



·粒子束及加速器技术·

环形正负电子对撞机注入引出 分布参数型冲击磁铁设计*

吴官健^{1,2}, 王磊^{1,2}, 王冠文², 史晓蕾², 翟心哲^{1,2}, 陈锦晖^{1,2}

(1. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049; 2. 中国科学院高能物理研究所加速器中心, 北京 100049)

摘要: 环形正负电子对撞机(CEPC)是一台周长 100 km, 最高能量为 120 GeV 的双环对撞机。为了满足不同能量粒子从增强器注入到对撞环, 针对 W 和 Z 能量模式设计了对撞环离轴注入系统, 用于实现束流的累积。为了提高注入效率, 兼容不同注入能量, 不同束流填充模式, 同时尽可能减少注入过程中冲击磁铁对其它束团的扰动, 要求对撞环离轴注入冲击磁铁系统是一个上升时间和下降时间小于 200 ns, 脉冲底宽调节范围为 440~2420 ns 的梯形波脉冲放电系统。和常见的集中参数型冲击磁铁相比, 分布参数型冲击磁铁具有更优越的动态响应特性, 适合产生一个前沿更加陡峭、波形更为理想的梯形波脉冲。根据 CEPC 的束流注入物理需求, 完成了一台分布参数型冲击磁铁的物理设计和结构设计, 并采用了 PSpice 和 Opera 程序进行模拟仿真。设计结果表明: 冲击磁铁由 26 级 LC 单元结构叠装而成, 磁铁总长为 1018 mm, 磁有效长度为 942 mm; 在 [-20, 20] mm 磁铁孔径内, 磁场强度为 0.042 T, 磁场均匀性优于 $\pm 0.2\%$; 冲击磁铁系统总上升时间(10%~90%)为 193 ns, 下降时间(90%~10%)为 191 ns。理论分析、PSpice 程序和 Opera 程序模拟均验证了磁铁设计方案的可行性。

关键词: CEPC; 注入引出; 离轴注入; 快脉冲冲击磁铁; 分布参数型冲击磁铁

中图分类号: TL503.3

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220364

Design of injection and extraction delay-line kicker magnet for circular electron-positron collider

Wu Guanjian^{1,2}, Wang Lei^{1,2}, Wang Guanwen², Shi Xiaolei², Zhai Xinzhe^{1,2}, Chen Jinhui^{1,2}

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Accelerator Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Circular electron-positron collider (CEPC) is a double ring collider with a circumference of 100 km and a maximum energy of 120 GeV. To meet the needs of different energy particles injected from the booster to the collision ring, an off-axis injection system of the collision ring is designed for the W and Z energy modes to realize the accumulation of beam. To improve the injection efficiency, also be compatible with different injection energy, and different beam filling modes, and at the same time reduce the disturbance of other bucket by the kicker magnet during the injection process as much as possible, the off-axis injection kicker magnet system of the collision ring is required to be a trapezoidal wave pulse discharge system with a rise time and falling time of less than 200 ns and a pulse bottom width adjustment range of 440–2420 ns. Compared with the common lumped-inductance kicker magnet, the delay-line kicker magnet has better dynamic response characteristics and is suitable for producing a trapezoidal pulse with steeper front and more ideal waveform. In this paper, according to the physical requirements of beam injection of CEPC, the physical design and structure design of a delay-line kicker magnet are completed, and the PSpice and Opera programs are used for simulation. The design results show that the delay-line kicker magnet is composed of 26 LC units superimposed. The total length of the kicker magnet is 1018 mm, and the magnetic effective length is 942 mm. In [-20, 20] mm magnet aperture, the magnetic field strength is 0.042 T, the magnetic field uniformity is better than $\pm 0.2\%$; the total rise time (10%–90%) of the kicker magnet system is 193 ns, and the fall time (90%–10%) is 191 ns.

* 收稿日期: 2022-10-29; 修订日期: 2023-02-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(11675194)
联系方式: 吴官健, wuguanjian@ihep.ac.cn。
通信作者: 陈锦晖, chenjh@ihep.ac.cn。

Theoretical analysis, PSpice program and Opera program simulation all verify the feasibility of the magnet design scheme.

Key words: circular electron-positron collider, injection and extraction, off-axis injection, fast kicker, delay-line kicker

