



·电源控制技术及电磁兼容技术·

千特斯拉级内爆磁压缩装置初始磁场电源系统研制

赵娟, 程诚, 李波, 吴刚, 匡学武, 胥超, 周中玉,
张旭平, 唐小松, 李建明, 仝延锦, 谷卓伟

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 初始磁场电源系统用于激励千特斯拉级内爆磁压缩装置的初级线圈产生初始磁场, 是内爆磁压缩装置的关键设备。在分析千特斯拉级内爆磁压缩装置初始磁场电源需求和技术难点的基础上, 系统设计了核心部件选择方案和主脉冲电路及控制系统结构, 研制成功一套输出电压 1~40 kV 可调、主放电电流脉冲上升沿约 60 μ s、总峰值电流达 3.2 MA 的初始磁场电源系统, 已应用于千特斯拉级内爆磁压缩装置动态试验。

关键词: 爆磁压缩; 强磁场激励; 复杂电磁环境; 精确控制

中图分类号: TN245

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230194

Development of primary magnetic field coil power supply system of kilo-tesla cylindrical implosion magnetic flux compression generator

Zhao Juan, Cheng Cheng, Li Bo, Wu Gang, Kuang Xuewu, Xu Chao, Zhou Zhongyu,
Zhang Xuping, Tang Xiaosong, Li Jianming, Tong Yanjin, Gu Zhuowei

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The primary magnetic field coil (PMFC) power supply system is designed for pumping the PMFC of the kilo-tesla cylindrical implosion magnetic flux compression generator (MC-1) to produce initial magnetic field. It is the key equipment of the MC-1 system. Based on analysis of the requirements and the key techniques, the key components, pulsed forming circuits and control system of the PMFC power supply system were designed. The power supply system with the output voltage adjustable from 1 kV to 40 kV, the rise front about 60 μ s and the peak current reached 3.2 MA was developed successfully. The power supply system has been applied to the dynamic test of the kilo-tesla cylindrical implosion magnetic flux compression (MC-1) generator.

Key words: explosive magnetic flux compression, pumping of ultra-high magnetic field, complex magnet-electrical circumstance, precise control

柱面内爆磁通量压缩技术(MC-1)是 20 世纪 50 年代美俄科学家几乎同时提出的一种基于磁场冻结效应的先进高能量密度加载实验技术^[1]。它利用炸药柱面内爆驱动金属套筒压缩预先引入的由初始磁场电源系统激励初级线圈(PMFC)产生的初始磁通量,使之在轴线附近聚集,使套筒内部的磁通量被压缩至很高的磁通密度,从而获得很高的脉冲磁场强度。如果在轴心附近安装一个金属样品管,管内放置实验样品材料,外套筒通过压缩磁通量就可以在样品管外表面施加一个磁压力,压缩管内材料至极高压。从 1996 年开始,美、俄等国联合开展 DIRAC 计划,用以研究数百至数千特斯拉(T)超强磁场下包括物质的超强磁场压缩特性等的凝聚态物质新物理现象,获得了许多前所未有的实验成果^[2-3]。俄罗斯实验物理研究院利用这项技术开展了低密度材料等熵压缩试验,获得了大量极有价值的研究成果^[4-5]。1998 年,Boyko 等人研制的多级装置获得了约 2 800 T 的超强磁场,这是目前在较大体积空间内所获得的最高磁场指标^[6],对应的等熵压力超过 3 TPa。MC-1 也是目前为止可在较大体积空间内(0.1~1 cm³)实现千特斯拉以上超强磁场的唯一技术手段^[7]。作为一种温升较低、等熵程度很高的非接触高压

* 收稿日期:2023-06-26; 修订日期:2023-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(11672276)

联系方式:赵娟, zj680525@21cn.com。

通信作者:谷卓伟, guzhw1969@126.com。

加载技术, MC-1 的超高压力、等熵压缩和超强磁场等特点决定了其在极端条件下的凝聚态物理领域包括低密度材料的高压物态研究、材料高压合成及超强磁场下的材料物性研究等方面都具有广阔的应用空间^[8]。

