



HALF 预注入器模拟 @IMPACT-T

李标斌，张善才

2023.10

biaobin@ustc.edu.cn

1 HALF 预注入器介绍

HALF 预注入器，包含一直流高压电子枪，20cm 长的 prebuncher, 1.4m 长的 buncher 和 两个 3m 长的行波加速管，还有 5 个螺线管用于束流的横向约束和发射度补偿。其示意图如图 1 HALF 预注入器布局示意图。图 1 所示：

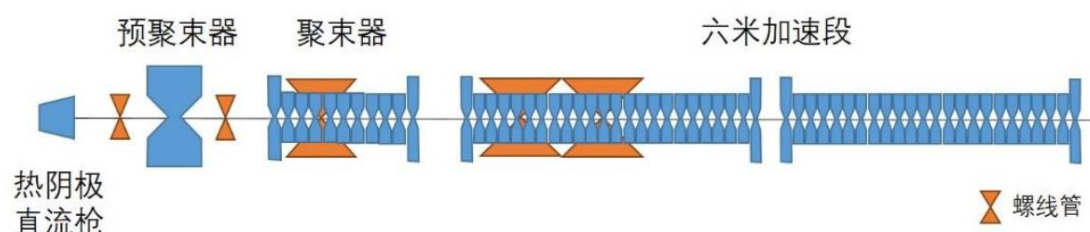


图 1 HALF 预注入器布局示意图。

如果从模拟软件的角度来看，上述元件主要可分为：

	电磁场类型	Parmela/IMPACT-T 元件	IMPACT-T 模拟方法	输入场分布
直流枪	静电场	Poisson/ EMfldCyl	驻波场频率设置为 0	必须用 3D 场分布(1D 轴上场展开方式不准)
螺线管	静磁场	Poisson/Sol		1D 轴上 Bz 场或 3D 场分布
Prebuncher	驻波场	Cell/ EMfldCyl		3D 场分布
buncher	变相速行波场	Trwave/Solrf	逐 cell 取叠加的驻波场，实现变相速行波场的模拟	轴上 Ez 场分布
6m 加速段	行波场	Trwave/Solrf	驻波场叠加形成行波场	轴上 Ez 场分布

接下来分别介绍各元件的模拟方法。

2 模拟方法

2.1 直流枪

IMPACT-T 软件，没有与 Parmela 对应的静电场元件，只有可以读入三维电磁场分布，柱坐标系下的 EMfldCyl 和直角坐标系下的 EMfldCart 两个模拟驻波场的元件。因此对于直流枪对应的静电场模拟，可以简单的设置驻波场频率为零即可。基于我们新开发的基于 python 的 lattice parser 模块¹，输入文件

¹ 见 <https://github.com/biaobin/IMPACT-T>

lte.impt 文件中，其定义方式如下：

```
dcgun: emfldcyl,zedge=0.0,L=6.5e-2,freq=0,phase=0,fileid=1,  
datafmt="poisson",scale=1.0
```

zedge 定义了元件起始位置(全局坐标)，L 为元件长度，freq 为 RF 频率，此处设置为零，相位也设置为零，fileid=1 对应于场文件 1T1.T7。对于三维场分布，IMPACT-T 场文件名的格式为 1T[fileid].T7。datafmt="poisson"为我们在 IMPACT-T 源码中新增加的格式，直接对应于 Parmela 静电场文件的格式：

```
!datafmt=poisson, units are [cm,V/cm]  
!-----  
open(33,file='1T1.T7')  
write(33,*)rmin,rmax,nmr-1  
write(33,*)zmin,zmax,nmz-1  
do j=1,nmz  
  do i=1,nmr  
    write(33,*)Er(i,j),Ez(i,j)  
  enddo  
enddo  
close(33)
```

Half 中电子枪的轴上 Ez 场分布如图 2 所示，电场峰值梯度为 2.46MV/m，电子在电子枪出口的动能(kinetic energy)约为 100keV。

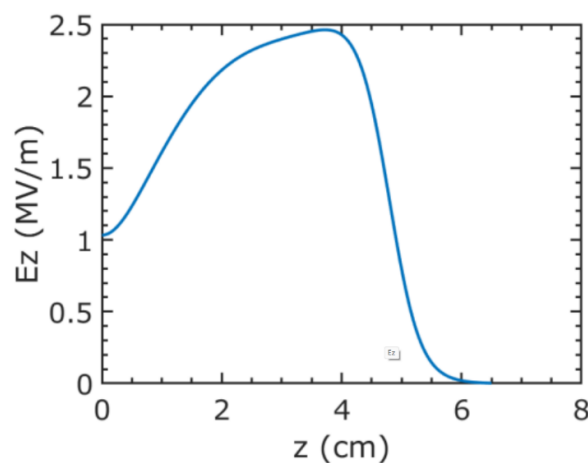


图 2 电子枪轴上 Ez 场分布

2.2 螺线管

IMPACT-T 有 Sol 元件，可与 possion 的静磁场元件直接对应，Sol 元件读取 3D 磁场分布，lte.impt 输入文件中，其定义方式如下：

```
sol2: sol, zedge=50e-2, L=150e-2, scale=1e-4,fileid=3
```

由于 IMPACT-T 源码内部磁场单位为 T，而 Parmela 磁场文件单位为 gauss，因此 scale=1e-4，fileid=3 对应于场文件 1T3.T7。场文件格式为：

```
%[cm, Gauss ]  
r1 r2 nr  
z1 z2 nz  
  
k=1;  
for j=1:nz+1  
    for i=1:nr+1  
        br(j,i)=B(k,1);  
        bz(j,i)=B(k,2);  
        k=k+1;  
    end  
end  
end
```

需注意的是：

1. IMPACT-T manual 中 V2 解释为 Bz0(T) Not used, 但实际上，该参数是作为 scale 参数，且被使用的。Manual 没有及时修正。
2. 模拟时需注意磁场径向 sample 磁场的范围，如果模拟中粒子超过了磁场范围，则会报错，程序停止：

```
!ir=r/hr+1, hr is dr  
if(ir.gt.fldata%NrIntvRft) then  
    print*,"ir: ",ir,rr,pos(1),pos(2),fldata%NzIntvRft,&  
    fldata%NrIntvRft,fldata%ZmaxRft,fldata%ZminRft,fldata%RmaxRft,&  
    fldata%RminRft  
    !print*,"ir: ",ir,rr,pos(1),pos(2)  
    stop  
endif
```