环形正负电子对撞机(CEPC)是一台由中国高能物理学家们提出的、正在设计中的高能粒子加速器。CEPC包括一对周长为100 km的对撞环,一个等周长的增强器,一条直线加速器,一个阻尼环和两条输运线。从直线加速器到阻尼环,从输运线到增强器,从增强器再到对撞环,共包含有9个注入引出子系统。CEPC初步实验计划是分别在质心能量240、160、91 GeV处运行来研究Higgs玻色子、W玻色子和Z玻色子物理^[1],在三种不同模式下相应的机器参数不尽相同,对各个注入引出子系统的具体要求也不同。H能量模式下,机器的动力学孔径(DA)比较小,拟采用在轴置换注入方案(on-axis injection),W和Z能量模式下,则采用较为传统的离轴累积注入方案(off-axis injection)。本文重点关注的是离轴注入系统的冲击磁铁(kicker)系统。在离轴注入过程中,为了缩短注入时间,提高效率,束流是以束团串的填充方式均匀分布在增强器和对撞环里,每次注入过程同时完成一整串束团的累积,因此,注入冲击磁铁系统必须是一个梯形波脉冲放电系统。为了尽可能减少注入过程中冲击磁铁对其他束团的扰动,要求梯形波脉冲上升时间和下降时间应小于200 ns,可实现逐束团串的偏转;同时,为了兼容不同注入能量,不同束流填充模式,要求梯形波脉冲幅度和宽度可调,脉冲底宽调节范围为440~2420 ns。

常见的注入引出kicker有集中参数型冲击磁铁、分布参数型冲击磁铁和逆向行波冲击器。在典型的梯形波放电系统里,集中参数型冲击磁铁可看作是一个电感元件,动态响应特性差,不利于产生完美的脉冲波形;而分布参数型冲击磁铁和集中参数型冲击磁铁不同,它在放电系统里可看成是一段阻抗匹配的传输线,具有较好的动态特性,有利于产生完美的脉冲波形。逆向行波冲击器,例如strip-line kicker,是一种按照传输线理念设计而成的电磁装置,利用与束流逆向行进的电磁波来偏转束流,与分布参数冲击磁铁相比,具有更好的动态特性,非常适合产生一个矩形脉冲,然而这种kicker通常能提供的场强不高,实际应用中通常需要较长的直线节空间来安装多台磁铁才能获得足够的偏转量。因此,相较而言,分布参数型快脉冲冲击磁铁系统更适合于CEPC对撞环离轴注入系统。目前在国际上,欧洲核子研究中心(CERN)的LHC^[2]、SPS^[3],日本的KEK-PF^[4]和美国的TEVATRON^[5-6]均采用过类似的冲击磁铁。本文在依据此类磁铁设计经验的基础之上,提出了CEPC对撞环离轴注入分布参数型冲击磁铁样机的设计方案。并对样机所需达到的设计要求、设计方法以及计算机模拟计算分别做了相关阐述。

1 设计要求

CEPC对撞环离轴注入系统要求冲击磁铁系统能够同时满足在W、Z两种能量和不同填充模式下工作的需求,冲击磁铁系统梯形波脉冲上升时间和下降时间小于200 ns、脉冲底宽440~2420 ns可调,可实现对逐束团(串)的偏转,冲击磁铁设计的物理要求如表1所示。

表1 CEPC对撞环离轴注入冲击磁铁系统设计物理要求

Table 1 Physical requirements of CEPC off-axis injection kicker system

repetition rate/Hz	pulse width/ns	flat top/ns	rise (fall) time/ns	kick angle/mrad	integral field strength/(T·m)	beam pipe aperture
1000	440~2420 (adjustable)	0~1980 (adjustable)	<220	0.1	0.04	75 mm×56 mm

2 磁铁设计

典型的梯形波冲击磁铁系统如图1所示^[7],它由六大部分组成:充电电源、脉冲形成线(PFL)或脉冲形成网络(PFN)、高压大电流快速开关、脉冲传输线、冲击磁铁(kicker magnet)和终端匹配电阻。其基本工作原理如下:特性阻抗为 Z ,单程传输延迟时间为 τ_p 的脉冲形成线被充电到工作电压 V_n ,高压大电流快速开关(最为常见是重氢闸流管开关)导通,输出脉宽为 $2\tau_p$,幅度为 $V_n/2Z$ 的梯形电流脉冲,经传输线匹配传输,通过冲击磁铁,最后传输到终端匹配电阻并被终端电阻匹配吸收。脉冲电流在通过冲击磁铁时建立起脉冲磁场,整个过程就是梯形波产生和传输的过程^[8]。在系统中,冲击磁铁通常是一个电感元件,在波的传输过程中构成一个障碍点,是影响脉冲磁场波形前、后沿及波形规整性的重要因素。

