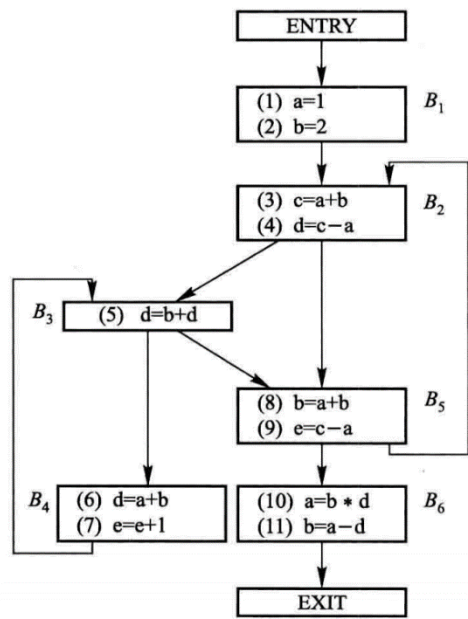


9.1 对于本题中的流图，回答下列问题：

- (a) 识别该流图中的循环。
- (b) 块 B_1 中的语句 (1) 和 (2) 都是复写语句，并且它们给 a 和 b 赋的都是常量。可以对 a 和 b 的哪些引用实施复写传播并将这些引用替换成对常量的引用？
- (c) 识别每个循环的全局公共子表达式。
- (d) 识别每个循环的归纳变量，不要忘记把 (b) 的复写传播引入的常量考虑进去。
- (e) 识别每个循环的不变计算。



解： 对每一问分析如下

- (a) 列表如下， 参考幻灯片 15 页循环的定义。

循环

□流图中的一个结点集合L是一个循环，如果它满足：

- ✧该集合有唯一的入口结点
- ✧任意结点都有一个到达入口结点的非空路径，且该路径全部在L中

□不包含其他循环的循环叫做内循环

□右图中的循环

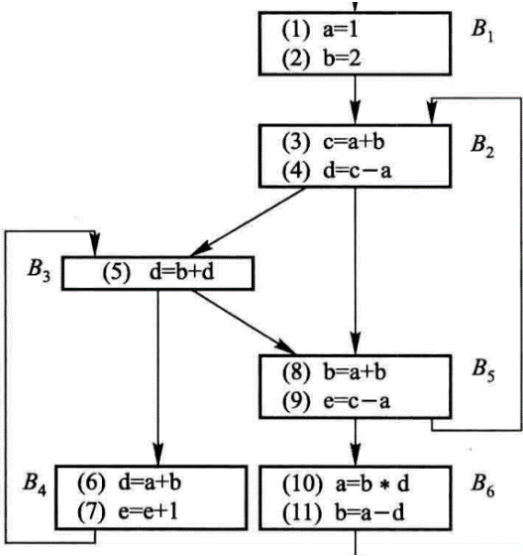
- ✧ B_2 自身
- ✧ B_3 自身
- ✧ $\{B_2, B_3, B_4, B_5\}$

循环节点集合 L	唯一的入口节点
$\{B_2, B_5\}$	B_2
$\{B_3, B_4\}$	B_2
$\{B_2, B_3, B_5\}$	B_2
$\{B_2, B_3, B_4, B_5\}$	B_2

- (b) 只有对那些在引用时， 沿任意一条可能的路径都不会对 a 或 b 重新赋值的引用点才可以实施复写传播。在本例中， 循环中没有对 a 赋值的语句， 但是语句 (8) 对 b 重新定值， 因此循环内以及循环以下都不能对 b 实施复写传播， 即本例(2)中定值的 b 不能在任意一处引用时采用复写传播； 而语句 (10) 对 a 定值， 它在循环外， 因而可以对 a 采取复写传播的语句有： (3)(4)(6)(8)(9)

复写语句	可实施复写传播的语句
(1) $a = 1$	(3)(4)(6)(8)(9)
(2) $b = 2$	无

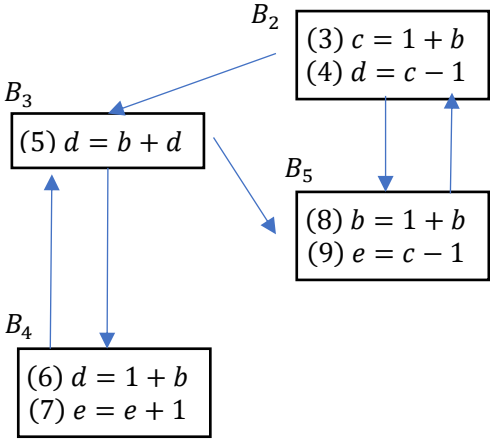
- (c) 对每个循环分别分析即可， 找出表达式右值的相同形式并判断到执行点时是否改变。列表如下：



