

# CEPC-SppC 加速器

## ——从概念设计到技术设计

高 杰<sup>1,2</sup>

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

2012年7月4日欧洲核子研究中心(CERN)宣布在大型强子对撞机LHC上发现希格斯粒子,科学家经过50多年的搜索,粒子物理学终于进入了希格斯时代。由于希格斯能量为较低的125 GeV,因此,除了可以使用直线正负电子对撞机(例如ILC和CLIC)外,还可以采用环形电子正负对撞机产生希格斯粒子,并且后者具有更高的亮度及更多的对撞点,除了在功耗方面外,在技术难度及成本方面也具有明显优势。

2012年9月,中国科学家提出了在中国建造一台质心能量为240 GeV的环形电子正电子对撞机(Circular Electron Positron Collider, 简称CEPC),用于希格斯粒子及超出标准模型以外的粒子物理研

究。CEPC具有两个探测器位于周长为100千米的隧道中,是CERN大型强子对撞机的三倍多。隧道宽6米,未来可以在同一隧道中在不拆除CEPC的情况下安装一台超级质子-质子对撞机(SppC),远远超出LHC的能量潜力,开展能量前沿研究(图1)。

在2012年11月费米实验室举行ICFA希格斯工厂研讨会之后,欧洲核子研究中心还提出了一个类似的周长100千米的“未来环形对撞机(FCC)”。2013年6月12日至14日,第464届香山会议在北京举行,主题是研讨中国高能物理未来发展战略,其中共识之一就是作为继BEPcII之后在中国的下一个对撞机,环形电子正电子希格斯工厂(CEPC)和随后在同一条隧道中的超级质子-质子对撞机(SppC)

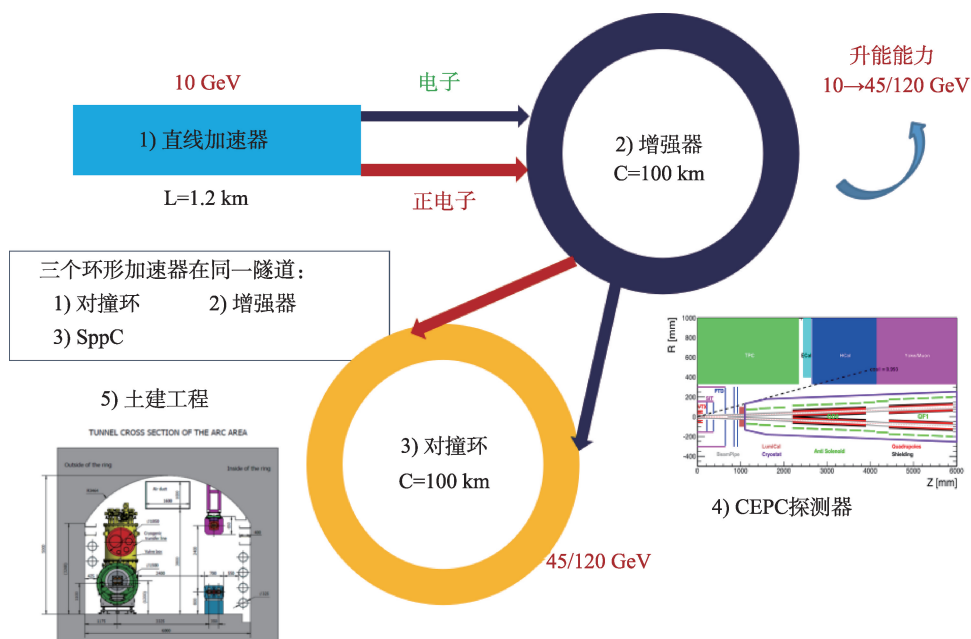


图1 CEPC-SppC隧道布局图

是一个历史机遇,也是未来高能物理实验的一个重要的选项,相应的R & D是必要的。国际未来加速器委员会(ICFA)分别于2014年2月和2014年7月连续两次发表声明,表示ICFA支持能量前沿环形对撞机研究并鼓励全球协调。在2016年4月于日本京都举行的亚洲高能物理委员会(AsiaHEP)及亚洲未来加速器委员会(ACFA)会议上,CEPC/SppC在AsiaHEP/ACFA的声明中得到了积极肯定。2016年9月12日在中国物理学会中国高能物理分会会议上,一份关于未来基于加速器的中国高能物理发展的声明中指出,CEPC是未来中国高能加速器项目的首选。2016年10月18日至19日在北京举行了会议主题为高能环形正负电子对撞机的第572届香山会议,会议得出的结论是:CEPC有充分的物理理由,在SppC中具有巨大的物理潜力。会议认为CEPC需要经过五年的前期研究,进行优化设计,关键技术预研和产业化准备工作,才能在CEPC于2022年左右开始建造并于2030年左右建成投入运行。CEPC将配备两个探测器,在希格斯能量下每个对撞点亮度最少为 $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,作为希格斯工厂运行10年,每个对撞点亮度至少 $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,以

