

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2025 年 1 月 9 日 (09.01.2025)



(10) 国际公布号
WO 2025/007544 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 7/00 (2006.01) **H02J 7/34** (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2024/072886
- (22) 国际申请日: 2024 年 1 月 17 日 (17.01.2024)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202310825152.4 2023年7月6日 (06.07.2023) CN
- (71) 申请人: 陕西星环聚能科技有限公司 (SHAANXI STARTORUS FUSION TECHNOLOGY COMPANY LIMITED) [CN/CN]; 中国陕西省西安市西咸新区沣西新城西部云谷二期 7A 栋 110 室, Shaanxi 712000 (CN)。清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。

- (72) 发明人: 常庭智 (CHANG, Tingzhi); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。陈锐 (CHEN, Rui); 中国陕西省西安市西咸新区沣西新城西部云谷二期 7A 栋 110 室, Shaanxi 712000 (CN)。王彬彬 (WANG, Binbin); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。杨萌华 (YANG, Menghua); 中国北京市海淀区清华园, Beijing 100084 (CN)。谭熠 (TAN, Yi); 中国陕西省西安市西咸新区沣西新城西部云谷二期 7A 栋 110 室, Shaanxi 712000 (CN)。
- (74) 代理人: 北京风雅颂专利代理有限公司 (BEIJING FORESTSONG PATENT AGENCY CO., LTD); 中国北京市朝阳区农展馆南路 13 号瑞辰国际中心 509 室, Beijing 100125 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,

(54) Title: POWER SUPPLY MODULE AND POWER SUPPLY SYSTEM

(54) 发明名称: 电源模块和电源系统

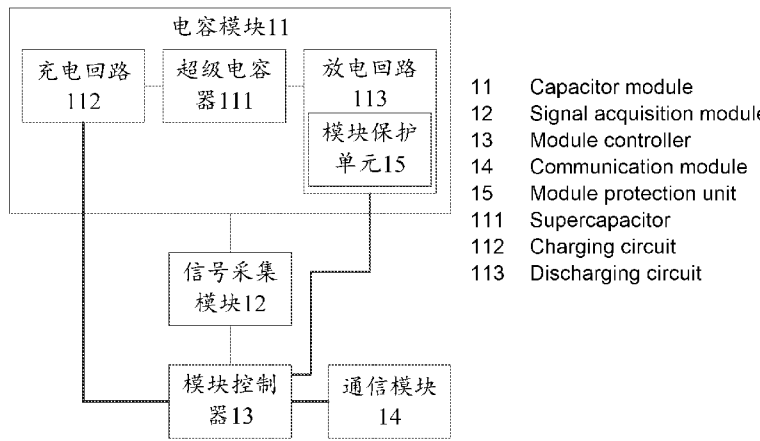


图 1

(57) Abstract: The present application provides a power supply module, comprising: a supercapacitor, a charging circuit and a discharging circuit, wherein the charging circuit is connected to a charging power supply and is used for charging the supercapacitor, and the discharging circuit is connected to a magnet in a magnetic confinement fusion device by means of a bus and is used for discharging the magnet; a signal acquisition module, connected to a capacitor module and used for acquiring a state signal of the capacitor module; a module controller, connected to the capacitor module and the signal acquisition module, respectively and used for controlling a charging/discharging state of the capacitor module and monitoring the capacitor module on the basis of the state signal; and a communication module, connected to the module controller and used for communicating with a module controller of another power supply module or a main controller of a power supply system. The power supply module is adaptively assembled in series and/or in parallel according to a target demand voltage and/or new target demand current of the magnet, so that the power supply module has high universality and simple maintainability.

GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ,
IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ,
LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN,
MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA,
PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,
UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚
(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE,
BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR,
HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO,
PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF,
CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN,
TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本申请提供一种电源模块, 包括超级电容器、充电回路和放电回路; 其中, 充电回路用于与充电电源连接, 对超级电容器充电, 放电回路用于通过母线与磁约束聚变装置中的磁体连接, 对磁体放电; 信号采集模块, 与电容模块连接, 用于采集电容模块的状态信号; 模块控制器, 分别与电容模块和信号采集模块连接, 用于对电容模块的充放电状态进行控制以及基于状态信号对电容模块进行监控; 以及通信模块, 与模块控制器连接, 用于与其他电源模块的模块控制器或电源系统的主控制器通信。电源模块按照磁体的目标需求电压和/或新的目标需求电流适应性串联和/或并联组装电源模块即可, 具有较强的通用性和较为简易的维护性。

电源模块和电源系统

本申请要求于 2023 年 07 月 06 日提交中国专利局、申请号为
5 “202310825152.4”、发明名称为“用于驱动磁约束聚变装置中磁体的
电源模块及电源系统”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引
用结合在本申请中。

技术领域

10 本申请涉及电子电力技术领域，具体涉及一种用于驱动磁约束聚
变装置中磁体的电源模块和电源系统。

背景技术

托卡马克装置等聚变装置通过磁场来控制等离子体，磁场则通过
向磁场线圈中通入一定电流来产生，因此通常会需要一套大功率的脉
15 冲电源来向磁场线圈中注入电流，即磁体驱动电源。通常磁体驱动电
源需要在短时间内能够到达兆瓦（MW）甚至更高级别的功率，这样的
功率需求如果从电网直接引入，则对电网的负荷要求较高。因此，现
有的磁体驱动电源通常会使用大容量的储能元件，先从电网储能，然
后将能量在短时间内馈入磁场线圈。

20 现有的磁体驱动电源通常采用飞轮发电机的方式进行储能，飞轮
发电机可存储较大的能量，输出功率高，能够满足各种类型的托卡马
克装置等聚变装置的用电需求，然而，飞轮发电机组成的电源系统，
往往复杂度较高，通用性差，若发生故障，可维护性差。

因此，如何在满足聚变装置的电源需求的同时提升磁体驱动电源
25 的适用性和维护性成为亟待解决的技术问题。

发明内容

本申请提供一种电源模块和电源系统，用于驱动磁约束聚变装置
中的磁体，至少解决相关技术中存在的如何在满足聚变装置的电源需

求的同时提升磁体驱动电源的适用性和维护性的技术问题。

本申请实施例提供一种电源模块，电容模块，包括超级电容器、充电回路和放电回路；其中，所述充电回路用于与充电电源连接，对所述超级电容器充电；所述放电回路用于通过母线与磁约束聚变装置中的磁体连接，对所述磁体放电；信号采集模块，与所述电容模块连接，用于采集所述电容模块的状态信号；模块控制器，分别与所述电容模块和所述信号采集模块连接，用于对所述电容模块的充放电状态进行控制以及基于所述状态信号对所述电容模块进行监控；以及通信模块，与所述模块控制器连接，用于与其他电源模块的模块控制器或电源系统的主控制器通信；其中，所述电源系统由多个所述电源模块形成，用于对所述磁体供电。

