

中国设计的未来环形对撞机

高 杰^{1,2} 李煜辉^{1,2} 于程辉¹

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 中国科学院大学 100049)

揭示宇宙及其演化的基本规律是人类的一项伟大事业。在粒子物理学领域,实现这一目标的最有效方法是通过强大的高能加速器。2012年7月,欧洲核子研究中心(CERN)发现了质量约为125 GeV的希格斯玻色子,为我们打开了一扇通往宇宙未知领域的大门。希格斯玻色子不仅是标准模型(SM)的核心,也是许多谜团的中心。这些谜团包括弱尺度和普朗克尺度之间的巨大能差、电弱相变的性质、质量的起源、自然性问题、真空的稳定性,以及标准模型之外有关自然的许多其他相关基本问题,如物质-反物质不对称的起源和暗物质的性质。

对希格斯玻色子性质的精确测量,是探索标准模型及其他基本物理原理的探针。为此,2012年9月,中国科学家提出了由中国来主持的作为国际性的大科学项目:环形电子-正电子对撞机(CEPC)和超级质子-质子对撞机(SppC),面向粒子物理的宏伟目标,并与直线对撞机和 μ 子对撞机互为补充。大约在同一阶段,欧洲核子研究中心(CERN)的物理学家们提出了正电子-电子(e^+e^-)和强子-强子未来环形对撞机(FCC)。

从那时起,全球高能物理界就将 e^+e^- 希格斯工

厂作为大型强子对撞机(LHC)之后的下一个对撞机的重要性达成了共识。在欧洲,2020年更新的欧洲粒子物理战略认为建造希格斯工厂具有最高优先级,而美国Snowmass2021领域规划研究和随后于2023年12月发布的P5报告也强调了海外希格斯工厂的重要性。CEPC的科学家也为上述两项战略研究作出了积极贡献。同时,日本在2012年提出了建造国际直线对撞机(ILC)希格斯工厂的建议,并于2017年提出了新的基线设计,即从250 GeV而不是500 GeV的对撞能量开始。在中国,于2013年和2016年召开的第464次和第572次香山科学会议的结论均认为“CEPC是国家发展以加速器为基础的高能物理计划的最佳途径和重大历史机遇”。2023年,在中国科学院的战略规划研究中,CEPC被评价为未来最重要的粒子加速器。在此之前,国际未来加速器委员会(ICFA)于2022年4月发表声明:“再次确认了希格斯工厂作为实现粒子物理科学目标重中之重的这一重要国际共识”,并表示支持世界各地的希格斯工厂提案。在2018年11月发表CEPC概念设计报告(CDR)5年后,CEPC加速器的技术设计报告(TDR)现已完成,该报告长达1000多



图1 未来环形对撞机示意图

页,是国际上第一个基于环形对撞机的希格斯工厂的技术设计报告。

CEPC是一个环形希格斯工厂,它由四个加速器组成:一个30 GeV的直线加速器、一个1.1 GeV的阻尼环、一个能量高达180 GeV的增强器,以及一个在四种不同能量模式下运行的对撞机,质心能量分别对应ZH产生(240 GeV)、Z极(91 GeV)、W+W-(160 GeV)和 $\bar{t}t$ (360 GeV)。这些加速器由10条传输线连接。直线加速器和阻尼环将建在地表,而增强器和对撞机将建在周长为100千米的地下环形隧道中,并为以后的强子对撞机SppC预留宽度空间。

1. 聚焦 CEPC

CEPC对撞机采用双环结构,电子束和正电子束在不同的束管中以相反的方向循环,并在将安装大型探测器的两个相互作用对撞点发生对撞。100千米周长的全能量CEPC增强器位于同一隧道中对撞机上方的隧道顶部,具有同步加速器的功能,其注入能量为30 GeV,引出能量等于束流对撞能量。为了保持恒定的亮度,将采用补充注入的方式。1.8千米长的直线加速器是增强器的注入器,利用S波段和C波段射频加速系统对电子和正电子进行加速,并配备一个阻尼环以减少正电子发射度。作为一种备选,极化束流方案也在研究之中。

