**CEPC束流极化研究计划**

段哲、高杰

中国科学院高能物理研究所

自旋极化束对于CEPC的物理研究有重要意义。一方面，利用CEPC的极高统计量可以大幅提高对Z玻色子和W玻色子质量的测量精度，分别达到0.5MeV及1MeV [1]，这对于检验标准模型的一致性有重要意义。**对Z和W玻色子质量测量的主要系统误差来源是对正负电子对撞束流的质心系能量测量的不确定度**，主要包括对单束流能量的测量不确定度及从单束流能量外推到质心系能量的不确定度。**在电子储存环中对束流能量最精确的测量方法是共振退极化方法 [2]**。该方法将射频扰动磁场以扫频激励方式作用于束流，用极化仪监测束流极化度的变化，记录因穿越自旋共振导致退极化的时刻，此时的射频磁场频率对应于束流能量，**单次测量可实现约10-6的束流能量相对测量精度 [3]**。

LEP对撞机使用该方法在45GeV实现了1.1MeV的单次束流能量测量系统不确定度 [4]。但LEP是单环对撞机，仅在每次对撞取数结束时才能保留单束流进行共振退极化测量，将束流能量标定的结果外推到整个对撞取数过程中，需要考虑多个引起束流能量随时间系统性变化的因素，如潮汐效应，这导致了较大的束流能量不确定度 [5]。另外，LEP在61GeV以上的束流能量没有再观测到束流极化，因此W质量的测量没有采用共振退极化方法来进行束流能量标定 [6]。

对于CEPC，利用康普顿极化仪测量束流垂直极化度，取数几秒钟可以实现1%的统计误差 [7,8]。为确保康普顿极化仪能够准确分辨极化度的突变，要求实现至少5%到10%的正、负电子束横向极化度。同LEP不同，CEPC采用双环方案，可以分别对正、负电子束流进行共振退极化测量，互相不干扰。**有望每隔10-15分钟进行一次束流能量标定，在物理取数过程中实现对正、负电子束流能量的连续监测，从而大幅降低束流能量不确定度。**根据模拟研究，CEPC在Z和W能区都有望实现足够的束流极化度 [9,10]，满足束流能量标定的需求。

另一方面，在Z、W及更高能量区间，利用高度极化束对撞可显著增强测量精度和新物理发现能力。以在45GeV附近的弱耦合角测量 [11,12]为例，SLC利用超过70%纵向极化电子束 [13]同非极化正电子束对撞测量ALR，LEP利用非极化束对撞测量AFB，SLC获取了相比LEP约3%的Z0玻色子统计量，获得了比LEP精度更高的弱耦合角测量结果 [14]，但两个实验测量结果之间存在对立。另外，利用高度横向极化束流也可进行CP破坏现象探索 [15]等。

**在45GeV及更高能区，CEPC有望实现50%-70%的极化电子束同非极化正电子束高亮度对撞 [16,17]，通过设置自旋旋转器可以实现极化方向在纵向、横向等不同状态之间切换，这将大大丰富CEPC的物理研究潜能**。例如，在45GeV利用纵向极化束对撞可实现对ALR的更高精度测量；采用非极化束对撞可实现对AFB的更高精度测量。在同一个实验中同时测量ALR从和AFB，有望解决SLC和LEP测量结果之间的不一致性。另外，如果能同时实现高极化度的电子束和正电子束用于对撞实验，可以降低束流极化度绝对精度的测量误差 [18]，进一步提高测量精度及新物理发现能力 [19]。