基于 MC-1 技术的重要科学意义和应用前景, 建立 MC-1 高能量密度实验平台并掌握相关核心技术, 对我国开展极端条件下材料物性实验研究具有积极意义。国内 20 世纪 60 年代在王淦昌院士指导下陈学印等人就已对 MC-1 装置进行了探索, 研制成功压缩磁场约 245 T 原型装置^[9]。2013 年, Zhou 等研制了我国首个能够稳定产生约 700 T 轴向峰值磁场的 CJ-100 型装置^[10]。近年来国内外大电流脉冲电源技术的发展, 特别是低阻抗电流传输、控制和保护技术的发展^[11-12], 为研制新型 MC-1 初始磁场电源系统创造了条件。

本文研制了一套具备产生 15~25 T 初始磁场强度能力的初始磁场电源, 用于驱动 MC-1 装置产生千特斯拉级高强度磁场。结合核心部件放电特性对初始磁场电源脉冲电路进行了分析、计算, 确定了各器件的参数, 利用仿真软件对器件参数进行了验证和优化, 完成了电源系统的研制及 MC-1 线圈的加载实验, 实验结果表明初始磁场电源满足使用要求, 达到了所需初始磁场强度。

1 系统结构及工作原理

通过对美、俄科学家发表的相关技术数据的分析, 结合系统的仿真计算可知能可靠产生千特斯拉级磁场的多级 MC-1 装置其典型磁场放大倍数在 50~100 范围, 同时千特斯拉级磁场动高压压缩实验平台要求装置具备一定的动态加载参数调节能力, 平台要求初始磁场强度范围在 15~25 T 可调, 上升沿时间 50~200 μs , 电流 $I_p \geq 2.5 \text{ MA}$, 初始线圈内径约 140 mm, 长度约 300 mm。

数值模拟结果表明: 在线圈尺寸为 $\phi 140 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的空间里, 在线圈中心产生径向平均磁场 $B_r = 25 \text{ T}$ 时, 磁场总能量 1.15 MJ, 按照俄装置的典型能量利用效率计算, 系统初始储能 $E_s \geq 2.7 \text{ MJ}$ 。考虑传输损耗及适度的工程裕量, 在负载参数设定为 0.3 $\mu\text{H}/0.2 \text{ m}\Omega$ 的情况下, 千特斯拉级内爆磁压缩装置初始磁场电源设计指标为: 工作电压 $\leq 40 \text{ kV}$; 峰值电流 (I_{max}) $\geq 3.2 \text{ MA}$; 上升沿时间 (t_r) $\leq 60 \mu\text{s}$; 总的触发延迟开关抖动 $\leq 1.2 \mu\text{s}$ (均方根值)。

初始磁场电源系统由供电网络、充电单元、放电单元、控制系统、数据采集系统等 5 个子系统及其联接线缆、光纤组成(图 1)。图 1 中蓝色线为控制指令及运行参数配置、反馈信号流; 紫色线表示数据信号流; 黑色线表示市电配送; 红色粗线箭头表示高功率电流传输路径。供电网络由隔离变压器、配电开关柜、滤波单元组成, 为充电单元、控制系统配电, 同时隔离能源系统在充放电过程中产生的电磁干扰, 并减小电网电压波动对控制单元造成的扰动; 充电单元由恒流充电电源、储能模块及本地控制器组成, 它按照设定参数为储能模块充电, 为放电网络产生脉冲大电流提供所需的初始电能; 放电单元(图 1 红色虚线框内部分)由储能模块、大电流传输电缆、负载线圈及高压大电流开关组成, 通过高压大电流开关使储能模块按照设定时序通过大电流传输电缆对负载线圈放电, 为实验装置提供合适强度的初始磁场; 控制系统由工业控制计算机、光纤通讯网络、控制软件组成, 对储能模块进行充、放电检测和控制, 同时实现保证设备及人员安全的故障报警和故障处理操作; 数据采集系统将初始磁场系统运行数据反馈给控制系统。