CEPC的后续项目将是SppC,这是一个质子-质子对撞机,其对撞质心能量高达125 TeV。地下隧道将建在坚硬的岩石中,并将使用隧道掘进机或钻爆法进行挖掘,隧道宽度可在不拆除CEPC的情况下安装SppC。除了CEPC的 e^+e^- 和SppC的质子-质子和离子-离子对撞物理实验之外,这种独特的布局还为电子-质子和电子-离子对撞物理提供了令人兴奋的长期可能性。此外,CEPC还将配置两条伽马射线光束线,作为高能同步辐射光源运行,将可用的同步辐射频谱扩展到前所未有的能量(从100 keV到超过100 MeV)和亮度范围。作为注入器的30 GeV直线加速器还可以通过增加一个波荡器

产生高能X射线自由电子激光。

2. 目标计划

CEPC的物理目标和运行计划遵循“10-2-1-5”计划,即10年作为希格斯工厂,2年作为Z工厂,1年作为W工厂,并有可能在 $\bar{t}t$ 能量下再运行5年。四种对撞模式(对应于H、Z、WW和 $\bar{t}t$ 生产)的同步辐射功率基线为每束30兆瓦。CEPC还考虑通过将每束同步辐射功率提高50兆瓦来升级亮度,使240 GeV时的亮度达到 $8 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 。根据亮度升级计划,两个CEPC探测器将产生430万个希格斯玻色子、4.1万亿个Z玻色子、2.1亿个W玻色子和60万个 $\bar{t}t$ 对。

CEPC概念设计报告完成后,加速器进入了为期五年的TDR研究阶段,在此期间对设计进行了进一步优化。最终TDR报告于2023年12月25日发布,强调了最高亮度、H、Z、W和 $\bar{t}t$ 能量的覆盖范围,以及技术研发、土木工程设计、国际合作和工业参与的全部内容。

在磁聚焦结构采用了较小的发射度以提高亮度,动力学孔径(包括四种能量的各种误差)符合设计目标,束-束相互作用和集体效应已得到检验,在对撞点采用了直径为20厘米的中央铍管,对机器-探测器接口进行了优化。增强器采用了理论上最小发射率的磁铁聚焦设计,注入能量提高到30 GeV,引出能量高达180 GeV。

CEPC加速器的技术研发工作与高能所正在建造的第四代6 GeV高能光源项目(HEPS)协同进行。这些研发活动涵盖了对撞环和增强器磁体、对撞区超导四极铁、NEG涂层真空盒、超导低温模组、低温系统、连续波长高效速调管、磁体电源、机械、S波段和C波段直线加速器和正电子源、阻尼环、束测和反馈、控制系统、校准测量和准直安装、辐射防护和环境等方面。

举三个例子:首先,CEPC 1.3GHz 8×9 单元腔低温模组的品质因数/加速梯度达到 $3.4 \times 10^{10}/23 \text{ MVm}^{-1}$,超过了增强器的设计指标(见图3(a))。其

