

# 电力电子技术实验指导书

电气工程实验中心 王丹丹 王明彦 编

2024 年 1 月

## 学生实验守则

实验时应保证人身安全，设备安全，爱护国家财产培养科学作风。为此，在本实验室应遵守以下守则：

1. 学生必须按时到指定实验室做实验，不得迟到。
2. 上课前学生必须对所做实验进行充分预习，并完成预习报告相关内容，经指导教师检查合格后，方可进行实验。
3. 学生应独立完成实验准备工作。在启动设备之前，需经指导教师检查认可。
4. 实验时，要严肃认真，正确操作，仔细观察，真实记录实验数据的结果。不许喧闹谈笑，不做与实验无关的事情，不动与实验无关的设备，不进入实验无关的场所。
5. 实验中应遵守实验室安全规定及相关设备的操作规程。
6. 仪器设备发生不正常现象时，应及时报告指导教师。发生人身安全事故时，应立即切断相关的电源、气源等，并听从指导教师的指导，要沉着冷静，不要惊慌失措。
7. 实验中，如发现仪器设备损坏，应及时报告，查明原因。凡属违反操作规程导致设备损坏的，要追究责任，照章赔偿。
8. 实验结束后，需经指导教师审查数据并签字，然后将仪器设备按原样整理完毕，清理实验台。得到指导教师允许后方可离去。
9. 学生进入开放实验室做自行设计的实验时，应事先和有关实验室负责人联系，报告自己的实验目的、内容，并整理好实验现场后，方可离去。
10. 学生必须认真完成实验报告，在规定的时间内交给教师批阅。批阅后的实验报告将由教师妥善保管，以备审查。

## 实验设备使用注意事项

1. 正确使用实验设备，在进行高电压测试时（60V 以上），需要安全操作，做好防护。
2. 必须在断电情况下完成实验电路的连接，经检查确认无误后方可上电。
3. 若发现设备打开无显示，请检查设备电源是否接好，或保险丝是否良好。
4. 实验操作过程中如有异味或异响，电子元器件出现冒烟、发热严重等异常现象应及时断电，检查电路连接或参数设置是否正确，排除电路中的故障后方可再次上电。
5. **测量电流时，注意选用合适量程的电流测试通道，避免超量程使用。**此外，切勿将电流表并联于电路以免造成电源短路！
6. 实验过程中，请注意各实验模块的启动和关闭顺序，避免出现过流保护等问题。
7. 实验结束后整理好仪器设备，断电。

## 实验课安全知识须知

1. 规范着装。为保证实验操作过程安全、避免实验过程中意外发生，学生**禁止穿拖鞋**进入实验室，女生尽量避免穿裙子参加实验。
2. 实验前必须熟悉实验设备参数、掌握设备的技术性能以及操作规程。
3. 实验时人体不可接触带电线路，接线或拆线都必须在切断电源的情况下进行。
4. 学生独立完成接线或改接线路后必须经指导教师检查和允许，并使组内其他同学引起注意后方可接通电源。实验中如设备发生故障，应立即切断电源，经查清问题和妥善处理故障后，才能继续进行实验。
5. 接通电源前应先检查功率表及电流表的电流量程是否符合要求，有否短路回路存在，以免损坏仪表或电源。

## 实验报告撰写要求

1. 预习：认真预习教材、实验指导书、仪器设备使用说明，完成预习报告。
2. 实验数据：数据处理、原因分析等需要以客观实验为基础，根据实验原始数据来分析。
3. 实验完成后：按实验报告的要求完成实验报告。
4. 每次实验结束后，请班长按照学号排序，按要求准时上交实验报告。

# 目 录

实验 1	三相桥式全控整流电路实验 .....	5
一.	实验目的 .....	5
二.	实验要求 .....	5
三.	预习题 .....	5
四.	实验内容 .....	5
五.	实验设备模块 .....	5
六.	实验线路及原理 .....	6
七.	实验方法 .....	7
八.	注意事项 .....	12
九.	实验报告 .....	12
【附录 1】	硬件实验平台 .....	14
1.1	电源类模块 .....	14
1.2	四象限测功机/电源 .....	15
1.3	变压器装置 .....	16
1.3.1	单相变压器 .....	16
1.3.2	三相变压器 .....	17
1.4	功率器件模块 .....	18
1.4.1	功率晶闸管模块 .....	18
1.4.2	IGBT 斩波器/逆变器模块 .....	19
1.4.3	二极管模块（桥式不控整流电路） .....	20
1.5	滤波装置模块 .....	20
1.6	负载模块 .....	21
1.6.1	阻性负载 .....	21
1.6.2	感性负载 .....	22
1.6.3	容性负载 .....	22
1.6.4	永磁直流电机 .....	23
1.7	数据采集和控制模块 .....	23
【附录 2】	平台软件 LVDAC-EMS .....	26
2.1	软件开启 .....	26
2.2	软件开启 .....	26
2.3	仪器仪表界面（Instrument） .....	27
2.3.1	Metering（测量仪表） .....	27
2.3.2	Oscilloscope（示波器） .....	28
2.3.3	Phase Analyzer（相位分析仪） .....	29
2.3.4	Harmonic Analyzer（谐波分析仪） .....	30
2.4	DACI 功能 .....	31
2.4.1	Chopper/Inverter Control（斩波器/逆变器控制） .....	31
2.4.2	Thyristor Control（功率晶闸管控制） .....	33
2.5	Dynamometer（测功机）功能 .....	33
2.5.1	四象限测功机功能 .....	34
2.5.2	电源功能 .....	36
2.6	数据处理 .....	38

# 实验1 三相桥式全控整流电路实验

## 一. 实验目的

1. 深入理解三相桥式全控整流电路的工作原理及整流电压、电流波形。
2. 掌握不同性质的负载对三相桥式全控整流电路的波形和输出特性的影响。
3. 学习可控整流装置的调试技术。

## 二. 实验要求

1. 完成预习题。
2. 明确所需测量的实验数据，并在实验过程记录页中做好实验数据表格等准备工作。

## 三. 预习题

1. 三相桥式全控整流电路合闸启动过程中或电流断续时，为确保电路正常工作，对触发脉冲有何要求？为满足这一要求，应该采用什么触发方式？这些触发方式的优缺点是什么？
2. 单相桥式全控整流电路、三相桥式全控整流电路中，当负载分别为电阻负载和电感负载时，要求的晶闸管触发角的移相范围分别是多少？
3. 三相桥式全控整流电路中，整流输出电压  $U_d$  的波形在一个周期内波动几次？已知变压器二次绕组线电压有效值为  $U_l$ ，如何计算当  $\alpha \leq 60^\circ$  时，整流输出电压的平均值？

## 四. 实验内容

1. 观察分析晶闸管的触发信号，掌握各晶闸管的导通顺序。
2. 三相桥式全控整流电路带纯电阻负载时的电路特性。
3. 三相桥式全控整流电路带阻感负载时的电路特性。
4. 三相桥式全控整流电路带反电动势负载时的电路特性。

## 五. 实验设备模块

序号	模块名称	型号	参数及功能说明
1	三相电源 Power Supply	8823-05	接口为：L1、L2、L3 和 N 电源
2	三相变压器组 Three-phase Transformer Bank	8348-45	变压：380:380/240/120 同名端已用圆点标注
3	功率晶闸管 Power Thyristors	8841-25	额定电流 1A；门控制信号：0-5V 脉冲
4	滤波电感/电容 Filtering Inductors/Capacitors	8325-A5	低频滤波器电感：50 mH/5 A/0~2 kHz；电容（铝电解）：210 $\mu$ F/450 V
5	阻性负载（120 V/252 W） Resistive Load	8311-00	共三组，每组均为 1200 $\Omega$ 、600 $\Omega$ 和 300 $\Omega$ 三个电阻并联组成，且均可单独控制
6	四象限测功机/电源	8960-35	其中作为电源使用时，按钮拨至右侧，电源参

序号	模块名称	型号	参数及功能说明
	Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply		数为：0-±150 V，0-±5 A，500 W
7	永磁直流电机 Permanent Magnet DC Machine	8213-10	额定功率：220W；标称电压：48 VDC；额定电流：5A；额定转速：3825 rpm；
8	数据采集与控制模块（DACI） Data Acquisition And Control Interface	9063-00	电压、电流等数据采集接口； 输出晶闸管模块数字触发信号； 采集晶闸管模块栅极模拟信号
9	24V 交流电源适配器	30004-2	为数据采集与控制 DACI 模块提供工作电源
10	PC 机	DELL	
11	连接导线和附件	8951-L	连接电路