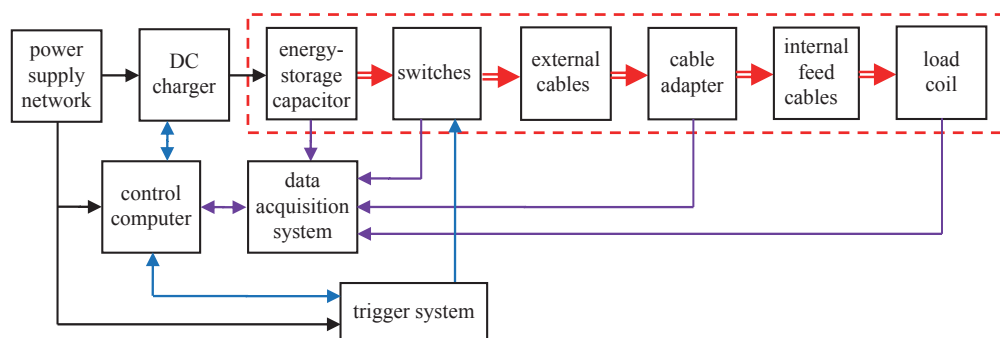


Fig. 1 Schematic diagram of the primary magnetic field exciting power system

图 1 初始磁场电源系统总体结构图

2 主脉冲电路设计

2.1 主脉冲电路拓扑结构设计

初始磁场电源系统主放电电路采用 RLC 串联电路拓扑结构, 结合二极管撬棒支路调控放电原理图(图 2(a))。

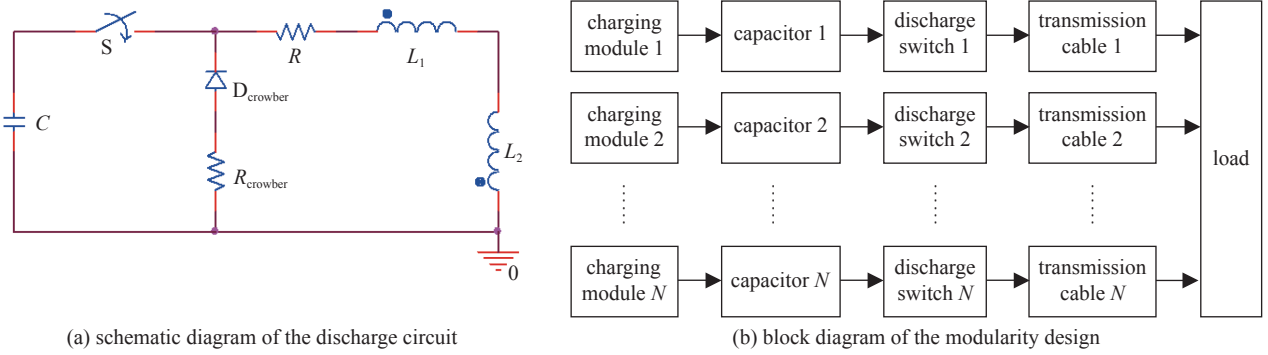


Fig. 2 Schematic diagram of the discharge circuit and the block diagram of the modularity design in the primary magnetic field exciting power system

图2 初始磁场电源系统主放电电路示意图及模块化设计框图

其工作原理为: 当储能电容器 C 充电达到预定值后, 通过转换开关 S 及大电流传输电缆对负载线圈 L_2 放电, 转换开关、大电流传输电缆及连接结构阻尼参数记为 R 、 L_1 , 合理选择 C 、 R 、 L_1 、 L_2 参数, 使负载电流脉冲的前沿和电流峰值达到设计指标的同时使主放电回路尽量以接近临界阻尼方式放电。续流电阻 R_{crowbar} 和续流二极管 D_{crowbar} 构成撬棒支路, 通过调整 R_{crowbar} 阻值从而达到调控负载电流后沿并吸收回路能量、抑制储能电容 C 反峰电压幅值的目的。为提高系统的安全性、可靠性和维修性, 初始磁场电源系统采用模块化设计(图2(b)), 每个模块由充电模块、电容器模块、放电开关和传输电缆构成, 大电流传输电缆通过接入汇流结构实现各模块输出电流的汇聚和到负载的电流传输结构转接。一个模块发生故障时, 不会影响其他模块的运行, 从而使电源系统在个别模块发生故障时仍可保障完成试验, 合理的电路参数设计亦可有效降低其他模块对故障模块中储能电容器的反充电压。