累积一百万个希格斯和1亿个Z粒子。

根据第572届香山会议制定的CEPC路线图CEPC-SppC的预概念设计报告(Pre-CDR)已于在2015年3月完成,CEPC Pre-CDR设计基于单环的pretzel轨道方案,然而这个方案并不能满足设计亮度指标的要求。

自2015年以来,CEPC加速器团队系统地研究了基于中国科学家于2013年6月提出的crab-waist对撞局部双环(Partial Double Ring, PDR),2016年提出的先进局部双环(Advanced Partial Double Ring, APDR)方案以及全局部双环(Full Partial Double Ring)方案,比较了不同方案的亮度潜力(图2,图3)。

针对CEPC周长与束流辐射功率与亮度的关系问题也开展了深入的研究,并与CERN FCCee设计亮度进行了比较(图4)。

CEPC的国际咨询委员会(IAC)于2015年成立。2016年中国科学技术部CEPC第一期R&D预研项目立项。2016年11月的CEPC指导委员会根据CEPC研究结果,并结合SppC未来发展潜力,明确了CEPC-SppC相互关系,确定CEPC周长为100 km。2017年1月14日CEPC指导委员会批准了CEPC加

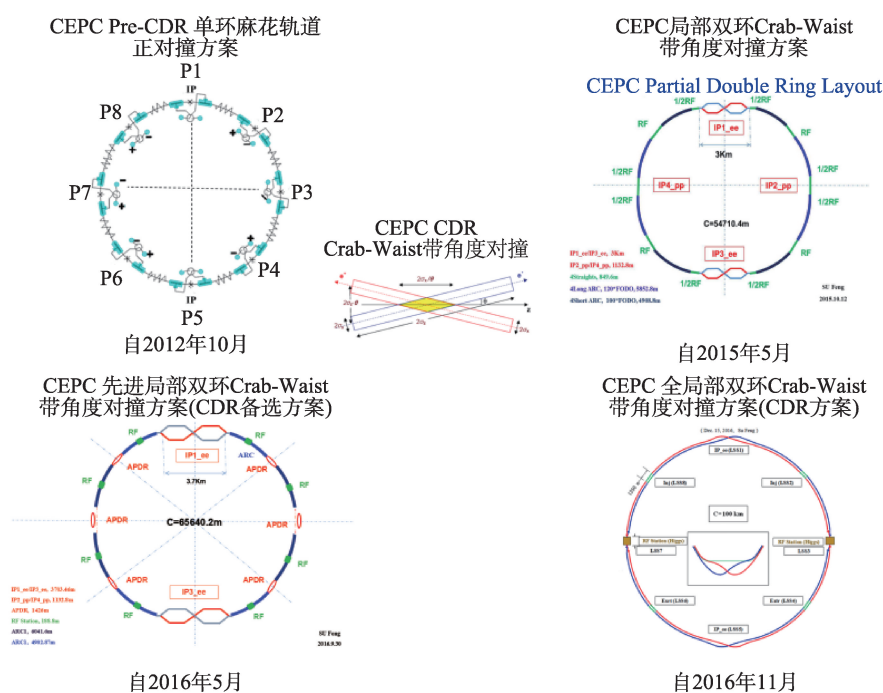


图2 CEPC四种方案比较

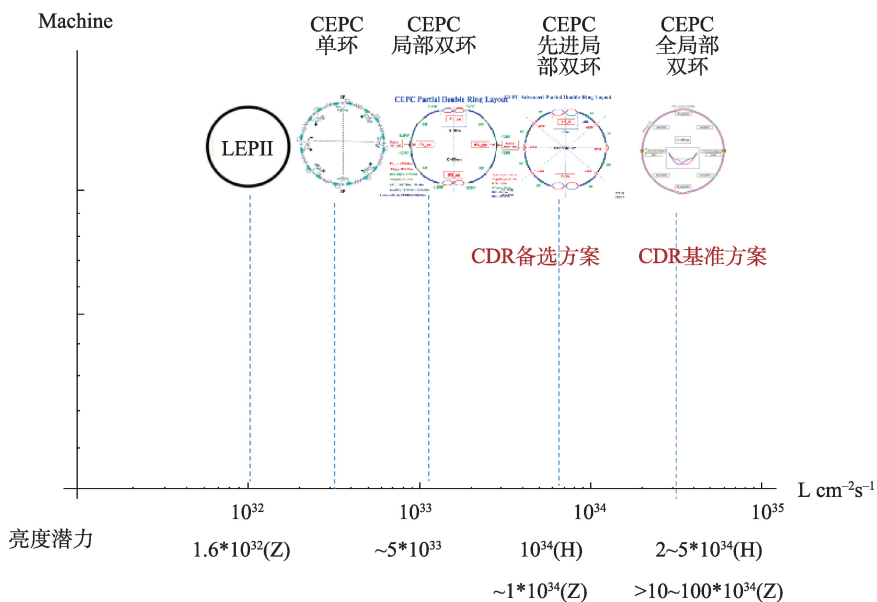


图3 CEPC四种方案亮度潜力

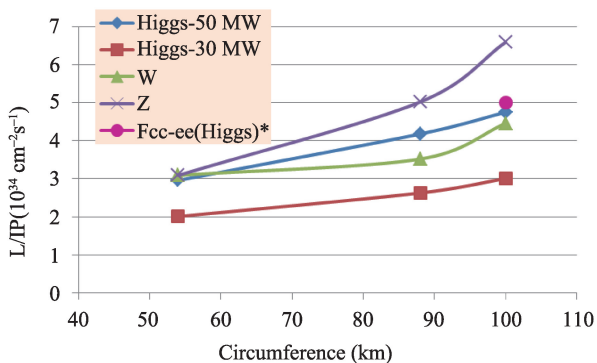


图4 CEPC不同周长及束流辐射功率与亮度的关系

速器团队提出的周长为 100 km 以全局部双环(FPDR)为基准方案,先进局部双环(APDR)为备选方案的建议。

