

1. 选题分工

矩阵是线性代数中的重要部分。在数值分析中，矩阵也是一个不断扩大的研究领域。因此，设计一个完备的矩阵类，可以极大方便我们的计算与应用。在本次课程设计中，我们将编写一个矩阵类，并给出一个简单的用户交互系统。

1.1 选题要求

1. 设计一个矩阵类，将相应的函数和数据封装在类中，简化程序。
2. 修改程序结构，使程序可以反复执行，直至按键选择退出为止。
3. 本程序用数组表示 5×5 矩阵，将其改为根据输入矩阵的大小动态分配空间 $m \times n$ 来放置数据，其中 m, n 为用户可输入的任意整数。
4. 增加类的构造函数和成员函数，使得矩阵数据既可以用于对象初始化时赋值，也可以通过键盘赋值，还可以通过读数据文件输入。
5. 用模板的形式改写矩阵数据类型，使得矩阵中的数据既可以是整型数据，也可以是浮点型数据，执行程序时，分别定义两个整型矩阵和两个浮点型矩阵进行乘法验证。
6. 完成矩阵的乘法运算，在运算之前判断这两个矩阵能否满足乘法的条件，若不满足，则给出提示信息。

1.2 任务分工

本次课程设计，由 23 级数学与统计学院的学生陈静波、曾晨祥协作完成。工作量占比约为，陈静波：曾晨祥 = 3 : 2。

2. 需求分析

2.1. 课题背景

为提供直观的矩阵运算工具，帮助理解线性代数中的基本概念（矩阵加减乘、转置、幂运算等）。通过命令行交互，用户可以逐步操作并观察结果，满足简单的矩阵计算要求。用户无需安装专业数学软件，通过命令行即可完成基础矩阵操作。

2.2. 总体设计思想

该程序实现了一个矩阵计算器，支持多种矩阵操作，包括创建、复制、加减乘除、幂运算等。程序采用面向对象的设计思想，将矩阵操作封装在**Matrix**类中，并通过命令行界面与用户交互。

同时，程序还包含了一些函数式编程的思想，即尽量将逻辑运算表示为一系列的函数调用。这一思想简化了代码的维护过程，避免了大量重复代码的编写，也使得调试变得更加方便。当然，我们的代码与纯粹的函数式编程也有着本质区别，实际上只是借鉴了一些思想。

2. 总体设计

在本次课程设计中，我们组设计了一个使用 C++ 实现的矩阵计算器程序。为了方便调用，我们将程序分成了两大部分：头文件 `matrix.h`，以及用户交互系统 `main.cpp`。以下将详细分析其组成与功能。

2.1. 头文件 `matrix.h`

对于矩阵类 `Matrix`，我们将其封装至头文件 `matrix.h` 中，方便我们使用时直接调用。

2.1.1. 随机数生成工具

由于示例程序中涉及随机矩阵的生成，因此需要一个随机数工具来生成随机数。在这里，我们采用 `std::mt19937`，并采用 `std::random_device` 作为其种子，从而使得随机数的质量更高。

```
inline mt19937_64 mrand(random_device{}());

inline double rnd() {
    return static_cast<double>(mrand()) / static_cast<double>
(numeric_limits<unsigned long long>::max()) * 20 - 10;
}
```

2.1.2. 矩阵类私有成员

采用 `std::vector` 作为动态数组，方便开辟空间。使用 STL 容器将牺牲一部分性能，但是同样也具备更高的安全性，并且使用更为方便。

n , m 为矩阵的大小，表示这是一个 $n \times m$ 的矩阵。

```
template<class T>
class Matrix {
private:
    vector<vector<T>> a;
    int n, m;
public:
    //...
};
```

2.1.3. 构造函数

为了方便使用，我们创建了如下几种构造函数：

- `Matrix()` 创建空矩阵；

```
Matrix() { n = 0; m = 0; }
```

- `Matrix(initializer_list<initializer_list<T>> b)` 由列表 *b* 创建矩阵；

```
Matrix(initializer_list<initializer_list<T>> b) {  
    for (auto it: b) {  
        a.emplace_back(move(it));  
    }  
    n = a.size();  
    m = a[0].size();  
}
```