为了获得较好的梯形波脉冲响应,分布参数型冲击磁铁将冲击磁铁(一个大的电感元件)做成与系统匹配的仿

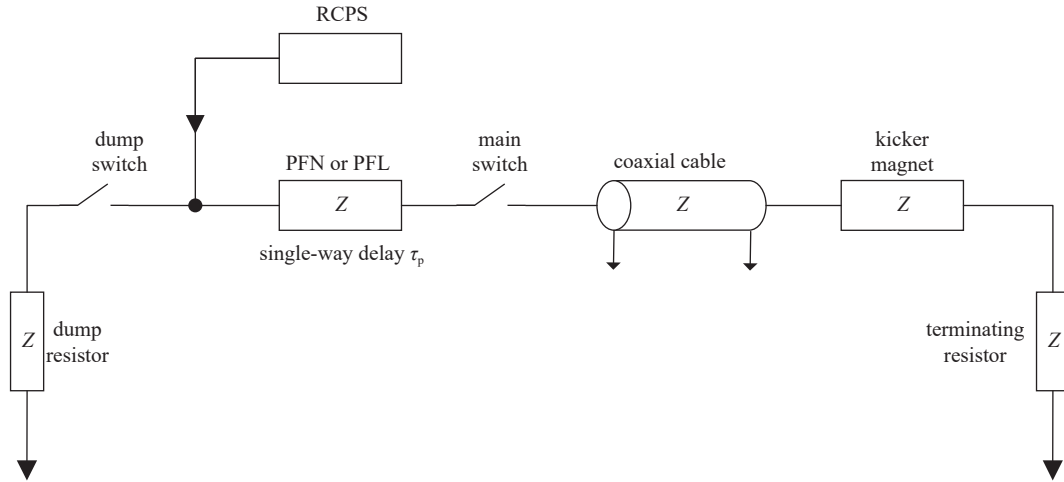


Fig. 1 Trapezoidal wave kicker system

图1 梯形波冲击磁铁系统

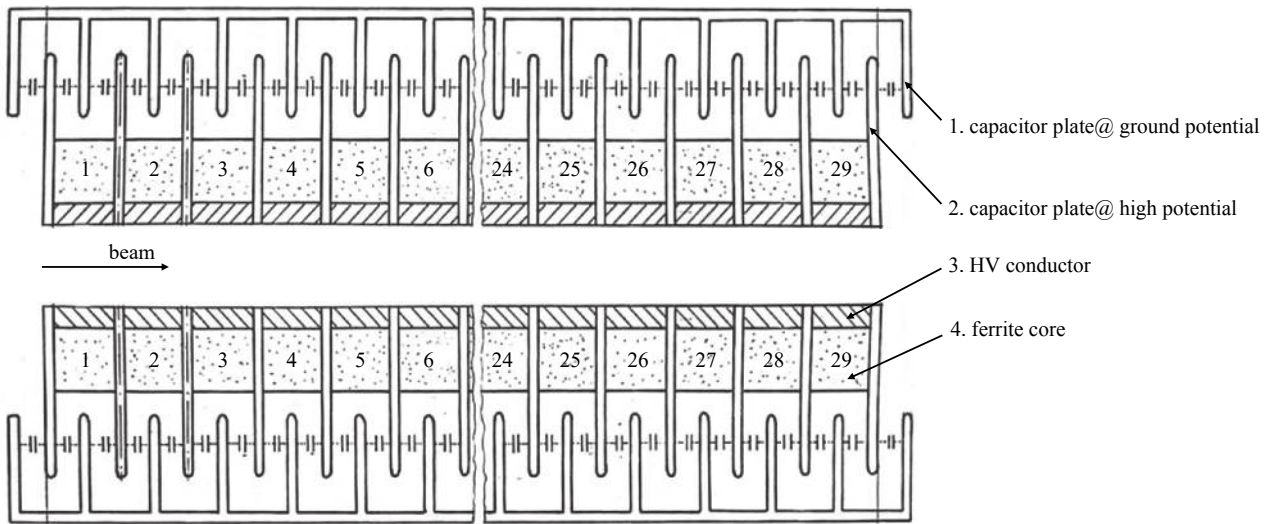


Fig. 2 Delay-line kicker base unit

图2 分布参数型冲击磁铁基本单元

真线形式。其基本单元示意图如图2所示，①为地电位电容极板，②为高电位电容极板，③为励磁导体，④为铁氧体铁芯，若干段励磁导体等距排布，每段之间夹一块高电位电容极板，与励磁导体相接；两块高电位电容极板之间插入地电位电容极板，与地电位相接，高、地电位极板间有10~12 mm的绝缘间隙。不难看出，这样的结构就组成了仿真线。如图3所示，其等效电路是若干节相同的LC型网络(L 电感, C 电容)，每节LC网络都与磁铁的一个单元相对应。每节的电感量 L_c 取决于磁铁孔径的形状、尺寸和磁性材料的性质，高、地电位极板和中间介质组成每节两端的电容器，其电容值 C_c 的大小取决于高、地电位极板的重叠面积、距离和介质的性质。分布参数型冲击磁