### 六. 实验线路及原理

本实验电路原理图如图 1-1 所示，主电路为三相桥式全控整流电路。实验线路图如图 1-2 所示，分别对应实验设备中的各模块。

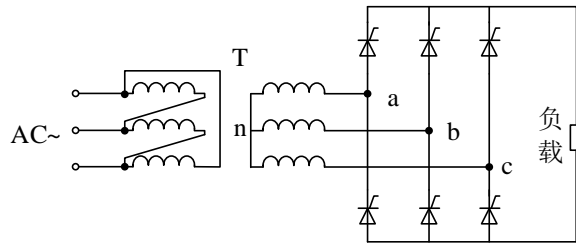


图 1-1 三相桥式全控整流电路原理图

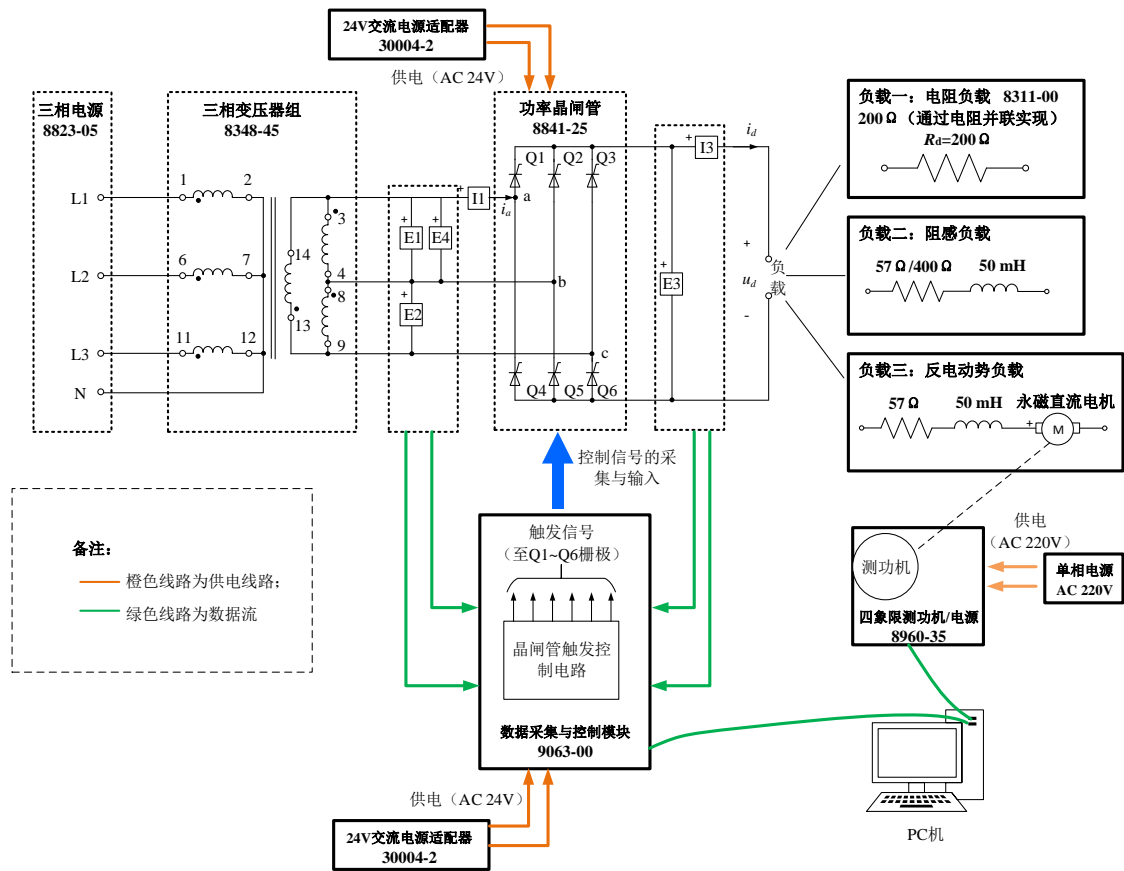


图 1-2 三相桥式全控整流电路实验线路图

## 七. 实验方法

### 1. 实验线路搭建

按图 1-2 正确接线，并检查电路是否正确，具体步骤如下：

(1) 确认实验台主电源打开，设备上实验模块**暂不上电**。

(2) 连接各模块（DACI 模块、功率晶闸管模块、四象限测功机/电源模块）**供电线路**。

(3) 连接主电路，电流测量通道串联在所测电流中，负载为“负载一”模式，即  $200\Omega$ 。

(4) 连接数据传输线路。将 DACI 模块的 USB 端口、四象限测功机/电源的 USB 端口均连接至主机的 USB 端口，保证数据可以正常采集与输出。

(5) 连接控制信号。使用 DB9 线缆将 DACI 数字输出端口连接至功率晶闸管模块左侧的触发控制输入端口；使用 2mm 线径的数据采集线分别将功率晶闸管模块的触发输入信号 1~6 接口连接至 DACI 模块中的模拟输入 1~6 接口，并将两个模块的白色接地端子（模拟地，AGND）连接在一起。

(6) 打开四象限测功机/电源模块的主电源开关，双击启动 LVDAC-EMS 软件。选择“Connected Mode”。确认软件可以检测到 DACI 模块和四象限测功机/电源模块，然后选择 220V/50Hz，点击“OK”。

#### 注意事项：

(1) 三相交流电源模块电源开关为 O (off) 状态；

(2) 四象限测功机/电源模块的工作模式选择旋钮拨至“测功机模式”；

(3) 功率晶闸管模块的开关 S1 和 S2 设置到 I (on) 位置，减少连接线缆数量；

(4) 电压测量通道并联在电路中，电流通道串联在电路中（选择 4A 的档位）。

### 2. 观察分析晶闸管的触发信号

(1) 在 LVDAC-EMS 软件的 DACI 菜单栏下选择“Thyristor Control”模块，按图 1-3 进行参数设置：Function 为“Thyristor Three-Phase Bridge”；将“Firing Angle”触发角  $\alpha$  设为 0；晶闸管 Q1 至 Q6 全部为 Active；保持其他参数设置为默认值。

(2) 启动软件界面上的示波器，分别设置通道 1 和通道 2 上测量线电压  $u_{ab}$  (E1) 和  $u_{bc}$  (E2)（标度为 200V/div），通道 3~通道 8 显示晶闸管 Q<sub>1</sub> 至 Q<sub>6</sub> 的触发信号（即 DACI 的 AI-1~AI-6）（标度为 10V/div）。将示波器设置为 Continuous Refresh 模式，如图 1-4 所示。设置时钟以显示至少两个周期的电源电压波形。

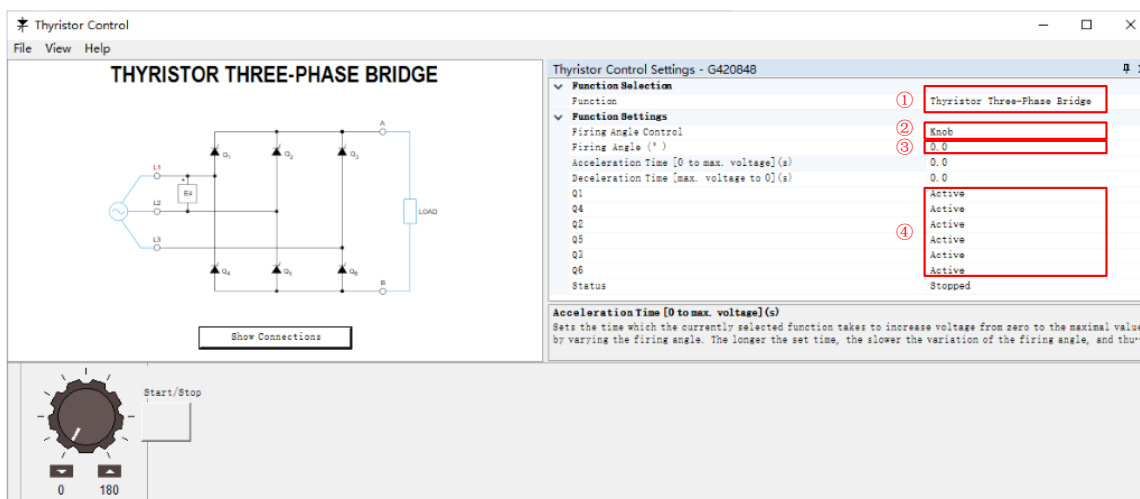


图 1-3 三相桥式全控整流电路触发信号控制界面

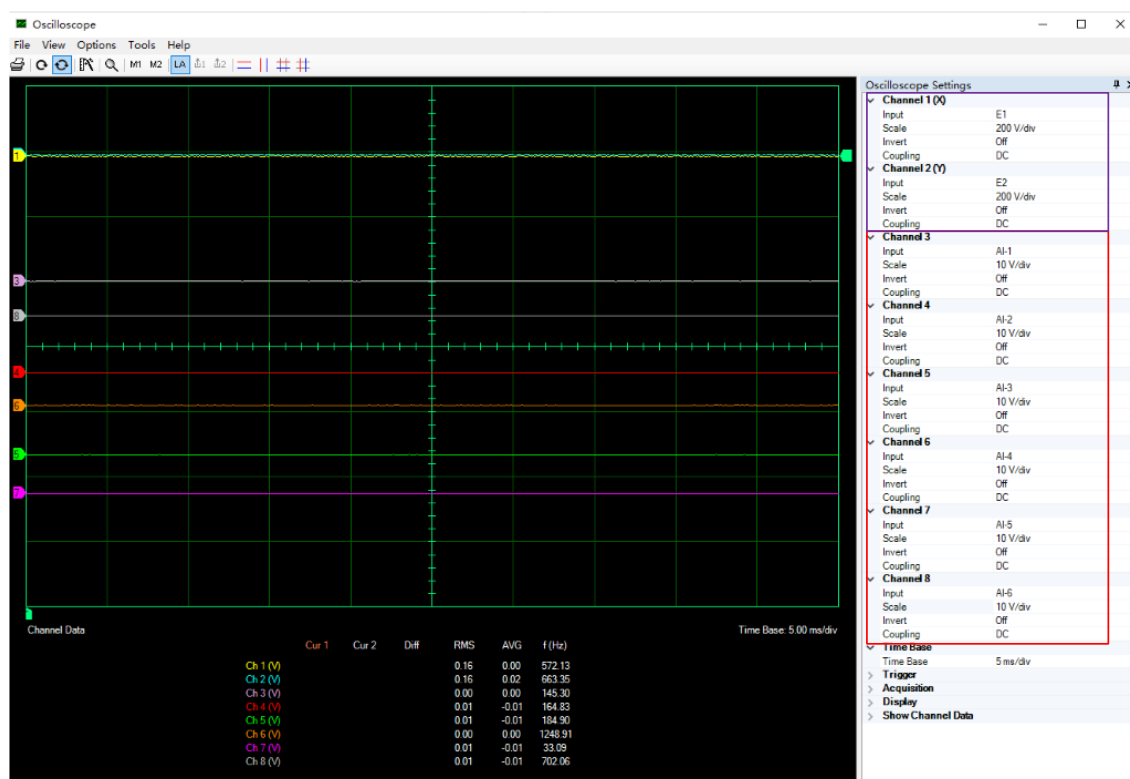


图 1-4 软件示波器界面设置

(4) 将三相交流电源模块开关设置为 I (on) 状态，主电源上电。

(5) 打开软件中“Thyristor Control”晶闸管控制界面，点击“Start/Stop”按钮，或设置“Status”参数为“Started”，以启动晶闸管全控桥触发功能，给出触发信号。

(6) 观察软件示波器界面波形。对比每个晶闸管触发信号的脉冲与线电压  $U_{ab}$  (通道 1) 之间的关系。注意到晶闸管 Q1 至 Q6 分别 (即通道 3~通道 8) 以电压  $u_{ab}$  的  $60^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $300^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $0^\circ$  和  $120^\circ$  相角作为触发，则表示相序正确。完成以下内容：

