

基于Matlab/Simulink的三相十二脉波整流电路在实验教学中的研究

刘少东¹, 肖瑶², 李瑾瑜², 陈宗桂² (通信作者)

1. 广州中医药大学第一附属医院, 广东广州, 510000

2. 湖南医药学院, 湖南怀化, 418000

摘 要: Simulink是软件Matlab最重要的组件, 专门用于对电路系统进行仿真, 以及对动态系统进行建模、仿真和分析。通过Matlab/Simulink模块对电力电子电路仿真, 可以使学生在不需要做实验的情况下, 结合理论知识形象地认识电路的工作原理。基于Matlab/Simulink建立十二脉波相控整流电路的仿真模型, 详细介绍三相十二脉波相控整流电路仿真模型的建立过程, 分别测试了次级绕组接法是Y/ Δ 情况下, 三相整流电路的输出特性。由于计算机仿真的灵活性, 可以使对电路拓扑和参数的修改极为方便, 并且能够从示波器中形象地观测到各种响应随时间变化的波形, 弥补实验设备不足、实验操作不安全等问题, 使学生对三相十二脉波整流电路的工作特点等核心知识点的认识更为深刻。

关键词: 十二脉波整流电路; Simulink; 可视化仿真技术; 实验教学; 电路拓扑和参数

DOI:10.19772/j.cnki.2096-4455.2025.06.075

0 引言

在医学影像技术本科教学中, 医学影像设备学作为一门核心专业课程, 旨在培养学生掌握各类医学影像设备的结构、工作原理和临床应用能力^[1-3]。然而, 传统的教学方式主要依赖教材和多媒体课件, 这种方式存在诸多不足, 尤其是对电子电路系统的直观理解和体验方面。文字描述虽然详尽, 但往往难以激发学生的兴趣, 更难以让他们真正掌握电路的工作原理。同时, 由于医学影像设备体积庞大、结构复杂, 学校往往难以提供足够的大型影像设备供学生拆卸观察电路结构, 这极大地限制了学生对电路系统的深入理解和实际操作能力的培养。

虚拟仿真教学方法不仅显著提升了学生的学习动机与兴趣, 而且对提高学生的学习效果具有积极作用^[4-7]。由于X线机单元电路原理枯燥乏味、结构复杂, 难以引起初学者的学习兴趣。Simulink作为Matlab的重要组件, 在教学中的价值就显得尤为重要^[8-9]。Simulink提供了一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境, 使得复杂的电子电路系统能够以直观、动态的方式展现出来。通过简单的鼠标操作, 学生可以轻松地构造出电子电路, 并观察其工作状态和结

果。这种直观的教学方式不仅能够激发学生的学习兴趣, 还能够加深他们对电路工作原理的理解。为此, 本文提出应用Matlab/Simulink软件的电力系统仿真工具箱, 为X线机单元电路设计可扩展性强的仿真电路。首先, 通过仿真电路, 学生可以直观地看到电路的组成和连接方式, 了解电路中各个元件的作用和相互影响。其次, 仿真电路可以模拟电路在不同条件下的运行情况, 帮助学生深入理解电路的工作原理和性能特点。此外, 学生还可以根据教学需求自行修改电路参数和元件类型, 进行扩展性强的实验设计, 提高学习的主动性和创造性。

本文以三相十二脉波整流电路为例, 该电路是医学影像设备中常见的电路之一。通过Simulink进行仿真教学, 学生可以自行构建该电路模型, 并实时观察电路在不同输入电压和负载条件下的输出波形和参数变化。通过对比不同条件下的仿真结果, 学生可以深入理解电路的工作原理和性能特点, 提高学习效果 and 兴趣。

1 三相十二脉波整流电路结构及工作原理

三相十二脉波整流电路如图1所示, 三相十二脉波整流电路由12个整流器与两个结构和参数相同的线圈绕组构成^[10-11]。初级绕组是Y形接法, 次级绕组是

基金项目: 湖南省教育厅一般项目《基于先验图像技术校准锥束CT金属伪影在临床上的应用研究》(项目编号: 22C1183)