这与 Parmela 不同，Parmela 不会报错，程序也不会停止。

-
3. 螺线管的模拟也可以使用 Solrf 元件，对轴上的 Bz 场进行傅里叶级数分解，输入场为 rfdatax。模拟结果与使用三维场分布几无差别。

2.3 预聚束段

预聚束腔为驻波场元件。输入文件 lte.impt 中定义格式如下：

```
!design phase=-90 => 93.46
phipreb=93.46
Emaxfile=6.6479
Emaxpreb=0.19/0.150/Emaxfile
preb: emfldcyl, zedge=45e-2, L=20e-2, freq=476e6, phase=phipreb, fileid=5,
scale=Emaxpreb, datafmt="impt"
```

首先，IMPACT-T 的相位对应于 $\cos()$ 函数，其次，0deg 对应于能量增益最大(不论正负电子)。因此设计相位(design phase)为 -90deg，即对应于头部粒子看到能量低于尾部粒子，可实现速度压缩。经 PhaseOpt.py 扫相后，可得绝对相位(driven phase) 为 93.46 deg。

场文件格式如下：

```
!datafmt=impt, units are [cm,MHz,MV/m,A/m]
!-----
open(33,file='lT1.T7')
write(33,*)zmin,zmax,nmz-1
write(33,*)freq
write(33,*)rmin,rmax,nmr-1
do i=1,nmr
  do j=1,nmz
    write(33,*)Ez(j,i),Er(j,i),E(j,i),H(j,i)
  enddo
enddo
close(33)
```

HALF prebuncher 的轴上 Ez 场分布如图所示。需注意 Parmela cell 元件定义场强为使用平均场强 E0，E0 定义为：

$$E_0 = \frac{1}{L} \int |E_z(z)| dz,$$

积分可求得 $E_0 \approx 0.15$ 。Parmela 中设置幅值为 0.19 MV/m，场文件 1T5.T7 轴上 Ez 场最大为 6.6479 MV/m，因此 IMPACT-T 的设置值 $\text{scale}=0.19/0.15/6.6479$ 。

Parmela 的 cell 驻波场元件，采用 $\sin()$ 函数习惯，且 0-180deg 为正的 Ez 场，对于负电子，-180-0 为加速相位。Parmela 中 prebuncher 相位为 183.46deg，与 IMPACT-T 的 93.46deg 差了 90deg。

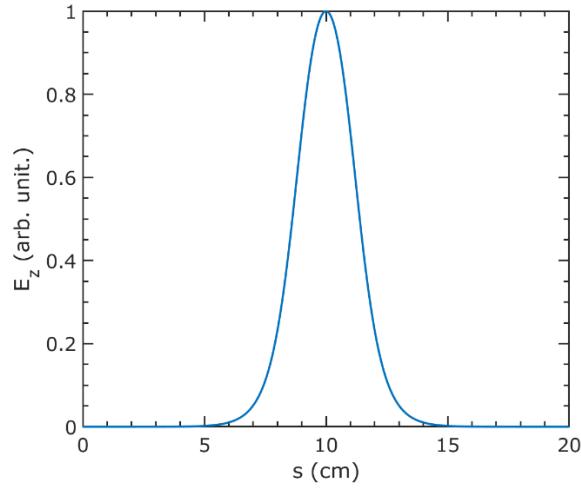


图 3 Prebuncher 轴上 Ez 场分布

2.4 聚束段

使用 IMPACT-T 模拟 HALF 预注入器的主要难点即在于此变相速行波管部分。该 buncher 段包含输入耦合器(驻波腔)和半个 cell 的行波腔，然后是相速度分别为 $\beta_\phi = 0.63, 0.8, 0.9, 0.95, 0.98$ 的 5 个行波加速腔，接着是相速度 $\beta_\phi = 1$ 的行波加速腔 30 个，最后是半个 cell 的行波腔和输出耦合器(驻波腔)。可见行波腔共有 36 个 cell，每 3 个 cell 相移为 2π 。

IMPACT-T 对于 RF 场的处理，主要元件为 EMfldCyl 和 Solrf 两个元件，前者输入为柱坐标系下的三维场分布，对应场文件为 1TV3.T7；后者则读入轴上场分布对应的傅里叶系数。

对于轴上场的处理，IMPACT-T 分别有 RFcoefext 和 RFcoeflcls 两个 Fortran 程序，前者处理非对称场分布，如出入口的 coupler 驻波场。后者则处理对称场分布，如 3 个 cell 的 $2\pi/3$ 模场分布。这两个程序生成的傅里叶系数文件格式为 rfdatax，程序内部拿到该傅里叶系数后，再基于傅里叶级数重构轴上纵向场分布，横向和偏轴场则由轴上纵向场解析求得。此方式对于驻波场十分直接，对于行波场的处理，则要复杂一些。

根据文献^[1]可知，行波场可由驻波场叠加获得：

$$E_{tr}(z, t) = \frac{1}{\sin(\beta_0 d)} [E_s(z) \cos\left(\omega t + \theta + \beta_0 d - \frac{\pi}{2}\right) + E_s(z + d) \cos(\omega t + \theta + \pi/2)]$$

对于 HALF 使用的 $2\pi/3$ 模行波加速管而言， $\beta_0 d = 2\pi/3$ 。处理步骤如下：

1. 根据一个周期(3 cell)的驻波场分布，获得左移一个 cell 距离 d 的另一个驻波场分布 $E_s(z + d)$ 。以阑片为起始点，3cell 场和左移一个 cell 的场如下图所示：