在CEPC加速器技术报告 [17]中设计了极化束产生、保持、调控和应用的不同实现方案，如表1所示：

* 方案1基于对撞环中的自极化效应，可在Z、W能区对少数非对撞正、负电子束团实现5%到10%的垂直极化度，满足束流能量标定的需求，而在Higgs等更高束流能量下实现可供实验使用的束流极化度，面临显著增强的辐射退极化效应，存在更大的挑战 [10]。自极化时间同束流能量的5次方成反比，在W能区自极化时间约15小时，约2小时可以建立起10%的垂直极化度；而在Z能区自极化时间约256小时，约30小时才能建立起10%的垂直极化度。参考FCC-ee的设计方案 [20]，在对撞环中加入非对称、三极头扭摆磁铁（asymmetric 3-pole wiggler，后面简称wiggler），可以将极化建立时间缩短到20小时左右，这样等待约2个小时可以建立约10%的束流极化度 [9,21]。但打开wiggler会引起束流能散度的显著增加，增加的同步辐射能量损失也限制了束流流强，这和高亮度对撞是不兼容的。在Z能区一种原理可行的运行模式如下：
  1. 在每次对撞取数之前先向正、负电子环分别注入约100个非对撞束团
  2. 打开wiggler等待约2小时，非对撞束团建立起足够的极化度
  3. 关闭wiggler并注入对撞束团，然后开始对撞取数
  4. 在取数过程中每隔10~15分钟利用一个非对撞束团进行一次束流能量标定
  5. 等最后一个非对撞束团退极化，最先退极化的对撞束团已经建立起足够极化度

对于W能区，上述运行模式稍作调整也可以适用：将非对撞束团数减少为12个；不需要wiggler，等待约2小时非对撞束团建立起10%极化度。这种运行模式可以在一次物理取数过程中持续进行，可实现对非对撞束能量的连续监测。但是，每次丢束后都需要重新执行流程中的第1和第2步，有2个小时左右的物理取数死时间。FCC-ee对加速器可靠性的研究 [22]表明，考虑到高频腔、功率源等关键硬件系统的故障率，这种运行模式的有效物理取数时间受限，积分亮度相比理想情况显著降低。

* 方案2利用对撞环中的自极化效应产生极化正电子束，和方案1一致；增加一台基于高压直流电子枪的极化电子源，产生超过85%的极化电子束，原非极化电子枪仍用于驱动正电子的产生。极化电子束经过注入器传输后注入到对撞环中。根据模拟研究，注入电子束的极化度可达70%以上 [23,24]。该方案一方面可满足束流能量标定的需求，同时可实现所有对撞电子束团的高极化度。在对撞环中每个对撞点两侧各加入一台自旋旋转器 [9]，可以在对撞点处实现超过50%的纵向极化，同时保持高对撞亮度。利用极化电子束同非极化正电子束对撞，可通过探测ALR精确测量弱耦合角，对物理研究的促进作用可以参考直线对撞机的相关研究 [19]。
* 方案3从极化电子源产生极化电子束，同方案2一致；利用正电子阻尼环中的自极化效应来产生极化正电子束。这需要采用正电子阻尼环的新设计方案，束流能量提高到2GeV左右，二极铁场强提高到2T左右，这样储存10分钟可以建立超过40%的横向极化。该方案。此方案可对所有对撞电子束团实现高度极化（横向或纵向），对撞正电子束团仍为非极化，可通过探测ALR精确测量弱耦合角。同方案1、2相比，此方案不再依赖对撞环中的自极化效应产生极化束，没有等待极化建立导致的物理死时间。每隔约10分钟，注入一对极化正、负电子束团，进行束流能量标定，同样可以实现对束流能量的连续监测。根据FCC-ee对加速器可靠性的研究 [22]，这种方案可以大幅提高积分亮度。
* 方案4从极化电子源产生极化电子束，同方案2、3一致；从源头产生极化度高于50%、产额高于1012/s的极化正电子束。但目前的极化正电子源技术尚无法同时满足极化度和产额要求 [25]，技术方面存在较大不确定性。极化正、负电子束注入到对撞环中，可满足束流能量标定的需求，并对所有对撞正、负电子束团实现高度极化对撞。实现正电子纵向极化需要在正电子对撞环中加入自旋旋转器。实现正电子束高度极化，对物理研究也有重要意义 [19]。