作者简介: 刘少东 (1999—), 男, 汉族, 湖南怀化人, 本科, 影像技师(初级), 研究方向: 电路虚拟仿真。

通信作者: 陈宗桂 (1989—), 男, 福建莆田人, 讲师, 研究方向: 电路的虚拟仿真在教学中的应用。

采用Y- Δ 的接法。 Δ 接法输出的相电压等于线电压。Y接法输出的线电压超前相应的相电压 30° 。在本研究中, Y形接法的线电压是220 V, 频率为50 Hz。 Δ 形接法的线电压是380 V, 频率为50 Hz。在次级电路上有12个二极管。其中, D_1 、 D_3 和 D_5 组成共阴组, D_2 、 D_4 和 D_6 组成共阴组。它们是对 Δ 形接法输出的电压进行整流得到6个脉冲。 D'_1 、 D'_3 和 D'_5 组成共阴组, D'_2 、 D'_4 和 D'_6 组成共阴组。它们是对Y形接法输出的电压进行整流得到6个脉冲。

当电路正常工作时, 每个时刻需4个二极管导通, 2个为共阴组, 另外2个为共阳组。在满足导通条件的情况下, 共阳组中只有二极管处于最大相电压导通, 另外两个二极管截止。共阴组中只有二极管处于最小相电压导通, 另外两个二极管截止。本电路采用的是三相交流电触发, Y形接法和 Δ 形接法输出的6脉冲幅值相同。但是, 每一个电压相位差为 30° , 这就使得不管是共阴组还是共阳组每一次导通只有1个二极管。根据二极管的工作情况, 故将波形中的一个周期等分成12段, 每段 30° 。在一个完整的正弦周期内, 电路就输出12个脉冲波。这种设计不仅提高了整流效率, 还有效地减少了输出电压的脉动, 使得电路的输出更为稳定和平滑。

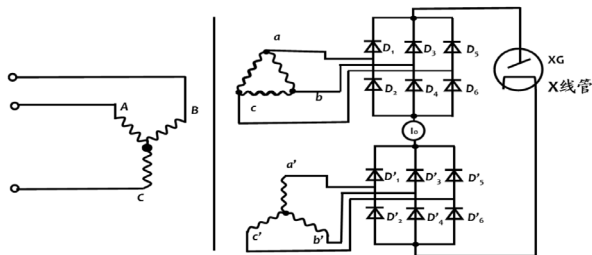


图1 三相十二脉波整流电路示意图

2 建模与仿真

在Matlab/Simulink环境下创建三相十二脉波整流电路的仿真模型, 需要用到Simulink中的各种模块来模拟实际电路的各个组成部分。在电源部分, 选择“AC Voltage Source”模拟三相交流电源, 设定三相电源的电压、频率和相位差。为了模拟整流变压器的功能, 选择“Three-Phase Transformer”模块, 并设置合适的变比和绕组连接方式, 以确保副边两个绕组的相位相差 30° 。在整流桥部分, 选择12个“Diode”模块来搭建整流桥。由于三相十二脉波整流电路需要两组整流桥。因此, 需要添加两组各六个“Diode”模块, 并确保它们按照正确的相位和极性连接。在整流桥之后, 选择“Series RLC Branch”模块模拟X线管, 并

使输出波形降在电阻两端。由于线圈具有滤波作用会使得输出的12个脉冲不明显。因此, 设置模块“Series RLC Branch”中参数Branch type为R。最后, 为了测量和显示仿真结果, 在元件库添加测量模块“Voltage Measurement”和“Current Measurement”模块。这些模块可以测量整流电路中的电压和电流, 并通过示波器等显示模块将结果显示出来。通过以上模块的组合和设置能在Matlab/Simulink环境下创建一个完整的三相十二脉波整流电路的仿真模型, 用于评估和优化整流器的性能。三相十二脉波整流电路的仿真模型如图2所示。