初始磁场电源系统主放电电路电流脉冲上升时间 t_r 和电流峰值 I_m 的计算公式分别为

$$t_r = \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{1-\alpha^2}} t_g^{-1} \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{\alpha} \quad (1)$$

$$I_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-(\alpha/\sqrt{1-\alpha^2}) t_g^{-1} (\sqrt{1-\alpha^2}/\alpha)} \quad (2)$$

式中: $\alpha = R\sqrt{C/L}/2$, 其中 R 、 L 、 C 分别表示回路的总电阻值、总电感值以及总电容值。

续流电阻 R_{crowbar} 应满足

$$R_{\text{crowbar}} < \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

避免放电电流切换入撬棒支路时引起负载电流的急剧下降导致负载线圈中磁场强度的过度衰落。同时, R_{crowbar} 阻值的选择也应保证放电电流切换入撬棒支路后, 储能电容器-转换开关-撬棒支路构成的回路处于临界阻尼状态, 以避免对储能电容器造成过高反充电压。

根据指标要求, 取主放电电流脉冲上升沿 $t_r \leq 60 \mu\text{s}$, 总峰值电流 $I_m \geq 3.2 \text{ MA}$, 设定 $U_0 = 40 \text{ kV}$ 由公式(1)和(2)可得 $L \leq 0.48 \mu\text{H}$, $C \geq 3.1 \text{ mF}$ 。

2.2 主要器部件参数设计

初始磁场电源系统中对系统性能影响较大的器部件是储能电容器、放电开关和大电流传输电缆, 综合考虑产品技术状态及研制进度要求, 在系统设计中, 重要器部件参数选择如下。

储能电容器完成高压电能的储存和快速释放, 它的性能直接影响到整个能源系统的性能和造价。从保证系统可靠性的角度, 储能电容器最高工作电压应不大于负载电感绝缘强度值。在电流满足要求的情况下应尽量降低工作电压, 同时考虑到电容器工作电压超过 50 kV 时易引发引线端头部位空气环境下的电晕放电, 本系统储能电容器工作电压设计为 40 kV 。为实现 25 T 初始磁场, 通过仿真计算本装置拟采用单只 $50 \mu\text{F}$ 容量电容共 80 只组成 4 mF 电容器组。同时, 为避免较高反峰电压对电容器造成严重损害, 电容器选用油浸型膜介电容器, 性能指标设计为: a) 容量 $50 \mu\text{F}$; b) 容差 $\pm 5\%$; c) 额定电压 45 kV ; d) 最大峰值放电电流 $\geq 120 \text{ kA}$; e) 杂散电感 $L_s \leq 40 \text{ nH}$; f) 内阻 $\leq 20 \text{ m}\Omega$ 。

由于放电电流较高, 放电开关可以选择使用多个固态开关组件或充气旋弧开关并联, 或爆炸开关。由于本方案中负载的特殊性, 存在较大幅度的反向电压和电流, 这是由多个大电流晶闸管串并联组成的固态开关难以承受

的。实验结果表明,较大的转移库伦量也会使充气旋弧开关使用寿命受到极大的限制。综合考虑本方案选用爆炸开关作为放电开关。在多支路并联运行条件下,为确保开关的同步性,本方案选择采用平面波驱动爆炸开关,该开关通流能力可达 3.5 MA 以上,其导通电感、电阻也可满足设计要求。考虑存在个别支路提前触发时存在电缆反射电压极性反转的风险,储能电容器充电电压选择为 40 kV 时,开关耐压设计为 80 kV。

大电流传输电缆采用低损耗传输电缆。在考虑导通电流、电感和电阻满足设计要求的情况下,耐压应考虑设计余量,以减小负载或回路开路故障感应电压造成的击穿风险。采用聚乙烯绝缘同轴电缆,该材料具有低密度、耐热性好、耐臭氧、耐腐蚀、柔软性好以及绝缘电阻对温度变化敏感性小等特点,可满足电缆的绝缘性能及布线弯曲半径要求。电缆采用内、外导体均为同轴编织线、内芯采用棒状低密度聚乙烯作为填充体的低感结构,技术指标要求为: a) 耐压 80 kV; b) 导通电流 120 kA; c) 冲击电流 180 kA; d) 电感 ≤ 200 nH/m; e) 电阻 $\leq 1 \Omega/\text{km}$ (@20 °C)。