表1. 不同极化束实现方案比较

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 方案 | | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 |
| 极化e-产生 | | 对撞环自极化 | 极化电子源 | 极化电子源 | 极化电子源 |
| 极化e+产生 | | 对撞环自极化 | 对撞环自极化 | 正电子阻尼环自极化 | 高性能极化正电子源 |
| 横向极化束 | | e+/e-: ~100非对撞束团，极化度5%~10% | e+: ~100非对撞束团，极化度5%~10%;  e-: 所有束团50%~70% | e+: 1~2个非对撞束团，极化度>10%；  e-: 所有束团50%~70% | e+：所有束团，30%~50%；  e-: 所有束团50%~70% |
| 粒子物理实验  收益 | | Z质量测量~500keV  W质量测量~1MeV | Z质量测量~500keV  W质量测量~1MeV；  基于ALR测量弱耦合角 | Z质量测量~500keV  W质量测量~1MeV；  基于ALR测量弱耦合角 | Z质量测量~500keV  W质量测量~1MeV；  基于ALR精确测量弱耦合角，精度大幅提高 |
| 束流能量标定 | | 每次丢束后需要~2小时重新建立极化，再开始对撞实验。对加速器可靠性要求极高 | 每次丢束后需要~2小时重新建立极化，再开始对撞实验。对加速器可靠性要求高 | 极化束产生和对撞环运行脱钩，相比方案1和2，可大幅提高积分亮度 | 极化束产生和对撞环运行脱钩，相比方案1和2，可大幅提高积分亮度 |
| Z能区纵向极化束对撞 | | 不支持 | 极化e-和非极化e+高亮度对撞 | 极化e-和非极化e+高亮度对撞 | 极化e-和极化e+高亮度对撞 |
| 相对前一方案的增加项及技术成熟度 | | 相对TDR的增项：  非对称3极头扭摆磁铁（成熟技术，BII运行过超导3-pole wiggler）；  储存环康普顿极化仪  （正在BII上做技术验证，CEPC的探测方式比BII复杂，需要探测器研发）；  共振退极化kicker  （参数和横向逐束团反馈kicker相似，成熟技术）；  共振退极化测量对定时、控制、束测等有新的需求  ，计划在BII做技术验证 | 相对方案1的增项：  极化电子源（成熟技术，正在PAPS直流高压电子枪做技术研制）；  增强器康普顿极化仪  （正在BII上做技术验证，CEPC的探测方式比BII复杂，需要探测器研发）；  电子环自旋旋转器  （EDR经费支持了基于YBCO线圈、传导冷却的12T超导螺旋管预研；需对CEPC做针对性设计及预研） | 相对方案2的增项：  正电子阻尼环新设计（1.1GeV提高到2GeV，采用成熟技术，对~2T二极铁，需要对常规磁铁方案和永磁铁方案进行详细比较、评估，VEPP-2000上使用2.3T的常规二极铁）、  正电子直线加速器及输运线做相应局部调整  （采用成熟技术） | 相对方案3的增项：  高性能极化正电子源（还需针对CEPC需求做方案探索研究，造价不好估计）；  正电子环自旋旋转器 |
| 相对TDR增加的关键硬件 | | 非对称3极头扭摆磁铁（10台/环，磁场0.6T/-0.15T，长度5m，100万/台，共计2000万） | 非对称3极头扭摆磁铁（10台/环，磁场0.6T/-0.15T，长度5m，100万/台，共计2000万） | 正电子阻尼环能量提升需~2T二极铁，其他硬件参数为常规要求（正电子极化产生总计约15000万） | 正电子源造价不好评估 |
| 康普顿极化仪（1台/环，测量横向极化度，分辨率 1% / 10 s，1000万/台，共计2000万） | 康普顿极化仪（主环共4台，2台测量单束团横向极化度，分辨率 1% / 10 s，1000万/台；2台测量对撞点附近的纵向极化度，分辨率1%/1s，1500万/台；增强器1台，测量多束团横向极化度，分辨率1%/1s，1500万/台，共计6500万） | 康普顿极化仪（主环共4台，2台测量单束团横向极化度，分辨率 1% / 10 s，1000万/台；2台测量对撞点附近的纵向极化度，分辨率1%/1s，1500万/台；增强器1台，测量多束团横向极化度，分辨率1%/1s，1500万/台；正电子阻尼环1台，测量单束团横向极化度，分辨率1%/1min，500万/台，共计700万） | 康普顿极化仪（主环共4台，2台测量单束团横向极化度，分辨率 1% / 10 s，1000万/台；4台测量对撞点附近的纵向极化度，分辨率1%/1s，1500万/台；增强器1台，测量多束团横向极化度，分辨率1%/1s，1500万/台；500万/台，共计9500万） |
| 共振退极化kicker（2台/环，参数要求类似于横向逐束团反馈kicker，100万/台，共计400万） | 共振退极化kicker（2台/环，100万/台，共计400万） | 共振退极化kicker（2台/环，100万/台，共计400万） | 共振退极化kicker（2台/环，100万/台，共计400万） |
