



静态类型检查

李 诚

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

计算机科学与技术学院

2023年11月22日

▣ 变量的类型

- 限定了变量在程序执行期间的取值范围和存储空间消耗

▣ 类型化的语言(typed language)

- 变量都被给定类型的语言
- 表达式、语句等程序构造的类型都可以静态确定，运行时不需要额外的操作

▣ 未类型化的语言(untyped language)

- 不限制变量值范围的语言,如JavaScript、Perl

□ 静态的语义分析

■ 类型检查

利用**逻辑规则**分析运算分量的类型与运算符预期是否匹配？

□ 中间代码生成

■ 声明语句的翻译

■ 数组寻址的翻译

■ 类型转换

- 通过声明语句**收集**变量或函数的类型
- **计算**所占存储空间
- **分配**相对地址
- 类型**转换**适配指令选择

□ 类型表达式

- 类型的结构

层次一：形式化描述类型结构

□ 类型等价

- 结构等价和名字等价

层次二：判定两个类型相同的依据

□ 类型检查

- 语法制导翻译方案实现
- 函数和算符的重载

层次三：定义一组逻辑规则检查语句或者表达式中是否存在类型错误

□ 其他知识点

- 类型可以是语法的一部分，因此也是结构的

考虑以下文法，**D代表声明语句**，S代表一般语句

$$P \rightarrow D ; S$$
$$D \rightarrow D ; D \mid \text{id} : T$$
$$T \rightarrow \text{boolean} \mid \text{integer} \mid \text{array} [\text{num}] \text{ of } T \mid \uparrow T \mid T \xrightarrow{\text{blue}} T$$

类型表达式 (Type expression)



- 类型可以是语法的一部分，因此也是结构的

考虑以下文法，**D**代表声明语句，**S**代表一般语句

$$P \rightarrow D ; S$$
$$D \rightarrow D ; D \mid \text{id} : T$$
$$T \rightarrow \text{boolean} \mid \text{integer} \mid \text{array} [\text{num}] \text{ of } T \mid \uparrow T \mid T \text{ '}\rightarrow\text{' } T$$

数组

指针

函数

基本类型

复杂且可组合的类型

类型表达式 (Type expression)



■ 基本类型是类型表达式

■ *integer*

■ *real*

■ *char*

■ *boolean*

■ *type_error* // 出错类型

■ *void* // 无类型

在类型检查中
传递错误

语句的类型

- ❑ 基本类型是类型表达式
- ❑ 可为类型表达式命名，类名也是类型表达式
- ❑ 将类型构造算子(type constructor)作用于类型表达式可以构成新的类型表达式
 - 数组类型构造算子 *array*
 - 指针类型构造算子 *pointer*
 - 笛卡尔乘积类型构造算子 \times
 - 函数类型构造算子 \rightarrow
 - 记录类型构造算子 *record*
 - 若有标识符 N_1, N_2, \dots, N_n 以及对应的类型表达式 T_1, T_2, \dots, T_n ，则 $record((N_1 \times T_1) \times (N_2 \times T_2) \times \dots \times (N_n \times T_n))$ 也是类型表达式

□ 类型表达式

- 类型的结构

层次一：形式化描述类型结构

□ 类型等价

- 结构等价和名字等价

层次二：判定两个类型相同的依据

□ 类型检查

- 语法制导翻译方案实现
- 函数和算符的重载

层次三：定义一组逻辑规则检查语句或者表达式中是否存在类型错误

□ 其他知识点

□ 两个类型表达式完全相同 (当无类型名时)

- 类型表达式树一样

- 相同的类型构造符作用于相同的子表达式

```
type link = ↑cell;
```

```
var  next : link;
```

```
last  : link;
```

```
p      : ↑cell;
```

```
q, r   : ↑cell;
```

- ❑ 两个类型表达式完全相同（当无类型名时）
- ❑ 有类型名时，用它们所定义的类型表达式**代换它们**，所得表达式完全相同（类型定义无环时）

```
type link = ↑cell;
```

```
var  next : link;
```

```
    last  : link;
```

```
    p     : ↑cell;
```

```
    q, r  : ↑cell;
```

