本人看网上关于MOOSE的中文教程基本没有，并且英文教程对于没有接触过有限元的新手极其不友好，于是想做这么一款入门教程。

但是本人深知自己学识浅薄，接触MOOSE时间也并不久，很多底层架构了解的其实不多。有错误或疑问欢迎在<https://github.com/123YanPeng/fuel_rods.git>给我留言。

一些标记的规则申明：

1. 《wsl –update》，《cd ~》，代码复制黏贴可直接运行。书名号加黄色背景的部分，直接复制到指定位置运行（默认为Cursor编辑器对应的linux终端，其他位置会特殊说明）。
2. [下载发行版本](https://aka.ms/wslubuntu2004)，下划线有超链接。
3. 在集成终端中打开，强调要注意。
4. 有一定概率报错，灰色文字不那么重要，可跳过。

目录

[第1章 安装MOOSE 1](#_Toc190445330)

[第2章 创建好自己的app 5](#_Toc190445331)

[2.1 MOOSE整体逻辑 5](#_Toc190445332)

[第3章 简单介绍问题 8](#_Toc190445333)

[3.1 [Kernels]： 8](#_Toc190445334)

[3.1.1 一般参数的定义与引用 9](#_Toc190445335)

[3.1.2 其他常用3.1 [Kernels] 9](#_Toc190445336)

[3.2 [Materials]： 9](#_Toc190445337)

[3.2.1 常用Materials总结 10](#_Toc190445338)

[第4章 Include与scr自定义函数 10](#_Toc190445339)

[第5章 附录 11](#_Toc190445340)

[5.1 Linux基础命令 11](#_Toc190445341)

[5.2 多线程计算 12](#_Toc190445342)

[5.2.1 更加专业的确定方法： 13](#_Toc190445343)

[5.3 Restart and Recover 14](#_Toc190445344)

[5.3.1 具体设置 14](#_Toc190445345)

[5.4 GPU并行 15](#_Toc190445346)

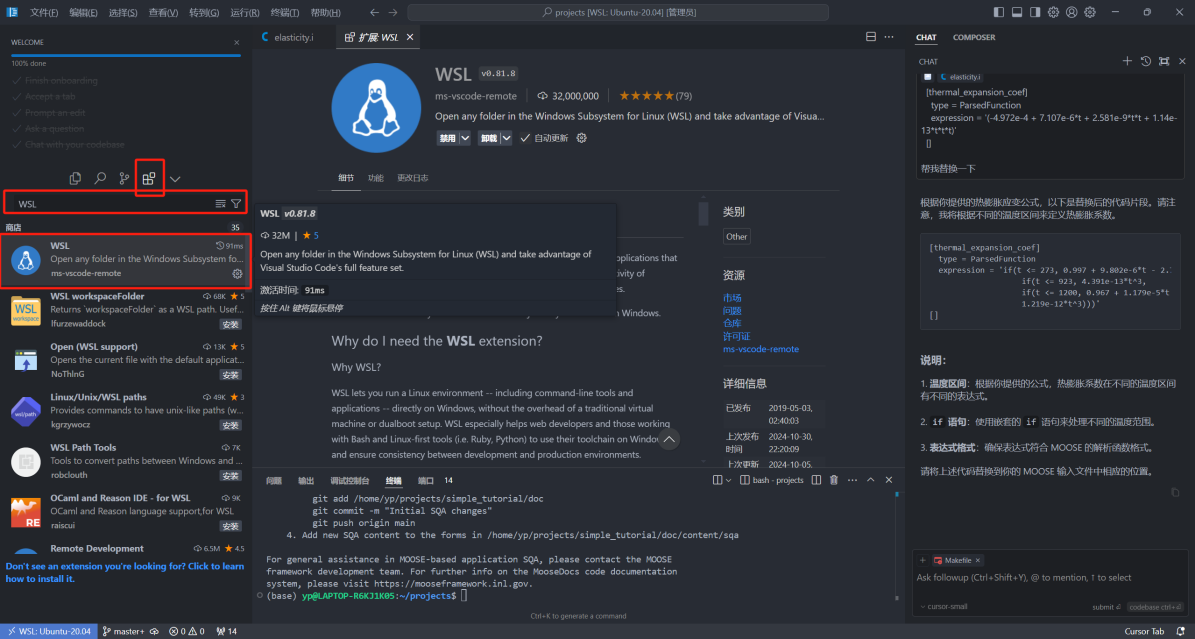
[5.5 常见报错 15](#_Toc190445347)

[5.5.1 代码格式问题 15](#_Toc190445348)

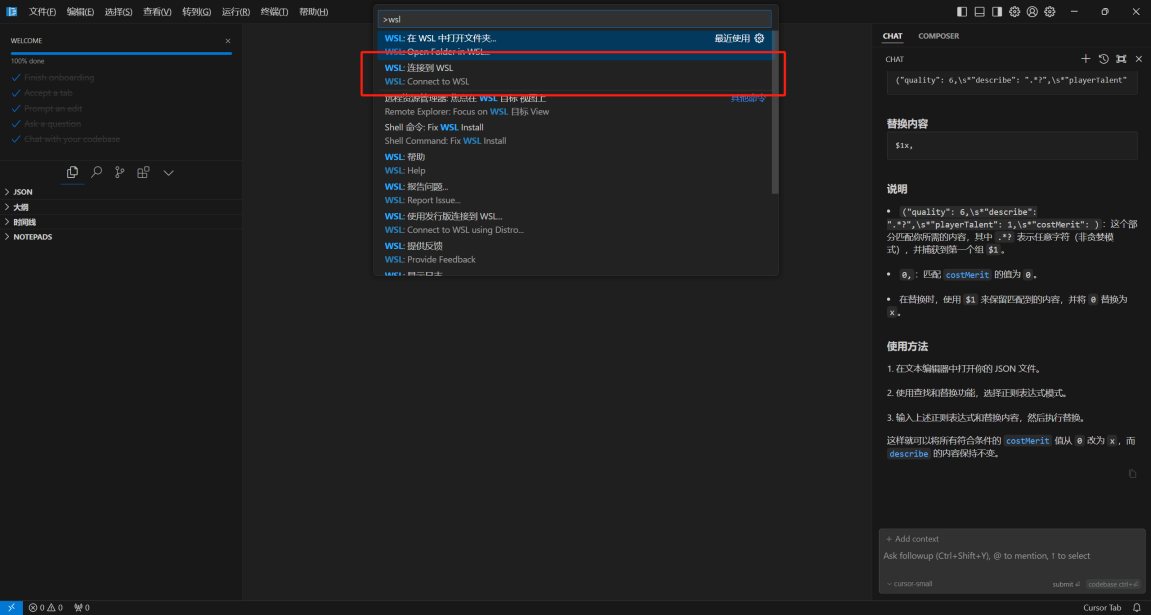
# 安装MOOSE

如果你是Windows系统，则需要安装linux子系统，然后安装conda运行环境，最后安装MOOSE。写本教程的时间是2024-12-15，由于版本可能更新，本教程中涉及的代码可能过时而无效或报错。强烈建议去官网按他的流程来一遍（[Windows Subsystem for Linux](https://mooseframework.inl.gov/getting_started/installation/windows.html)）（[Installing MOOSE | MOOSE](https://mooseframework.inl.gov/getting_started/installation/index.html)）。