- 记录此时晶闸管的导通顺序，并在报告中画出触发角  $\alpha=0^\circ$  时各触发信号波形；
- 在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间缓慢改变触发角，描述触发角  $\alpha=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时触发信号相对线电压  $U_{ab}$  相位差的变化。



### 3. 三相桥式全控整流电路带电阻负载时工作研究

保持负载为  $R_d=200\ \Omega$  不变，测试三相桥式全控整流电路带电阻负载，触发角  $\alpha$  在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间改变时的整流电压  $u_d$ 、整流电流  $i_d$ ，并观察相关波形。

#### 3.1 参数设置

(1) 设置**软件示波器**。通道 1 和 2 显示线电压  $u_{ab}$  和  $u_{bc}$ 、通道 3~通道 6 分别显示晶闸管 Q5、Q1、Q6、Q2 的触发信号，通道 7、8 分别显示晶闸管三相桥的直流侧的整流电流  $i_d$  (I3) 和整流电压  $u_d$  (E3)。

(2) 设置**测量仪表 (Metering)** 界面。打开软件界面中 Instruments 选项中的 Metering，分别设置：M1 测量电压  $U_{ab}$  (E1, AC 默认为 RMS 值)；M2 测量整流电流  $I_d$  (I3, DC)；M3 测量整流电压  $U_d$  (E3, DC)；M15 测量负载有功功率  $P_R$  (PQS3 (E3, I3))。选择 Continuous Refresh 模式。(注：E4 所测电压为软件中数据计算所需，非测量参数，量表界面禁用。)

(3) 设置**谐波分析仪 (Harmonic Analyzer)** 界面。打开界面后，设置基波频率为交流电网频率 (默认 50Hz)，设置所需观察的谐波次数 (最高可观察 40 次谐波含量)。将所需观察的变量交流侧输入电流  $i_a$  (I1) 设为 Input，即可在界面中显示不同工作状态时输入电流的直流分量、基波分量和不同谐波分量。

#### 3.2 实验操作

在 “Thyristor Control” 晶闸管控制界面，按表 1-1 中所列触发角的值，在  $0^\circ \sim 120^\circ$  之间缓慢改变触发角。

(1) 观察量表界面测量值，并完成表 1-1。

(2) 绘制  $\alpha=0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  时，交流侧输入电流  $i_a$  (I1)、整流电压  $u_d$  (E3)、整流电流  $i_d$  (I3) 波形曲线  $i_a=f(t)$ 、 $u_d=f(t)$ 、 $i_d=f(t)$ ，并记录  $i_a$  谐波分析结果。

表 1-1 三相桥式全控整流电路纯电阻负载时，整流电压和触发角  $\alpha$  测量数据

触发角 $\alpha(^{\circ})$	负载有功功率 (W)	线电压 $U_{ab}$ 实测值 (V)	整流电流 $I_d$ 测量值 (A)	整流电压 $U_d$ 测量值 (V)	整流电压 $U_d$ 理论值 (V)
0					
15					
30					
45					
60					
75					
90					
105					
120					

实验完成后，“Thyristor Control”晶闸管控制界面点击“Start/Stop”按钮，或设置“Status”

参数为“Stop”，关闭触发信号；然后关闭三相交流电源。

软件示波器和测量仪表界面不用关闭。

#### 4. 三相桥式全控整流电路带阻感负载时工作研究

##### 4.1 负载为 $R_d = 400\Omega$ , $L = 50 \text{ mH}$ 串联

负载为电阻  $R_d = 400\Omega$ （即  $1200\Omega//600\Omega$ ）与电感  $L = 50 \text{ mH}$  串联。电阻使用 8311-00 “Resistive Load” 模块，电感使用 8325-A5 “Filtering Inductors/Capacitors” 模块。线路连接无误后，打开三相交流电源，启动触发信号。

记录触发角在  $0^\circ \sim 120^\circ$  之间缓慢变化时的测量数据，完成表 1-2（记录  $U_d$  无限接近于 0V 时的  $\alpha_{max}$  的值）。

表 1-2 三相桥式全控整流电路阻感负载时，整流电压和触发角  $\alpha$  测量数据（ $R_d = 400\Omega$ ,  $L = 50 \text{ mH}$ ）

触发角 $\alpha (^\circ)$	负载有功功率 (W)	线电压 $U_{ab}$ 实测值 (V)	整流电流 $I_d$ 测量值 (A)	整流电压 $U_d$ 测量值 (V)	整流电压 $U_d$ 理论值 (V)
0					
15					
30					
45					
60					
75					
90					
105					
$\alpha_{max}=?$ ( $U_d=0\sim 1V$ )					

实验完成后，关闭触发信号，关闭三相交流电源！

##### 4.2 负载为 $R_d = 57\Omega$ , $L = 50 \text{ mH}$ 串联

负载为电阻  $R_d = 57\Omega$ （ $1200\Omega//600\Omega//300\Omega=171\Omega$ ，三组并联）与电感  $L = 50 \text{ mH}$  串联。线路连接无误后，打开三相交流电源，启动触发信号。

(1) 记录触发角在  $0^\circ \sim 120^\circ$  之间缓慢变化时的测量数据，完成表 1-3。

(2) 观察并记录  $U_d$  接近于 0V 时  $\alpha_{max}$  的值，并于理论值作比较，分析实际值与理论值存在差异的原因。

(3) 绘制  $\alpha=0^\circ$ 、 $60^\circ$  时，交流侧输入电流  $i_a$ 、电感电压  $u_L$ 、整流电压  $u_d$ 、整流电流  $i_d$  波形曲线  $i_a=f(t)$ 、 $u_L=f(t)$ 、 $u_d=f(t)$ 、 $i_d=f(t)$ ，并记录  $i_a$  谐波分析结果。

表 1-3 三相桥式全控整流电路阻感负载时，整流电压和触发角  $\alpha$  测量数据（ $R_d = 57\Omega$ ,  $L = 50 \text{ mH}$ ）

触发角 $\alpha (^\circ)$	负载有功功率 (W)	线电压 $U_{ab}$ 实测值 (V)	整流电流 $I_d$ 测量值 (A)	整流电压 $U_d$ 测量值 (V)	整流电压 $U_d$ 理论值 (V)
-----------------------	------------	----------------------	--------------------	--------------------	--------------------

0					
15					
30					
45					
60					
75					
90					
105					
$\alpha_{max}=?$ ( $U_d=0\sim 1V$ )					

实验完成后，关闭触发信号，关闭三相交流电源！

## 5. 三相桥式全控整流电路带反电动势负载时工作研究

负载为电阻  $R_d=57\Omega$ 、电感  $L=50\text{ mH}$  和永磁直流电机串联，反电动势为直流电机电枢电压，注意直流电机接入的正负。

### 5.1 参数设置

(1) 设置四象限测功机/电源模块。将该模块的模式选择旋钮拨至左侧，使其处于测功机工作状态，以测量功率、转矩、转速等数据。然后使用 2mm 线径的数据采集线将该模块右下角的转矩 (T) 和转速 (n) 数据接口对应连接至 DACI 模块中的模拟输入部分的 7 通道 (7/T) 和 8 通道 (8/n)。

在 LVDAC-EMS 中，“Dynamometer”菜单下选择 Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply。将“Function”参数设置为“Negative Constant-Torque Prime Motor/Brake”（负恒转矩电动机/制动器）；“Pulley Ratio”参数设置为“24:12 (timing belt coupling)”，如图 1-5 所示。**注意：测功机不启动。**

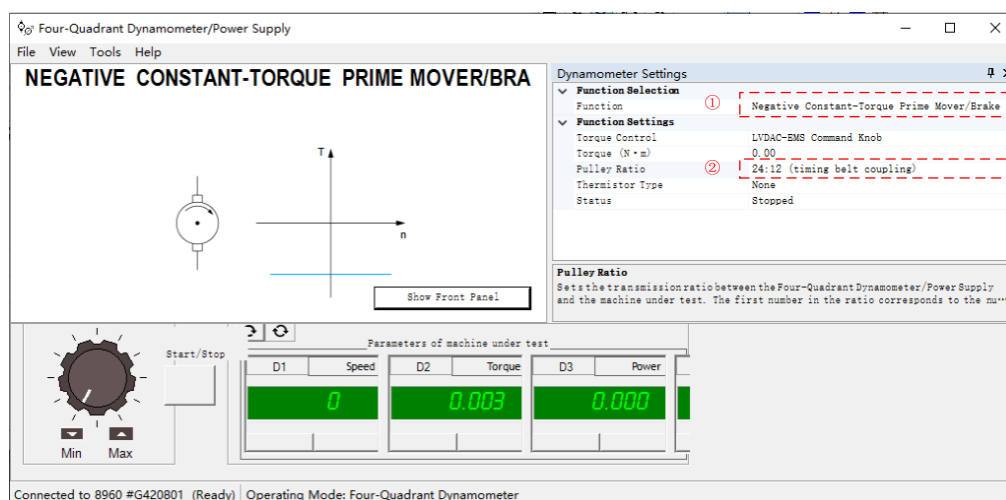


图 1-5 四象限测功机界面设置

(2) 设置软件示波器。同实验内容 3 和 4。

(3) 设置测量仪表 (Metering) 界面。分别设置: M1 测量电压  $U_{ab}$  (E1); M2 测量整流电流  $I_d$  (I3); M3 测量整流电压  $U_d$  (E3); M15 测量负载有功功率  $P_R$  (PQS3 (E3,I3))。新增设置 M6 和 M12 测量转矩和转速。

**注意:** E4 测量为软件内部相关处理数据的测量, 不做显示; 若测量界面有 E4 测量请关闭, 否则影响软件内部数据计算及显示。选择 Continuous Refresh 模式。(仪表单元可任意选择, 测量变量设置完整即可。)

## 5.2 实验操作

设置初始触发角  $\alpha=90^\circ$ 。打开三相交流电源, 启动触发信号。通过软件中触发控制界面的旋钮下方的减小键 ▼ 缓慢减小触发信号, 直至电机启动 (此时整流电流约为 1.2A, 转速约为 500r/min), 停止减小触发角。

记录直流电机刚启动时的触发角、电机转速, 及整流电压  $u_d$ 、整流电流  $i_d$  的波形曲线。

实验完成后, 在软件设置界面关闭触发信号, 关闭直流电机, 关闭四象限测功机。最后关闭三相交流电源, 四象限测功机总电源! 将所有导线拆除, 整理好以后放置在置线架上。待老师确认实验台整理完毕后, 方可离开实验室。

## 6. ※ (选做) 观察变压器漏感对整流电路的影响

按图 1-2 正确接线, 设置负载电阻  $R_d=200\Omega$ , 触发角  $\alpha=0^\circ$ , 使用泰克示波器分别观察记录以下两组波形: (1) 交流侧输入电流  $i_a$ 、 $i_b$ , 与整流电压  $u_d$  的波形曲线; (2) 交流侧输入电流  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$  的波形曲线。

参照三相半波可控整流电路, 根据所测波形分析变压器漏感对三相桥式全控整流电路换相过程的影响。

# 八. 注意事项

1. 连接主电路或更改电路前确保三相交流电源模块为断开状态。
2. 打开 LVDAC-EMS 软件前, 注意打开四象限测功机/电源模块的主电源开关, 否则在软件界面无法检测到该模块, 则无法进行参数设置。
3. 数据采集与控制模块中电压测量接口并联在测试点两端, 电流测量接口串入所测电路。
4. 三相桥式全控整流电路带反电动势负载时, 注意缓慢减小触发角大小, 确保工作电流满足晶闸管的耐流要求。
5. 实验过程中, 如需要改变主电路, 一定注意先关掉三相交流电源!

