

AIRSS 说明手册

Yang Li

lyang.1915@gmail.com

2020.10.24 — 2020.10.28

Contents

1 关于 AIRSS	2
2 准备工作	3
2.1 Linux 系统	3
2.2 程序的安装与卸载	3
2.3 初次运行 AIRSS	3
3 自定义随机结构	5
3.1 *.cell 文件结构概括	5
3.2 *.cell 文件参数细节	7
3.2.1 结构数据	7
3.2.2 全局参数	12
4 结构弛豫与能量计算	23
4.1 联合 airss-pp3 模块弛豫	23
4.2 联合 CASTEP 弛豫	24
4.3 联合 VASP 弛豫	25
5 数据后处理	26
5.1 *.res 文件结构	26
5.2 数据批量化处理	27
A AIRSS 安装日志	29
A.1 软件主体安装	29
A.2 辅助插件安装	32
A.3 卸载软件	35

1 关于 AIRSS

AIRSS(Ab Initio Random Structure Searching) 是一款由英国剑桥大学 Chris Pickard 教授¹等人开发的第一性原理结构搜索软件. 该软件是开源的, 受 GPL2 许可证保护. 访问其官方网站, <https://www.mtg.msm.cam.ac.uk/Codes/AIRSS>, 可获取安装源码.

所谓结构搜索是指: 对于一原子结构未知的体系, 在一定物理条件 (如原子间距, 分布密度, 元素构成, 元素配比等) 的限制下, 广泛地猜测其构型, 进行结构弛豫并计算其能量, 最终得到 (DFT 计算上的) 全局最稳定原子结构的过程. 显然人工手动猜测或是计算机盲目地遍历式搜寻是极为笨拙、耗时、甚至难以实现的. 因此, 就需要使用一套成熟的结构搜索软件, 系统且巧妙地捕捉体系的稳定构型.

AIRSS 正是这样一款软件. Chris 教授本人关于此软件的介绍可参考[有关视频](#). 另外还有两个较为常用的结构搜索软件: USPEX 和 CALYPSO.

与 USPEX 或 CALYPSO 中使用的遗传算法不同, AIRSS 基于完全随机的结构搜索策略, 其产生的不同结构是完全随机且独立的, 这样的算法非常有利于搜索任务的并行实现.²而这种随机方法的有效性在 Chris 教授关于 AIRSS 文章中也有所证明.³ AIRSS 最强大之处在于其众多灵活的可调参数, 这可以说是此项目最出众的特点. AIRSS 的用户体验给人一种“傻瓜相机 vs 专业单反相机”的感觉. 前者简单实用, 可以一键提交各种不同类型的任务并获得不错的结果. 后者按键众多参数可调, 能自定义产生各种更加专业精细的结果. 前者是牺牲灵活性换取操作简易; 后者则相反. AIRSS 可以根据用户需求高度自定义研究对象的特征. 例如, 我们甚至可以使用此软件验证某个原子结构的稳定性, 或是进行晶格表面势能的计算.

令人遗憾的是, AIRSS 作为一个功能强大的结构搜索软件, 其[官方手册](#)却相对简陋, 未能覆盖全部用法. 再加上网络上相关说明文档或教程十分匮乏, 所以大部分人对 AIRSS 这样一个材料设计领域异常优秀的程序并不熟悉.

为了弥补这一缺憾, 笔者决定编写此文. 以下内容算不上指南或教程, 仅仅是学习 AIRSS 的一些记录. 本文绝大部分结论是自行分析源码、实际运行程序、尝试摸索所得.⁴受各种因素限制, 理解和解释上的错误或不可避免. 如有问题, 还望您不吝指正.

¹Chris 教授同时还参与研发过 DFT 计算软件 CASTEP

²比如, 我们可以用 AIRSS 随机产生 1000 个结构, 而后独立弛豫

³[1] PRL 97, 045504 (2006); [2] JPCM 23, 053201 (2011)

⁴官方虽然没有给出完整的手册, 但是提供了大量的使用范例, 位于程序的 example 目录中, 供使用者参考学习.

2 准备工作

2.1 Linux 系统

阅读本记录前, 您需要对 Linux 操作系统有一定的了解. 例如, 能理解以下指令的含义:

```
user@machine_name$ ls | grep *.cell
```

以及下述指令所能引起的灾难性事故:

```
root@machine_name# rm -rf / home/user_name/trash_directory
```

另外需要特别提醒的是, 由于 PDF 文档编译时会将某些字符转化为命令行不能识别的符号 (如 `ls -l` 中的减号, 虽然他们看起来与命令号输入的减号并无不同), 所以在直接复制粘贴本文档中的命令或字符使用时, 请加以小心.

2.2 程序的安装与卸载

附录 A 中以 `airss-0.9.0` 版本为例, 简要记录了 AIRSS 的安装过程. 最新的 `airss-0.9.1` 在安装过程上做了大量简化, 您可以自行阅读其内包含的 `README` 文件, 安装此版本.

AIRSS 主运行脚本使用 `perl` 语言写成, 仅能安装在 `*nix` 系统中, 且只支持在命令行 (Command Line) 使用. 安装此软件前, 您最好已经了解 `GNU make` 的使用方法.

2.3 初次运行 AIRSS

初次接触 AIRSS, 您可以在终端输入 `airss.pl` 指令查看软件欢迎界面.

```

user@machine_name$ airss.pl

      .o.      ooooo oooooooooo.      .oooooooo..o .oooooooo..o
      .888.      '888' '888      'Y88. d8P'      'Y8 d8P'      'Y8
      .8:888.      888      888      .d88' Y88bo.      Y88bo.
      .8' '888.      888      888ooo88P'      ':Y8888o.      ':Y8888o.
      .88ooo8888.      888      888'88b.      ':Y88b      ':Y88b
      .8'      '888.      888      888 '88b. oo      .d8P oo      .d8P
      o88o      o8888o o888o o888o o888o 8::88888P' 8::88888P'

      Ab Initio Random Structure Searching
      Chris J. Pickard (cjp20@cam.ac.uk)
      Copyright (c) 2005-2018

Please cite the following:

[1] C.J. Pickard and R.J. Needs, PRL 97, 045504 (2006)
[2] C.J. Pickard and R.J. Needs, JPCM 23, 053201 (2011)

Usage: airss.pl [-pressure] [-build] [-pp0] [-pp3] [-gulp]
               [-lammmps] [-gap] [-psi4] [-cluster] [-slab]
               [-dos] [-workdir] [-max] [-num] [-amp] [-mode]
               [-minmode] [-sim] [-symm] [-nosymm] [-mpinp]
               [-steps] [-best] [-track] [-keep] [-seed]
-pressure f Pressure (0.0)
-build      Build str. only (false)
-pp0        Use pair potentials rather than Castep (0D) (false)
-pp3        Use pair potentials rather than Castep (3D) (false)
-gulp       Use gulp rather than Castep (false)
-lammmps    Use LAMMPS rather than Castep (false)
-gap        Use GAP through QUIP/QUIPPY/ASE (false)
-psi4       Use psi4 (false)
-vasp       Use VASP (false)
-cluster     Use cluster settings for symmetry finder (false)
-slab       Use slab settings (false)
-dos        Calculate DOS at Ef (false)
-workdir s   Work directory ('.')
-max        n Maximum number of str. (1000000)
-num        n Number of trials (0)
-amp        f Amplitude of move (-1.5)
-mode       Choose moves based on low lying vmodes (false)
-minmode    n Lowest mode (4)
-sim        f Threshold for structure similarity (0.0)
-symm       f Symmetrise on-the-fly (0.0)
-nosymm     f No symmetry (0)
-mpinp      n Number of cores per mpi Castep (0)
-steps      n Max number of geometry optimisation steps (400)
-best       Only keep the best str. for each compos. (false)
-track      Keep the track of good str. during RESH(false)
-keep       Keep intermediate files (false)
-seed       s Seedname ('NONE')
user@machine_name$

```

airss.pl 是使用 AIRSS 执行结构搜索的主要指令. 欢迎界面中已经系统且简要地说明了该指令的用法. 用法解释中的表格有三列. 第一列是传入参数的名称; 第二列是传入参数的数据类型, f 代表浮点数, n 代表整数, s 代表字符串, “空” 代表逻辑字符串 true 或 false. 第三列是对相应参数的简单描述.

3 自定义随机结构

AIRSS 的核心组件名为 **buildcell**. 这个组件的作用就是依据用户给出的 *.cell 文件, 生成一系列结构的随机但符合给定物理条件约束的初始原子构型. 另外, 我们也可以单独拿出此模块, 使其与其他程序 (如 VASP 等) 适配. 学会书写出高度自定义化的 *.cell 文件是学习 AIRSS 的根本.

buildcell 区块的执行大致分为以下几步:

1. 通过 cell.f90 模块读取 *.cell 文件中的配置信息.
2. 通过 build.f90, opt.f90 等模块生成满足要求的结构.
 - (a) 首先根据给定的原子及其半径确定合理的晶格常数, 若存在晶格标签⁵ #FIX 则忽略此步骤.
 - (b) 按要求在随机位置生成某个原子.
 - (c) 根据约束选择: 接受这一位置, 拒绝这一位置, 或者 **PUSH** 当前原子. **PUSH** 是指: 将原子位置过近的两原子在其连线方向上, 反向移开相同距离. 当原子标签中有 FIX 或 NOMOVE 时, 忽略这一操作.
 - (d) 遍历体系中的全部原子, 直至更新完整个结构.
 - (e) 视用户设置, 用唯象的对势 (pp3) 对结构进行简单弛豫.
3. 通过 buildcell.f90 模块输出上述满足要求的随机结构.