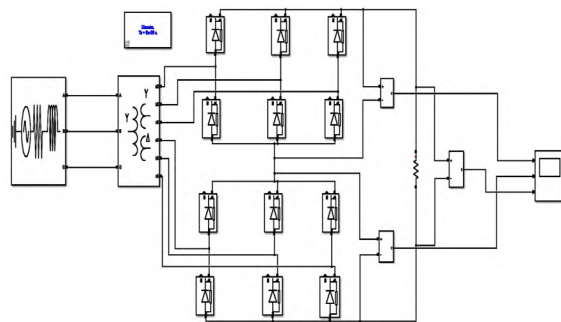


图2 三相十二脉波整流电路的仿真模型

2.1 Y形绕组的建模

在Simulink中构建Y形接法的三相整流电路。首先, 从Simscape的Electrical库中调用所需的模块。在元件库中添加三相交流电源, 将它们作为电路的输入源, 确保这些电源的相位设置正确, 以模拟实际的三相电源。在Simscape的Specialized Power Systems库中, 选择“Three-Phase Transformer”模块中的Y形接法。Y形接法也称为星形接法, 它将三个整流桥输入端与三相电源连接, 同时将整流桥的负极连接到一个公共点, 形成中性线。接下来, 添加六个二极管模块, 用于实现整流功能。这些二极管将按照三相整流电路的标准连接方式组合, 以确保电源正半周时对应的二极管导通, 负半周时截止。在二极管之后, 添加电阻来模拟负载。这些阻抗将连接到三个二极管的输出端, 形成一个Y形负载。为了观察和调试电路, 可以添加示波器和万用表等测量工具。示波器可以显示电源和负载的电压波形, 而万用表则可以测量电路中的电流和电压值。最后, 通过调整AC电源的幅值、频率和相位等参数, 以及二极管的触发方式和时间等参数, 可以模拟不同条件下的三相整流电路运行情况。这些阻抗和负载将模拟实际电路中的电阻、电感和其他电气元件。

2.2 Δ 形绕组的建模

在Simulink中构建三角形接法的三相整流电路需

要从Simulink的库浏览器中选取所需的模块。这包括三相交流电源、整流桥（通常采用六个二极管组成的桥式电路）、电阻元件以及示波器等测量工具。首先，从Simscape/Electrical/Specialized Power Systems库中选择三相交流变压器（Three-Phase Transformer）。根据三角形接法中线圈首尾相接的特点，选择“Three-Phase Transformer”模块中的 Δ 形接法。在构建仿真电路的过程中，确保每个二极管都与相应的交流电源相连，且每个二极管都配置有适当的触发信号，以确保整流过程的正确进行。在交流电的1/6周期内，同时存在两个二极管同时导通，以实现对交流电源的有效整流。在电路构建完成后，在元件库添加测量模块“Voltage Measurement”和“Current Measurement”模块，以观察电路中的电压、电流等参数。通过调整控制信号和负载参数，可以观察整流电路在不同条件下的工作性能，并进行相应的优化和改进。

2.3 三相十二脉冲发生器的建模

为了得到十二脉波直流电压，需要两组三相交流电源，且两组电源间的相位差应是 30° 。相位差的存在有助于产生具有更平滑、更低谐波含量的直流脉动电压。根据电力电子理论，Y形绕组的线电压是其相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，而 Δ 绕组的线电压与相电压则相等^[12-13]。通过合理的匝数比配置，可以确保两组绕组的线电压在数值上相等，从而满足十二脉波直流电压系统的要求。因此，一次侧绕组采用Y形连接，二次侧1号绕组采用Y形连接，2号绕组采用 Δ 形连接的匝数比为 $1:1:\sqrt{3}$ ，令二次侧Y形绕组与二次侧 Δ 绕组的匝数比为 $1:\sqrt{3}$ ，这样可以满足两个二次侧绕组的线电压相等。此外，本设计中变压器的变比设定为 $1:1:\sqrt{3}$ ，这意味着在一次侧和二次侧Y形绕组之间的电压比为 $1:1$ ，而与二次侧 Δ 绕组之间的电压比则为 $1:\sqrt{3}$ 。这种变比设置有助于进一步平衡输出电压的幅值，提高系统的整体性能。

2.4 仿真参数设置

三相电源的仿真参数设置：电压峰值为220 V，频率为50 Hz，相位分别为 0° 、 -120° 和 120° 。三相变压器仿真参数设置：一次绕组连接，选择Y，线电压 $U_1=380$ V，频率为50 Hz；二次绕组连接选择Y，线电压 $U_2=220$ V，频率为50 Hz；三次绕组连接选择Delta (D1)，线电压 $U_2=220$ V，频率为50 Hz，其他参数保持默认值。变压器容量、互感等其他参数可以保持默认值不变。整流器参数使用默认值。RLC负载仿真参数