B_2 是这四个循环的入口， 支配 B_3, B_4

循环节点集合 L	全局公共子表达式
$\{B_2, B_5\}$	(8)(9)
$\{B_3, B_4\}$	(6)
$\{B_2, B_3, B_5\}$	(8)(9)
$\{B_2, B_3, B_4, B_5\}$	(6)(8)(9)

- (d) 只需要在每个循环内找循环一轮后值+1 的变量即可。作出复写传播后的循环流图， 列表如下：



循环节点集合 L	归纳变量
$\{B_2, B_5\}$	c, d, b, e
$\{B_3, B_4\}$	e
$\{B_2, B_3, B_5\}$	c, b, e
$\{B_2, B_3, B_4, B_5\}$	c, b

- (e) 对于本题的四个循环, 显然只有 $\{B_3, B_4\}$ 中的 (5)(6) 是循环不变计算, 每次得到的结果都是相同的。在其他循环中没有循环不变计算。

9.2 对右图所示的计算向量 A 和 B 点积的中间代码完成下列优化：

删除公共子表达式、归纳变量上的强度削弱、尽量删除归纳变量。

解：每一步的操作如下所示：

标记公共子表达式

```
dp = 0
i = 0
L:
t1 = i * 8
t2 = A[t1]
t3 = i * 8
t4 = B[t3]
t5 = t2 * t4
dp = dp + t5
i = i + 1
if i < n goto (L)
```

删除公共子表达式

```
dp = 0
i = 0
L:
t1 = i * 8
t2 = A[t1]
t4 = B[t1]
t5 = t2 * t4
dp = dp + t5
i = i + 1
if i < n goto (L)
```

归纳变量上的强度削弱

```
dp = 0
i = 0
t1 = i * 8
L:
t2 = A[t1]
t4 = B[t1]
t5 = t2 * t4
dp = dp + t5
i = i + 1
t1 = t1 + 8
t6 = n * 8
if t1 < t6 goto (L)
```

尽量删除归纳变量

```
dp = 0
t1 = 0
t6 = n * 8
L:
t2 = A[t1]
t4 = B[t1]
t5 = t2 * t4
dp = dp + t5
t1 = t1 + 8
if t1 < t6 goto (L)
```

```
dp=0
i=0
L:
t1=i*8
t2=A[t1]
t3=i*8
t4=B[t3]
t5=t2*t4
dp=dp+t5
i=i+1
if i<n goto L
```

图 9.33 计算点积的中间代码

9.3 对给出的流图，计算：

- (a) 为到达-定值分析，计算每个块的 gen 、 $kill$ 、IN、OUT 集合。
- (c) 为活跃变量分析，计算每个块的 def 、 use 、IN、OUT 集合。

解：对两问分别分析：记标号 (i) 的语句为 d_i ，与教材相对应。

(a) 到达-定值分析求 IN、OUT 集合算法如下：

$$\begin{aligned} \text{OUT}[\text{ENTRY}] &= \emptyset \\ \text{OUT}[B] &= gen[B] \cup (\text{IN}[B] - kill[B]) \\ \text{IN}[B] &= \cup_{P \text{ 是 } B \text{ 的前驱}} \text{OUT}[P] \end{aligned}$$

列表如下：IN,OUT 集合按照所属块插入了空格。

块	gen	$kill$	IN ¹	OUT ¹	IN ²	OUT ²	IN ³	OUT ³
B_1	d_1, d_2	d_8, d_{10}, d_{11}	00 00 0 00 00 00	11 00 0 00 00 00	00 00 0 00 00 00	11 00 0 00 00 00	00 00 0 00 00 00	11 00 0 00 00 00
B_2	d_3, d_4	d_5, d_6	11 00 0 00 00 00	11 11 0 00 00 00	11 11 1 00 11 00	11 11 0 00 11 00	11 11 1 00 11 00	11 11 0 00 11 00
B_3	d_5	d_4, d_6	11 11 0 00 00 00	11 10 1 00 00 00	11 11 0 11 11 00	11 10 1 01 11 00	11 11 0 11 11 00	11 10 1 01 11 00
B_4	d_6, d_7	d_4, d_5, d_9	11 10 1 00 00 00	11 10 0 11 00 00	11 10 1 01 11 00	11 10 0 11 10 00	11 10 1 01 11 00	11 10 0 11 10 00
B_5	d_8, d_9	d_2, d_7, d_{11}	11 11 1 00 00 00	10 11 1 00 11 00	11 11 1 01 11 00	10 11 1 00 11 00	11 11 1 01 11 00	10 11 1 00 11 00
B_6	d_{10}, d_{11}	d_1, d_2, d_8	10 11 1 00 11 00	00 11 1 00 01 11	10 11 1 00 11 00	00 11 1 00 01 11	10 11 1 00 11 00	00 11 1 00 01 11