3.1 *.cell 文件结构概括

.cell 文件是结构搜索的“种子文件”, 您可以在此文件中设置搜索约束条件. 文件名称前的星号 () 代表是 Linux 系统下的通配符, 也即它代表任意字符. 在 AIRSS 文件系统中, 我们把后缀名前的部分称为“seed name”. Seed name 可用于区分不同计算的同类文件. 文中后续见到所有通配符, 如果不特殊指明, 均代指 seed name.

***.cell 文件有以下特点:**

1. 由于 AIRSS 是由部分参与 CASTEP 研发的人员编写, 因此该程序对 CASTEP 极其友好, 这里的 *.cell 文件与 CASTEP 中的 *.cell 文件完全兼容.
2. *.cell 文件设置参数时, 需要使用一定的 keywords 标明所设参数的含义.
3. AIRSS 完全复用了 CASTEP 中进行结构声明的 keywords, 如 LATTICE_CART 等.
4. AIRSS 内置的 keywords 一般以 # 开头, 如 #RASH. (以使得 AIRSS 的 *.cell 文件与 CASTEP 完全兼容)
5. *.cell 文件主要由两部分组成: “结构数据” 和 “全局参数”. 相应的, 文件中的 keywords 也可以分为上述两类.
6. 任何 keyword 之间没有书写顺序上的限制.
7. *.cell 中设定的所有的 keywords 需要采用**大写字母**书写, 并注意在 keywords、等号和参数数值之间**不能添加空格**. 同时, 任何空行都将被自动忽略.
8. 该文件中使用双井号 (##) 标明注释内容.
9. 虽然程序允许单行中出现多个 keywords, 但出于对所写文件的规范性和易读性考虑, 最好一行只写一个 keyword.

以下是预测金属铝结构所用到的 Al.cell 文件:

```
0 user@machine_name$ cat Al.cell
1 %BLOCK LATTICE_CART
2 2 0 0
3 0 2 0
4 0 0 2
5 %ENDBLOCK LATTICE_CART
6
7 %BLOCK POSITIONS_FRAC
8 Al 0.0 0.0 0.0 # Al1 % NUM=8
9 %ENDBLOCK POSITIONS_FRAC
10
11 #MINSEP=1.5
12 user@machine_name$
```

上述 *.cell 文件的结构可做如下概括:

1. 前 9 行是由%BLOCK [keywords] 格式定义的数据读取区块, 这种格式在 CASTEP 中是十分常见的. 这些区块定义了晶体基本的**结构数据**.
2. 1 至 5 行数据的 [keywords] 是 LATTICE_CART, 声明使用笛卡尔绝对坐标系定义的单胞基矢.
3. 7 至 9 行使用的 [keywords] 是 POSITIONS_FRAC. 这在 CASTEP 中的意义是“以分数坐标定义的原子位置”. 而在 AIRSS 中, 该数据模块不仅可以指明原子初始位置, 还可以定义搜寻过程中对单种原子的约束条件. 若初始不知道原子的具体位置, 可将其设为任意值, 如 (0, 0, 0), 程序将自行找到符合要求的原子位置. 原子位置设置的更具体细节将在之后给出.
4. 第 11 行的 #MINSEP 是 AIRSS 中的**全局参数**. #MINSEP=1.5 表明了任意两原子的间距不得低于 1.5 Å.

可以看到, *.cell 文件的结构大致分为两大部分: **结构数据**和**全局参数**.

3.2 *.cell 文件参数细节

3.2.1 结构数据

该部分沿用了 CASTEP 的结构文件中定义数据的模式. 结构数据由两部分构成: 晶格参数数据区块, 原子位置数据区块.

数据区块的具体模式如下所示:

```
%BLOCK [keywords]
[...]
[structure data]
[...]
%BLOCKEND [keywords]
```

可以在 AIRSS 中使用的数据区块关键字 ([keywords]) 已在 Table 1 中列出.

Table 1: AIRSS Cheat Sheet – Data BOLCK

参数名称	功能说明
LATTICE_CART	使用笛卡尔坐标系, 以一个 3×3 的矩阵定义 单胞 基矢. 通过在该区块中附加以下标签: #FIX, #CFIX, #ABFIX, 可分别实现: 固定整个晶格形状, 固定晶格常数 c, 固定晶格常数 ab. 另外, 需要强调的是, 如果要确保晶格参数不变, 除了在晶格参数数据区块中加入#FIX, 以保证在猜测晶格结构时保持其为常值外, 还需要在 DFT 弛豫软件中做相应的设置, 以保证其在结构弛豫时也不变.

Continued on next page...

Table 1 – Continued from previous page

参数名称	功能说明
LATTICE_ABC	以一个 2×3 的矩阵定义单胞的晶格参数. 矩阵第一行是参数 abc, 第二行是三个夹角. 在同一个 .cell 中, 与 LATTICE_CART 二选一即可. 通过在该区块中附加以下标签: #FIX, #CFIX, #ABFIX, 可分别实现: 固定整个晶格形状, 固定晶格常数 c, 固定晶格常数 ab.
POSITIONS_FRAC	以晶格基矢坐标系下的分数坐标定义原子位置.
POSITIONS_ABS	以笛卡尔坐标系下的绝对数值坐标定义原子位置. 与 POSITIONS_FRAC 二者选一即可.
SYMMETRY_OPS	定义生成的单胞所必须满足的对称操作, 四行一组, 前三行定义旋转操作, 第四行行定义平移操作. 具体用法可参考 CASTEP:SYMMETRY OPS .

下面简单介绍, 晶格参数数据区块和原子位置数据区块的详细书写方法.

晶格参数 首先介绍晶格参数的设定, 以 LATTICE_CART 为例.

例 1.

```

1 %BLOCK LATTICE_CART
2 20 0 0
3 0 20 0
4 0 0 20
5 #FIX
6 %BLOCKEND LATTICE_CART

```

上述字段构建了一个 $20 \times 20 \times 20 \text{ \AA}^3$ 的正方体作为晶体的单胞. 这里的 #FIX 被称为**晶格标签** (Lattice Tags).

它声明了晶格常数在搜寻 (生成初始随机结构) 过程中是不能改变的. 如果您想保证体系晶格常数在进行 DFT 弛豫时也不变, 则需要在相应计算软件的输入文件中设置.

原子位置 再介绍原子位置的设置方法, 以 POSITIONS_FRAC 为例.

例 2.

```

1 %BLOCK POSITIONS_FRAC
2 Al 0.0 0.0 0.0 # A11 % NUM=2
3 Mg 0.0 0.0 0.0 # Mg1 % NUM=4
4 O 0.4 0.2 0.3 # O1 % NUM=1 POSAMP=0 FIX
5 O 0.1 0.1 0.1 # O2 % NUM=1 POSAMP=0 UNMOVE
6 H 0.3 0.3 0.6 # free_H
7 H 0.0 0.0 0.0 # H-set % ANGAMP=0 POSAMP=0
8 H 0.0 0.0 0.0 # H-set % ANGAMP=0 POSAMP=0
9 %BLOCKEND POSITIONS_FRAC

```


通过这个例子可以看出, 原子位置结构数据的基本格式是:

```
[element] [x] [y] [z] # [atoms_set_name] % [tag1] [tag2] [tag3]
```

每一行内部的元素含义如下:

1. 第一项是元素名称, 如果将元素名称设置为 **Z**, 则表示此原子是个空位, 空位与真实原子一样具有体积和 **PUSH** 属性, 但不会在最终结果中输出.
2. 二三四项是原子位置坐标.
3. 井号 (#) 后的第一项是原子所在原子集的名称, 原子集名称可以被设置成任意字符. 原子集名称相同的原子组成一个原子集, 原子集是由一个或多个原子构成的基本结构单元, 同一个原子集中的原子做相同的随机移动, 且不受 **PUSH** 影响. 如无特殊需求, 为了实现自由度相对最大化, 一般不推荐将不同原子放入同一原子集中.
4. 百分号 (%) 之后的内容都是原子标签 (Atom Tags). 同一行原子可以指定多个原子标签, 中间用空格隔开, 他们共同指定了该原子应该满足的若干约束条件.

Table 2 是 AIRSS 中全部可用的原子标签的具体说明.

Table 2: AIRSS Cheat Sheet – Atom Tags (distance in Å)

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
NUM=n NUM= $n_{\min} - n_{\max}$	int	1	定义该行原子实际代表的原子个数. 使用 NUM 定义的重原子会被逐个单独分配到不同的原子集中.
POSAMP=d	float	-1.0	定义该行原子在结构搜索过程中, 能偏离初始位置的最大距离. 若为负值则无限制.
MINAMP=d	float	0.0	定义该行原子在结构搜索过程中, 偏离初始位置的最小距离.
XAMP=d	float	-1.0	定义该行原子在结构搜索过程中, 在 X 轴方向上移动的最大距离. 若为负值则无限制. 设置该项会令 POSAMP 和 MINAMP 失效.
YAMP=d	float	-1.0	定义该行原子在结构搜索过程中, 在 Y 轴方向上移动的最大距离. 若为负值则无限制. 设置该项会令 POSAMP 和 MINAMP 失效.

Continued on next page...