这里隐藏了递归检查，因此暂时不考虑有环的情况

next, last, p, q和r结构等价

结构等价 (Structural equivalence)



function **sequiv**(s, t) : **boolean**

{if s 和 t 是相同的基本类型 **then**

return true

else if $s == \text{array}(s_1, s_2)$ and $t == \text{array}(t_1, t_2)$ **then**

return sequiv(s_1, t_1) and sequiv(s_2, t_2)

else if $s == s_1 \times s_2$ and $t == t_1 \times t_2$ **then**

return sequiv(s_1, t_1) and sequiv(s_2, t_2)

else if $s == \text{pointer}(s_1)$ and $t == \text{pointer}(t_1)$ **then**

return sequiv(s_1, t_1)

else if $s == s_1 \rightarrow s_2$ and $t == t_1 \rightarrow t_2$ **then**

return sequiv(s_1, t_1) and sequiv(s_2, t_2)

else return false

}

名等价(name equivalence)



- ❑ 把每个类型名看成是一个可区别的类型

- ❑ 两个类型表达式名字等价当且仅当

- 它们是相同的基本类型
- 不进行名字代换就能结构等价

名等价(name equivalence)



❑ 把每个类型名看成是一个可区别的类型

❑ 两个类型表达式名字等价当且仅当

■ 它们是相同的基本类型

■ 不进行名字代换就能结构等价

type link = ↑cell; 类型表达式

var next : link; link

last : link; link

p : ↑cell; pointer (cell)

q, r : ↑cell; pointer (cell)

next和last名字等价

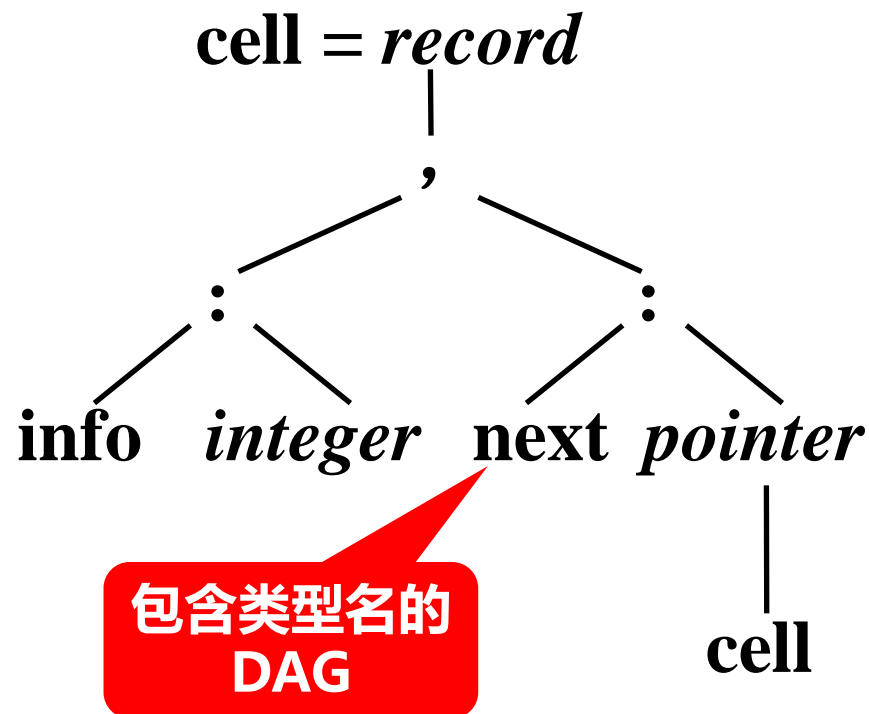
p, q和r名字等价

递归定义的类型



- Where: Linked Lists, Trees, etc
- How: records containing pointers to similar records

```
type link = ↑ cell ;  
cell = record  
    info : integer ;  
    next : link  
end;
```

