山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

编译原理

第十章 代码优化

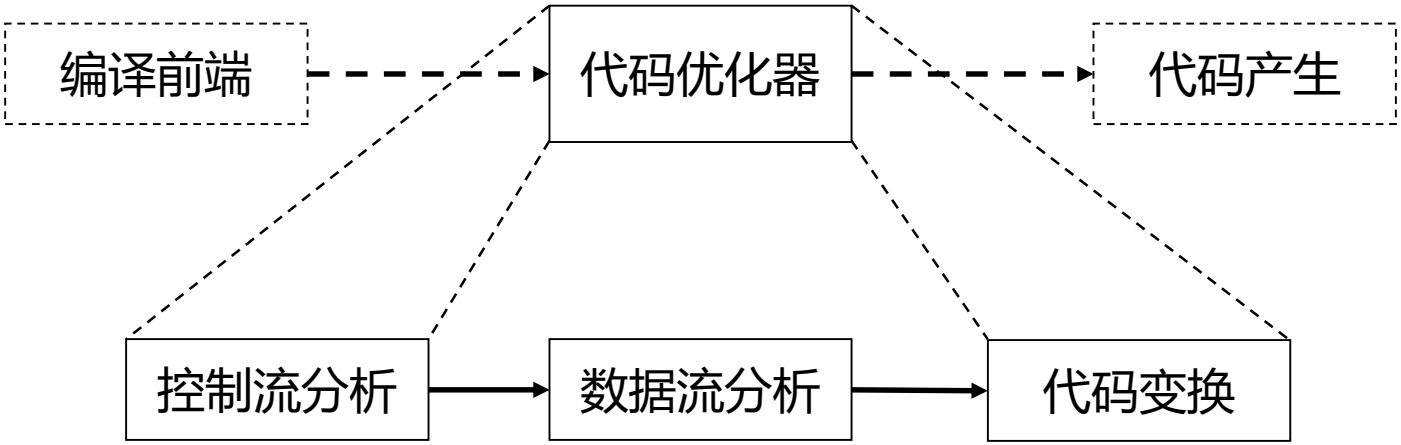
授 课 教 师 ：郑艳伟
手 机 ：18614002860（微信同号）
邮 箱 ：zhengyw@sdu.edu.cn

第十章 代码优化

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

第十章 代码优化

- 优化：指对程序进行等价变换，使得从变换后的程序出发，能生成更有效的目标代码。
  - 前端优化：在目标代码生成以前，对语法分析后的目标代码进行优化。
  - 后端优化：在生成目标代码时进行优化，依赖于具体的计算机指令系统。



第十章 代码优化

- 10.1 概述
- 10.2 局部优化
  - 10.2.1 基本块及流图
  - 10.2.2 基本块的DAG表示及其应用
- 10.3 循环优化
  - 10.3.1 代码外提
  - 10.3.2 强度削弱
  - 10.3.3 删除归纳变量
- 10.4 数据流分析
  - 10.4.1 任意路径数据流分析
  - 10.4.2 全路径数据流分析
  - 10.4.3 数据流问题的分类
  - 10.4.4 其它主要数据流问题
  - 10.4.5 利用数据流信息进行全局优化

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.1 概述

优化原则

- 等价原则：经过优化的代码不应改变程序运行的结果。
- 有效原则：使优化后所产生的目标代码运行时间较短，占用的存储空间较小。
- 合算原则：应尽可能以较低的代价取得较好的优化效果。

10.1 概述

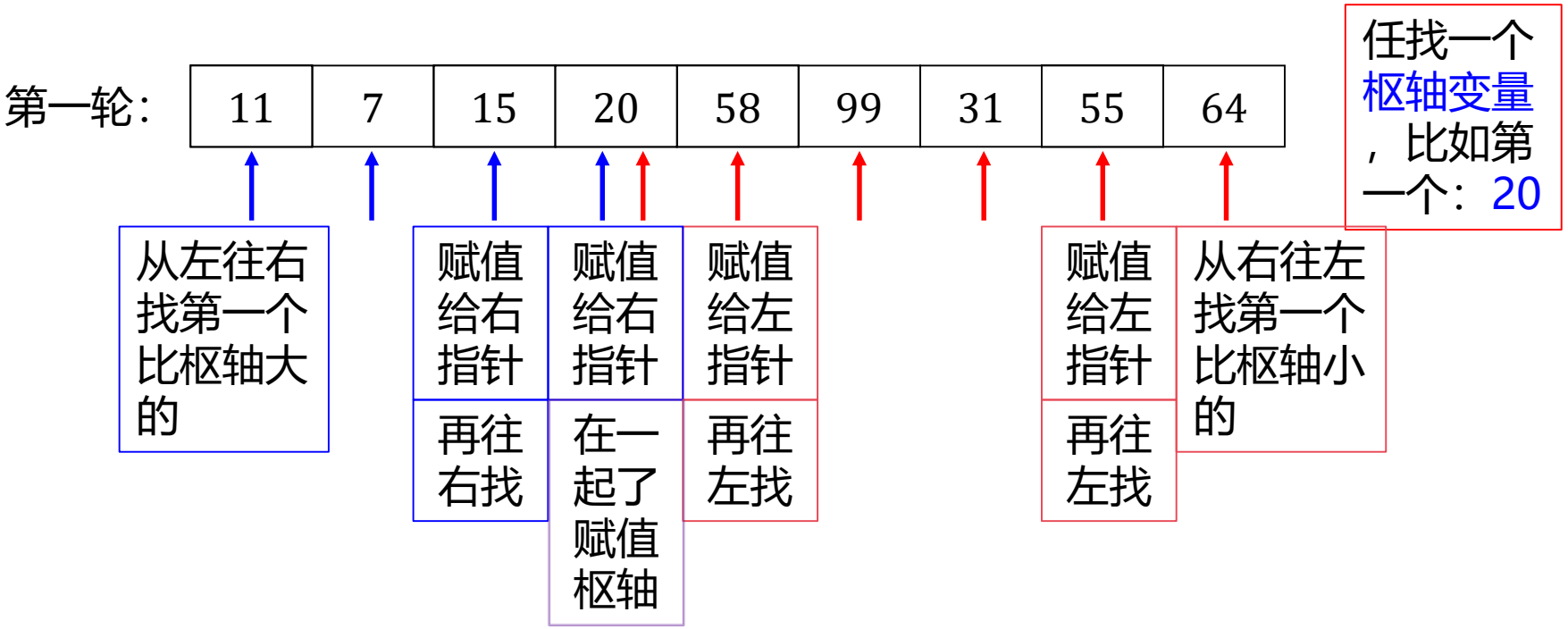
优化环节

- 源代码级别：选择适当的算法，比如排序算法中，“快排”比“插排”快。
- 语义动作级别：
  - 生成更高效的中间代码。
  - 加入对优化的预备工作。如循环的开头和结尾处打上标记，方便控制流和数据流分析；代码分叉和交汇处打上标记，方便识别流程图中的直接前驱和直接后继。
- 中间代码级别：安排专门的优化阶段。
- 目标代码级别：考虑如何有效的利用寄存器，如果选择指令，以及进行窥孔优化等。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.1 概述

【例10.1】真·快排

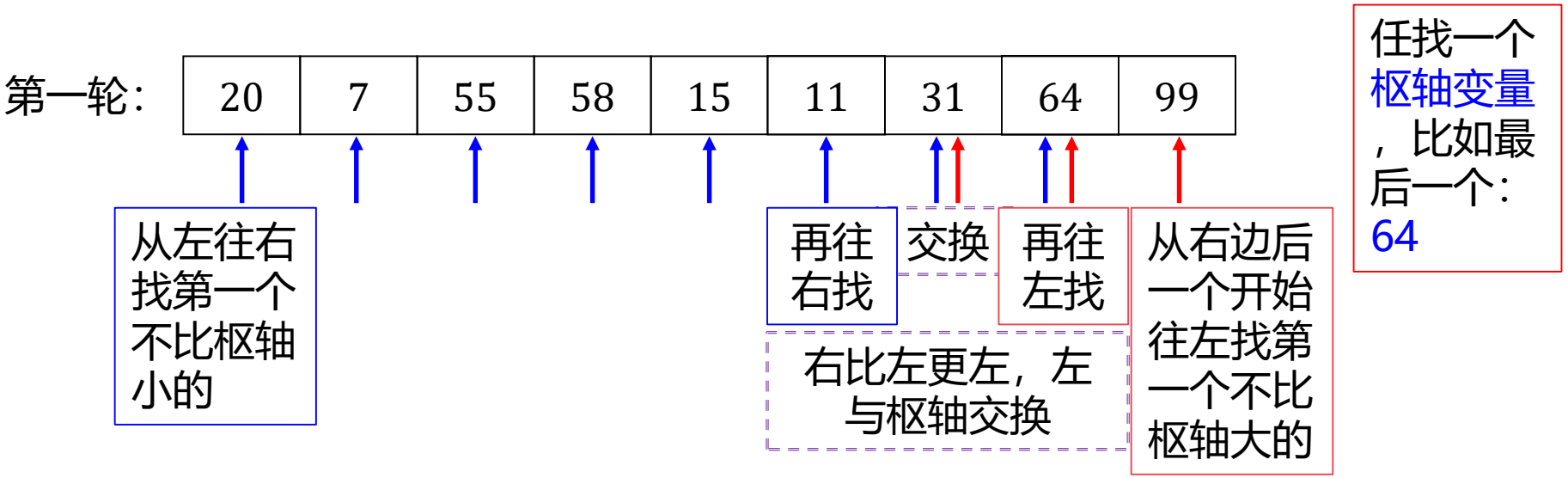


分成左右两部分分别快排

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

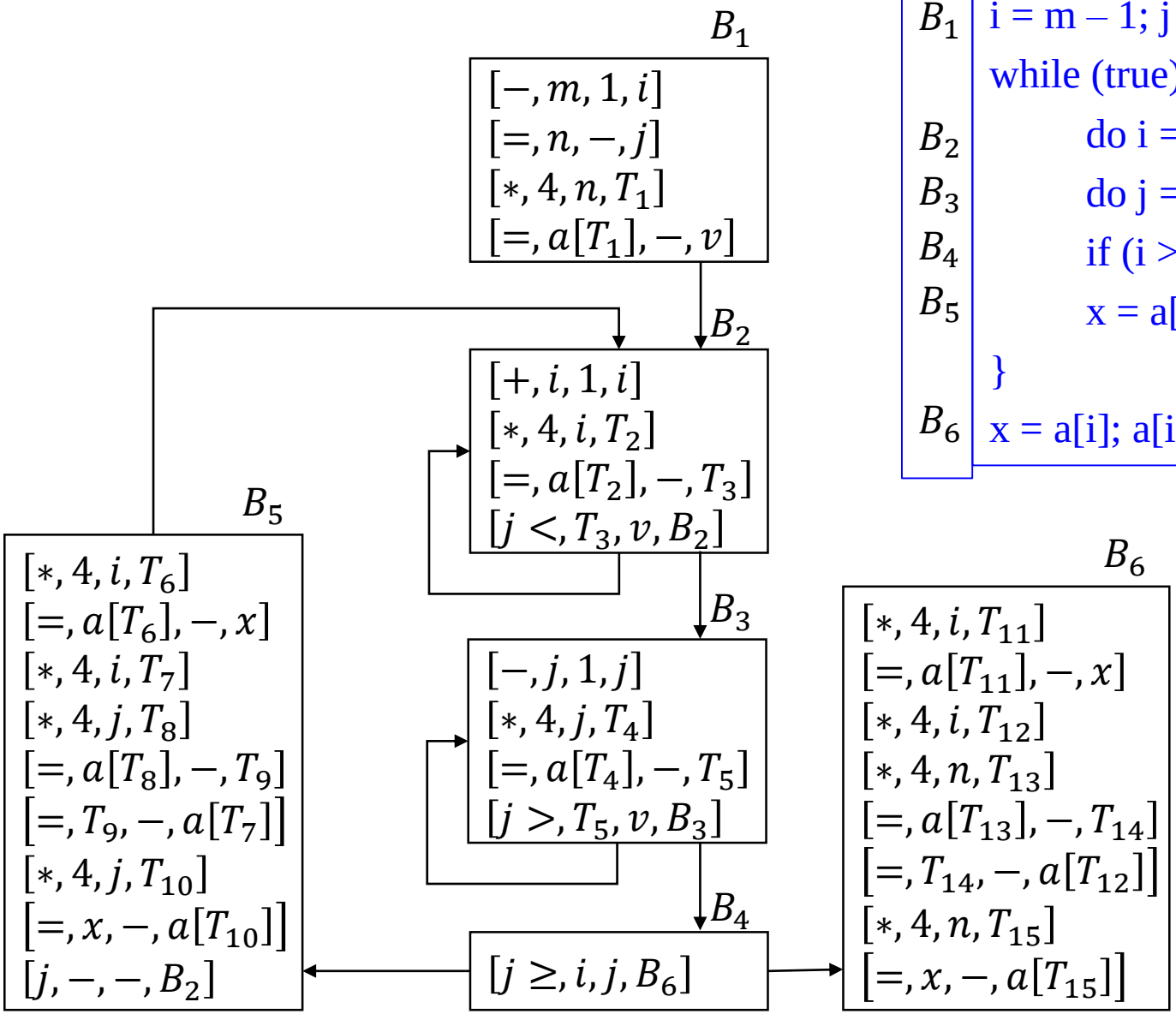
10.1 概述

【例10.1】本章快排



```
void QuickSort(int m, int n) // 需要快排的数组区间下标
{
    int i, j, v, x; // 左、右、枢轴下标和临时变量
    if (n <= m) return;
    i = m – 1; j = n; v = a[n];
    while (true) {
        do i = i + 1; while (a[i] < v);          // 从左往右找
        do j = j – 1; while (a[j] > v);          // 从右往左找
        if (i >= j) break;                       // 跳出循环时，左比右靠右了
        x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;         // 左右交换
    }
    x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;             // 左与最后的枢轴变量交换
    QuickSort(m, j); QuickSort(i + 1, n);        // 分组快排
}
```

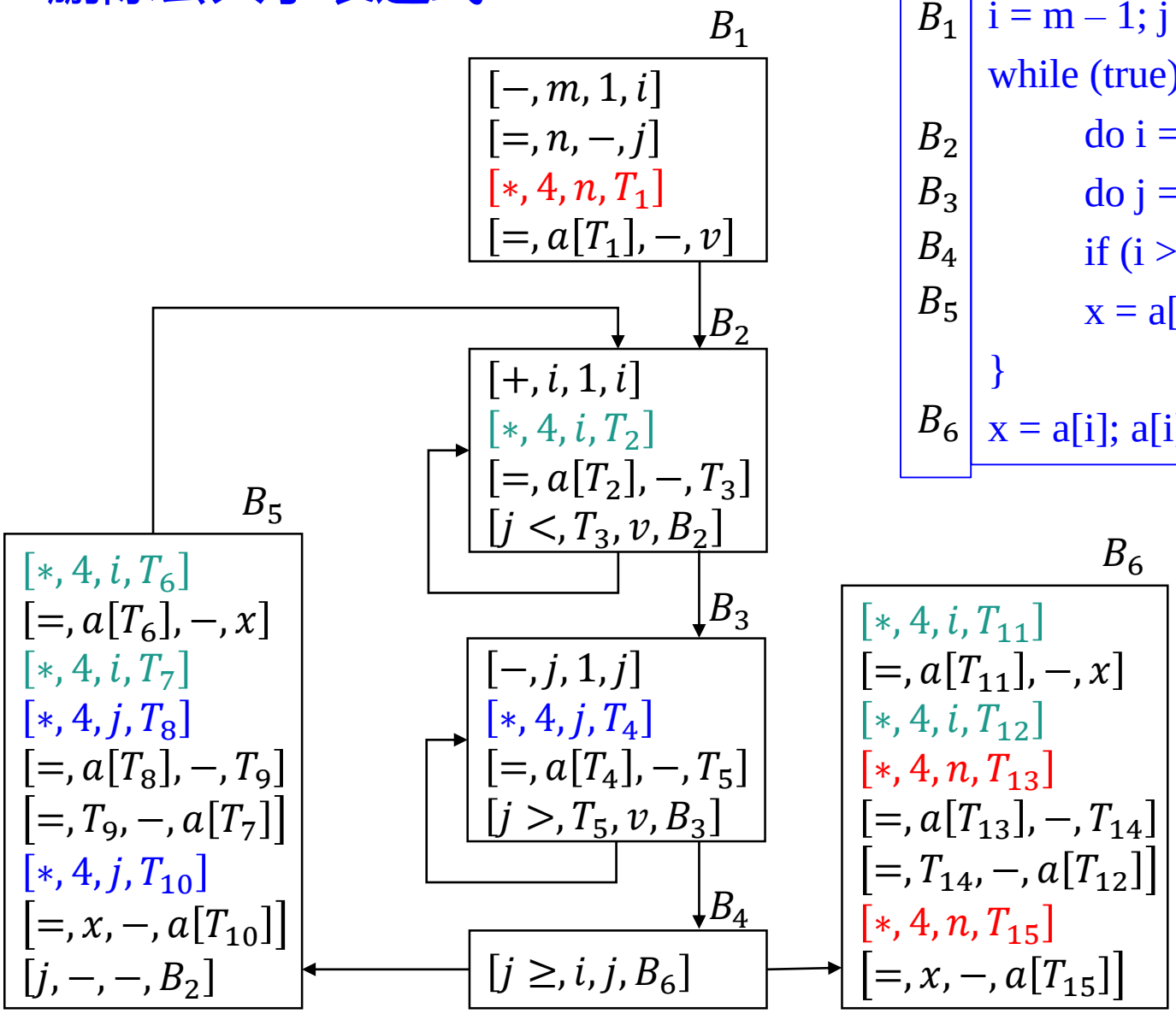
山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn



B_1	i = m – 1; j = n; v = a[n];
	while (true) {
B_2	do i = i + 1; while (a[i] < v);
B_3	do j = j – 1; while (a[j] > v);
B_4	if (i >= j) break;
B_5	x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;
	}
B_6	x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

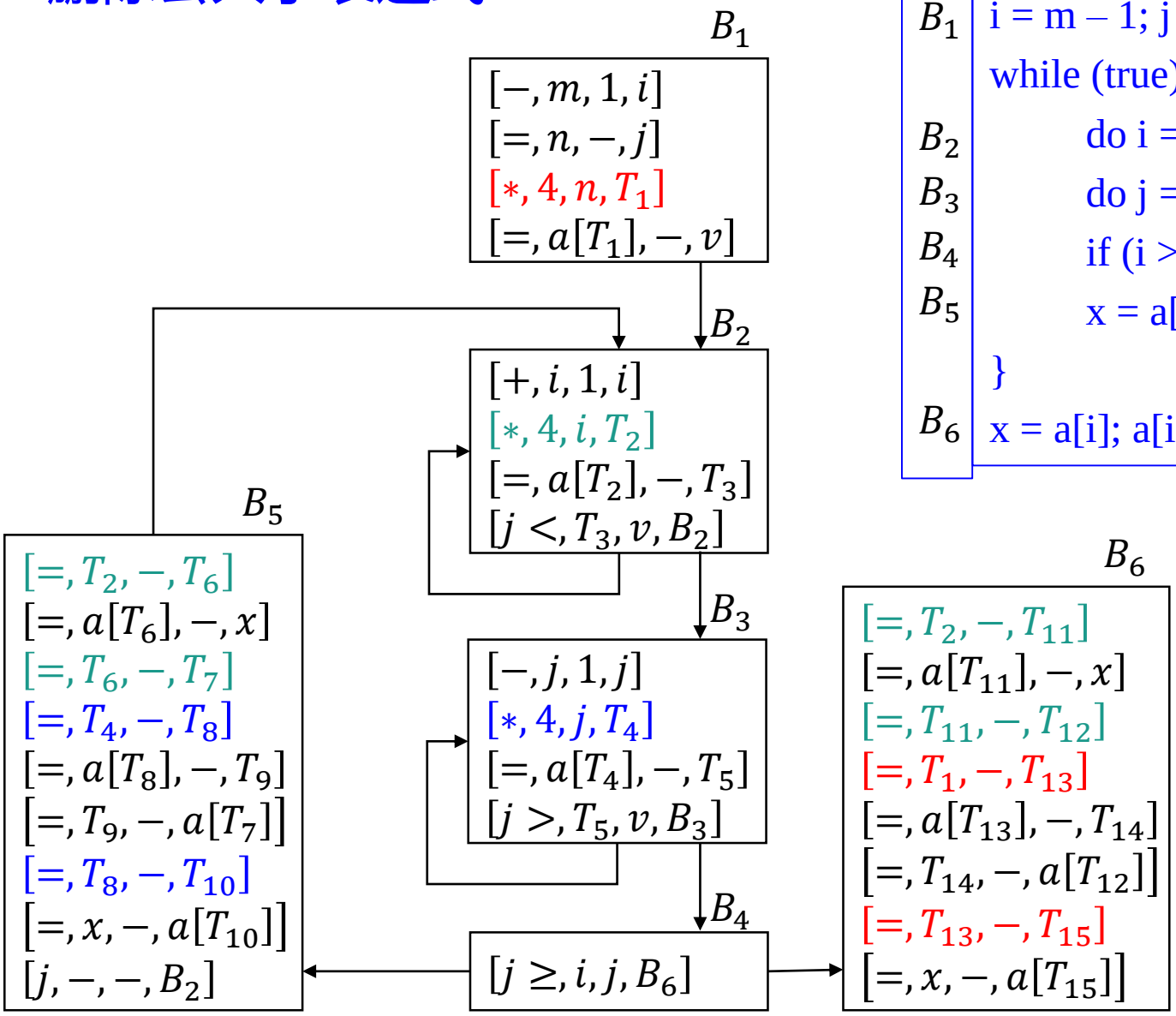
删除公共子表达式




```
B1  i = m – 1; j = n; v = a[n];
    while (true) {
B2      do i = i + 1; while (a[i] < v);
B3      do j = j – 1; while (a[j] > v);
B4      if (i >= j) break;
B5      x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;
    }
B6  x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;
```