2.3 主脉冲电路仿真分析

根据主放电电路分析结果,结合关键器部件的实际参数,初始磁场电源系统主放电电路参数如表 1 所示。

表 1 放电电路参数表
Table 1 Parameters of the discharge circuit

inductance of the load/ μH	resistance of the load/ $\text{m}\Omega$	total capacitance of capacitors/ mF	internal inductance of the parallel capacitors/ nH	shunt resistance of the parallel capacitors/ $\text{m}\Omega$	fly-back resistance/ $\text{m}\Omega$	inductance of the parallel cables/ nH	shunt resistance of the parallel capacitors/ $\text{m}\Omega$
0.3	0.2	4	10	0.25	4	10	0.25
fly-back resistance/ $\text{m}\Omega$	inductance of the parallel cables/ μH	internal resistance of the parallel cables/ $\text{m}\Omega$	distribution capacitance of the parallel cables/ nF	inductance of bus-bar/ nH	resistance of bus-bar/ $\text{m}\Omega$	capacitance of bus-bar/ nF	
4	0.1	0.5	103	40	0.5	20	

图 3 给出了初始磁场电源系统主放电电路 Pspice 仿真电路图,由 80 台 50 μF 电容器组成的总容量 4 mF 的储能电容器组分为 20 组,每组电容器通过由 2 根低损耗高压电缆并联组成的大电流传输电缆组件与汇流排连接,汇流排高压极与爆炸开关输入极连接,爆炸开关输出极与内馈电缆高压极连接。爆炸开关闭合时,汇流排汇聚所有放电模块的输出电流通过爆炸开关和内馈电缆向负载线圈放电。从放电电流仿真计算结果(图 4)可知,在电容器充电电压为 34 kV 时,回路总电流在 $t=65 \mu\text{s}$ 时刻达到峰值 $I_m=3.1 \text{ MA}$, $t_r(10\% \sim 90\%) \leq 60 \mu\text{s}$, 满足设计指标要求。