CEPC 四个方案的设计过程及比较过程于 2017 年 4 月发表在 CEPC-SppC 进展报告中(IHEP-CEPC-DR-2017-01)。2018 年 6 月以 CEPC 基准设计方案(图 5)为主要设计目标的 CEPC 概念设计(CDR)通过国际评估。评估报告结论是:全体评审委员一致肯定 CEPC 设计工作中取得的令人瞩目的进展,并对概念设计报告的完成表示祝贺。全体评审委员认为,设计工作已经证明项目的基本可行并可以被批准进入技术设计报告(Technical Design Report, TDR)阶段。CEPC 加速器 CDR 于 2018 年 9 月 2 日发表在

2018:arXiv: 1809.00285。CEPC CDR 于 2018 年 11 月 14 日正式对外发布。2019 年 1 月 CEPC 正式进入技术设计报告(TDR)阶段。2019 年 5 月 CEPC 加速器报告提交欧洲高能物理战略会议进行讨论(CEPC accelerator: ArXiv: 1901.03169)。

## 一、CEPC 加速器 CDR 设计

CEPC CDR 设计思路如下:CEPC 优化在希格斯粒子能量,在不变硬件的情况下可以同时工作在 W(80 GeV)和 Z-Pole(45.5 GeV)能区。在高能量环形正负电子对撞机中,同步辐射的功率损耗是十分关键的“瓶颈”问题。为了降低 CEPC 运行功耗,CEPC CDR 提出了每束 30 MW 的同步辐射功率限制。CEPC 的布局如图 5 所示,CEPC 加速器注入链包括一台能量为 10 GeV 正负电子直线加速器和一台 1.1 GeV 正电子阻尼环,以及对撞机环在同一隧道中的、能将束流能量从 10 GeV 提升到 120 GeV 的增强器。

表 1 中显示了周长 100 km 的 CEPC CDR 参数表,其中加速器-探测器区域(MDI)参数为:对撞交叉角为 33 mrad 和最终聚焦磁铁离对撞点的距离  $L^*=2.2$  m。