# 九. 实验报告

1. 触发角  $\alpha=0^\circ$  时, 记录晶闸管的导通顺序, 并手绘触发信号波形。
2. 描述触发角  $\alpha=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时触发信号相位的变化。
3. 完成表 1-1。绘制三相桥式全控整流电路带纯电阻负载 ( $R_d=200\Omega$ ), 触发角  $\alpha=0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、

120° 时, 交流侧输入电流  $i_a$ 、整流电压  $u_d$ 、整流电流  $i_d$  的波形曲线  $i_a=f(t)$ 、 $u_d=f(t)$ 、 $i_d=f(t)$ 。

4. 完成表 1-2。观察并记录三相桥式全控整流电路带阻感负载 ( $R_d=400\ \Omega$ ,  $L=50\text{mH}$ ),  $U_d\approx 0\text{V}$  时  $\alpha_{max}$  的值, 并于理论值作比较, 分析实际值与理论值存在差异的原因。
5. 完成表 1-3。绘制三相桥式全控整流电路带阻感负载 ( $R_d=57\ \Omega$ ,  $L=50\text{mH}$ ), 触发角  $\alpha=0^\circ$ 、 $60^\circ$  时, 交流侧输入电流  $i_a$ 、电感电压  $u_L$ 、整流电压  $u_d$ 、整流电流  $i_d$  的波形曲线  $i_a=f(t)$ 、 $u_L=f(t)$ 、 $u_d=f(t)$ 、 $i_d=f(t)$ , 并与理论曲线进行对比分析。
6. 根据表 1-1、1-2、1-3 记录的数据, 在同一张图中分别绘制三相桥式全控整流电路的输入-输出特性 ( $U_d/U_{ab}$  与触发角  $\alpha$  之间关系曲线)  $U_d/U_{ab}=f(\alpha)|_{R_d=200\ \Omega}$ 、 $U_d/U_{ab}=f(\alpha)|_{R_d=400\ \Omega, L=50\text{mH}}$ 、 $U_d/U_{ab}=f(\alpha)|_{R_d=57\ \Omega, L=50\text{mH}}$ 。并根据曲线结果, 分析不同负载对三相桥式全控整流电路的输入-输出特性的影响。
7. 根据纯电阻负载 ( $R_d=200\ \Omega$ ) 和阻感负载 ( $R_d=57\ \Omega$ ,  $L=50\text{mH}$ ), 且触发角  $\alpha=0^\circ$  时, 测得的交流侧输入电流  $i_a$  的谐波含量结果, 分析所含谐波次数及谐波有效值与基波有效值和次数的关系, 并与理论值对比, 分析实际值与理论值存在差异的原因。
8. 三相桥式全控整流电路带反电动势负载时, 记录直流电机启动完成进入稳态 (转速约为 400r/min~500r/min) 时的触发角、电机转速, 并记录整流电压  $u_d$ 、整流电流  $i_d$  的波形曲线。
9. ※ (选做) 参照三相半波可控整流电路, 根据所测波形分析变压器漏感对三相桥式全控整流电路换相过程的影响。

# 【附录1】 硬件实验平台

本课程的实验依托 Labvolt 公司设计生产的电力电子与电力传动综合实验平台，如图 1-1 所示。该平台采用标准化、模块化设计，模块间通过线缆连接，每个模块都设有电路保护装置，避免过温、过压或过流带来的设备安全方面的风险。

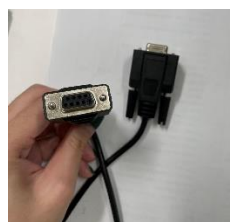
该实验平台的硬件部分包括电源类模块、功率器件模块、负载模块、数据采集和控制模块、连接功率线缆、信号线（如图 1-19 所示）、计算机等。实验时，可根据实验内容自由组合各模块，搭建完整的实验电路和检测电路，因此该实验平台具有较高的自由度和扩展性。目前该实验平台涵盖了《电力电子技术》、《电机学》、《电气传动自动控制系统》等基础专业课程的实验内容。接下来，将分别介绍以上各模块的性能。



图 1-1 电力电子与电力传动综合实验平台



(a) 2mm 数据传输线



(b) DB9 线缆

图 1-2 连接线等附件

## 1.1 电源类模块

电源模块（Power Supply），型号为 8823-05，如图 1-3 所示。该模块可提供交流电和直流电两种电源。同时具备独立的断路器，保护输入和输出免受过大电流情况的影响；配置的指示灯可以显示电源输出情况。



(1) 交流电源。通过电源开关控制交流电的接通和关断，三相分别为 L1、L2 和 L3，中线输出端子为 N；相电压为 220V，线电压为 380V，工作频率为 50Hz，额定工作电流为 2.5A。

(2) 直流电源。通过拨码开关控制直流电是否接通，输出端子为红“+”黑“-”。电源固定输出额定电压 220V，额定电流 2A 的直流电。此外，该直流电源为非隔离的，因此接地时不要将输出端接到大地上，以免对设备造成损坏。此外，在出现过流保护时，复位键会弹出。

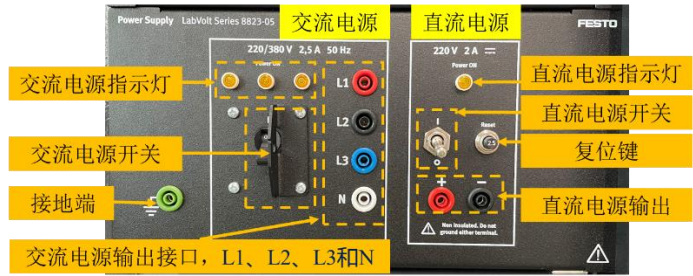


图 1-3 交流/直流电源模块

此外，同样具有电源功能的还有四象限测功机/电源模块，当其工作模式选择电源时，可通过软件进行设置电源功能设置选项，实现电源功能，详情可见【附录 1】1.2 节和【附录 2】节。

## 1.2 四象限测功机/电源

四象限测功机/电源（Four-Quadrant Dynamometer/Power Supply）模块，如图 1-4 所示。该模块由一个永磁直流电动机、一个四象限电源和一个封装在全尺寸 EMS 模块中的板载微控制器组成，型号为 8960-00。使用时可根据功能需要选择测功机模式或电源模式。

使用前，需确保该模块与计算机实现通讯，工作电源开关打开，正常通电，这样才可以确保模块正常运行，且在 LVDAC-EMS 软件中实现控制和数据获取。

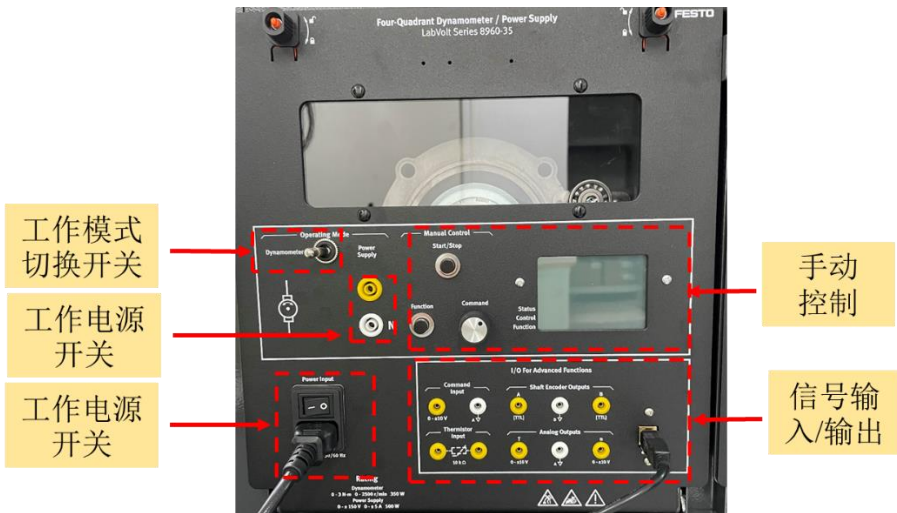


图 1-4 四象限测功机/电源模块

### (1) 工作模式选择

该模块前面板左上角的工作模式切换开关允许选择操作模式，拨至左侧即为“测功机”工作模式；拨至右侧即为“电源”工作模式。

在测功机模式下，该单元作为四象限测功机运行，既可以充当机械负载，也可以充当原

**动机**，由用户选择的控制功能决定。通过转轴上的皮带轮可以连接被测电机。

在**电源模式**下，四象限电源充当四象限电源，根据用户选择的控制功能，该四象限电源可用作**直流电压源**，**直流电流源**，**交流电源**等。前面板上的两个 4 毫米安全香蕉插孔可用于连接四象限电源端子。