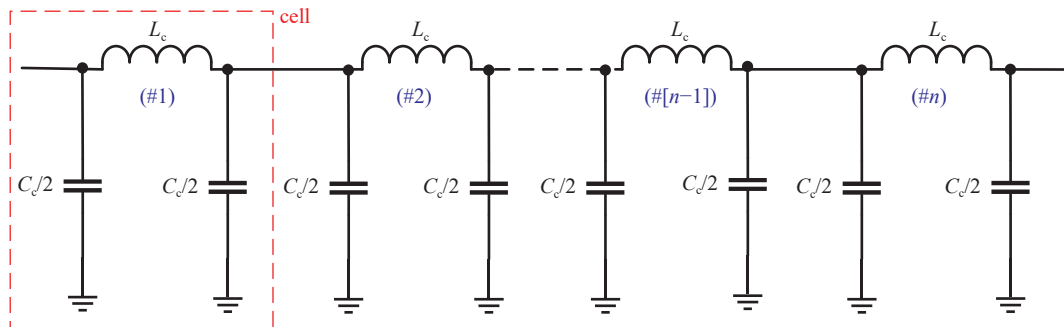


Fig. 3 Simplified equivalent electric circuit of a delay-line kicker

图3 分布参数型冲击磁铁简化等效电路

铁的特性阻抗 $Z = \sqrt{L_c/C_c}$, 与脉冲形成网络的特性阻抗相等, 脉冲磁场上升时间 $t_r = L/Z$, 其中 L 为磁铁总电感。 t_r 在数值上是集中电感匹配放电型的 2/3, 集中电感短路放电型的 1/3^[7]。

为了降低磁铁工艺设计的难度, CEPC 分布参数冲击磁铁拟采用真空外磁铁设计。分布参数型冲击磁铁采用一根截面为跑道形的镀膜陶瓷真空盒作为束流管道, 如图 4 所示, 由于分布参数型冲击磁铁磁场为 ns 级的快脉冲磁场, 如果使用普通的金属真空盒, 涡流屏蔽作用会导致真空盒内部的磁场被屏蔽掉, 因此采用 99% 高纯度氧化铝材料(99 瓷)制作的陶瓷真空盒, 99 瓷材料更加致密, 耐磨性和真空性能好, 耐高温, 机械强度高。陶瓷真空盒内壁镀有特定图案的 TiN 膜^[9], 能够为镜像电流提供通路, 减小束流尾场和铁氧体铁芯的耦合, 同时能降低二次电子发射。陶瓷真空盒横截面为跑道形, 如图 5 所示, 相比于另外两种结构的真空盒, 跑道形的真空盒具有强度高、变形小、有利于镀膜厚度均匀性控制的综合优势。

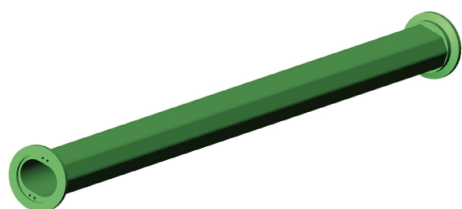


Fig. 4 Ceramic vacuum chamber

图 4 陶瓷真空盒

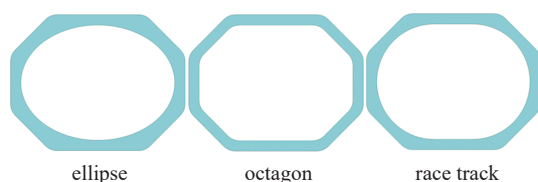


Fig. 5 Cross section of ceramic vacuum chamber

图 5 陶瓷真空盒横截面

分布参数型冲击磁铁铁芯为双 C 型窗框结构, 如图 6 所示, 它由两组对称的 C 型铁氧体组成, 拼接处由铜板隔开。由于完整的 C 型铁氧体块烧制难度大、加工周期长且成本高, 采用三片铁氧体(上下两片, 中间夹一片)组成一段 C 型铁芯的方案。为了提高励磁效率, 使用镍锌铁氧体材料做铁芯, 其参数如表 2 所示, 这种材料具有较好的高频特性, 在高频下仍有较高的磁导率和饱和磁感应强度。它的剩磁、矫顽力和损耗低, 并且可以通过机加工的方式获得好的极面形状, 非常适合快脉冲冲击磁铁使用^[10-11]。冲击磁铁的励磁导体采用铜板作为单匝线圈, 电容极板采用铝合金板制成, 其表面需要较好的光洁度, 支撑均采用强度性能与绝缘性能良好的 Al_2O_3 高铝瓷柱, 整体结构如图 7 所示。

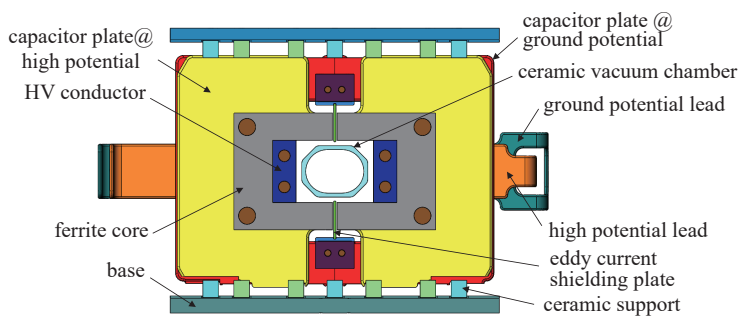


Fig. 6 Cross section of designed kicker

图 6 冲击磁铁横截面

表 2 镍锌铁氧体性能参数

Table 2 Performance parameters of Ni-Zn ferrite

initial permeability	saturation flux density/mT	residual flux density/mT	coercive force/(A·m ⁻¹)	density/(g·cm ⁻³)	Curie temperature/°C
2100	330	130	9.5	5.27	130