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

删除公共子表达式

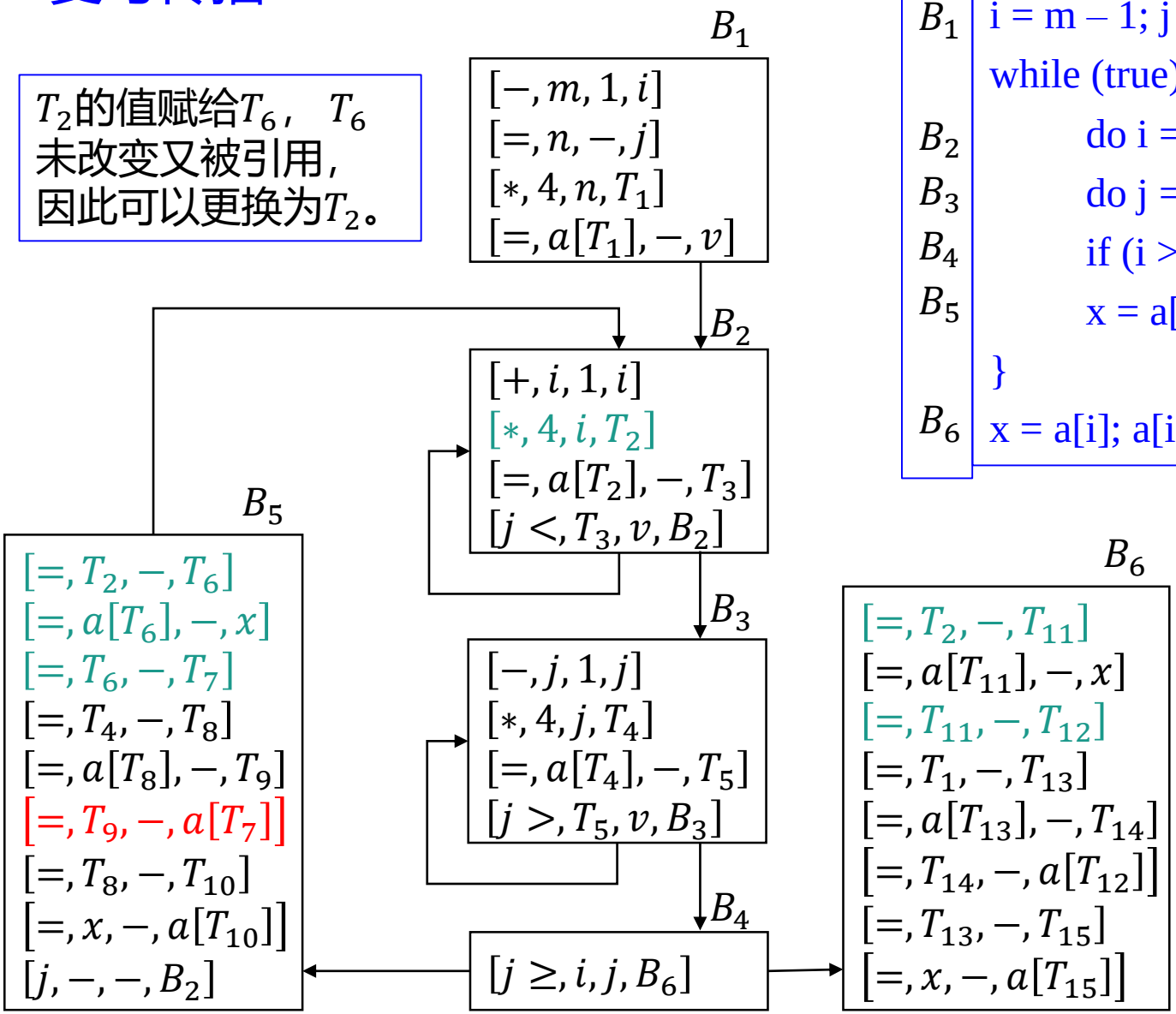


B_1	i = m – 1; j = n; v = a[n];
	while (true) {
B_2	do i = i + 1; while (a[i] < v);
B_3	do j = j – 1; while (a[j] > v);
B_4	if (i >= j) break;
B_5	x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;
	}
B_6	x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

复写传播

T_2的值赋给T_6，T_6未改变又被引用，因此可以更换为T_2。

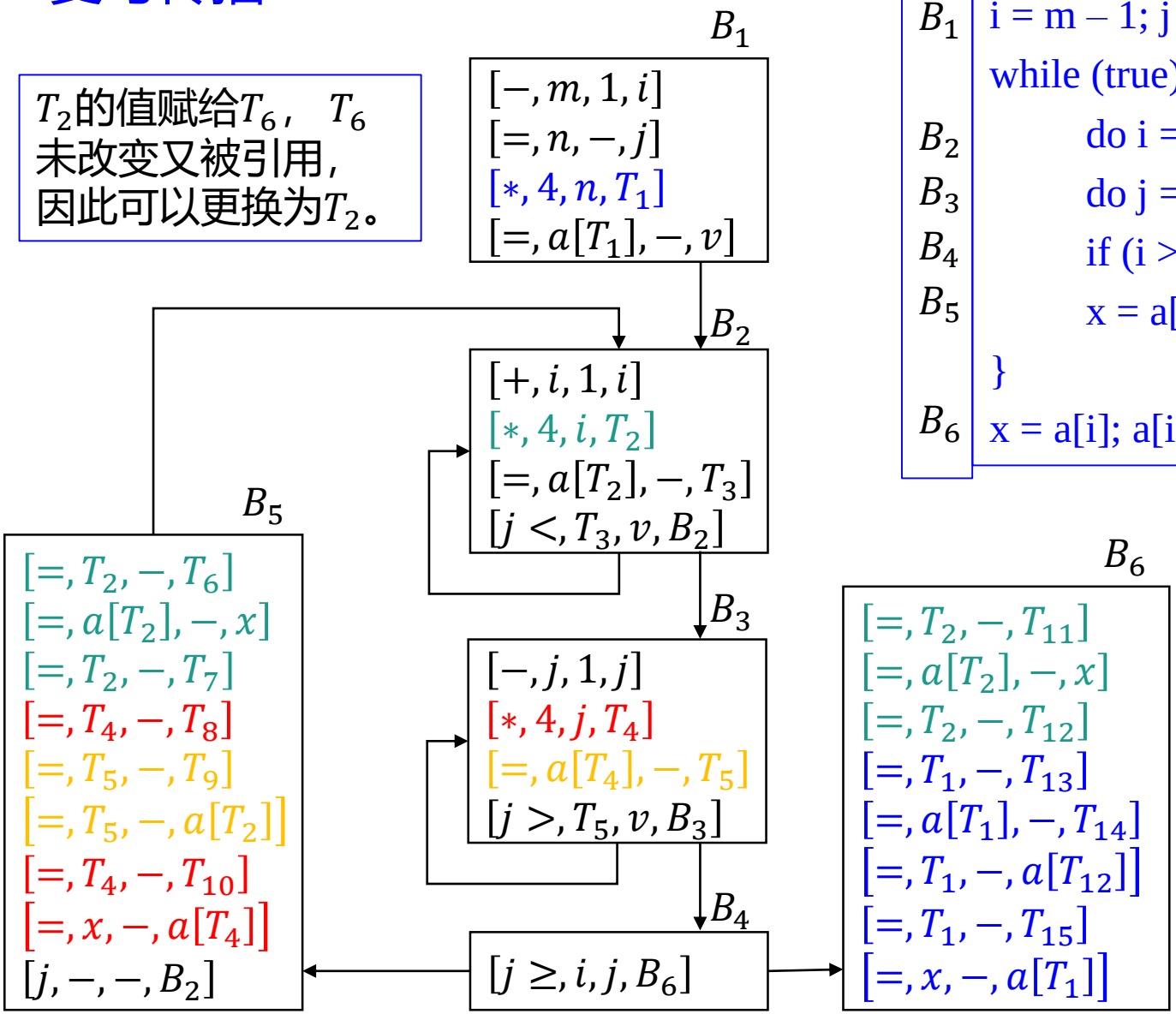



```
B1  i = m – 1; j = n; v = a[n];
    while (true) {
B2      do i = i + 1; while (a[i] < v);
B3      do j = j – 1; while (a[j] > v);
B4      if (i >= j) break;
B5      x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;
    }
B6  x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;
```

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

复写传播

T_2的值赋给T_6，T_6未改变又被引用，因此可以更换为T_2。

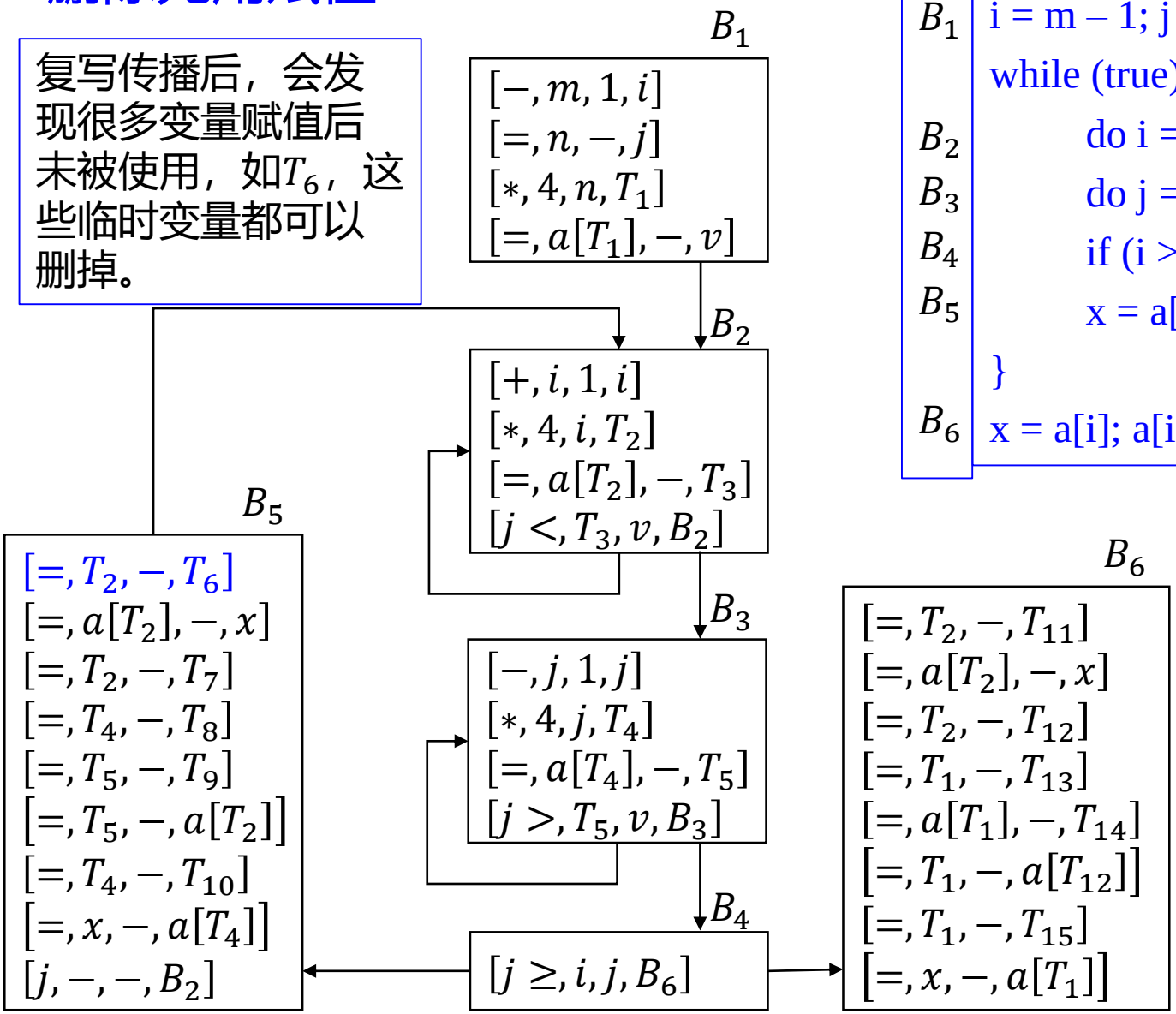



```
B1  i = m – 1; j = n; v = a[n];
    while (true) {
B2      do i = i + 1; while (a[i] < v);
B3      do j = j – 1; while (a[j] > v);
B4      if (i >= j) break;
B5      x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;
    }
B6  x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;
```

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

删除无用赋值

复写传播后，会发现很多变量赋值后未被使用，如T_6，这些临时变量都可以删掉。

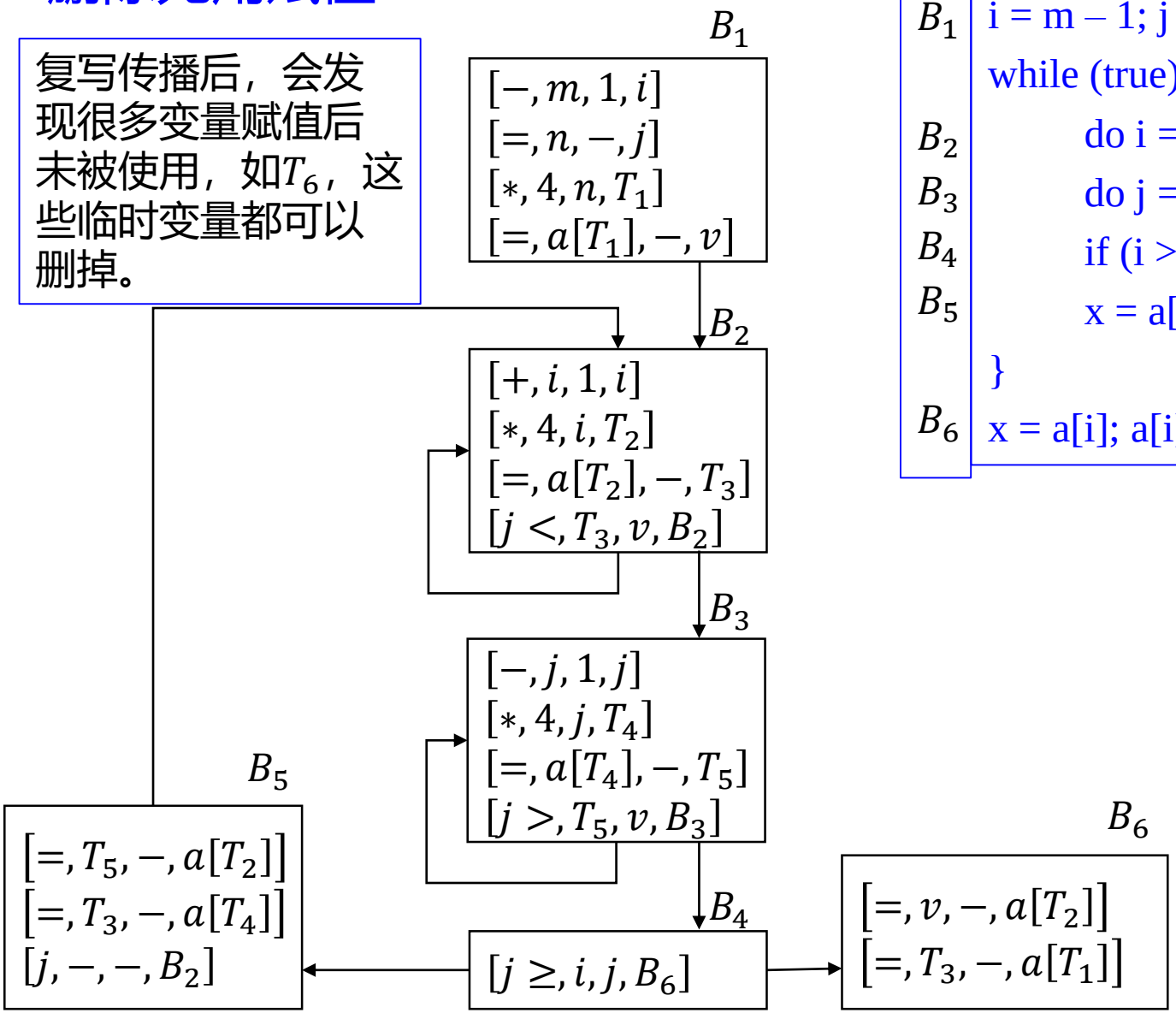



```
B1  i = m – 1; j = n; v = a[n];
    while (true) {
B2      do i = i + 1; while (a[i] < v);
B3      do j = j – 1; while (a[j] > v);
B4      if (i >= j) break;
B5      x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;
    }
B6  x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;
```

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

删除无用赋值

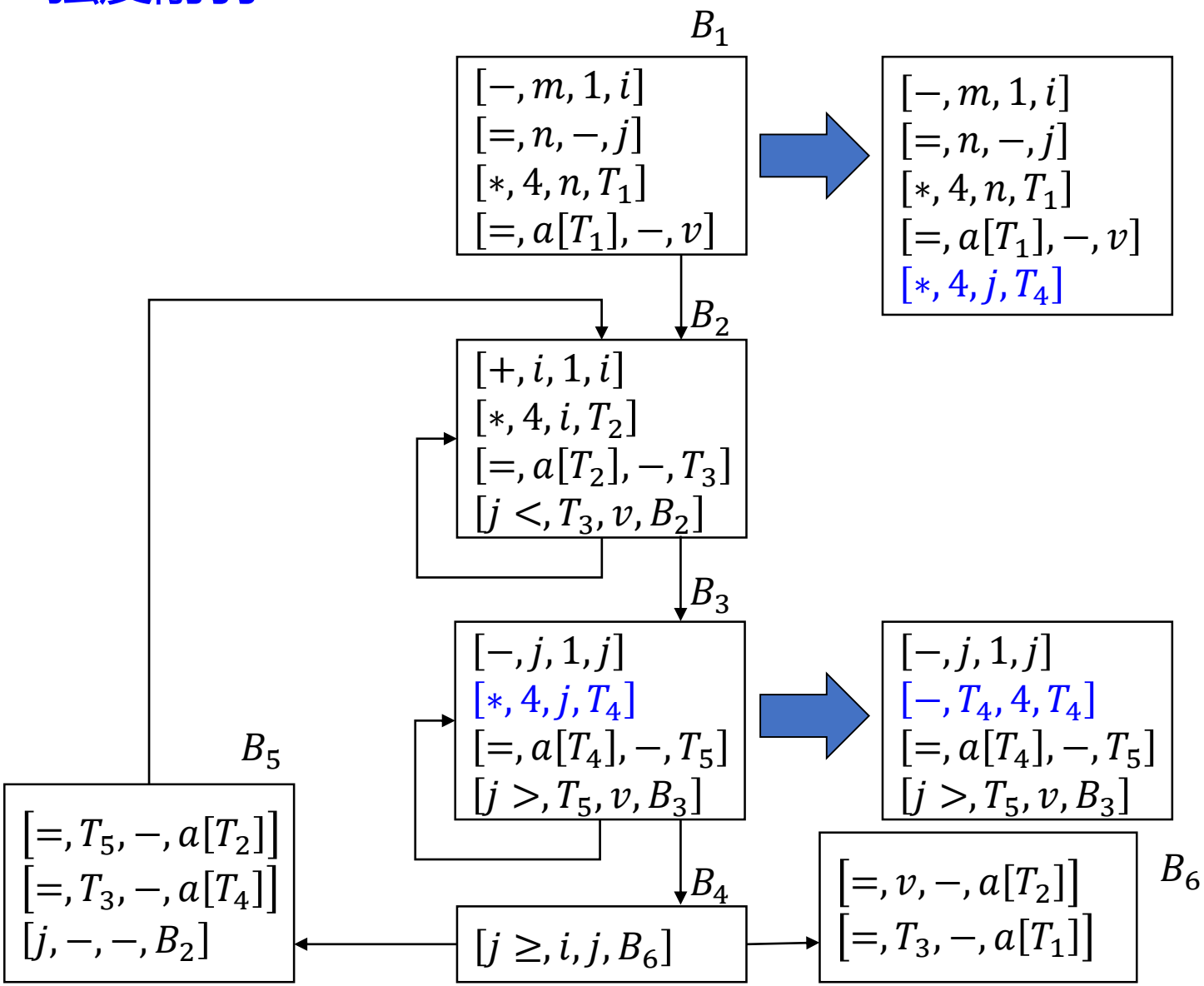
复写传播后，会发现很多变量赋值后未被使用，如T_6，这些临时变量都可以删掉。



B_1	i = m – 1; j = n; v = a[n];
	while (true) {
B_2	do i = i + 1; while (a[i] < v);
B_3	do j = j – 1; while (a[j] > v);
B_4	if (i >= j) break;
B_5	x = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = x;
	}
B_6	x = a[i]; a[i] = a[n]; a[n] = x;