Table 2 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
ZAMP=d	float	-1.0	定义该行原子在结构搜索过程中, 在 Z 轴方向上移动的最大距离. 若为负值则无限制. 设置该项会令 POSAMP 和 MINAMP 失效.
ANGAMP= θ	float [0, 360]	-1.0	原子绕自身所在原子集中心旋转角度的最大值 (与 POSAMP 互相独立, 分开作用). 存在晶格标签 #FIX 时, ANGAMP=0, POSAMP=0 与 NOMOVE(\FIX) 共用, 可保证原子在原始位置不动. 如果 cell 文件中所有原子集都只有 1 个原子, 则该参数失效, ANGAMP 强制设为 0. 若为负值则无限制.
RAD=d	float	0.0	设置原子的半径, 用于判断两个原子间的最小距离, MINSEP 其优先级低于直接设置全局参数 #MINSEP=.
FIX	void	off	该原子在产生结构时不受 PUSH 影响. 任何接近该原子的可移动原子都会以 2 倍的 PUSH 步长被 PUSH 回去. 同时向 cell 文件中写入指令使其在 CASTEP 弛豫时也不动. 这一指令仅在晶格被 #FIX 时有效. 原子标签中的 FIX 与晶格标签中的 #FIX, #CFIX, #ABFIX 名称相似, 但作用不同.
NOMOVE	void	off	该原子在产生结构时不受 PUSH 影响, 任何接近该原子的可移动原子都会以 2 倍的 PUSH 步长被 PUSH 回去. 这一指令仅在晶格被 #FIX 时有效.
COORD=n, COORD= $n_{\min} - n_{\max}$	int	-1	约束该行原子的配位数 (最近邻原子数). 若为负值则无限制.
NN= $\pm elm$	string	null	规定原子最近邻元素种类, '+' 代表必须近邻该元素, '-' 代表不能近邻该元素. 一个原子只能指定一种元素近邻或不近邻 (NN 参数仅会被读入一次). 若为空, 则表示无限制

Continued on next page...

Table 2 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
OCC=p	float [0, 1]	1.0	该点位占据原子的几率, 同种元素在不同位置的占据几率之和必须为大于 0 的整数. 接收分数形式的输入, 如 OCC=1/3. 若该值设为小于 0 的数, 则强行将该原子的 OCC 设置为 1, 同时不再输出该原子可能因对称性衍生的其他原子位置. 若原子同时有 FIX 或 NOMOVE 标签, 则 OCC 强制设为 1. 若该原子 OCC 大于 1, 则将其设置为空位 (与将元素名称设为 Z 的效果相同). 系统存在对称性时, 使用更小的 OCC 可强制某一原子位于对称性更高的点位上. 但更为自然的用法是使用 MULT 代替 OCC 设置. 若设置了全局参数 #NFORM=n (n 大于 0): 在没有对称性条件下, OCC 参数失效; 在有对称性条件下, 请参考 MULT 中的说明.
MULT=m	float	-1.0	设置该原子点位的 multiplicities. 这一数值为正时, 强制将 OCC 参数的值覆盖为 MULT/SYMM_NUM. 其中 SYMM_NUM 为晶格对称群元的个数. 若设置了全局参数 #NFORM=n (n 大于 0), 则等效于将所有原子的 MULT 的值设为 n, 同时不设置 #NFORM=. 若该行原子有标签 FIX 或 NOMOVE, 则强制将该原子的 MULT 设为 -1. 使用这一参数, 可以限制某一行原子由晶体对称性实际生成原子的个数, 以及所处位置对称性的高低. 关于格点 multiplicities 与对称性的关系可参考 BCS: Wyckoff Position .
PERM	void	off	在完成原子位置选定后, 重排 (按一定概率互相交换) 指定原子位置间的元素种类. 需要配合全局参数 #PERMUTE 使用, 否则该参数将被关闭.

Continued on next page...

Table 2 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
ADATOM	void	off	表明该行原子是等, 未加该标签的所有原子位置生成结束之后, 再加入的原子.
ATHOLE	void	off	表明该原子位于被挖掉的孔洞之中, 输出结构中将自动删除该原子. 常与全局变量 #HOLE=, #HOLEPOS= 联用.

3.2.2 全局参数

结构搜索过程中整个体系应遵守的条件由全局参数指定. AIRSS 中的全局参数均以井号 (#) 开头, 对体系中晶格以及全部的原子作用. 另外, 有些全局参数和原子标签有相同的作用, 此时, 原子标签设置的优先级要高于全局参数.

全局参数目前覆盖的功能大致可以分为以下几类:

1. **对晶胞参数的约束.** 比如固定初始晶胞, 约束晶胞体系, 约束晶胞变化程度, 约束晶胞所在晶系, 为晶胞添加真空层等.
2. **对体系化学式的要求.** 比如体系是几元的, 电子是否能配平 (是否有悬挂键) 等.
3. **对原子位置的约束.** 如两原子之间的最短距离, 某个原子偏离初始位置的最大/最小距离, 某原子的配位数等.
4. **对体系对称性的约束.** 如体系有几个对称操作, 在什么空间群, 对称性寻找的精细程度, 是否引入破坏对称性扰动等.
5. **对程序本身搜索算法的调整.** 如, 接受搜索失败次数上限, 是否引入 PSUH, 是否引入 TPSD, 是否引入 RASH 等.
6. (不太常用的) 在晶体中加入一个覆盖整个晶胞的力场. 如, 加入一个球形力场, 椭球力场, 长条状力场, 平面力场等.

AIRSS 中全部可用的全局参数的功能和详细使用方法如 **Table 3** 所示.

Table 3: AIRSS Cheat Sheet – Global Pragma (distance in Å)

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#CELLCON=a b c α β γ	int	off	定义晶胞应满足的条件: a, b, c 是晶格常数; α, β, γ 是三个晶角. 晶格常数可选填的值有 {0, -1}, 晶角可选填的值有 {0, -1, θ }. 0 表示无约束, -1 表示相等. 如 #CELLCON=-1-1 -1 90 90 90 表示立方晶系.
#SYSTEM=sys	string	off	设置结构所在的晶系, 可选的输入有 [Tric, Mono, Hexa, Rhom(/Trig), Orth, Tetr, Cubi]. 该参数实际为 '#CELLCON=' 参数的若干特殊组合.
#CONS=p	float (0, 1]	0.4	约束单胞边长. 接近 0 表示完全没有约束, 等于 1 表示尽一切可能约束晶胞 abc 三边等长.
#ACONS=p	float (0, 1]	0.5	约束晶胞晶角, 使其远离某一晶格参数极小、晶胞扁平的情况. 接近 0 表示完全没有约束, 等于 1 表示尽一切可能约束三个键角严格等于 90 度.
#CELLAMP=p	float	-1.0	在一定限度内, 随机变化晶格形状. 设为负值时采用晶格形状将完全随机变化. p 越小, 晶格偏离 cell 文件中给定值越小. 若要启用该参数, 建议不要设置超过 1.0 的值. ⁶ 使用该参数后, 晶格标签 #ABFIX 与 #CFIX, 原子标签 #CONS 与 #ACONS 都将被弃用. 若为负数则关闭该参数设置.
#VACUUM=d	float	0.0	在晶格 (Z 方向) 中加入 d Å 的真空层.
#NFORM=n	int	-1	声明单胞中实际存在的原子个数是 %BLOCK POSITIONS_* 或 #SPECIES 中定义的 n 倍. 该选项不可与 #NATOM 联用. 若为负值则此参数被关闭.

Continued on next page...

⁶该参数使用方法详见 airss-0.9.1/src/buildcell/src/build.f90 第 100 行 cellamp 变量的使用.

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#SUPERCELL= n #SUPERCELL= $n_a n_b n_c$ #SUPERCELL= $a_x a_y a_z$ $b_x b_y b_z c_x c_y c_z$	int	off	定义超胞的尺寸. 可以使用超胞中单胞的个数 n , 超胞晶格基矢在三个方向的数值 $n_a n_b n_c$, 或是超胞与单胞晶格基矢之间的变换矩阵 $[[a_x, a_y, a_z], [b_x, b_y, b_z], [c_x, c_y, c_z]]$ 定义新的超胞. 超胞的构建策略是: 首先用单胞构建符合条件的原子构型, 而后根据扩胞参数复制粘贴得到超胞后直接输出.
#SLAB	void	off	声明该结构是一个二维平面结构, 取超胞时将不再向 c 方向扩胞, 同时检查结构对称性时也将忽略 c 方向.
#SURFACE	void	off	声明该结构是一个表面结构, 表面结构继承 SLAB 的全部特性, 同时增加一条与表面相关的对称性限制条件. ⁷
#MOLECULES	void	off	声明同一个原子集中的原子构成了一个基本分子构型, 检查配位时将不再对同一个原子集内的原子做检查.
#CLUSTER	void	off	声明预测的结构是无周期性的团簇.
#FOCUS= n	int	0	约束最终结构必须是 n 组分的 (由 n 种不同的元素构成). 该参数一般用于变组分分析. 小于等于 0 表示无约束.
#OCTET	void	off	检查化学配比是否电子配平 (全部电子数是否可以被 8 整除).
#POSAMP= d	float	-1.0	与原子标签中的定义相同, 结构搜索中原子偏离初始点的最大位置. 负值为无限制.
#MINAMP= d	float	-1.0	与原子标签中的定义相同, 结构搜索中原子偏离初始点的最小位置. 负值为无限制.

Continued on next page...