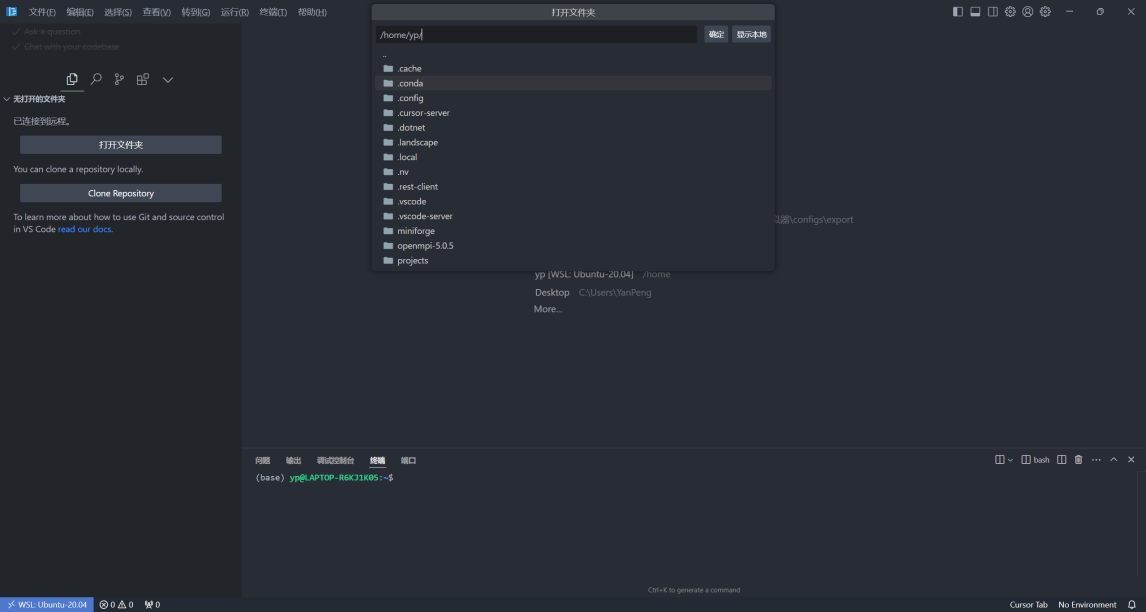
1. **第一步，安装好linux子系统。**（[windows11 安装WSL2全流程\_wsl2安装-CSDN博客](https://blog.csdn.net/u011119817/article/details/130745551)，或其他安装WSL2的教程，有一定概率报错，这与每个人的电脑设置有关），按照这个来，安装好linux子系统就OK，可以不用安装图形界面。具体步骤如下
   1. [启用window子系统及虚拟化](https://blog.csdn.net/u011119817/article/details/130745551#1window_14)（可以不用安装图形界面）
   2. [下载发行版本](https://aka.ms/wslubuntu2004)
   3. power shell 以管理员方式运行后，输入：《wsl --update》
   4. 双击安装b)中下好的子系统，设置linux系统名字（后续提及的“你的linux名字”就是指的是这个）与密码，然后就安好linux子系统。
2. **第二步，在**[**Cursor**](https://www.cursor.com/)**下打开linux子系统。**推荐下载[Cursor](https://www.cursor.com/)或者[VsCode](https://code.visualstudio.com/)软件，使用Cursor可直接打开linux子系统的文件夹，方便太多。（这两个软件都集成了ai的代码编辑器功能过于强大，极其推荐，并且他们的界面基本一样，因此下面就介绍Cursor。此外后面有详细的Cursor使用教程，掌握该软件可大幅提升写代码水平）
   1. 下载[Cursor](https://www.cursor.com/)
   2. 在软件里面安装WSL插件



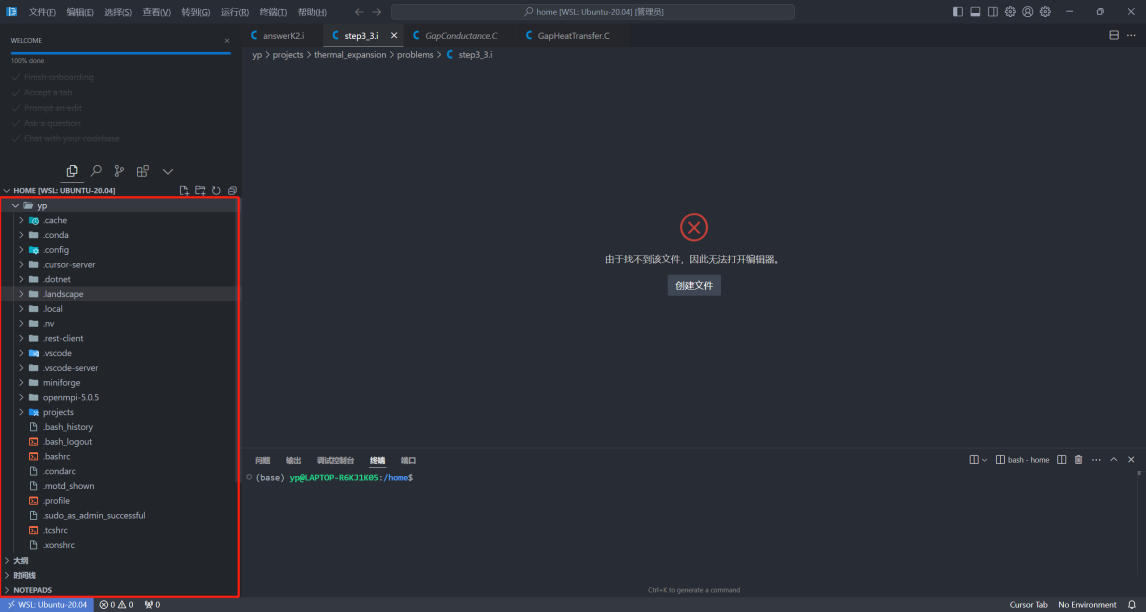
* 1. 输入>WSL，选择连接到WSL



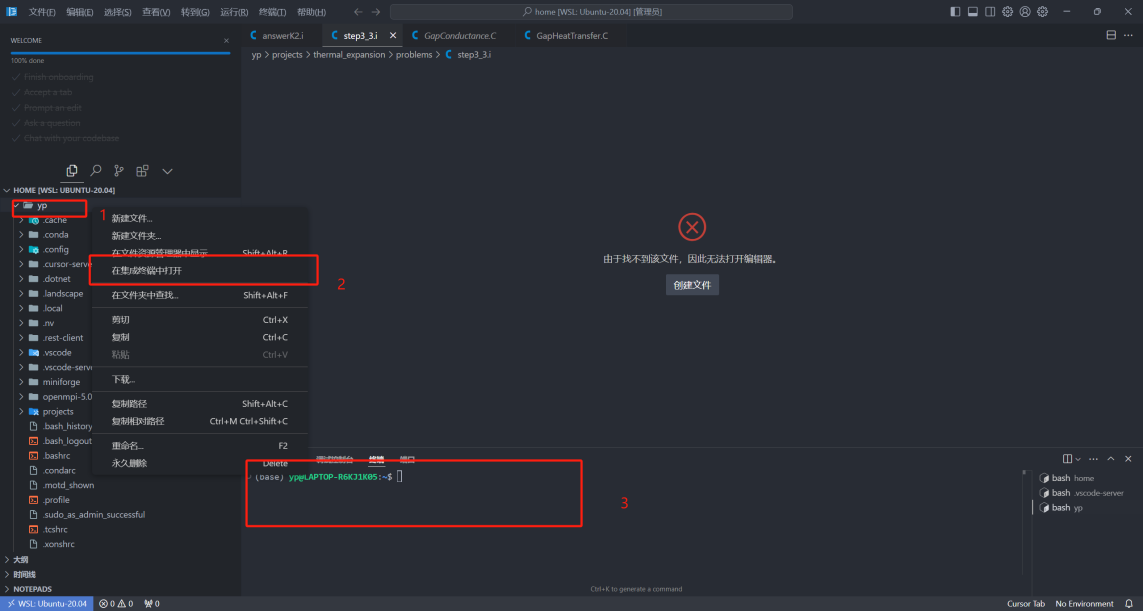
* 1. 然后弹出窗口后，选择打开文件夹/home，点确定



* 1. 出现红色框框。说明你已经配置好了



* 1. 选择《你的linux名字》文件夹，选《在集成终端中打开》，出现3，就说明linux环境配置完成



PS：右键文件选择《在集成终端中打开》这一招用来切换终端位置非常好用！

1. **第三步，配置MOOSE运行环境-python环境安装**（[Conda MOOSE Environment | MOOSE](https://mooseframework.inl.gov/getting_started/installation/conda.html)）
   1. 在linux终端处（上图《3》的位置处）中分别输入