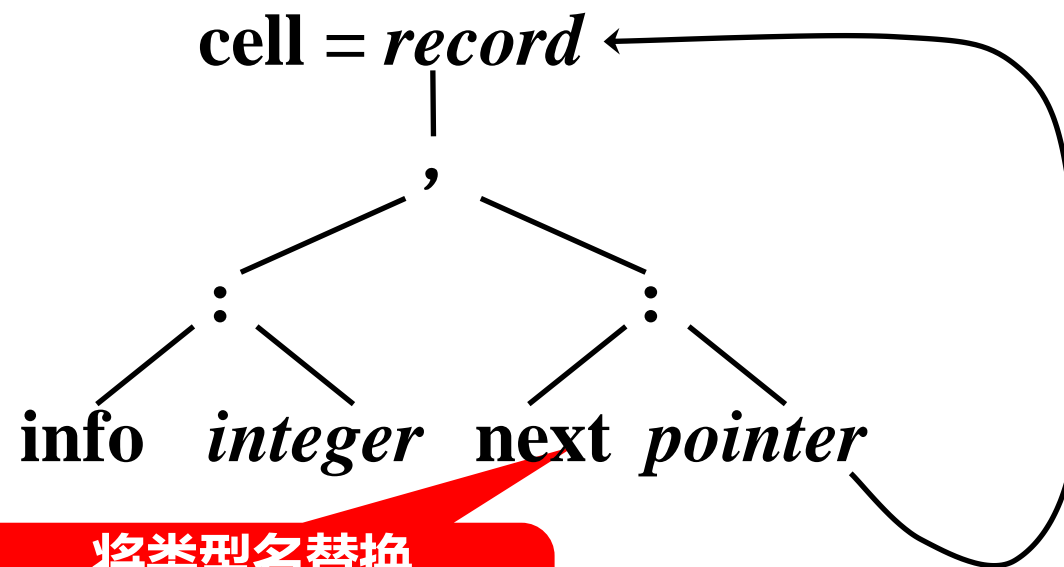


递归定义的类型



- Where: Linked Lists, Trees, etc
- How: records containing pointers to similar records

```
type link = ↑ cell ;  
cell = record  
    info : integer ;  
    next : link  
end;
```

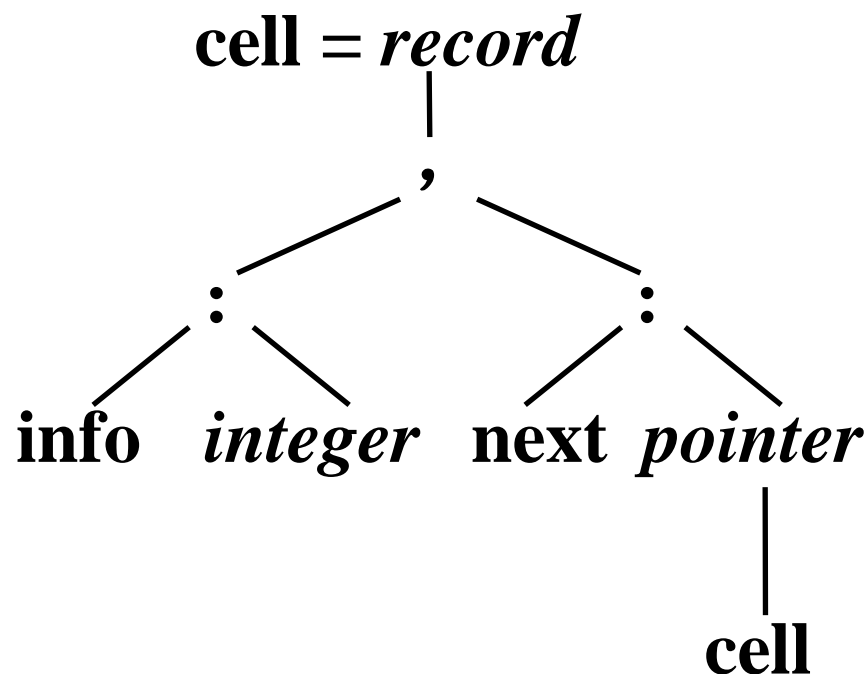


将类型名替换
引入环，结构等价判定
有可能不终止

C语言中的递归定义的类型



- ❑ C语言对除记录（结构体）以外的所有类型使用结构等价，而记录类型用的是名字等价，以避免类型图中的环



在X86/Linux机器上，编译器报告最后一行有错误：

incompatible types in return

```
typedef int A1[10];           | A2 *fun1() {  
typedef int A2[10];           |     return(&a);  
A1 a;                         | }  
typedef struct {int i;}S1;    | S2 fun2() {  
typedef struct {int i;}S2;    |     return(s);  
S1 s;                         | }
```