CEPC 冲击磁铁系统要求脉冲重复频率高达 1 kHz, 上升下降时间小于 200 ns, 因此将采用固态脉冲电源技术。这里调研了两种典型的电源固态开关 IGBT 和 MOSFET 的相关参数, 如表 3 所示, 其上升下降时间最大值为 60 ns, 因此在磁铁设计时将电源脉冲的上升时间 t_r 预留 80 ns, 故冲击磁铁建立磁场的上升下降时间(也就是填充时间 filling time)应在 120 ns 以内。

至此, 分布参数型冲击磁铁物理设计要求积分磁场强度为 0.04 T·m, 磁铁上升(下降)时间小于 120 ns, 束流孔径为 75 mm×56 mm, 陶瓷真空盒外径为 85 mm×66 mm, 磁铁孔径为 100 mm×80 mm。

冲击磁铁的电感预估公式可以由^[12]

$$L = N^2 \mu_0 \omega l / h \quad (1)$$

式中： N 为线圈匝数； μ_0 为磁导率； ω 为磁铁极面宽度； h 为磁铁高度间隙； l 为磁铁有效长度。

根据镍锌铁氧体的磁性能参数和相关工程经验，可设定使用镍锌铁氧体作为铁芯的冲击磁铁磁场强度 B 为 0.042 T，冲击磁铁的有效长度估算为

$$l = K / B \quad (2)$$

式中： K 为积分场强； B 为磁铁磁场强度。

由式(1)~(2)，可以确定冲击磁铁的总电感。

由于磁铁脉冲磁场上升时间 $t_r = L/Z$ ，且根据设计要求， $t_r \leq 120$ ns，可以得到冲击磁铁特性阻抗范围，即

$$Z \geq L / t_r \quad (3)$$

式中： $t_r = 120$ ns。

由公式(3)可以确定冲击磁铁的特性阻抗范围为不小于 12 Ω 。由于传输线通常采用多根 50 Ω 的线缆并联而成，冲击磁铁的特性阻抗要与之相匹配，故其特性阻抗在数值上应当能整除 50。此外，特性阻抗越大意味着磁铁所需供电电压越高，这会增加整个冲击磁铁系统的设计难度和成本，通常分布参数型冲击磁铁的特性阻抗 ≤ 25 Ω ^[13-14]。综上所述，确定冲击磁铁的特性阻抗为 12.5 Ω 。

要获得一个平滑的没有振荡的脉冲响应磁场^[15]，截止频率 f_{0c} 和脉冲电源的上升时间 t_g 的乘积必须满足

$$f_{0c} t_g \geq 3 \dots 5 \quad (4)$$

截止频率 f_{0c} 与单元电感 L_c 的关系为

$$f_{0c} = Z / \pi L_c \quad (5)$$

由式(4)~(5)可以确定磁铁单元电感 $L_c \leq 64$ nH，以此为依据，综合考虑绝缘强度、支撑强度等多方面因素对基础磁铁单元进行设计，导体轴向长度为 30 mm，高、地电容极板厚度为 6 mm，高、地电容极板间距为 12 mm，单元轴向长度为 36 mm，单元级数为 26 级。

冲击磁铁的单元电容为

$$C_c = L_c^2 / Z \quad (6)$$

从整体结构来看，正高压电极板与负高压电极板是串联方式，故总电容是单侧电容的一半，即单侧单元电容应为 $2C_c$ 。在磁铁单侧单元电容确定的基础上，对决定其数值的高、地电位电容极板和极板间介质进行设计。由于高、地电位电容极板间距已经确定，且考虑到磁铁为真空外设计即极板间介质设为空气，所以此处主要需要对高、地电位电容极板间的重叠面积进行设计。综合考虑磁铁内部铁芯和外部支撑结构的尺寸，高、地电位电容极板间的重叠面积设计尺寸如图 8 所示，其单侧电容值为

$$C_{c1} = 2\epsilon S / d + \delta_0 P \quad (7)$$

式中： ϵ 为介电常数， S 为极板间重叠面积， d 为极板间间距， δ_0 为修正系数， P 为电容极板的周边长度。

计算得到 C_{c1} 在数值上等于 $2C_c$ ，即设计的高、地电位电容极板形成的电容能够满足要求。在此基础上，我们参考日本 KEK-PF 的工程实践经验，改用耐高压陶瓷作为电容极板间的绝缘介质，如图 9 所示，形成高压电容极板-陶瓷-地电位电容极板的三明治结构。该设计不仅能够满足单元电容设计的需要，还能够增加电容极板间的耐压强度和电容极板机械强度，缩小样机的整体尺寸。设计改进后的电容极板间的重叠面积设计尺寸如图 10 所示，极板面积可减小至原先的 1/6，经计算验证电容值满足 $2C_c$ 的设计要求。