《curl -L -O <https://github.com/conda-forge/miniforge/releases/latest/download/Miniforge3-Linux-x86_64.sh>》以下载MOOSE环境软件Miniforge3

《bash Miniforge3-Linux-x86\_64.sh -b -p ~/miniforge》以解压MOOSE环境软件miniforge

* 1. 输入《export PATH=$HOME/miniforge/bin:$PATH》以导出环境软件miniforge的路径，目的以后一打开linux终端就能自动启用PATH环境的环境，方便操作
  2. 输入《conda init --all》，你就会发现终端变成了《(base) 你的linux名字@XXXX:~$》
  3. 更新python环境《conda update --all --yes》
  4. 输入《conda config --add channels <https://conda.software.inl.gov/public>》以便下载MOOSE运行环境
  5. 输入《conda create -n moose moose-dev=2024.12.02=mpich》安装运行环境，注意红字2024.12.02代表的MOOSE软件版本，这可能更新了，[请去官网看一下](https://mooseframework.inl.gov/getting_started/installation/conda.html)（漫长等待）。代码解释：“conda create -n moose”中的moose表示这个环境名字叫做moose，你也可以把它改为其他名字。
  6. 输入《conda activate moose》以激活环境moose（注意现在这个moose只是MOOSE软件的运行环境，现在还没有安装MOOSE软件，每次你要打开MOOSE软件，先输入conda activate moose激活MOOSE的运行环境环境以避免错误）（如果你在f）步骤中将moose命名为xxx，则这里代码就变成了conda activate xxx）

1. **第四步，安装MOOSE软件** 
   1. 输入《mkdir -p ~/projects》。在/home/yp路径下创建projects文件夹（自己直接在cursor里右键创建也完全可以）。注意最终是/home/你的linux系统名字/projects
   2. 输入《cd ~/projects》。进入刚才创建的projects文件夹
   3. 输入《git clone https://github.com/idaholab/moose.git》这一步便是抓取MOOSE软件，需要漫长的等待
   4. 输入《cd moose》进入moose软件
   5. 输入《git checkout master》将当前工作目录切换到moose的主分支，（输入就好了，可无视这个解释）（通常称为 master 分支）
2. **第五步，验证MOOSE软件**
   1. 输入《cd ~/projects/moose/test》，进入MOOSE软件的test目录
   2. 输入《make -j 6》，编译，漫长的等待，注意，这个《make -j 6》这个蓝色6是根据你的cpu内核数来的，合适的配置可以加快编译与程序运行，具体请看4.2并行计算。编译test文件夹下面的make文件以导出我们最为需要的-opt文件，这个以-opt结尾的文件（例如全称为moose\_test-opt）是我们运行MOOSE输入文件(xxx.i)的必要文件。(可以这样理解，make编译的是我们的整个模型，编译结果是-opt文件，我们用这个模型(-opt)与输入文件(.i)去运行相应MOOSE程序。之后会反复验证与强调这句话)。
   3. 输入《cd ~/projects/moose/test》，进入MOOSE软件的test目录
   4. 输入《./run\_tests -j 6》运行写好的测试函数，以验证MOOSE的各个物理模块是否安装成功。漫长的等待

# 创建好自己的app

第二章的目的是基于MOOSE创建一个自定义APP，并完成编译出-opt文件。-opt文件与.i输入文件共同使用即可完整的运行程序。

## MOOSE整体逻辑

如果以前接触过其他有限元软件，那MOOSE逻辑与它们都差不多。如果你是第一次接触有限元软件，那么MOOSE整体逻辑举个例子更好理解：**完整的运行一个MOOSE程序可以看作是以自己的视角参军打仗，包括战争开始前的各种准备（-opt模型文件），以及真正发生战争时的部队、策略、自己的状态等（.i输入文件）。**

-opt模型文件-战争前的准备。你需要加入某个部队（启用MOOSE的models），用部队提供的一些武器与资源（使用models中的各种函数），以及锻炼一些战斗技能（自己自定义函数）。

.i输入文件-真正的战争的各种状态。真正发生战争时，你得把自己的任务目标明确好（网格文件.e，控制方程对应的变量Variables，边界条件BCs，控制方程变量对应的Kernel,等），得明确自己、队伍与敌人的各种信息（控制方程中的对应的Materials，求解器Executioner，输出控制Outputs，甚至辅助获取信息的AuxVariables、AuxKernels等）。