⁷见源码 airss-0.9.1/src/buildcell/src/cell.90 第 3216 行

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#XAMP=d	float	-1.0	与原子标签中的定义相同, 结构搜索中原子 X 方向偏离初始点的最大振幅. 负值为无限制. 设置该项会令 POSAMP 和 MINAMP 失效.
#YAMP=d	float	-1.0	与原子标签中的定义相同, 结构搜索中原子 Y 方向偏离初始点的最大振幅. 负值为无限制. 设置该项会令 POSAMP 和 MINAMP 失效.
#ZAMP=d	float	-1.0	与原子标签中的定义相同, 结构搜索中原子 Z 方向偏离初始点的最大振幅. 负值为无限制. 设置该项会令 POSAMP 和 MINAMP 失效.
#ANGAMP= θ	float [0, 360]	-1.0	与原子标签中的定义相同, 原子绕自身所在原子集中心旋转角度的最大值. 负值为无限制.
#MINBANGLE= θ	float (0, 360]	0.0	设置搜索结构中, 原子键角的最小值.
#MAXBANGLE= θ	float (0, 360]	180.0	设置搜索结构中, 原子键角的最大值.
#MINSEP=d #MINSEP=d X-X=d _{XX} X-Y=d _{XY} ...	float	0.0	两原子间最小距离, 也可以用来定义两原子距离固定是多少. 比如 #MINSEP=2.0 Li-Li=2.6 Ge-Ge=2.51
#RAD=d	float	0.0	与原子标签中的定义相同, 定义原子的半径大小.
#COORD=n	int	-1	与原子标签中的定义相同, 设置原子的配位数限制. 负值为无限制.

Continued on next page...

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
$\#SPIN=S_{real} S_{mod}$ $\#SPIN=S_{real} S_{mod}$ $"elm_1 elm_2... "$	float, string	off	随机设置体系每个原子上共线自旋的取值. 并要求 $S_{t,real}/N_{ions} = S_{real}$, $S_{t,mod}/N_{ions} = S_{mod}$, 其中 $S_{t,real}$ 是全部指定原子自旋的和, $S_{t,mod}$ 是全部指定原子自旋绝对值的和. 未被指定的原子自旋保持为 0. 可以用被双引号包裹的带空格的元素符号指明哪些是指定原子. 若未指定任何原子, 则默认所有原子都是指定原子. 例如 $\#SPIN=0\ 5\ "Fe\ Co\ "$ 或者 $\#SPIN=1\ 4$
$\#SPECIES=elm_1\%tags_1,$ $elm_2\%tags_2, \dots$ $\#SPECIES=elm_1, elm_2\dots$	string	off	使用简化记号定义体系原子组分. 例如, $\#SPECIES=Si\%NUM=1\ COORD=2, O\%NUM=2$. 该参数不能与 $BLOCK\ POSITIONS_*$ 同时出现.
$\#NATOM=n$ $\#NATOM=n_{min} - n_{max}$	0	int	与 $\#SPECIES$ 联用, 定义单胞中总原子数, 一般用于变组分分析 (变胞预测). 且使用此全局参数会使 $\#SPECIES$ 指令包含的 % 后的原子标签全部失效. ⁸ 若 $\#SPECIES$ 中含有多中元素, 则每种元素随机数目, 保持总和为 $NATOM$. 该参数设为 0 时自动失效.
$\#TARGVOL=V$ $\#TARGVOL=V_{min} - V_{max}$	float	init. cell vol.	固定晶格体积为 V , 或 V_{min} 到 V_{max} 之间的随机数值. 存在晶格标签 $\#FIX$ 时该参数失效. 默认为初始给定原胞的体积. 该参数常在不引入 $BLOCK\ POSITION_*$ 区块时使用.
$\#VARVOL=V$	float	init. cell vol.	与 $\#TARGVOL=$ 作用相同, 该参数会覆盖 $\#TARGVOL=$ 的设置. 默认为初始给定原胞的体积.
$\#SLACK=p$	float [0, 1)	0.0	使用此参数可整体降低体系对原子间成键 (原子相对位置) 的限制, p 越大对原子间间距和角度的要求越低. 默认为 0, 推荐值 0.1–0.3.

Continued on next page...

⁸详细原因请参见源码 “airss-0.9.1/src/buildcell/src/cell.f90” 第 493 行与 514 行区别.

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#AUTOSLACK=p	float [0, 1)	off	使用此参数可整体降低体系对原子间成键 (原子相对位置) 的限制, p 越大对原子间间距和角度的要求越低. 若给定的初始值 p 不合适, 则以 0.01 的步长递增 SLACK, 直到找到合适的 SLACK 值.
#FLIP	void	off	搜索结构时, 对原子集引入随机翻转操作. 若体系中所有原子集中均只有一个原子, 则该参数失效.
#REMOVE	void	off	删除 (PUSH 后) 重叠的原子 (之一). 可以用于高初始原子密度的结构预测.
#TIGHT	void	off	使得生成的结构更加紧密.
#SYMMOPS=n #SYMMOPS=~n #SYMMOPS= $n_{\min} - n_{\max}$	int	off	声明生成的结构中必须含有 n 种对称操作. 若体系是周期性晶体结构, 推荐从下述整数中选取: 1,2,3,4,5,6,8,12,16,24,48. 若输入中含有波浪号 (~) 则表明, 结构搜索时将只在 general positions 上放置原子, 对于对称性更高但数量 ⁹ 更少的 special position 不予考虑. ¹⁰ 另外需要注意的是, AIRSS 中实现锁定对称性的方法是: 接将原子按对称性复制 n 份. 例如原子有 C_4 对称性, 则最终输出的总原子数将是设定的 4 倍. 但如果结合原子标签 OCC, MULT 等的使用, 可实现在更高对称的点位安放更少原子的操作. 在含有波浪号 (~) 的模式下不推荐使用 MULT 等参数限制原子对称复制的个数.

Continued on next page...

⁹这里的“数量”是指, 满足对称操作所需的最少同类原子数量, 也即该点位的 multiplicities.¹⁰源代码中这样描述: Symmetry is only be approximately applied (filling general positions only)

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#SYMM=spg #SYMM=~spg	string	off	生成的结构必须在 spg 空间群中, spg 是空间群的名称. 若输入中含有波浪号 (~) 则表明, 结构搜索时将只在 general positions 上放置原子, 对于对称性更高但数量更少的 special position 不予考虑, 在此模式下不推荐使用MULT 等参数限制原子对称复制的个数.
#SYMMNO=n #SYMMNO=~n	int	off	生成的结构必须在第 n 号空间群中, n 是空间群的序号. 若输入中含有波浪号 (~) 则表明, 结构搜索时将只在 general positions 上放置原子, 对于对称性更高但数量更少的 special position 不予考虑, 在此模式下不推荐使用MULT 等参数限制原子对称复制的个数.
#SYMMORPHIC	void	off	只检查体系是否存在点式对称操作.
#SGRANK=n	int	230	设置空间群寻找/锁定的序号上限 n. 此值设为 230 时, 接受任何空间群的对称性锁定.
#ADJGEN=n #ADJGEN= $n_{\min} - n_{\max}$	int	0	调整晶胞中使用 general positions(GP) 的个数. 该值为 0 时, 会最大程度地使用 GP 点位. 增大该值则将逐渐更多地使用 Special positions(SP) 点位. 如果尝试后发现难以生成符合条件结构, 则程序将动态增加该值. 关于 SP/GP 与晶体空间群的关系请参考: Wiki: Wyckoff Position .
#BREAKAMP=d	float	0.0	在晶格矢量 a 方向随机移动原子破坏原有对称性, 原子分数坐标移动距离: $d_a^{(\text{frac})} = (\text{random}(0, 1) \times d)^{1/3}$
#NOPUSH	void	off	对于距离过近的原子不引入 PUSH 步, 直接拒绝该构型. 该关键字不会关闭 #SPHERE 等关键字引入的晶体中心势场的 PUSH 步.
#PUSHSTEP=p	float	0.25	每一步 PUSH 移动距离大小 (step-size) 的比例参数.

Continued on next page...

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#PUSHMAX=n	int	100	设置最大 PUSH 步数 (在 buildcell 的输出中, 两个 X 之间所夹的 * : - 符号的个数).
#OVERLAP=cov	float	off	结束 PUSH 之后, 再附加采用 TPSD ¹¹ 对势对晶体结构进行简单弛豫. cov 为收敛判据, 其值越小对晶格收敛限制越高, 推荐值为 0.1–0.2.
#RASH	float	off	在使用 TPSD 对势弛豫结束后再引入原子集之间的随机位移和旋转 (SHAKE step). 设置过 #OVERLAP 之后此参数才有效.
#RASH_POSAMP=d	float	1.0	设置由 RASH 引入的 SHAKE 步移动原子集的最大距离, 与 POSAMP 类似. 该项必须为一个小的正值, 不可设为负数.
#RASH_ANGAMP=θ	float (0, 360]	30.0	设置由 RASH 引入的 SHAKE 步原子集绕自身中点转动的最大角度, 与 ANGAMP 类似. 该项必须为一个小的正值, 不可设为负数.
#CELLADAPT	void	off	在设置#OVERLAP 的情况下附加设置此项, 可强制要求 TPSD 简单结构弛豫时同时尝试在保持体积不变的情况下改变单胞的形状. 体系默认不会在 TPSD 结构优化步改变单胞形状. 若存在晶格标记#FIX 或者设置了 #CELLAMP=0 则此参数失效.
#THREE=p	float	TODO	使用三体势能代替 TPSD 弛豫结构, 该参数对应的功能尚未在 airss-0.9.1 中实现.
#COMPACT	void	on	对最终生成的单胞进行 nigli reduce 操作. 在晶格形状没有被锁定时 (未引入晶格标签#FIX, #CFIX, #ABFIX), 该项默认打开. R. W. Grosse-Kunstleve, N. K. Sauter and P. D. Adams, Acta Cryst., A60, 1-6 (2004)

Continued on next page...