| 极化电子源（2nC，100Hz，85%极化度，2000万） | 极化电子源（2nC，100Hz，85%极化度，2000万） | 极化电子源（2nC，100Hz，85%极化度，2000万） |
| 自旋旋转器4套，含  超导螺旋管磁体（32台，6T, 2.5m长，8000万元）； 低温系统（含低温恒温器、制冷机、低温管线等，27970万）；  自旋旋转器局部补偿常规磁铁及电源（64台，共2000万）；BPM （40个，共560万） | 自旋旋转器4套，含  超导螺旋管磁体（32台，6T, 2.5m长，8000万元）； 低温系统（含低温恒温器、低温制冷机、低温管线等，27970万）；  自旋旋转器局部补偿常规磁铁及电源（64台，共2000万元）；BPM （40个，共560万） | 自旋旋转器8套，含  超导螺旋管磁体（64台，6T, 2.5m长，16000万元）； 低温系统（含低温恒温器、制冷机、低温管线等，55940万）；  自旋旋转器局部补偿常规磁铁及电源（128台，共4000万元）；BPM （80个，共1120万） |
| 经费（万元） | | 4400 | 49430 | 63430 | 94460（不含极化正电子源） |
| 技术预研需求  （这里只列出了关键技术预研项目，未包括加速器物理方案的优化、工程设计方案的迭代以及对土建的影响） | | 非对称3极头扭摆磁铁  （相对成熟技术，BII运行过超导3-pole wiggler） | 非对称3极头扭摆磁铁  （相对成熟技术，BII运行过超导3-pole wiggler） | 2T 二极磁铁  （需比较常规电磁铁和永磁铁方案） | 2T 二极磁铁  （需比较常规电磁铁和永磁铁方案） |
| 康普顿极化仪（BEPCII实验，需对CEPC做针对性设计和探测器预研） | 康普顿极化仪（BEPCII实验，需对CEPC做针对性设计和探测器预研） | 康普顿极化仪（BEPCII实验，需对CEPC做针对性设计和探测器预研） | 康普顿极化仪（BEPCII实验，需对CEPC做针对性设计和探测器预研） |
| 共振退极化方法（BEPCII实验） | 共振退极化方法（BEPCII实验） | 共振退极化方法（BEPCII实验） | 共振退极化方法（BEPCII实验） |
| 自旋旋转器超导螺旋管及低温系统（EDR经费支持了基于YBCO线圈、传导冷却的12T超导螺旋管预研；需对CEPC做针对性设计及预研） | 自旋旋转器超导螺旋管及低温系统（EDR经费支持了基于YBCO线圈、传导冷却的12T超导螺旋管预研；需对CEPC做针对性设计及预研） | 自旋旋转器超导螺旋管及低温系统（EDR经费支持了基于YBCO线圈、传导冷却的12T超导螺旋管预研；需对CEPC做针对性设计及预研） |
| EDR阶段预研项目 | | 2025 | 2026 | 2027 | 长期目标 |
| 极化束物理设计 | | 方案1-3的第一版物理设计1 |  | 兼容方案1-3的第一版工程设计2 |  |
| 非对称3极头扭摆磁铁 | |  | 样机研制 | |  |
| 极化  电子源 | PAPS | 极化光阴极性能测试 | 极化电子束线设计方案及关键设计研制 | 极化电子束线出束 |  |
| CEPC | 第一版极化电子源束线方案设计 | |  | 面向BEPC/CEPC的极化电子源研发和测试 |
| 康普顿极化仪 | 原理验证 | BEPCII首次电子束垂直极化测量 | BEPCII上共振退极化能量标定实验验证 | | LPA-Ring光学谐振腔电子纵向极化测量 |
| CEPC |  | 对撞环和增强器中的康普顿极化仪方案设计  专用像素探测器研发 | |  |
| 自旋旋转器 | LPA-Ring |  |  | 12T超导螺线管自旋旋转器性能测试 | 纵向极化实验验证 |
| CEPC |  | 硬件方案初步设计 |  | 适用于CEPC的高场超导螺线管磁体及低温系统研发 |
| 技术研究内容 | | 说明 | | | 经费需求 |
| 非对称3极头扭摆磁铁 | | 用于对撞环自极化产生 | | | 100万元 |
| ~2T 二极磁铁 | | 用于正电子阻尼/预极化环中的自极化产生，电磁、永磁或者高温超导方案 | | | 200万元 |
| 150kV高压直流极化电子源 | | BEPCII和CEPC有同样的参数需求，研制后可以在BEPCII上进行束流测试，向储存环注入极化电子束，然后用于CEPC | | | 1000万元 |
| 康普顿极化仪 | | 硅像素探测器 （用于对背散射电子的探测，5mm \* 300 mm尺寸，<50um pitch ，基于CEPC探测器技术预研成果）  取样型量能器（用于对背散射光子的探测，测量纵向极化，可在BEPCII和LPA-Ring上进行束流测试）  光学谐振腔（提高康普顿极化仪事例率，计划先在LPA-Ring上技术验证，未来可应用于CEPC booster的极化测量） | | | 1000万元 |
| 超导螺线管自旋旋转器 | | 需要按CEPC的技术要求作针对性设计与预研： 高场超导磁体和低温系统（ LTS+低温恒温器，HTS+传导冷却？） | | | 还不明确 |