最终完整的战斗的最简单的代码（完整的运行跑一个MOOSE程序）就是：

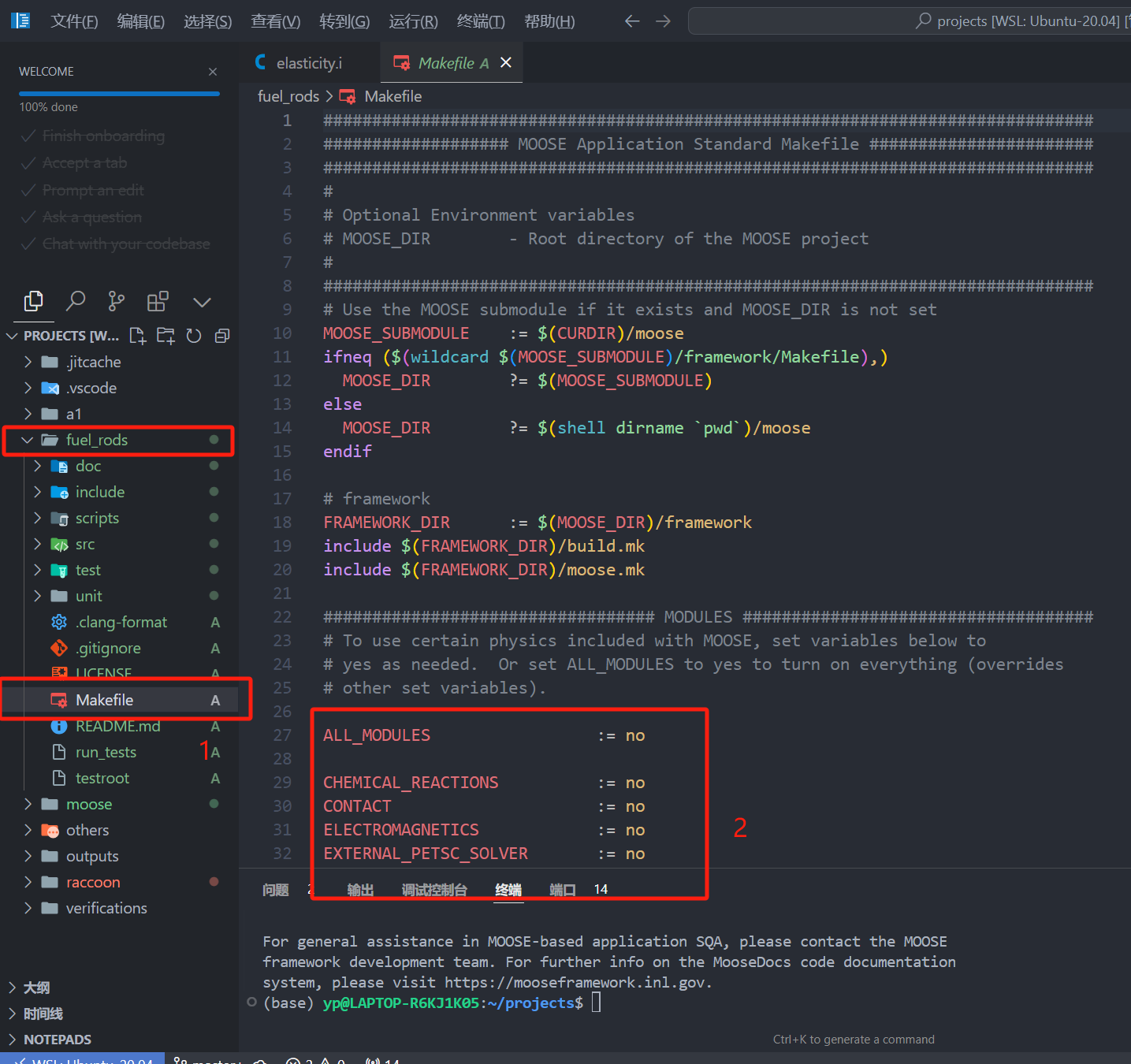
X1-opt -i Y1.i ,

X1-opt就是-opt模型文件（战争前的准备），Y1.i就是输入文件（真正的战争的各种状态）。

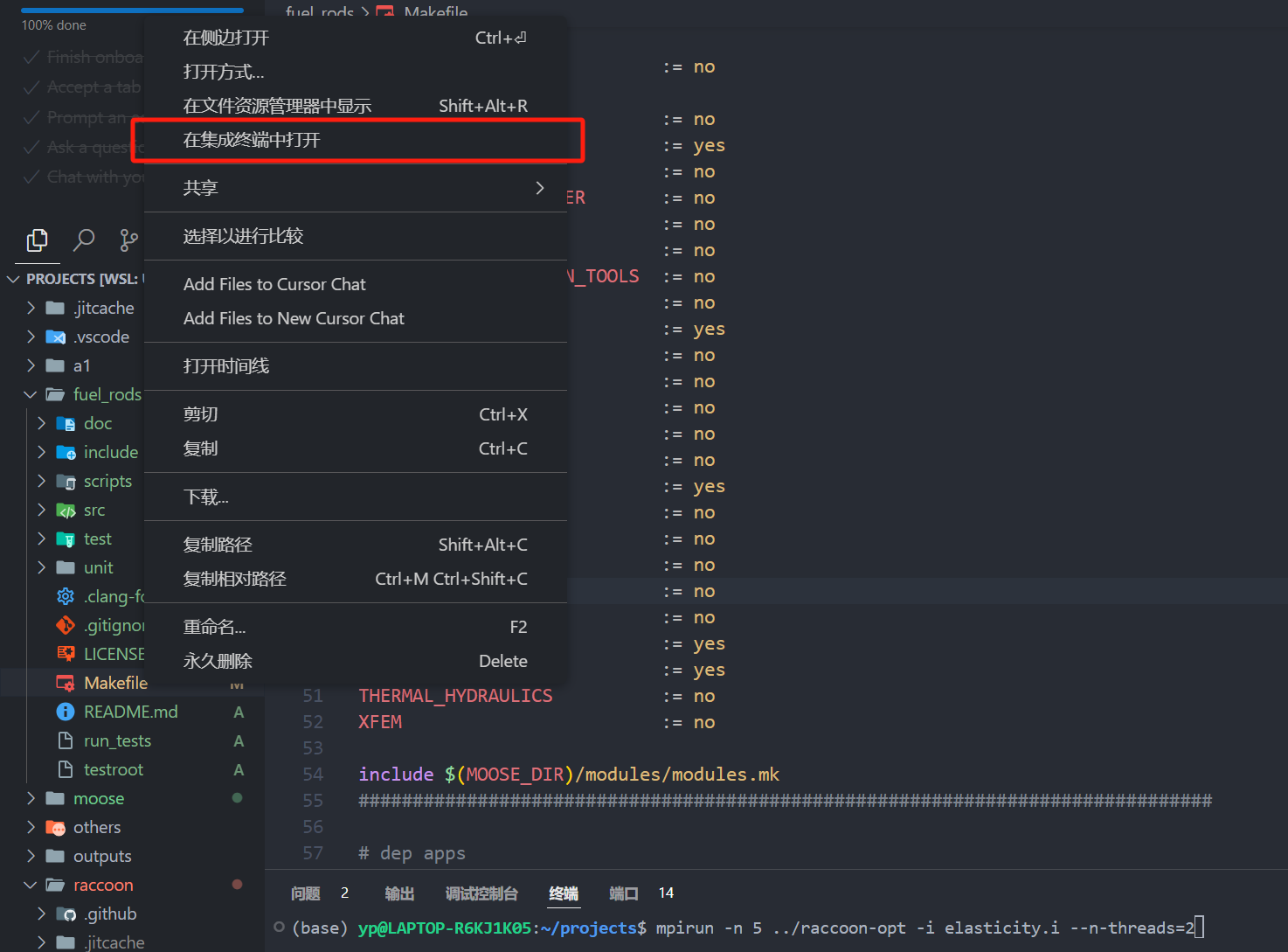
创建的APP就是你自己，它等于你的全部；Makefile中启用MOOSE的一些大模块（MODULES）约等于自己加入了某个部队，加入的越多，能用的武器与资源越多，但是编译起来也慢。

总结一下大概流程就是：

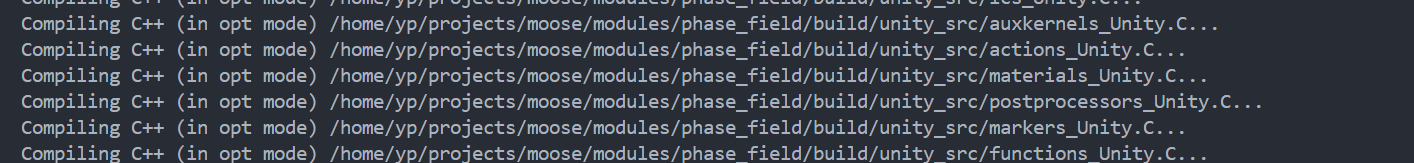
1. 创建基于MOOSE的APP，这个APP里，可以启用相应的MOOSE自带的模块，也可以自己分别在【app路径/include】与【app路径/src】将模型给初步创建好。
2. Make编译好后才是真正将模型创建好了。
3. 《cd ~/projects》
4. 《./moose/scripts/stork.sh FuelRods》比如说我想这个APP模拟的是燃料棒，FuelRods就是APP的名字，改成自己想要的即可。按理说你将出现类似如下叫做fuel\_rods的文件夹（原来是MOOSE的app文件夹不支持驼峰命名法，所以自动变成了fuel\_rods，但是其实MOOSE创建的app还是叫做“FuelRodsApp”，这里请分清楚文件夹的名字与APP名字的区别）