¹¹Two-point Step Size Gradient Methods - Barzilai and Borwein, IMA Journal of Numerical Analysis (1988) 8, 141-148

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#NOCOMPACT	void	off	强制关闭 COMPACT 操作.
#PERMUTE	void	off	在完成原子位置选定后, 重排 (按一定概率互相交换) 指定原子位置间的元素种类. 可以联合原子标签 PERM 使用.
#PERMFRAC=p	float [0, 1]	1.0	设置重排发生的概率.
#HOLE=d	float	-1.0	设置在晶格上切割球洞的半径. 设为负数时不对成型的结构做任何处理.
#HOLEPOS=f _a f _b f _c	float	random	设置在晶格上切割球洞的位置 (分数坐标). 默认为随机位置. 可与原子标签中的ATHOLE 联用.
#VACANCIES=n@elm	float, string	off	等待结构生成完毕后, 选取 n 个元素种类为 elm 的原子替换为空位. ¹²
#MAXTIME=t	float	1.0	设置对一个猜测结构 PUSH 步使用时间的上限, 超过该时间程序将停止 PUSH 并重新猜测新结构. 默认 t = 1s.
#NFAILS=n	int	0	每个结构允许的失败次数 (在 buildcell 命令输出中出现 X 的次数). 若其值为 0, 则无限制.
#SPHERE=r	float	off	在单胞中心处引入一球状势能. 设置球势能的吸引半径为 r. 当原子与晶格中心距离大于 r 时, 会受到指向晶格中心的 PUSH.
#ELLIPSOID=r ε	float	off	在单胞中心处引入一椭球状吸引势. r 为椭球势能半长轴长度, ε 为形变程度. 当原子与晶格中心距离大于 r 时, 会受到指向晶格中心的 PUSH. ε = 0 为球形, ε 越大畸变越严重.

Continued on next page...

¹²该参数本来还设计了一种不加 @ 符号的输入, 但目前在 airss-0.9.1 中, 这种输入在后续处理中存在一些 BUG, 因此在此未予说明.

Table 3 – Continued from previous page

参数名称	输入类型	默认值	功能说明
#PANCAKE= $r \ \varepsilon$	float	off	在单胞中心处引入一圆饼状吸引势. r 为圆饼半径, ε 为形变程度. 当原子与晶格中心距离大于 r 时, 会受到指向晶格中心的 PUSH. $\varepsilon = 0$ 为偏平圆饼, $\varepsilon = 1$ 为接近球形的势能.
#CIGAR= $r \ \varepsilon$	float	off	在单胞中心处引入一雪茄状吸引势. r 为雪茄长度, ε 为形变程度. 当原子与晶格中心距离大于 r 时, 会受到指向晶格中心的 PUSH. $\varepsilon = 0$ 为针尖状势能, $\varepsilon = 1$ 为接近球形的势能.
#CYLINDER= r	float	off	在单胞中心处引入一圆筒状势能 (原子在 Z 方向不受力). r 为圆筒势能吸引半径. 当原子与晶格中心距离大于 r 时, 会受到指向晶格中心的 XY 方向的 PUSH.
#CORE= r	float	off	对定义的球状 (椭球状, 圆饼状, 雪茄状, 圆筒状) 吸引势附加排斥核心. 设置排斥核心半径 (长轴长度, 半径, 雪茄长度, 圆筒半径) 为 r . 当原子与晶格中心距离小于 r 时, 会受到远离晶格中心方向的 PUSH.
#WIDTH= l	float	off	使用平面状势能 (原子在 X 和 Y 方向均不受力), 附加计算 PUSH 步的距离. l 为平面状势能吸引长度. 当原子与原点 (origin) 距离大于 l 时, 会受到指向原点的 Z 方向的 PUSH.
#SHIFT= h	float	0.0	将平面势移动至 $Z=h$ 的位置 (origin 的位置), 默认 $h = 0$.

现在您应该可以轻松读懂下述内容了:

```
1 %BLOCK LATTICE_CART
2 20 0 0
3 0 20 0
4 0 0 20
5 #FIX
6 %ENDBLOCK LATTICE_CART
7
8 %BLOCK POSITIONS_FRAC
9 Al 0.0 0.0 0.0 # A11 % NUM=7-13 COORD=4
10 %ENDBLOCK POSITIONS_FRAC
11
12 #MINSEP=1.5
13 #CLUSTER
14 #OVERLAP=0.2
15 #RASH
16 #POSAMP=3.0
17 #MINBANGLE=80
18 #MAXBANGLE=120
```

另外, *.cell 文件中还可以完全不出现结构数据对应的数据区块. 比如您只对晶体大概的结构有一些模糊的认识 (比如, 只知道其晶体原子构成, 晶格大概的体积大小等), 仍然可以使用 AIRSS 进行结构搜索. 下面就是这样两则符合规范且十分简洁的 AIRSS 结构种子文件.

例 4.1

```
1 #VARVOL=15
2 #SPECIES=A%NUM=4,B%NUM=1
3 #NFORM=2
4 #MINSEP=1.5
```

例 4.2

```
1 #VARVOL=15
2 #SPECIES=A,B,C
3 #NATOM=2-8
4 #MINSEP=1.5
```

这里用 #VARVOL 代替了晶格参数数据区块 BLOCK LATTICE_CART, 用 #SPECIES 代替了原子位置数据区块 BLOCK POSITIONS_FRAC.

4 结构弛豫与能量计算

4.1 联合 airss-pp3 模块弛豫

使用 AIRSS 联合 airss-pp3 计算模块预测结构时,除了要准备一个 *.cell 的文件外,还需要准备一个名为 *.pp 文件.

airss-pp3 是 AIRSS 自带的 pp3 对势 (pair potential) 计算模块. 其功能是使用化学上经典的分子势场 (如 6-12 势) 弛豫原子结构并输出体系能量. 由于这一模块使用的是维象的晶体能量模型, 不涉及任何第一性原理的复杂运算, 因此其实现简单、效果稳定、计算速度极快, 适用于简单组分的小体系. 更具体的, airss-pp3 采用了如下势能计算原子的受力和体系总能:

$$E_{ij} = 4\epsilon_{ij} \left[\left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^m - \beta_{ij} \left(\frac{\sigma_{ij}}{r_{ij}} \right)^n \right] \quad (1a)$$

$$E = \sum_{i < j}^{\text{all ions}} E_{ij} \quad (1b)$$

其中 i, j 标定了不同原子位置, 当元素种类不同时, $\epsilon_{ij}, \sigma_{ij}$ 等变量对应不同的值.

使用该模块时, 需要首先配置名为 *.pp 的参数文件. 这个文件中存储了对势的相关参数, 其内部书写形式如下:

```
1 n_spec m n range
2 specs
3 # Epsilon
4 eps_11 eps_12 ...
5 eps_22 ...
6 ...
7 # Sigma
8 sgm_11 sgm_11 ...
9 sgm_11 ...
10 ...
11 # Beta
12 beta_11 beta_12 ...
13 beta_22 ...
14 ...
```

上述参数中,

1. 第 1 行各项分别是: 元素个数; 对势中指数 m, n 的数值; 对势中能量极小值 (力为 0 处) 处距离原子中心的距离 d_{\min} 与 σ 的比值, 也即 $d_{\min}^{(ij)} = \sigma_{ij} * d_{\text{range}}$.
2. 第 2 行指明了体系中的元素种类, 不同元素间用空格隔开.
3. 第 3 行是注释行, 在程序中无意义, 但必须存在.
4. 第 4 至 $(n_{\text{spec}} + 3)$ 行声明了元素之间的 varepsilon 值对应的矩阵.
5. 第 $(n_{\text{spec}} + 4)$ 行是注释行, 在程序中无意义, 但必须存在.
6. 第 $(n_{\text{spec}} + 5)$ 至 $(2n_{\text{spec}} + 4)$ 行声明了元素之间的 sigma 值对应的矩阵.
7. 第 $(2n_{\text{spec}} + 5)$ 行必须为书写含有 "Beta" 字符的注释. 若此字符未出现, 则系统将强制把全部 beta 值设为 1.
8. 第 $(2n_{\text{spec}} + 6)$ 至 $(3n_{\text{spec}} + 5)$ 行声明了元素之间的 beta 值对应的矩阵.