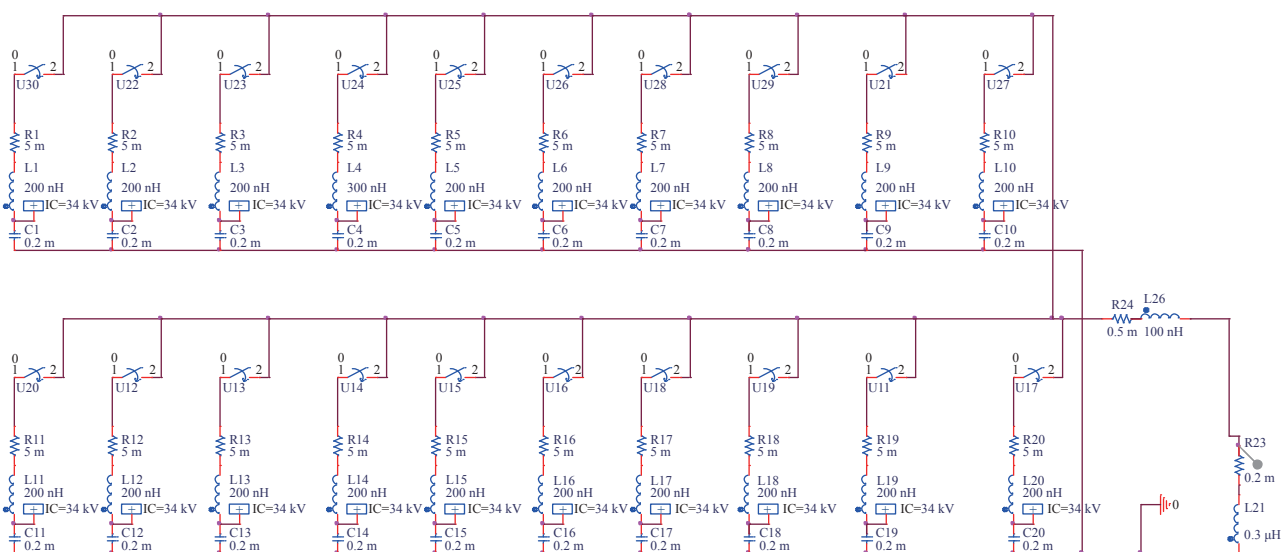


Fig. 3 Simulation diagram of the discharge circuit

图 3 主放电电路仿真电路图

3 控制系统设计

电源控制系统用以完成 20 组电容器组的充、放电控制,监测电容器电压、放电电流等参数,实现保证设备及人员安全的故障报警和故障处理操作。

控制系统以一台工控机作为控制核心,通过以太网实现系统内所有仪器设备的管理和运行控制,以及控制对

象的状态监测(图5)。串口联网服务器将串口转换为网络接口,实现多个串口设备(电源系统和同步触发系统)的快速联网。采用PLC构建IO控制器,实现数字IO和模拟IO的输入输出控制,用于电源系统的远程开机、高压接地、慢信号监测等功能。采用PLC构建安全连锁控制器,针对急停系统、门禁系统、同步触发系统,实现安全连锁信号的快速处理。采用PXI接口构建多通道数据采集系统,可实时20个放电回路电流信号的同步采集。

4 电磁兼容设计

电源系统的电磁兼容能力的提升重点关注两个方面的工作:1)降低电磁干扰源项强度,与一般电子设备不同,电源系统的脉冲形成系统中产生和传输数十千安甚至数兆安的脉冲大电流,会在其临近区域产生较高强度的瞬态电磁场,是强度较高的电磁干扰源项;2)提高电子学系统的抗干扰的性能,电源系统内部需要大量的控制和测试子系统,这些子系统大多数是工作在TTL电平或CMOS电平的电子学系统,在电源系统中,这些电子学系统与电磁干扰源项之间存在多种复杂的耦合路径,完全切断所有耦合是不可能的,必须在电子学系统设计中采取多种措施提高其本身的抗干扰能力。

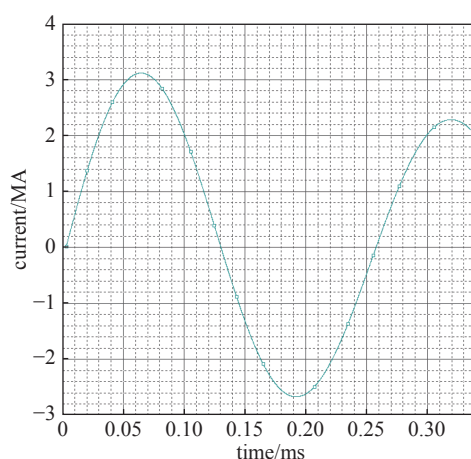


Fig. 4 Simulation results of the discharge current

图4 放电电流的仿真结果

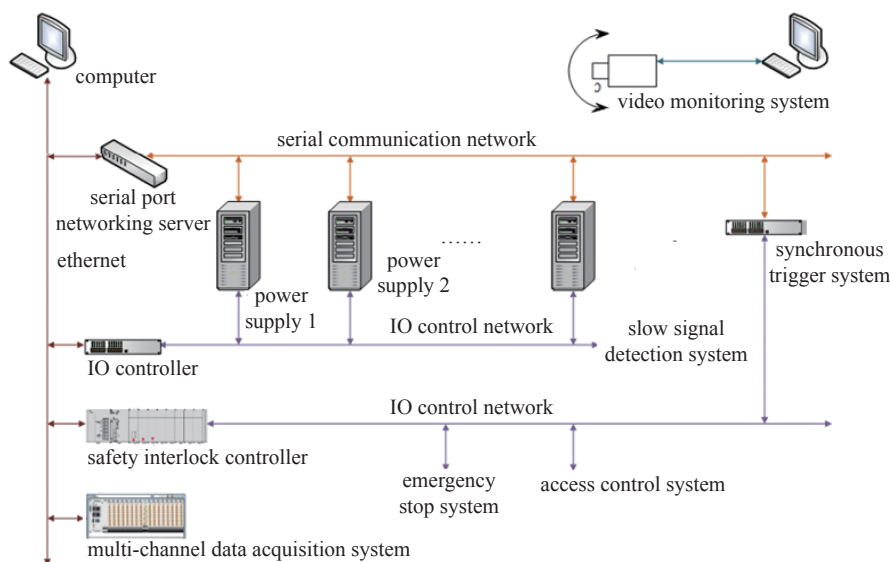


Fig. 5 Block diagram of the control system

图5 控制系统结构框图

本电源系统中电磁干扰的源项主要由大电流传输和可能发生的打火造成,采取的降低电磁干扰源项强度的措施包括:

