



天津大学
Tianjin University

《并行计算》实验指导书

2023-2024 学年第二学期

实验指导：肖 健 孙 超

《并行计算》实验指导书

2023-2024 学年第二学期

一、实验要求及评分标准

本课程实验目的为提升学生对并行计算的理解认识，培养学生编写基本并程序的能力，加深对多线程(Phthread)和多进程(MPI)并行编程的理解认识。

实验课程需要上交实验报告，报告评分标准如下：

| 实验 | 内容要求 | 评分比例 | 占总分比例 |
|-----|---------|------|-------|
| 实验一 | 实验内容 | 10% | 10% |
| | 实验原理 | 10% | |
| | 程序流程图 | 30% | |
| | 实验结果及分析 | 40% | |
| | 实验总结 | 10% | |
| 实验二 | 实验内容 | 10% | 30% |
| | 实验原理 | 10% | |
| | 程序流程图 | 30% | |
| | 实验结果及分析 | 40% | |
| | 实验总结 | 10% | |
| 实验三 | 实验内容 | 10% | 30% |
| | 实验原理 | 10% | |
| | 程序流程图 | 30% | |
| | 实验结果及分析 | 40% | |
| | 实验总结 | 10% | |
| 实验四 | 实验内容 | 10% | 30% |
| | 实验原理 | 20% | |
| | 设计实现 | 30% | |
| | 实验结果 | 30% | |
| | 实验总结 | 10% | |

其中，实验原理包括：**实验数学计算模型**和**实现方法**；编程语言要求使用 C/C++，并行程序设计部分需要给出**伪代码**或**关键部分代码实现**；实验结果及分析应包括：**实验结果数据列表**、**加速比曲线**和**实验结果分析**。

二、实验环境介绍及使用方法

1. 集群登录及所需软件

国家超级计算天津中心提供了集成客户端——青索客户端，使用手册见：
<https://www.nsccl-tj.cn/file/青索安装与入门手册.pdf>，以下为常规使用所用软件：

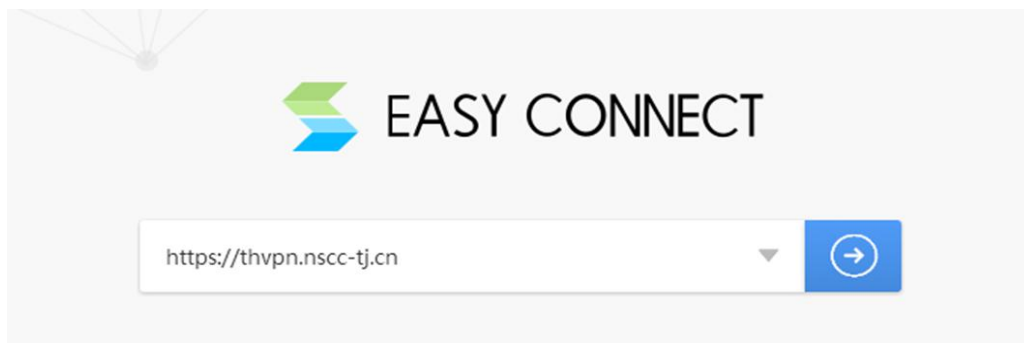
- Easy Connect（VPN 登陆）
 - 校内下载地址：<https://vpn.tju.edu.cn/com/EasyConnectInstaller.exe>
- SSH（命令行远程登陆命令）
 - Win10 可直接使用 ssh 命令
 - Win7 需要安装 OpenSSH，官方网站：<https://www.mls-software.com/opensshd.html>
- FileZilla（远程文件传输工具）
 - 官方网站：<https://filezilla-project.org/index.php>

实验环境不支持图形界面。

PS: Linux 可以安装 Easy Connect（<https://vpn.tju.edu.cn> 可下载）后直接使用 OpenSSH 进行登录，Mac OS 也可以使用对应的 ssh 命令登录链接到集群。