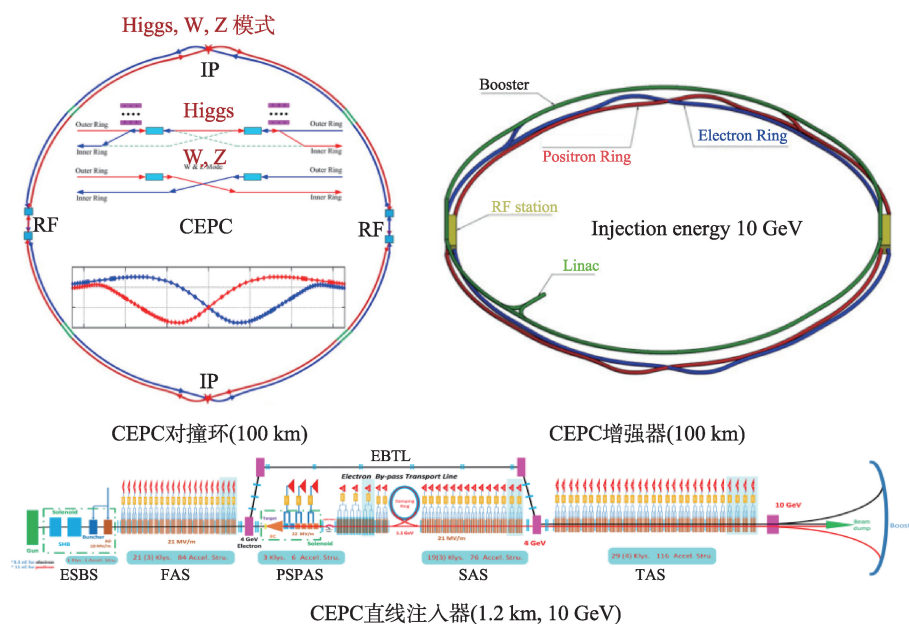


图5 CEPC基准设计方案

表1 CEPC CDR 参数表

	Higgs	W	Z (3T)	Z (2T)
对撞点个数		2		
能量(GeV)	120	80	45.5	
周长(km)	100			
同步辐射损失能量/圈(GeV)	1.73	0.34	0.036	
交叉角(mrad)	16.5 × 2			
单束团粒子数( $10^{10}$ )	15.0	12.0	8.0	
束流总流强(mA)	17.4	87.9	461.0	
单束同步辐射功率(MW)	30	30	16.5	
偏转半径(km)	10.7			
对撞点 $\beta$ 函数 $b_x^*/b_y^*$ (m)	0.36/0.0015	0.36/0.0015	0.2/0.0015	0.2/0.001
对撞点束团横向尺寸(mm)	20.9/0.06	13.9/0.049	6.0/0.078	6.0/0.04
高频腔压(GV)	2.17	0.47	0.10	
高频频率(MHz)(谐波)	650 (216816)			
束长(mm)	4.4	5.9	8.5	
寿命(hour)	0.43	1.4	4.6	2.5
亮度/对撞点 $L$ ( $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	2.93	10.1	16.6	32.1

CEPC对撞环由弧区,高频区,对撞区等三大部分组成,其中对撞区超导聚焦极铁、环中大量六极铁及束束相互作用所产生的非线性力对粒子的动力学孔径产生巨大限制,为了使动力学孔径满足对撞束流的亮度及寿命要求,必须对动力学孔径进行优化设计,并最终在考虑量子辐射激发,磁铁误差,轨道误差等因素影响下动力学孔径和能量接收度依然满足设计要求。

CEPC对撞环超导高频加速器系统CDR设计采用频率为650 MHz的2单元超导高频腔,加速梯度为20 MV/m,空载品质因数 $Q_0=1.5 \times 10^{10}$ 。6个工作在2 K温度下的2单元超导腔置于一个恒温器中。在希格斯能量下,共需要240只2单元超导腔。

CEPC对撞环的全能量注入由一台周长100 km的正负电子增强器提供,该增强器置于CEPC对撞环的上方的隧道顶部。CEPC增强器由于注入能量低(10 GeV)及半径大,因此增强器起步二极铁磁场强度仅为28高斯,这样的低场注入目前国际上还没有先例,对增强器二级磁铁设计加工制造都提出了很高的要求,非常具有挑战性。增强器超导高频加速系统采用1.3 GHz 9单元超导腔,并将8只9单元超导腔置于一个12 m长的恒温器中,其技术与国际直线对撞机基本相同。CEPC增强器需要96只加速梯度为20 MV/m的1.3 GHz 9单元超导腔。

CEPC正负电子注入器为一台S波段常温直线加速器,加速梯度为21 MV/m。正电子源由电子束流轰击钨靶产生高能伽玛射线衰变为正负电子对得以收集产生。由于正电子束流的发射度较大,因此需要通过一台能量为1.1 GeV的正电子阻尼环对正电子束流横向发射度进行阻尼衰减。

CEPC运行在Z-pole能量时可以通过正负电子横向自极化(5%~10%极化率)对撞来进行精确达 $10^{-6}$ 的能量标定。为了提高自极化速度,需要在对撞环中加装10台左右的特种扭摆磁铁。为了进一步实现Z-pole能量下的高极化度(>50%)水平极化



对撞以提高物理实验测量精度,需要在每个对撞点两边各加入一个极化旋转器,同时,由于正负点电子极化束流的产生来自直线加速器,需要经过增强器升能注入到对撞环,因此,为了使极化束流在升能期间不经过退化共振线,需要加装一对称为“西伯利亚蛇”的特种磁铁以保证注入到对撞环中的极化率不小于50%。

为了降低CEPC增强器低场二极磁铁的研制风险,CEPC加速器团队提出了采用等离子体加速的方法把10 GeV正负电子的能量提高到45 GeV。

## 二、CEPC 加速器 TDR 优化设计, 技术预研及产业化准备

自2018年11月CEPC CDR正式发布之后,CEPC也根据国际顾问委员会建议进入了技术报告TDR阶段。在这个阶段中需要继续优化CEPC设计提高不同能量下的对撞亮度并在关键部件方面推进样机研制。自CEPC CDR完成后,通过优化设计希格斯能量亮度可以在束流辐射功率30 MW亮度可以达到 $5.2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。2018年12月提出大晶粒高Q值( $3 \times 10^{10}$ )高梯度(40 MV/m)650 MHz单腔作为CEPC超导腔设想后,CEPC在Z-pole能区亮度可