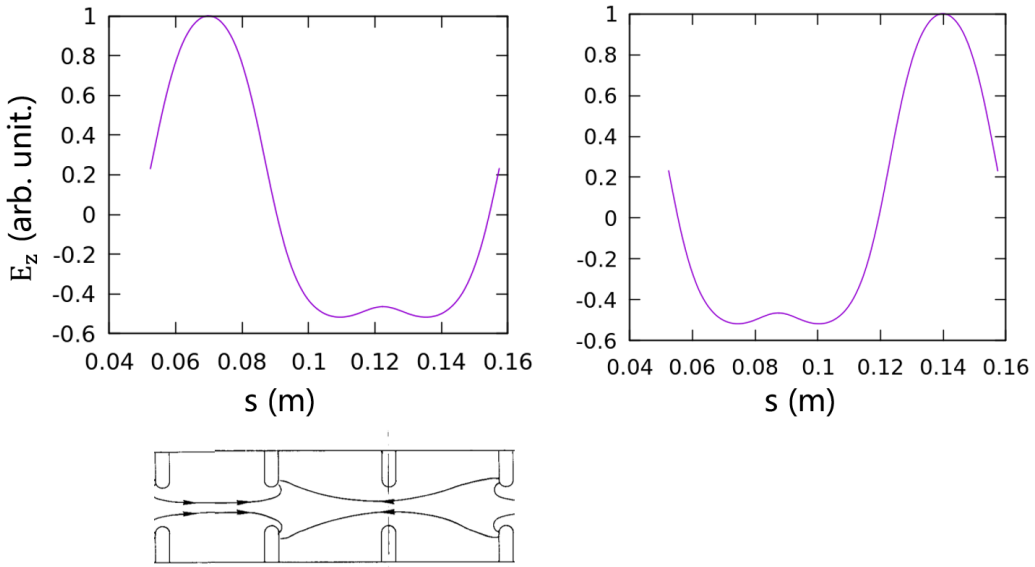


图 4 一个周期驻波场(左图)，与左移距离 d 的驻波场分布(右图)

2. 幅值需乘以系数 $\frac{1}{\sin(2\pi/3)}$
3. 两个叠加的驻波场分布，相位分别增加 30deg 和 90deg

上述步骤中，对于 $E_s(z + d)$ 场分布的获取，可利用 RFcoeflcls 获得。第二步和第三步则需要在 ImpactT.in 文件中显式给出。见后面 lte.impt 输入文件。

对于加速场场强的设置，IMPACT-T 和 Parmela 也略有不同，前者设置值为 E_{max} ，而后者为 $E_0 T$ 。Parmela 手册中给出的 T 的定义式为：

$$T = \frac{1}{E_0 L} \int E_z(z) [\cos(kz) + i \sin(kz)] dz,$$

注意手册中的公式漏了虚数符号 i 。式中的 T 实际上是 $T(k = 2\pi/3d)$ ，即为基模在输入的加速场中所在比例²。图 5 中为对 3cell 场分布作傅里叶级数分解的

² 此处的 k 即 β_0

结果，可得基模幅值为 0.744，即有 $E_0T = 0.744$ 。

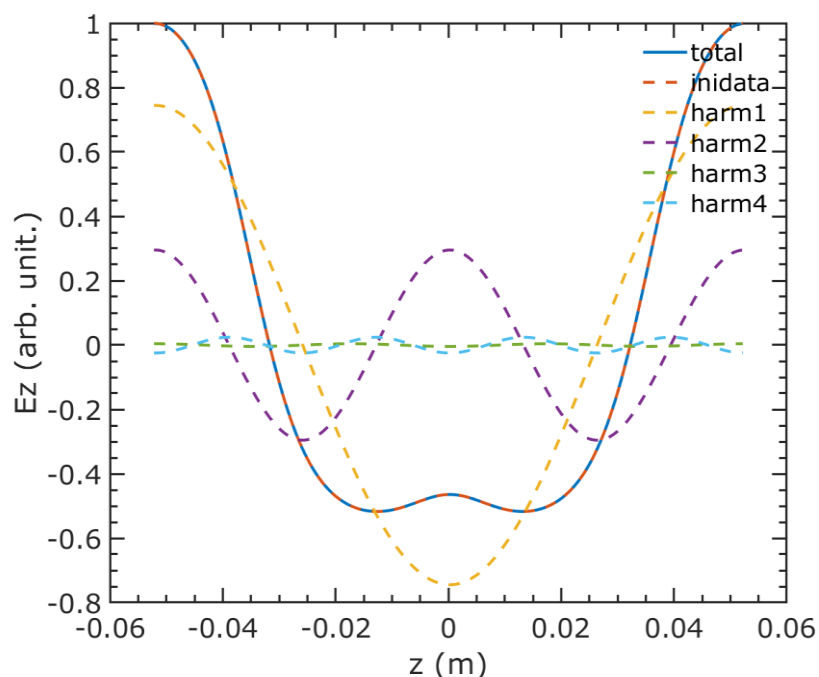


图 5 SLAC 2pi/3 模加速场的模式分解

接下来，我们考虑变相速行波场的模拟。变相速，体现在每个 cell 中的电磁场上，其 **profile** 不变，即维持图 5 中场形不变。只是周期长度随相速度相应变短。因此对于变相速结构的模拟，傅里叶系数文件 `rfdatax` 可重构出场形，只需对每个 cell 的场分布文件 `rfdatax` 改变 cell 长度。而三个 cell 形成一个周期，不同的 cell，分别截取对应的 cell 处的电磁场部分即可。输入文件 `lte.impt` 中对于聚束段的定义方式如下：

```
!A1, buncher
!using combined method
!=====
phi=240
fac=1/sin(2*pi/3)
E0T=0.744
E0cp1=0.3941
E0cp2=0.3449

ampcoup1=3.61e6/E0cp1
ampcoup2=4.2e6/E0cp2

amp1= 7.4376e6/E0T*fac
```

amp2= 8.3459e6/E0T*fac

amp3= 8.7292e6/E0T*fac

!cell length

!-----

Lcoup1=3.30600e-2

Lcoup2=5.24637e-2

L1=1.10174*0.01

L2=2.20348*0.01

L3=2.79806*0.01

s0=96.694e-2

s1=s0+Lcoup1

s2=s1+L1

s3=s2+L2i

!-----

coup1: solrf, zedge=s0, L=Lcoup1, Emax=ampcoup1, freq=2856e6, phase=phi,
fileid=4, L_fourier_exp=2*Lcoup1, z1=-Lcoup1, z2=Lcoup1