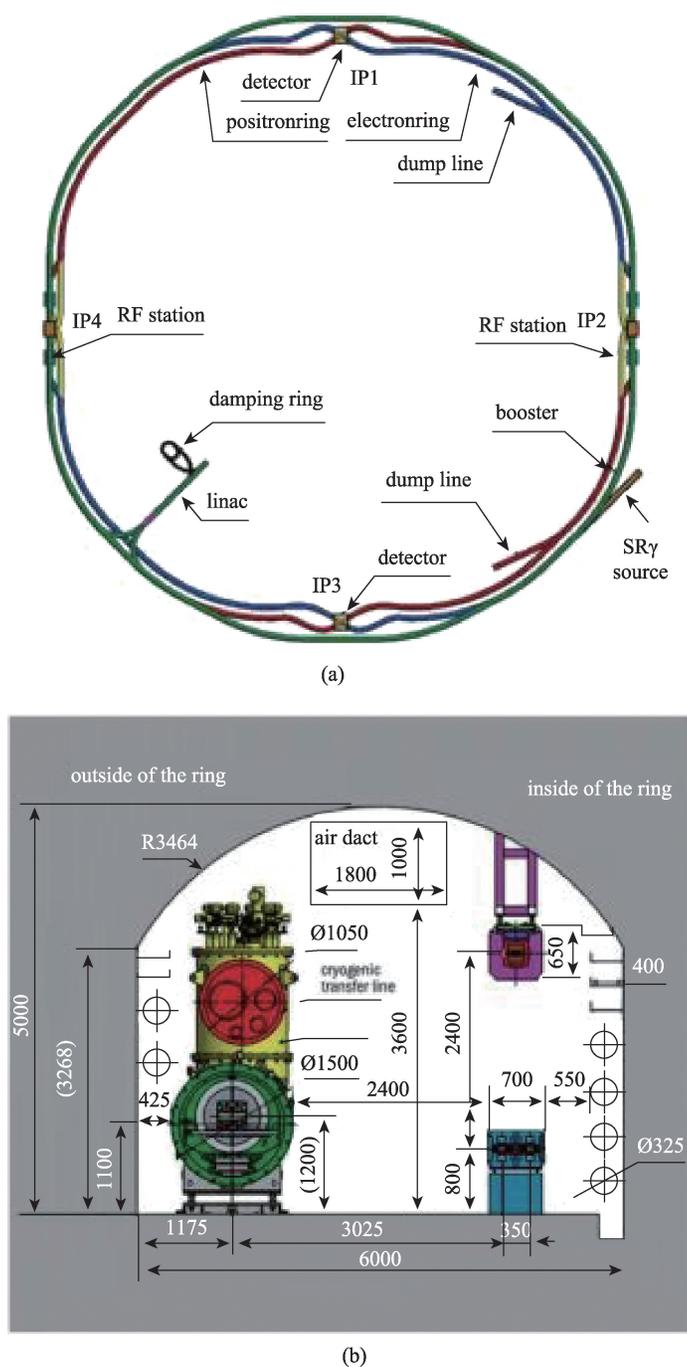


图2 进入地下: CEPC 布局(a)和采用钻爆法的隧道横截面(b), 显示外侧为 SppC 环和低温模块(绿色和红色), 内侧为 CEPC 增强器(紫色)和对撞机环(蓝色)(资料来源: 高能所)

次, CEPC 650 MHz 单腔在 2K 时经过电抛光处理达到 $2.3 \times 10^{10}/41.6 \text{ MVm}^{-1}$, 经过中温处理达到 $6.3 \times 10^{10}/31 \text{ MVm}^{-1}$ 。第三, 高能所研发了三台对撞环用 650 MHz/800 kW 连续波高效速调管, 其中第二台速调管(图 3(b))在脉冲模式下达到 849 kW 输出功

率, 效率达到 77.2%(在连续波模式下 800 kW 的效率设计值为 77%)。第三台是多束速调管, 设计效率目标是 80.5%, 其电子源目前正在进行测试。CEPC 加速器 TDR 所取得的成就也是通过大力推动 CEPC 产业促进联盟工业界参与和贡献的结果。

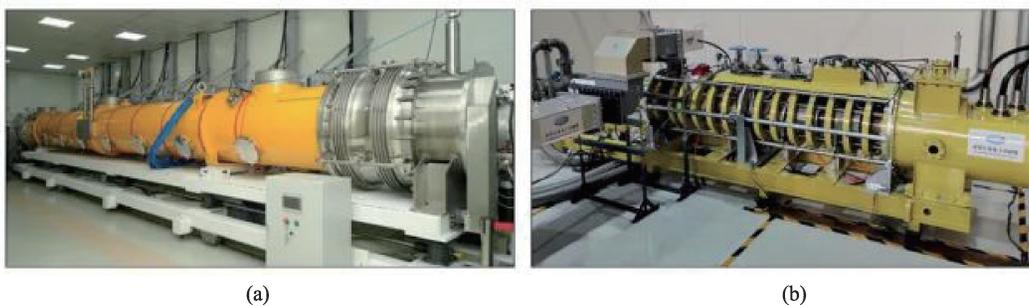


图3 CEPC技术:高能所研制并测试的1.3 GHz 8×9单元腔低温模组(a)和650 MHz 800 kW连续波长高效速调管(b)(资料来源:高能所)

3. 高能雄心

作为未来高能物理及其他领域战略技术研发的一部分,CEPC团队提出了另一种使束流能量从10 GeV到30 GeV的束流驱动等离子体注入器备选方案。为了研发和验证未来直线对撞机所需的等离子体加速器技术,如正电子加速、级联加速和高品质束流产生,高能所于2023年9月启动了中科院资助的等离子体加速实验计划(先导B),利用BEP-CII(亮度为 $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @1.89 GeV e^+e^- 对撞机)的注入器直线加速器作为部分实验设施,总经费达9千万元人民币。