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

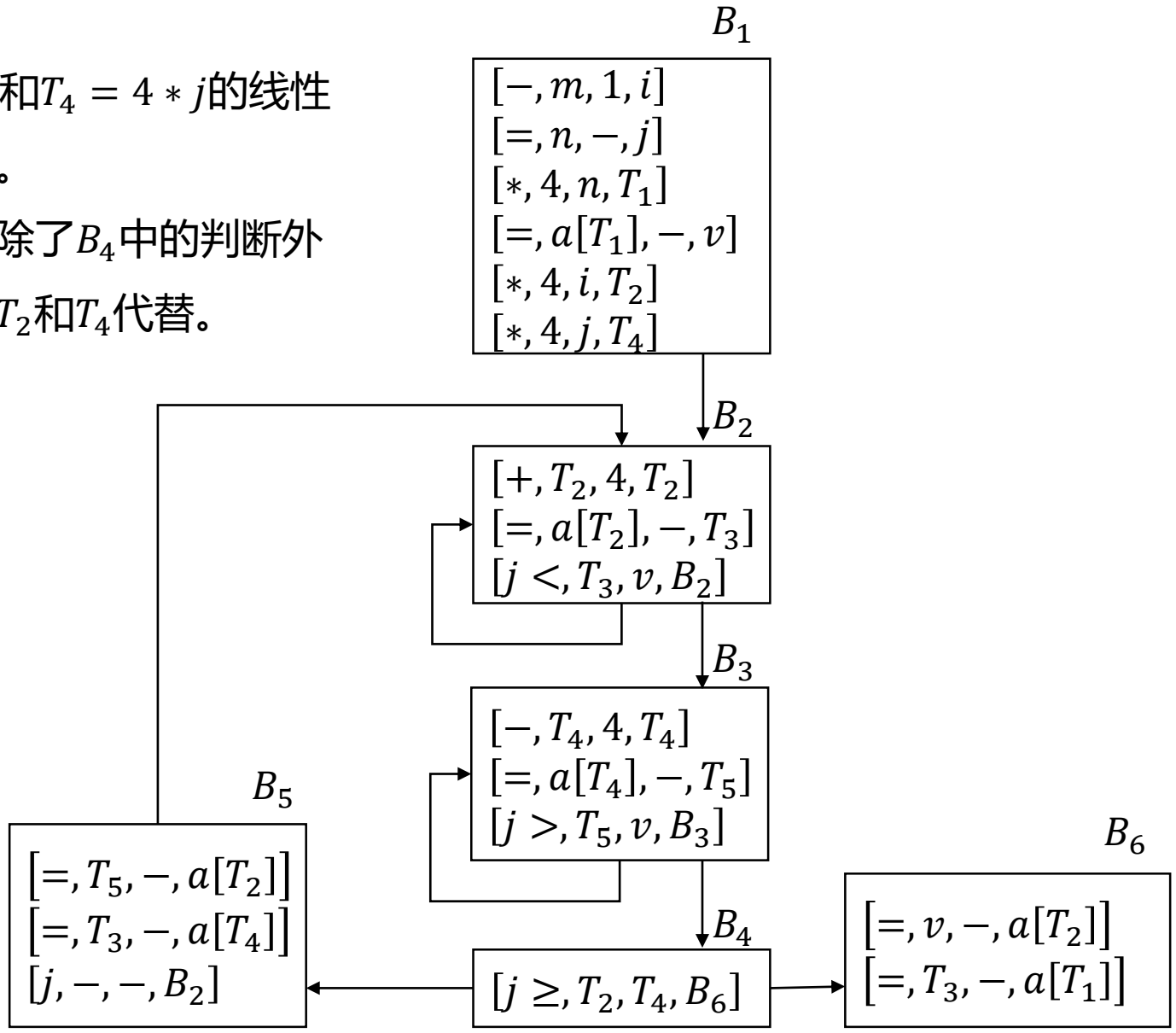
强度削弱



山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

删除归纳变量

- 线性关系$T_2 = 4 * i$和$T_4 = 4 * j$的线性关系称为归纳变量。
- 强度削弱后， i和j除了B_4中的判断外不再使用，可以用T_2和T_4代替。



第十章 代码优化

10.2.1 基本块及流图

- 基本块：指程序中一段顺序执行的语句序列，其中只有一个入口和一个出口，入口就是其中的第一条语句，出口是其中最后一条语句。

【例10.2】基本块举例

$$T_1 = a * a$$

$$T_2 = a * b$$

$$T_3 = 2 * T_2$$

$$T_4 = T_1 + T_2$$

$$T_5 = b * b$$

$$T_6 = T_4 + T_5$$

10.2.1 基本块及流图

- 如果一条三地址语句为$x = y + z$，则称对x定值并引用y和z。
- 基本块中的一个名字在程序中某个给定点是活跃的，指如果在程序中（包括本基本块或其它基本块），它的值在该点以后被引用。
- 局限于基本块范围内的优化称为基本块内的优化，或称为局部优化。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的划分算法

- 求出基本块入口语句，包括以下三种情况之一：
  - 程序的第一个语句；
  - 能由条件转移语句或无条件转移语句转移到的语句；
  - 紧跟在条件转移语句后面的语句。
- 基本块入口语句到以下语句之间部分构成一个基本块：
  - 后续的另一个入口语句（不含该入口语句）；
  - 一条转移语句（含该转移语句）；
  - 停止语句（含该停止语句）。
- 未被纳入任一基本块的语句，都是程序中控制流不能到达的语句，可以删除。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的划分算法

【例10.3】找出如下三地址语句基本块

(1) *read X*
(2) *read Y*
(3) $R = X \ mod \ Y$
(4) *if* $R = 0$ *goto* 8
(5) $X = Y$
(6) $Y = R$
(7) *goto* 3
(8) *write Y*
(9) *halt*

(1) *read X*
(2) *read Y*

(3) $R = X \ mod \ Y$
(4) *if* $R = 0$ *goto* 8

(5) $X = Y$
(6) $Y = R$
(7) *goto* 3

(8) *write Y*
(9) *halt*

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的优化

- 删除公共子表达式
- 删除无用赋值
- 合并已知量

$T_1 = 2$

…

$T_2 = 4 * T_1$ $\quad\quad$ $T_2 = 8$

- 临时变量改名

$T_1 = b + c$ $\quad\quad$ $S = b + c$

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的优化

- 交换语句位置

$T_1 = b + c$　　$T_2 = x + y$

$T_2 = x + y$　　$T_1 = b + c$

- 代数变换

$x = x + 0$　　// 可删除

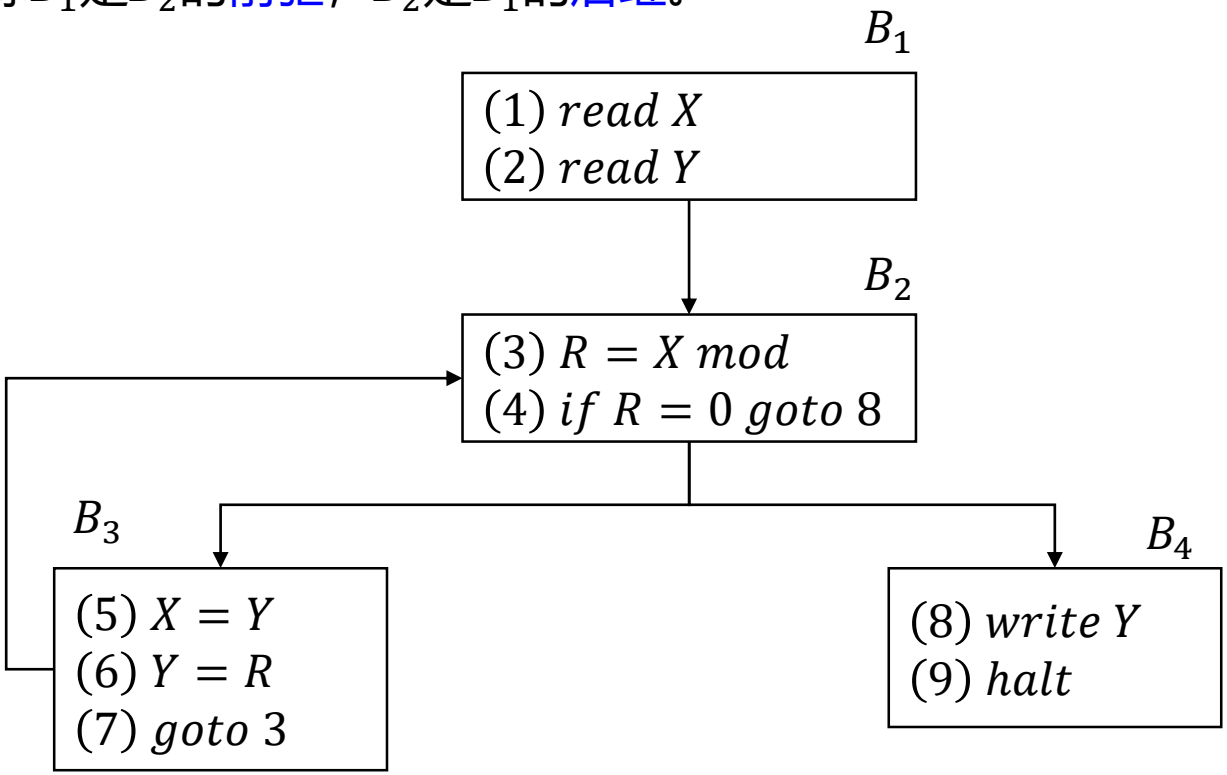
$x = x * 1$　　// 可删除

$x = y \wedge 2$　　$x = y * y$

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的优化

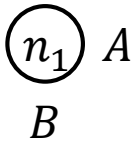
- 流图：以基本块为结点，通过有向图表示。
  - 如果一个结点的基本块的入口语句是程序的第一条语句，则此结点为首结点。
  - 如果在某个执行顺序中，基本块B_2紧接在B_1之后执行，则从B_1到B_2有一条有向边，称B_1是B_2的前驱，B_2是B_1的后继。



第十章 代码优化

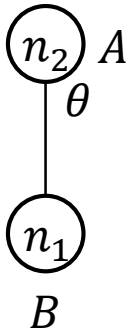
基本块的DAG

- 一个基本块的DAG是一种结点带有下述标记或附加信息的DAG
  - 结点圈内为编号，下面为标记，右面为附加信息。
  - 叶结点：标记为变量名或常数，表示该结点变量或常数的值；
  - 内部结点：标记为运算符，表示后继结点的运算结果；
  - 各节点可能附加一个或多个变量名，表示这些变量具有该结点的值。



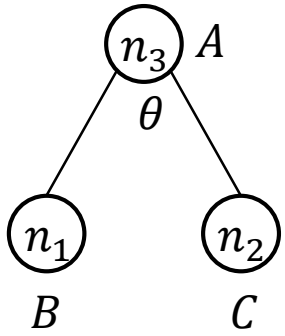
0型四元式

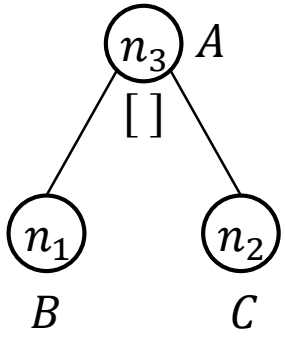
$A = B$



1型四元式

$A = \theta B$





2型四元式

$A = B\theta C$ 或 $A = B[C]$

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

DAG优化的基本思想

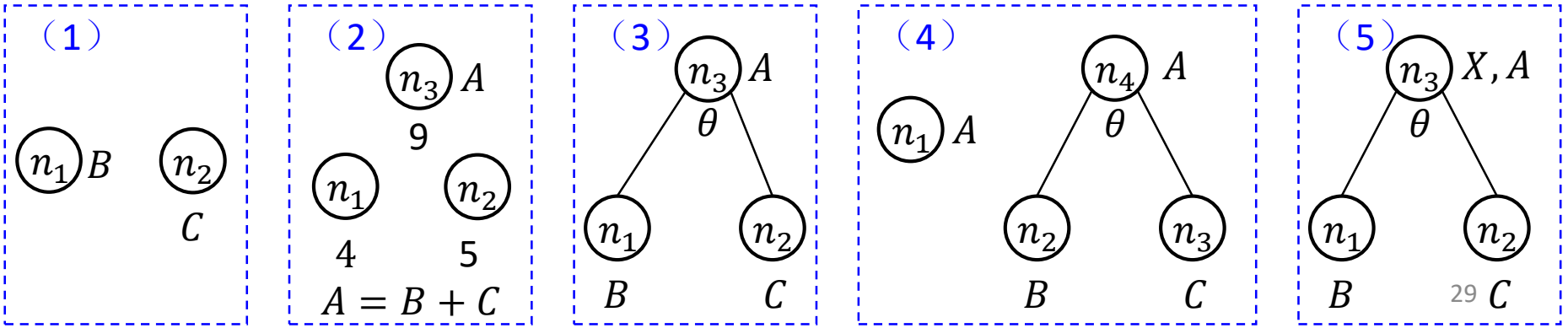
（1）对每个四元式，如$A = B\theta C$，找出或建立代表B和C当前值的结点；

（2）若B和C都是叶结点，且都为常数，则直接执行$B\theta C$，然后建立以运算结果P为标记的叶结点，并把A附加上去，即合并已知量；(B或C若新建立，删除之)；

（3）若B或C是内部结点，或至少一个不是常数，则建立以θ为标记的新结点，此结点分别以B和C为左右直接后继结点，并把A附加上去；

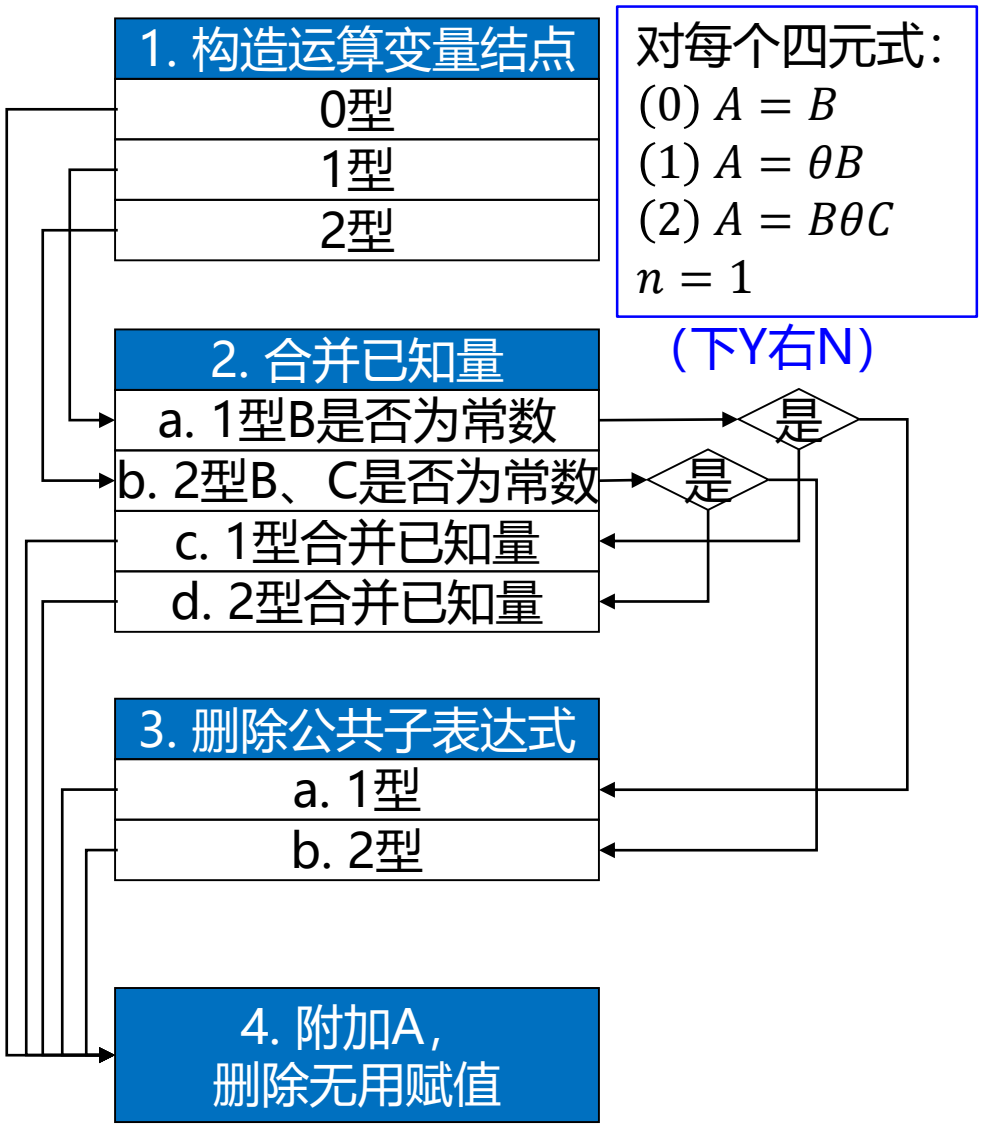
（4）若第三步之前，DAG中已有结点有附加标记A，且此结点无前驱，则在建立新结点的同时，把老结点上附加的A删除，即删除无用赋值；

（5）若原来已有代表$B\theta C$的结点，则不必建立新的结点，只需把A附加到代表$B\theta C$的结点上去，即删除公共子表达式。



山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的DAG优化算法



1、构造运算变量的结点

如果$Node(B)$没有定义，构造标记为B的叶结点。

a. 0型：记$Node(B) = n$，转4

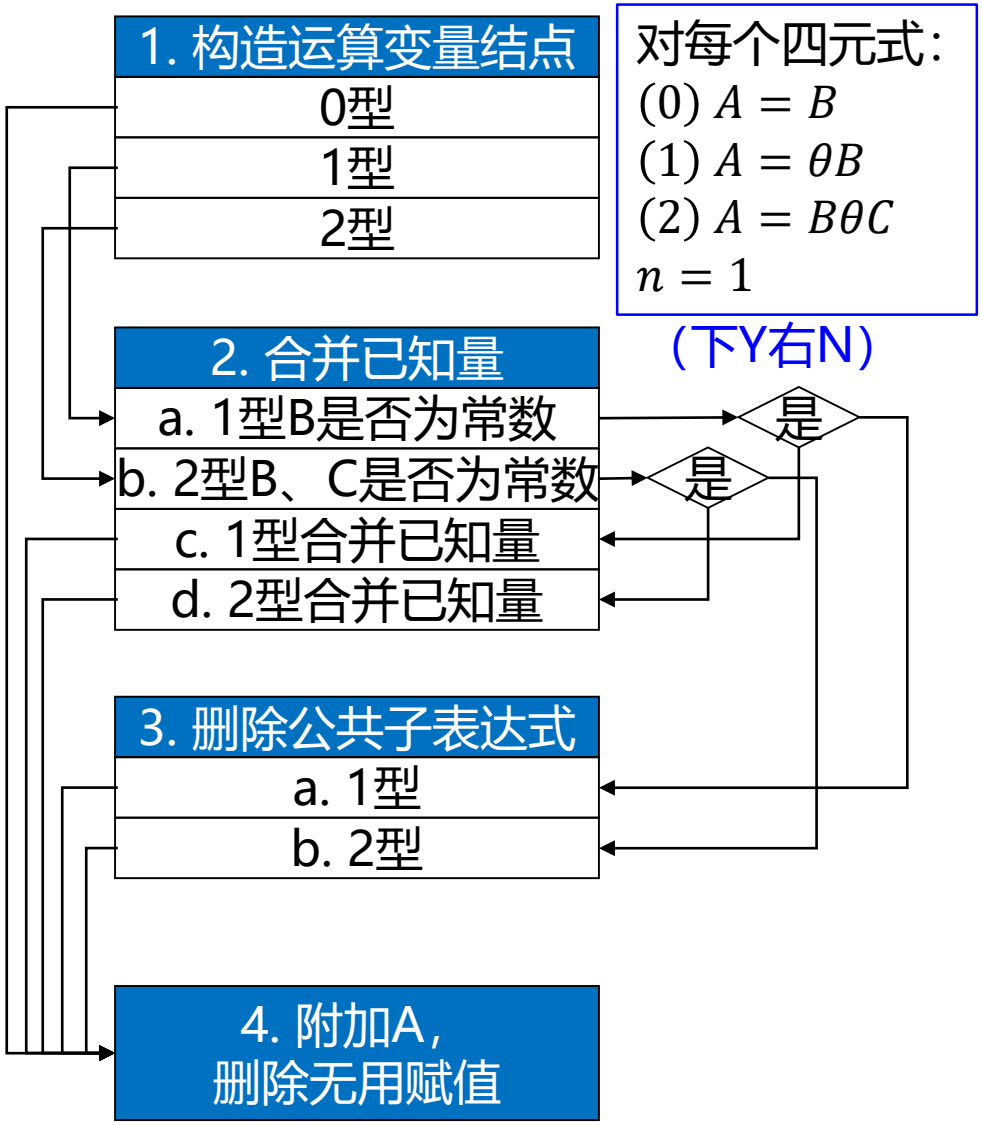
b. 1型：转2.a。

c. 2型：

- 如果$Node(C)$没有定义，构造标记为C的叶结点；
- 转2.b。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的DAG优化算法