设置： $R=1\ \Omega$ 。仿真时间可以按需要设置，是任意的，时间越长观察到的波形越多，计算花费的时间也多。一般电阻负载2个电源周期后电路已进入稳态，电感负载因为电流有上升时间，仿真时间也需要长一些，本研究中仿真时间设为0.04 s。

3 仿真模型分析

3.1 电阻性负载的仿真

在三相全波整流电路中，负载为纯电阻，阻值 $R=1\ \Omega$ ，电阻性负载的仿真波形如图3所示。

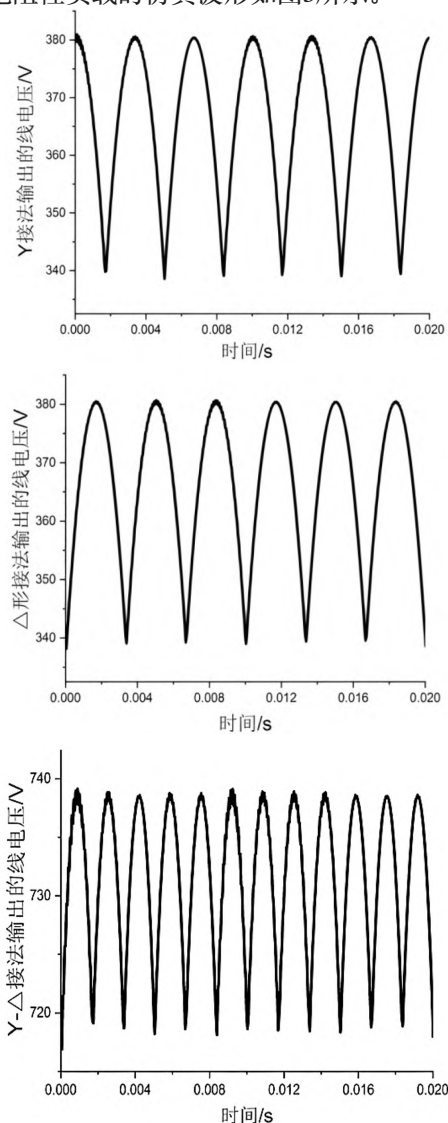


图3 电阻性负载的仿真波形

3.2 电感性负载的仿真

在三相全波整流电路中，在电路中串联线圈，线圈为1 μH ，电感性负载仿真波形如图4所示。

3.3 电容性负载的仿真

在三相全波整流电路中，在电阻旁串联电容，电

容大小为1 μF ，电容性负载仿真波形如图5所示。

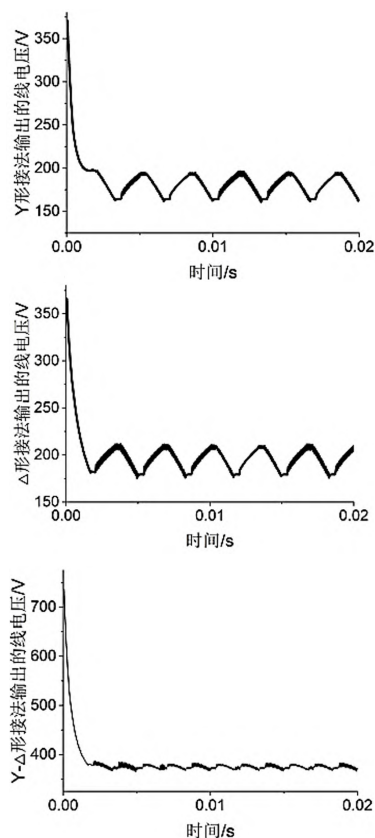


图4 电感性负载的仿真波形

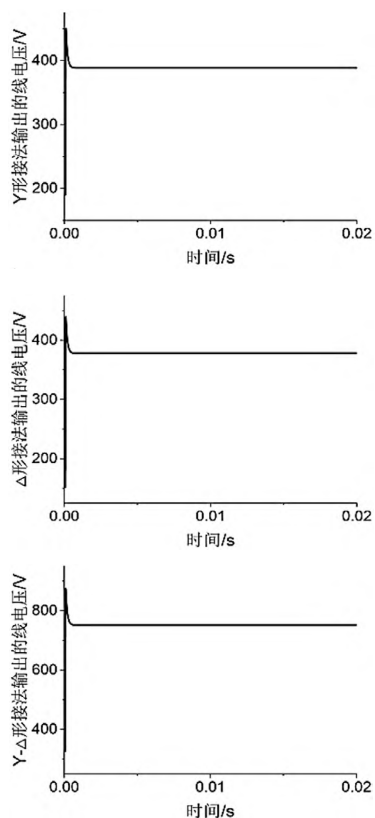


图5 电容性负载仿真波形

4 仿真模型的验证

4.1 数值验证

针对负载是纯电阻型三相十二脉波整流电路次级绕组中Y形接法的相电压为:

$$u_{a'} = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

$$u_{b'} = U_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$u_{c'} = U_m \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (3)$$

根据矢量计算可得Y形接法的线电压为:

$$u_{a'b'} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (4)$$

$$u_{a'c'} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 30^\circ) \quad (5)$$

$$u_{b'c'} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (6)$$

为了得到十二个脉冲波，Y形接法和 Δ 形接法输出的6脉冲幅值相同，且每一个电压相位差为 30° 。因此， Δ 形接法输出的相电压为:

$$u_c = u_{c'} - u_{a'} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t + 60^\circ) \quad (7)$$