- `Matrix(const vector<vector<T2>>& b)` 由二维 `std::vector` 数组 *b* 创建矩阵。

```
template<class T2>  
explicit Matrix(const vector<vector<T2>>& b) {  
    n = b.size();  
    m = b[0].size();  
    a.resize(n, vector<T>(m));  
    for (int i = 0; i < n; i++) {  
        for (int j = 0; j < m; j++) {  
            a[i][j] = b[i][j];  
        }  
    }  
}
```

- `Matrix(const Matrix<T2>& b)` 由矩阵 *b* 创建矩阵。这里的注释是为了消除编译器的 warning。

```

template<class T2>
// ReSharper disable once CppNonExplicitConvertingConstructor
Matrix(const Matrix<T2>& b) {
    n = b.Row();
    m = b.Col();
    a.resize(n, vector<T>(m, 0));
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = 0; j < m; j++) {
            a[i][j] = b.get(i, j);
        }
    }
}

```

- `Matrix(int n, int m, const string& ch = "0")` 以 *ch* 为参数（默认为 "0"），创建 $n \times m$ 的矩阵。其中，参数的含义如下：
 - "0" 创建一个全 0 矩阵；
 - "1" 创建一个全 1 矩阵；
 - "I" 创建一个单位矩阵，若矩阵不为方阵则会报错；
 - "R" 创建一个随机矩阵（范围在 $[-10, 10]$ ）；
 - "r" 从输入中读入矩阵。

```

Matrix(int n, int m, const string& ch = "0") {
    this->n = n;
    this->m = m;
    if (ch == "0") {
        a = move(vector<vector<T>>(n, vector<T>(m, 0)));
    } else if (ch == "I") {
        assert(n == m && "initialization failed: n != m");
        a = move(vector<vector<T>>(n, vector<T>(m, 0)));
        for (int i = 0; i < n; i++) {
            a[i][i] = 1;
        }
    } else if (ch == "1") {
        a = move(vector<vector<T>>(n, vector<T>(m, 1)));
    } else if (ch == "R") {
        a = move(vector<vector<T>>(n, vector<T>(m, 0)));
        for (int i = 0; i < n; i++) {
            for (int j = 0; j < m; j++) {
                a[i][j] = rnd();
            }
        }
    }
    } else if (ch == "r") {

```

```

        a = move(vector<vector<T>>(n, vector<T>(m, 0)));
        if (n * m) cout << "Please enter exactly " << n * m << "
elements.\n";
        for (int i = 0; i < n; i++) {
            for (int j = 0; j < m; j++) {
                cin >> a[i][j];
            }
        }
    }else {
        assert(0 && "initialization failed: unknown type");
    }
}

```

- `Matrix(int n, int m, const function<T(int, int)>& fun)` 以 `fun` 为构造函数，创建 $n \times m$ 的矩阵；

```

Matrix(int n, int m, const function<T(int, int)>& fun) {
    this->n = n;
    this->m = m;
    a = move(vector<vector<T>>(n, vector<T>(m, 0)));
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = 0; j < m; j++) {
            a[i][j] = fun(i, j);
        }
    }
}

```

- `Matrix(int n, string ch = "0")` 以 *ch* 为参数（默认为 "0"），创建 $n \times n$ 的方阵。

```

explicit Matrix(int n, string ch = "0"): Matrix(n, n, ch) {};

```

以上构造函数基本可以满足全部的使用需求。如果还有额外需求，也可以自行构造函数来生成矩阵，非常方便。此外，对于单参数的构造函数，除了直接由另一个矩阵生成新矩阵以外，构造函数前都加上了 `explicit` 关键字，这是为了防止隐式转换。

2.1.4. 矩阵基本操作

在矩阵类模板中，我们根据日常使用的需要，定义了如下成员函数：

- `Row()` 获取矩阵的行数。

```
[[nodiscard]] int Row() const {  
    return n;  
}
```

- `Col()` 获取矩阵的列数。

```
[[nodiscard]] int Col() const {  
    return m;  
}
```

- `trace()` 获取矩阵的迹。如果矩阵不是方阵，则会报错。

```
[[nodiscard]] T trace() const {  
    if (n != m) {  
        assert(0 && "failed to get trace: n != m");  
    }  
    T sum = 0;  
    for (int i = 0; i < n; i++) {  
        sum += a[i][i];  
    }  
    return sum;  
}
```