以达到 $1 \times 10^{36} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。这些优化设计指标达到了国际领先水平,而且具有CEPC特色。图6中列举了部分关键硬件样机研制进展:1) CEPC对撞环650 MHz 2单元超导腔;2) 650 MHz大晶粒一单元超导腔;3) 电抛光EP设备;4) 对撞环双孔径二级磁铁;5) 对撞环双孔径四极磁铁;6) 650 MHz超导腔恒温器样机;7) 增强器铁芯高精度低场二极铁;8) 增强器空芯高精度低场二极铁;9) 电子环铝真空盒;10) 650 MHz高功率高效800 KW速调管;11) 增强器1.3 GHz 9单元超导腔。在TDR阶段,CEPC数字化BIM设计,协同设计电子文档,计算机优化仓储物流安装流程等研究工作也在相关企业和大学的合作中不断推进,设备产业化准备也在积极准备之中。

## 三、SppC 加速器设计

尽管SppC将于CEPC运行结束后才开始建造,但是由于SppC将于CEPC置于同一隧道中,今后还要保留电子质子对撞的可能性,因此,需要考虑SppC与CEPC之间的相互关系。另外,由于CEPC建设将在新址上建设,因此在选址时需要考虑SppC注入链加速器的相关位置,为未来的长远发展打下良好的基础。关于SppC CDR设计,其周长约为



图6 CEPC关键部件TDR预研进展

100 km,位于CEPC外侧,SppC在75 TeV的质心能量处提供质子质子对撞,亮度为 $1 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,这时需要场强为12 Tesla超导二极磁铁磁场强度。SppC二极超导磁铁采用高温铁基超导材料,用以降低SppC加速器造价。CEPC-SppC选择100 km周长的隧道为CEPC-SppC性能与技术变化提供了优化及发展空间。

#### 四、CEPC土建设计及部件安装

CEPC的施工建造面临多方面的前所未有的挑战。CEPC将是人类在地球上建造的规模最大复杂程度最高的科学实验装置,其周长100 km,置于地下100 m左右的岩石之中,隧道长,洞室结构复杂(图7),探测器大厅跨度大,部件数量多(图8),设备安装精度高,工期紧等,因此,CEPC无论从设计到施工安装都是一个协同性极高的系统工程。

#### 五、CEPC-SppC 选址

CEPC-SppC选址工作,需要考虑很多因素。地址技术指标大致可量化如下:地震强度小于7;地震加速度小于0.1g;1~100 Hz时地面振动幅度小于20 nm;花岗岩基岩深50~100 m。除了地址条件技术指标还要考虑选址地年平均气温,地下水,地面

水资源及电力资源等环境情况。除了自然环境,还要考虑社会与经济发展水平,交通条件以及当地政府支持力度。CEPC选址过程始于2015年2月,迄今已对六个选址地点进行了较为深入的研究(图9):1) 河北省秦皇岛;2) 陕西省延安地区;3) 广东省深汕特别合作区;4) 浙江省湖州;5) 吉林省长春;6) 湖南省长沙。

#### 六、CEPC 产业联盟 (CIPC) 及 CEPC 促进基金(CPF)

2017年11月7日CEPC产业促进会(CIPC)正式成立,目前已有70多家国内企业参与到CEPC-SppC相关的TDR关键技术R&D研究中,其中包括:速调管、超导腔、超导材料(超导腔及超导磁铁)、低温恒温器、制冷机、磁铁、真空、电子学、土建等领域,在CEPC土建、选址、数字化设计(BIM)等方面发挥了突出的作用。2019年11月17日由王贻芳院士发起并投入第一笔约350万元人民币(五十万美元)种子基金的CEPC促进基金(CPF)正式宣布成立。CPF的成立立即得到包括CIPC成员单位在内的单位与个人的积极响应和参与,今后CPF必将不断发展壮大,成为服务于CEPC预研,建设与运行的重要公益性基金。