根据第二方面，本申请实施例提供了一种电源系统，包括多个上述第一方面任意一项所述的电源模块；多个所述电源模块连接在所述母线上，向所述磁体供电；以及主控制器，分别通过所述通信模块与每个所述电源模块的模块控制器通信，用于接收每个所述电源模块的状态信号，并基于所述状态信号控制所述电源系统的工作状态。

在本公开的实施例中，每一电源模块可以具有超级电容器以及可以为超级电容器进行独立充电和独立放电的充电回路和放电回路，并且，每一电源模块还设置有独立的信号采集模块和模块控制器，通过信号采集模块采集电容模块的状态信号，通过模块控制器对电容模块实现独立的充放电状态控制和监控，进而可以使得每一电源模块独立运行。因此，本实施例中的电源模块可以作为磁约束聚变装置中磁体的电源系统的一个通用模块按照目标需求电压和/或目标需求电流进行灵活的组装。进而可以在不影响磁体的电源系统正常工作的情况下，维护单个电源模块；在目标需求电压和/或目标需求电流发生变化时，只需要按照新的目标需求电压和/或新的目标需求电流适应性的增加电源模块的串联数量和/或并联数量即可，具有较强的通用性和较为简易的维护性。

附图说明

此处的附图被并入说明书中并构成本说明书的一部分，示出了符

合本申请的实施例，并与说明书一起用于解释本申请的原理。

为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，对于本领域普通技术人员而言，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

图 1 为本申请实施例的一种示例性的用于驱动磁约束聚变装置中磁体的电源模块的示意图；

图 2 为本申请实施例中的一种示例性的用于驱动磁约束聚变装置中磁体的电源模块的电路原理示意图；

图 3 为本申请实施例的另一种示例性的用于驱动磁约束聚变装置中磁体的电源模块的示意图；

图 4 为本申请实施例的一种示例性的电源系统的示意图。

具体实施方式

为了使本领域普通技术人员更好地理解本申请方案，下面将结合本申请实施例中的附图，对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本申请一部分的实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都应当属于本申请保护的范围。

需要说明的是，本申请的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象，而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换，以便这里描述的本申请的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外，术语“包括”和“具有”以及他们的任何变型，意图在于覆盖不排他的包含，例如，包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元，而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

本申请提供了一种电源模块，其中，上述电源模块用于驱动磁约束聚变装置中磁体。在本公开的实施例中，上述电源模块采用模块化

设计，多个电源模块可基于磁体的目标需求电量通过串联和/或并联构建用于驱动磁体的电源系统，以对上述磁体供电。图 1 显示了本申请实施例所述的电源模块的结构。参见图 1，该电源模块可以包括：电容模块 11，信号采集模块 12，模块控制器 13 和通信模块 14。

5 其中，所述电容模块 11 包括超级电容器 111，充电回路 112 和放电回路 113。其中，所述充电回路 112 用于与充电电源连接，对所述超级电容器 111 充电，所述放电回路 113 用于通过母线与所述磁体连接，对所述磁体放电。

10 信号采集模块 12，与所述电容模块 11 连接，用于采集所述电容模块 11 的状态信号。

模块控制器 13，分别与所述电容模块 11 和所述信号采集模块 12 连接，用于对所述电容模块 11 的充放电状态进行控制以及基于所述状态信号对所述电容模块 11 进行监控。其中，模块控制器 13 可以采用树莓派（Raspberry Pi）或 MCU 实现。

15 通信模块 14，与所述模块控制器 13 连接，用于与其他电源模块的模块控制器 13 或所述电源系统的主控制器 20 通信。

作为示例性的实施例，上述状态信号可以包括电流信号，电压信号，充电回路 112 和/或放电回路 113 触发反馈信号，超级电容器 111 的实时温度、以及充电回路 112 和/或放电回路 113 中功率器件的实时温度，以及通信模块的通信状态信号等。

在本实施例中，上述电流信号可以通过电流传感器采集充电状态或放电状态下的充电回路 112 的充电电流和/或放电回路 113 的放电电流，例如，可以采用霍尔电流传感器分流器或电磁式电流互感器等电流传感器。电压信号可以采用电压传感器采集超级电容器 111 的电压，
25 例如，超级电容器 111 空闲状态的电压，也可以采用电流传感器采集充电过程中或放电过程中的电流，进而通过电流计算超级电容器 111 的电压。

在本实施例中，对于温度信号的采集可以利用温度传感器进行采集。对于触发反馈信号的采集可以通过反馈电路和对应的反馈端对反馈电路的电压或电平变化进行采集。

在一些磁约束聚变装置中磁体的驱动电源中存在采用电容储能方

式构建电源系统的相关技术，具体为，先通过多个电容以阵列的形式构成电容器组，作为储能元件，电容器组与逆变器连接以对线圈进行放电，其中逆变器的作用在于控制开关、调制电流波形。然而，目前
5 能量密度低，导致以此为基础的电源储能小，使得放电时间较短，无法满足聚变装置在放电过程中电源持续缓慢放电的要求。因此，在本实施例中，采用能量密度更高的超级电容器，克服了电解电容储能低的缺点，能够用于较长时间放电。

在一种实施例中，磁约束聚变装置在实际应用时，负载可能会发
10 生变化，因此，为了能够适应更多负载的情况，使得电源系统在为磁约束聚变装置供电时可拓展性和可靠性更高，每一电源模块可以具有超级电容器 111 以及可以为超级电容器 111 进行独立充电和独立放电的充电回路 112 和放电回路 113，并且，每一电源模块还设置有独立的信号采集模块 12 和模块控制器 13，通过信号采集模块 12 采集电容模
15 块 11 的状态信号，通过模块控制器 13 对电容模块 11 实现独立的充放电状态控制和监控，进而可以使得每一电源模块独立运行。因此，本实施例中的电源模块可以作为磁约束聚变装置中磁体的电源系统的一个通用模块按照目标需求电压和/或目标需求电流进行灵活的组装。进而可以在不影响磁体的电源系统正常工作的情况下，维护单个电源模
20 块；在目标需求电压和/或目标需求电流发生变化（负载发生变化）时，只需要按照新的目标需求电压和/或新的目标需求电流适应性的增加电源模块的串联数量和/或并联数量即可，具有较强的通用性和较为简易的维护性。