冲击磁铁的励磁电流峰值预估公式为^[16]

$$I = Bh / \mu_0 \quad (8)$$

由公式可以估算出冲击磁铁的最大励磁电流为 2703 A。经过设计得到磁铁的各项参数：磁铁孔径为 100 mm × 80 mm，单元轴向长度为 36 mm，单元级数为 26 级，特性阻抗为 12.5 Ω ，磁铁有效长度为 942 mm，单元电感为 56.6 nH，

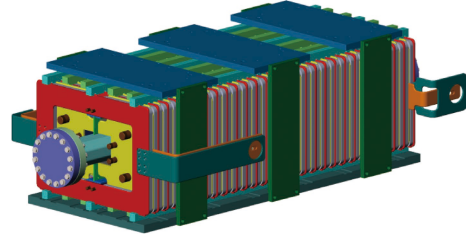


Fig. 7 3D model of designed kicker

图 7 冲击磁铁三维模型

表 3 典型的 MOSFET 和 IGBT 开关参数

Table 3 Typical MOSFET and IGBT switching parameters

type	V_{br}/V	$T_d(\text{on})/\text{ns}$	T_r/ns	$T_d(\text{off})/\text{ns}$	T_f/ns
MOSFET	1700	65	20	48	18
IGBT	1200	10	60	530	30

磁铁总电感为 1471.6 nH, 单元电容为 362 pF, 磁铁总电容为 9.412 nF, 磁场强度为 0.0425 T, 电流为 2703 A, 电压为 33791 V。

3 磁铁的仿真分析

设计使用 Opera 2D 程序对冲击磁铁进行了模拟, 计算磁场空间分布特性。图 11 是用 Opera 2D 建立的二维磁铁模型, ①和②为铁氧体铁芯, ③和④为励磁导体, 采用差模激励, 上下两个薄板为涡流屏蔽板。图 12 是沿磁铁中心 x 轴方向的磁场分布, 放大 x 轴方向 [-20, 20] mm 区间磁场分布如图 13 所示。模拟结果显示, 在注入束区间 [-20, 20] mm 范围内, 磁场强度为 0.0420~0.0421 T, 略低于设计磁场的 0.0425 T, 误差约为 1%, 在实际使用中可略微提高励磁电流来获得预期磁场强度; 注入区磁场均匀性优于±0.2%, 磁场空间分布平坦度好, 满足设计要求。

为了计算磁场的时间分布特性, 采用 PSpice 程序对冲击磁铁进行了模拟。图 14 是用 PSpice 程序建立的磁铁

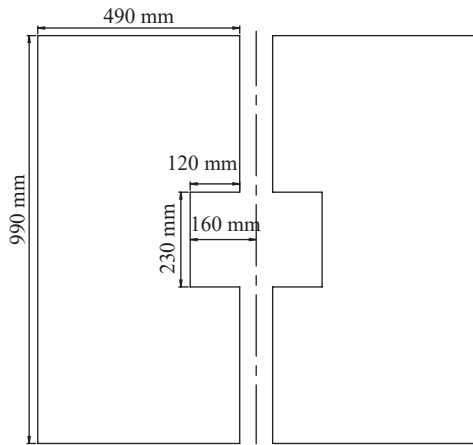


Fig. 8 Overlapping area of capacitor plates (air as medium)
图 8 电容极板重叠面积(空气作为介质)

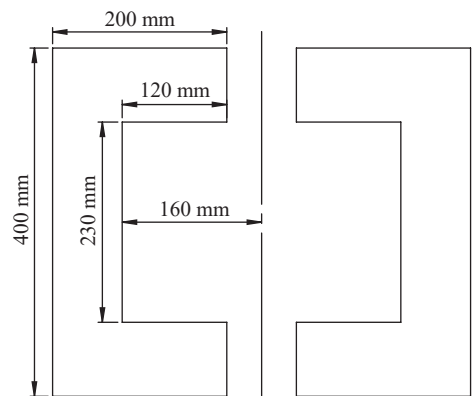


Fig. 10 Overlapping area of capacitor plates (ceramic as medium)
图 10 电容极板重叠面积(陶瓷作为介质)