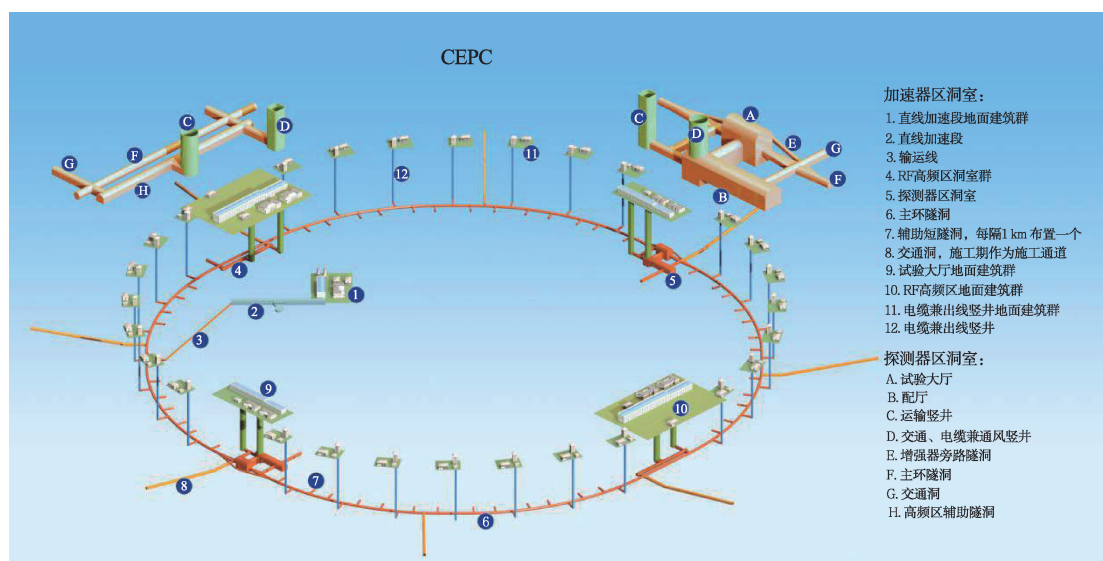


图7 CEPC洞室群

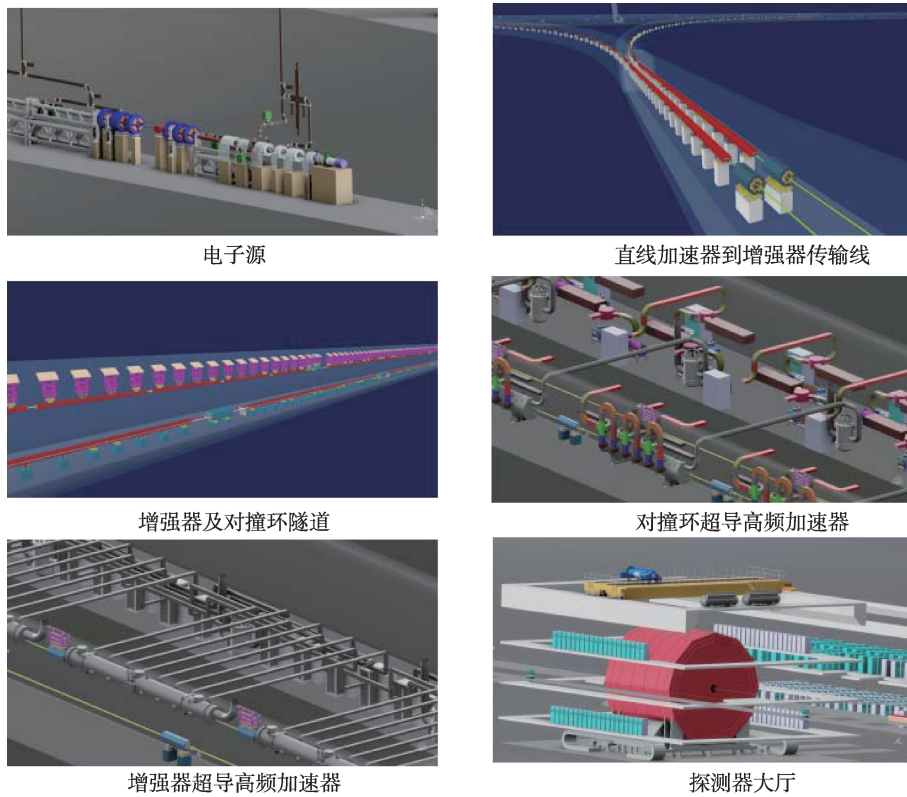


图8 CEPC设备安装数字化(BIM)设计

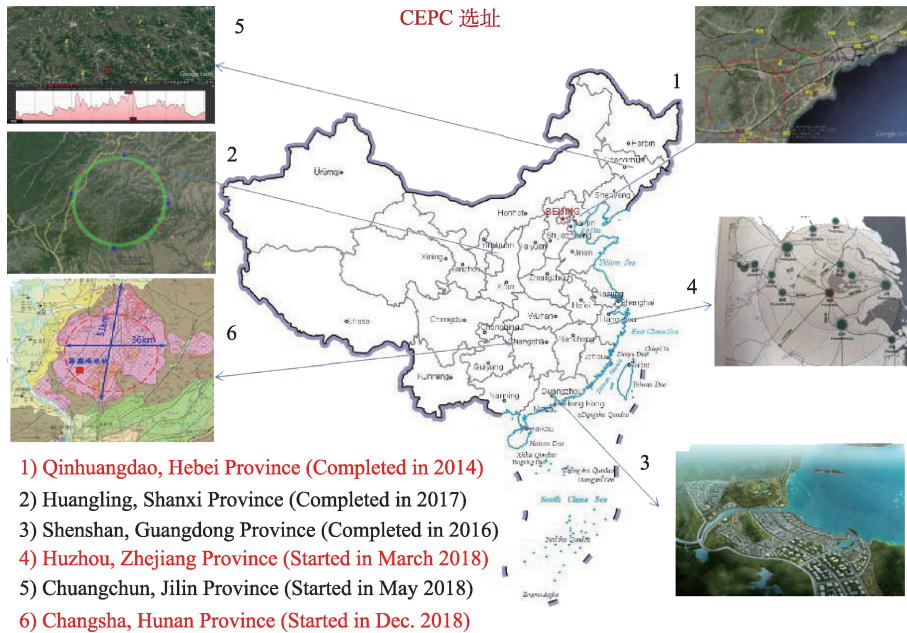


图9 CEPC选址地域分布图

## 七、CEPC 加速器国际合作

CEPC 加速器设计、预研、产业化、安装、调试、

运行等工作涉及面广,难度大,因此除了国内范围内的合作与协作外,还需要高水平的国际合作,通过国际合作解决相关问题,通过国际合作进行人才



培养,通过国际合作增加CEPC的国际参与度,通过国际合作提升CEPC的整体水平,例如与日本KEK的SuperKEKB,俄罗斯新西伯利亚BINP,俄罗斯杜布纳研究所(JINR),美国BNL实验室的eRICH等在先进环形正负电子对撞机设计和运行,及极化束流等方面开展了卓有成效的合作。目前CEPC与国际上20多个研究机构与大学签署了合作意向书(MoU),2019年11月成立了CEPC加速器国际评估委员会。

## 八、CEPC 加速器建造路线图及规划时间表

2019年5月欧洲高能物理战略规划研讨会在