2、合并已知量

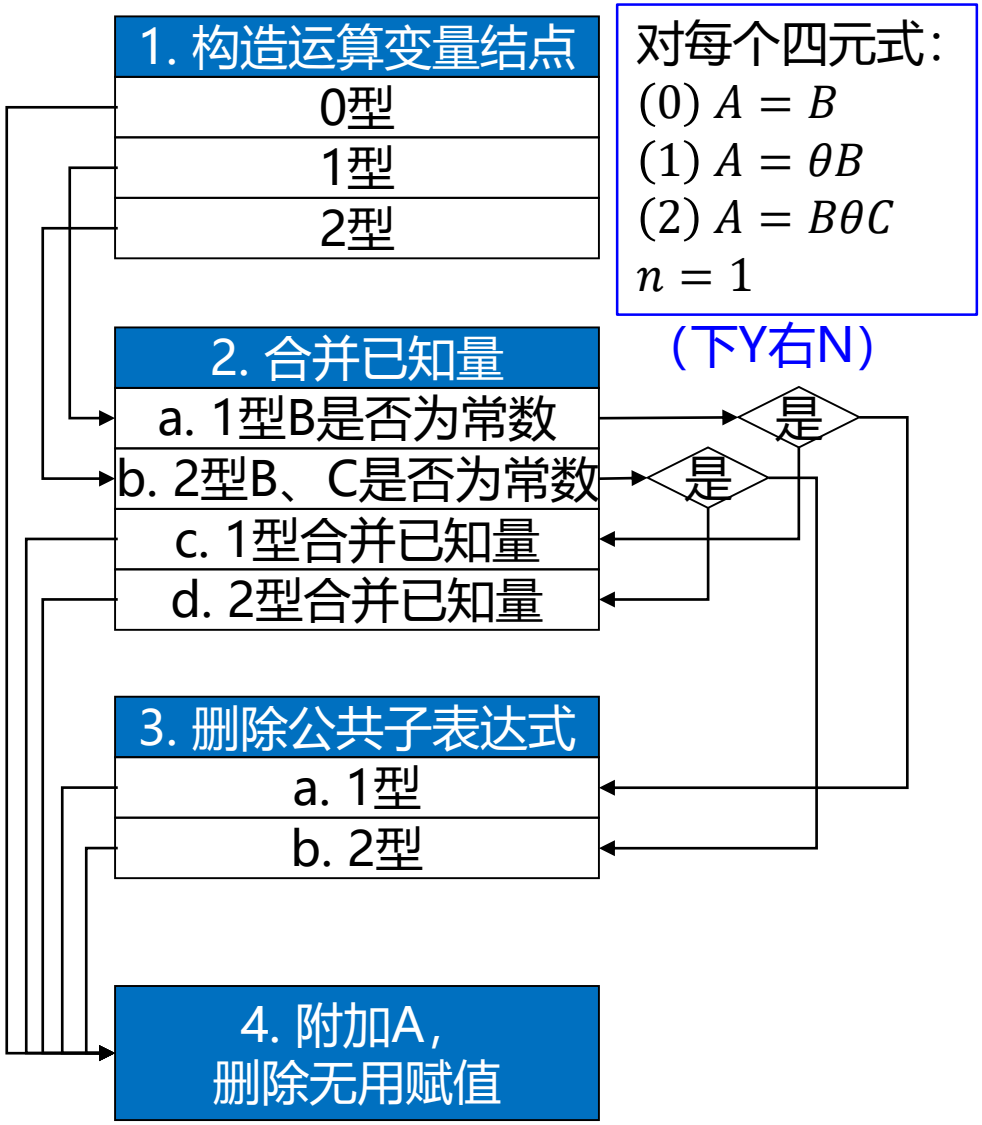
a. 如果$Node(B)$是标记为常数的叶结点，则转2.c，否则转3.a。

b. 如果$Node(B)$和$Node(C)$都是标记为常数的叶结点，则转2.d，否则转3.b。

c. 令$p = \theta B$，如果$Node(B)$是新构造出来的，删除之；如果$Node(p)$无定义，构造标记为p的叶结点，$Node(p) = n$，转4

d. 令$p = B\theta C$，如果$Node(B)$或$Node(C)$是新构造出来的，删除之；如果$Node(p)$无定义，构造标记为p的叶结点，$Node(p) = n$，转4。

基本块的DAG优化算法



3、删除公共子表达式

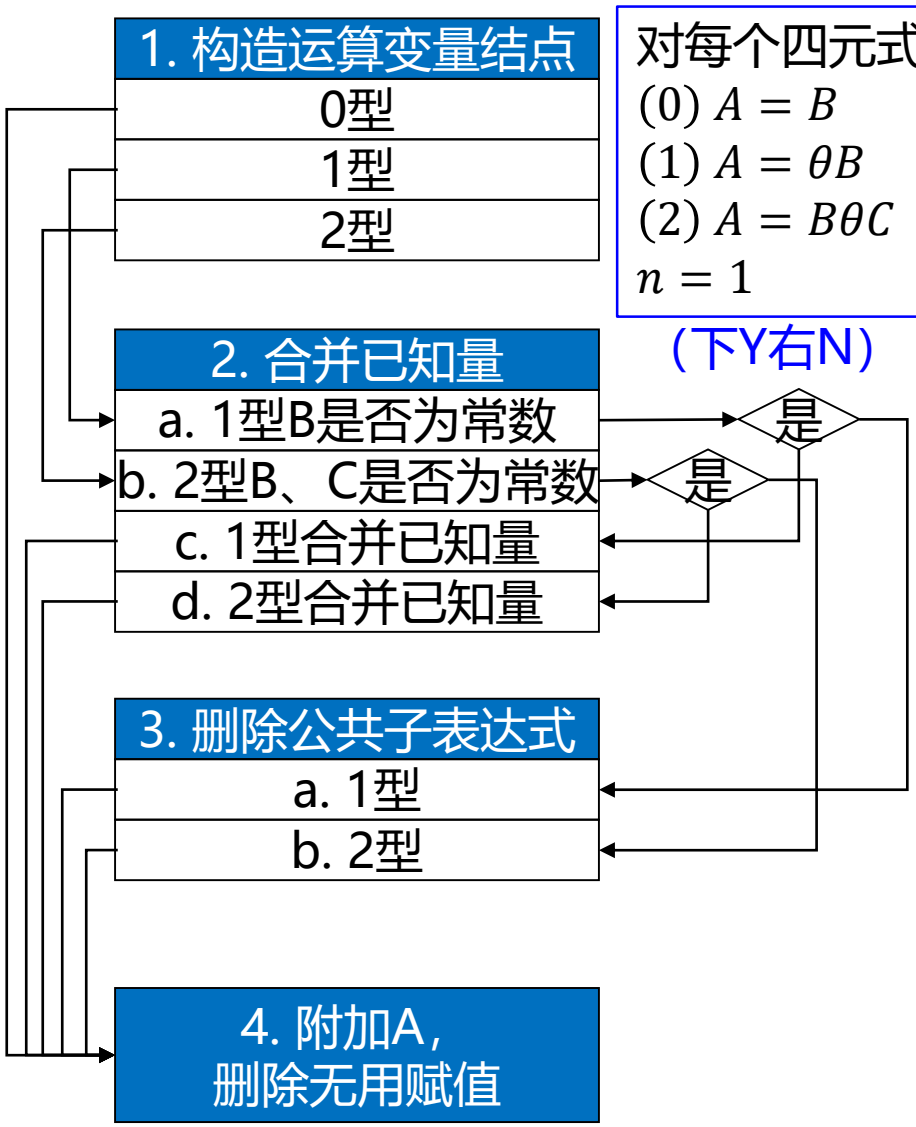
a. 1型：检查是否有结点，其唯一后继为$Node(B)$且标记为θ。

- 若没有，创建之，置为n，转4
- 若有，作为它的结点，转4

b. 2型：检查是否有结点，其左右后继为$Node(B)$和$Node(C)$，且标记为θ。

- 若没有，创建之，置为n，转4
- 若有，作为它的结点，转4

基本块的DAG优化算法



4、附加A，删除无用赋值

a. 若$Node(A)$无定义把A附加到结点n

b. 若$Node(A)$已定义，则把A从原$Node(A)$删除，再把A附加到新结点n，以下情况不删除：

- A是叶结点标记

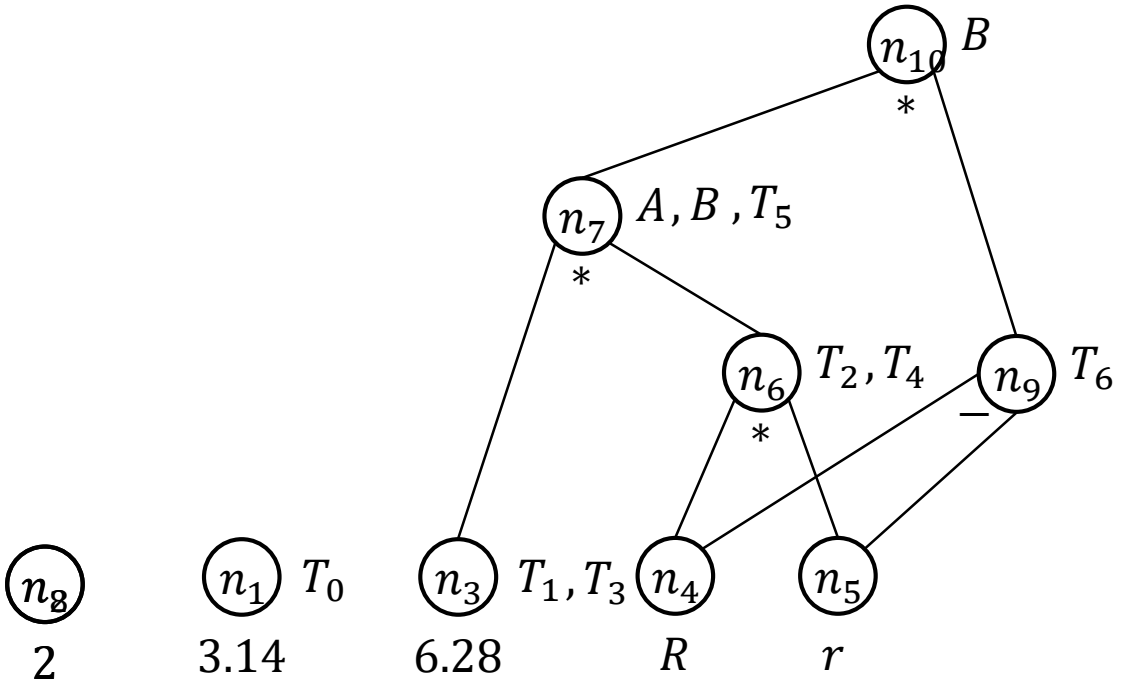
重新生成四元式前，把有前驱但没有附加信息的内部结点，生成新的临时变量附加上去。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的DAG优化算法

【例10.4】构造以下基本块的DAG

(1) $T_0 = 3.14$
(2) $T_1 = 2 * T_0$
(3) $T_2 = R * r$
(4) $A = T_1 * T_2$
(5) $B = A$
(6) $T_3 = 2 * T_0$
(7) $T_4 = R * r$
(8) $T_5 = T_3 * T_4$
(9) $T_6 = R - r$
(10) $B = T_5 * T_6$

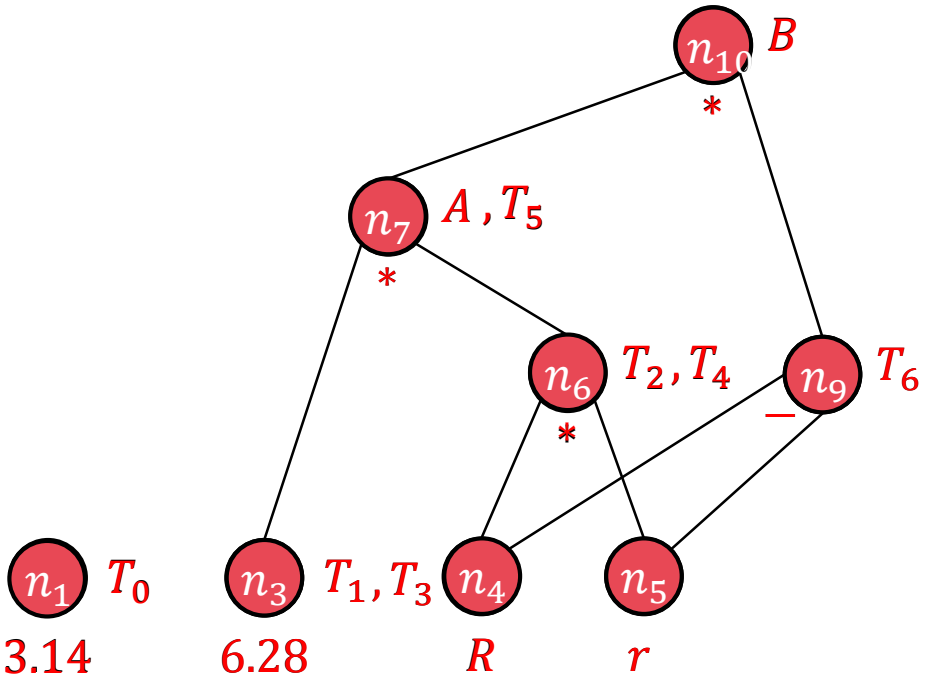


山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的DAG优化算法

【例10.5】按构造DAG结点的顺序重构中间代码。

(1) $T_0 = 3.14$
(2) $T_1 = 2 * T_0$
(3) $T_2 = R * r$
(4) $A = T_1 * T_2$
(5) $B = A$
(6) $T_3 = 2 * T_0$
(7) $T_4 = R * r$
(8) $T_5 = T_3 * T_4$
(9) $T_6 = R - r$
(10) $B = T_5 * T_6$



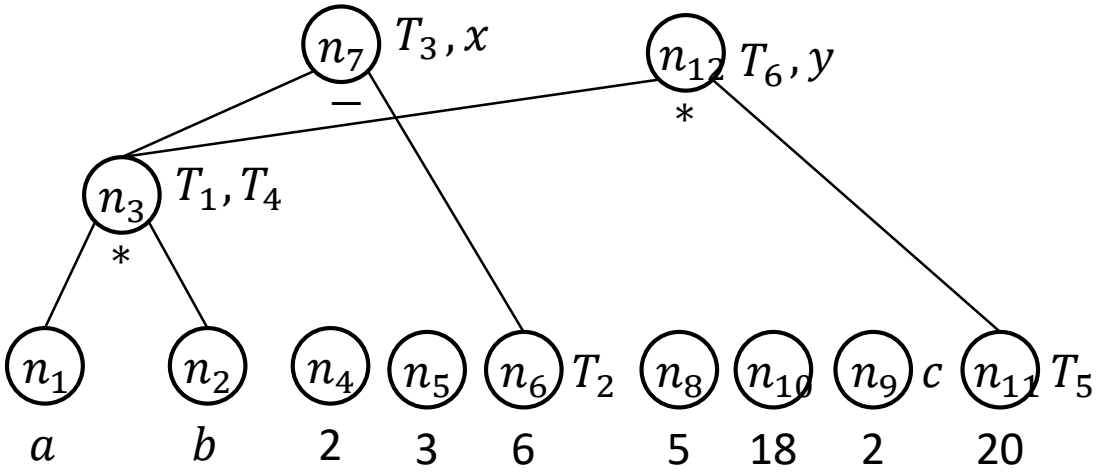
(1) $T_0 = 3.14$
(2) $T_1 = 6.28$
(3) $T_3 = 6.28$
(4) $T_2 = R * r$
(5) $T_4 = T_2$
(6) $A = 6.28 * T_2$
(7) $T_5 = A$
(8) $T_6 = R - r$
(9) $B = A * T_6$

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的DAG优化算法

【例10.6】对如下基本块进行DAG优化。

(1) $T_1 = a * b$
(2) $T_2 = 2 * 3$
(3) $T_3 = T_1 - T_2$
(4) $x = T_3$
(5) $c = 5$
(6) $T_4 = a * b$
(7) $c = 2$
(8) $T_5 = 18 + c$
(9) $T_6 = T_4 * T_5$
(10) $y = T_6$

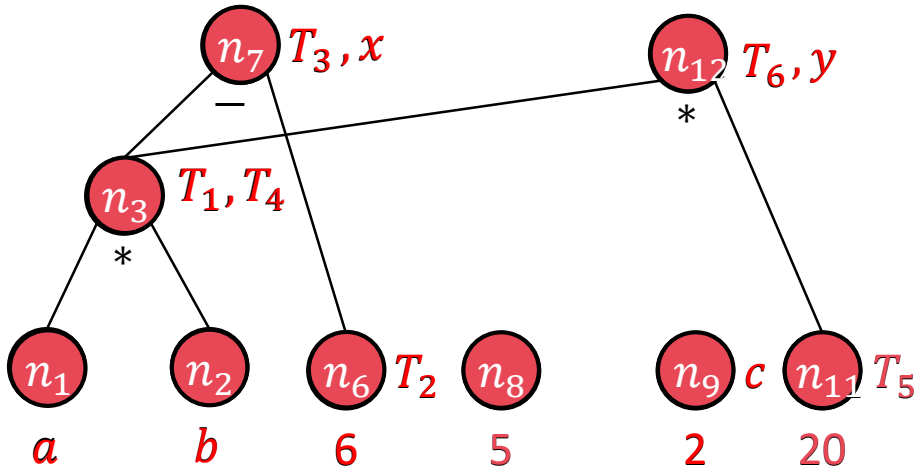


山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

基本块的DAG优化算法

【例10.6】对如下基本块进行DAG优化。

(1) $T_1 = a * b$
(2) $T_2 = 2 * 3$
(3) $T_3 = T_1 - T_2$
(4) $x = T_3$
(5) $c = 5$
(6) $T_4 = a * b$
(7) $c = 2$
(8) $T_5 = 18 + c$
(9) $T_6 = T_4 * T_5$
(10) $y = T_6$



(1) $T_1 = a * b$
(2) $T_4 = T_1$
(3) $T_2 = 6$
(4) $T_3 = T_1 - 6$
(5) $x = T_3$
(6) $c = 2$
(7) $T_5 = 20$
(8) $T_6 = T_1 * 20$
(9) $y = T_6$

- 叶结点上标记的标识符：是基本块外定值而基本块内引用的变量。
- 各结点上附加的标识符：是基本块内定值而可能在基本块外引用的变量。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

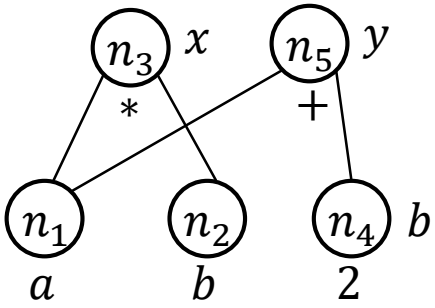
出现多个可用结点

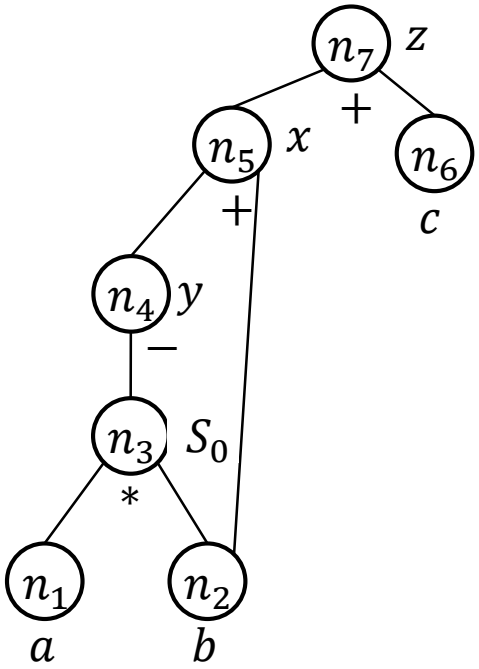
【例10.7】构造如下两个基本块的DAG

(1) $x = a * b$
(2) $b = 2$
(3) $y = a + b$

- 搜索结点应从后往前搜索。

(1) $x = a * b$
(2) $y = -x$
(3) $x = y + b$
(4) $z = x + c$





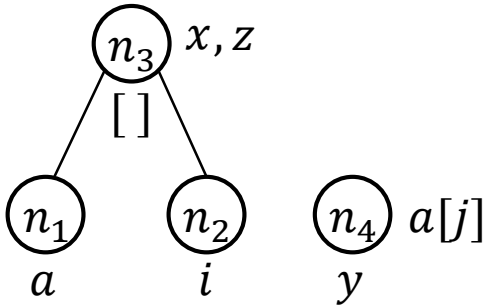
(1) $S_0 = a * b$
(2) $y = -S_0$
(3) $x = y + b$
(4) $z = x + c$

