

紧凑型高功率重复频率脉冲电源 的高压输出端设计

蓝欣, 李亚维, 李玺钦, 马成刚, 刘云涛, 冯元伟

中国工程物理研究院流体物理研究所, 脉冲功率科学与技术重点实验室, 绵阳 621900

摘要: 紧凑型高功率重复频率脉冲电源受其重量和体积尺寸等技术指标的限制, 通常需要加入数MPa的气体绝缘介质才能实现其电气性能。其高压输出端设计要同时满足高机械结构强度和高电气绝缘强度要求, 必须做到二者间的综合平衡。本文介绍了运用计算机建模软件分析及数值模拟, 完成的一款800kV的紧凑型高功率重复频率脉冲电源的高压输出端设计工作。经实验证明, 该装置外径为290mm, 在重复频率50Hz时脉冲电源可在输出电压800kV下可稳定可靠工作。

关键词: 紧凑型, 重复频率, 高机械结构强度, 高电气绝缘强度, 高压输出端

Design of high voltage output for Compact high power and repetition rate pulse power supply

LAN Xin, LIYawei, LIXiqin, MA Chenggang, LIUYuntao, FENGYuanwei

Key laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.Box 919-107, Mianyang 621900

Abstract: Compact high power and repetition rate pulse power supply subject to the restrictions on size and other technical requirements of weight and volume, usually need to join several MPa gas insulated dielectric to implement its electric property. The design of high voltage output must meet the requirements of high mechanical structure strength and high electric insulated strength, and achieve a balance between the two. This paper use computer modeling analysis and numerical simulation software to implement the high voltage output design of a 800 kV compact high power and repetition rate pulse power supply. The results show, with external diameter 290mm, the pulse power can work stable under the output voltage of 800 kV at 50Hz.

Keywords: compact, repetition rate, high mechanical structure strength, high electric insulated strength, high voltage output

1 前言

高功率重复频率脉冲电源广泛地应用在国防、环保、医疗和科学研究等众多领域, 当需要在移动平台上使用时, 又对其提出了小型化和轻量化的要求。紧凑型高功率重复频率脉冲电源正是针对上述需求应运而生的。要实现轻量化, 首选的绝缘模式是采用气体绝缘, 无金属外壳化, 或者在绝缘外壳上包覆薄层铝皮外壳来改善电场分布; 要实现小型化, 在气体绝缘模式下只能提高电源内部的充气压力, 因此, 通常所见的紧凑型高功率重复频率脉冲电源都

工作在数 MPa 至十几 MPa 的充气压力下^[1]。重复频率在 100Hz 以下的电源就大多选用气体火花间隙作为开关, 电路拓扑结构可以选择 Marx 发生器型或脉冲变压器型^[2,3]。在电路拓扑结构选用 Marx 发生器型, 特别是选用同轴型 Marx 发生器时, 容器两端分别是高压输出端和地电位连接端, 这对电源的整体结构设计是非常有利的。本文就介绍了一款由同轴型 Marx 发生器构成的紧凑型高功率重复频率脉冲电源, 其输出脉冲电压 800kV, 脉冲前沿约 1ns, 脉冲宽度约 3ns, 可以在重复频率 50Hz 下稳定可靠工作。

2 电源设计

800kV 紧凑型高功率重复频率脉冲电源的脉冲调制线路原理图如图 1 所示, 一台同轴型 Marx 发生器由 16 级单元模块组成, 采用单极性直流高压充电, 选取电感作为级间隔离元件, Marx 发生器触发建立后通过自击穿的两电极气体火花间隙开关 (SW01) 对前沿锐化电容 (C001) 充电, 然后再通过自击穿的两电极气体火花间隙开关 (SW02) 对负载 (Rzf) 放电^[4]。