在本实施例中，每个电源模块中的模块控制器 13 可通过各自的信
25 号采集模块 12 采集当前电源模块中的状态信号，并且，可以通过通信模块与主控制器 20 通信，进而使得通过多个电源模块构建的电源系统能够被实时分析，自动报警，在出现问题时能够立即发现，并且精准定位问题所在。同时，由于每个电源模块都能够被独立触发，有独立的工作状态监测，因此可以独立做反馈控制，为使用载波移相技术调
30 制总电流波形提供了可能性，而且多个模块并联将能以一个极高的等效开关频率将电流纹波降至极小。

图 2 为本申请实施例所述的电源模块的电路原理示意图。如图 2 所示，以单个电源模块的示例性的电路原理图对电源模块的工作原理进行详细介绍。

电容模块 11 可以包括超级电容器 111，充电电路 112 和放电电路 113。其中，放电电路 113 可以包括：开关电路 1131 和开关电路的驱动单元 1132，其中，开关电路 1131 包括第一控制开关 Q1 和续流元件，所述驱动单元 1132 与所述第一控制开关 Q1 的控制端连接，所述第一控制开关 Q1 与所述续流元件串联在所述超级电容器 111 的两端，所述续流元件两端用于通过所述母线与所述磁体线圈连接。

作为示例性的实施例，第一控制开关 Q1 可以采用 IGBT，MOS 管。继电器等可控开关器件，为了保证耐压等级和开关速率，在本实施例中，可以以 IGBT 为例进行说明：

第一控制开关 Q1 的栅极与驱动单元 1132 连接，用于在驱动单元 1132 的驱动下开通和关闭，第一控制开关 Q1 的集电极与超级电容器 111 的正极连接，第一控制开关 Q1 的发射极分别与母线的正极连接，并连接值续流元件的负极，续流元件的正极分别与母线的负极和超级电容器 111 的负极连接。

所述驱动单元 1132 在接收到放电指令时，控制所述第一控制开关 Q1 闭合，导通所述超级电容器 111 与所述母线之间的连接，所述超级电容器 111 通过所述母线向所述磁体放电；所述驱动单元 1132 在接收到停止放电指令时，控制所述第一控制开关 Q1 断开，以断开所述超级电容器 111 与所述母线之间的连接，所述磁体可通过母线和所述续流元件形成续流回路，释放所述磁体中的电量。

在本实施例中，续流元件可以采用续流二极管，续流二极管的正极与超级电容器 111 的负极连接，并连接在母线的负极，续流二极管的负极分别与第一控制开关 Q1 的发射极和母线的正极连接，第一控制开关 Q1 的集电极与超级电容器 111 的正极连接。

在一种实施例中，续流元件还可以采用 IGBT，即与第一控制开关 Q1 相同的第二控制开关 Q2，其中，第二控制开关 Q2 的发射极分别与超级电容器 111 的负极连接，并连接在母线的负极；第二控制开关 Q2 的集电极分别与第一控制开关 Q1 的发射极和母线的正极连接。在放电

过程和停止放电过程中，第二控制开关 Q2 一直处于关断状态，利用其反向并联的二极管进行续流。

作为示例性的实施例，每一电源模块中还设置有独立的充电回路 112，充电回路 112 可以包括第三控制开关，其中，第三控制开关的控制端与模块控制器 13 连接，第三控制开关的一端用于与充电电源连接，另一端与超级电容器 111 连接，在本实施例中，各个电源模块的模块控制器 13 可控制充电回路 112 对超级电容器 111 进行独立充电控制。

在本实施例中，充电电源可以为低压直流电源，与外部电源连接，例如，与 220V/380V/110V 交流电源连接，将外部电源的电压转换成可对超级电容器 111 充电的电压，在本实施例中，充电电源可以包括整流电路，将交流电转换成为超级电容器充电的直流电压；在外部电源为直流电电源时，充电电源采用直流电压转换电路，例如，BUCK 变换器、BUOOST 变换器或 BUCK-BOOST 变换器。

在一种实施例中，充电电源还可以复用为模块控制器 13、驱动单元 1132 等需要低压直流电供电的供电电源。在本实施例中，可以将外部电源转为 15V 和/或 24V 直流电源，以提供电源模块上所需的低压供电。

图 3 显示了本申请另一个实施例所述的电源模块的结构。作为示例性的实施例，如上述图 2 和图 3 所示，每一电源模块还可以包括模块保护单元 15，该模块保护单元 15 设置在放电回路 113 中，用于对电源模块进行保护。

在本实施例中，模块保护单元 15 可以为电源模块在工作状态下，或非工作状态下提供独立的保护功能，相当于将把整体电源系统的风险分散到了单个电源模块上。这样，单个电源模块即使发生问题，由于单个电源模块均具有模块保护单元 15，可以独立的进行保护，因此对其他模块影响也较小，并且单个电源模块的电压和电流等级较低，因此，可以减小发生事故时引起剧烈能量，进而保证整体电源系统的安全。

由于超级电容器 111 可能存在差异，并且，在多个电源模块搭建电源系统时，各个电源模块中的超级电容器 111 充电状态，电量和放电状态可能存在不一致的情况，在电源系统放电时，可能存在各个电

源模块放电电流不一致。

在一种实施例中，模块保护单元 15 可以包括：均流电路 151，设置在所述放电回路 113 中，用于所述多个电源模块搭建所述电源系统时，对所述超级电容器 111 的放电电流进行均流。在本实施例中，通过均流模块对电源系统中的各个电源模块的放电电流进行均衡，保证并联模块间电流的均一性。

在一种实施例中，上述均流电路 151 可以包括均流电阻 R1，如图 2 所示，该均流电阻 R1 可以串联在超级电容器 111 输出端，即串联在超级电容器 111 和第一控制开关 Q1 的漏极之间，如果该当前电源模块的输出电流比较高，在均流上的压降就升高，从而使输出电流降低，达到均流的目的。

在另一种实施例中，均流电路 151 可以包括动态均流电路，动态均流电路可以与信号采集模块 12 或模块控制器 13 连接，基于当前电源模块输出电流实时调整当前电源模块输出的压降，进而基于当前电源模块实际输出电流与理论输出电流之间的差值调整当前电源模块输出的电流，进而使得输出电流与理论输出电流相同，从而实现均流的目的。

在本实施例中，上述动态均流电路可以复用第一控制开关，通过第一控制开关的占空比动态调整当前的电源模块的放电电流，在本实施例中，模块控制器在获取到电源模块的实时放电电流后，基于实时放电电流确定第一控制开关的占空比，并向驱动单元输出占空比控制指令，以使驱动单元按照对应的占空比控制第一控制开关，进而可以实时动态到的调整放电电流。

在另一种实施例中，上述动态均流电路还可以包括第四控制开关，串联连接在放电回路中，模块控制器在获取到电源模块的实时放电电流后，基于实时放电电流确定第四控制开关的占空比，进而可以实时动态到的调整放电电流。