- `get(i, j)` 仅读取矩阵的第 i 行，第 j 列的元素。

```
T get(const int& i, const int& j) const {  
    return a[i][j];  
}
```

- `print()` 按照一定的格式输出矩阵，并根据数据类型和大小，智能计算输出的宽度。

```
void print() const {  
    cout << "Type = Matrix<" << typeid(T).name() << ">\n";  
    cout << "Size = ";  
    if (n == 0 && m == 0) {
```

```

        cout << "[empty]\n";
    }else {
        cout << n << " x " << m << "\n";
    }

    bool f = static_cast<T>(1) / 2 != 0;

    auto dig = [](int x) -> int {
        int cnt = 0;
        if (x == 0) cnt++;
        if (x < 0) cnt++;
        while (x) {
            x /= 10;
            cnt++;
        }
        return cnt;
    };

    int sz = 0;
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = 0; j < m; j++) {
            sz = max(sz, dig(a[i][j]));
        }
    }

    cerr << sz << "\n";
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        if (n == 1) {
            cout << " < ";
        }else if (i == 0) {
            cout << " / ";
        }else if (i == n - 1) {
            cout << " \\\ ";
        }else {
            cout << " | ";
        }
        for (int j = 0; j < m; j++) {
            if (f) cout << fixed << setprecision(3) << setw(sz + 6) <<
a[i][j] << " ";
            else cout << setw(sz + 2) << a[i][j] << " ";
        }
        if (n == 1){
            cout << ">";
        }else if (i == 0) {
            cout << "\\\";
        }else if (i == n - 1) {
            cout << "/\";
        }else {
            cout << "|\";
        }
    }

```



```

    }
    cout << "\n";
}
}

```

- `trans()` 转置运算，将自身转置后，再返回 `*this`。

```

Matrix& trans() {
    vector<vector<T>> b(m, vector<T>(n));
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = 0; j < m; j++) {
            b[j][i] = a[i][j];
        }
    }
    swap(n, m);
    a = move(b);
    return *this;
}

```

并进行了如下运算符的重载：

- 下标运算符 `[]` 获取一个行向量的引用，即可以直接使用 `a[i][j]` 访问并修改矩阵的元素。

```

vector<T>& operator [] (const int& x) {
    return a[x];
}

```

- 加法运算符 `+`，保证数据类型向上兼容；加赋值运算符 `+=`，数据类型保持不变。若大小不同，则会报错。

```

template<class T2>
auto operator + (const Matrix<T2>& x) const {
    if (x.Row() != n || x.Col() != m) {
        assert(0 && "failed to do operation \"+\": different sizes");
    }
    Matrix<decltype(a[0][0] + x.get(0, 0))> c(a);
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = 0; j < m; j++) {
            c[i][j] += x.get(i, j);
        }
    }
}

```

```

        return c;
    }

    template<class T2>
    Matrix& operator += (const Matrix<T2>& x) {
        *this = *this + x;
        return *this;
    }

```

- 减法运算符 `-`，保证数据类型向上兼容；减赋值运算符 `-=`，数据类型保持不变。若大小不同，则会报错。

```

    template<class T2>
    auto operator - (const Matrix<T2>& x) const {
        if (x.Row() != n || x.Col() != m) {
            assert(0 && "failed to do operation \"-\": different sizes");
        }
        Matrix<decltype(a[0][0] - x.get(0, 0))> c(a);
        for (int i = 0; i < n; i++) {
            for (int j = 0; j < m; j++) {
                c[i][j] -= x.get(i, j);
            }
        }
        return c;
    }

    template<class T2>
    Matrix& operator -= (const Matrix<T2>& x) {
        *this = *this - x;
        return *this;
    }

```

- 乘法运算符 `*`，保证数据类型向上兼容；乘赋值运算符 `*=`，数据类型保持不变。若不满足矩阵乘法条件，则会报错。

```

    template<class T2>
    auto operator * (const Matrix<T2>& x) const {
        if (x.Row() != m) {
            assert(0 && "failed to do operation \"*\": different sizes");
        }
        Matrix<decltype(a[0][0] * x.get(0, 0))> c(n, x.Col());
        for (int i = 0; i < n; i++) {
            for (int j = 0; j < x.Col(); j++) {
                for (int k = 0; k < m; k++) {