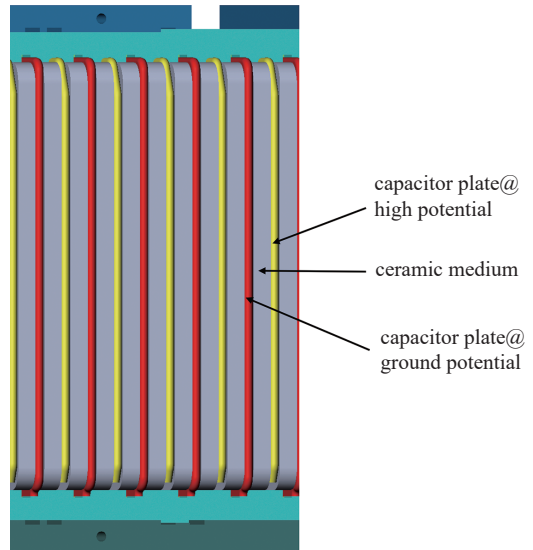


Fig. 9 Sandwich capacitor structure
图 9 三明治电容结构

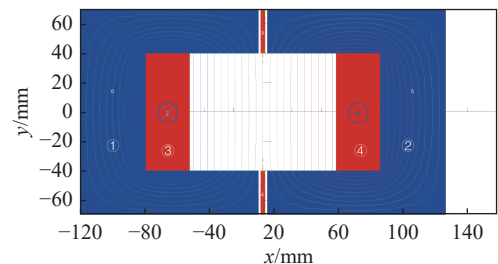


Fig. 11 Opera 2D model of delay-line kicker
图 11 分布参数型冲击磁铁 Opera 2D 模型

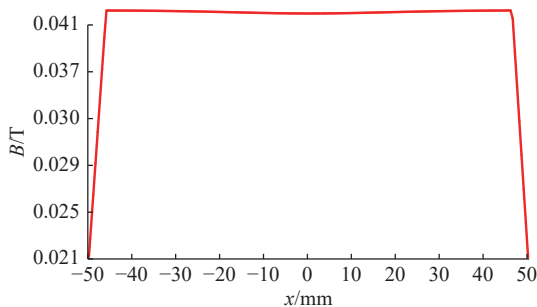


Fig. 12 Magnetic field distribution along x-axis
图 12 x 轴向磁场分布

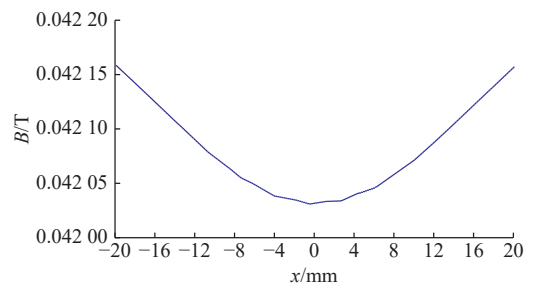


Fig. 13 Magnetic field distribution of central region
图 13 中心区域磁场分布

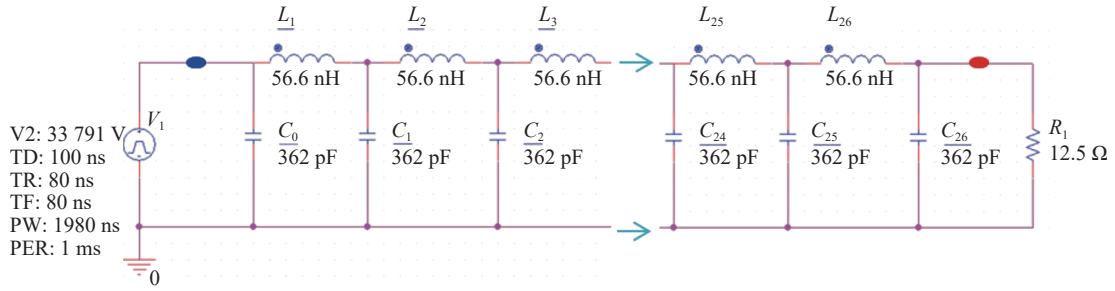


Fig. 14 Electric circuit model of delay-line kicker system

图 14 分布参数型冲击磁铁系统电路模型

电路模型, 该模型依据图 1 的梯形波冲击磁铁系统结构进行建立: V_1 是理想的脉冲电压源, 其输出电压 V_2 数值上为磁铁所需电压, 前文提到采用固态开关作为主开关, 为其预留 80 ns 的上升下降时间, 设置为前后沿 TR 和 TF; 中间部分 $L_1 \sim L_{26}$ 和 $C_0 \sim C_{26}$ 为冲击磁铁的等效电路模型, R_1 为终端电阻, 其特性阻抗与电路相匹配。我们在 V_1 电压源之后和终端电阻之前各放置一个电压测试点, 测得脉冲源输出的电压信号和传递至最后一级磁铁上的电压信号。磁场的时间分布特性模拟结果如图 15 所示, pulser 指向为脉冲发生源的时间分布, delay-line kicker 指向为末端磁场脉冲的时间分布, 二者之间的延迟时间实际上是脉冲信号在磁铁前 25 级单元传递的过程。脉冲发生源产生的脉冲信号经过冲击磁铁单元的逐级传导后, 前后沿变缓, 冲击磁铁系统总上升时间(10%~90%)为 193 ns, 下降时间(90%~10%)为 191 ns, 均在 200 ns 以内, 验证满足设计的要求。