数组的处理

【例10.8】构造如下两个基本块的DAG

(1) $x = a[i]$
(2) $a[j] = y$
(3) $z = a[i]$

(1) $x = a[i]$
(2) $z = x$
(3) $a[j] = y$



- 当$i = j, y \neq a[i]$时，两者z值不一致
  - 原因：当对数组赋值时，即使a和i都未改变，也可能改变了$a[i]$的右值
- 数组做限制
  - 当对数组a的元素赋值时，注销数组a作为公共子表达式资格；
  - 即标记为[ ]，左变元为a的结点，禁止再添加附加变元；
  - 每个结点需要有个标志位标记是否已注销。

第十章 代码优化

- 10.1 概述
- 10.2 局部优化
  - 10.2.1 基本块及流图
  - 10.2.2 基本块的DAG表示及其应用
- 10.3 循环优化
  - 10.3.1 代码外提
  - 10.3.2 强度削弱
  - 10.3.3 删除归纳变量
- 10.4 数据流分析
  - 10.4.1 任意路径数据流分析
  - 10.4.2 全路径数据流分析
  - 10.4.3 数据流问题的分类
  - 10.4.4 其它主要数据流问题
  - 10.4.5 利用数据流信息进行全局优化

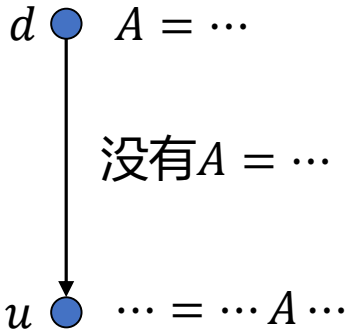
山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.3.1 代码外提

【例10.9】代码外提

```
for (i = 0; i < 100; i++)
{
    u = a + b;
    s = u + i;
}
```

```
u = a + b;
for (i = 0; i < 100; i++)
    s = u + i;
```

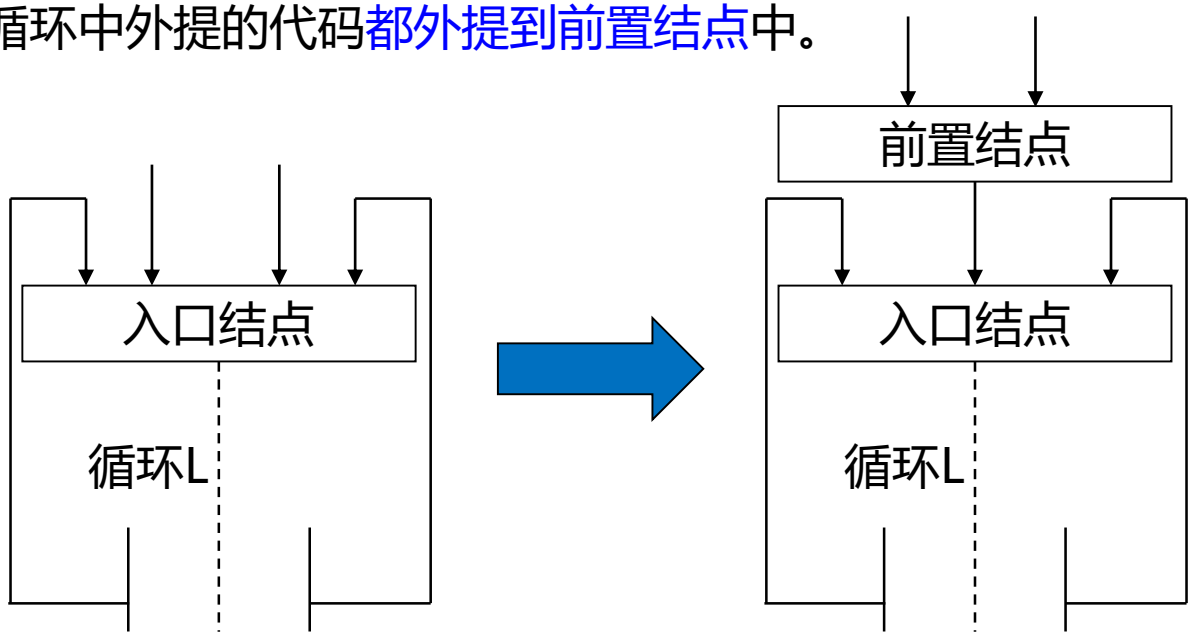


- 变量A在某点定值：即在该点对A赋值
- 变量A在某点d的定值到达另一点u：指流图中从d有一条通路到达u，且该通路上没有A的其它定值。
- 在循环中定值不变的运算称为循环不变运算。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

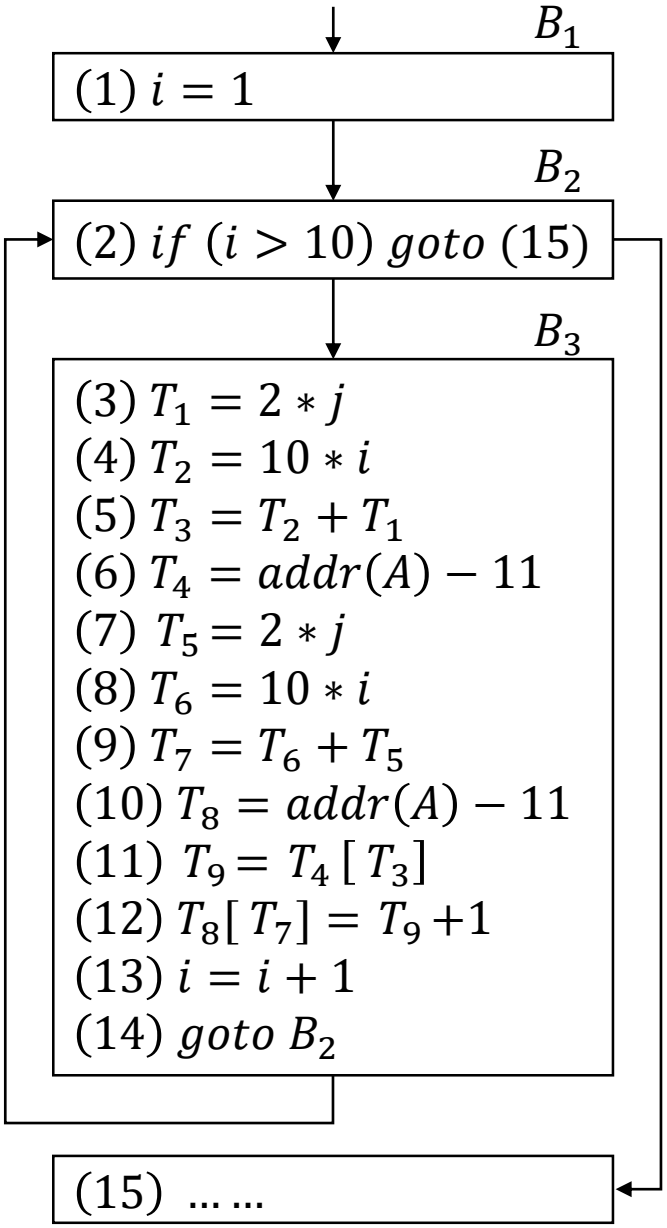
10.3.1 代码外提

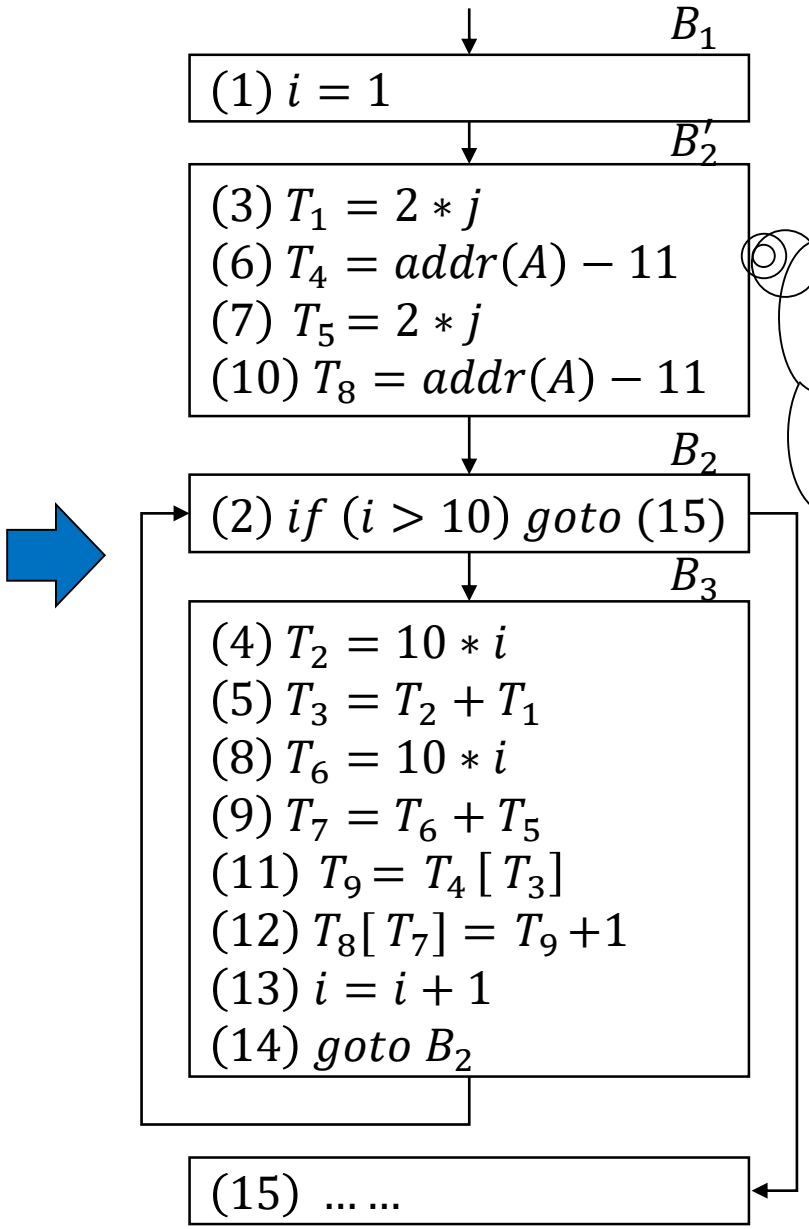
- 代码外提时，在循环入口点前面建立一个新结点（基本块），称为循环的前置结点。
  - 循环前置结点以循环入口结点为其唯一后继，原来流图中从循环外引入（不包括循环内引入）到循环入口结点的有向边，改成引入到循环前置结点。
  - 循环入口结点是唯一的，所以前置结点也是唯一的。
  - 循环中外提的代码都外提到前置结点中。



山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

【例10.10】 i = 1; for (; i <= 10; i = i+1) A[i, 2*j] = A[i, 2*j] + 1; 假设A[10, 10]

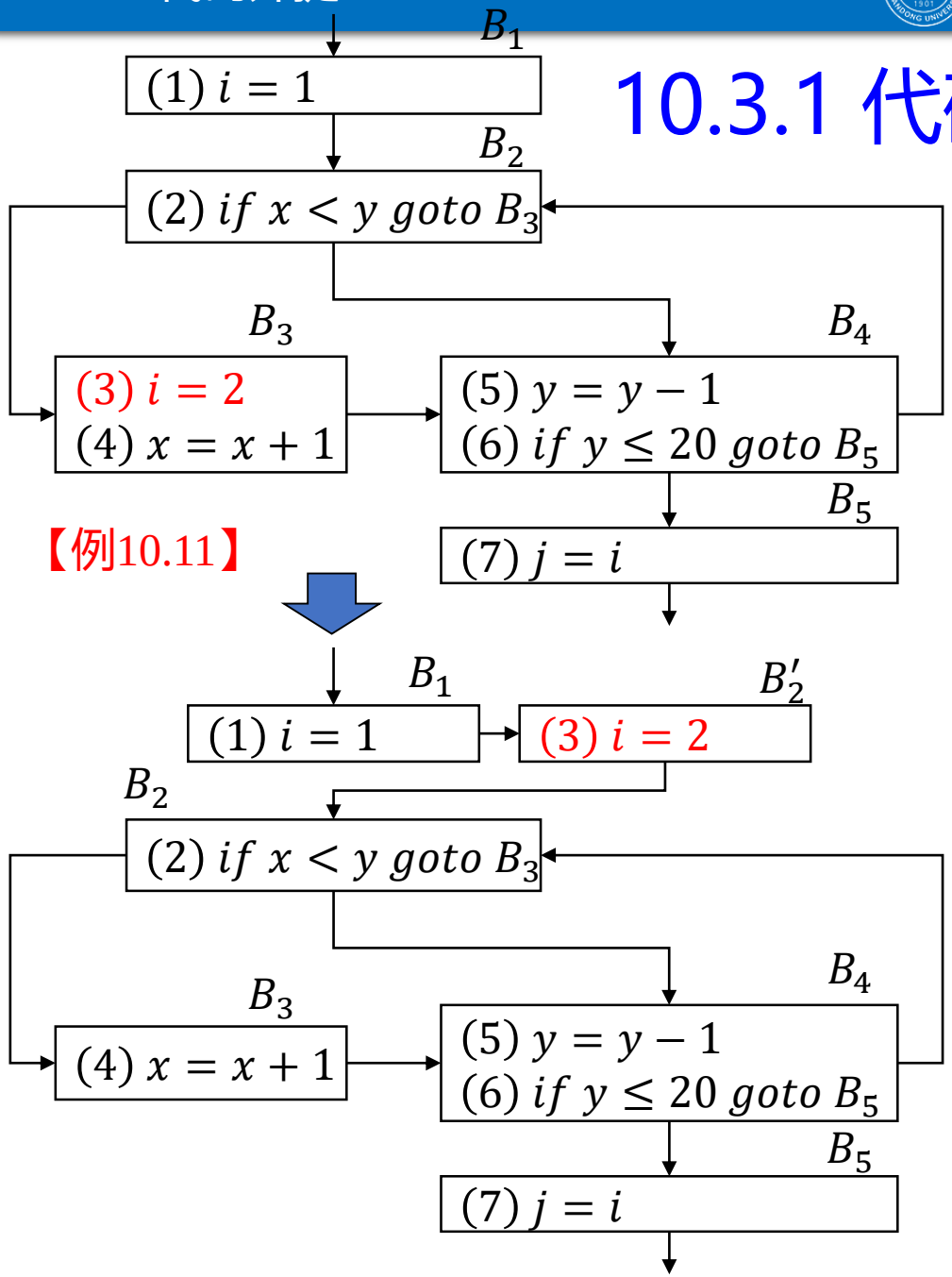




是否任何情况下都可以把循环不变运算代码外提?

郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.3.1 代码外提

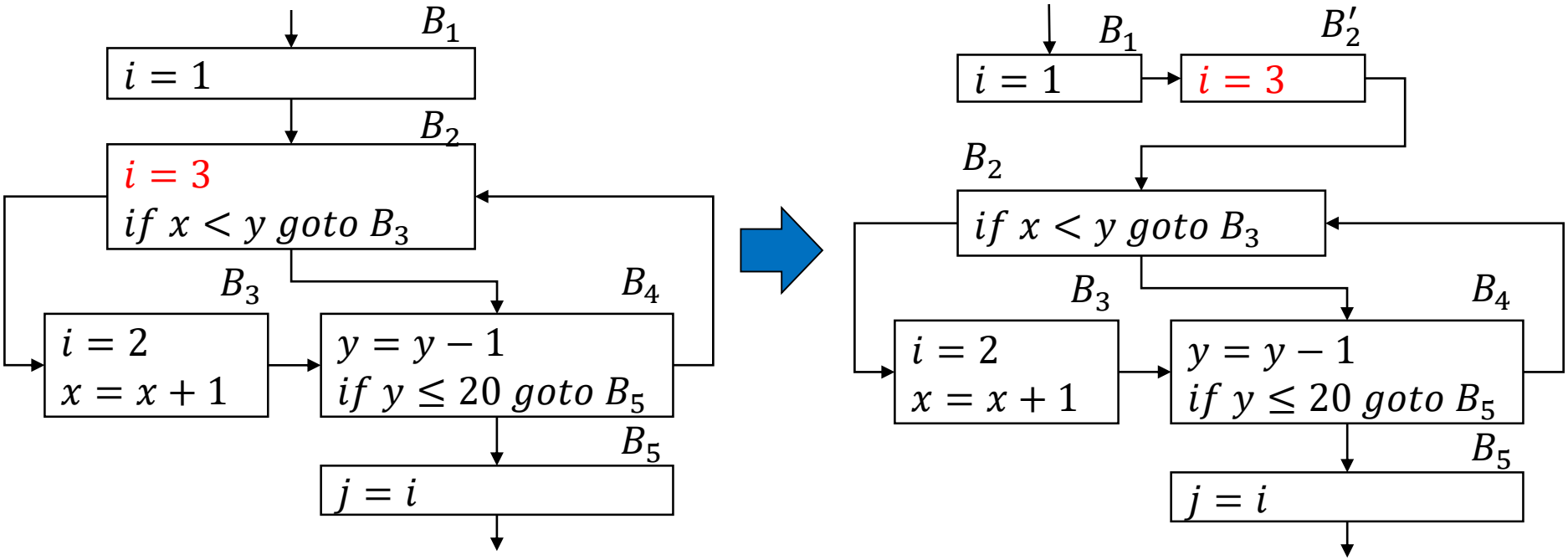


- 循环不变量$i = 2$提到循环外
  - 代码外提后，最后总有$j = 2$
  - 代码外提前，如果$x \geq y$，则$j = 1$
- 循环外提条件
  - B_3必须是出口结点B_4的必经结点；
  - 或者，虽然不是必经结点，但出循环后不再引用该定点值。
- 活跃变量（变量A在点p活跃）
  - 指A要在从p开始的某通路上被引用
  - 前述等价于：在循环外的循环后继结点入口，变量i不活跃才能外提。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.3.1 代码外提

【例10.12】

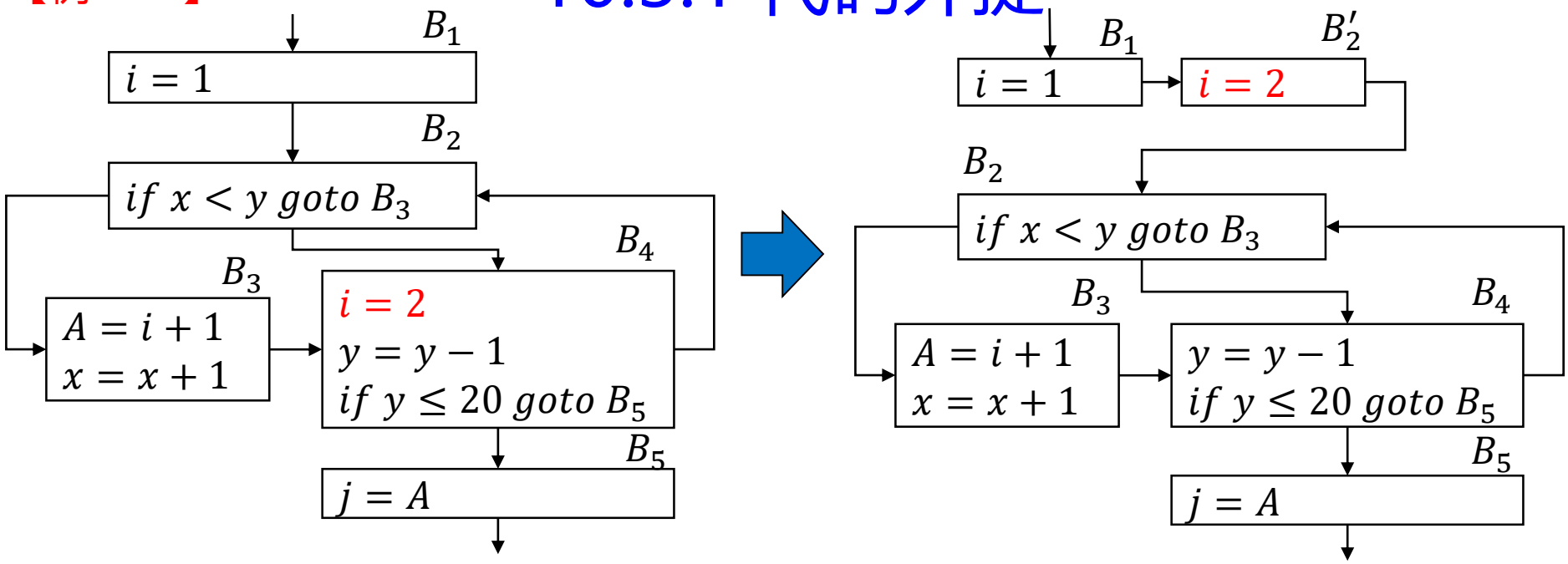


- $i = 3$所在的B_2是出口结点的必经结点，是否可外提?
- 路径：$B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow B_4 \rightarrow B_2 \rightarrow B_4 \rightarrow B_5$
  - 代码外提前，$j = 3$
  - 代码外提后，$j = 2$
- 结论：循环不变量$A = B\theta C$外提时，要求循环中其它地方不再有A的定值点。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.3.1 代码外提