1. APP选物理模型。接下来我们看到fuel\_rods下面的Makefile文件，点击并滑动页面至2处，可以看到里面有丰富的物理模型可供选择，出于fuel\_rods热力耦合断裂模拟考虑，我选了CONTACT、HEAT\_TRANSFER、PHASE\_FIELD、SOLID\_MECHANICS、STOCHASTIC\_TOOLS五个物理模块。
2. 编译。

Ctrl+S保存，后右键Makefile文件，选择《在集成终端中打开》，

终端位置对了后（终端应该显示类似(base) yp@LAPTOP-R6KJ1K05:~/projects/fuel\_rods$），我们就输入《conda activate moose》激活MOOSE运行环境，就可以输入《make -j 2》编译出-opt文件了（蓝色的2与配置有关，详细见4.2）。漫长等待，其中代码运行的时候应出现：



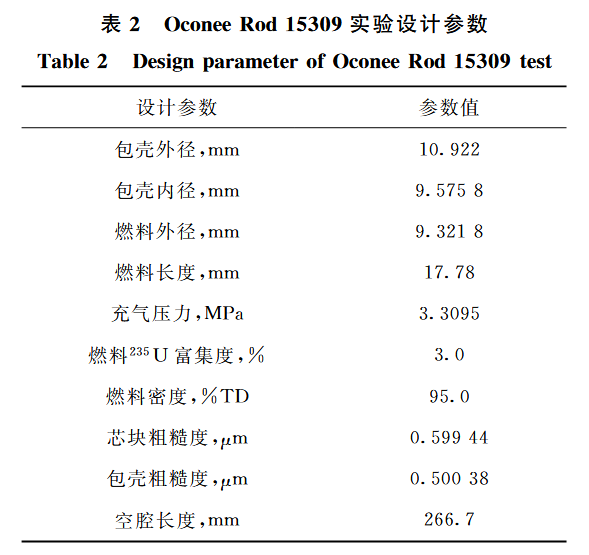
编译结果是以-opt结尾的文件，我的是fuel\_rods-opt

1. 好了，-opt文件有了，在写一个输入文件，我们的整体建模就完成了！

输入文件是.i结尾的文件。我在/home/yp/projects/fuel\_rods文件夹下面建立/Oconee\_Rod\_15309文件夹,表示该文件夹下面的输入文件都是为了模拟Oconee Rod 15309反应堆实验的（你也完全可以不建立文件夹，只需要在fuel\_rods文件夹下即可）。

该实验涉及的参数如下：

《[1]邓超群, 向烽瑞, 贺亚男, 等. 基于MOOSE平台的棒状燃料元件性能分析程序开发与验证[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(7): 1296-1303.》



为此，我们需要建立一个名叫step1\_to\_generate\_e.i的输入文件，专门为了生成网格几何文件，（详细请看github文件下面的fuel\_rods/pellets/Oconee\_Rod\_15309/step1\_to\_generate\_e.i）,里面进行了非常详尽的注解。

终端输入《mpirun -n 10 ../../fuel\_rods-opt -i step1\_to\_generate\_e.i --mesh-only Oconee\_Rod\_15309.e》

你就可以得到一个名字叫做《Oconee\_Rod\_15309.e》的几何与网格文件，作为后续的网格文件输入。

# 简单介绍问题

以该[文件](file:///D:\\Postgraduate\\Papers\\MOOSE\\examples\\elastoplasticity.i)为例：

这个文件其实要解决的是二氧化铀燃料芯块的热-力耦合方程。

在MOOSE中，必须要明确要解决的控制方程，如，我这里需要解的是如下两个控制方程：

热传导方程： 1‑1

力平衡方程： 1‑2

接下来，推导得出它的弱形式。（详细请看[Step 4 Generate a Weak Form | MOOSE (inl.gov)](https://mooseframework.inl.gov/getting_started/examples_and_tutorials/tutorial01_app_development/step04_weak_form.html)的推导）。【或可以先不管，主要看右边的项】

如热传导方程：

可以写成MOOSE使用的弱形式(移项到一边，这里先忽略边界条件)： =0

需要知道的是，MOOSE所有弱形式方程中的每一项（，热平衡方程中出现了3项）其实都对应好[Kernels]中的一项与 [Materials]中的若干项（如中的*ADHeatConductionTimeDerivative方法对应，而*这两个材料属性则是与 [Materials]中的若干项（也可能没有，看每一个项中有没有材料参数），）具体而言，对应的[Kernels]与如图 1.1所示。

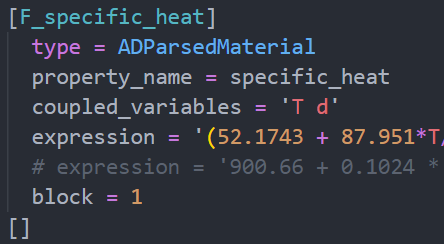
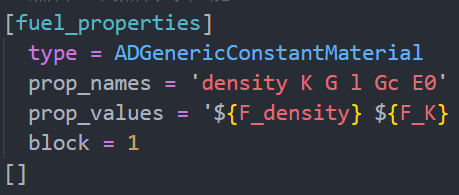
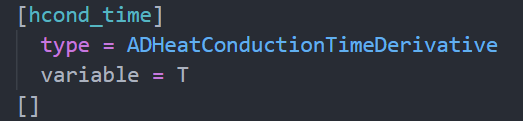


图 1.1 [Kernels]与[Materials]的部分值（左1是[Kernels]的项，右边两个是[Materials]的项）

这里我们再理一下：

1. 所有控制方程
2. 控制方程的弱形式
3. 弱形式的每一项都对应[Kernels]与[Materials]的项（其实还有边界条件的项）

## 几何与网格[Mesh]

### 常用函数

注意这些函数一般只适用于单个简单的情况，复杂的几何需要与其他函数联用。

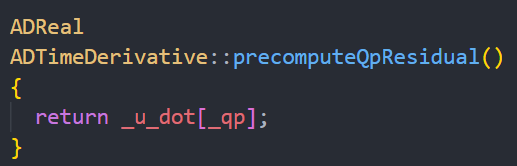
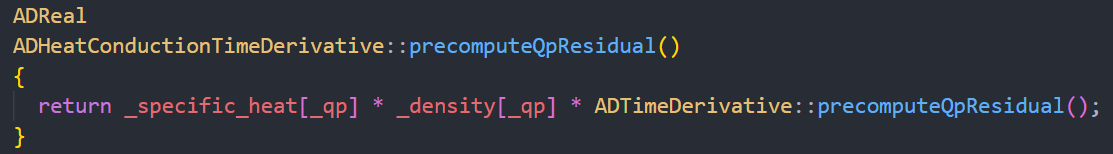
下面是与其他函数联用后的结果展示（都是3维）

详细请见

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 环形燃料[AnnularMeshGenerator](https://mooseframework.inl.gov/moose/source/meshgenerators/AnnularMeshGenerator.html)  详细请见fuel\_rods/SomeTests/test0.1\_Mesh/AnnularFuel/ CompleteAnnularPellet3D.i | 棒状燃料[ConcentricCircleMeshGenerator](https://mooseframework.inl.gov/source/meshgenerators/ConcentricCircleMeshGenerator.html)  详细请见fuel\_rods/SomeTests/test0.1\_Mesh/RodFuel/CompleteRodPellet3D.i |

## [Kernels]：

我们找到/moose/modules/heat\_transfer/src/kernels/ADHeatConductionTimeDerivative.C与其调用的ADTimeDerivative.C文件，可以看到计算残差的部分其实与对应的很好。