!-----

cell11: solrf, zedge=s1, L=L1, Emax=amp1, freq=2856e6, phase=phi+30, fileid=51,
L_fourier_exp=L1*6, z1=-L1, z2=L1

cell12: solrf, zedge=s1, L=L1, Emax=amp1, freq=2856e6, phase=phi+90, fileid=61,
L_fourier_exp=L1*6, z1=-L1, z2=L1

cell21: solrf, zedge=s2, L=L2, Emax=amp1, freq=2856e6, phase=phi+30, fileid=52,
L_fourier_exp=L2*3, z1=-L2, z2=L2

cell22: solrf, zedge=s2, L=L2, Emax=amp1, freq=2856e6, phase=phi+90, fileid=62,
L_fourier_exp=L2*3, z1=-L2, z2=L2

cell31: solrf, zedge=s3, L=L3, Emax=amp2, freq=2856e6, phase=phi+30, fileid=53,
L_fourier_exp=L3*3, z1=-2*L3, z2=L3

cell32: solrf, zedge=s3, L=L3, Emax=amp2, freq=2856e6, phase=phi+90, fileid=63,
L_fourier_exp=L3*3, z1=-2*L3, z2=L3

cav1: line=(cell11,cell12,cell21,cell22,cell31,cell32)

lineExample: line=(coup1,cav1)

上面的 lineExample 即定义了入口耦合器, 接下来的半个 cell 行波腔, 和紧接着的两个行波腔。其中, L_fourier_exp 对应于三个 cell 的长度, 即一个周期长度。z1 和 z2 定义一个周期中取哪一部分场, IMPACT-T 只取(0,z2) 部分的场。我们基于 python 写的 lattice parser 模块, 将自动根据 L_fourier_exp, z1, z2 修改、更新 rfdata[fileid] 文件, 从而实现逐 cell 长度的改变, 即所谓变相速结构。

2.5 加速段

整个加速段为行波场, 共有 168 个行波加速 cell, 其相速度一致, 因此处理要简单很多。只需在得到一个周期 3 个 cell 场分布的傅里叶系数后, 重建时周期延拓即可得到 56 个周期的场分布。lte.impt 输入文件中定义方式如下:

```
!A2
!=====
Lcell=3.49758e-2

phiA2=85
ampA2= 17.5e6/E0T*fac
tws: tws, zedge=285.25e-2, L=Lcell*168, Emax=ampA2, freq=2856e6, phase=phiA2,
fileid_1=14, Lcoup=5.2464e-2, Lcav=Lcell*3
```

上面中 fileid_1=14 对应于场文件 rfdata14, 该文件对应于入口耦合器场分布, 目录中还需依次给出 rfdata15, rfdata16, rfdata17, 分别对应 3cell 驻波场分布傅里叶系数文件, 左移 1 cell 驻波场分布傅里叶系数文件, 和出口处耦合器场分布。Lcoup 和 Lcav 的值会在 lattice parser 中自动更新上面四个场文件。

2.6 模拟结果后处理

基于前面的介绍, 基于 IMPACT-T 的 HALF injector 模拟便搭建完成。接下来, 我们介绍一下对于模拟结果的后处理。IMPACT-T 的输出文件名为 fort.xx 格式。常用到的文件有 fort.18, fort.24/25/26, 其详细含义见 IMPACT-T 手册。利用 gnuplot 可以方便的查看结果, 以查看发射度的变化为例。在命令行输入 gnuplot, 将会打开 gnuplot 的命令行界面:

```
(base) → impt_scon gnuplot

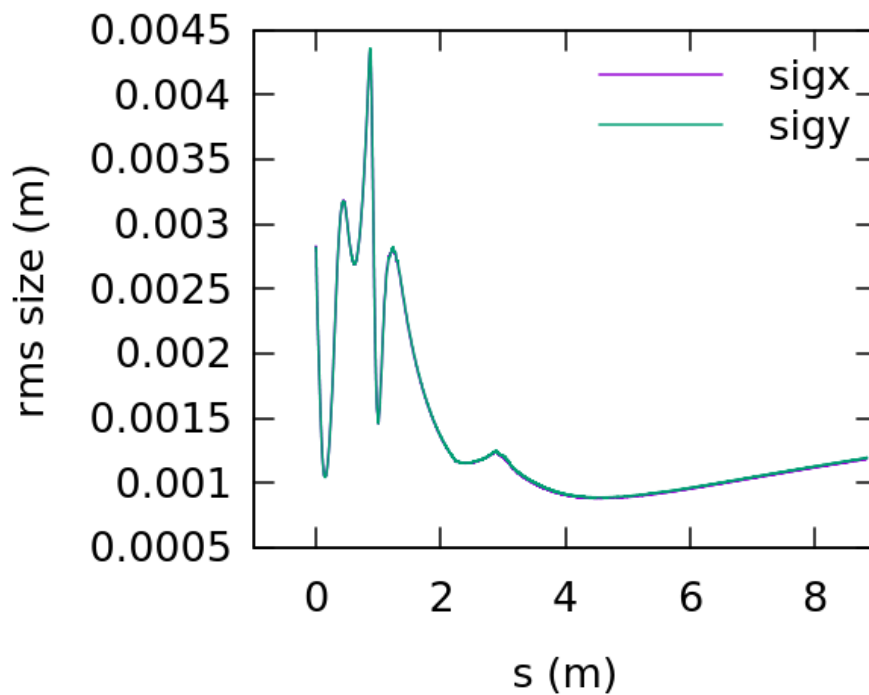
G N U P L O T
Version 5.2 patchlevel 8    last modified 2019-12-01

Copyright (C) 1986-1993, 1998, 2004, 2007-2019
Thomas Williams, Colin Kelley and many others

gnuplot home:      http://www.gnuplot.info
faq, bugs, etc:    type "help FAQ"
immediate help:    type "help" (plot window: hit 'h')

Terminal type is now 'qt'
gnuplot>
gnuplot> p 'fort.24' u 2:4 w l t 'sigx'
gnuplot> rep 'fort.25' u 2:4 w l t 'sigy'
gnuplot> set xlabel 's (m)'
gnuplot> set ylabel 'rms size (m)'
gnuplot> rep
gnuplot> |
```