### （2）功能控制

确定工作模式后，可通过 LVDAC-EMS 软件或模块前面板上的手动控制方式进行功能设置。通过软件控制时，在 LVDAC-EMS 软件的菜单栏中有专门的选项，如图 1-5 所示，点击该选项进入功能参数设定，具体操作可参考【附录 2】中该模块的设置介绍。在**手动控制模式**下，由按钮 FUNCTION、START / STOP 和控制旋钮 COMMAND，配合前面板上的 LCD 显示内容设置和监视设备执行的功能。

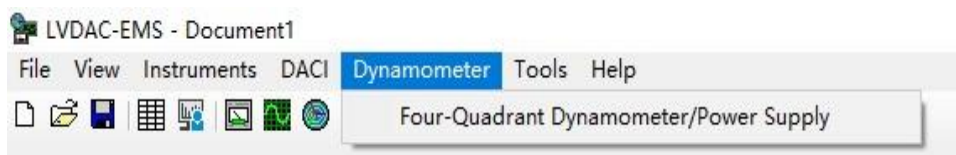


图 1-5 软件中的四象限测功机/电源模块选项

### （3）I/O 高级功能

该部分包含四个区域，**命令输入**（Command Input）、**热敏电阻输入**（Thermistor Input）、**编码器输出**（Shaft Encoder Outputs）、**转矩/转速输出**（Analog Outputs）。

**命令输入**可作为给定信号，此信号的电压确定模块实现的功能的命令（例如，直流电流源的电流给定）。

**热敏电阻输入**允许连接外部温度传感器（热敏电阻）以使用四象限测功机/电源进行温度测量。对于某些高级功能（例如镍氢电池充电器），需要进行温度测量。

**编码器输出**，由安装在内部直流电动机上的轴编码器产生（A-B 输出类型），可以用于测定电动机转速及转动方向。

**转矩/转速模拟输出**提供与内部永磁直流电动机轴上测得的转矩和速度成比例的模拟信号。通过数据线与计算机连接后，以上输出可在 LVDAC-EMS 软件中读取。

## 1.3 变压器装置

实验平台中的变压器主要有单相变压器和三相变压器。

### 1.3.1 单相变压器

单相变压器模块，型号为 8353-00，如图 1-6 所示。单相变压器原边侧和副边侧各由两个独立的绕组，具体规格如图中所示，其变比为 1:5（即 24:120），对应的白点为同名端。此外，可通过热敏电阻输出端监控变压器温度，以防止过热造成设备损坏。



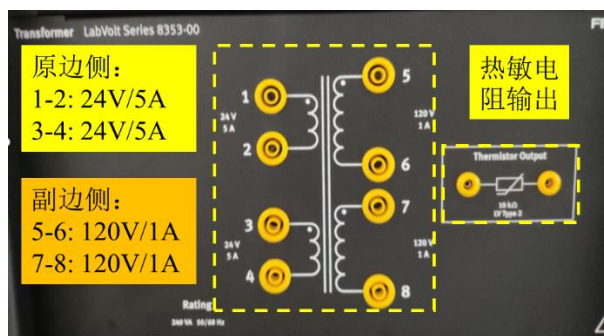


图 1-6 单相变压器模块

### 1.3.2 三相变压器

三相变压器模块，型号为 8348-45，如图 1-7 所示。三相变压器由三个独立的单相变压器组成，红黑蓝分别代表 A、B、C 三相，可采用星形或三角形连接（如图 1-8 所示），白点为同名端标识。

每一个单相变压器根据接线时对应的不同的抽头，形成不同的变比，具体规格如图 1-7 中所示。且每个绕组都串有熔断器，避免过流造成设备损坏。

原边侧和副边侧各由两个独立的绕组，具体规格如图中所示，其变比为 1:5（即 24:120），对应的白点为同名端。此外，可通过热敏电阻输出端监控变压器温度，以防止过热造成设备损坏。

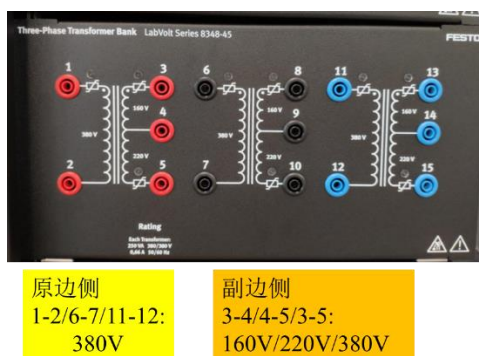


图 1-7 三相变压器模块

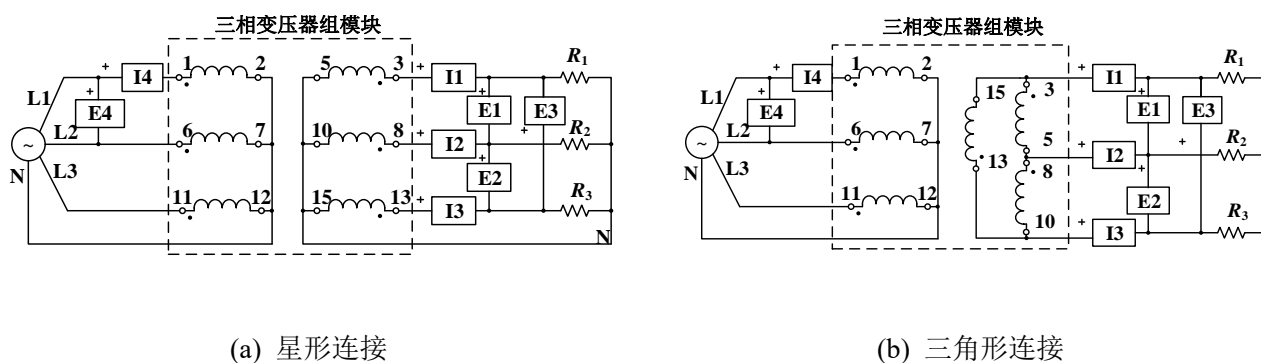


图 1-8 三相变压器接线方式

## 1.4 功率器件模块

硬件模块中主要涉及的电力电子器件包括功率晶闸管、IGBT 和二极管，不同的电力电子器件涉及的控制方式和工作结构不同，本节主要介绍功率晶闸管模块、IGBT 模块和二极管模块。

### 1.4.1 功率晶闸管模块

功率晶闸管（Power Thyristors）模块，型号为 8841-25，如图 1-9 所示。该模块由六个晶闸管（SCR）、触发脉冲电路、复位电路、接线模式选择等部分组成。该模块可实现单相半波可控整流、单相桥式全控整流、三相桥式整流电路、单相/三相交流调压电路等功能，功能选择详见【附录 2】功率晶闸管设置部分。

#### （1）工作电源

模块工作需提供 24V 直流电源。该电源通过电源适配器将 220V 交流电转换成 24V 直流电，供给实验平台中对应的模块（如 DACI 模块、IGBT 模块、功率晶闸管模块等），且每个模块上的接口都可以实现并行供电。若 24V 供电接口线缆已接上，且绿色显示灯亮，则证明电源供电正常。

#### （2）晶闸管模块

模块中包含六个晶闸管（SCR），其中晶闸管的工作电流为 1A，其触发脉冲的高电平为 5V。每个晶闸管都有过流和短路保护，若某个晶闸管超出安全工作范围，则对应的复位键弹出。此时，实验人员应检查电路连接、工作条件设备是否正确，错误修正后方可按下复位键，重新进行实验。

#### （3）触发脉冲信号（Firing control）

触发脉冲信号为 0/5V 的脉冲信号，硬件部分包括两部分：一是 9 针型接口，为 DACI 模块下发的控制信号，由 DB9 线缆连接 DACI 模块和该接口；编号 1~6 的黄色微型香蕉端子和白色接地端子为控制信号监测接口，采用 2mm 的信号线将黄色端子和接地端子接至 DACI 模块的模拟输入端子和模拟地端子，实现数据的传输，并可在 LVDAC-EMS 软件的示波器中观察 AI-X 的波形，即为对应 X 开关管的触发脉冲信号。信号可由 LVDAC-EMS 软件中 DACI 功能菜单的晶闸管电路功能选项进行控制。

功率晶闸管模块还包括同步输出，当观察触发控制信号可触发示波器，通过触发控制禁用输入，防止触发所有六个功率晶闸管。

#### （4）连接方式选择

为了减少外部线缆连接的数量，该模块针对典型的配置方式设置了简化模式。在模块右上角有 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 两个拨码开关。当 S<sub>1</sub> 拨至 1 时，表示上桥臂的三个晶闸管阴极共连，下桥臂的三个晶闸管阳极共连；当 S<sub>2</sub> 拨至 1 时，表示上下桥臂连通。



图 1-9 功率晶闸管模块

## 1.4.2 IGBT 斩波器/逆变器模块

IGBT 斩波器/逆变器（IGBT Chopper/Inverter）模块，型号为 8837-B5，如图 1-10 所示。该模块主要由七个绝缘栅双极晶体管（IGBT）及其控制模块和保护模块组成，可实现斩波和逆变功能。使用时，需确保以下几点：

### （1）工作电源

模块工作需提供 24V 直流电源。该电源通过电源适配器将 220V 交流电转换成 24V 直流电，供给实验平台中对应的模块（如 DACI 模块、IGBT 模块、功率晶闸管模块等），且每个模块上的接口都可以实现并行供电。若 24V 供电接口线缆已接上，且绿色显示灯亮，则证明电源供电正常。

### （2）IGBT 模块

模块中包含 7 个 IGBT 器件，使用时需注意其安全工作范围。要求母线直流电压/电流不高于 770V/6A，IGBT 可承受的峰值电流最大为 12A；泄放(dumping circuit)电路：660V/100W；开关驱动信号：0/5V，开关频率在 0~20kHz 范围内。其中端子 1 和端子 2 用来接入直流电源，端子 3、4、5 接后续的三相滤波装置或负载。此外，单个 IGBT 可单独接入电力电子变换器中，不必拘泥于三相电路，但需确保控制程序给出的控制信号与所使用的 IGBT 对应。

### （3）开关控制信号（switching control）

开关控制信号部分包括两部分：一是 9 针型接口，为 DACI 模块下发的控制信号，由 DB9 线缆连接 DACI 模块和该接口；二是编号 1~6 的黄色微型香蕉端子和白色接地端子，为控制信号监测接口，采用 2mm 的信号线将黄色端子和接地端子接至 DACI 模块的模拟输入端子和模拟地端子，实现数据的传输，并可在 LVDAC-EMS 软件的示波器中观察 AI-X 的波形，即为对应 X 开关管的驱动信号。