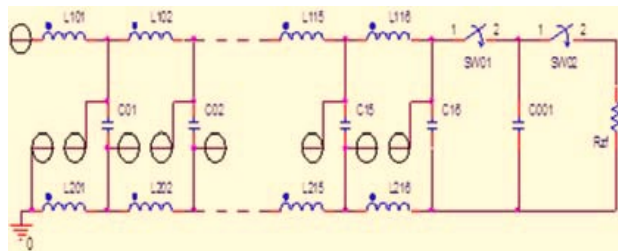


图 1 脉冲调制线路原理图

Fig.1 pulse modulation circuit schematic

气体火花间隙开关 (SW01) 设计在同轴型 Marx 发生器内, 最大工作压力 0.8MPa, 气体火花间隙开关 (SW02) 和前沿锐化电容 (C001) 集成为一体, 最大工作压力 5.0MPa。通过电路仿真计算表明, 受终端放电回路杂散电感的影响, 前沿锐化电容 (C001) 的最大充电电压将接近 1.1MV。设计时要求将同轴型 Marx 发生器的外径控制在 300mm 以内, 无金属外壳化, 电源的整机长度控制在 1500mm 以内。

3 电源高压输出端设计

电源高压输出端的设计工作包括 Marx 发生器高压端的机械密封结构设计、电气绝缘结构设计, 前沿锐化电容设计, 气体火花间隙开关 (SW02) 设计和负载连接端设计等项目。开展工作时必须尽可能的将上述设计项目进行一体化设计, 高度集成, 减少过渡段, 以使终端放电回路杂散电感量最小化。无金属外壳化的同轴型 Marx 发生器选用 MC 浇铸尼龙材料制作成容器外壁, 批量制造时可以选用环氧树脂制作容器外壁以进一步降低其重量和体积, 容器外壁直径 290mm, 壁厚 45mm^[5]。

3.1 Marx 发生器高压端机械密封结构设计

Marx 发生器最大工作压力为 0.8MPa, 开展容器设

计按照 1.6MPa 的工作压力计算校核其机械结构强度^[6], 在设计 Marx 发生器高压端的机械密封结构时不能忽略其处于高电场强度之中, 按照最大工作电压 1.1MV 进行计算, 密封结构位置处的电场强度大于 60kV/cm, 已远远大于空气的击穿强度, 为了避免密封结构位置大气侧发生局部放电对橡胶密封圈造成烧蚀, 导致密封失效, 应采取直口式沟槽密封结构。如图二所示, A 型密封结构会因为大气侧发生局部放电对橡胶密封圈造成烧蚀, B 型密封结构因采用了直口式沟槽密封结构, 不会因为大气侧发生局部放电对橡胶密封圈造成烧蚀。电源高压输出端其他部位的径向密封也全部采用这种直口式沟槽密封结构。

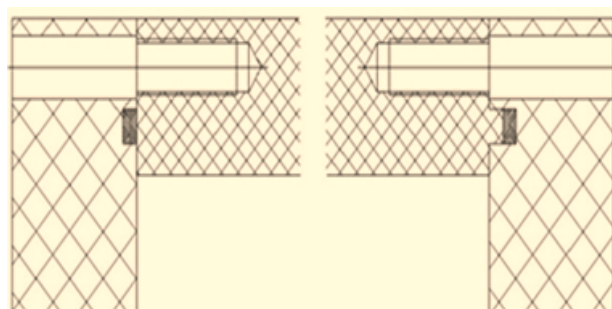


图 2 Marx 发生器高压端的机械密封结构示意图

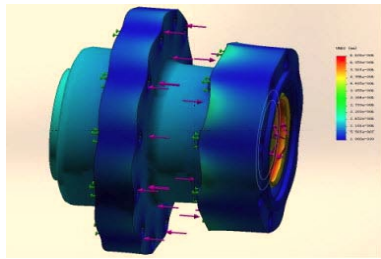
Fig.2 mechanical seal structure schematic on Marx generator

3.2 电源高压输出端电气绝缘结构设计

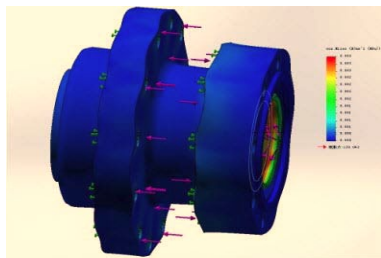
遵循进行一体化设计, 高度集成的设计思想, 设计了电源高压输出端的绝缘结构件, 其既是 Marx 发生器的封板, 还是开关 (SW02) 的封板, 开关 (SW02) 的最大工作压力 5.0MPa, 开展设计时按照 8.0MPa 的工作压力计算校核其机械结构强度^[6]。