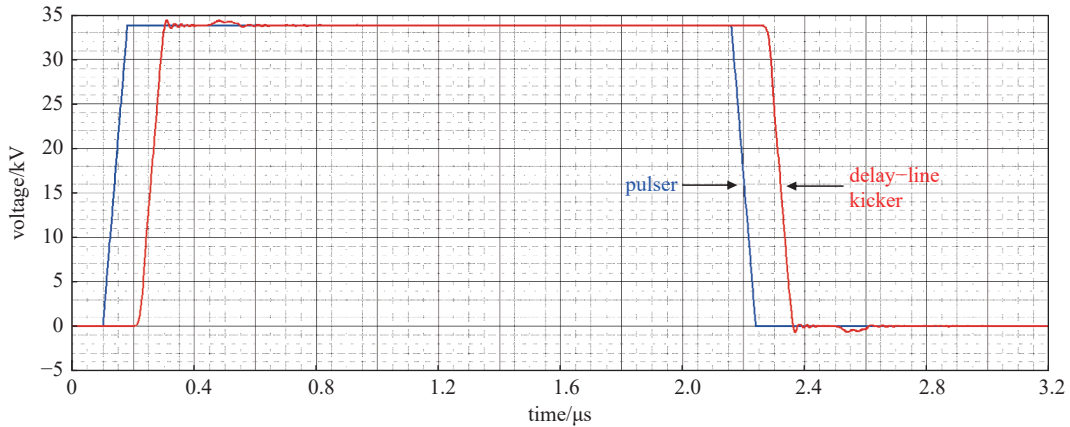


Fig. 15 Time distribution of magnetic field pulse

图 15 磁场脉冲时间分布

4 结论

CEPC 对撞环离轴注入系统快脉冲冲击磁铁拟采用真空外分布参数型冲击磁铁方案, 本文详细介绍了完整的磁铁物理设计过程和机械结构设计, 并利用 Opera 2D 程序和 PSpice 程序对脉冲磁场进行空间和时间的模拟计算, 计算结果证明分布参数型冲击磁铁设计能够满足 CEPC 注入的物理指标要求。目前, CEPC 注入引出分布参数型冲击磁铁样机已在加工制造中。

参考文献:

- [1] The CEPC Study Group. CEPC conceptual design report[R]. Beijing: Institute of High Energy Physics (IHEP), 2018.
- [2] Ducimetiere L, Garrel N, Barnes M J, et al. The LHC injection kicker magnet[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. 2003: 1162-1164.
- [3] Frick E, Kühn H, Mayer M, et al. Fast pulsed magnet systems for proton and antiproton injection into the CERN 400 GeV proton synchrotron[C]//Proceedings of the 15th Power Modulator Symposium. 1982: 290-298.
- [4] Ueda A, Ushiku T, Mitsuhashi T. Construction of travelling wave kicker magnet and pulse power supply for the KEK-Photon factory storage ring[C]//Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. 2001: 4050-4052.
- [5] Jensen C, Hanna B, Reilly R. A fast injection kicker magnet for the Tevatron[C]//Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. 2001: 3720-3722.
- [6] Jensen C, Reilly R, Hanna B. A fast injection kicker system for the Tevatron[C]//Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. 2001: 3723-3725.
- [7] Barnes M J, Ducimetiere L, Fowler T, et al. Injection and extraction magnets: kicker magnets[C]//Proceedings of the CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets. 2009: 141-166.

- [8] 高杰, 李煜辉, 翟纪元. 高能粒子加速器关键技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2021: 194-197. (Gao Jie, Li Yuhui, Zhai Jiyuan. Key technologies of high energy particle accelerators[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2021: 194-197)
- [9] 张洪涛, 董海义, 杨奇. CSNS/RCS二极陶瓷真空盒磁控溅射镀TiN薄膜研究进展[J]. 真空, 2014, 51(4): 61-64. (Zhang Hongtao, Dong Haiyi, Yang Qi. Development of titanium nitride coating for the CSNS/RCS dipole ceramic vacuum chambers by DC magnetron sputtering[J]. Vacuum, 2014, 51(4): 61-64)
- [10] 王磊, 康文, 郝耀斗, 等. CSNS/RCS引出系统快脉冲冲击磁铁样机的设计[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(8): 1263-1266. (Wang Lei, Kang Wen, Hao Yaodou, et al. Fast kicker magnet prototype for CSNS/RCS extraction system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(8): 1263-1266)
- [11] Dinkel J, Hanna B, Jensen C, et al. Development of a high quality kicker magnet system[C]//Proceedings of International Conference on Particle Accelerators. 1993: 1357-1359.
- [12] 赵籍九, 尹兆升. 粒子加速器技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 298-299. (Zhao Jijiu, Yin Zhaosheng. Particle accelerator technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 298-299)
- [13] Stange G. A new delay-line kicker with capacitive loading sandwiches[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1991, 300(3): 425-430.
- [14] Fiander D C, Metzmacher K D, Pearce P. Kickers and septa at the PS complex, CERN[C]//Proceedings of the KAON PDS Magnet Design Workshop. 1988: 71-86.
- [15] Schröder G. Fast pulsed magnet systems[M]//Chao A W, Tigner M. Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Singapore: World Scientific Press, 1999: 460-466.
- [16] Forsyth E B, Fruitman M. Fast kickers[J]. Particle Accelerators, 1970, 1: 27-39.