### （4）保护及复位

此处为避免接线错误带来的硬件损坏，模块设计了过压保护、过流保护和过热保护。当超过保护阈值时，对应的保护指示灯会亮起，此时需要检查电路接线或参数设置是否正确，修改调节后确认无误，按下复位键复位，重新进行实验。

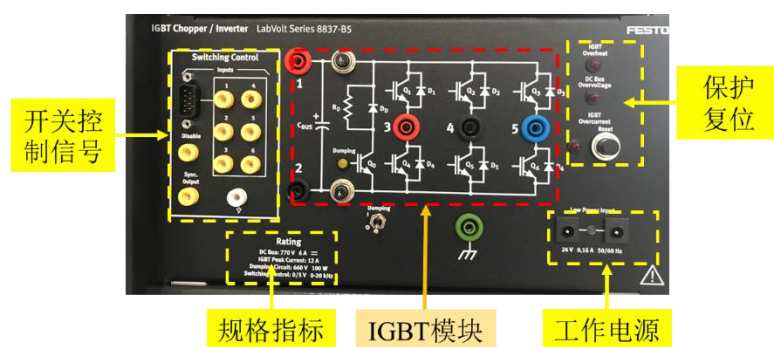


图 1-10 IGBT 斩波器/逆变器模块

### 1.4.3 二极管模块（桥式不控整流电路）

该模块由一个三相桥式不控整流电路和两个独立的电容组成，如图 1-11 所示。该模块可通过桥式整流电路结构将三相交流电转换为脉动的直流电，然后经过滤波电容进行滤波，输出平滑的直流电。

通过该模块可构建三相半波整流电路（正极性和负极性）、三相全波整流电路（即三相桥式不控整流电路）。

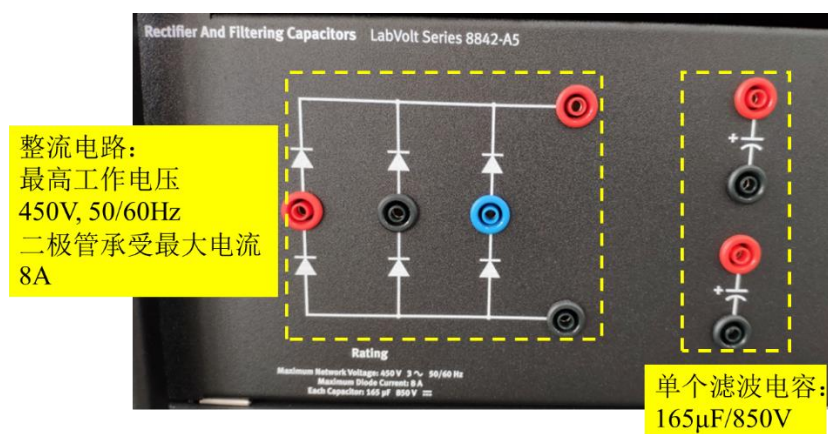


图 1-11 三相桥式不控整流电路模块

## 1.5 滤波装置模块

滤波装置模块主要由滤波电感电容（Filtering Inductors/Capacitors）组成，共有低频滤波部分和高频滤波部分两项。低频滤波器由一个电感器和铝电解电容组成，使用时需注意铝电解电容的极性。高频滤波器由两组电感和高频电容组成。使用时注意图中所示各器件的安全工作范围。



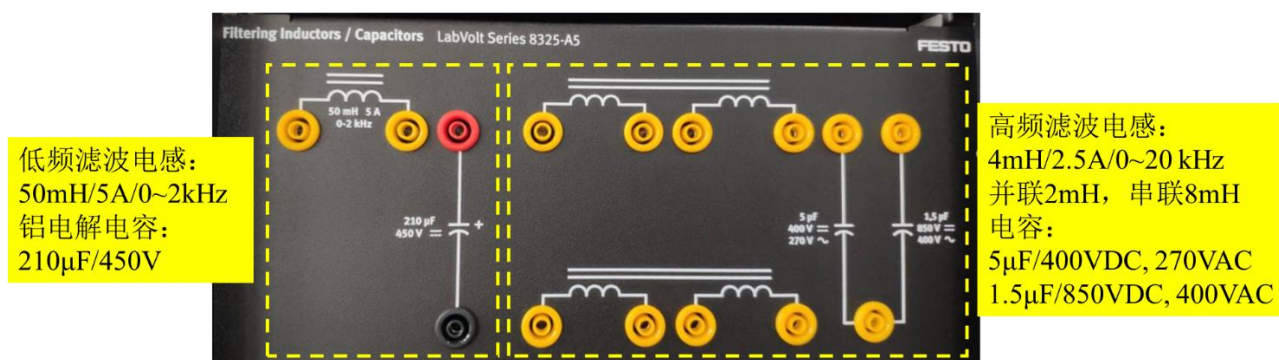


图 1-12 IGBT 斩波器/逆变器模块

## 1.6 负载模块

根据负载类型不同，将其分为阻性负载、感性负载和容性负载，其中电阻负载包含两种不同规格的模块。

### 1.6.1 阻性负载

阻性负载共两个模块，主要区别是工作电流、额定功率、阻值、工作电压不同，将其分为低压电阻模块和高压电阻模块。

低压电阻负载（Resistive Load）模块，如图 1-13 所示，型号为 8311-00。该模块由九个电阻组成，三种不同规格的电阻并联组成一组，共 3 组；且每个电阻都可以通过拨码开关控制其接通或关断，以获得各种电阻值。每组并联的三个电感规格分别为：1200Ω/0.1A、600Ω/0.2A、300Ω/0.4A，耐受电压为 120V，额定功率 252W，电阻精度为±5%。

该模块可利用两端香蕉插孔、拨码开关，并配合接线方式，获得不同电阻值。

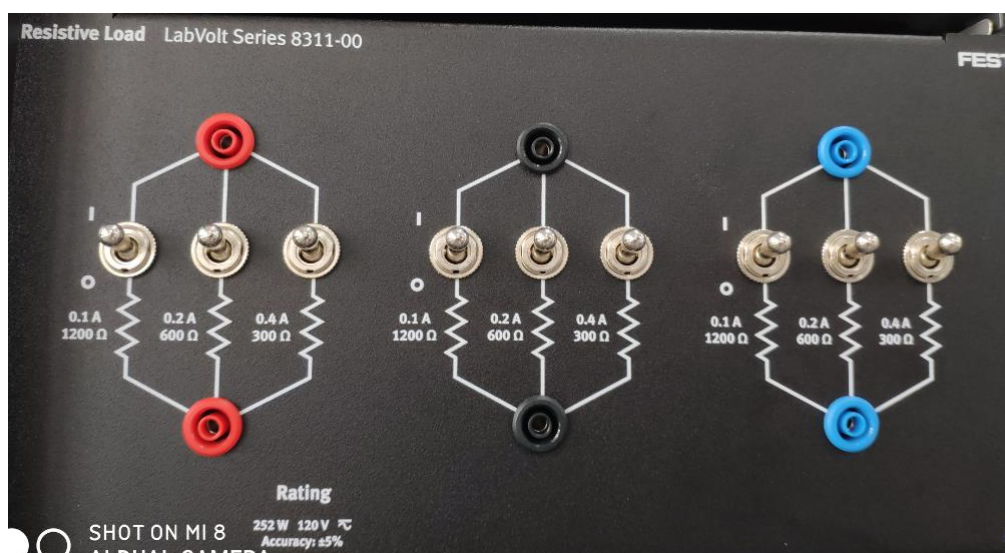


图 1-13 阻性负载模块（低压）

高压电阻负载（Resistive Load）模块，如图 1-14 所示，型号为 8311-05。该模块由九个电阻组成，三种不同规格的电阻并联组成一组，共 3 组；且每个电阻都可以通过拨码开关控制其接通或关断，以获得各种电阻值。每组并联的三个电感规格分别为：4400Ω/0.05A、

2200 $\Omega$ /0.1A、1100 $\Omega$ /0.2A，耐受电压为 220V，额定功率 231W，电阻精度为 $\pm 5\%$ 。  
该模块可利用两端香蕉插孔、拨码开关，并配合接线方式，获得不同电阻值。

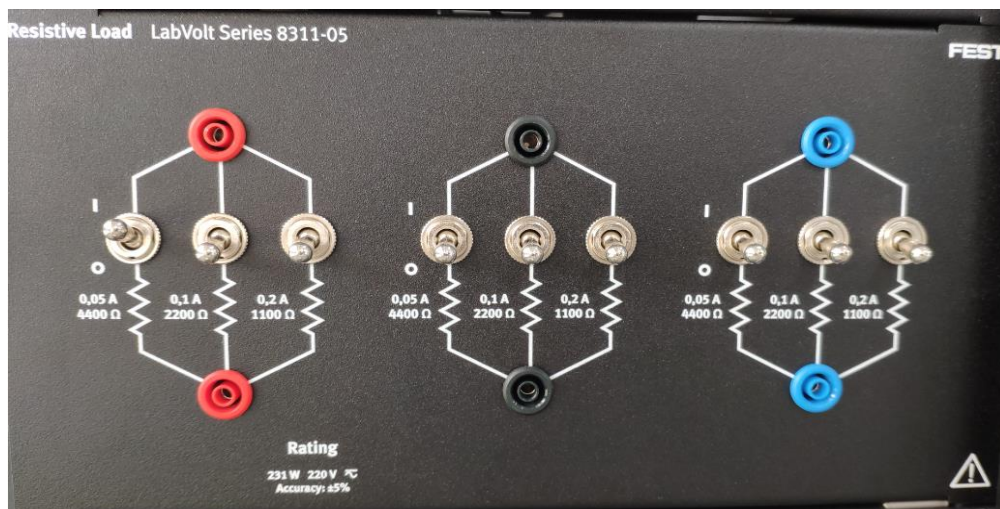


图 1-14 阻性负载模块（高压）

## 1.6.2 感性负载

电感负载（Inductive Load）模块，如图 1-15 所示，型号为 8321-05。该模块由九个电感组成，三种不同规格的电感并联组成一组，共 3 组；且每个电感都可以通过拨码开关控制其接通或关断，以获得各种电感值。每组并联的三个电感规格分别为：14H/0.05A/4400 $\Omega$ 、7H/0.1A/2200 $\Omega$ 、3.5H/0.2A/1100 $\Omega$ ，耐受电压为 220V（最高 400V），工作频率 50Hz，电感精度为 $\pm 5\%$ ，品质因数  $Q=10$ 。