例如,

```
1 2 12 6 5
2 A B
3 # Epsilon
4 1.00 1.50
5 0.50
6 # Sigma
7 2.00 1.60
8 1.76
```

下面通过一个例子来演示 AIRSS 联合 pp3 的计算过程.

```
user@machine_name$ ls
A1.cell A1.pp
user@machine_name$ cat A1.cell
%BLOCK LATTICE_CART
2 0 0
0 2 0
0 0 2
%ENDBLOCK LATTICE_CART

%BLOCK POSITIONS_FRAC
A1 0.0 0.0 0.0 # A11 % NUM=8
%ENDBLOCK POSITIONS_FRAC

#MINSEP=1.5
user@machine_name$ cat A1.pp
1 12 6 2.5
A1
# Epsilon
1
# Sigma
2
# Beta
1
user@machine_name$ airss.pl -pp3 -max 3 -seed A1
user@machine_name$ ls -l
A1-43867-3302-1.res
A1-43867-3302-2.res
A1-43867-3302-3.res
A1-43867-3302.cell
A1.cell
A1.pp
user@machine_name$
```

4.2 联合 CASTEP 弛豫

官方推荐 AIRSS 结合 CASTEP 使用, 且构建了 AIRSS 和 CASTEP 间十分完善的接口.

要使用 CASTEP 联合 AIRSS 计算, 首先需要将成功安装的 CASTEP 可执行文件 `castep.serial` 或 `castep.mpi` 复制到 AIRSS 的 `bin` 目录中, 并重命名为 `castep`.

使用 CASTEP 联合 AIRSS 计算时, 除了 `*.cell` 外, 还需要准备 `*.param` 文件. `*.param` 是 CASTEP 的配置文件, 您可以在其中定义 CASTEP 计算过程中的必要配置参数, 包括, 计算的类型 (结构优化, 自洽, 光学性质计算, 能带计算等), 电

荷, 自旋取向, 截断能, 收敛标准等. 该文件通常由若干行组成, 每一行包含一个 keyword 及其相应的赋值.

***.param 文件主要有以下特点:**

1. 任何两个 keywords 之间没有书写顺序上的限制.
2. 您可以使用 # 或; 或! 又或者单词 COMMENT 来添加注释.
3. *.param 中设定的所有的 keywords 和数据均不区分大小写, 同时, 任何标点符号 (除了标明注释内容的符号), 多余的空格和任何空行都将被自动忽略.
4. 文件的任何一行中最多只能出现一个 keywords 及其对应参数.

*.param 文件每一行的基本格式均为:

```
[keywords] : [value]
```

其中的 ‘:’ 是为了书写美观便于区分内容所加, 程序实际执行时会自动忽略, 您也可以完全不加入这一符号转而用空格代替.

CASTEP 中 [keywords] 的定义和使用方法, 可参考: [CASTEP cell keywords and data blocks](#).

AIRSS 默认联合 CASTEP 计算, 因此运行下述命令即可启动结构搜索.

```
1 user@machine_name$ airss.pl -max 3 -seed A1
```

4.3 联合 VASP 弛豫

AIRSS 自带了 `airss.pl -vasp` 选项用于联合 VASP 弛豫计算. 但官方自带的接口在并行计算方面还有待完善. 基于 AIRSS, 笔者用一套 `bash` 命令集重新编写了 AIRSS 至 VASP 的接口, 将其命名为 `airss4vasp(a4v)`. 后虽考虑过将此命令集使用 `python` 重新编写, 但 AIRSS 本身无法在 Windows 上运行, 而复写工程又过于庞大且收效甚微, 因此 `a4v` 目前仍然主要基于 `bash` 实现.

`a4v` 可以看做是 AIRSS 的改版, 无需安装原生 AIRSS 便可独立运行. 其主要基于 AIRSS 原生的 `buildcell` 模块, 同时内嵌了 PBS, NSCC, Slurm 等作业提交系统指令, 真正做到了一键提交 AIRSS+VASP 任务的功能, 同时对计算的并行也有较好的支持. 其具体用法可参见项目内部的 `README.md` 文件.¹³

在 *.cell 文件设置方面: `a4v` 增加了对应原子位置弛豫固定的 SD-XYZ, SD-XY, SD-X 等原子标签; 同时删减了原先 `buildcell` 中设置共线自旋数值的全局参数, `#SPIN=`.

¹³事实上, 该说明手册也在此项目中.(笑

5 数据后处理

5.1 *.res 文件结构

AIRSS 的计算结果全部储存在了 *.res 文件中. 这种 *.res 结构文件最早在 **SHELX** 中使用. 由于一些历史原因被 CASTEP 和 AIRSS 复用. 由于 SHELX 本身是对 Windows 友好的程序, 因此其输入输出文件的书写格式也沿袭了部分 Windows 文档的特点, 如倾向使用大写字母, REM 代表注释行, 文件使用 END 结尾等.

```
user@machine_name$ cat Al-43867-3302-1.res
TITL Al-43867-3302-2 0.0000000004 60.4852769773 -53.2712053113 0 0
      8 (P63/mmc) n - 1
REM
REM in /Users/alex/Documents/ProgramCode/MaterialCalculateProgram/
      AIRSS/airss-0.9/examples/1.1
REM
CELL 1.54180 2.2 5.2 5.2 86.6 90.0 90.0
LATT -1
SFAC Al
Al      1  0.2544637028970  0.9316224149716  0.6657635302849  1.0
Al      1  0.7544640475988  0.0982890099295  0.3324301203388  1.0
Al      1  0.2544640470150  0.3482890078890  0.5824301202379  1.0
Al      1  0.2544640470479  0.8482890103459  0.0824301202324  1.0
Al      1  0.7544640476367  0.5982890097930  0.8324301190566  1.0
Al      1  0.7544637023180  0.1816224159838  0.9157635306900  1.0
Al      1  0.7544637024482  0.6816224143044  0.4157635299253  1.0
Al      1  0.2544637030384  0.4316224167828  0.1657635292340  1.0
END
user@machine_name$
```

AIRSS 输出的 *.res 文件各行的含义如下:

1. 第一行 TITL 中的第一项是软件分配给该结构的名称标签, 第二项是系统外加静水压 (GPa), 第三项是单胞体积, 第四项是每个单胞总的焓 (能量), 第五项是原子自旋值的平均值, 第六项是原子自旋绝对值的平均值, 第七项是体系的总原子数, 第八项是体系所在空间群名称, 最后一项是固定字符 n - 1.
2. 之后若干以 REM 开头的行是注释行, 记录了文件生成的基本信息, 删除后不会有任何影响.
3. 紧接着以 CELL 开头的行记录了基本的晶胞信息. 其中, 第一项是一个无意义的小数, 这个小数在原来的 SHELX 程序中是用来记录得到相关结构所用衍射谱的波长, 在 AIRSS 中锁定为了一个无意义的小数. 第二至四项是晶格常数 a b c, 接下来五至七项是晶角 α β γ .
4. 下面一行是 LATT -1. 这一行在 SHELX 中用于标定晶格的对称性, 在 AIRSS 中锁定为固定值-1.
5. 接下来以 SFAC 开头的一行记录了构成体系的全部元素名称, 不同的元素用一个空格隔开.
6. 最后若干行标定了单胞中原子的位置. 这些行中的第一列是元素符号, 第二列指明了该元素在 SFAC 行中出现的次序, 第三到五列是该行储存了原子的分数坐标, 最后一列是原子的占据数, 一般设为 1.
7. 文件最终以 END 行结尾.

5.2 数据批量化处理

有了计算数据 *.res 文件后, 就可以使用ca 指令进行数据处理了. ca 是对 AIRSS 中基本分析套件 cryan 的封装.

```
user@machine_name$ ca
ca [-R(recursive)] [command line arguments for cryan]
user@machine_name$
```

cryan 的使用方法如下:¹⁴

```
user@machine_name$ cryan

Usage: cryan [OPTIONS]
The str. are read from STDIN, for example:

    cat *.res | cryan -s
    gunzip -c lots.res.gz | cryan -f H2O
    find . -name "*.res" | xargs cat | cryan -m

cryan options (note - the order matters):

-r, --rank                      Rank all str.
-s, --summary                   Summary
-e, --enthalpy <length_scale>  Plot enthalpy vs. pressure
-f, --formula <formula>        Select str. of a given com.
-fc, --formula_convert <formula> Attempt to convert.
-t, --top [num]                 Output top few results
-u, --unite <thresh>            Unite similar str.
-dr, --distance <rmax>          Distance threshold
-de, --delta_e <energy>         Ignore str. above energy
-sd, --struc_dos <smear>        Plot a structural DOS
-p, --pressure <pressure>       Additional pressure
-m, --maxwell                   Extract the stable com.
-ph, --pressure_hull            Ext. the stable str. with P
-<n>                             Component <n>
-xg, --xmgrace                  Plot output with xmgrace
-c, --compare <thresh> <structure> Compare structures
  --delete                      Delete unwanted str.
-g, --geometry [thresh]        Calculate the atomic geometry
-n, --num_units                 Report n separate str.
-d, --dimensionality            Report dD str.
-cl, --cluster                  No periodic boundary
-bl, --bondlength               Maximum bond length
-bs, --bondscale                Bond length scaling
-dm, --deltamodularity          Modularity bias parameter
-wt, --weight                   Weight the adjacency matrix
-ns, --notsymm                  Clusters point group off
-sc, --struct_comm <thresh>     Determine the community str.
-cm, --community                Output the community str.
-am, --adjacancymatrix          Output the adjacency matrix
-x, --xyz                       Output clusters in XYZ format
-o, --off                       Output polyhedra in OFF
-al, --alpha                    Construct alpha shapes
-l, --long                      Long names for str.
-h, --help, -?                 Print usage information
user@machine_name$
```

¹⁴为了行文简洁, 对参数的说明做了少许简化, 请自行运行上述指令查看更详细的信息.