西班牙格拉纳达召开,CEPC-SppC, FCC(ee, hh), ILC, CLIC等计划均向会议提交了报告。CEPC的路线图和时间表如图10所示。作为希格斯工厂的ILC250 GeV计划,日本政府将于2020年2月20日在美国SLAC召开的国际未来加速器委员会(ICFA)的直线对撞机理事会(LCB)上,给出是否有意承建ILC并开展下一步与相关国家政府协商分担建造经费的工作。欧洲也将在2020年2月给出欧洲是否将希格斯工厂作为战略首选,以及欧洲是否有意在欧洲建造或支持和参与在世界其他地区的希格斯工厂项目,CEPC与ILC均希望能够纳入欧洲高能物理发展战略规划之中。美国高能物理战略发展规划也将在2020年启动。因此,2020年将是世界高能物理发展的关键之年。

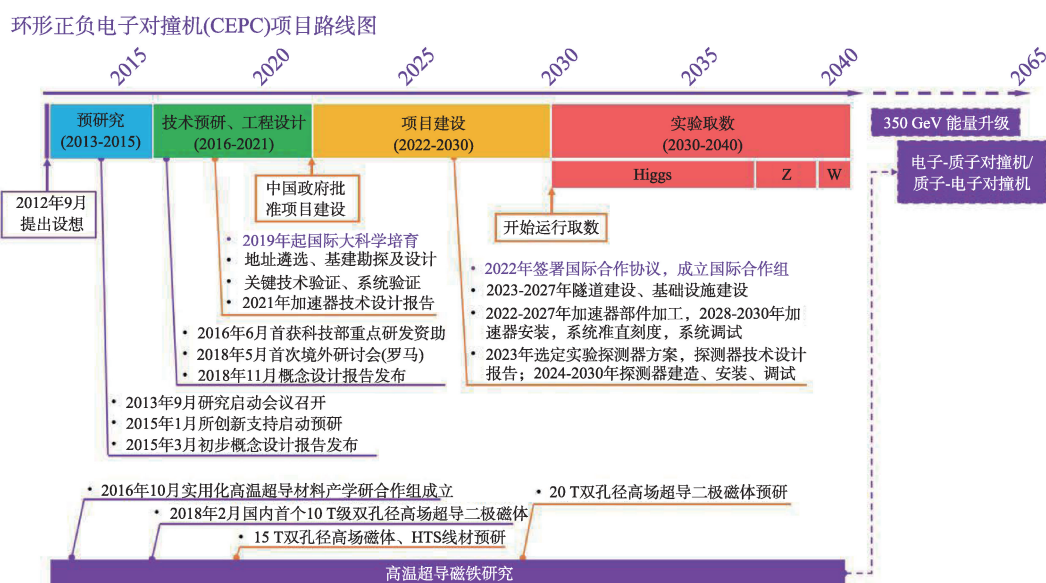


图10 CEPC项目战略图及规划时间表

### 致谢

本文作者感谢CEPC-SppC加速器团队成员,CIPAC成员单位,国内外合作单位及个人,CEPC机构委员会,CEPC指导委员会,CEPC国际顾问委员会及CEPC加速器评估委员会。科技部、中科院、自然科学基金委、王贻芳科学家工作室、中科院卓越中心等专项经费的支持。