输出的图片如下：



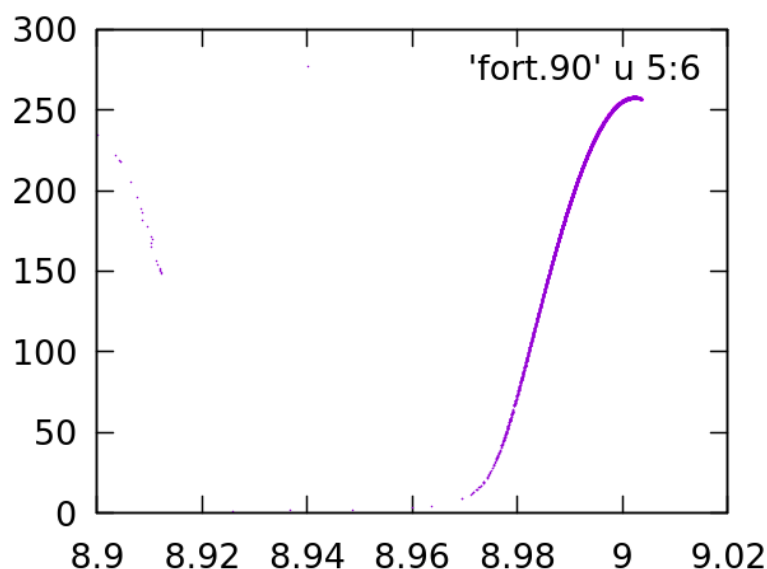
更多关于 gnuplot 的用法，可以查看 gnuplot 的手册。

对于束流相空间的查看，fort.40 给出了初始相空间的分布，文件里有六列数据，分别为： $x(m)$, $\gamma\beta_x$, $y(m)$, $z(m)$, $\gamma\beta_z$ 。Fort.50 给出了模拟结束点的束流相空间分布，需注意该分布并不是某一时刻的束流分布，非参考粒子均回溯了 0.5dt 的距离，其物理含义类似于打在某一个 PR 靶上得到的分布。如果要查看某一时

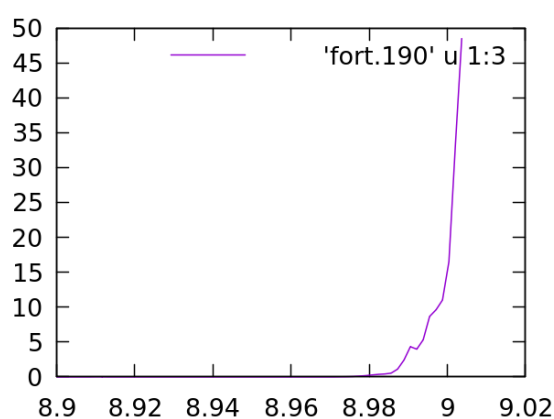
刻的分布，可用-2 元件，在 python 的 lattice parser 中，即为 watch 元件：

```
ww:watch,zedge=9.0,filename_id=90,slice_bin=64,sample_freq=1  
line: line=(dcgun,sol1,preb,sol2,lineA1,sol3,tws,ww)
```

watch 元件将在束流中心到达 90cm 处时，输出该时刻的束流分布：



其中 sample_freq 用于控制输出粒子个数，如模拟用了大量粒子 $np=1e6$ ，只想要输出 $1e4$ 粒子，则可设置 sample_freq=100。同时，slice_bin 用于控制切片网格数，fort.190 (100+90)文件中将含有切片信息，如流强分布，切片能散和切片发射度等。初始版本的第三列数据对应于流强分布，但单位并非 A，现已更新为量纲为 A：



2.7 其他注意事项

- (1) Lte.impt 中的 perdlen 现更新为可用于卡去参考粒子两侧 perdlen/2 距离外的粒子，即可用于只跟踪第一个 bucket 内的粒子。

(2) IMPACT-T 程序还提供了改变跟踪步长的选项，如在跟踪加速段时，改变跟踪步长为 2deg ($dt \approx 1ps$):

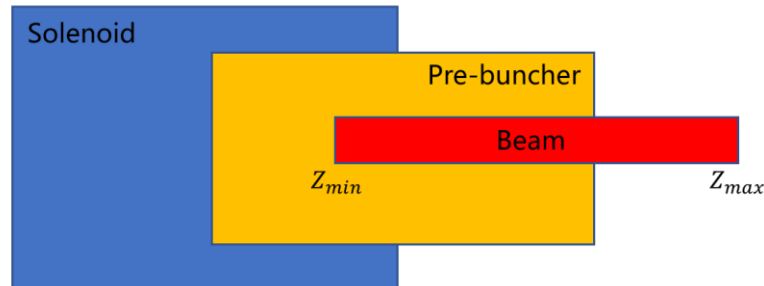
```
!A2
!=====
Lcell=3.49758e-2

phiA2=85
ampA2= 17.5e6/E0T*fac
tmptws: tws, zedge=285.25e-2, L=Lcell*168, Emax=ampA2, freq=2856e6,
phase=phiA2, fileid_1=14, Lcoup=5.2464e-2, Lcav=Lcell*3

chdt: changedt, zedge=280e-2, dt=2e-12
tws: line=(chdt, tmptws)
```

基于该功能，可在保证模拟精度的前提下有效加快模拟速度。

(3) IMPACT-T 在处理场叠加时，需特别注意。



在上述情况，束流较长，跨越了螺线管场、预聚束器场分布，且头部已经出了预聚束器。由于代码内部在处理叠加场时，会判断束流起始位置是否位于某一元件内部：

$$z_{min} \in [s_1, s_2] \quad ?$$

$$z_{max} \in [s_1, s_2] \quad ?$$

当束流头部已探出 pre-buncher 时， z_{max} 此时不属于任一元件。此时代码处理叠加场时便会出错³。解决办法也很简单，在 pre-buncher 后补一 drift 元件，覆盖探出的电子束部分，避免上述情况即可：