使用ca 就可以对之前的计算结果进行分析.

```
user@machine_name$ ca -r > analysis.data
user@machine_name$ cat analysis.data
Al-43867-3302-2    0.00    7.561    -6.659    8 Al    P63/mmc    1
Al-43867-3302-1   -0.00    7.561     0.000    8 Al    P63/mmc    1
Al-43867-3302-3    0.00    7.564     0.005    8 Al    Fm-3m     1
user@machine_name$
```

上述输出结果中,

1. 第一列是 AIRSS 软件分配给该结构的名称标签
2. 第二列压力值 (GPa)
3. 第三列是每个化学式结构单元 (fu) 的体积
4. 第四列第一行是一个化学式结构单元 (fu) 的焓值, 之后的几行是不同结构下相对于第一行的焓值
5. 第五列是单胞中化学式结构单元 (fu) 的总个数 (单胞中 fug 的个数乘以一个 fug 中 fu 的个数.)
6. 第六列是化学式结构单元 (fu) 的化学式
7. 第七列是空间群名称
8. 第八列是所有搜索结果中出现该结构的次数

如果您认为所列结果过多, 可以使用-u 选项, 但是要注意, -u 一定要排在-r 之前使用.¹⁵ 如果您仔细看过 cryan 的 help 信息就不难发现这样一个提醒: “note - the order matters”.

```
user@machine_name$ ca -u 0.01 -r > analysis.data
user@machine_name$ cat analysis.data
Al-43867-3302-2    0.00    7.561    -6.659    8 Al    P63/mmc    2
Al-43867-3302-3    0.00    7.564     0.005    8 Al    Fm-3m     1
user@machine_name$
```

指令 ca -u 后所跟的数字是一个无量纲的比例. 可以将这一参数简单的做如下理解: 他标定了晶格相似度阈值. 该数值越大, 容忍度越高, 最终展示出来的不同结构越少. 更详细的, 这一参数标定的距离, 是原子结构内部最接近的两个原子之间距离的倍数. 例如, 现有两个结构十分相似, 晶格中最短键长为 1.5 Å, 则 ca -u 0.1 就意味着, 依次比较两结构对应原子的两两距离, 如果未能发现这些距离差存在大于 0.15 Å 的情况, 则标定这两个结构一致.¹⁶ 该值可根据需求调整, 建议在 0.1-0.01 之间选择.

¹⁵事实上, 所有排在 rank (-r) 任务之后的参数都会被自动忽略.

¹⁶这一段描述只是一个粗浅直观的解释, 实际使用的算法要更加复杂且稳定. 详见源码 “airss-0.9.1/src/cryan/src/cryan.f90”2133 行.

A AIRSS 安装日志

下面将以 `airss-0.9.0` 版本为例, 简要记录 AIRSS 的安装.

AIRSS 只支持在命令行 (Command Line) 使用, 且仅能安装在 *nix 系统中. 安装此软件前, 您最好已经了解 [GNU make](#) 的使用方法. 当然, 如果您实在对此不感兴趣, 这不是必须的. 前提是你能完全按照以下步骤操作.

A.1 软件主体安装

具体的安装分为以下几步, 非必须步骤已使用* 标出:

- (I) 建立安装包文件管理系统** 在开始一切安装之前, 建议作为非root 用户但是有sudo 权限的您: 在自己能进行任意操作的家目录~/中建立一个安装包管理文件夹, 如~/install_package; 同时在系统目录/usr/local 中建立一个存放 airss 和其他程序二进制可执行文件的目录, 如usr/local/airss-0.9/bin.

之所以这样建议, 是为了减少您安装过程中在系统目录下需要进行的操作, 降低由此可能引发的事故的概率, 同时让安装过程更简洁 (避免每个命令都要使用前缀sudo ..., sudo sh -c "...>...").

当然, 您也可以完全不将软件安装在系统目录, 一切都凭您的个人喜好.

```
user@machine_name$ cd /usr/local/
user@machine_name$ sudo mkdir -p airss-0.9/bin
Password:
user@machine_name$ cd airss-0.9
user@machine_name$ ls -F
bin/
user@machine_name$ cd
user@machine_name$ mkdir -p install_package/AIRSS
user@machine_name$ cd install_package
user@machine_name$ ls -F
AIRSS/
```

- (II) AIRSS 安装包下载** 您可以访问前文所述[官方网站](#)下载 airss-0.9.0.

您可以选择在浏览器上下载, 也可以使用wget 指令.

```
user@machine_name$ wget -P ~/Downloads https://www.mtg.msm.cam.ac.uk/files/airss-0.9.tgz
```

- (III) 拷贝并解压安装包** 将您下载的airss-0.9-2.tag 拷贝到安装包管理文件夹中, 并使用tar 解压.

```
user@machine_name$ cd AIRSS
user@machine_name$ cp ~/Downloads/airss-0.9-2.tgz .
user@machine_name$ tar -zxvf airss-0.9-2.tgz
x airss-0.9/.hg_archival.txt
x airss-0.9/.hgignore
x airss-0.9/LICENCE
x airss-0.9/README
x airss-0.9/VERSION
...
...
```

(IV) 使用 GNU make 指令安装 AIRSS 使用make 等指令安装编译安装 AIRSS.

```
user@machine_name$ cd airss-0.9
user@machine_name$ make
(cd src/pp3/src; make)
gfortran -O3 -c ../../common/constants.f90
gfortran -O3 -c cell.f90
gfortran -O3 -c pp.f90
gfortran -O3 -c opt.f90
gfortran -O3 -c pp3.f90
...
...
user@machine_name$ make install > make_install.log 2>&1
user@machine_name$
user@machine_name$ cat make_install.log
(cp src/pp3/src/pp3 bin/)
(cp src/cabal/src/cabal bin/)
(cp src/buildcell/src/buildcell bin/)
(cp src/cryan/src/cryan bin/)
user@machine_name$
```

十分鼓励您今后使用make install 指令时, 将其输出重定向到一个记录文件中, 这样会给您卸载软件时提供便利.

*(V) 安放可执行文件 ~/install_package/AIRSS/airss-0.9/bin 存放了安装完毕的可执行文件, 将其拷贝至系统目录下.

```
user@machine_name$ sudo cp -r bin/ /usr/local/airss-0.9/bin
Password:
user@machine_name$ ls /usr/local/airss-0.9/bin
airss.pl      cabal          cell2lammps    crud.pl
despawn       gulp_relax    mc             pp3_relax     psi4_relax
spawn-slow    tidy.pl       buildcell      castep2res
check_airss   cryan         gap_relax      lammps2cell
niggli        press         run.pl         stopairss
ca            castep_relax  comp2minsep    csymm
gencell       lammps_relax  pp3            prim
spawn         symm
```

(VI) 设置系统环境变量 完成以上所有设置后, 您实际上就可以通过使用使用命令/usr/local/airss-0.9/bin/airss.pl -[option] [parameter] ... 来运行 AIRSS 了. 为了简便, 可以考虑在 ~/.bash_profile 文件中加入如下内容

```
## Setting PATH for AIRSS
export PATH="/usr/local/airss-0.9/bin:${PATH}"
```

修改储存并退出后, 请重新登入终端, 或运行source 指令完成环境变量的更新.

```
user@machine_name$ source ~/.bash_profile
```

这样您就可以在系统中的任何路径上执行airss.pl 等 AIRSS 的指令了.

(VII) 检查安装情况 设置好环境变量后, 您可以在~/install_package/AIRSS/airss-0.9/下输入make check 指令检查 AIRSS 安装情况.

```

user@machine_name$ make check
(sh bin/check_airss)
Essential:

airss.pl +
run.pl +
crud.pl +
castep2res +
buildcell +
cryan +
pp3 +
cabal +
cellsym - Install cellsym: http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/sw/check2xsf/cellsym.html
symmol - Patch and install symmol: http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/symmol/~pila/symmol.zip
bob - Get Bob!

Recommended:

castep - Install castep: http://www.castep.org/
optados - Install optados: http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/~ajm255/optados/index.html
qhull - Install qhull from package manager, or:
http://www.qhull.org/
qconvex - Install qhull from package manager, or:
http://www.qhull.org/
xmgrace - Install grace from package manager or:
http://plasma-gate.weizmann.ac.il/Grace/
Rscript - Install R/Rscript and ggtern from package manager
or: https://cran.r-project.org/

Optional:

gulp - Install gulp: http://projects.ivec.org/gulp/
cif2cell - Install cif2cell from: http://cif2cell.sourceforge.net/

Very optional:

lammps - Install lammps: http://lammps.sandia.gov/
hull - Install hull: http://www.netlib.org/voronoi/hull.html
off_util - Install antiprism: http://www.antiprism.com/files/antiprism-0.24.1.tar.gz

Pseudopotentials:

pspot - set $PSPOT_DIR to location of the CASTEP pspot
directory

Spawn file:

.spawn -

-----
Tests run in .check:
-----

Running example 1.1 (Crystals):
Al-9002-4643-1    -0.00    7.561    -6.659    8 Al    n/a    1

```

```

A1-9002-4643-2      0.00    7.564      0.005    8 A1      n/a    1

Running example 1.2 (Clusters):

A1-9274-4255-2      0.00    615.385    -3.014    13 A1      n/a    1
A1-9274-4255-1      0.00    615.385     0.019    13 A1      n/a    1

Skipping example 3.1 (Gulp)
Skipping example 2.1a (Castep)

```

如果您仔细阅读了上述输出文件, 会发现必要的组件中还有`cellsym` 和`symmol` 没有安装. 这直接导致了晶体和团簇空间群符号输出为`n/a`.