该模块可利用两端香蕉插孔、拨码开关，并配合接线方式，获得不同电感值。

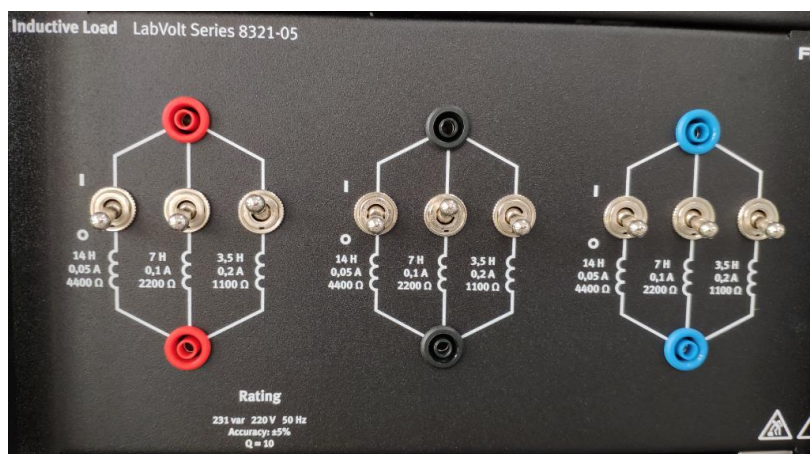


图 1-15 感性负载模块

## 1.6.3 容性负载

电容负载（Capacitive Load）模块，如图 1-16 所示，型号为 8331-05。该模块由九个电容组成，三个不同规格的无极性电容并联组成一组，共 3 组；且每个电容都可以通过拨码开关

控制其接通或关断，以获得各种电容值。每组并联的三个电容规格分别为： $0.72\mu\text{F}/0.05\text{A}/4400\Omega$ 、 $1.45\mu\text{F}/0.1\text{A}/2200\Omega$ 、 $2.89\mu\text{F}/0.2\text{A}/1100\Omega$ ，耐受电压为  $220\text{V}$ （最高  $400\text{V}$ ），电容精度为 $\pm 5\%$ 。  
该模块可利用两端香蕉插孔、拨码开关，并配合接线方式，获得不同容值的电容。

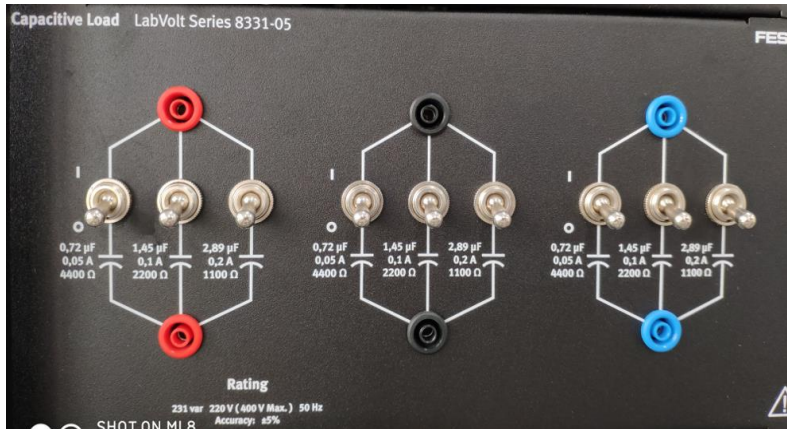


图 1-16 容性负载模块

### 1.6.4 永磁直流电机

永磁直流电机（Permanent Magnet DC Machine）模块，型号为 8213-10，如图 1-17 所示。电机电源必须由外部直流电源供电。该电机的额定功率为  $220\text{W}$ ，额定工作电压为  $48\text{V}_{\text{DC}}$ ，额定工作电流为  $5\text{A}$ ，额定转速为  $3825\text{rpm}$ 。

当电动机连接到电池组或直流电源时，可以使用前面板左侧的拨码开关来接通或关断电动机的供电电源，如所示。当拨码开关拨至左侧的“0”，则断开电源；拨至“1”，则接通电源。若不需要拨码开关控制电源，则直接将永磁直流电机两端接入电路，此时拨码开关将不再起作用。

当直流电机由原动机驱动时，永磁直流电机作为直流发电机带动负载运行，如将直流电动机与四象限测功机连接（通过皮带轮连接，四象限测功机作为机械负载），在直流斩波电路中作为反电动势负载。



图 1-17 永磁直流电机

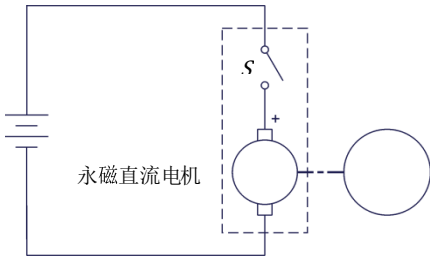


图 1-18 拨码开关控制永磁直流电机电源接线图

## 1.7 数据采集和控制模块

数据采集和控制（Data acquisition and control interface, DACI）模块，型号为 9063-00，



如图 1-19 所示，具有两大功能：数据采集和控制，需与计算机上安装的 LVDAC-EMS 软件一起使用，共同构建一套完整的基于计算机的现代虚拟仪器系统，用于测量、观察、分析和控制电气和机械参数。

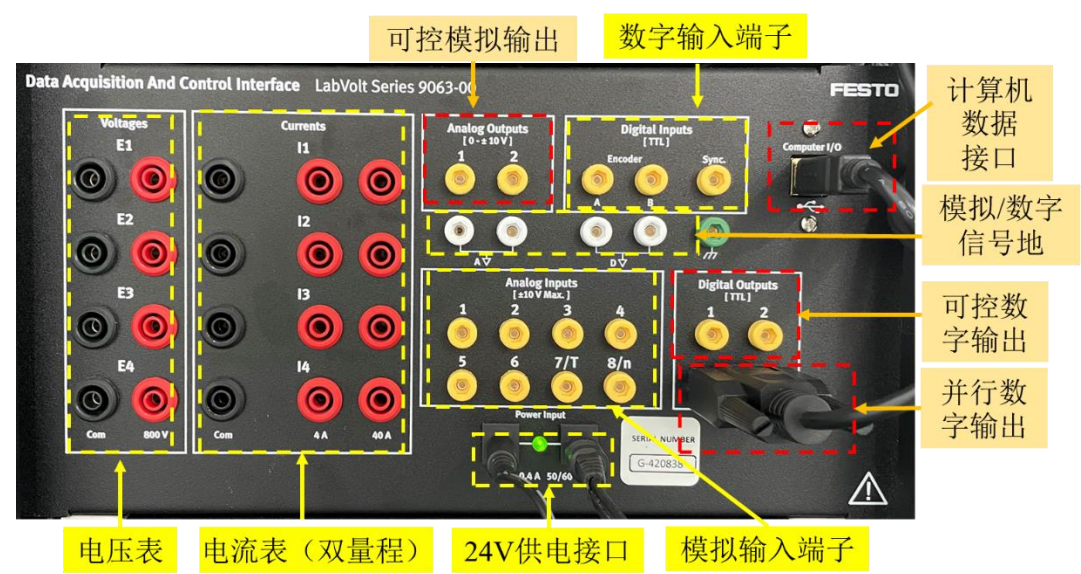


图 1-19 数据采集和控制模块

该模块的主要功能及使用时注意事项如下：

（1）工作电源

模块工作需提供 24V 直流电源。该电源通过电源适配器将 220V 交流电转换成 24V 直流电，供给实验平台中对应的模块（如 DACI 模块、IGBT 模块、功率晶闸管模块等），且每个模块上的接口都可以实现并行供电。若 24V 供电接口线缆已接上，且绿色显示灯亮，则证明电源供电正常。

（2）计算机数据接口

模块使用时务必确保计算机数据接口已将 DACI 模块与计算机成功连接，以便实现数据的上传和下发，实现软硬件双向数据传输。

（3）实验数据采集/测量

DACI 模块左侧分别是电压表通道和电流表通道。电压表通道有 4 个，最高量程为 800V，红正黑负；电流表通道共两种量程，分别是 4A 和 40A，每种量程含有 4 个通道。电压表需要并联在所需测量的电路部分两端，电流表需串联在所需测量的电路中，均采用香蕉头功率线缆进行连接。

电压表、电流表采集的数据，可在 LVDAC-EMS 软件中进行数据处理，并通过电压表、电流表、功率表、频率表、效率表、阻抗表、功率因数表、电能表、转矩和速度表等量表，及示波器、相量分析仪、谐波分析仪和频谱分析仪等软件模块展示出来，具体内容参见【附录 2】中的 DACI 模块介绍。

（4）控制信号下发

在并行数字输出端口，采用 DB9 线缆，将 DACI 模块与被控模块（如 IGBT 模块、功率晶闸管模块等）中的驱动信号接口相连，下发驱动信号，用于控制功率模块中电力电子器件的开通和关断。



### （5）控制信号的监测

模拟输入端子共有 8 个，其中 1~6 号端子和模拟地端子与功率器件模块中的驱动信号端子和接地端子一一对应连接，以便将驱动信号采集回 DACI 模块，并与计算机上的 LVDAC-EMS 软件交互，以观察驱动信号的数据和波形；7、8 号端子用于测量转矩和转速，可与测功机模块中的相应端子相连，获得相应数据，上传至软件平台。以上 8 个信号在 LVDAC-EMS 软件的示波器中以 AI-X 表示其变量，如 AI-1 代表 1 号端子的信号，即 1 号开关管的驱动信号。

## 【附录2】 平台软件 LVDAC-EMS

LVDAC-EMS 软件为电力电子与电力传动实验平台配套软件，主要是将 DACI 模块采集回的数据进行处理和展示，并通过控制程序下发控制指令。本章主要介绍其具体功能和使用方法。