在C语言中，数组和结构体都是构造类型，为什么上面第2个函数有类型错误，而第1个函数却没有？

□ 类型表达式

- 类型的结构

层次一：形式化描述类型结构

□ 类型等价

- 结构等价和名字等价

层次二：判定两个类型相同的依据

□ 类型检查

- 语法制导翻译方案实现
- 函数和算符的重载

层次三：定义一组逻辑规则检查语句或者表达式中是否存在类型错误

□ 其他知识点

一个简单的语言



$P \rightarrow D; S$

$D \rightarrow D; D \mid \text{id} : T$

$T \rightarrow \text{boolean} \mid \text{integer} \mid \text{array} [\text{num}] \text{ of } T \mid$

$\uparrow T \mid T \xrightarrow{\text{blue}} T$

$S \rightarrow \text{id} := E \mid \text{if } E \text{ then } S \mid \text{while } E \text{ do } S \mid S; S$

$E \rightarrow \text{truth} \mid \text{num} \mid \text{id} \mid E \text{ mod } E \mid E[E] \mid$

$E \uparrow \mid E(E)$

例

$\text{i} : \text{integer};$

$\text{j} : \text{integer};$

$\text{j} := \text{i mod } 2000$



$D \rightarrow D; D$

$D \rightarrow \text{id} : T \quad \{ \textit{addtype}(\text{id.entry}, T.type) \}$

***addtype*: 把类型信息填入符号表**



$D \rightarrow D; D$

$D \rightarrow \text{id} : T \quad \{ \textit{addtype}(\text{id.entry}, T.type) \}$

$T \rightarrow \text{boolean} \quad \{ T.type = \textit{boolean} \}$

$T \rightarrow \text{integer} \quad \{ T.type = \textit{integer} \}$

$T \rightarrow \uparrow T_1 \quad \{ T.type = \textit{pointer}(T_1.type) \}$

$D \rightarrow D; D$

$D \rightarrow \text{id} : T \quad \{ \text{addtype}(\text{id.entry}, T.\text{type}) \}$

$T \rightarrow \text{boolean} \quad \{ T.\text{type} = \text{boolean} \}$

$T \rightarrow \text{integer} \quad \{ T.\text{type} = \text{integer} \}$

$T \rightarrow \uparrow T_1 \quad \{ T.\text{type} = \text{pointer}(T_1.\text{type}) \}$

$T \rightarrow \text{array} [\text{num}] \text{ of } T_1$
 $\quad \{ T.\text{type} = \text{array}(\text{num.val}, T_1.\text{type}) \}$

$D \rightarrow D, D$

$D \rightarrow \text{id} : T \quad \{ \text{addtype}(\text{id.entry}, T.\text{type}) \}$

$T \rightarrow \text{boolean} \quad \{ T.\text{type} = \text{boolean} \}$

$T \rightarrow \text{integer} \quad \{ T.\text{type} = \text{integer} \}$

$T \rightarrow \uparrow T_1 \quad \{ T.\text{type} = \text{pointer}(T_1.\text{type}) \}$

$T \rightarrow \text{array} [\text{num}] \text{ of } T_1$

$\{ T.\text{type} = \text{array}(\text{num.val}, T_1.\text{type}) \}$

$T \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \quad \{ T.\text{type} = T_1.\text{type} \rightarrow T_2.\text{type} \}$



$E \rightarrow \text{truth}$ $\{E.type = \textit{boolean}\}$

$E \rightarrow \text{num}$ $\{E.type = \textit{integer}\}$

$E \rightarrow \text{id}$ $\{E.type = \textit{lookup(id.entry)}\}$

$E \rightarrow \text{truth} \quad \{E.type = \text{boolean} \}$

$E \rightarrow \text{num} \quad \{E.type = \text{integer} \}$

$E \rightarrow \text{id} \quad \{E.type = \text{lookup}(\text{id.entry}) \}$

$E \rightarrow E_1 \text{ mod } E_2$

$\{E.type = \text{if } E_1.type == \text{integer and}$

$E_2.type == \text{integer then integer}$

$\text{else type_error} \}$



$$E \rightarrow E_1 [E_2] \{ E.type = \text{if } E_2.type == \text{integer and} \\ E_1.type == \text{array}(s, t) \text{ then } t \\ \text{else } type_error \}$$