2. 登陆 VPN

- 登录 VPN 方式如图所示



在输入框中输入：<https://thvpn.nsccl-tj.cn>，点击右侧箭头连接国家超级计算天津中心 VPN。



在输入框中输入 VPN 登陆的用户名和密码（另行通知），点击登陆按钮等待连接成功。

※注意：输入 VPN 密码时**务必仔细**，可复制粘贴，错误之后会锁定账号，无法登陆。

3. 登录集群

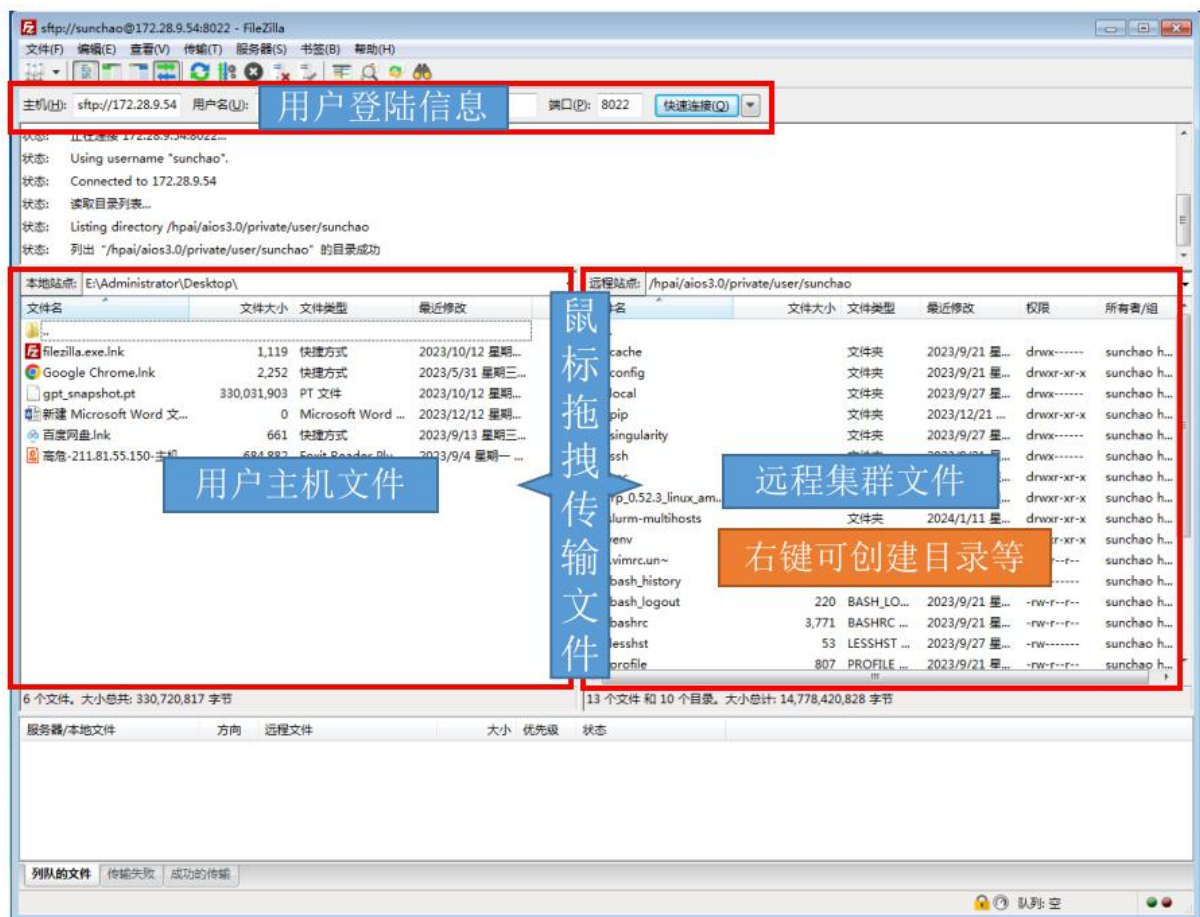
- 登录集群方式如图所示：



在提示符后输入：ssh USERNAME@192.168.10.10，其中，需要将 USERNAME 替换为自己的账户名称（另行通知），然后按回车键登录系统。首次登陆会提示密钥指纹信息，输入 yes 继续连接，之后根据提示输入密码（无回显），按回车键确认，待提示欢迎信息后就可以正式使用了。