作为示例性的实施例，模块保护单元 15 可以包括：泄放电路 152，分别与所述超级电容器 111 和所述模块控制器 13 连接，用于在所述模块控制器 13 的触发下对所述超级电容器 111 中的电量进行泄放。

示例性的，泄放电路 152 可以包括泄放电阻和泄放控制单元，其

中泄放控制单元与模块控制器 13 连接，用于在模块控制器 13 的触发下导通或关断泄放电阻与超级电容器 111 之间的通路。在本实施例中，泄放电阻可以采用水冷电阻，能够在泄放超级电容器 111 中剩余电量时，具有足够的散热能力。

5 在本实施例中，电源系统在工作结束后，模块控制器 13 可以控对应的泄放控制单元导通对应的泄放电阻和超级电容器 111 之间的通路，进而将超级电容器 111 上残余的能量释放。单个电源模块有独立的充电和泄放控制能力，不仅可以提升泄放效率，减少能量泄放时的热量集中问题，并且因此能够成为一个有着完备和独立放电能力的电源。

10 作为示例性的实施例，为了保证在出现事故后，超级电容器 111 中的剩余的能量能够被安全及时的泄放，可以为每个电源模块冗余设置多个泄放电路 152。

作为示例性的实施例，所述模块保护单元 15 还可以包括：缓冲电路 153，并联在所述放电回路 113 中，用于对所述放电回路 113 关断时的尖峰脉冲进行缓冲。示例性的，缓冲电路 153 可以并联在超级电容器 111 和第一控制开关 Q1 之间，包括第一电阻 R2，第一电容 C1 和第一二极管 D1，其中第一电阻 R2 的一端连接在超级电容器 111 和第一控制开关 Q1 的集电极之间，另一端与第一电容 C1 的正极连接，第一电容 C1 的负极与超级电容器 111 的负极（母线负极）连接；第一二极管 D1 与第一电阻 R2 并联，其中，第一二极管 D1 的负极连接在超级电容器 111 和第一控制开关 Q1 的集电极之间，第一二极管 D1 的正极与第一电容 C1 的正极连接。

25 由于从超级电容器 111 到第一控制开关 Q1 的母线有较大的分布电感，在第一控制开关 Q1 关断后母线上会产生较大的尖峰电压，可能对其他元件造成过压破坏，使用缓冲电路 153 防止尖峰的产生。关断时，电流通过第一二极管 D1 快速对第一电容 C1 充能，因此母线两端电压由第一电容 C1 控制住，与第一二极管 D1 并联的第一电阻 R2 能够对第一电容 C1 上的能量进行消耗，进而防止电路振荡。

30 作为示例性的实例，上述缓冲电路 153 还可以并联在第一控制开关 Q1 的集电极和发射极之间，并包括，第二电阻 R3，第二二极管 D2 和第二电容 C2，其中第二电阻 R3 的一端与第一控制开关 Q1 的集电极

连接，另一端与第二电容 C2 的正极连接，第二电容 C2 的负极与第一控制开关 Q1 的集电极连接，第二二极管 D2 的负极与第一控制开关 Q1 的集电极连接，第二二极管 D2 的正极与第二电容 C2 的正极连接。在第一控制开关 Q1 关断时，对于电路中产生的尖峰脉冲的缓冲原理与上述实施例中缓冲电路 153 的原理相同，在本实施例中不再赘述。

作为示例性的实施例，上述保护单元还可以包括过流/过压保护电路 154，设置在所述放电回路 113 中，用于对所述放电回路 113 进行过流/过压保护。在本实施例中，过流/过压保护电路 154 可以包括设置在超级电容器 111 的输出端串联熔断器 F1 作为过流保护器件，在输出电流过大时，熔断器 F1 通断，切断当前电源模块放电回路 113。

上述过流/过压保护电路 154 还可以包括：并联在电源模块输出端的压敏电阻 R4，在母线电压过高时，压敏电阻 R4 能够保护超级电容器 111 模块 11 不发生 overvoltage 损坏。

基于上述电源模块，本申请实施例还提供了一种电源系统。图 4 为本申请实施例所述的电源系统的示意图。如图 4 所示，该电源系统可以采用多个上述实施例中电源模块搭建而成。其中，上述多个电源模块可以通过并联或串联的形式搭建上述电源系统。在本实施例中，多个所述电源模块串联和/或并联在所述母线上，向所述磁体供电。

如图 4 所示，上述电源系统还包括：主控制器 20，分别通过所述通信模块与每个所述电源模块的模块控制器 13 通信，用于接收每个所述电源模块的状态信号，并基于所述状态信号控制所述电源系统的工作状态。

在本实施例中，每一电源模块具有独立的单位电压和单位电流输出能力的完备电源，在确定磁体所需的目标电压和目标电流后，通过计算目标电流与单位电流之间的倍数关系，确定电源模块的并联数量，通过计算目标电压与单位电压之间的额倍数关系确定多个并联支路的数量。

示例性的，每一电源模块中的超级电容器 111 的输出单位电压为 129V，输出的单位电流为 1.2kA，磁约束聚变装置中磁体所需电流为 110KA，因此，通过并联大于或等于 126 个电源模块，对磁体供电，在磁体的内阻 $R=0.93m\Omega$ ，自感 $L=590\mu H$ 的情况下，电源系统能够输

出最高电流 $I_{peak} > 110\text{kA}$ ，放电时长 $t > 1\text{s}$ ，对应在托卡马克磁轴处场强 $B_T > 1\text{T}$ 。

因此，通过多个电源模块的并联和/或串联即可适应性的搭建磁体所需的目标电流和目标电压。主控制器 20 分别每个所述电源模块的模块控制器 13 通信，在放电过程中，模块控制器 13 通过自身的信号采集模块 12 采集放电过程中当前电源模块的实时电流信号，放电回路 113 的触发状态信号等上传至主控制器 20，主控制器 20 能够基于每一模块控制器 13 上传的每一电源模块的工作状态监控各个电源模块的运行状态。在放电之前或空闲状态，模块控制器 13 可以通过信号采集装置采集的超级电容器 111 的电压、温度、开关电路的温度，开关电路的驱动供电状态等状态信息上传至主控制器 20，主控制器 20 能够对整个电源系统的状态进行实时分析，自动报警，因此在出现问题时能够立即发现，并且精准定位问题。

作为示例性的实施例，为了保证各个电源模块的运行状态是同步的，在本实施例中，电源系统还包括时钟同步模块 30，分别与多个所述电源模块连接，用于同步多个所述电源模块的动作时钟。