1 包括从极化束产生、传输到应用的完整设计，评估加速器的综合性能，给出对关键硬件的参数需求。

2 极化束应用所需硬件完成第一轮设计，并同物理方案进行迭代，基于此制定第一版工程设计方案。

若按照CEPC项目从2027年开工建设，考虑到目前的技术成熟度，建议首先开展方案1，将方案2及方案3作为升级方案。方案4所需的高极化度、高产额正电子源仍需长期的技术研发，可作为对方案3更长期的潜在升级。在优先考虑方案1的同时，应在加速器设计中保留升级到方案2、3的潜力，这要求优先完成兼容方案1-3的物理设计方案，特别是在对撞环中要预留自旋旋转器的位置。

**参考文献**

[1] The CEPC Study Group, CEPC Conceptual Design Report: Volume 2 - Physics & Detector, ArXiv:1811.10545 [Hep-Ex, Physics:Hep-Ph] (2018).

[2] Ya. S. Derbenev, A. M. Kondratenko, S. I. Serednyakov, A. N. Skrinsky, G. M. Tumaikin, and Y. M. Shatunov, Accurate calibration of the beam energy in a storage ring based on measurement of spin precession frequency of polarized particles, Part. Accel. **10**, 177 (1980).

[3] V. E. Blinov, E. B. Levichev, S. A. Nikitin, and I. B. Nikolaev, Resonant depolarization technique at VEPP-4M in Novosibirsk, Eur. Phys. J. Plus **137**, 717 (2022).