- 文件传输：

打开 FileZilla 软件，输入主机(sftp://192.168.10.10)、用户名、密码，点击快速连接按钮可以打开文件传输界面，通过鼠标拖动操作即可实现文件传输。



3. 常用 Linux 命令

- ls: 列出当前文件夹下文件。如: ls -al
- mkdir: 新建文件夹。如: mkdir data
- cd: 切换工作文件夹。如: cd data/
- pwd: 查看当前文件夹绝对路径
- rm: 删除文件或文件夹 (需要加上 -r 参数)
- time: 获取程序运行时间
- passwd: 修改登录密码
- exit: 退出登录

4. 实验环境

i. 系统参数

- 国家超级计算天津中心定制操作系统
- 使用国产飞腾处理器
- 天河自主高速互联网络 (400GB/s)

- 单核理论性能（双精度）9.2 GFlops
- 单节点理论性能（双精度）588.8 GFlops

ii. 编译环境

- GCC 9.3.0: gcc, g++, gfort 等
- OpenMPI 4.1.1: mpicc, mpic++等

iii. 示例

- g++ -pthread -o test.o test.cpp
- g++ -fopenmp -o test.o test.cpp
- mpic++ -o test.o test.cpp

注：运行 MPI 命令前需加载 OpenMPI 环境：

- module load openmpi

5. 使用任务队列

i. 同步执行，可用于小规模测试。程序执行结束前中断连接会导致程序中止。

- 测试串行程序示例(test.o)：

```
yhrun -p thcp1 -n 1 ./test.o
```

- 测试多线程程序示例(test.o)，使用 8 个核：

```
yhrun -p thcp1 -n 1 -c 8 ./test.o
```

- 测试多进程程序示例(test.o)，使用 2 个节点，共 8 个核，每节点 4 个核：

```
yhrun -p thcp1 -N 2 -n 8 ./test.o
```

ii. 异步执行，常规使用方法。通过提交任务实现，提交任务后可随时退出。

➤ 步骤 1：编写任务脚本。脚本编写及参数设置可参考 SLURM 调度系统：

<https://slurm.schedmd.com/sbatch.html>

- 串行程序脚本示例：

```
test.sh

#!/bin/bash
time yhrun -p thcp1 -n 1 ./test.o &> run.log
```

- 多线程程序脚本示例：

```
test.sh

#!/bin/bash
time yhrun -p thcp1 -n 1 -c 8 test.o &> run.log
```

- 多进程程序脚本示例：

```
test.sh
```

```
#!/bin/bash
module load openmpi
time yhrun -p thcp1 -N 2 -n 8 test.o &> run.log
```

➤ 步骤 2: 提交任务

- 提交串行程序任务:

```
yhbatch -p thcp1 -n 1 ./test.sh
```

- 提交多线程程序任务:

```
yhbatch -p thcp1 -n 1 ./test.sh
```

- 提交多进程程序任务, 使用 2 个节点, 共 8 个核, 每节点 4 个核:

```
yhbatch -p thcp1 -N 2 -n 8 ./test.sh
```

➤ 步骤 3: 查看/删除任务

- 查看任务列表, 找到相应 `jobid`:

```
yhq
```

- 删除任务:

```
yhcancel jobid
```

6. 任务结果查看

- 任务运行结果文件名称默认保存格式为: `slurm-jobid.out`。

如: `slurm-418101.out`

- 可以在任务脚本中添加输出重定向, 输出到自定义文件中。

如: `time yhrun -n 1 ./test.o &> run.log`

三、实验题目

实验一: 多线程计算正弦值

本实验的输入包含弧度值、计算规模和线程数。**要求: Pthread 并行化实现。**

方法: 利用正弦函数的泰勒级数展开式计算结果。

$$\sin x = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots$$

注意: 由于弧度值 x 过大, 会导致前几项的值过大 (长整型数据不能保证数据精度), 从而使得结果异常, 所以弧度值 x 的取值范围可控制在 $[-10, 10]$ 。