### 参考文献

① 王贻芳,“建设大型加速器 实现中国梦”,现代物理知识,2014,26: 29-31

- ② CEPC-SppC Pre-CDR, IHEP-CEPC-DR-2015-0, <http://cepc.ihep.ac.cn/preCDR/volume.html>
- ③ CEPC-SppC Progress Report, IHEP-CEPC-DR-2017-01, <http://cepc.ihep.ac.cn/Progress%20Report.pdf>
- ④ CEPC Accelerator CDR, 2018:arXiv:1809.00285
- ⑤ CEPC accelerator to European Strategy Input: ArXiv: 1901.03169
- ⑥ 高杰,“关于CEPC采用亚毫米 $\beta\gamma$ 带角度对撞并保证对撞亮度的Lattice优化设计建议”,IHEP-AC-LC-Note 2013-012, June 16,2013
- ⑦ J. Gao, “The advanced partial double ring scheme for CEPC”, 2016 IHEP-AC-LC 2016-002
- ⑧ J. Gao, “Review of some important beam physics issues in electron



- positron collider design”, Modern Physics Letters A Vol. 30, No. 11 (2015) 1530006
- ⑨ D.Wang, et al., “Optimization parameter design of a circular e+e Higgs factory”, Chinese Physics C, Vol. 37, No. 9 (2013) 097003
- ⑩ J. Gao, “CEPC-SppC accelerator status towards CDR”, 2017 Int. J. Mod. Phys. A 32 1746003
- ⑪ Y. W. Wang, et al., “Lattice design for the CEPC double ring scheme”, International Journal of Modern Physics A Vol. 33, No. 2 (2018) 1840001
- ⑫ D. Wang, et al., “100 km CEPC parameters and lattice design”, 2017 Int. J. Mod. Phys. A 32 1746006
- ⑬ T.J. Bian, et al., “CEPC Booster Lattice Design Study”, 2017 Int. J. Mod. Phys. A 32 1746009
- ⑭ D. Wang, et al. “Design and beam dynamics of CEPC booster”, International Journal of Modern Physics A, September 29, 2019 16:41
- ⑮ S. Bai, et al., “Accelerator physics design in the interaction region for CEPC double ring scheme”, Int. J. Mod. Phys. A 34 1940002
- ⑯ F. Su, et al., “SPPC/CEPC Lattice Design and Beam Dynamics Study”, 2017 Int. J. Mod. Phys. A 32 1746005
- ⑰ D.J. Gong, “Beam-induced HOM power in CEPC collider ring cavity”, Radiation Detection Technology and Methods (2019) 3:18
- ⑱ H.J. Zheng, et al., “RF design of 650- MHz 2- cell cavity for CEPC”, NUCL SCI TECH (2019) 30:155
- ⑲ J. Gao, “China’s bid for a circular electron-positron collider”, CERN Courier, 2018, June 1
- ⑳ 王贻芳, “从BEPc到CEPC”, 现代物理知识, 2018年第5期
- ㉑ 高杰: 2018年, 亚洲希格斯玻色子工厂的里程碑之年, 科学通报, 2018, 63(21): 22102-2106

她用物理的情趣, 引我们科苑揽胜;  
她用知识的力量, 助我们奋起攀登!

欢迎投稿, 欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会, 由中国科学院高能物理研究所主办, 是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平, 欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn, 并将联系人姓名、详细地址、邮政编码, 以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用, 作者须将该论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有, 并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名), 如不接受此协议, 请在投稿时予以声明。来稿一经发表, 将一次性酌情付酬, 以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2020年《现代物理知识》每期定价10元, 全年6期60元, 欢迎新老读者订阅。

需要过去杂志的读者, 请按下列价格付款。

2010~2019年单行本每期10元; 2010~2015年合订本每本60元。

订阅方式

(1) 邮局订阅 邮发代号: 2-824。

(2) 编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号, 并在附言中说明“现代物理知识\*\*年\*\*期”)

名称: 中国科学院高能物理研究所

开户行: 工商银行北京永定路支行

账号: 0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部: 联系电话 010-64017032 64017539;

(4) 网上购买: 搜淘宝店、微店店铺名称: 中科期刊; 淘宝购买链接:

<https://item.taobao.com/item.htm?spm=a1z10.3-c.w4002-17748874504.9.3473bd0e1SdzHy&id=520828395681>

微店购买链接:

<https://weidian.com/item.html?itemID=2561726602>

或扫描下方二维码:



淘宝网购刊



微信购刊