswitching：外提（减少）循化内条件判断
- Loop unroll：将循环体复制多遍

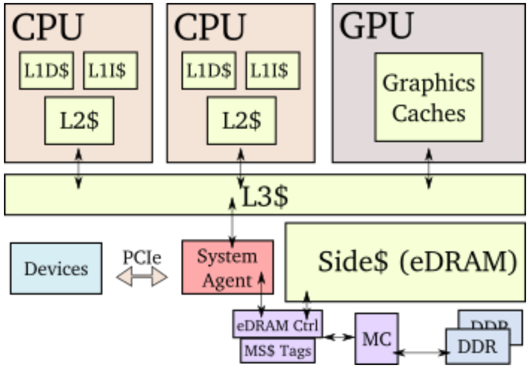
```
void testbrpred(int* a, int len,  int x){
    unsigned long long cycle = rdtsc();
    while(len>-1){
        len-=1;
        if(a[len]>x) ;
        else ;
    }
    unsigned long long cycl = rdtsc()- cycle;
    printf("x = %d, cycles = %d\n", x, cycl);
}

int main(int argc, char** argv){
    int a[1000];
    srand(time(NULL));
    for(int i = 0; i< 1000; i++) a[i] = rand()%1000;
    testbrpred(a,1000,100);
    testbrpred(a,1000,300);
    testbrpred(a,1000,500);
    testbrpred(a,1000,700);
    testbrpred(a,1000,900);
}
```

```
x = 100, cycles = 23630
x = 300, cycles = 47175
x = 500, cycles = 63744
x = 700, cycles = 49642
x = 900, cycles = 26301
```

# 面向访存的优化：Cache

- Cache访问速度优于内存访问速度
- 最小单位是cache line
- 通过降低cache miss提升代码性能

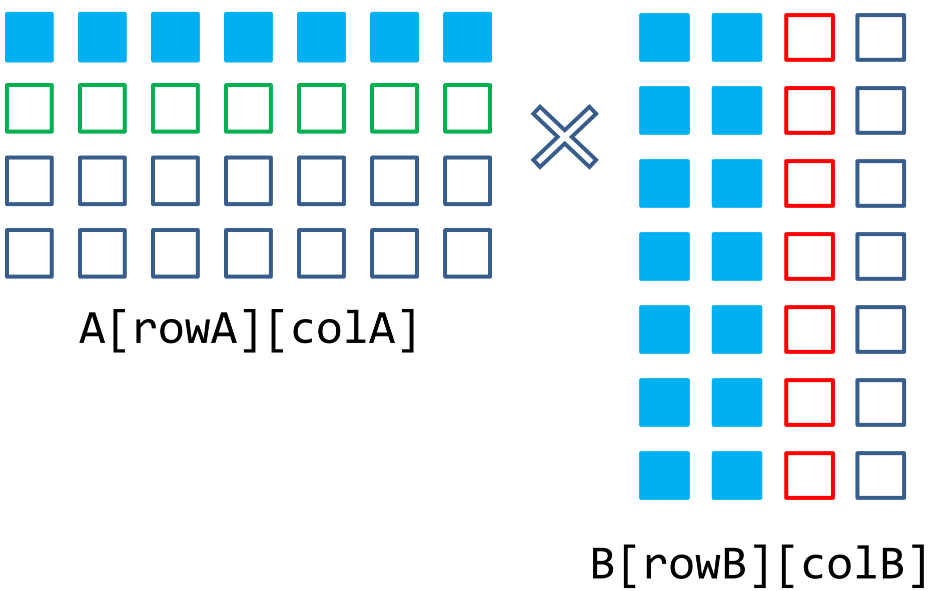



| index | valid | tag | data |
|---|---|---|---|
| 001 | 0x... | | 64 B |
| 002 | 0x... | | 64 B |
| 003 | 0x... | | 64 B |
| ... | 0x... | | 64 B |

| cache | size | line | speed |
|---|---|---|---|
| L1 | 32 KB + 32 KB | 64 B | 4-5 cycles |
| L2 | 256 KB | 64 B | 12 cycles |
| L3 | up to 2 MB | 64 B | 30-50 cycles |

# 矩阵乘法：循环分块

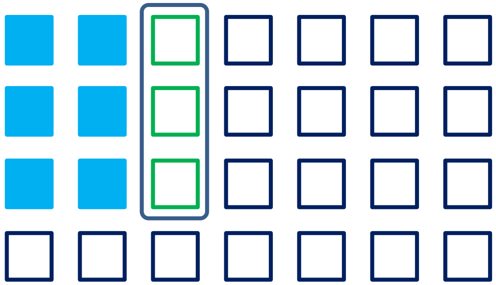
```
for i in 0..rowA {
    for j in 0..colB {
        for k in 0..colA {
            R[i][j] = R[i][j] + A[i][k]*B[k][j];
        }
    }
}
```



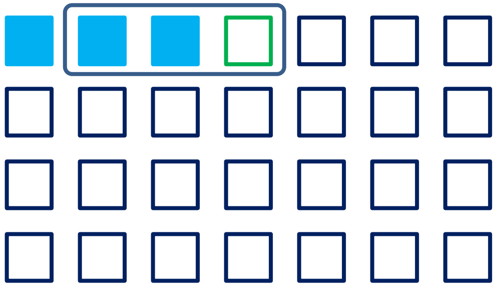

- 假设：
  - 已经算完R[0][0]..R[0][j]
  - B[][0]..B[][j]已经在cache中
- 先算R[0][j+1]还是R[1][0]?

# 循环交换

```
for i in 1..m-2 {
    for j in 0..n-1 {
        R[i][j] = A[i-1][j] + A[i][j] + A[i+1][j];
    }
}
```



```
for j in 0..n-1 {
    for i in 1..m-2 {
        R[i][j] = A[i-1][j] + A[i][j] + A[i+1][j];
    }
}
```



# 循环合并和拆分

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
}
for i in 0..n-1 {
    R2[i] = A[i] + B[i];
}
```

合并

fusion

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
    R2[i] = A[i] + B[i];
}
```

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
    R2[i] = C[i] + D[i];
}
```

拆分

distribution

```
for i in 0..n-1 {
    R1[i] = A[i] + B[i];
}
for i in 0..n-1 {
    R2[i] = C[i] + D[i];
}
```

可能对寄存器分配有利：减少冲突关系

# 练习

- 找出LLVM的过程内优化功能并测试分析其效果
  - 链接：https://llvm.org/docs/Passes.html

- Transform Passes
  - `-adce`: Aggressive Dead Code Elimination
  - `-always-inline`: Inliner for `always_inline` functions
  - `-argpromotion`: Promote ‘by reference’ arguments to scalars
  - `-bb-vectorize`: Basic-Block Vectorization
  - `-block-placement`: Profile Guided Basic Block Placement
  - `-break-crit-edges`: Break critical edges in CFG
  - `-codegenprepare`: Optimize for code generation
  - `-constmerge`: Merge Duplicate Global Constants
  - `-dce`: Dead Code Elimination

```
#: opt -dce -S in.ll -o out.ll
```