```

```

        c[i][j] += a[i][k] * x.get(k, j);
    }
}
return c;
}

template<class T2>
Matrix& operator *= (const Matrix<T2>& x) {
    *this = *this * x;
    return *this;
}

```

- 比较运算符，判断两个矩阵是否相等，或不相等；

```

template<class T2>
bool operator == (const Matrix<T2>& x) const {
    if (x.Row() != n || x.Col() != m) return false;
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        for (int j = 0; j < m; j++) {
            if (a[i][j] != x[i][j]) return false;
        }
    }
    return true;
}

template<class T2>
bool operator != (const Matrix<T2>& x) const {
    return !(*this == x);
}

```

最后，在矩阵类外，还实现了函数：

- `Matrix<T> pow(Matrix<T> a, int x)` 矩阵幂运算，并采用了快速幂加快运算。

```

template<typename T>
Matrix<T> pow(Matrix<T> a, int x) {
    if (a.Row() != a.Col()) {
        assert(0 && "failed to do operation pow: different sizes");
    }
    Matrix<T> res(a.Row(), "I");
    while (x) {
        if (x & 1) res *= a;
        a *= a;
        x >>= 1;
    }
    return res;
}

```

以上就是头文件中的全部内容。

2.2. 用户交互系统 main.cpp

为了方便演示矩阵类的功能，我们简单实现了一个交互系统，并仿照 Linux 命令行的帮助文档，编写了一个简单版的操作手册，附在了 main.cpp 文件末尾的注释里。

运行程序后，输入 help 也可以获得操作手册。

```

print 'help' to get the manual.
help

Usage:
  new <name> <row_size> <col_size> [-p] [-t] [-o]
  new <name> <size> [-p] [-t] [-o]
  copy <from_name> <to_name>
  add <name1> <name2> [-p] [-s]
  sub <name1> <name2> [-p] [-s]
  mul <name1> <name2> [-p] [-s]
  pow <name> <power> [-p] [-s]
  print <name>
  delete <name>
  quit

Options:
  -p          print the matrix after generating
  -t <type>   set the data type of matrix [default: int]
              int, i      integer
              double, d   double precision floating-point number
              modint      (to be done)
  -o <option> set the option for generating matrix [default: 0]
              0          zero matrix
              1          1s matrix
              I          identity matrix
              R          random matrix in range [-10, 10]
  -s <new_name> store the result in "new_name"

```

由于涉及到不同数据类型的矩阵的存储问题，这里我们采用 `variant<Matrix<int>, Matrix<double> >` 来实现整型矩阵和浮点型矩阵的统一存储，并利用 `std::map` 来储存名字与矩阵的映射关系。

关于用户交互系统的具体命令，已经全部详细记载在操作手册当中。总体来讲，包含如下操作指令：

- 新建矩阵，可选择类型 `int`（整型）和 `double`（双精度浮点型）。
- 复制矩阵
- 矩阵加法、减法、乘法运算，以及幂运算
- 按照一定的格式打印矩阵
- 删除矩阵

指令的具体使用方法详见操作手册，再下一小节也将给出若干示例。

至于用户交互系统的具体代码实现，由于个人能力所限，实现的方法由大量的分支结构组成，总体代码比较冗长。源码（应该）已经上传在附件当中，这里不再详细展开。

3. 具体实现

在本节中，我们将给出若干个操作示例，来对这个矩阵类以及用户交互系统进行较为全面的展示。为了方便区分用户的输入和程序的输出，我们将采用 **Clion** 的内置终端，并以截图的形式给出示例。其中，绿色的文字表示用户的输入，白色的文字表示程序的输出。

1. 创建一个命名为 **A** 的 3×4 的零矩阵并打印：

```
new A 3 4 -p

Name = "A"
Type = Matrix<i>
Size = 3 x 4
/  0  0  0  0 \
|  0  0  0  0 |
\  0  0  0  0 /
```

2. 先创建一个命名为 **B** 的 3×4 的零矩阵，再打印：

```
new B 3 4

print B

Name = "B"
Type = Matrix<i>
Size = 3 x 4
/  0  0  0  0 \
|  0  0  0  0 |
\  0  0  0  0 /
```