1) 建立良好的接地系统并规范接地。本系统主放电回路采取电容器组地接大电流地,该地线电阻要求小于 0.5Ω ,地线桩与电容器组地端子连接线尽量短且总电阻小于 0.1Ω ;控制系统仪器设备接测控地,该地线电阻要求小于 5Ω ,地线桩与控制系统仪器设备接地端子连接线应注意不得与大电流地连接线缆连通且总电阻小于 1Ω 。所有设备、试验装置均实现一点接地。

2) 采用屏蔽罩等匀场设计降低高压电极表面及其临近空间电场强度,汇流排等导通电流平面采用紫铜箔做为垫层、黄铜做电极板的软硬金属材料复合压接以提高电流导通截面积并消除微气隙,避免在能源模块及控制仪器设备附近产生打火放电,从而消除快上升沿放电。

3) 采用能源模块整体屏蔽和同轴电缆传输脉冲大电流,大电流开关及负载放置于与电源系统空间隔离的密闭金属容器内等措施,降低空间电磁干扰辐射的强度。

提高电子仪器设备抗干扰性能的措施包括:

1)防止从配电网引入干扰信号。电源系统的所有控制、数据采集仪器设备均由市电系统经过隔离变压器和滤波器后馈能,且与能源模块的充电及本地控制系统尽量避免使用同相配电盘,能源模块的本地控制采取板上直流电源增加滤波器和浪涌抑制电路的抗干扰强化设计。

2)电源控制系统的数据、触发、故障和急停3类信号根据其响应时间要求和优先级,采用相应硬件响应或程序响应机制。

3)电源控制系统与电源主机电路的电气完全隔离设计。

(a)对电压信号测量采用模拟光耦隔离、电流信号测量采用磁隔离;

(b)根据电源系统地线噪声具体频谱,设计电源滤波系统;

(c)控制系统之间的数据、触发、故障信号等采用全光纤信号传输。

5 实验结果

电容器充电电压34 kV条件下,电源系统驱动0.3 $\mu\text{H}/0.2\text{ m}\Omega$ 负载的实验波形如图6所示,电源系统输出峰值电流达到3.1 MA,上升沿约50 μs ,与设计值吻合良好。

在不接入撬棒(crowbar)开关支路时,反向电流幅值达到正向峰值电流幅值的30%,对电容器存在较大的反充。投入撬棒开关支路时,放电波形如图7所示,反向电流消失,消除了对电容器的反充效应,提升了系统的安全性和可靠性。

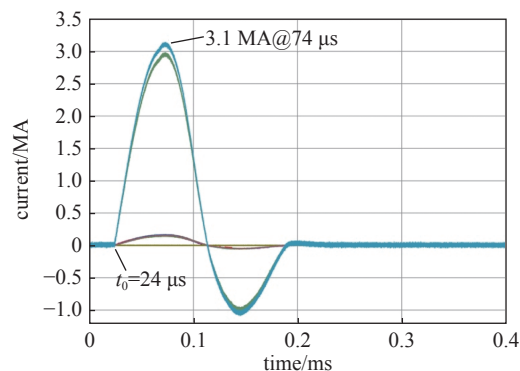


Fig. 6 Power system experimental waveform when crowbar switch does not start

图6 Crowbar开关不启动时电源系统实验波形

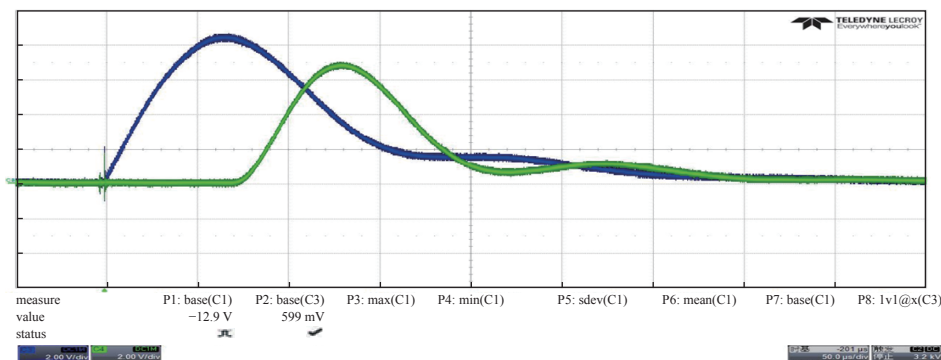


Fig. 7 Experimental waveform of power supply system with crowbar switch input at peak current moment