A.2 辅助插件安装

AIRSS 支持的全部插件信息可查询`~/install_package/AIRSS/airss-0.9/README` 文件. 下面只演示最核心的`cellsym` 和`symmol` 插件的安装过程.

(I) 下载插件安装包 `cellsym` 的安装包官方网站是:

<http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/sw/check2xsf/cellsym.html>

需要注意的是, `cellsym` 源码是使用 C 语言编写的, 安装此程序前, 需要下载并安装库文件`spglib.h`.

`spglib.h` 的下载地址是:

<http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/sw/check2xsf/spglib-1.9.4.tar.gz>

`cellsym` 的下载地址是:

<http://www.tcm.phy.cam.ac.uk/sw/check2xsf/cellsym.tgz>

`symmol` 插件安装包的下载地址是:

<http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/symmol/~pila/symmol.zip>

您可以通过浏览器下载上述文件, 也可以使用`wget` 指令下载.

```

user@machine_name$ wget -P ~/Downloads
www.tcm.phy.cam.ac.uk/sw/check2xsf/spglib-1.9.4.tar.gz
www.tcm.phy.cam.ac.uk/sw/check2xsf/cellsym.tgz
www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/symmol/~pila/symmol.zip

```

(II) 拷贝并解压插件 将您下载的三个压缩包拷贝到安装包管理文件夹中, 并使用`tar` 和`unzip` 解压.

```

user@machine_name$ cd ~/Downloads
user@machine_name$ cp cellsym.tar spglib-1.9.4.tar
symmol.zip ~/install_package/AIRSS
user@machine_name$ cd ~/install_package/AIRSS
user@machine_name$ tar -xvf cellsym.tar
...
user@machine_name$ tar -xvf spglib-1.9.4.tar
...
user@machine_name$ unzip symmol.zip -d symmol
...
user@machine_name$ ls -F
airss-0.9/      airss-0.9-2.tgz      cellsym-0.16a/
cellsym.tar     spglib-1.9.4/        spglib-1.9.4.tar
symmol/         symmol.zip

```


(III) 编译插件 将解压好的插件按如下顺序操作.

首先安装库文件 spglib. 使用 GNU make 指令.

```
user@machine_name$ cd spglib1.9.4/
user@machine_name$ ./configure
...
user@machine_name$ make
...
user@machine_name$ sudo sh -c 'make install > make_install.log
2>&1'
Password:
user@machine_name$ cat make_install.log
Making install in src
../install-sh -c -d '/usr/local/lib'
/bin/sh ../libtool --mode=install /usr/bin/install -c
  libsymspg.la '/usr/local/lib'
libtool: install: /usr/bin/install -c .libs/libsymspg.0.dylib
/usr/local/lib/libsymspg.0.dylib
libtool: install: (cd /usr/local/lib && { ln -s -f libsypg
  .0.dylib libsypg.dylib || { rm -f libsypg.dylib && ln
  -s libsypg.0.dylib libsypg.dylib; }; })
libtool: install: /usr/bin/install -c .libs/libsymspg.lai /usr
/local/lib/libsymspg.la
libtool: install: /usr/bin/install -c .libs/libsymspg.a /usr/
local/lib/libsymspg.a
libtool: install: chmod 644 /usr/local/lib/libsymspg.a
libtool: install: ranlib /usr/local/lib/libsymspg.a
/Applications/Xcode.app/Contents/Developer/Toolchains/
XcodeDefault.xctoolchain/usr/bin/ranlib: file: /usr/local/
lib/libsymspg.a(debug.o) has no symbols
../install-sh -c -d '/usr/local/include/spglib'
/usr/bin/install -c -m 644 arithmetic.h cell.h debug.h
delaunay.h hall_symbol.h kgrid.h kpoint.h mathfunc.h
niggli.h pointgroup.h primitive.h refinement.h
site_symmetry.h sitesym_database.h spacegroup.h
spg_database.h spglib.h spin.h symmetry.h version.h '/usr/
local/include/spglib'
make[2]: Nothing to be done for 'install-exec-am'.
make[2]: Nothing to be done for 'install-data-am'.
user@machine_name$
user@machine_name$
user@machine_name$ make install check
...
...
...
PASS: spglib_test
=====
Testsuite summary for spglib 1.9.4
=====
# TOTAL: 1
# PASS: 1
# SKIP: 0
# XFAIL: 0
# FAIL: 0
# XPASS: 0
# ERROR: 0
=====
make[1]: Nothing to be done for 'check-am'.
user@machine_name$
```

使用make install check 检查 PASS 后, 就可以开始编译cellsym了.

```

user@machine_name$ cd ../cellsym-0.16a/
user@machine_name$ make
...
user@machine_name$ ls -all cellsym
-rwxr-xr-x 1 user groups 53628 Jan 25 12:28 cellsym
user@machine_name$

```

顺利编译完成后, 会生成一个名为cellsym的可执行文件. 注意, make 执行过程中可能会出现编译警告, 但这并不影响程序执行, 可忽略.

编译并确认生成了cellsym 文件后, 就可以开始编译另一个插件symmol 了. symmol 是使用 Fortran 写成的. 在网站上下载的是其源码, 需要编译使其变为可执行文件. 需要注意的是, 原版的symmol.f 并不兼容AIRSS, 需要为其打上~/install_package/AIRSS/airss-0.9/misc 中提供的symmol.patch 补丁.

```

user@machine_name$ cd ../airss-0.9/misc/
user@machine_name$ cp ../../symmol/symmol.f .
user@machine_name$ ls
symmol.f      symmol.patch
user@machine_name$ patch -p0 symmol.f symmol.patch
patching file symmol.f
user@machine_name$ gfortran symmol.f -o symmol
user@machine_name$ ls
symmol      symmol.f      symmol.patch
user@machine_name$ echo '-o 后跟的文件名一定要是 symmol'
-o 后跟的文件名一定要是 symmol
user@machine_name$ ls -all symmol
-rwxr-xr-x 1 user group 106800 Jan 25 12:41 symmol
user@machine_name$

```

至此, 我们完成了所有插件的编译. 生成了symmol 和cellsym 两个可执行文件.

- (IV) **将插件导入 AIRSS** 这一步的操作十分简单, 将编译好的两个插件复制到系统目录下的bin/文件夹即可. 为了以防万一, 可以在安装包管理文件夹保存一个bin/的备份

```

user@machine_name$ pwd
/home/user_name/install_package/AIRSS/airss-0.9/misc
user@machine_name$ cp symmol ../bin/
user@machine_name$ sudo cp symmol /usr/local/airss-0.9/bin
Password:
user@machine_name$ cd ../../cellsym-0.16a/
user@machine_name$ cp cellsym ../airss-0.9/bin/
user@machine_name$ sudo cp cellsym /usr/local/airss-0.9/bin

```

- (V) **安装最终检查** 回到airss-0.9 中执行make 的文件夹. 重新输入make check 检查安装情况.

```

user@machine_name$ cd ../airss-0.9
user@machine_name$ make check
(sh bin/check_airss)
Essential:

airss.pl +
run.pl +

```

```

crud.pl +
castep2res +
buildcell +
cryan +
pp3 +
cabal +
cellsym +
symmol +
bob - Get Bob!

Recommended:

castep - Install castep: http://www.castep.org/

...
...
...

-----
Tests run in .check:
-----

Running example 1.1 (Crystals):

Al-14776-403-2  -0.00   7.784  -6.398   8 Al    C2/m    1
Al-14776-403-1   0.00   7.820   0.066   8 Al    P21/m    1

Running example 1.2 (Clusters):

Al-15054-7410-1  0.00   615.385  -3.190  13 Al    Cs     1
Al-15054-7410-2  0.00   615.385   0.006  13 Al    Cs     1

Skipping example 3.1 (Gulp)
Skipping example 2.1a (Castep)
user@machine_name$

```

成功输出了晶体的空间群名称!

至此, 我们完成了 AIRSS 的基本安装, 您现在已经可以使用 AIRSS 的 pp3 模块 (默认是 CASTEP) 进行结构搜索了.

AIRSS 是受 GPL 许可证保护的开源软件. 对此程序您有以下三种权利:

- * 以任何目的运行此程序
- * 再复制
- * 改进此程序, 并公开发布改进

A.3 卸载软件

AIRSS 卸载可分为三步:

(I) 卸载 spglib 进入安装包管理文件夹, 使用 `make uninstall` 卸载 spglib.

```

user@machine_name$ cd ~/install_package/AIRSS/spglib-1.9.4
user@machine_name$ sudo make uninstall
...
user@machine_name$

```

(II) **删除相关文件夹** 删除系统目录中的 bin 文件. 您可以选择保留安装文件. 保留安装文件可以在您试图恢复使用 AIRSS 时提供便利.¹⁷

```
user@machine_name$ cd /usr/local/  
user@machine_name$ sudo rm -ri airss-0.9  
Password:  
user@machine_name$ cd ~/install_package/  
user@machine_name$ rm -r AIRSS
```

(III) **恢复 PATH 变量** 进入 ~/.bashrc 文件, 删除修改环境变量的语句即可.

```
###Setting PATH for AIRSS  
export PATH="/usr/local/airss-0.9/bin:${PATH}"
```

¹⁷强烈建议您对文件进行删除时, 在离此文件较近的路径上操作, 并杜绝使用绝对路径, 以免打出文章开头提到的毁灭性指令.