作为示例性的实施例，由于电源系统是通过多个电源模块通过并联和/或串联构建而成，多个电源模块作为一个整体对磁体进行放电，在本实施例中，各个电源模块的放电回路 113 通过可通过主控制器 20 统一进行控制，示例性的，主控制器 20 电源模块的放电回路 113 连接，用于向所述放电回路 113 输出放电控制指令和停止放电控制指令，以控制所述放电回路 113 放电或停止放电。主控制器 20 可以分别与每一电源模块中放电回路 113 的第一控制开关 Q1 的控制端连接，在需要进行放电时，主控制器 20 输出放电指令，同时控制所有电源模块的第一控制开关 Q1 闭合，所有电源模块开始放电，在需要停止放电时，主控制器 20 输出停止放电指令，同时控制所有电源模块的第一控制开关 Q1 断开，以停止放电。

在本实施例中，为了使得开关指令对所有电源模块的第一控制开关同时触发，在主控制器 20 和各个电源模块之间设置有第一同步单元 31，在第一同步单元 31 接收到主控制器 20 发送的指令后，将指令同步至各个电源模块，以保证各个电源模块的运行动作处于同步状态。

在一种实施例中，如图 4 所示，第一同步单元 31 可以包括多路并联的光纤触发器，该光纤触发器的输入端与主控制器 20 的开关指令输出端连接，光纤触发器同步输出开关指令，以控制各个电源模块的开关处于同步状态，在本实施例中，光纤触发器可以保证开关延迟均小于 1 μ s，模块间同步误差小于 50ns，能够满足电源系统中多个电源模块同时放电的需求。

在另一种实施例中，主控制器 20 在对各个电源模块的状态进行判断时，各个电源模块的状态信息也是需要同步的，因此，各个模块控制器 13 之间还设置有第二同步单元 32，该第二同步单元 32 分别与所述模块控制器 13 连接，用于同步所述模块控制器 13 之间的时钟，作为示例性的实施例，第二同步单元 32 可以将多个电源模块中的一个电源模块的时钟作为主时钟，通过精密时协议 (Precision Timing Protocol, PTP) 将其余电源模块的时钟进行同步。

此外，第二同步单元 32 还可以采用卫星时钟同步系统对各个电源模块的时钟进行同步。在本实施例中，第二同步单元 32 还可以采用其他时钟同步方式，例如，采用网络时间协议 (Network Time Protocol, NTP)；时间敏感网络 (Time-Sensitive Networking, TNS) 等时钟同步方式将各个电源模块中的时钟进行不同。

作为示例性的实施例，在放电之前，主控制器 20 基于所述状态信号判断各个所述电源模块是否处于正常状态，以确保电源系统能够正常放电。示例性的，主控制器 20 通过汇总各个电源模块的模块控制器 13 上传的电源模块状态信息，分别对每一电源模块的状态进行检测，例如，检测每一电源模块中超级电容器 111 的电压，温度、第一控制开关 Q1 的温度，第一控制开关 Q1 的驱动单元的供电状态等，通过电源模块的状态信息判断当前的电源模块是否具备放电条件。若超级电容器 111 的电压小于预设电压值，超级电容器 111 的温度超过第一预设温度值，第一控制开关 Q1 的温度超过第二预设温度值，第一控制开关 Q1 的驱动供电状态为未供电，可能会导致放电失败，因此，可禁止当前电源模块放电。

在另一种实施例中，在放电之前，主控制器 20 还检测各个模块控制器与主控制器 20 之间的通信状态是否正常，以及主控制器 20 与各

个电源模块的放电回路 113 的远程控制是否处于在线状态，在通信状态正常时，且，远程控制处于在线状态时，确认可以放电，在通信状态异常或远程控制处于掉线状态，则禁止对应的电源模块放电。

由于电源系统是多个电源模块搭建而成，若电源系统中的某一个或某几个电源模块的电压较小，或超级电容器 111 未充电，在放电时，可能会发生电流倒灌的情况。在另一种实施例中，主控制器 20 还可以基于电源模块的状态信号判断各个电源模块之间的压差是否大于预设压差，当大于预设压差时，检测对应电源模块的电压，在电压小于预设电压时，禁止对应的电源模块放电，以防止其他电源模块对当前电源模块倒灌电流。

为了减小电源系统的停机频次，在本实施例中，在一些电源模块不具备放电条件时，可以判断不具备放电条件的电源模块的数量是否少于预设数量，当少于预设数量时，确认剩余电源模块放电可以满足磁体对电流和电压的需求，因此，可以将不具备放电条件的电源模块屏蔽，其他电源模块正常放电。

在本实施例中，每一电源模块的模块控制器还可以单独控制当前电源模块的放电回路 113 中的第一控制开关 Q1，在进行放电之前，若电源模块不满足放电条件，且不具备放电条件的电源模块的数量小于预设数量时，主控制器 20 可以向模块控制器 13 发送屏蔽对应电源模块放电的指令，以使模块控制器 13 控制放电回路 113 和充电回路 112 保持断开状态。

作为示例性的实施例，在电源模块中放电回路 113 与主控制器 20 之间可以串联有第四控制开关，第四控制开关的控制端与模块控制器 13 连接，在模块控制器 13 接收到主控制器 20 的屏蔽指令时，模块控制器 13 控制第四控制开关断开放电回路 113 与主控制器 20 之间的连接，进而使主控制器 20 对当前电源模块的控制失能，进而使得主控制器 20 发送的放电指令不触发当前电源模块的放电回路 113 中的第一控制开关 Q1，第一控制开关 Q1 保持断开，在电源系统满足磁体用电需求的情况下，能够防止其他模块对当前电源模块的电流倒灌。即便是在一些电源模块不具备放电条件的情况下，电源系统依然能够对磁体供电的同时，还可以保护不具备放电条件的电源不会发生电流倒灌或

过流过压损坏的情况。

由此可以看出，在本公开的实施例中，每一电源模块可以具有超级电容器以及可以为超级电容器进行独立充电和独立放电的充电回路和放电回路，并且，每一电源模块还设置有独立的信号采集模块和模块控制器，通过信号采集模块采集电容模块的状态信号，通过模块控制器对电容模块实现独立的充放电状态控制和监控，进而可以使得每一电源模块独立运行。因此，本实施例中的电源模块可以作为磁约束聚变装置中磁体的电源系统的一个通用模块按照目标需求电压和/或目标需求电流进行灵活的组装。进而可以在不影响磁体的电源系统正常工作的情况下，维护单个电源模块；在目标需求电压和/或目标需求电流发生变化时，只需要按照新的目标需求电压和/或新的目标需求电流适应性的增加电源模块的串联数量和/或并联数量即可，具有较强的通用性和较为简易的维护性。