另外绝缘结构件同时也是前沿锐化电容的支撑结构件, 前沿锐化电容的高压电极杆从其中心穿过, 高压电极杆的一端连接开关 (SW01) 的一个电极头, 另一端则连接开关 (SW02) 的一个电极头, 高压电极杆还起密封作用, 将开关 (SW01) 和开关 (SW02) 的气室分隔开。运用建模分析软件分别对绝缘结构件进行受力分析、位移形变分析及电场分布数值模拟, 获得的典型结果如图 3 所示。(a) 图是绝缘结构件的受力分析结果, (b) 图是绝缘结构件的位移形变分析结果, (c) 图是绝缘结构件的电场分布数值模拟结果。根据计算机建模软件分析及数值模拟给出的数

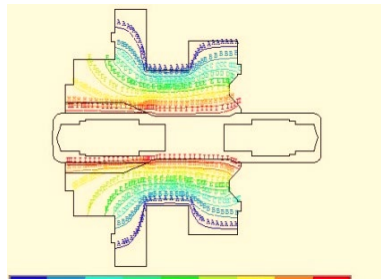
据,对绝缘结构件的形状进行修改,经过多次迭代,最终确定其合理的结构尺寸。



(a) insulation structure stress analysis



(b) displacement deformation analysis



(c) electric field distribution numerical simulation

图3 计算机建模软件分析及数值模拟
Fig. 3 computer modeling analysis and numerical simulation

此外设计一段金属的输出过渡段,其既是用来连接电源的负载,还是开关(SW02)的气室壁,同样开展设计时按照8.0MPa的工作压力计算校核其机械结构强度。另外输出过渡段同时也是前沿锐化电容的地电极的一部分,前沿锐化电容的地电极由输出过渡段、均压活法兰及其连接螺栓共同组成。

电源高压输出端的典型设计结果如图4所示。绝缘结构件选用MC浇注尼龙材料整体加工而成,高压电极杆选

用硬铝材料制造,开关电极头选用黄铜材料制造,均压活法兰和输出过渡段选用不锈钢材料制造。

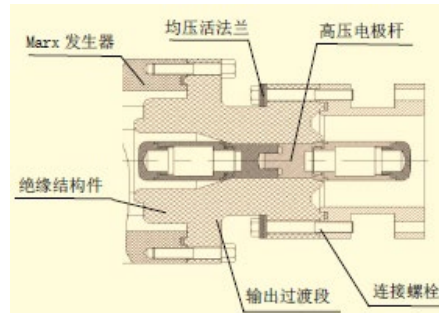


图4 电源输出端典型设计图

Fig. 4 typical design on power supply high voltage output

4 实验考核

800kV紧凑型高功率重复频率脉冲电源总装完成后,截止到输出过渡段靠负载边的端部,总长为1270mm,最大外径290mm。在输出过渡段后接等阻抗传输线到50Ω电阻模拟负载上进行实验考核,其输出脉冲电压大于800kV,输出脉冲电压的脉冲前沿约1ns,脉冲宽度约3ns,可以在重复频率50Hz下稳定可靠工作。其输出脉冲电压波形的典型示波图如图5所示。另外在实验考核中发现,需要将触发电压加在Marx发生器的第三级单元模块上,Marx发生器的动作才稳定可靠。

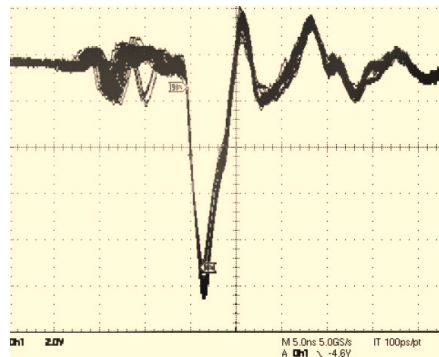


图5 电源输出脉冲电压典型示波图

Fig. 5 power output pulse voltage typical oscillogram

5 结论

研制了一款800kV的紧凑型高功率重复频率脉冲电源,在开展其高压输出端设计工作中,运用计算机建模软件分析