$$u_b = u_{b'} - u_{c'} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$u_a = u_{a'} - u_{b'} = \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - 60^\circ) \quad (9)$$

根据矢量计算可得Y- Δ 形接法的线电压为:

$$u_{0^\circ-30^\circ} = 3.35U_m \sin(\omega t + 75^\circ) \quad (10)$$

$$u_{30^\circ-60^\circ} = 3.35U_m \sin(\omega t + 45^\circ) \quad (11)$$

$$u_{60^\circ-90^\circ} = 3.35U_m \sin(\omega t + 15^\circ) \quad (12)$$

$$u_{90^\circ-120^\circ} = 3.35U_m \sin(\omega t - 15^\circ) \quad (13)$$

根据以上公式可得Y- Δ 形接法输出线电压的最大值是 $3.35U_m$ 、最小值是 $3.24U_m$ ，脉动率是 $(U_{\max} - U_{\min}) \div U_{\max} \times 100\% = 3.28\%$ 。在本研究提出的仿真模型中，Y形接法的相电压是220 V，线电压为380 V； Δ 形接法的相电压和线电压都是380 V，Y- Δ 形接法输出两组6个脉冲电压相位差为 30° 。Y- Δ 形接法输出电压的最大值是737 V，最小值是712.8 V，脉动率是3.28%。这与三相十二脉波整流电路仿真结果一致，见表1。

4.2 图形验证

通过三相整流电路实验箱测得模拟X线管两端电压的最大值、最小值、平均值和脉冲率。通过两部分实验数据进行对比可得虚拟仿真电路得到的波形特性（包括最大值、最小值、平均值和脉冲率）与实验箱得到的波形基本一致，见图6。然而，实验箱测得的十二波脉动率略高于仿真结果，且最大值略低于仿真最大值。这一差异可能原因是电子元器件的发热现象^[14-16]。当电子元器件在工作过程中产生热量时，其内部结构和性能可能会发生变化，这直接影响了电路的工作状态。具体来说，元器件的发热可能导致电压的不稳定，进而使得脉动率增加。此外，由于能量的损耗增

表 1 电路实验箱和虚拟仿真电路采集数据的比较

组别	Y 形 - 相电压 /V	最大值 /V	最小值 /V	脉动率 /%	平均值 /V
电路实验箱	220	717.23	692.63	3.43	709.18
虚拟仿真电路	220	737	712.8	3.28	731.65

大,波形在传递过程中的峰值衰减,因此实测的最大值低于仿真中理想化的最大值。本次实验与仿真的对比分析揭示了两者在波形特性上的一致性,同时也指出了存在的微小差异。这些发现不仅提供了关于电子元器件发热对电路性能影响的实际数据,也为未来优化实验条件、提高测量精度提供了方向。