进一步，每一电源模块还可以包括模块保护单元，模块保护单元可以为电源模块在工作状态下，或非工作状态下提供独立的保护功能，相当于将把整体电源系统的风险分散到了单个电源模块上，单个电源模块即使发生问题，由于单个电源模块均具有模块保护单元，可以独立的进行保护，因此对其他模块影响也较小，并且单个电源模块的电压和电流等级较低，因此，可以减小发生事故时引起剧烈能量，进而保证整体电源系统的安全。

进一步，均流电路设置在所述放电回路中，用于所述多个电源模块搭建所述电源系统时，对所述超级电容器的放电电流进行均流。通过均流模块对电源系统中的各个电源模块的放电电流进行均衡，保证并联模块间电流的均一性。

进一步，模块保护单元还包括泄放电路，分别与所述超级电容器和所述模块控制器连接，用于在所述模块控制器的触发下对所述超级电容器中的电量进行泄放。电源系统在工作结束后，模块控制器可以控对应的泄放控制单元导通对应的泄放电阻和超级电容器之间的通路，进而将超级电容器上残余的能量释放。不仅可以提升泄放效率，减少能量泄放时的热量集中问题，并且单个电源模块有独立的充电和泄放控制能力，因此能够成为一个有着完备和独立放电能力的电源。

进一步，通过多个电源模块的并联和/或串联即可适应性的搭建磁体所需的目标电流和目标电压。主控制器分别每个所述电源模块的模块控制器通信，在放电过程中，模块控制器通过自身的信号采集模块采集放电过程中当前电源模块的实时电流信号，放电回路的触发状态信号等上传至主控制器，主控制器能够基于每一模块控制器上传的每一电源模块的工作状态监控各个电源模块的运行状态。在放电之前或空闲状态，模块控制器可以通过信号采集装置采集的超级电容器的电压、温度、开关电路的温度，开关电路的驱动供电状态等状态信息上传至主控制器，主控制器能够对整个电源系统的状态进行实时分析，自动报警，因此在出现问题时能够立即发现，并且精准定位问题。

进一步，各个电源模块的放电回路可通过主控制器统一进行控制，为了使得开关指令对所有电源模块的第一控制开关同时触发，在主控制器和各个电源模块之间设置有第一同步单元，在第一同步单元接收到主控制器发送的指令后，将指令同步至各个电源模块，以保证各个电源模块的运行动作处于同步状态。

进一步，各个模块控制器之间还设置有第二同步单元，该第二同步单元分别与所述模块控制器连接，用于同步所述模块控制器之间的时钟，可以保证模块控制器之间的时钟误差较小，进而能够使得主控制器接收到的各个电源模块的模块控制器上传的状态信号是同步的。

以上所述仅是本申请的优选实施方式，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本申请原理的前提下，还可以做出若干改进和润饰，这些改进和润饰也应视为本申请的保护范围。

权 利 要 求 书

1、一种电源模块，包括：

电容模块，包括超级电容器、充电回路和放电回路；其中，所述充电回路用于与充电电源连接，对所述超级电容器充电；所述放电回路用于通过母线与磁约束聚变装置中的磁体连接，对所述磁体放电；

信号采集模块，与所述电容模块连接，用于采集所述电容模块的状态信号；

模块控制器，分别与所述电容模块和所述信号采集模块连接，用于对所述电容模块的充放电状态进行控制以及基于所述状态信号对所述电容模块进行监控；以及

通信模块，与所述模块控制器连接，用于与其他电源模块的模块控制器或电源系统的主控制器通信；其中，所述电源系统由多个所述电源模块形成，用于对所述磁体供电。

2、如权利要求1所述的电源模块，还包括：模块保护单元，设置在所述放电回路中，用于对所述电源模块进行保护。

3、如权利要求2所述的电源模块，其中，所述模块保护单元包括如下电路中的至少之一：

均流电路，用于对所述电源系统中各个电源模块的各个所述超级电容器的放电电流进行均流；

泄放电路，分别与所述超级电容器和所述模块控制器连接，用于在所述模块控制器的触发下对所述超级电容器中的电量进行泄放；

缓冲电路，用于对所述放电回路关断时的尖峰脉冲进行缓冲；以及

过流/过压保护电路，用于对所述放电回路进行过流/过压保护。

4、如权利要求1所述的电源模块，其中，所述放电回路包括：第一控制开关，续流元件和驱动单元；其中，

所述驱动单元与所述第一控制开关的控制端连接；

所述第一控制开关与所述续流元件串联在所述超级电容器的两端；以及

所述续流元件两端用于通过所述母线与所述磁体线圈连接。

5、如权利要求4所述的电源模块，其中，所述驱动单元在接收到放电指令时，控制所述第一控制开关闭合，导通所述超级电容器与所述母线之间的连接，所述超级电容器通过所述母线向所述磁体放电；

所述驱动单元在接收到停止放电指令时，控制所述第一控制开关断开，以断开所述超级电容器与所述母线之间的连接，所述磁体可通过母线和所述续流元件形成续流回路，释放所述磁体中的电量。

6、如权利要求4所述的电源模块，其中，所述续流元件包括第二控制开关；其中，所述第二控制开关与所述第一控制开关串联，所述第二控制开关的控制端与所述驱动单元的输出端连接。