【例10.13】



- $i = 2$所在的B_4本身是出口结点，且其它地方没有i 的定值，是否可外提?
- 路径：$B_2 \rightarrow B_3 \rightarrow B_4 \rightarrow B_2 \rightarrow B_4 \rightarrow B_5$
  - 代码外提前，$j = 2$
  - 代码外提后，$j = 3$
- 结论：循环不变量$A = B\theta C$外提时，要求循环中A的所有引用点都是而且仅仅是这个定值点所能到达的。

10.3.1 代码外提

- 查找循环L的不变运算的算法

（1）依次查看L的各基本块的代码，如果它的每个运算对象或为常数，或者定值点在L外，则将此代码标记为“不变运算”。

（2）重复第（3）步，直至没有新的代码被标记为“不变运算”为止。

（3）依次查看尚未被标记为“不变运算”的代码，如果它的每个运算对象或为常数，或者定值点在L之外，或只有一个能到达的定值点且该点上的代码已标记为“不变运算”，则把查看的代码标记为“不变运算”。

10.3.1 代码外提

代码外提算法

1. 求出循环L的所有不变运算。

2. 对步骤1所求得的每一个不变运算s: $A = B\theta C$或$A = \theta B$，检查是否满足条件：

   2.1

      2.1.1 s所在的结点是L的所有出口结点的必经结点；

      2.1.2 A在L中其它地方未再定值；

      2.1.3 L中所有A的引用点只有s中A的定值才能到达。

   2.2 A在离开L后不再是活跃的，并且条件2.1.2和2.1.3成立。 A离开L后不活跃，指A在L的任何出口结点的后继结点的入口处是不活跃的。

3. 按步骤1所找出的不变运算的查找顺序，依次把符合条件2.1和2.2的不变运算s外提到L的前置结点；但如果s的运算对象（B或C）在L中定值，那么只有当这些定值代码都外提到前置结点中时，才可能把s外提。

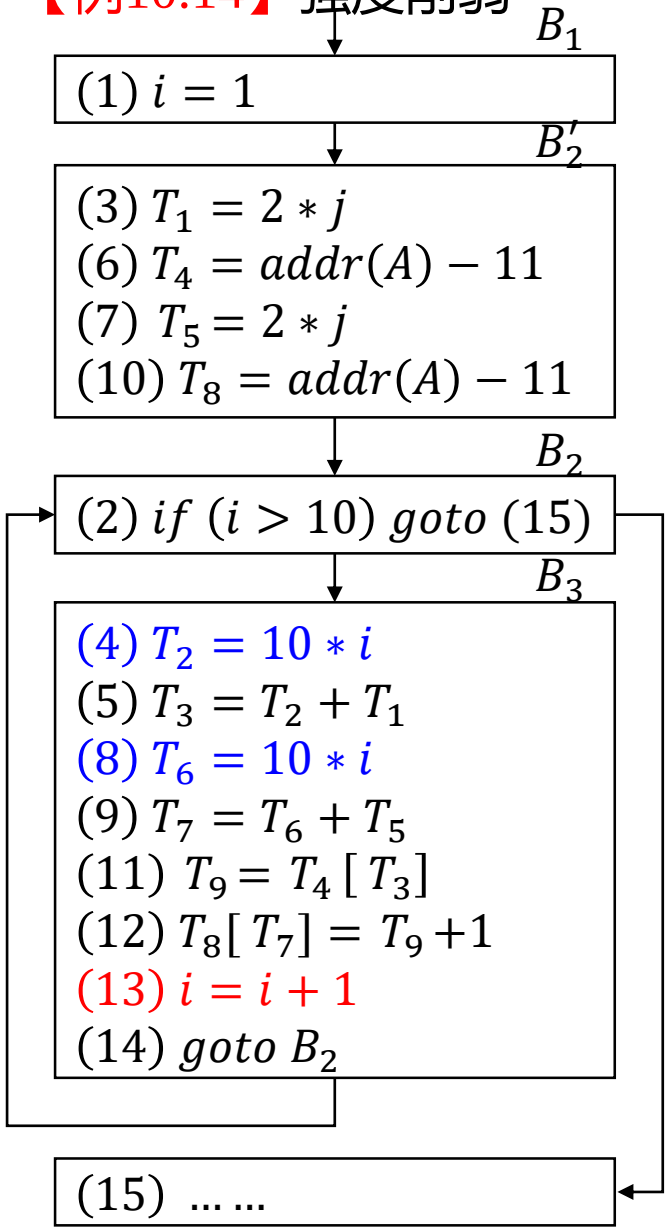
第十章 代码优化

10.3.2 强度削弱

- 强度削弱：指把程序中执行时间较长的运算替换为执行时间较短的运算。
  - 乘法替换为递归加法
  - 变量替换为常量

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

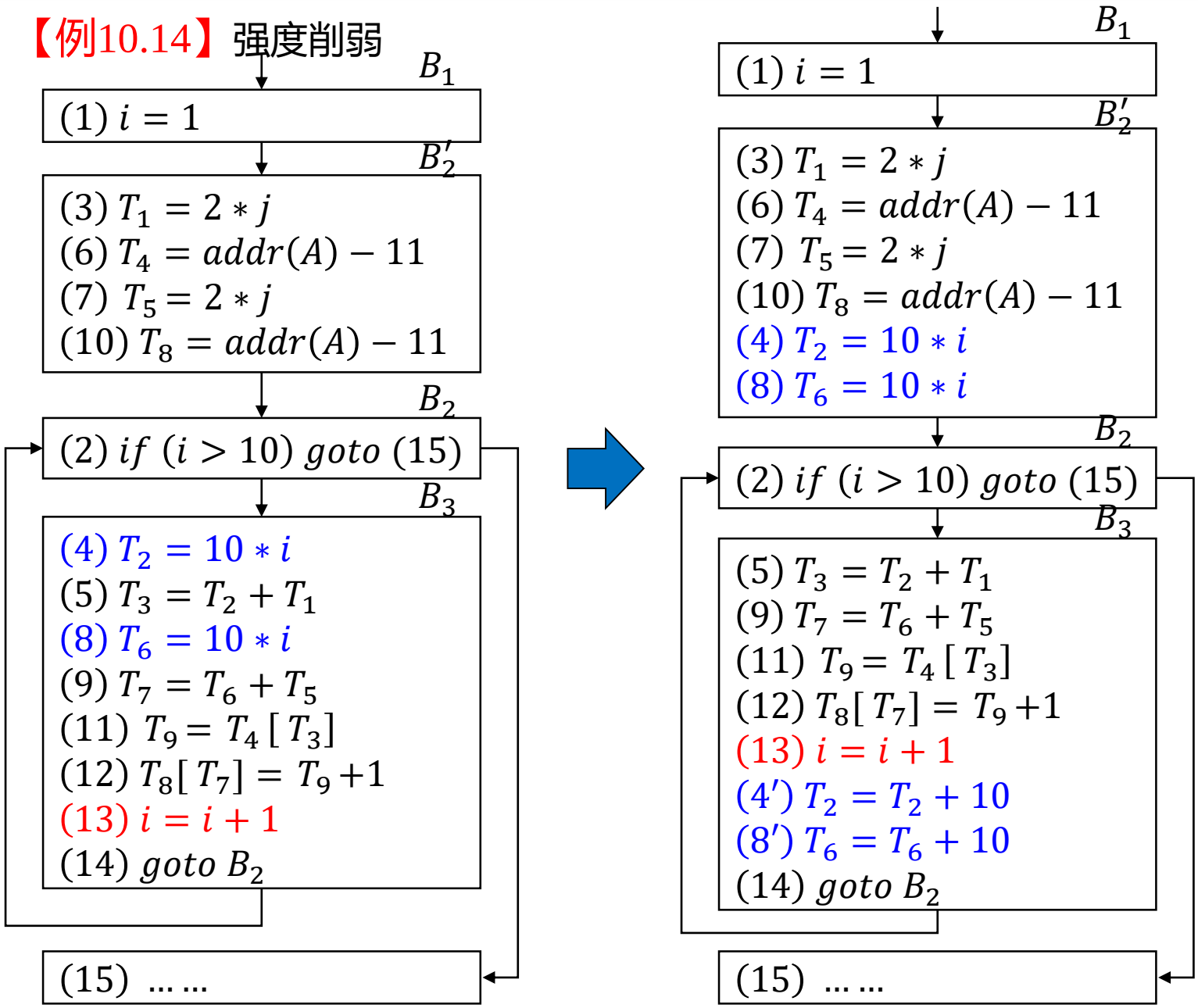
【例10.14】强度削弱



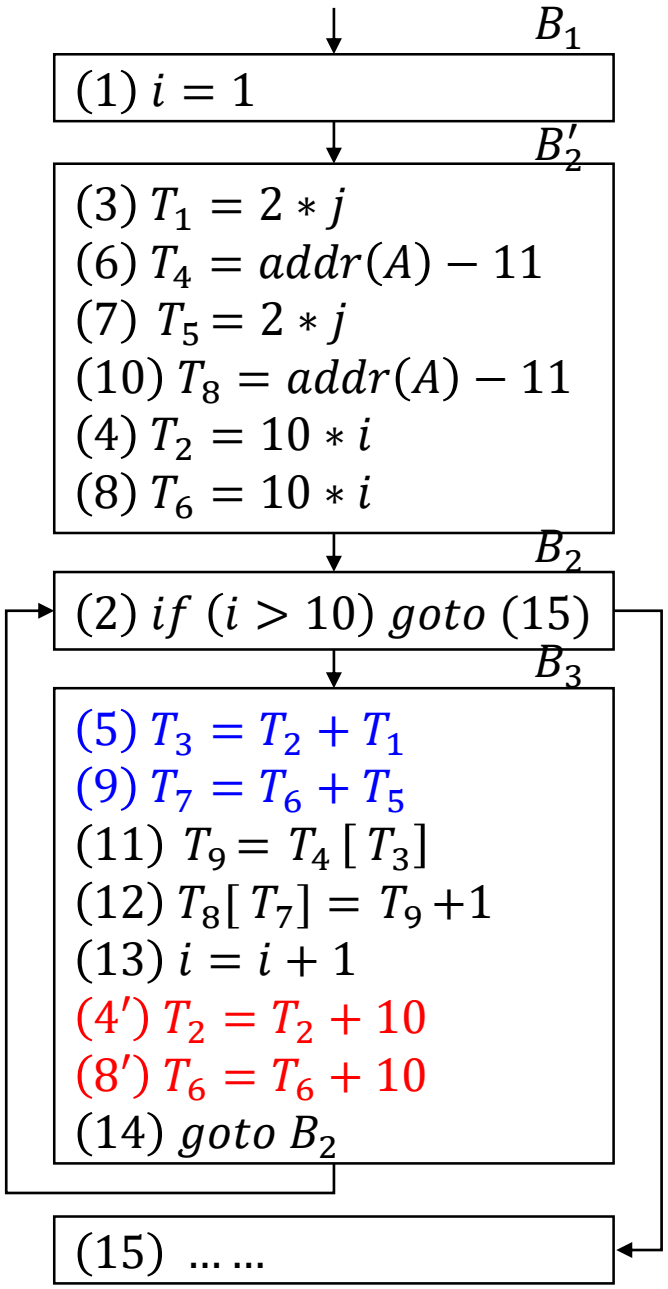
- $\{B_2, B_3\}$是循环，B_2是入口结点。
  - （13）中的i是一个递归赋值的变量，每循环一次，其值增加常量1。
  - （4）和（8）中的T_2和T_6要引用i点值，且都是i的线性函数。
  - 即每循环一次，i增加常量1，T_2和T_6增加常量10。
  - 优化：把（4）和（8）外提，在（13）后面T_2和T_6增10。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

【例10.14】强度削弱



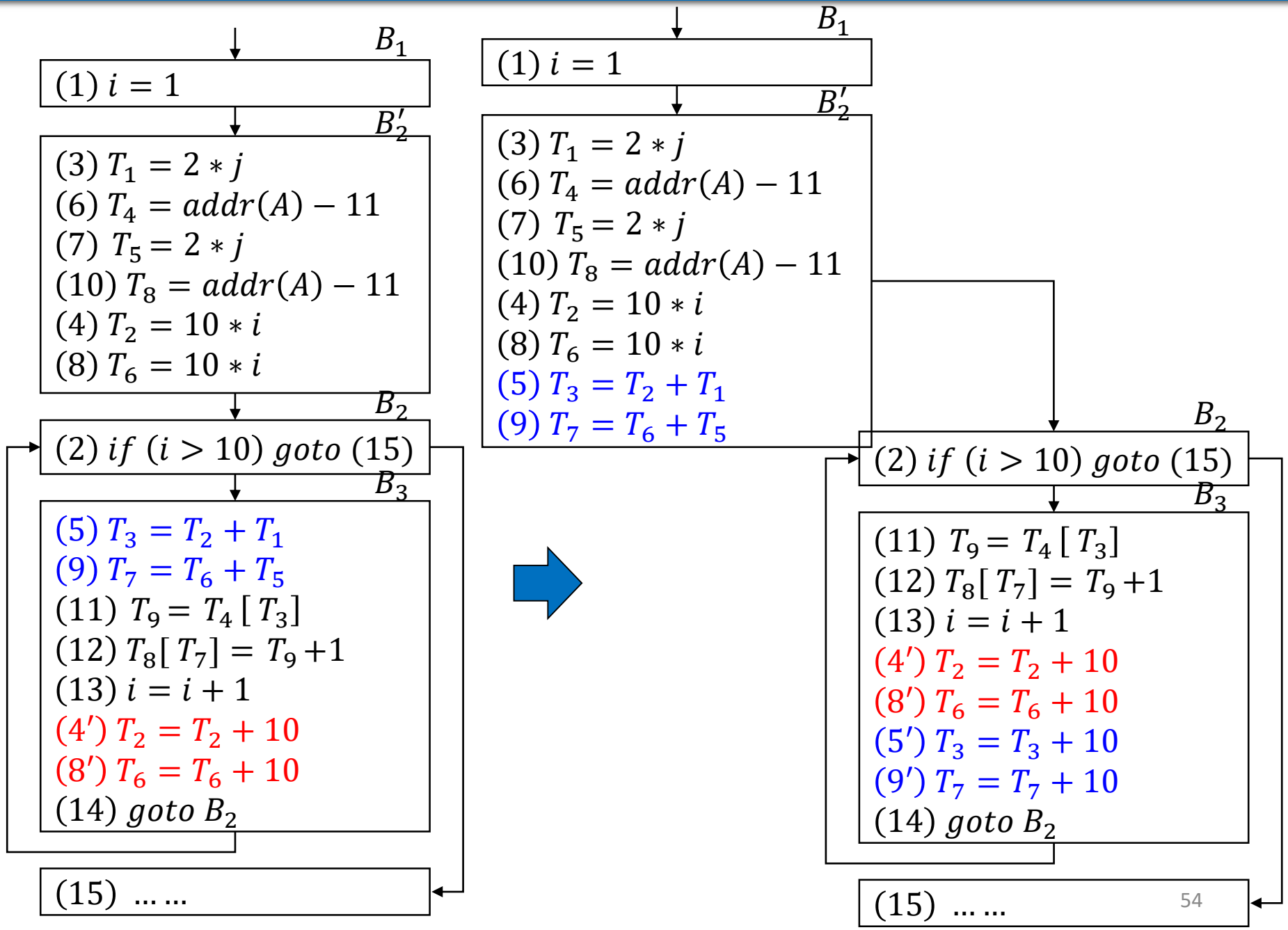
山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn



对加法实行强度削弱

- （4’）和（8’）中的T_2和T_6是递归赋值变量，每循环一次，分别增加一个常量10。
- （5）中的T_3要引用T_2点值，它的另一个运算对象是循环不变量T_1，故每次循环增量也是常量10。
- （9）中T_7增量与T_6相同。
- 优化：把（5）和（9）外提，在（8’）后面分别给T_3和T_7增10。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

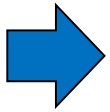


10.3.2 强度削弱

强度削弱

- 如果循环中有i的递归赋值$i = i \pm C$，并且循环中T的赋值运算可以化归为$T = k * i \pm C_1$，其中C, C_1, k均为循环不变量，那么T的赋值运算可以进行强调削弱。
- 进行强度削弱后，循环中可能出现一些新的无用赋值，如(4')和(8')，如果T_2和T_6在循环出口之后不再是活跃变量，则可以删除。
- 循环中下标变量的计算很费时，强度削弱对下标变量的计算强度优化非常有效。

$(5)\ T_3 = T_2 + T_1$
$(9)\ T_7 = T_6 + T_5$
$(11)\ T_9 = T_4[T_3]$
$(12)\ T_8[T_7] = T_9 + 1$
$(13)\ i = i + 1$
$(4')\ T_2 = T_2 + 10$
$(8')\ T_6 = T_6 + 10$
$(14)\ goto\ B_2$



$(11)\ T_9 = T_4[T_3]$
$(12)\ T_8[T_7] = T_9 + 1$
$(13)\ i = i + 1$
$(4')\ T_2 = T_2 + 10$
$(8')\ T_6 = T_6 + 10$
$(5')\ T_3 = T_3 + 10$
$(9')\ T_7 = T_7 + 10$
$(14)\ goto\ B_2$

第十章 代码优化

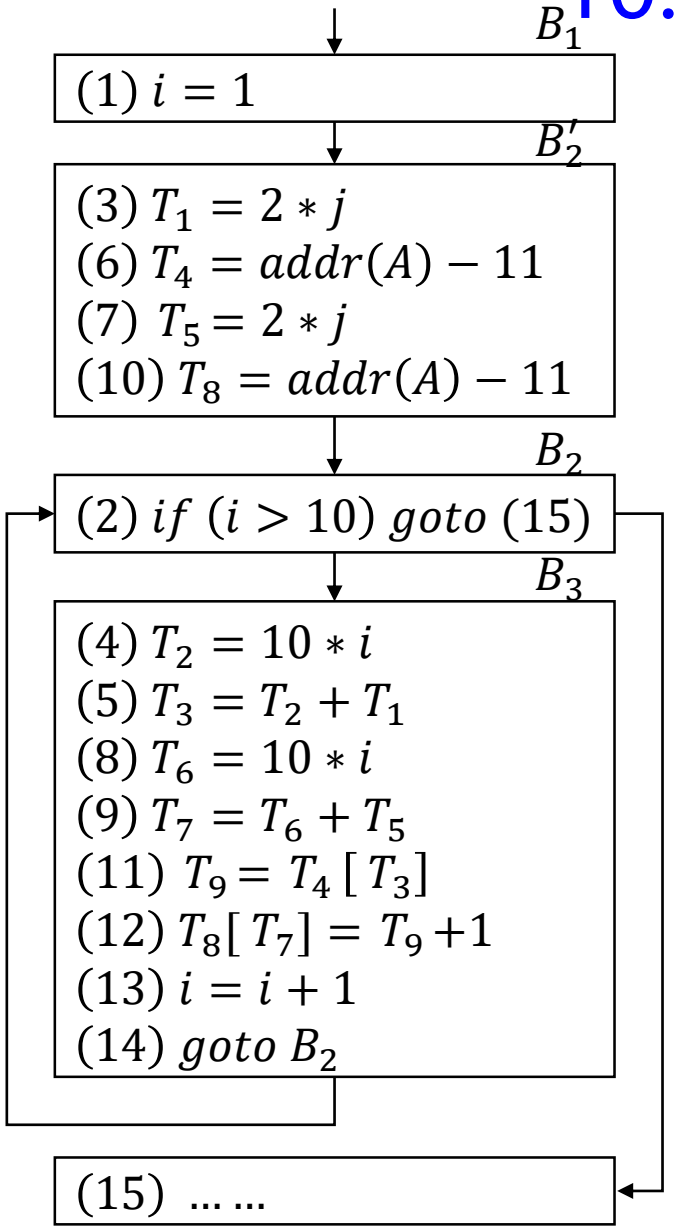
山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.3.3 删除归纳变量

- 基本归纳变量：如果循环中对变量i只有唯一的形如$i = i \pm C$的赋值，其中C是循环不变量，则称i为循环中的基本归纳变量。
- 归纳变量：如果i是循环中的基本归纳变量，j在循环中的定值总是可以化归为i的线性函数，即$j = C_1 * i + C_2$，其中C_1, C_2是循环不变量，则称j是归纳变量，并称它与i同族。
  - 一个基本归纳变量也是一个归纳变量。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