由于不同的控制方程中有许许多多不同的项，每一个项的形式不一样，为了方便定义与使用，MOOSE里面有非常多[Kernels]以便使用，详细请看[Kernels System | MOOSE](https://mooseframework.inl.gov/moose/syntax/Kernels/)，

本例子中， ADHeatConduction、ADHeatConductionTimeDerivative、HeatSource分别对应

=0

### 一般参数的定义与引用

如同python或者C++，需要命名全局变量或者局部变量一样。在moose输入文件中，我们先将一些材料参数（如热导率，密度等）进行全局变量的定义（此时moose在计算时是不会调用的，需要用特殊的引用格式才能被moose使用）。

首先在此使用全局变量与表达式的进行命名，写在MOOSE的输入文件(.i文件的开头)，例如

density=3980.0*#*kg⋅m-3

thermal\_conductivity=31*#*W⋅m-1⋅K-1

*#* thermal\_conductivity\_dem=0.026#孔隙的导热系数W⋅m-1⋅K-1

elastic\_constants=3.7e11*#*Pa

nu = 0.3

K = '${fparse elastic\_constants/3/(1-2\*nu)}'

G = '${fparse elastic\_constants/2/(1+nu)}'

注意引用的格式一般用 ？ **= '${ elastic\_constants } ${ K}'**

### 其他常用3.1 [Kernels]

## [Materials]：

其实就是将\_specific\_heat[\_qp] 、\_density[\_qp]等[Kernels]需要调用的参数提前先定义好，可以是常数(ADGenericConstantMaterial方法),可以是与变量耦合的公式（如热导率与温度耦合的经验公式ADParsedMaterial方法），甚至与[Materials]本身模块耦合的公式（ADDerivativeParsedMaterial方法）

下面是[Materials]里面常用的模块与例子：

[fuel\_properties]

type = ADGenericConstantMaterial

prop\_names = 'density K'

prop\_values = '${F\_density} ${F\_K}'

block = 1

[]

在 ADGenericConstantMaterial中，使用

prop\_names = 'x1 x2 x3 x4'与

prop\_values = '${y1} ${y2} y3 y4'

以确定材料参数 x1,x2,x3等值。其中${y1}表示y1是定义的全局变量（即在输入文件开头的density=3980.0*#*kg⋅m-3、nu = 0.3、K = '${fparse elastic\_constants/3/(1-2\*nu)}'、G = '${fparse elastic\_constants/2/(1+nu)}'等

）。

[base\_thermal\_conductivity]

type = ADParsedMaterial

property\_name = base\_conductivity

coupled\_variables = 'T'  *#* T in Kelvin

*#* 使用Harding-Martin表达式

block = 1

expression = '100/(7.5408 + 17.692\*T/1000 + 3.6142\*(T/1000)^2) + 6400/((T/1000)^2.5)\*exp(-16.35/(T/1000))'

[]

在ADParsedMaterial中，使用property\_name确定材料参数的名字。耦合变量为coupled\_variables，公式使用expression。（expression的乘法为\*，次方为^）

*#*热导率

[thermal\_conductivity]

type = ADDerivativeParsedMaterial

property\_name = thermal\_conductivity

coupled\_variables = 'd'

material\_property\_names = 'base\_conductivity'

expression = '(1-d)\*base\_conductivity + d\*base\_conductivity\*0.1'

block = 1

[]

在ADDerivativeParsedMaterial中，也和ADParsedMaterial类似，只是它多了与已经定义好的其他材料参数耦合的量material\_property\_names。

### 常用Materials总结

# Include与scr自定义函数

MOOSE中确实有非常多非常好用的模块与对应的函数，但是为了解决特殊问题，我们总是会用到MOOSE里面没有的函数，这一章重点介绍自定义函数。

这里面

# 附录

## Linux基础命令

1. 明确【终端位置】与【文件位置】的区别与联系

注意打开Linux终端或者Windows终端后，其实都是有一个对应位置的，如Windows终端显示【(base) PS C:\Users\xxxxx>】，那么可以确定该终端目前在C盘下的Users\xxxxx文件夹下。如果启用相关命令，一定是基于该路径进行的操作（环境变量除外）。这是必要是基础知识。如linux终端显示【(base) yp@LAPTOP-R6KJ1K05:~/projects/moose/test$】那么同理，该终端现在位于~/projects/moose/test文件夹下。

1. 切换终端位置，cd相关命令（其实一般的切换目录命令直接使用Cursor软件自带的功能点击就很方便了，但是还是得明确文件位置与切换这个概念，因为运行程序时用的上）

假设有这么一个文件路径/home/yp/projects/a1/b2/c3,终端位置在/home/yp/projects

* 其他任意目录

《cd /home》终端位置切换到 /home 目录:

* 子目录

《cd a1/b2/c3》终端位置切换到子文件夹(即/home/yp/projects/a1/b2/c3)

* 本目录

《cd ./》终端位置切换到当前目录（啥事都没做）

* 上级目录

《cd ../》终端位置切换到上级目录(即/home/yp)

《cd ../../》终端位置切换到上上级目录（即/home）

1. MOOSE中最常用到的地方
2. 例子1，简单例子（如下图）：

当前linux终端位置为：~/projects/moose/examples/ex01\_inputfile$

要想跑MOOSE程序，那么得分别知道模型文件(即-opt文件)的与输入文件(即.i文件)的相对于目前终端的相对位置，

-opt文件（ex01-opt）在/home/yp/projects/moose/examples/ex01\_inputfile/，即当前文件夹(./ex01-opt)

.i文件（ex01.i）在/home/yp/projects/moose/examples/ex01\_inputfile/,当前文件夹(./ex01.i)【，其实./也可以省略，因为./ex01-opt -i ./ex01.i命令下，./ex01.i部分默认为路径，所以当前文件夹下，./也可不加。但是由于第一项作为命令的开始有许多限制，而不能省略./】