3. 手动输入一个命名为 **C** 的 3×4 的矩阵，数据类型为 `int`：

```
new C 3 4 -t int -o r

Please enter exactly 12 elements.
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

print C

Name = "C"
Type = Matrix<i>
Size = 3 x 4
/  1  2  3  4 \
|  5  6  7  8 |
\  9 10 11 12 /
```

4. 创建命名为 **D** 的 4×3 全 1 矩阵：

```
new D 4 3 -o 1 -p

Name = "D"
Type = Matrix<i>
Size = 4 x 3
/  1  1  1 \
|  1  1  1 |
|  1  1  1 |
\  1  1  1 /
```

5. 创建命名为 **E** 的 3×3 单位矩阵：

```
new E 3 -o I -p

Name = "E"
Type = Matrix<i>
Size = 3 x 3
/  1  0  0 \
|  0  1  0 |
\  0  0  1 /
```

6. 创建一个命名为 E 的 3×3 随机矩阵，数据类型为 double :

```
new F 3 -t d -o R -p

Name = "F"
Type = Matrix<d>
Size = 3 x 3
/  1.870  9.052  3.450 \
|  0.376 -5.824  2.550 |
\  8.517  8.795  7.734 /
```

7. 将矩阵 E 与 F 相加并储存为命名为 $E+F$ 的矩阵:

```
add E F -s E+F -p

Type = Matrix<d>
Size = 3 x 3
/  2.870  9.052  3.450 \
|  0.376 -4.824  2.550 |
\  8.517  8.795  8.734 /
```

8. 将 E 与 F 相减并储存为命名为 $E-F$ 的矩阵:

```
sub E F -s E-F -p

Type = Matrix<d>
Size = 3 x 3
/  -0.870 -9.052 -3.450 \
|  -0.376  6.824 -2.550 |
\  -8.517 -8.795 -6.734 /
```

9. 将 C 与 D 相乘并储存为命名为 $C*D$ 的矩阵:

```
mul C D -s C*D -p

Type = Matrix<i>
Size = 3 x 3
/  10  10  10 \
|  26  26  26 |
\  42  42  42 /
```

10. 对 F 做二次幂运算并储存为命名为 F^2 的矩阵:

```
pow F 2 -s F^2 -p

Type = Matrix<d>
Size = 3 x 3
/  36.287 -5.446  56.210 \
|  20.230  59.749  6.170 |
\  85.113  93.897  111.621 /
```

11. 矩阵 d 复制矩阵 D 的数据:

```
copy D d

print d

Name = "d"
Type = Matrix<i>
Size = 4 x 3
/  1  1  1 \
|  1  1  1 |
|  1  1  1 |
\  1  1  1 /
```

12. 删除矩阵 D :

```
delete D

print D

There isn't a matrix named "D".
```

13. 重新创建一个命名为 A 的随机矩阵，并覆盖原有矩阵：

```
print A

Name = "A"
Type = Matrix<i>
Size = 3 x 4
/  0  0  0  0 \
|  0  0  0  0 |
\  0  0  0  0 /

new A 3 -t i -o R

There has been a matrix named A.
Would you like to recover it? (y / n)
y

print A

Name = "A"
Type = Matrix<i>
Size = 3 x 3
/  -2  -3  -1 \
|   8   3   0 |
\   6  -9   4 /
```


4. 结果分析

总体来讲，这次课程设计的结果比较让人满意，但是缺点同样明显。在本节，我们将对实现的矩阵计算器工具进行优缺点分析，并提出改进空间。

4.1. 优点分析

1. 功能丰富

- 支持多种矩阵操作：创建 (new)、复制 (copy)、加法 (add)、减法 (sub)、乘法 (mul)、幂运算 (pow)、打印 (print)、删除 (delete)。
- 支持不同数据类型 (int、double)，并可通过 -t 选项指定。
- 提供多种初始化方式（零矩阵、单位矩阵、随机矩阵、手动输入）。

2. 良好的错误处理

- 检查矩阵名称是否合法（不能以 - 开头）。
- 检查矩阵是否存在。
- 检查矩阵运算的维度是否匹配（如乘法要求 `A.col() == B.row()`）。
- 提供清晰的错误提示，例如：

```
Failed to execute command "mul": different sizes.
```