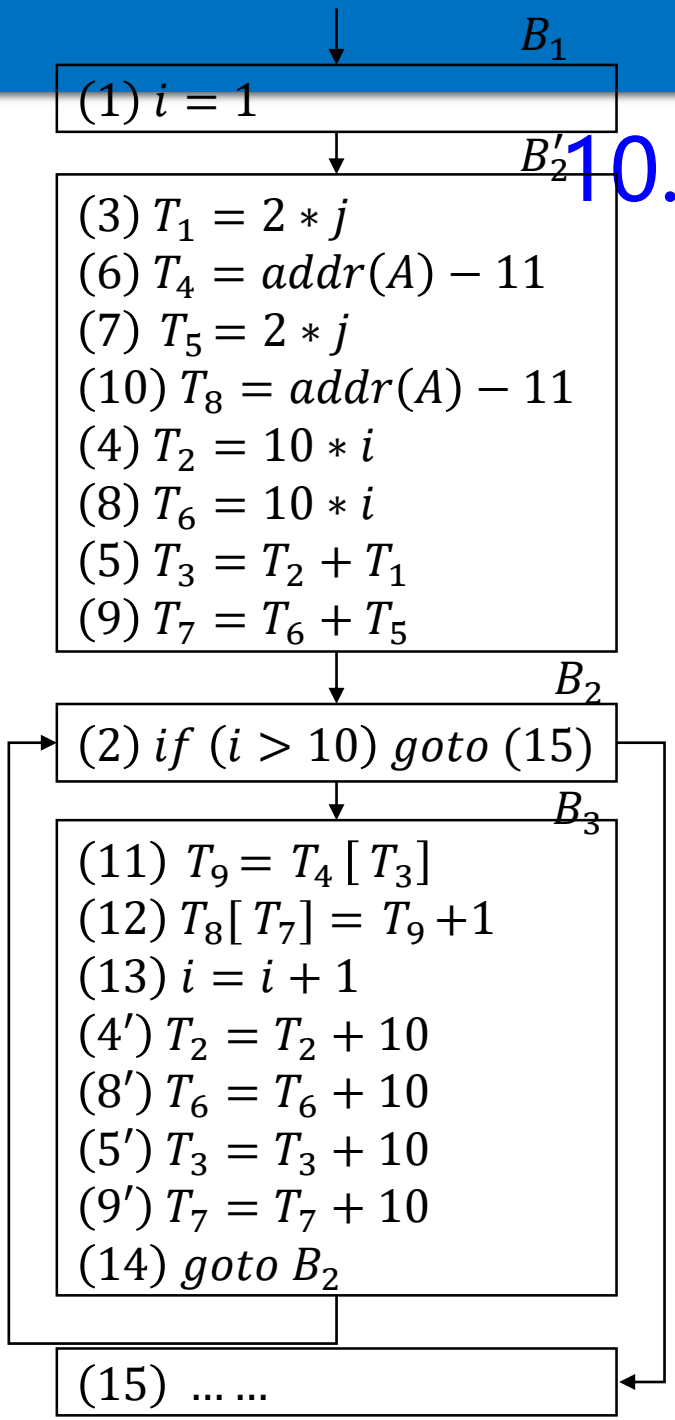
10.3.3 删除归纳变量



【例10.16】归纳变量

- i是循环$\{B_2, B_3\}$的基本归纳变量。
- T_2和T_6是循环中与i同族的归纳变量。
- T_3在(5)中被唯一定值，根据(5)(4)，有$T_3 = 10 * i + T_1$，而T_1是循环不变量，因此T_3是循环中与i同族的归纳变量。
- T_7在(9)中被唯一定值，根据(9)(8)，有$T_7 = 10 * i + T_5$，而T_5是循环不变量，因此T_7是循环中与i同族的归纳变量。

10.3.3 删除归纳变量

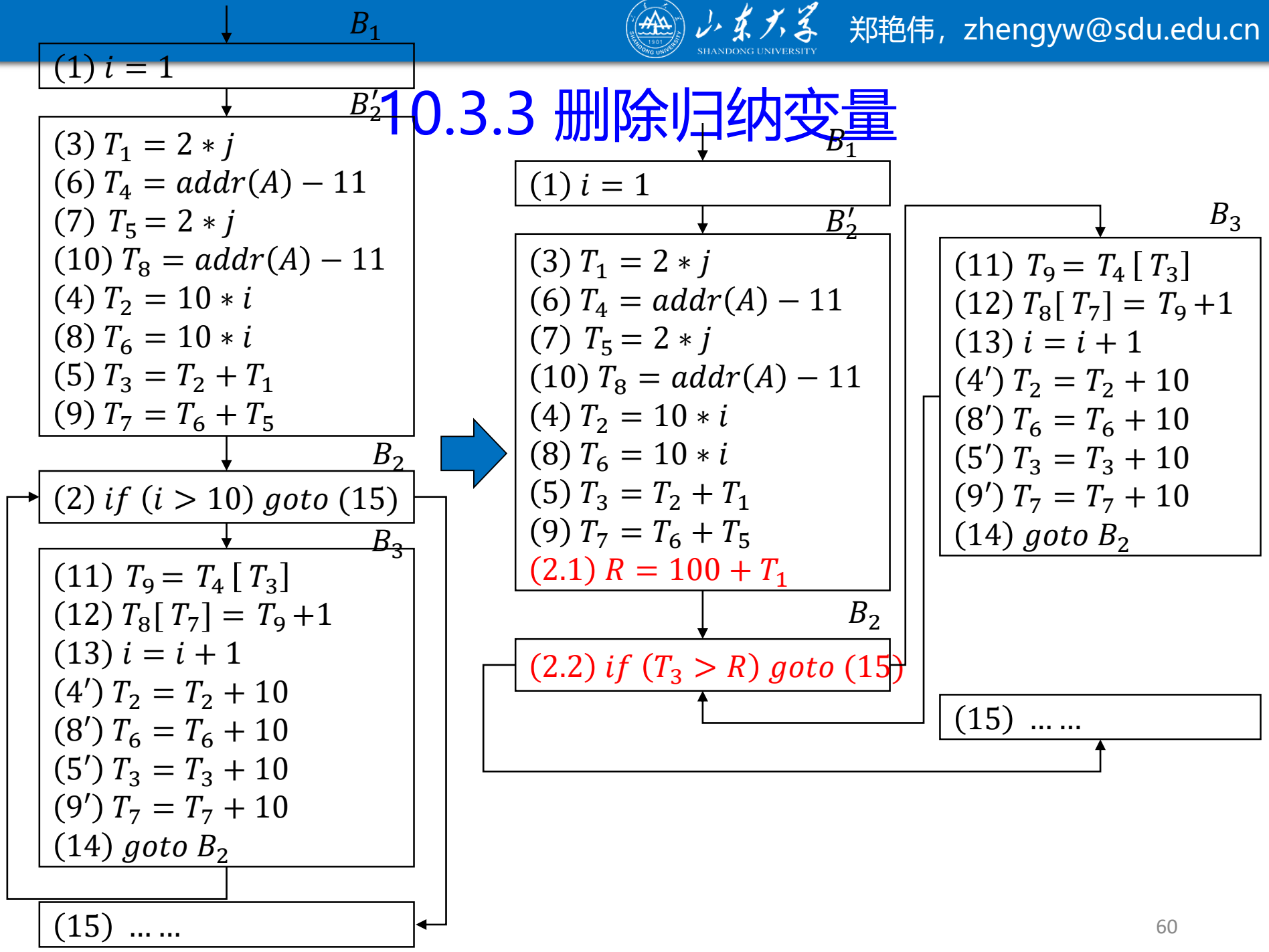


- 一个基本归纳变量除用于自身的递归定值外，往往只在循环中用来计算其它归纳变量，以及用来控制循环的进行。
  - 左图为强度削弱后，i只用来控制循环的进行。
- 考虑用与i同族的某一归纳变量替换循环中的控制条件。
  - 可选T_2, T_3, T_6, T_7。
  - 比如选 $T_3 = 10 * i + T_1$，所以：$i > 10 \Leftrightarrow T_3 > 100 + T_1$，因此可以替换为：

    2.1 $R = 100 + T_1$

    2.2 $if\ (T_3 > R)\ goto\ (15)$

10.3.3 删除归纳变量


B_1
(1) $i = 1$
B_2'
(3) $T_1 = 2 * j$
(6) $T_4 = addr(A) - 11$
(7) $T_5 = 2 * j$
(10) $T_8 = addr(A) - 11$
(4) $T_2 = 10 * i$
(8) $T_6 = 10 * i$
(5) $T_3 = T_2 + T_1$
(9) $T_7 = T_6 + T_5$
B_2
(2) $if\ (i > 10)\ goto\ (15)$
B_3
(11) $T_9 = T_4[T_3]$
(12) $T_8[T_7] = T_9 + 1$
(13) $i = i + 1$
(4′) $T_2 = T_2 + 10$
(8′) $T_6 = T_6 + 10$
(5′) $T_3 = T_3 + 10$
(9′) $T_7 = T_7 + 10$
(14) $goto\ B_2$
(15) ……
B_1
(1) $i = 1$
B_2'
(3) $T_1 = 2 * j$
(6) $T_4 = addr(A) - 11$
(7) $T_5 = 2 * j$
(10) $T_8 = addr(A) - 11$
(4) $T_2 = 10 * i$
(8) $T_6 = 10 * i$
(5) $T_3 = T_2 + T_1$
(9) $T_7 = T_6 + T_5$
(2.1) $R = 100 + T_1$
B_2
(2.2) $if\ (T_3 > R)\ goto\ (15)$
B_3
(11) $T_9 = T_4[T_3]$
(12) $T_8[T_7] = T_9 + 1$
(13) $i = i + 1$
(4′) $T_2 = T_2 + 10$
(8′) $T_6 = T_6 + 10$
(5′) $T_3 = T_3 + 10$
(9′) $T_7 = T_7 + 10$
(14) $goto\ B_2$
(15) ……

10.3.3 删除归纳变量

- 删除归纳变量在强度削弱以后进行，其统一框架为：

① 利用循环不变信息，找出循环中的所有基本归纳量。

② 找出所有其它归纳变量A，并找出A与已知基本归纳变量X的同族线性函数关系$F_A(X)$。

③ 对②中找出的每个归纳变量A，进行强度削弱。

④ 删除对归纳变量的无用赋值。

⑤ 删除基本归纳变量。如果基本归纳变量B在循环出口后不是活跃的，并且在循环中，除在自身的递归赋值被引用外，只在形如$if\ B\ \theta\ y\ goto\ L$中被引用，则可选取一与$B$同族的归纳变量$M$来替换$B$进行条件控制。最后删除循环中对$B$的递归赋值代码。

第十章 代码优化

10.4.1 任意路径数据流分析

- 全局数据流分析：分析数据的数值如何在基本块之间进行引用和修改。
  - 通常一个程序中基本块的确切执行次序不能预知，因此执行数据流分析时，假定流图中所有路径都可能执行。
- 以全局活跃变量分析为例-活跃变量集合定义
  - $LiveIn(B)$：基本块B入口处为活跃的变量的集合；
  - $LiveOut(B)$：基本块B出口处为活跃的变量的集合；
  - 令$S(B)$为流图中基本块B的后继的集合，则有：

$$LiveOut(B) = \bigcup_{B_i \in S(B)} LiveIn(B_i)$$

10.4.1 任意路径数据流分析

定值前引用变量集合

- $LiveUse(B)$：基本块B中被定值之前引用的变量集合，由B中的语句唯一确定。
- 如果$v \in LiveUse(B)$，则$v \in LiveIn(B)$，即$LiveIn(B) \supseteq LiveUse(B)$。

定值变量集合

- $Def(B)$：基本块B中被定值的变量集合，由B中的语句唯一确定。
- 如果$v \in LiveOut(B) \wedge v \notin Def(B)$，则$v \in LiveIn(B)$，即

$$LiveIn(B) \supseteq LiveOut(B) - Def(B)$$

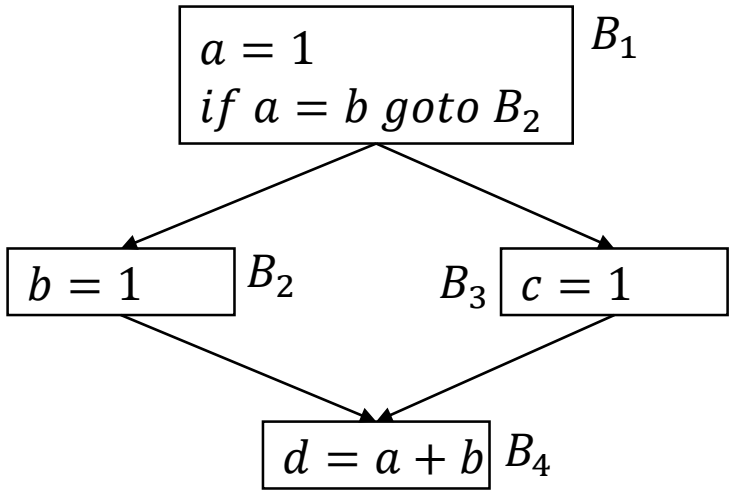
10.4.1 任意路径数据流分析

- 由基本块语句唯一确定的集合
  - $LiveUse(B)$：基本块B中被定值之前引用的变量集合；
  - $Def(B)$：基本块B中被定值的变量集合。
- 计算方程
  - $LiveOut(B) = \cup_{B_i \in S(B)} LiveIn(B_i)$，没有后继则为空。
  - $LiveIn(B) \supseteq LiveUse(B)$
  - $LiveIn(B) \supseteq LiveOut(B) - Def(B)$
- 求解
  - $LiveIn(B) = LiveUse(B) \cup (LiveOut(B) - Def(B))$
- 求解方向
  - 反向流(backward-flow)：信息流的方向与控制流相反
  - 前向流(forward-flow)：信息流的方向与控制流一致

10.4.1 任意路径数据流分析

【例10.17】程序段

```
a = 1;
if a = b then b = 1;
else c = 1;
d = a + b;
```



基本块	Def	LiveUse
B_1	$\{a\}$	$\{b\}$
B_2	$\{b\}$	ϕ
B_3	$\{c\}$	ϕ
B_4	$\{d\}$	$\{a,b\}$

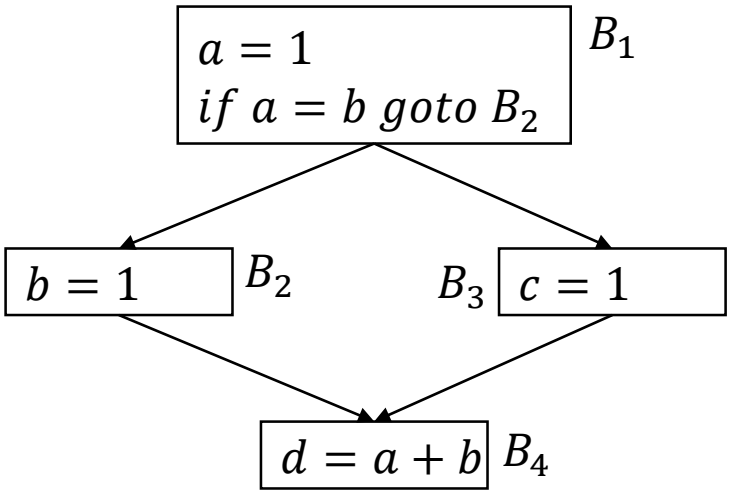
基本块	LiveIn	LiveOut
B_1	$\{b\}$	$\{a,b\}$
B_2	$\{a\}$	$\{a,b\}$
B_3	$\{a,b\}$	$\{a,b\}$
B_4	$\{a,b\}$	ϕ

- $LiveIn(B_4) = LiveUse(B_4) \cup (LiveOut(B_4) - Def(B_4)) = \{a,$
- $LiveOut(B_2) = LiveIn(B_4) = \{a,b\}$
- $LiveOut(B_3) = LiveIn(B_4) = \{a,b\}$
- $LiveIn(B_2) = LiveUse(B_2) \cup (LiveOut(B_2) - Def(B_2)) = \{a\}$
- $LiveIn(B_3) = LiveUse(B_3) \cup (LiveOut(B_3) - Def(B_3)) = \{a,b\}$
- $LiveOut(B_1) = LiveIn(B_2) \cup LiveIn(B_3) = \{a,b\}$
- $LiveIn(B_1) = LiveUse(B_1) \cup \big(LiveOut(B_1) - Def(B_1)\big) = \{b\} \cup (\{a,b\} - \{a\}) = \{b\}$

10.4.1 任意路径数据流分析

【例10.17】程序段

```
a = 1;
if a = b then b = 1;
else c = 1;
d = a + b;
```



基本块	Def	LiveUse
B_1	$\{a\}$	$\{b\}$
B_2	$\{b\}$	ϕ
B_3	$\{c\}$	ϕ
B_4	$\{d\}$	$\{a,b\}$

基本块	LiveIn	LiveOut
B_1	$\{b\}$	$\{a,b\}$
B_2	$\{a\}$	$\{a,b\}$
B_3	$\{a,b\}$	$\{a,b\}$
B_4	$\{a,b\}$	ϕ

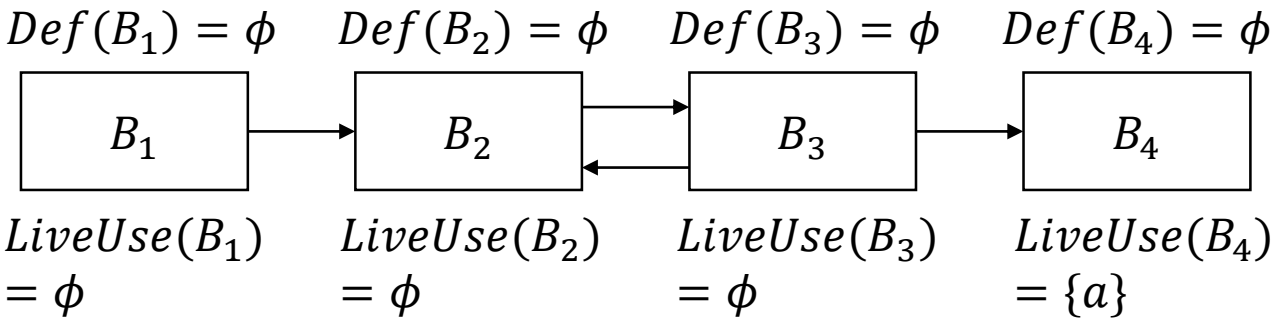
- 活跃变量分析的另一种用法
  - $LiveIn(B_1)=\{b\}$：变量在程序起始基本块的入口处是活跃的，则变量可能在定值之前被引用。

10.4.1 任意路径数据流分析

- 如果规定流图只有一个唯一的开始结点（无前驱），并且有一个或多个结束结点（无后继），则数据流方程是可解的。
  - 从基本块所产生的值$LiveUse$开始；
  - 这些值反向传播；
  - 除掉基本块内死了的值（Def）；
  - 一直迭代直到求出所有集合。

10.4.1 任意路径数据流分析

【例10.18】数据流问题的解不唯一



- 一个明显的解：$LiveIn(B_i) = \{a\}$
- 一个不太合理的解

基本块	LiveIn	LiveOut
B_1	$\{a, b\}$	$\{a, b\}$
B_2	$\{a, b\}$	$\{a, b\}$
B_3	$\{a, b\}$	$\{a, b\}$
B_4	$\{a\}$	ϕ

10.4.1 任意路径数据流分析

- 数据流方程的两个观点
  - 悲观观点：如果在所有后继结点中没有看到明显的定值，就认为这些变量是活跃的；
  - 乐观观点：只有看到一个变量在某个后继基本块中被引用了，才认为这个变量是活跃的。
  - 乐观观点是最小有效解。就优化目的而言，最小有效解是合理的，因为活跃变量的值要保存，而死变量的值可以忽略。

10.4.1 任意路径数据流分析

- 前向数据流分析：变量初始化检测问题
  - $UninitIn(B)$：基本块B入口处可能未被初始化的变量集，如果一个基本块没有前驱，则其$UninitIn$集合包含所有变量；
  - $UninitOut(B)$：基本块B出口处可能未被初始化的变量集。
  - 令$P(B)$为流图中基本块B的前驱的集合，则有：

$$UninitIn(B) = \bigcup_{B_i \in P(B)} UninitOut(B_i)$$

10.4.1 任意路径数据流分析

- 初始化变量集合
  - $Init(B)$：在B的出口处已被初始化的变量集合。
  - $UninitOut(B) \supseteq UninitIn(B) - Init(B)$
- 基本块中变为未初始化集合$Uninit(B)$
  - 被赋予一个非法值，如$null$；
  - 一个操作的副作用，如释放一个对象；
  - 刚刚建立一个变量。
  - 显然：$UninitOut(B) \supseteq Uninit(B)$