³ 源码见 scatter20t_BeamBunch()中的 do 循环部分。

```

dcgun:emfldcyl,zedge=0.0,L=6.5e-
2,freq=0,phase=0,fileid=1,datafmt="poisson",scale=1.0

sol1: sol, zedge=20e-2, L=40e-2, scale=0.4856e-4, fileid=14

!design phase=-90 => 93.46
phipreb=93.46
Emaxfile=6.6479
Emaxpreb=0.19/0.150/Emaxfile
preb: emfldcyl, zedge=45e-2, L=20e-2, freq=476e6, phase=phipreb, fileid=3,
scale=Emaxpreb, datafmt="impt"

d2: drift, zedge=65e-2, L=20e-2
ww: watch, zedge=85e-2, filename_id=90, slice_bin=64

line: line=(dcgun,sol1,preb,d2,ww)

```

(4) Fort.50 和 -2 元件，代码内部均调用的 `phase_Output()` 函数输出粒子分布。但是，fort.50 输出时，在调用 `phase_Output()` 之前回溯了 0.5dt。而-2 元件没有该回溯，因此结果不同。

2.8 IMPACT-T 的安装与运行

IMPACT-T 为 fortran 程序，可支持并行多线程，和单线程运行。我们写了两个 bash 脚本，可方便的在 IMPACT-T 的并行和单核版本之间进行切换。进入到 utilities 目录中，运行：`./para2singcore` 或者 `./sing2paracore` 即可。用户需先安装 gfortran 编译器，对于并行版本，需要安装 mpich。然后进入到 IMPACT-T/src 目录下，命令行执行：

```
$make
```

即可编译生成可执行文件 `ImpactT.exe` 文件。

当前我们的 github 版本⁴与 lbl 官方版本的主要区别在于我们添加了基于 python 的 lattice parser 模块，见 `utilities/lattice_parser`。为使用该模块。需先在 `.bashrc` 或者 `.zshrc` 文件中设置环境变量，如：

```
export PATH=$PATH:/home/biaobin/gitproj/IMPACT-T/utilities/lattice_parser
```

如此，便可在任意目录下调用 `genimpacttin`，该可执行程序为 python 脚本，将调用 `lattice_parser.py` 和 `impact_parser.py` 两个模块中的函数，将 `lte.impt` 文件转化

⁴ 见 <https://github.com/biaobin/IMPACT-T>

为 ImpactT.in 文件⁵。如对于 HALF 预注入器，lte.impt 文件中的 control 和 beam 部分定义如下：

```
&control
!=====
core_num_T=2
core_num_L=2
meshx=32
meshy=32
meshz=64
dt=1e-12
max_step=1e5
image_sc=1
image_stop_pos=15e-2
xrad=1.5e-2
yrad=1.5e-2
perdlen=0.2

nemission=1000
temission=1e-9

kinetic_energy=60
freq_rf_scale=2856e6
ini_t=0.0

diag = 1
nbunch=1
&end

&beam
!=====
mass=0.511e6
charge=-1.0

distribution_type=6
Np=1e5
```

⁵ ImpactT.exe 的输入文件为 ImpactT.in 文件。

```
total_charge=1e-9

sigx=5.64e-3, sigpx=0
sigy=5.64e-3, sigpy=0
sigz=2.998e8*1e-9
sigpz=0.0

&end
```

对于上述命令的含义,见代码主目录下的 `readme.md` 文件和 IMPACT-T 的手册。

准备好 `lte.impt` 文件后,在 `lte.impt` 文件目录下:

```
$genimpacttin lte.impt line
line 指定选用的 lattice 序列,当前目录下将生成 ImpactT.in 文件。然后即可调用
ImpactT.exe 程序:
$mpirun -np 4 ImpactT.exe
即调用 4 个线程执行 ImpactT.exe 程序。如想运行单核版本,则需修改
core_num_T=1, core_num_L=1, 然后重新运行:
$genimpacttin lte.impt line
$ImpactT.exe
```

2.9 Lattice parser 的语法规则

Lattice parser 的语法规则和 Elegant 十分类似,均为字符串解释型输入文件。对用户来说,相较于全是数字的 `ImpactT.in` 文件,十分友好。

输入文件 `lte.impt` 文件中包含三个部分, `control`, `beam` 和 `lattice` 部分。如对于 `control` 部分,以 `&control` 开始,以 `&end` 结束。输入文件支持数学表达式方式的赋值方式,如上面对于 `sigz` 的赋值方式。Lattice 部分则还可以定义变量,然后赋值,见聚束器部分的输入文件。更多详细的参数解释,见 `github` 中的 `readme.md` 文件。

3 与 Parmela 的结果比对

Parmela 输出结果中, `rms` 统计文件给出的发射度演化不可信⁶。为得到 Parmela 模拟结果准确的发射度演化,我们直接统计 `TAPE3.T3` 文件中给出的每 20 steps 输出的粒子分布⁷。

⁶ 即在 `LANL.ini` 文件中设置: `TimeStepEmittance=rms.txt`, 运行后会生成 `RMS.txt` 文件。

⁷ 为和 IMPACT-T 对比, IMPACT-T 中也加入了每 20 步长输出相空间分布, 动画对比见 PPT。

Parmela 的 TAPE3.T3 文件的粒子分布，包含所有 bucket 内的粒子⁸，我们主要关心头部第一个 bucket 内部的粒子信息。因此，在统计发射度和 RMS 尺寸变化时，我们均只截取头部第一个 bucket。而 IMPACT-T 如果模拟中考虑所有 bucket 粒子，由于其纵向空间电荷力的网格划分是以 z_{min}, z_{max} 划分的，如果粒子分布跨度过大，一般常用的纵向 64 个网格显然是不够的，此时 IMPACT-T 的模拟经常会中途报错停止运行。考虑到尾随 bucket 内的粒子实际上占比很少，且各 bucket 之间间距很大，彼此之间几无影响，因此我们在 IMPACT-T 中利用 **Perdlen** 参数选取参考粒子 $[-Perdlen/2, Perdlen/2]$ 范围内的粒子分布，即只考虑第一个 bucket。