3. 灵活的选项控制

- 支持 -p（打印结果）、-y（跳过确认）、-s（存储结果到新矩阵）等选项，提高交互效率。

4. 代码结构清晰

- 使用 variant 和 visit 处理不同类型的矩阵 (Matrix<int> 和 Matrix<double>)，避免重复代码。
- 矩阵运算 (+, -, *) 通过模板实现，支持混合类型计算（如 int 矩阵 + double 矩阵）。

5. 扩展性强

- 可以通过修改 matrix.h 轻松支持新功能（如行列式、逆矩阵等）。
- 命令解析逻辑 (split、read_name 等) 可复用，方便添加新命令。

4.2. 缺点分析

1. 缺少关键功能

- 无矩阵转置命令。
- 无迹 (trace) 计算命令。
- 无行列式、逆矩阵等高级运算。

2. 手动输入矩阵不够友好

- 必须通过 `-o r` 选项输入，且需一次性输入所有元素，出错后无法修改，只能从头输入。

3. 错误提示可以更友好

- 某些错误信息较模糊
- 在 `matrix.h` 中使用 `assert` 判断非法情况，将直接终止程序

4. 用户体验问题

- 不支持多步撤销（如误删矩阵无法恢复）。

4.3. 改进空间

1. 增加高级功能

- 添加 `transpose`、`det`（行列式）、`inv`（逆矩阵）等命令。
- 支持分步输入矩阵（如逐行输入）。

2. 增强错误处理

- 替换 `assert` 为友好的错误提示。
- 增加输入校验（如检查元素是否为数字）。

3. 优化性能

- 实现更高效的矩阵乘法。
- 避免不必要的拷贝（如使用移动语义）。

4. 代码重构

- 将错误提示集中到统一函数（如 `show_error("msg")`）。
- 代码写的太丑了，一个月后回头再看一遍真的好丑。

5. 课程总结

在完成这个矩阵计算器项目的过程中，我们遇见并克服了很多难点。这段开发历程带给我的不仅是编程技能的提升，更重要的是对软件开发的深入理解，以及对计算机科学本质的思考。

通过本次矩阵计算器的实现，我深刻体会到C++面向对象与模板编程的强大。利用 `std::vector` 和 `std::variant` 管理矩阵数据，实现了类型安全的混合运算；运算符重载让矩阵操作像数学表达式一样直观，如 `mat1 + mat2`。格式化输出部分通过动态计算列宽和艺术化边框，提升了可读性。

最初接触矩阵运算时，我们只是将其视为线性代数课程中的数学概念。通过这个项目，我们真正理解了如何用计算机语言描述数学对象。比如，在编写快速幂算法时，位运算的巧妙应用让我们对算法优化有了更深刻的认识。这种将数学理论转化为可执行代码的过程，极大地锻炼了我们的计算思维能力。

调试过程中，主要遇到的麻烦就是 `std::variant` 的使用，这是 C++17 标准库中引入的一种类型安全的联合体，我们自然对其比较陌生。在查阅了相关文档后开始编写，也出现了多次编译错误。但在克服这些挑战后，我们也对这一新增的容器有了更深的理解。

遇到的挑战还包括 `std::variant` 的类型推导和边界检查。在这一部分中，采用了 `std::visit` 来简化 `std::variant` 之间的运算，并采用 `auto` 关键字进行解析。由于 C++20 修复了若干 C++17 中存在的问题，原代码直接迁移到 C++17 的环境中会出现一些兼容性问题，这也为我们协作完成代码带来了一些困难。

在调试的过程中，编译器也给出了多个弱警告，这些警告虽然不影响程序的运行，但是可能带来一些安全隐患。例如，一些参数应该写为 `const auto&` 的常量引用形式，防止出现不必要的修改；一些类内的函数应该加上 `const` 标识，防止不小心修改 `this` 中的内容；还有一些函数应该加上 `[[nodiscard]]` 标识，防止函数的返回值没有承接的情况。最终，我们的代码实现了 0 warning，这也帮助我们养成了更好代码习惯，提前适应工程化代码风格。

这次实践巩固了我对类设计、模板、STL容器的掌握，尤其是资源管理和异常安全的考量。总的来说，将理论转化为实际代码的过程让我收获颇丰。同时，我们的团队协作能力也得到了极大的提升。