7、如权利要求1所述的电源模块，其中，所述电源系统由多个所述电源模块基于所述磁体的目标需求电量通过串和/或并联后形成。

8、一种电源系统，包括：

多个如权利要求1-7任意一项所述的电源模块；其中，多个所述电源模块连接在所述母线上，向所述磁体供电；以及

主控制器，分别通过所述通信模块与每个所述电源模块的模块控制器通信，用于接收每个所述电源模块的状态信号，并基于所述状态信号控制所述电源系统的工作状态。

9、如权利要求8所述的电源系统，还包括：时钟同步模块，分别与多个所述电源模块连接，用于同步多个所述电源模块的动作时钟。

10、如权利要求9所述的电源系统，其中，

所述主控制器分别与所述电源模块的放电回路连接，用于向所述放电回路输出放电指令或停止放电指令，以控制所述放电回路放电或停止放电；

所述时钟同步模块包括第一同步单元，连接在所述主控制器和所述放电回路之间，用于向所述放电回路同步所述放电指令或所述停止放电指令。

11、如权利要求9所述的电源系统，其中，所述时钟同步模块还包括第二同步单元；其中，

所述第二同步单元分别与所述模块控制器连接，用于同步所述模块控制器之间的时钟。

12、如权利要求8所述的电源系统，其中，所述主控制器在输出

放电指令之前，基于所述状态信号判断各个所述电源模块是否处于正常状态；以及当所述电源模块处于正常状态时，输出所述放电指令。

13、如权利要求 12 所述的电源系统，其中，当存在处于异常状态的电源模块时，所述主控制器或所述模块控制器屏蔽所述处于异常状态
5 的电源模块。

14、如权利要求 8 所述的电源系统，其中，多个所述电源模块串联和/或并联在所述母线上。

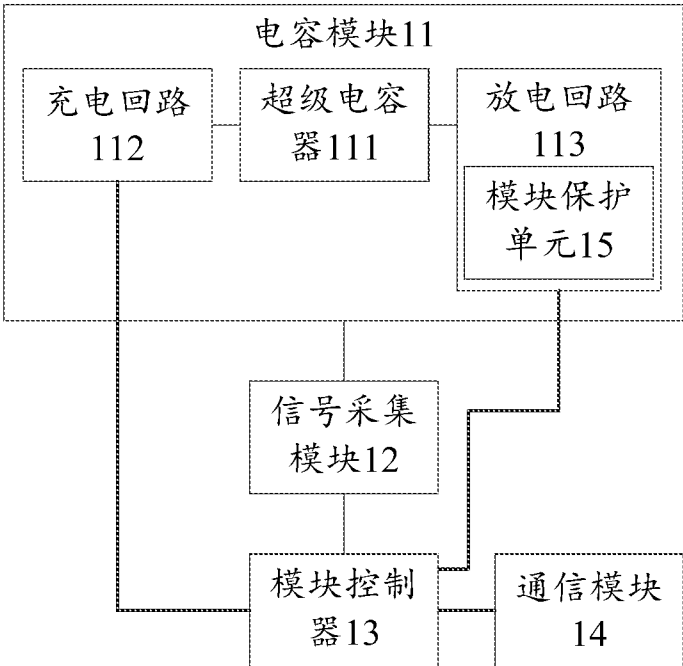


图 1

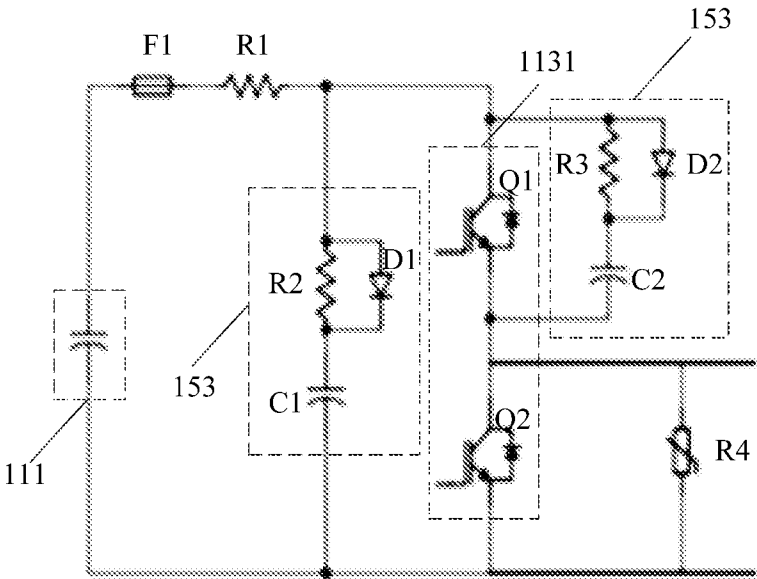


图 2

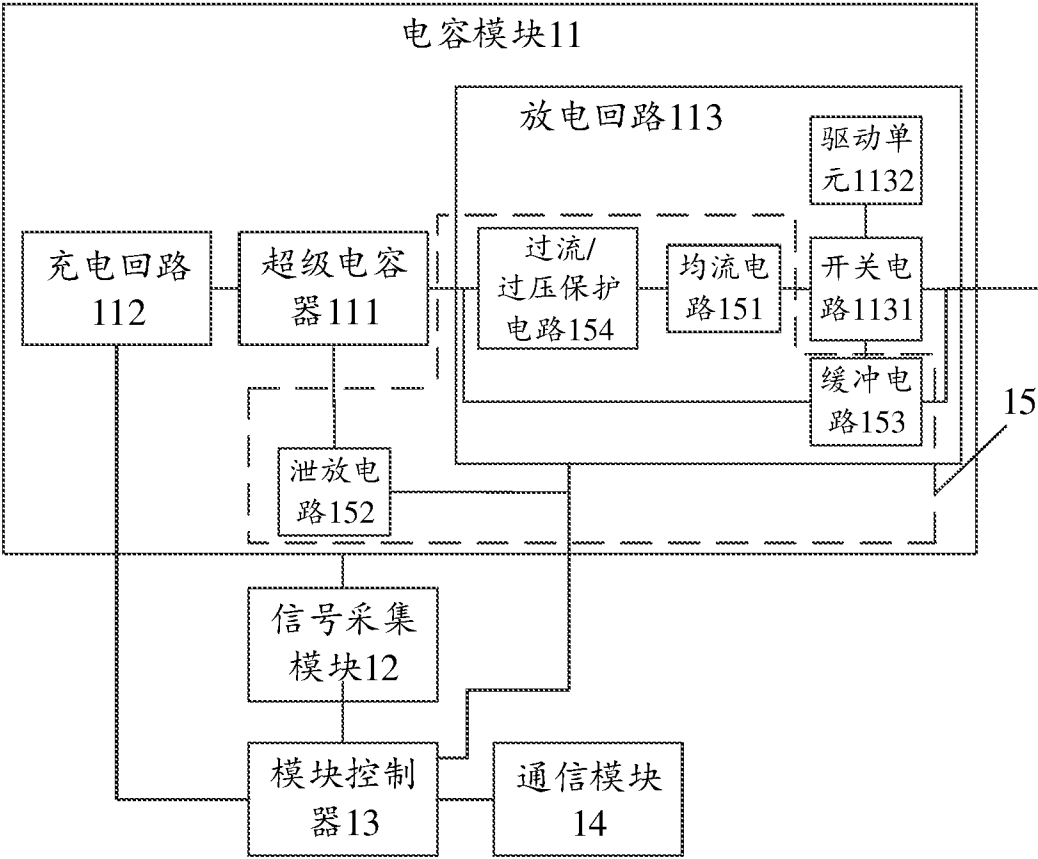


图 3

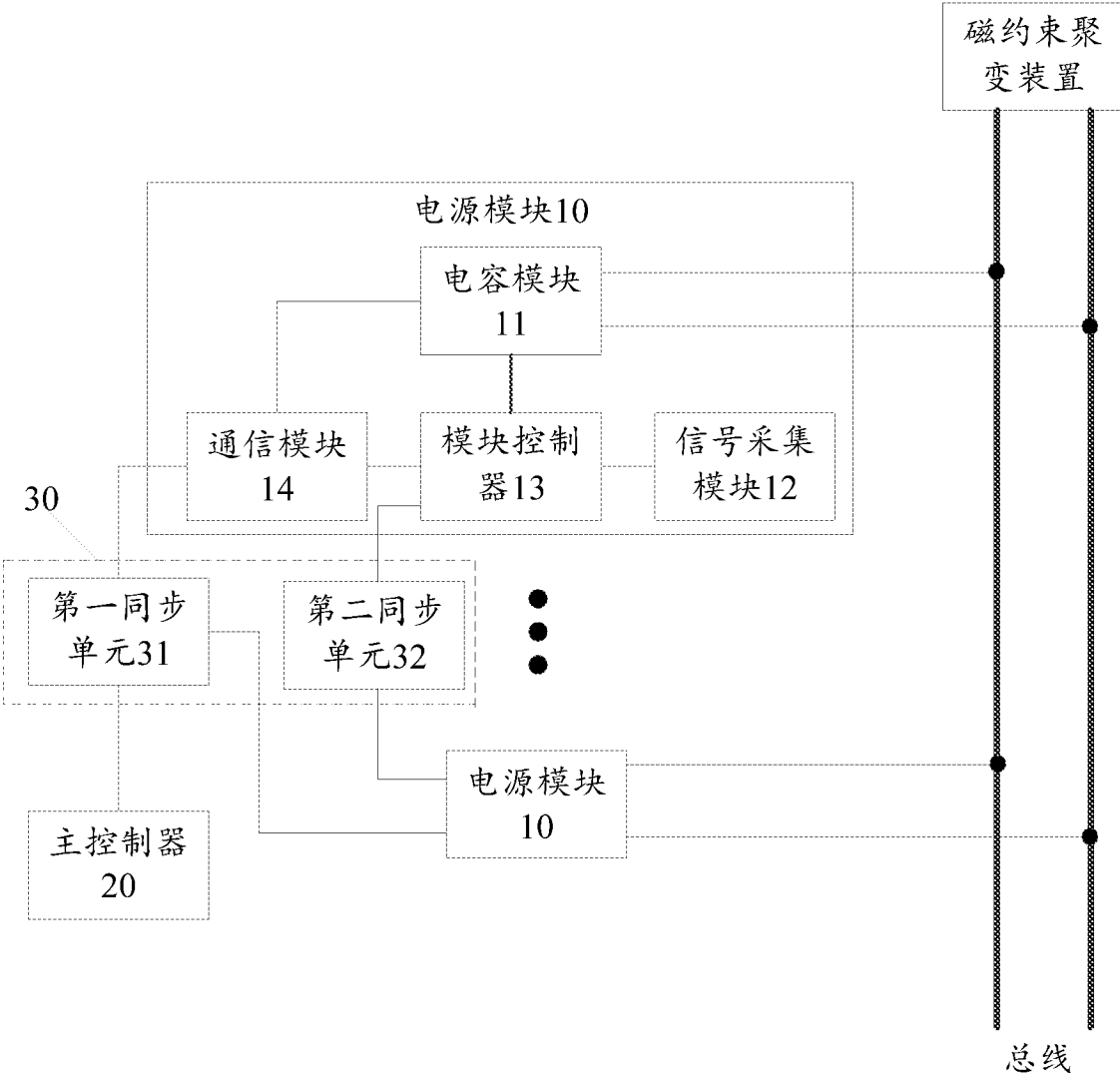


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2024/072886

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H02J 7/00(2006.01)i; H02J 7/34(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H02J Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) VEN, CNABS, CNTXT, WOTXT, EPTXT, USTXT, CNKI, IEEE: 超级电容, 磁约束, 聚变, 放电, 缓冲, 均流, 母线, 时钟, 同步, Super capacitor+, magnetic limit+, discharg+, synchronous, clock		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 114629221 A (HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) 14 June 2022 (2022-06-14) description, paragraphs 0049-0068, and figures 1-4	1-14
Y	CN 110460153 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 15 November 2019 (2019-11-15) description, paragraphs 0029-0040, and figures 1-2 and 5	1-14
A	CN 114844074 A (SHANGHAI AOWEI TECHNOLOGY DEVELOPMENT CO., LTD.) 02 August 2022 (2022-08-02) entire document	1-14
A	CN 116317487 A (SOUTHWESTERN INSTITUTE OF PHYSICS) 23 June 2023 (2023-06-23) entire document	1-14
A	EP 2437386 A1 (PL TECHNOLOGIES AG) 04 April 2012 (2012-04-04) entire document	1-14