所以命令为《./ex01-opt -i ./ex01.i》或《./ex01-opt -i ex01.i》

1. 例子2，困难例子如下图：

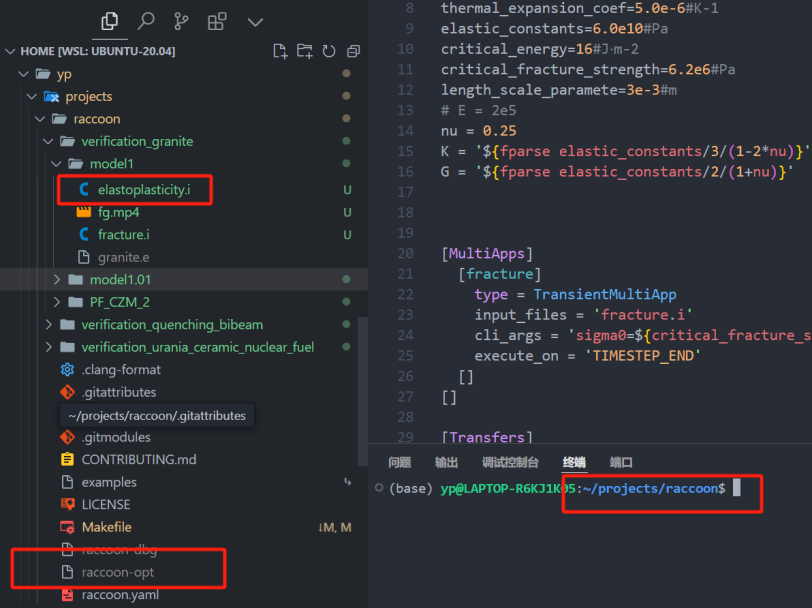
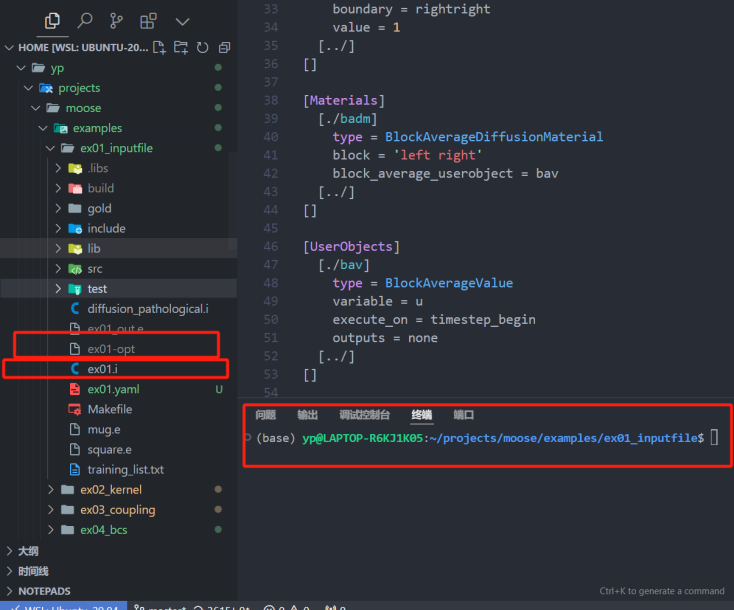
当前linux终端位置为：~/projects/raccoon/verification\_granite/model1/elastoplasticity\_out\_cp$

要想跑MOOSE程序，那么得分别知道模型文件(即-opt文件)的与输入文件(即.i文件)的相对于目前终端的相对位置，

-opt文件（raccoon-opt）在/yp/projects/raccoon/raccoon-opt，即相对位置为上上上级目录（../../../raccoon-opt）

.i文件（elastoplasticity.i）在yp/projects/raccoon/verification\_granite/model1/elastoplasticity.i即相对位置上级目录（../elastoplasticity.i）

于是命令就变成了../../../raccoon-opt -i ../elastoplasticity.i



左图为例子1 右图为例子2

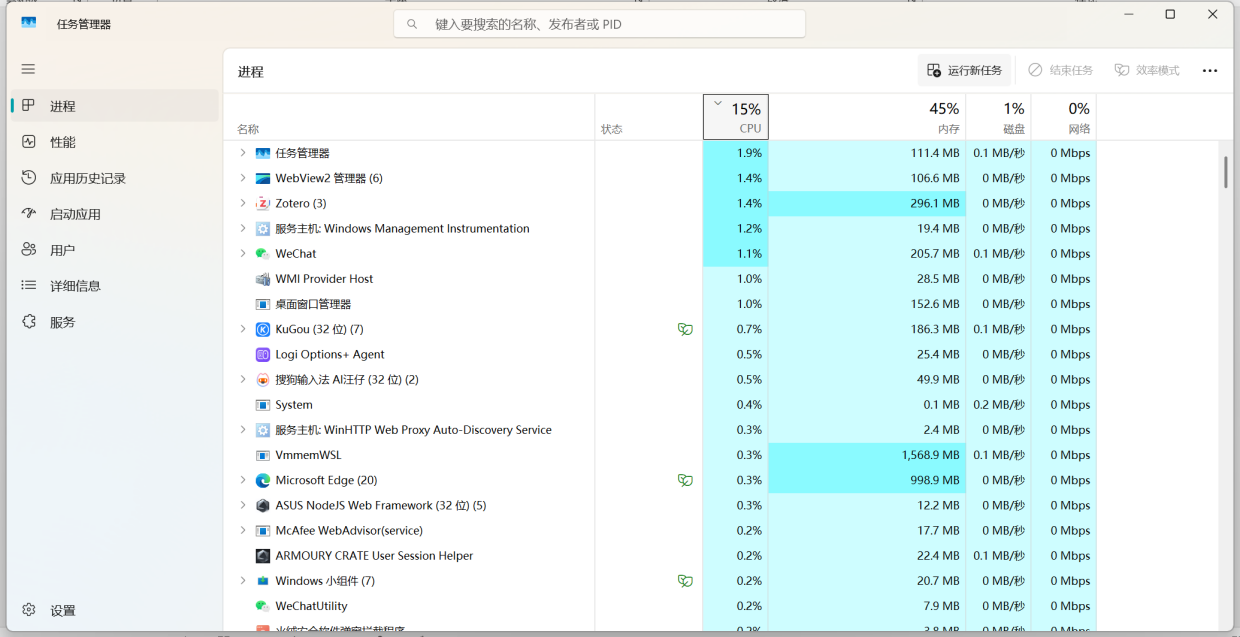
## 多线程计算

目前用到多线程计算的地方有最少3个：

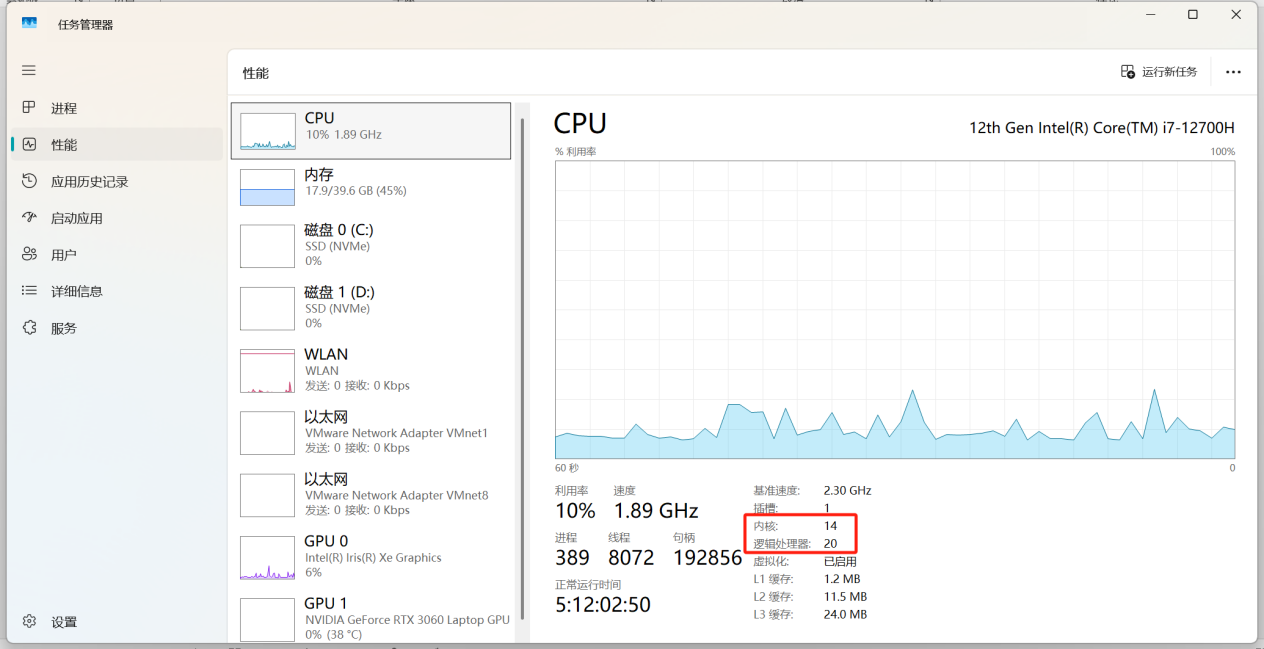
1. 《make -j x》
2. 《./run\_tests -j x》
3. 《mpirun -n x ./ex01-opt -i ./ex01.i --n-threads=y》其中标蓝的地方，即x(处理器),y（线程）的选取，需要进一步考虑！数字代表的是计算使用的核数与线程，合适的x,y可大大提高运算速度。[具体请参考原文](https://mooseframework.inl.gov/getting_started/examples_and_tutorials/tutorial01_app_development/step07_parallel.html" \l "step-7-execute-in-parallel)。