错误!未找到引用源。为发射度演化结果对比。IMPACT-T 采用了 10 万宏粒子，Parmela 为 1 万宏粒子。IMPACT-T 给出的发射度要略低于 Parmela，在螺线管处的差别要大一些，在加速段出口处，IMPACT-T 给出的发射度约为 25mm mrad，而 Parmela 约为 29 mm mrad。从数值噪声的角度来考虑，IMPACT-T 的结果要更为可信。图在 14cm 处，束流纵向相空间的对比图，Parmela 模拟结果可见明显的因数值噪声(宏粒子数过低)引起的纵向不规则调制，能散要显著高于 IMPACT-T 的模拟结果。

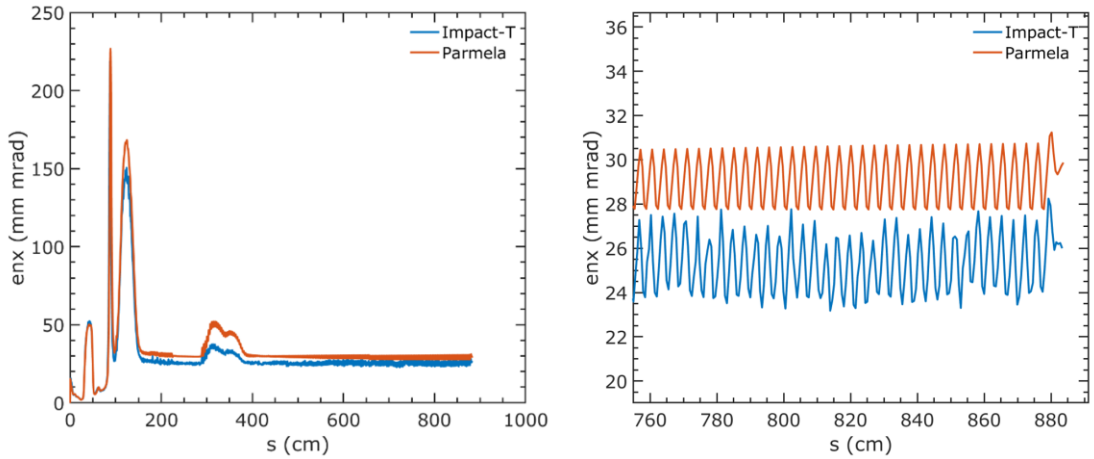


图 6 IMPACT-T 和 Parmela 发射度演化对比。

图 8 为两个程序给出的 RMS 束团尺寸的演化曲线，IMPACT-T 的结果也是要比 Parmela 略小一些。

图 9 为两程序束流相空间对比，其位置位于聚束器出口，两个程序给出的结果符合的很好。图 10 则为加速段出口的相空间对比结果，IMPACT-T 给出的纵向相空间，电子束能量要略高于 Parmela。图 11 为放大对比图，可注意到两个程序头部的相空间分布有差别，IMPACT-T 给出的结果要更为平滑，Parmela 则具有明显弥散。差异的来源可能是对于空间电荷力的处理不同，IMPACT-T 严格限制了纵向 64 个网格划分只限于第一个 bucket 内部，因此结果应该是可信的，但