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: “A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance “D” document cited by the applicant in the international application “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed “T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art “&” document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 14 March 2024		Date of mailing of the international search report 20 March 2024
Name and mailing address of the ISA/CN China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2024/072886

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	114629221	A	14 June 2022	None			
CN	110460153	A	15 November 2019	None			
CN	114844074	A	02 August 2022	None			
CN	116317487	A	23 June 2023	None			
EP	2437386	A1	04 April 2012	CA	2792602	A1	19 April 2014

A. 主题的分类

H02J 7/00(2006.01)i; H02J 7/34(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H02J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

VEN, CNABS, CNTXT, WOTXT, EPTXT, USTXT, CNKI, IEEE:超级电容, 磁约束, 聚变, 放电, 缓冲, 均流, 母线, 时钟, 同步, Super capacitor+, magnetic limit+, discharg+, synchronous, clock

C. 相关文件

类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 114629221 A (中国科学院合肥物质科学研究院) 2022年6月14日 (2022 - 06 - 14) 说明书0049-0068段, 附图1-4	1-14
Y	CN 110460153 A (清华大学) 2019年11月15日 (2019 - 11 - 15) 说明书第0029-0040段, 附图1-2、5	1-14
A	CN 114844074 A (上海奥威科技开发有限公司) 2022年8月2日 (2022 - 08 - 02) 全文	1-14
A	CN 116317487 A (核工业西南物理研究院) 2023年6月23日 (2023 - 06 - 23) 全文	1-14
A	EP 2437386 A1 (PL TECHNOLOGIES AG) 2012年4月4日 (2012 - 04 - 04) 全文	1-14

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

★ 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“D” 申请人在国际申请中引证的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“p” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2024年3月14日

国际检索报告邮寄日期

2024年3月20日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

授权官员

李坤鹏

电话号码 (+86) 010-53961270

PCT/ISA/210 表(第2页) (2022年7月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2024/072886

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	114629221	A	2022年6月14日	无	
CN	110460153	A	2019年11月15日	无	
CN	114844074	A	2022年8月2日	无	
CN	116317487	A	2023年6月23日	无	
EP	2437386	A1	2012年4月4日	CA 2792602 A1	2014年4月19日