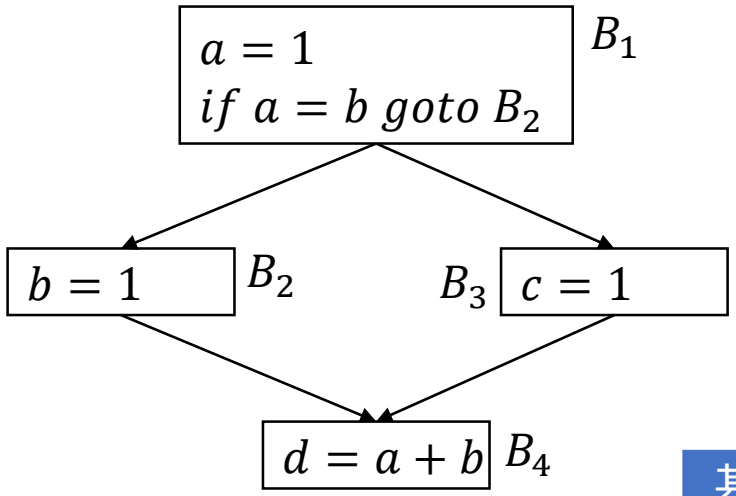
10.4.1 任意路径数据流分析

- 由基本块语句唯一确定的集合
  - $Init(B)$：在B中被初始化的变量集合；
  - $Uninit(B)$：在B中变为未初始化的变量集合。
- 计算方程
  - $UninitIn(B) = \cup_{B_i \in P(B)} UninitOut(B_i)$，没有前驱则包含所有变量。
  - $UninitOut(B) \supseteq UninitIn(B) - Init(B)$
  - $UninitOut(B) \supseteq Uninit(B)$
- 求解
  - $UninitOut(B) = Uninit(B) \cup (UninitIn(B) - Init(B))$

10.4.1 任意路径数据流分析

【例10.18】程序段

```
a = 1;
if a = b then b = 1;
else c = 1;
d = a + b;
```



基本块	Init	Uninit
B_1	$\{a\}$	ϕ
B_2	$\{b\}$	ϕ
B_3	$\{c\}$	ϕ
B_4	$\{d\}$	ϕ

基本块	UninitIn	UninitOut
B_1	$\{a,b,c,d\}$	$\{b,c,d\}$
B_2	$\{b,c,d\}$	$\{c,d\}$
B_3	$\{b,c,d\}$	$\{b,d\}$
B_4	$\{b,c,d\}$	$\{b,c\}$

- $UninitIn(B_1) = \{a,b,c,d\}$
- $UninitOut(B_1) = Uninit(B_1) \cup (UninitIn(B_1) - Init(B_1))$
- $UninitIn(B_2) = UninitOut(B_1) = \{b,c,d\}$
- $UninitOut(B_2) = Uninit(B_2) \cup (UninitIn(B_2) - Init(B_2))$
- $UninitIn(B_3) = UninitOut(B_1) = \{b,c,d\}$
- $UninitOut(B_3) = Uninit(B_3) \cup (UninitIn(B_3) - Init(B_3)) = \{b,d\}$
- $UninitIn(B_4) = UninitOut(B_2) \cup UninitOut(B_3) = \{b,c,d\}$
- $UninitOut(B_4) = Uninit(B_4) \cup (UninitIn(B_4) - Init(B_4)) = \{b,c\}$

第十章 代码优化

10.4.2 全路径数据流分析

- 任意路径问题：存在某条路径为真，则问题为真。
  - 活跃变量检测：存在某条路径上变量被引用，则认为变量是活跃的。
  - 变量未初始化检测：存在任何一条路径上变量没有适当初始化，就认为这个变量是未初始化的。
- 全路径问题：所需性质需要在所有路径上都满足。
  - 确定表达式的可用性（availability），是一个全路径前向数据流问题。
  - 称表达式是可用的（available），如果它已经被计算且重新计算是多余的；即在点p上，x op y已经在之前被计算过，不需要重新计算。
  - 可用性信息对实现全局公共子表达式优化非常重要。

10.4.2 全路径数据流分析

- 确定基本块内对表达式的计算，在基本块出口处是否可用。
  - $RelVar(T)$：表达式计算的相关变量集合，把它与临时变量T关联起来。
  - 函数$ComputeRelVar(T)$：递归的把临时变量替换为计算这个临时变量的变量和临时变量，直到只剩下变量。

function ComputeRelVar(T)

{

$RealVar(T) = \{T\}$;

while 存在临时变量$T' \in RealVar(T)$

把$RealVar(T)$中的T'替换为计算T'的变量和临时变量;

}

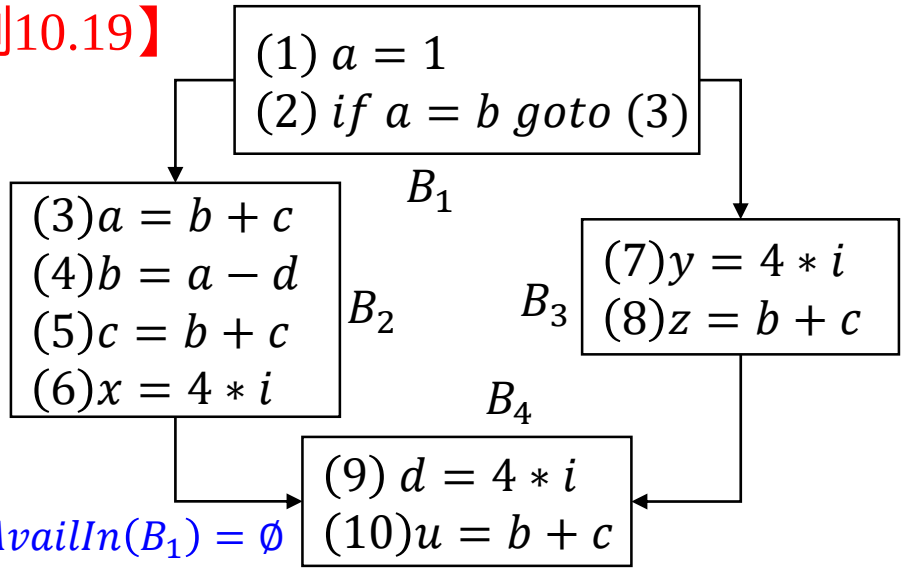
10.4.2 全路径数据流分析

- 可用临时变量集合
  - $AvailOut(B)$：在B的出口处可用的表达式集合；
  - $AvailIn(B)$：在B的入口处可用的表达式集合，第一个基本块入口处无可用表达式；
  - $AvailIn(B) = \cap_{B_i \in P(B)} AvailOut(B_i)$，其中$P(B)$是$B$的前驱集合。
- 基本块语句唯一确定的集合
  - $Kill(B)$： U中在基本块B内对相关变量赋值而被杀死的表达式集合；
  - $Gen(B)$：在基本块B内生成的（被计算而且没被杀死）表达式集合；
- 求解
  - $AvailOut(B) = Gen(B) \cup (AvailIn(B) - Kill(B))$

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

10.4.2 全路径数据流分析

【例10.19】



基本块	Kill	Gen
B_1	{4}	{1}
B_2	{1,3,4,5,8,10}	{4,6}
B_3	ϕ	{7,8}
B_4	{4}	{9,10}

- $AvailIn(B_1) = \emptyset$
- $AvailOut(B_1) = Gen(B_1) \cup (AvailIn(B_1) - Kill(B_1)) = \{1\}$
- $AvailIn(B_2) = AvailOut(B_1) = \{1\}$
- $AvailOut(B_2) = Gen(B_2) \cup (AvailIn(B_2) - Kill(B_2)) = \{a - d, 4 * i\}$
- $AvailIn(B_3) = AvailOut(B_1) = \{1\}$
- $AvailOut(B_3) = Gen(B_3) \cup (AvailIn(B_3) - Kill(B_3)) = \{1, 4 * i, b + c\}$
- $AvailIn(B_4) = AvailOut(B_2) \cap AvailOut(B_3) = \{4 * i\}$
- $AvailOut(B_4) = Gen(B_4) \cup (AvailIn(B_4) - Kill(B_4)) = \{4 * i, b + c\}$

10.4.2 全路径数据流分析

- 反向全路径数据流分析：确定非常忙表达式
  - 非常忙表达式：表达式在被杀死之前，所有路径上都要引用这个表达式的值；
  - 非常忙表达式为寄存器分配的主要候选，因为知道它的值是必须要引用点；
  - 非常忙表达式也用于指导代码外提。

10.4.2 全路径数据流分析

- 由基本块语句唯一确定的集合
  - $Used(B)$：在B中被杀死之前引用点表达式集合；
  - $Killed(B)$：在B中被引用之前杀死了的表达式集合。
- 计算方程
  - $VeryBusyOut(B)$，在基本块B的出口处非常忙的表达式集合；
  - $VeryBusyIn(B)$，在基本块B的入口处非常忙的表达式集合；
  - $VeryBusyOut(B) = \cap_{B_i \in S(B)} VeryBusyIn(B_i)$
- 求解
  - $VeryBusyIn(B) = Used(B) \cup (VeryBusyOut(B) - Killed(B))$

第十章 代码优化

10.4.3 数据流问题的分类

数据流问题的四个集合

- $Gen(B)$：在B中生成的集合，由基本块语句唯一确定；
- $Killed(B)$：在B中被杀死的集合，由基本块语句唯一确定；
- $In(B)$：B的入口处的集合，前向流需要确定开始基本块的该集合；
- $Out(B)$：B的出口处的集合，反向流需要确定结束基本块的该集合。

	前向流	反向流
任意路径	$Out(B) = Gen(B) \cup (In(B) - Killed(B))$ $In(B) = \bigcup_{B_i \in P(B)} Out(B_i)$	$In(B) = Gen(B) \cup (Out(B) - Killed(B))$ $Out(B) = \bigcup_{B_i \in S(B)} In(B_i)$
全路径	$Out(B) = Gen(B) \cup (In(B) - Killed(B))$ $In(B) = \bigcap_{B_i \in P(B)} Out(B_i)$	$In(B) = Gen(B) \cup (Out(B) - Killed(B))$ $Out(B) = \bigcap_{B_i \in S(B)} In(B_i)$

第十章 优化

引用-定值链（UD链）

- 到达定值集合：一个变量v的定值到达v的某个引用点，如果存在一条从v的这个定值到引用点的路径，并且中间没有对v的重新定值。
  - 规则1：在基本块B中，变量A的引用点u之前有A的定值点d，且d点所定A值能到达点u，则A在u点的UD链为$\{d\}$。
  - 规则2：在基本块B中，变量A的引用点u之前没有A的定值点，则包含在$In(B)$中的全部A的定值点均可到达u，故$In(B)$中的这些A的定值点组成A在u点的UD链。
- 引用-定制链问题为前向流问题
  - $Gen(B)$：出现在B中且到达基本块尾的定值，由基本块语句唯一确定；
  - $Killed(B)$：出现在B中排除掉$Gen(B)$的定值，擦掉了被基本块内局部定值取代了的那些定值，由基本块语句唯一确定；
  - $In(B)$：B的入口处的集合，第一个基本块的该集合为空；
  - $Out(B)$：B的出口处的集合。

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

定值-引用链（DU链）

- 定值-引用链：一个变量A的定值点p，从p出发能到达的全部A的引用点组成的集合，称为A在定值点P的定值-引用链，简称DU链。
- 定制-引用链问题为反向流问题
  - $Gen(B)$：形如(s, A)的元素，其中s是变量A在基本块B中点引用点，且从B的入口点到s之前无变量A的定值点；
  - $Killed(B)$： 形如(s, A)的元素，其中变量A是在基本块B中定值，而s是基本块B外变量A的引用点；
  - $In(B)$：B的入口处的、可能引用变量当前值的那些中间代码集合；
  - $Out(B)$：B的出口处的、可能引用变量当前值的那些中间代码集合，最后一个基本块的该集合为空。

第十章 代码优化

- 10.1 概述
- 10.2 局部优化
  - 10.2.1 基本块及流图
  - 10.2.2 基本块的DAG表示及其应用
- 10.3 循环优化
  - 10.3.1 代码外提
  - 10.3.2 强度削弱
  - 10.3.3 删除归纳变量
- 10.4 数据流分析
  - 10.4.1 任意路径数据流分析
  - 10.4.2 全路径数据流分析
  - 10.4.3 数据流问题的分类
  - 10.4.4 其它主要数据流问题
  - 10.4.5 利用数据流信息进行全局优化

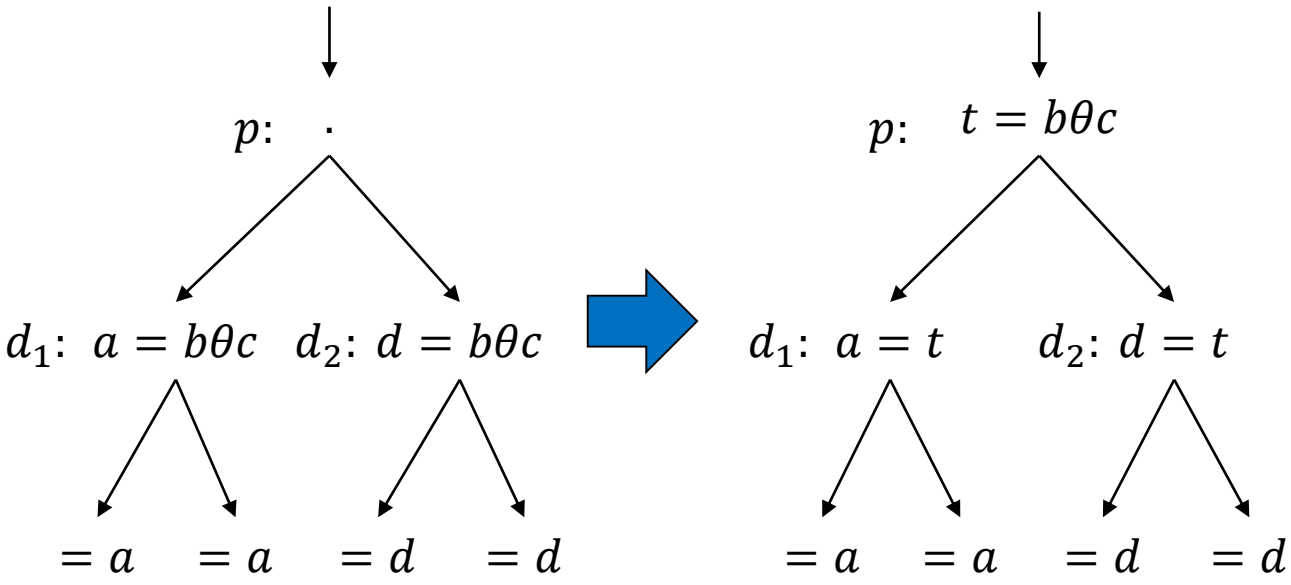
10.4.5 利用数据流信息进行全局优化

	前向流		反向流	
	问题	初始值	问题	初始值
任意路径	到达定值（UD链）	ø	活跃变量	ø
	未初始化变量	所有变量	DU链	ø
全路径	有效表达式	ø	非常忙表达式	ø
	复写传播	ø		

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

非常忙表达式

- 非常忙表达式：如果从程序中某点p开始的任何一条通路上，在对b或c进行定值前，都要计算表达式$b\ \theta\ c$，则称表达式在p点非常忙。
  - 非常忙的循环不变运算是代码外提到极好候选；
  - 非常忙表达式可以用来进行代码提升。

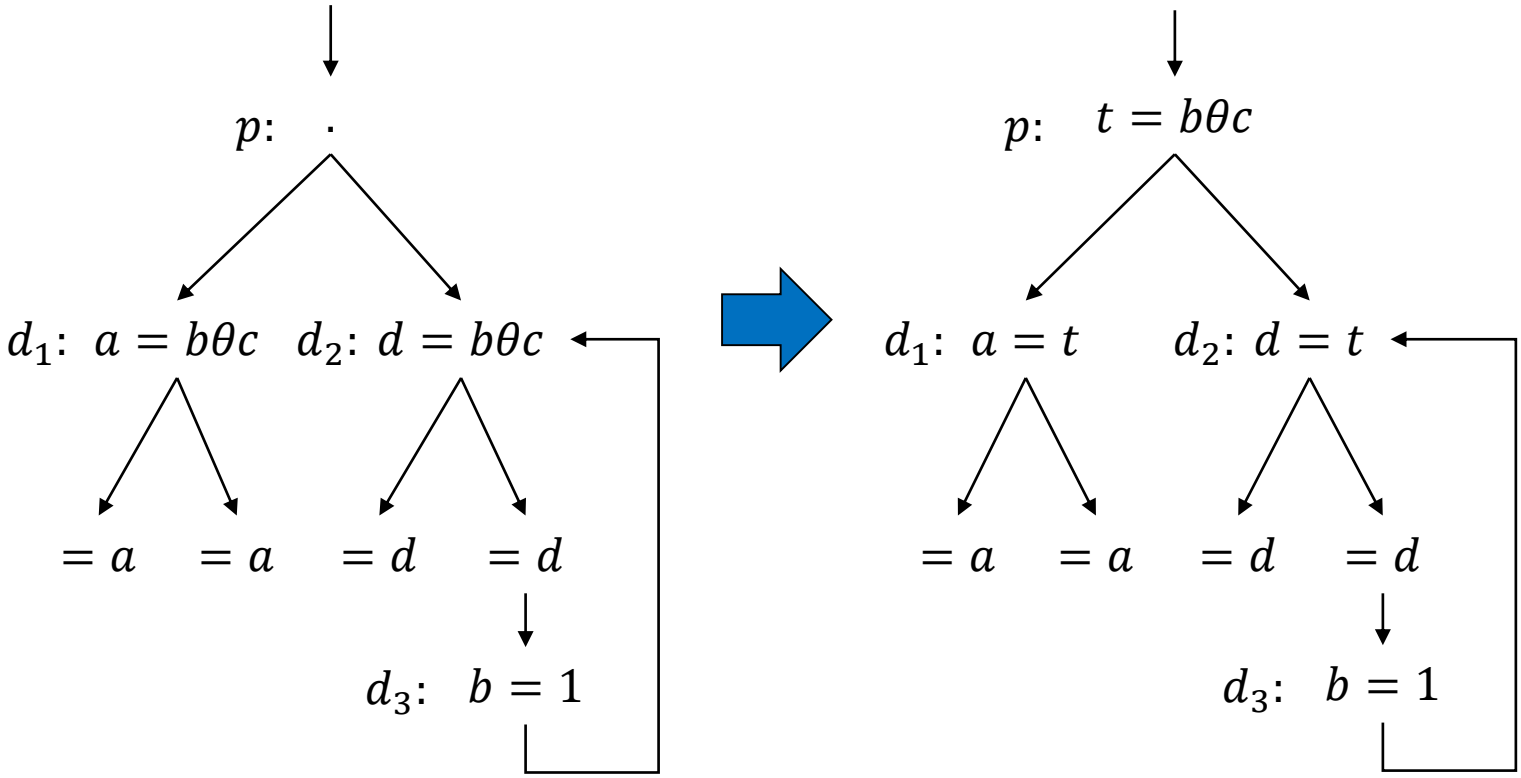


这步本身未使程序得到改善，但为复写传播优化提供了基础。

郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

非常忙表达式

- 该变换不能保证变换后的程序与变换前的程序等价。



对变换的每一$(d)a = b\theta c$，除了$b\theta c$在点p非常忙的条件外，还要求任何能到达d的b和c的定值，必须首先经过p。

删除全局公共子表达式

```
procedure RemoveGlobalCSEs()
{
    计算全局公共子表达式集合GlobalCSE;
    foreach 表达式E in GlobalCSE
    {
        对E进行可用表达式数据流分析;
        给E分配一个临时单元，记作t(E);
    }

    foreach 基本块B
        foreach 表达式E in GlobalCSE
            if E ∈ B ∧ E在B的入口处可用
                删除B中E的第一次计算，并把它替换为引用t(E)。
}
```

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

活跃变量分析

```
procedure RemoveDeadStores() // 删除死变量赋值
{
    foreach 基本块B
        foreach 代表变量或公共子表达式的单元v
        {
            if B中对v的赋值是在所有对v的引用之后
                对v进行活跃变量分析;
            if B出口处v不再活跃
                从B中删除对v的赋值;
        }
}
```

山东大学 SHANDONG UNIVERSITY 郑艳伟，zhengyw@sdu.edu.cn

未初始化变量分析

```
procedure FindUninitializedVars()
{
    进行未初始化变量数据流分析;
    foreach 基本块B
        for B中变量v的每次使用
        {
            if ((这是B中v的第一次引用 且 在B的入口处v未初始化)
                or (v的最后一次引用使v变为未初始化) )
                发出v未被初始化的警告;
        }
}
```

常量传播和复写传播

```
procedure Propagate()
{
    进行到达定值数据流分析;
    进行UD链数据流分析;
    进行复写传播数据流分析;
    标记程序中所有变量引用;

    for 变量v的每个被标记的引用
        去掉v的这个引用标记;
        if 到达v的这个引用的唯一定值为v = c，这里c为常量 {
            用c代替v的这个引用，并尽量简化表达式;
            if 这个替换和简化建立了一个常量赋值x = k {
                用x = k代替原来的赋值;
                标记这个赋值可以到达的x的所有引用;
            }
            从v = c的DU链中去掉对v的这个引用;
        }
```

常量传播和复写传播

else if 复写传播分析表明到达v的这个引用的唯一定值为$v = x$，这里x为变量
{
用x代替v的这个引用;
从$v = x$的DU链中去掉对v的这个引用;
}

for 变量v的每个定值
if 这个定值的所有引用都因常量或复写传播而消除
从程序中删除这个定值;

for 每个变量
if 这个变量的所有引用已被消除
从程序中删除这个变量;
}

山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

第十章 优化

The End

谢谢

授 课 教 师 ：郑艳伟

手 机 ：18614002860（微信同号）

邮 箱 ：zhengyw@sdu.edu.cn