⁸ Parmele 的纵向截取似乎不起作用，依照手册，被截断的粒子仍会保留在 TAPE3.T3 中。

Parmela 的处理细节不明，因此暂时无法知道差异来源的具体原因。

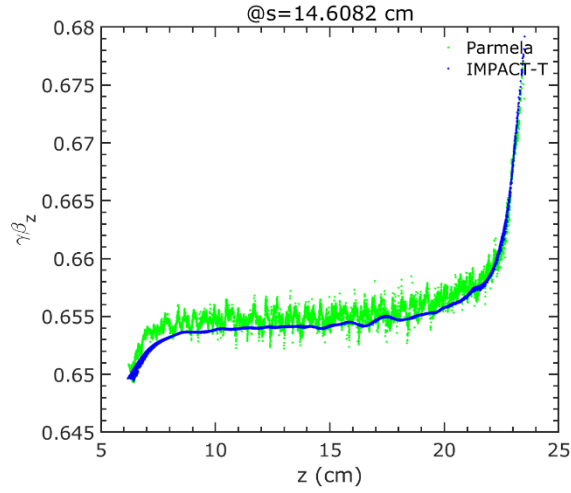


图 7 14.6cm 处，两个程序纵向相空间对比，Parmela 具有明显数值噪声引起的不规则调制结构。

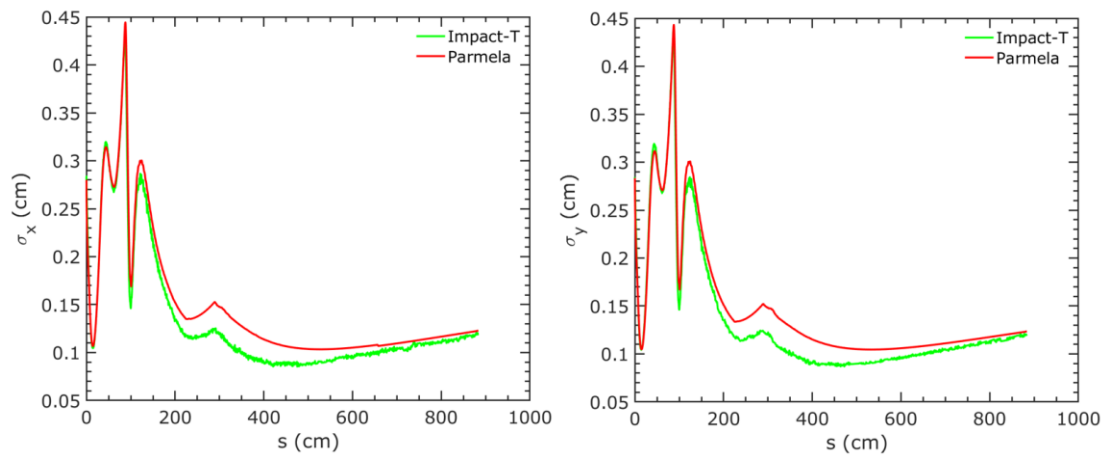


图 8 IMPACT-T 和 Parmela 两个程序，RMS 尺寸演化对比。

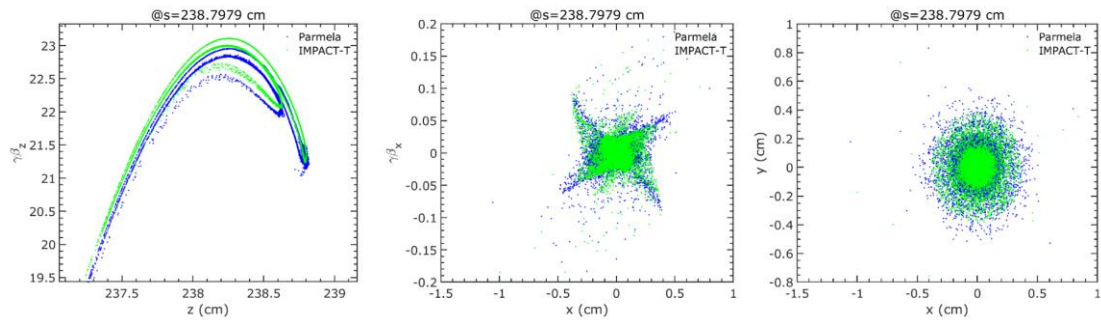


图 9 2.39m 处，即聚束器出口处，两个程序模拟结果的相空间对比。

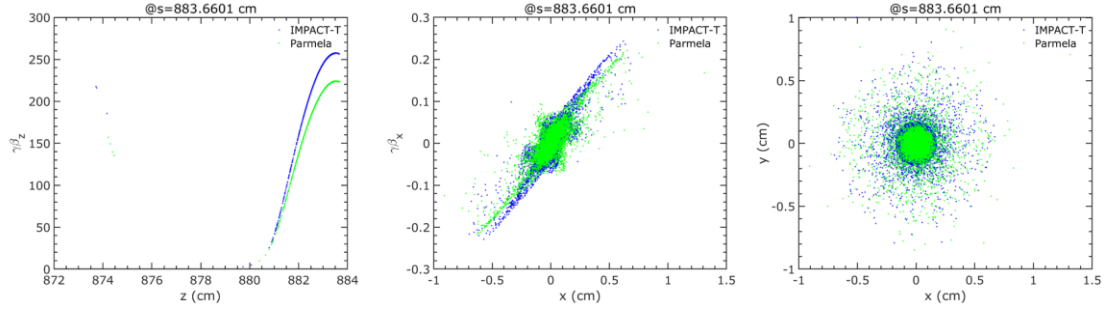


图 10 加速段出口处，两个程序模拟结果的相空间对比。IMPACT-T 束流中心能量要略高于 Parmela，能量差异约为 18MeV。

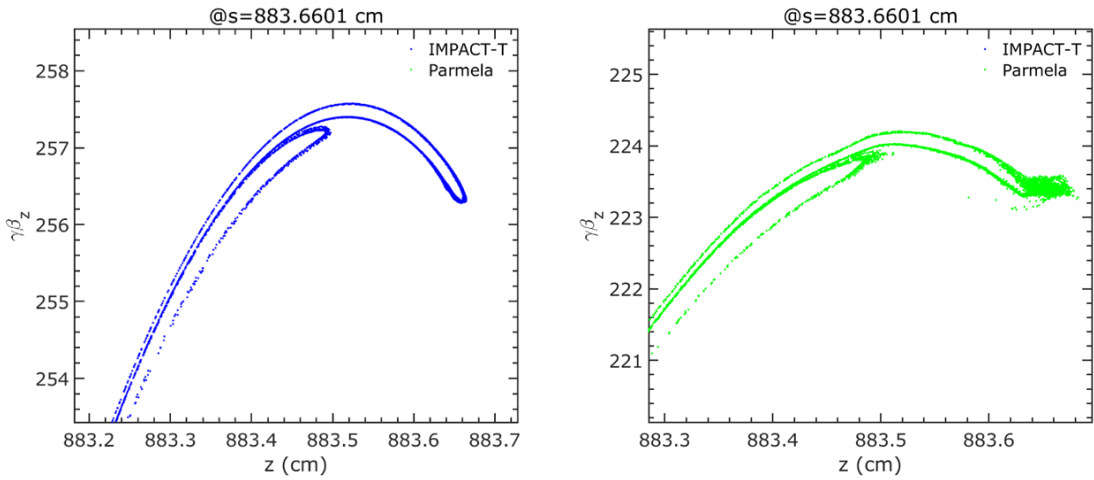


图 11 加速段出口处，IMPACT-T 和 Parmela 模拟结果对比。左图为 IMPACT-T 纵向相空间，右图为 Parmela 纵向相空间。

4 总结

我们基于 python 开发了针对 IMPACT-T 程序的 lattice parser 模块，可方便的处理类似 Elegant 的字符串解释型输入文件，相比 IMPACT-T 程序的原有的全是数字的输入方式，对用户要友好很多。Lte.impt 输入文件中很多缺省的参数值设置对于刚入门的用户来说也要友好很多。

IMPACT-T 程序模拟 HALF 预注入器的主要困难在于变相速段的模拟，我们采用更新 cell 长度，在重建 3cell 周期电磁场分布后，逐段选取对应 cell 场的方式处理该变相速段。模拟结果和 Parmela 符合的很好。

借助于 IMPACT-T 的并行模拟能力，对于大粒子数的模拟($np > 1e5$), IMPACT-T 相对于 Parmela 具有明显的速度优势。借助于 IMPACT-T 开源、跨平台且免费的特性，我们在后续 HALF 直线加速器调束软件的开发中，将基于 IMPACT-T 开发相应程序。

4 参考文献

- [1] Loew G A, Miller R H, Early R A, et al. Computer calculations of traveling-wave periodic structure properties[R]. Stanford Univ., CA (USA), 1979.