➤ 编译与运行

- 编译命令: `g++ -pthread -o test.o test.cpp`
- 同步执行命令: `time yhrun -p thcp1 -n 1 -c 8 ./test.o`
- 脚本示例:

```
test.sh

#!/bin/bash
time yhrun -p thcp1 -n 1 -c 8 test.o &> run.log
```

- 提交任务: `yhbatch -p thcp1 -n 1 ./test.sh`

实验二：多线程计算矩阵幂

矩阵幂是数学中非常常用的一种运算方法，是对一个矩阵进行多次自乘的运算，其在计算机科学、物理学、化学、经济学等领域都有广泛的应用。在实际应用中，矩阵幂经常用于解决一系列复杂问题，以下是几个具体的应用场景：

- 图形变换：矩阵幂运算可用于对图形进行变换，例如矩阵 A 表示平移变换， A^n 即可表示 n 次平移后的变换。
- 动力学模型：动力学模型中，往往需要使用矩阵幂计算大量转移矩阵，例如马尔可夫链模型、蒙特卡罗模拟等。
- 最短路径：求解最短路径问题时，可使用权值邻接矩阵的幂次计算求解，有效提高计算效率。

本实验的输入包含一个二维矩阵、幂次 N 和线程数（进程数），需要求解此矩阵的 N 次幂，输出最终结果。**要求：Pthread 并行化实现。**

i. 串行算法

Begin

```
output = 单位矩阵
for n in 1..N
  for i in 1..M (matrix_size)
    for j in 1..M (matrix_size)
      for k in 1..M (matrix_size)
        temp(i, j) += output(i, k) * matrix(k, j)
      endfor
      output = temp
    endfor
  endfor
endfor
```


End

ii. 并行算法

可对每次矩阵相乘进行划分，划分方法可参考课程中的 Jacobi 迭代，将结果矩阵划分成 p （线程数）个子块，每个线程处理一个子块，再同步计算结果，以这种方式进行 N 次矩阵相乘，计算中需要注意每次矩阵相乘后的同步。

➤ 编译与运行

- 编译命令: `g++ -pthread -o test.o test.cpp`
- 同步执行命令: `time yhrun -p thcp1 -n 1 -c 8 ./test.o`
- 脚本示例:

```
test.sh

#!/bin/bash
time yhrun -p thcp1 -n 1 -c 8 test.o &> run.log
```

- 提交任务: `yhbatch -p thcp1 -n 1 ./test.sh`

实验三：多进程计算矩阵幂

本实验针对实验二问题，采用 MPI 编程模型实现矩阵幂计算。

对每次矩阵相乘进行划分，划分方法可参考课程中的 Jacobi 迭代，将结果矩阵划分成 p （进程数）个子块，每个线程处理一个子块，再同步计算结果，以这种方式进行 N 次矩阵相乘，计算中每一个进程都要向其它进程发送数据，同时从其它进程接收数据。

➤ 编译与运行

- 编译命令: `mpic++ -o test.o test.cpp`
- 加载 MPI 环境: `module load openmpi`
- 同步执行命令: `time yhrun -p thcp1 -N 2 -n 8 ./test.o`
- 脚本示例:

```
test.sh

#!/bin/bash
module load openmpi
time yhrun -p thcp1 -N 2 -n 8 test.o &> run.log
```

- 提交任务: `yhbatch -p thcp1 -N 2 -n 8 ./test.sh`

实验四：多级并行化计算矩阵幂

本实验针对实验二问题，采用 MPI+OpenMP 编程模型实现矩阵幂计算。节点间采用 MPI，节点内采用 OpenMP。需要制定多层划分策略。

➤ 编译与运行

- 编译命令: `mpic++ -fopenmp -o test.o test.cpp`
- 加载 MPI 环境: `module load openmpi`
- 同步执行命令: `time yhrun -p thcp1 -N 2 -n 2 -c 4 ./test.o`
- 脚本示例:

```
test.sh

#!/bin/bash
module load openmpi
time yhrun -p thcp1 -N 2 -n 2 -c 4 test.o &> run.log
```

- 提交任务: `yhbatch -p thcp1 -N 2 -n 2 ./test.sh`