$$E \rightarrow E_1 [E_2] \{ E.type = \text{if } E_2.type == \text{integer} \text{ and } \\ E_1.type == \text{array}(s, t) \text{ then } t \\ \text{else } type_error \}$$

$$E \rightarrow E_1^\uparrow \{ E.type = \text{if } E_1.type == \text{pointer}(t) \text{ then } t \\ \text{else } type_error \}$$

$$E \rightarrow E_1 [E_2] \{ E.type = \text{if } E_2.type == \text{integer} \text{ and } \\ E_1.type == \text{array}(s, t) \text{ then } t \\ \text{else } type_error \}$$
$$E \rightarrow E_1 \uparrow \{ E.type = \text{if } E_1.type == \text{pointer}(t) \text{ then } t \\ \text{else } type_error \}$$
$$E \rightarrow E_1 (E_2) \{ E.type = \text{if } E_2.type == s \text{ and } \\ E_1.type == s \rightarrow t \text{ then } t \\ \text{else } type_error \}$$



$S \rightarrow id := E \{ \text{if } (id.type == E.type \ \&\& \ E.type \in \{boolean, integer\}) \ S.type = void;$
 $\text{else } S.type = type_error; \}$

$$S \rightarrow id := E \{ \text{if } (id.type == E.type \ \&\& \ E.type \in \{boolean, integer\}) \ S.type = void;$$

$\text{else } S.type = type_error; \}$

$$S \rightarrow \text{if } E \text{ then } S_1 \{ S.type = \text{if } E.type == boolean$$

$\text{then } S_1.type$

$\text{else } type_error \}$



$S \rightarrow \text{while } E \text{ do } S_1$

**$\{S.type = \text{if } E.type == \text{boolean} \text{ then } S_1.type$
 $\text{else } type_error\}$**

$S \rightarrow \text{while } E \text{ do } S_1$

**$\{S.type = \text{if } E.type == \text{boolean} \text{ then } S_1.type$
 $\text{else } type_error\}$**

$S \rightarrow S_1; S_2$

**$\{S.type = \text{if } S_1.type == \text{void} \text{ and}$
 $S_2.type == \text{void} \text{ then } \text{void}$
 $\text{else } type_error\}$**



$P \rightarrow D; S$

**$\{P.type = \text{if } S.type == \text{void then void}$
 $\text{else type_error}\}$**

□ 类型表达式

- 类型的结构

层次一：形式化描述类型结构

□ 类型等价

- 结构等价和名字等价

层次二：判定两个类型相同的依据

□ 类型检查

- 语法制导翻译方案实现
- 函数和算符的重载

层次三：定义一组逻辑规则检查语句或者表达式中是否存在类型错误

□ 其他知识点

❑ 重载符号

- 有多个含义，但在每个引用点的含义都是唯一的

❑ 例如：

- 加法算符+可用于不同类型，"+"是多个函数的名字，而不是一个多态函数的名字

❑ 重载的消除

- 在重载符号的引用点，其含义能确定到唯一

子表达式的可能类型集合



❑ 例 Ada语言的声明:

```
function "*" (i, j : integer ) return complex;
```

```
function "*" (x, y : complex ) return complex;
```

使得算符*重载, 可能的类型包括:

`integer × integer → integer` --这是预定义的类型

`integer × integer → complex`

`complex × complex → complex`

`2 * (3 * 5)`

`(3 * 5) * z` z是复型



□ 以函数应用为例，考虑类型检查

■ 在每个表达式都有唯一的类型时，函数应用的类型检查是：

$E \rightarrow E_1(E_2) \{ E.type = \text{if } E_2.type == s \text{ and } E_1.type == s \rightarrow t \text{ then } t \text{ else type_error} \}$