[4] L. Arnaudon et al., Accurate determination of the LEP beam energy by resonant depolarization, Z. Phys. C - Particles and Fields **66**, 45 (1995).

[5] R. Assmann, Calibration of centre-of-mass energies at LEP1 for precise measurements of Z properties, Eur. Phys. J. C **6**, 187 (1999).

[6] R. Assmann, Calibration of centre-of-mass energies at LEP 2 for a precise measurement of the W boson mass, Eur. Phys. J. C **39**, 253 (2005).

[7] 陈姗红, CEPC束流能量标定与极化测量研究, 博士论文, 中国科学院大学, 2023.

[8] S. H. Chen et al., A toy Monte Carlo simulation for the transverse polarization of high-energy electron beams, J. Inst. **17**, P08005 (2022).

[9] 夏文昊, CEPC 加速器极化束关键物理研究与设计, 博士论文, 中国科学院大学, 2022.

[10] W. Xia, Z. Duan, D. P. Barber, Y. Wang, B. Wang, and J. Gao, Evaluation of radiative depolarization in the future circular electron-positron collider, Physical Review Accelerators and Beams **26**, 091001 (2023).

[11] M. Martinez, R. Miquel, L. Rolandi, and R. Tenchini, Precision tests of the electroweak interaction at the *Z* pole, Rev. Mod. Phys. **71**, 575 (1999).

[12] Precision electroweak measurements on the Z resonance, Physics Reports **427**, 257 (2006).

[13] M. Woods, *The Polarized Electron Beam for the SLAC Linear Collider*, arXiv:hep-ex/9611006.

[14] The LEP Collaboration, ALEPH Collaboration, DELPHI Collaboration, L3 Collaboration, OPAL Collaboration, the LEP Electroweak Working Group, and the SLD Electroweak and Heavy Flavour Group, A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model, No. arXiv:hep-ex/0312023, 2004.

[15] X.-K. Wen, B. Yan, and Z. Yu, Single Transverse Spin Asymmetry as a New Probe of Standard-Model-Effective-Field-Theory Dipole Operators, PHYSICAL REVIEW LETTERS (2023).

[16] W. Xia, Z. Duan, J. Gao, and Y. Wang, Investigation of spin rotators in CEPC at the Z-pole, Radiat Detect Technol Methods **6**, 490 (2022).

[17] J. Gao, CEPC Technical Design Report: Accelerator, Radiation Detection Technology and Methods **8**, 1 (2024).

[18] A. Blondel, A SCHEME TO MEASURE THE POLARIZATION ASYMMETRY AT THE Z POLE IN LEP, PHYSICS LETTERS B **202**, (1988).

[19] G. Moortgat-Pick et al., Polarized positrons and electrons at the linear collider, Physics Reports **460**, 131 (2008).

[20] A. Blondel et al., Polarization and Centre-of-Mass Energy Calibration at FCC-Ee, No. arXiv:1909.12245 [physics:acc-ph], 2019.

[21] W. Xia, J. Gao, Y. Wang, and D. Wang, CEPC Z-pole polarization design studies, Int. J. Mod. Phys. A **36**, 2142003 (2021).

[22] J. Heron, *Availability and Luminosity in the Future Circular Electron-Positron Collider (FCC-Ee)*, https://indico.cern.ch/event/1298458/contributions/5976119/attachments/2874480/5033595/WEBN3\_talk\_print.pdf.

[23] 陈涛, CEPC增强器中束流极化保持的研究, 硕士论文, 中国科学院大学, 2023.

[24] T. Chen, Z. Duan, D. Ji, and D. Wang, Booster free from spin resonance for future 100-km-scale circular e+e- colliders, Physical Review Accelerators and Beams **26**, 051003 (2023).

[25] P. Musumeci et al., Positron Sources for Future High Energy Physics Colliders, ArXiv:2204.13245 [Physics] (2022).