SppC与CEPC相结合,不仅能提供前所未有的希格斯玻色子测量精度,还能探索新物理领域更大的区域,将我们对物理世界的理解推向新的高度。与希格斯粒子工厂相比,未来的强子对撞机成本更高,技术难度更大。在开始建设之前,必须充分解决高场(20 T或更高)超导磁体、低温环境中的同步



图4 增强器研发:CEPC增强器的全尺寸二极磁铁样机(资料来源:高能所)

辐射以及用于失超保护的精密束流准直系统等关键问题。

SppC将基于高温铁基超导体的高磁场磁体作为其主要技术发展途径。与目前使用的NbTi/Nb3Sn技术相比,该技术具有更高的磁场强度潜能(>30 T)和更低的成本,并在过去八年中与产业界合作共同取得了重大进展。2016年,制作了超过100米的铁基“7芯”超导导线,到2022年,在10T和4.2 K下的电流密度达到了 450 A/mm^2 。

假设SppC有两个对撞点,运行时间为20~30年,预计每个对撞点的峰值亮度为 $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,积分度约为 30 ab^{-1} 。为了进一步降低SppC和CEPC的能耗(在ZH能量下,同步辐射功率为每束30兆瓦,总能耗为262兆瓦),目前正在研究各种相应节能措施。

从2019年到2022年,国际加速器评审委员会对CEPC的加速器技术设计报告阶段预研工作进行了指导。2023年6月和9月,CEPC加速器TDR和成本国际评估在香港科技大学进行,土木工程成本于2023年6月由国内委员会评估。CEPC总造价预计为人民币364亿元(约合51.5亿美元),其中加速器、基础设施和实验分别占人民币190亿元、101亿元和40亿元。在所有CEPC候选地点中,秦皇岛、湖州和长沙三个候选地点已在TDR中进行了研究。

2023年10月底,CEPC国际顾问委员会(IAC)支持CEPC技术设计报告TDR国际评估的结论,即CEPC加速器团队已做好进入工程设计报告(EDR)阶段的充分准备。11月,CEPC-SppC的提案在国际未来加速器委员会(ICFA)在德国DESY召开的



图5 2023年12月25日正式发布CEPC加速器技术设计报告(高能所)

ICFA研讨会上报告,并宣告CEPC加速器TDR正式完成。

关于CEPC探测器的技术发展和现状,CEPC探测器团队已经开展了全方位的研发,包括顶点像素探测器、硅径迹探测器、时间投影室和漂移室、飞行时间探测器、量能器、高温超导螺线管磁铁和探测器机械设计等。这些研发工作还得益于BESIII过去的经验(特别是有关漂移室和超导磁体的经验)以及高亮度大型强子对撞机(HL-LHC)的ATLAS和CMS探测器升级(如硅带探测器和高粒度量能器)。CEPC探测器TDR参考设计始于2024年1月,并将在CEPC EDR阶段(2024年~2027年)内于2025年中期完成。

4. EDR和时间表

目标是在2025年左右将CEPC方案(包括加速器、探测器和工程设计)提交中国政府选择,希望在2027年左右开工建设,在2035年左右建成。加速器EDR初步计划已经制定,将于2024年由国际加速器审查委员会进行评估。

关于CEPC的进展,中国科学院正在规划第“十五”规划中的大科学工程,并于2022年成立了由

中科院院长担任主席的指导委员会。高能物理与核物理是中国科学院“十五五”规划中的八大领域之一,目前已遴选出九项建议,并通过了公开的评审。CEPC在各委员会(包括三个国内委员会和一个国际咨询委员会)评审中排名第一。最终报告已提交中国科学院审议。

CEPC一直被作为国际合作大科学项目,欢迎国际科学界和产业界的参与和合作。CEPC加速器TDR凝聚了数千名国内外科学家和工程师多年的努力和心血。这一设施将在世界高能物理界的未来发展计划中发挥重要作用,它将以前所未有的程度加深我们对物质、能量和宇宙的理解,同时促进广泛的研究与合作,探索技术前沿。

更多阅读

CEPC 研究团队,2018 arXiv:1809.00285 和 1811.10545.

CEPC 加速器研究团队,2019 arXiv:1901.03169 和 1901.03170.

CEPC 加速器研究团队,2022 arXiv:2203.09451 和 2205.08553.

CEPC 加速器研究团队,2023 arXiv:2312.14363.

(本文译自 CERN Courier Volume 64, Number 2, pp. 39-42, March/April 2024, 原文地址 <https://cds.cern.ch/record/2893513>)