计算发现第二、三次迭代后 IN、OUT 集合已经不变，因此最后一次求出的结果就是题中要求结果。

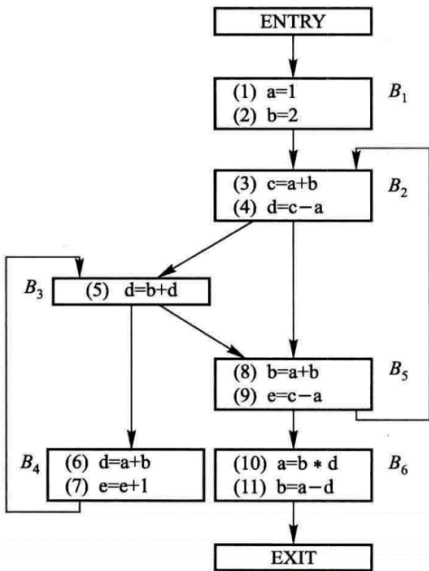
(c) 活跃变量分析求 IN、OUT 集合算法如下：

$$\begin{aligned} \text{IN}[\text{EXIT}] &= \emptyset \\ \text{OUT}[B] &= \cup_{S \text{ 是 } B \text{ 的后继}} \text{IN}[S] \\ \text{IN}[B] &= use[B] \cup (\text{OUT}[B] - def[B]) \end{aligned}$$

先计算 OUT 再计算 INT，先计算下方的块再计算上方的块。

块	use	def	OUT ¹	IN ¹	OUT ²	IN ²	OUT ³	IN ³
B_1	/	a, b	a, b, e	e	a, b, e	e	a, b, e	e
B_2	a, b	c, d	a, b, c, d, e	a, b, e	a, b, c, d, e	a, b, e	a, b, c, d, e	a, b, e
B_3	b, d	/	a, b, c, d, e	a, b, c, d, e	a, b, c, d, e	a, b, c, d, e	a, b, c, d, e	a, b, c, d, e
B_4	a, b, e	d	/	a, b, e	a, b, c, d, e	a, b, c, e	a, b, c, d, e	a, b, c, e
B_5	a, b, c	e	b, d	a, b, c, d	a, b, d, e	a, b, c, d	a, b, d, e	a, b, c, d
B_6	b, d	a	/	b, d	/	b, d	/	b, d

最后一次迭代已经得到不变的结果，因此这就是最终要求的结果。



活跃变量分析

定义

- ❖ x 的值在 p 点开始的某条执行路径上被引用，则说 x 在 p 点活跃，否则称 x 在 p 点已经死亡
- ❖ $\text{IN}[B]$ ：块 B 开始点的活跃变量集合
- ❖ $\text{OUT}[B]$ ：块 B 结束点的活跃变量集合
- ❖ use_B ：块 B 中有引用，且在引用前在 B 中没有被定值的变量集
- ❖ def_B ：块 B 中有定值，且该定值前在 B 中没有被引用的变量集

活跃变量的迭代计算算法

输入：流图 G ，其中每个基本块 B 的 use 和 def 都已计算

输出： $\text{IN}[B]$ 和 $\text{OUT}[B]$

$\text{IN}[\text{EXIT}] = \emptyset;$

for (除了 EXIT 以外的每个块 B) $\text{IN}[B] = \emptyset;$

while (某个 IN 值出现变化) {

for (除了 EXIT 以外的每个块 B) {

$\text{OUT}[B] = \cup_{S \text{ 是 } B \text{ 的后继}} \text{IN}[S]$

$\text{IN}[B] = use_B \cup (\text{OUT}[B] - def_B);$

}

}

2018/12/6

Cheng @ Compiler USTC, Fall 2020

56