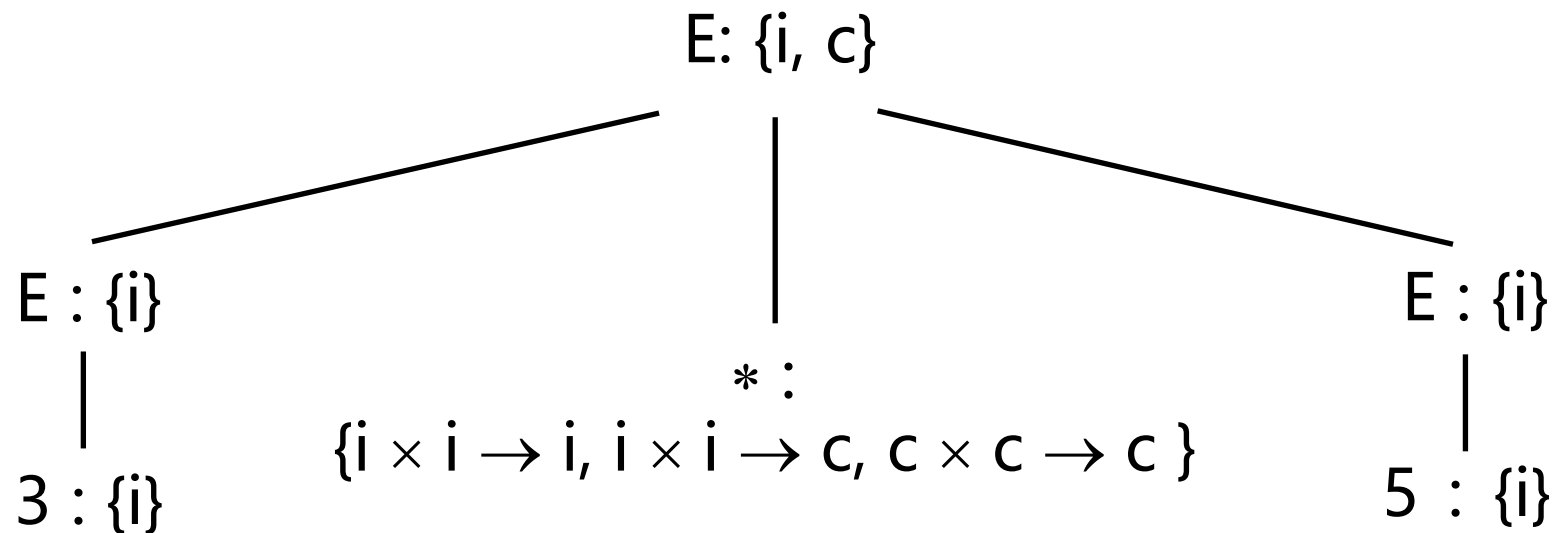
■ 确定表达式可能类型的集合（类型可能不唯一）

产生式	语义规则
$E' \rightarrow E$	$E'.types = E.types$
$E \rightarrow id$	$E.types = \text{lookup}(id.entry)$
$E \rightarrow E_1(E_2)$	$E.types = \{t \mid E_2.types \text{ 中存在一个 } s, \text{ 使得 } s \rightarrow t \text{ 属于 } E_1.types \}$

子表达式的可能类型集合



例：表达式 $3 * 5$ 可能的类型集合



□ 类型表达式

- 类型的结构

层次一：形式化描述类型结构

□ 类型等价

- 结构等价和名字等价

层次二：判定两个类型相同的依据

□ 类型检查

- 语法制导翻译方案实现
- 函数和算符的重载

层次三：定义一组逻辑规则检查语句或者表达式中是否存在类型错误

□ 其他知识点

■ 控制流检查

- 控制流语句必须使控制转移到合法的地方。
- 例如，在C语言中**break**语句使控制跳离包括该语句的最小**while**、**for**或者**switch**语句；否则就报错。

```
main() {  
    printf( "\n%d\n" ,gcd(4,12));  
    continue;  
}
```

编译时的报错如下：

example.c: In function 'main' :

example.c:3: continue statement not within a loop

□ 上下文相关检查

- 标识符没有声明
- 标识符重复声明

□ 唯一性检查

- **Switch**语句的分支常量表达式不能有重复
- 枚举类型的元素不能重复

编译时的唯一性检查的例子

```
main() {  
    int i;  
    switch(i){  
        case 10: printf( "%d\n" , 10); break;  
        case 20: printf( "%d\n" , 20); break;  
        case 10: printf( "%d\n" , 10); break;  
    }  
}
```

编译时的报错如下：

switch.c: In function 'main' :

switch.c:6: duplicate case value

switch.c:4: this is the first entry for that value



一起努力 打造国产基础软硬件体系！

李 诚

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

计算机科学与技术学院

2023年11月22日