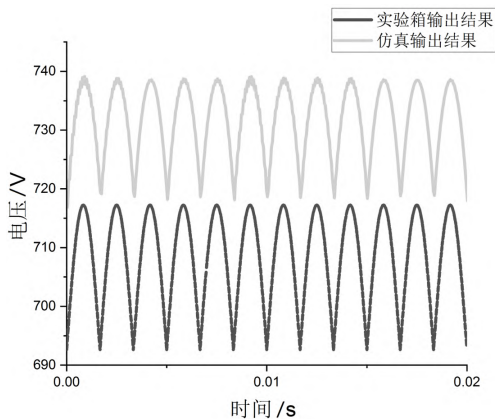


图 6 电路实验箱和虚拟仿真电路的输出波形

5 结论

通过Matlab软件的电力系统仿真工具箱对X线机单元电路进行了仿真实验。理论研究和实验得到的结果一致,进一步证明了应用该软件进行电力电子电路仿真的可行性。因Matlab/Simulink软件独特的仿真功能,研究者能够轻松实现电路拓扑和参数的灵活调整,这一特性极大地简化了电路研究的过程,使得相关工作更为便捷高效。这不仅为研究者提供了极大的便利,也为学生提供了一个将课堂理论知识与实际操作相结合的平台。通过灵活的仿真实验,学生能够更深刻地认知和掌握电力电子电路的工作原理,进而提升他们的学术素养和实践能力。

参考文献

[1] 齐现英,何乐民,唐峰,等. 基于SPOC的递进式“CBL+TBL”翻转课堂在医学影像设备学教学中的探索[J]. 中国高等医学教育,2024(3):114-116.

[2] 王彪,吕俊宏.PBL教学法在《医学影像设备学》课程教学中的应用[J]. 中国继续医学教育,2023,15(20):80-83.

[3] 杜娜娜.理实一体、双师施教教学模式研究:以医学影像设备学课程为例[J]. 中国教育技术装备,2022(13):在97-99,105.

[4] SHENG J, ZHANG C, GAO Z, et al. Virtual versus jaw simulation in inlay preparation preclinical teaching: a randomised controlled trial[J]. BMC med educ, 2022,22(1):841-851.

[5] WANG P, WU S, GAO L, et al. The effect of virtual simulation technology applied to undergraduate teaching of periodontal probing[J]. Eur j dent educ, 2024,28(2):461-470.

[6] LU J, YANG X, ZHAO W, et al. Effect analysis of a virtual simulation experimental platform in teaching pulpotomy[J]. BMC med educ, 2022,22(1):760-767.

[7] 余超凡,周晓云.基于元宇宙的职业教育虚拟仿真实训系统设计:以“计算机组装与维护”课程为例[J]. 实验室研究与探索,2024,43(7):176-182.

[8] MONTES N, ROSILLO N, MORA MC, et al. A novel real-time MATLAB/Simulink/LEGO EV3 Platform for academic use in robotics and computer science[J]. Sensors (Basel),2021,21(3):1006.

[9] RIVERA DE, MISTIRI ME, SHI Z. Using sir epidemic modeling and control to teach process dynamics and control to chemical engineers[J]. IFAC pap online, 2022,55(17):380-385.

[10] 袁发庭,秦实宏,姚湘陵.谐波注入串联三相桥式12脉波整流电路的研究[J]. 电子设计工程,2013,21(2):100-103,107.

[11] 丁硕,郭继宁,张放.12脉波大功率相控整流电路仿真实验教学设计[J]. 渤海大学学报(自然科学版),2021,42(3):264-269.

[12] 申永鹏,刘迪,梁伟华,等.三相桥式逆变电路电流检测方法综述[J]. 电工技术学报,2023,38(2):465-484.

[13] 周群利,余红英,白彩波,等.MATLAB仿真在电力电子技术课程中的应用研究[J]. 中国现代教育装备,2022(11):35-37.

[14] 宋阳,于磊.IGCT驱动电路散热分析与研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2018,33(6):118-123.

[15] LEE KW, YI J, KIM MK, et al. Transparent radiative cooling cover window for flexible and foldable electronic displays[J]. Nat commun, 2024,15(1):4443-4453.

[16] YANG K, YANG X, LIU Z, et al. Vertically aligned boron nitride nanosheets films for superior electronic cooling[J]. ACS appl mater interfaces, 2023,15(23):28536-28545.