具体分为如下几步：

1. 键盘同时按住左下角的CTRL键+SHIFT键+左上角的ESC键（没有弹出窗口可以先按住前两个，后按ESC键）



1. 点击性能，



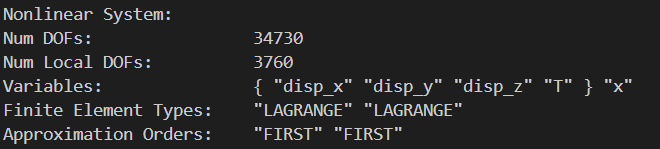
1. 内核14，这是个关键参数，这是我们能取的最大值。我的经验是y取1，x得小于内核数，如果你跑程序时还需要用到它干很多事情，那么可以取10，甚至取8。

《mpirun -n 10 ./ex01-opt -i ./ex01.i --n-threads=1》这将大幅提高运行速度。

### 更加专业的确定方法：

1. 结论：
   * + [**MOOSE开发人员倾向于认为，20000是单个流程可能负责的理想的DOF数量（Local DOFs）。**](https://mooseframework.inl.gov/getting_started/examples_and_tutorials/tutorial01_app_development/step07_parallel.html#step-7-execute-in-parallel)但当出现以下情况时，可使用更低DOFs/process：
       - 强非线性问题（需要更多牛顿迭代）
       - 多物理场耦合（如热-力-相场耦合）
       - 内存限制（每个进程DOFs超过内存容量）
     + 越多核心数越好，但核心数多到一定程度后会达到一个阈值。
     + 线程数的加速效果相当有限。在只有一个核心时加速才明显。
2. 具体实操：

每当运行一个程序时，终端的将会出现类似下面的信息：



其中的Num Local DOFs是用总自由度Num DOFs除以使用的内核数，官网提示这个值小于20000为佳。但是遇到多物理场、强非线性时，可继续降低。

1. 根据测试，我使用的20核28逻辑处理器的台式电脑：

热力化学耦合（**强非线性问题+多物理场耦合**）的情况下的测试：

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 核心数 | 线程数 | Local DOFs | 运行时间(s) | 加速比 | 效率(%) |
| 1 | 1 | 34730 | 170.60 | 1.00 | 100% |
| 1 | 2 | 34730 | 146.50 | 1.16 | 58% |
| 1 | 3 | 34730 | 142.70 | 1.20 | 40% |
| 2 | 1 | 17365 | 71.80 | 2.38 | 119% |
| 2 | 2 | 17365 | 63.80 | 2.67 | 67% |
| 2 | 3 | 17365 | 62.50 | 2.73 | 45% |
| 3 | 1 | 11577 | 43.10 | 3.96 | 132% |
| 3 | 2 | 11577 | 39.40 | 4.33 | 72% |
| 3 | 3 | 11577 | 41.40 | 4.12 | 46% |
| 4 | 1 | 8683 | 32.90 | 5.19 | 130% |
| 4 | 2 | 8683 | 34.20 | 4.99 | 62% |
| 4 | 3 | 8683 | 32.60 | 5.23 | 44% |
| 5 | 1 | 6946 | 24.80 | 6.88 | 138% |
| 5 | 2 | 6946 | 26.20 | 6.51 | 65% |
| 6 | 1 | 5788 | 24.00 | 7.11 | 118% |
| 6 | 2 | 5788 | 23.70 | 7.20 | 60% |
| 7 | 1 | 4961 | 22.90 | 7.45 | 106% |
| 7 | 2 | 4961 | 22.60 | 7.55 | 54% |
| 8 | 1 | 4341 | 21.90 | 7.79 | 97% |
| 8 | 2 | 4341 | 21.00 | 8.12 | 51% |
| 9 | 1 | 3859 | 21.30 | 8.01 | 89% |
| 9 | 2 | 3859 | 19.40 | 8.79 | 49% |
| 10 | 1 | 3473 | 20.80 | 8.20 | 82% |
| 10 | 2 | 3473 | 19.40 | 8.79 | 44% |

因此，推荐尽可能用多一些内核数，而线程数给个1即可。

## Restart and Recover

当我们运行的程序迫不得已需要中止时，我们就需要使用Recover命令了（得提前设置部分参数）。[具体见官网](https://mooseframework.inl.gov/releases/moose/2024-03-08/application_usage/restart_recover.html)。

### 具体设置

[Outputs]

  exodus = true #表示输出exodus格式文件

  [my\_checkpoint]

    type = Checkpoint

    time\_step\_interval = 5    # 每5个时间步保存

    num\_files = 4             # 保留最近4个检查点

    wall\_time\_interval = 3600 # 每小时保存一次（秒）

  []

  file\_base = 'outputs/test1\_RestartAndRecover/step2\_onlyPellet3D'

[]

绿色字体是与程序中断后的恢复有关的代码。其中标注较为清楚。file\_base后面的是一串路径，输出.e文件与恢复文件xxxxxx\_cp都是在这个路径之下。

在[Outputs]设置好后，正常运行程序时，程序就可以保存检查点文件。这些文件格式如下

# 典型检查点目录结构

xxx\_cp/

├── 0005-mesh.cpa.gz # 网格数据（所有进程共享）

├── 0005-restart-0.rd# 进程0的数据

├── 0005-restart-1.rd# 进程1的数据

├── 0005-restart-2.rd# 进程2的数据

├── ...

├── 0010-mesh.cpa.gz

├── 0010-restart-1.rd

└── ...

其中0005-restart-x.rd的x的最大值直接与你的所指定的核数相关。即

《mpirun -n x ./ex01-opt -i ./ex01.i --n-threads=1》

下一次需要恢复时，直接在《mpirun -n x ./ex01-opt -i ./ex01.i --n-threads=1》后加—recover即可，

运行命令为

《mpirun -n x ./ex01-opt -i ./ex01.i --n-threads=1 --recover》

这将从最新的检查点出发继续运行。

## GPU并行

难度看起来有些大，基本没有看到完整的教程

## 常见报错

### 代码格式问题

(moose) yp@LAPTOP-R6KJ1K05:~/projects/fuel\_rods/pellets/Wu2021/input\_files$ mpirun -n 4 ../../../fuel\_rods-opt -i step3\_ThermalCouple2.i --n-threads=2

===================================================================================

=   BAD TERMINATION OF ONE OF YOUR APPLICATION PROCESSES

=   PID 235217 RUNNING AT LAPTOP-R6KJ1K05

=   EXIT CODE: 9

=   CLEANING UP REMAINING PROCESSES

=   YOU CAN IGNORE THE BELOW CLEANUP MESSAGES

===================================================================================

YOUR APPLICATION TERMINATED WITH THE EXIT STRING: Segmentation fault (signal 11)

This typically refers to a problem with your application.

Please see the FAQ page for debugging suggestions

原因：这里没有打注释，一遇到这个报错，你应该庆幸了，因为问题很快就能被发现且容易解决。