图7 电流峰值时刻投入撬棒开关的电源系统实验波形

6 结论

本文在系统分析千特斯拉级磁场动高压压缩实验平台电源系统关键技术和难点的基础上,通过开展较为系统的仿真分析、关键部件选型等工作,确定了具有较高可靠性和安全性的模块化设计方案,研制成功上升沿约50 μs 、输出电流峰值达到3.1 MA的初始磁场激励电源系统。与千特斯拉级磁场动高压压缩实验平台MC-1柱面内爆磁通量压缩发生器的联调试验结果表明,该电源系统已达到设计要求,满足千特斯拉级磁场动高压压缩实验平台初始磁场激励的要求。

参考文献:

- [1] Sakharov A D, Lyudaev R Z, Smirnov E N, et al. Magnetic cumulation[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1965, 165(1): 65-68.
- [2] Clark R G. The DIRAC experiments-results and challenges[C]//Proceeding of the 8th International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. 1998: 12-21.
- [3] Lindemuth L R, Ekdahl C A, Fowler C M, et al. US/Russian collaboration in high-energy-density physics using high-explosive pulsed power: ultrahigh current experiments, ultrahigh magnetic field applications, and progress toward controlled thermo nuclear fusion[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(6): 1357-1372.
- [4] Boriskov G V, Belov S I, Bykov A I, et al. Conductivity and permittivity of hydrogen under isentropic magnetic compression up to 3 Mbar[J]. Journal of Low

- Temperature Physics, 2010, 159(1/2): 307-310.
- [5] Boriskov G V, Bykov A I, Egorov N I, et al. Isentropic compression of substances using ultra-high magnetic field: zero isotherms of protium and deuterium in pressure range up to ~5 Mbar [J]. *Contributions to Plasma Physics*, 2011, 51(4): 339-348.
- [6] Bykov A I, Dolotenko M I, Kolokolchikov N P, et al. VNIIEF achievements on ultra-high magnetic fields generation [J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2001, 294/295: 574-578.
- [7] 谷卓伟. 内爆磁通量压缩技术进展概述 [J]. 高能密度物理, 2020(2): 47-53. (Gu Zhuowei. Overview of the development of internal explosive magnetic flux compression technology [J]. *High Energy Density Physics*, 2020(2): 47-53)
- [8] 谷卓伟, 罗浩, 张恒第, 等. 炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62: 170701. (Gu Zhuowei, Luo Hao, Zhang Hengdi, et al. Experimental research on the technique of magnetic flux compression by explosive cylindrical implosion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 170701)
- [9] 陈学印, 龚兴根, 陈英石, 等. 爆炸磁通量压缩装置的实验研究 [C]//王淦昌论文选集. 1987: 151-153. (Chen Xueyin, Gong Xinggen, Chen Yingshi, et al. Experimental study on explosive magnetic flux compression device [C]//Selected Papers of Wang Ganchang. 1987: 151-153)
- [10] Zhou Zhongyu, Gu Zhuowei, Luo Hao, et al. A compact explosive-driven flux compression generator for reproducibly generating multimegagauss fields [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(10): 3279-3283.
- [11] 马勋, 关键, 李松杰, 等. 用于地球磁尾三维磁重联实验的脉冲电源 [J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 125003. (Ma Xun, Guan Jian, Li Songjie, et al. Pulsed power supply for three-dimensional magnetic reconnection experiment of earth's magnetotail [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 125003)
- [12] 关键, 凌文斌, 马勋, 等. SPERF 环向场线圈脉冲电流源设计 [J]. *电源学报*, 2022, 20(6): 174-183. (Guan Jian, Ling Wenbin, Ma Xun, et al. Design of pulsed current source for toroidal field coils in SPERF [J]. *Journal of Power Supply*, 2022, 20(6): 174-183)