### 2.1 软件开启

完成硬件电路接线后，需确保各硬件模块的工作电源是否打开，如四象限测功机/电源的 220V 电源开关、功率器件模块的 24V 工作电源接线等，确认电源正常后，开启 LVDAC-EMS 软件，先双击打开桌面上 LVDAC-EMS 软件的图标，然后选择“Connected Mode”，最后确认在开启界面可检测到 DACI 模块（如需用到四象限测功机/电源模块，开启界面右侧需检测到该模块），并选择我国标准的市电 220V-50Hz，点击“ok”，则进入软件界面，如图 2-1 所示。

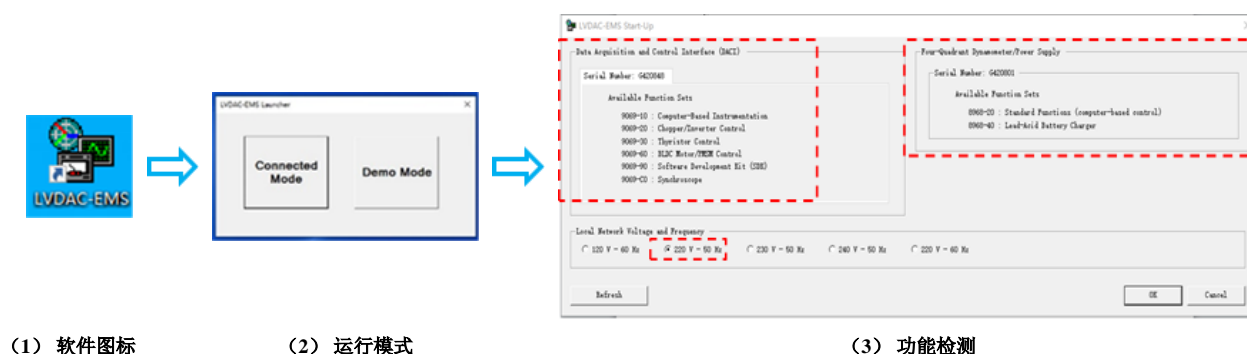


图 2-1 LVDAC-EMS 软件开启过程

### 2.2 软件开启

软件界面的菜单栏和工具栏如图 2-2 和表 2-1 所示。其中最重要的事 Instrument、DACI、Dynamometer 功能。



图 2-2 LVDAC-EMS 软件界面菜单栏和工具栏

表 2-1 功能菜单介绍

菜单名称	功能描述
File	文件管理：新建、打开、保存、另存为等，设置/重置开启设置
View	视图功能设置
Instrument	仪器仪表，包含基本的测量仪器，量表、示波器、相位分析仪、谐波分析、同步镜

菜单名称	功能描述
DACI	电路控制功能，如模拟输出、数字输出、斩波器控制、逆变器控制等等
Dynamometer	四象限测功机和电源功能控制
Tools	工具栏，如数据表格、软件语言和默认单位设置等
Help	软件升级、软件版本等

## 2.3 仪器仪表界面（Instrument）

点击 Instrument 选项，可以看到该菜单下的功能列表，如图 2-3 所示，包括测量仪表（Metering 电压表、电流表、功率表等）、示波器（Oscilloscope）、相量分析仪（Phasor Analyzer）、谐波分析仪（Harmonic Analyzer）。

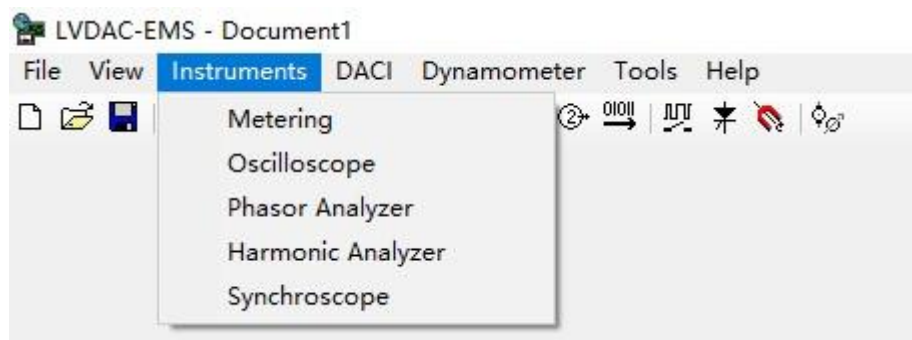


图 2-3 Instrument 菜单功能

### 2.3.1 Metering（测量仪表）

量表界面最多可同时显示 18 个仪表数据，如图 2-4 所示。这些仪表可配置为测量多种参数，如电压、电流、有功功率、无功功率、视在功率、效率、阻抗、功率因数、频率、能量、扭矩、速度、机械功率、相角、相移。每个仪表显示的参数均可自行定义。电压表和电流表具有几种工作模式，可以测量平均值、均方根值（RMS，有效值）、波峰因数、特定谐波（直到 15 次）的 RMS 值及总谐波畸变率（THD）。

使用时，需注意以下事项：

（1）单击每个量表左上角的 MX 可开启或关闭量表，单击右上角按钮进入功能选择界面，进行测量参数的选择、交直流的设置等；

（2）测量参数时注意所需测量的变量是交流变量还是直流变量，即量表的左下角显示的是"AC"还是"DC"。

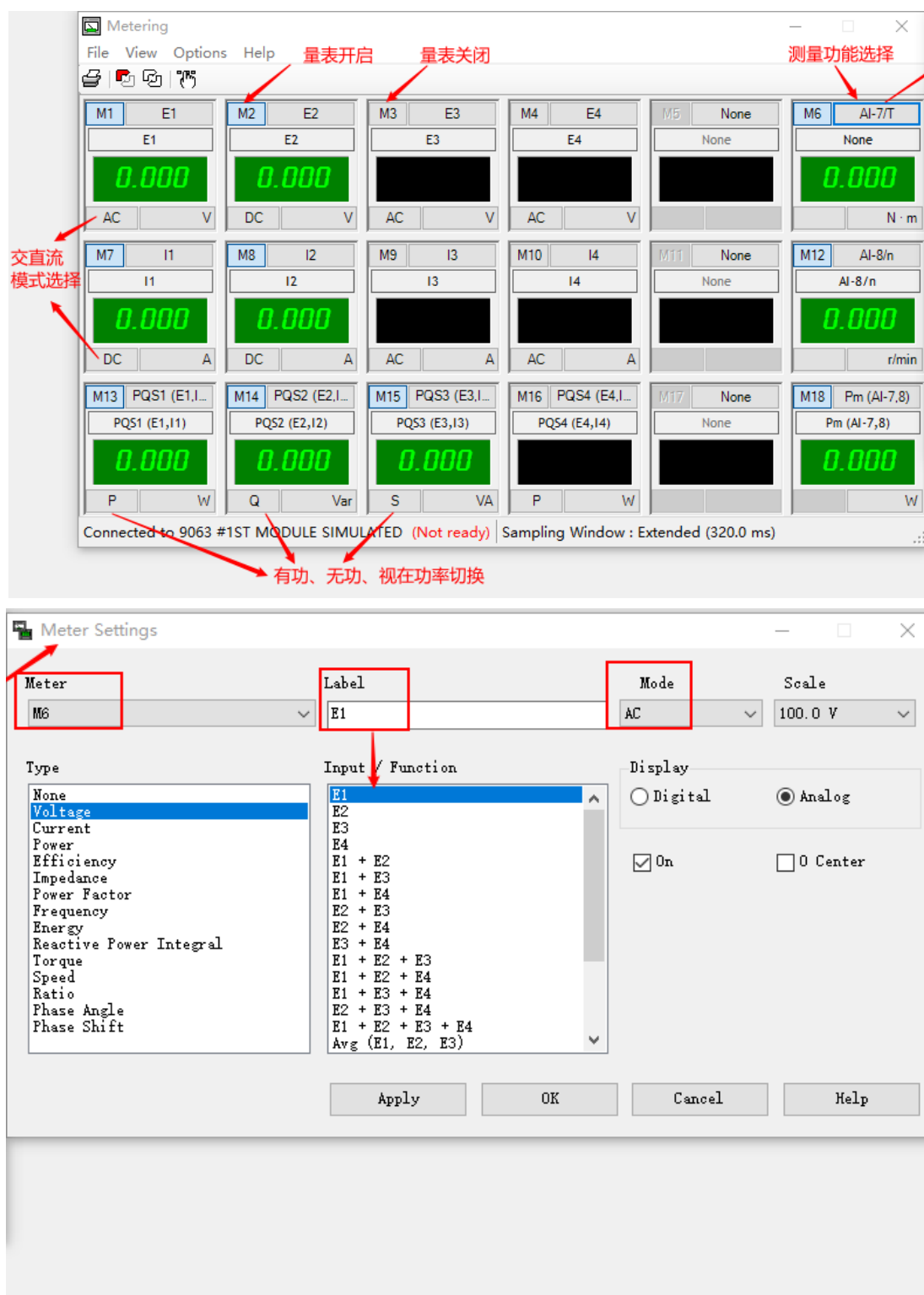


图 2-4 Metering 测量仪表功能界面

### 2.3.2 Oscilloscope（示波器）

该软件示波器为八通道示波器，如图 2-4 所示。每个通道的颜色和背景颜色都可以通过 View 菜单下的 color settings 进行设置。使用时，需注意以下事项：

（1）每个通道可独立设置垂直方向的基准电平（纵向基准），即 Scale 选项设置，需保证波形完整清晰的显示；

- (2) 耦合方式 (coupling) 选择: 若选择 AC 模式, 则只显示波形中的交流分量; 若选择 DC 耦合方式, 则显示波形中的直流+交流分量;
- (3) Time Scale (时间基准), 即水平方向的基准, 代表每格的时间长短; 采集波形时, 若想清晰展示波形, 则波形不可太密或周期数过少, 应调整合适的时间基准;
- (4) 光标定位: 共有四种模式, 水平光标、垂直光标、水平垂直光标 (水平可调)、水平垂直光标 (垂直可调), 可进行特定点的测量;
- (5) 工具栏中的“M1”、“M2”可实现波形的保存, 方便于后续的波形进行比较。
- (6) 波形最下方显示的波形数据可通过打开设置中的通道数据显示设置显示出来。

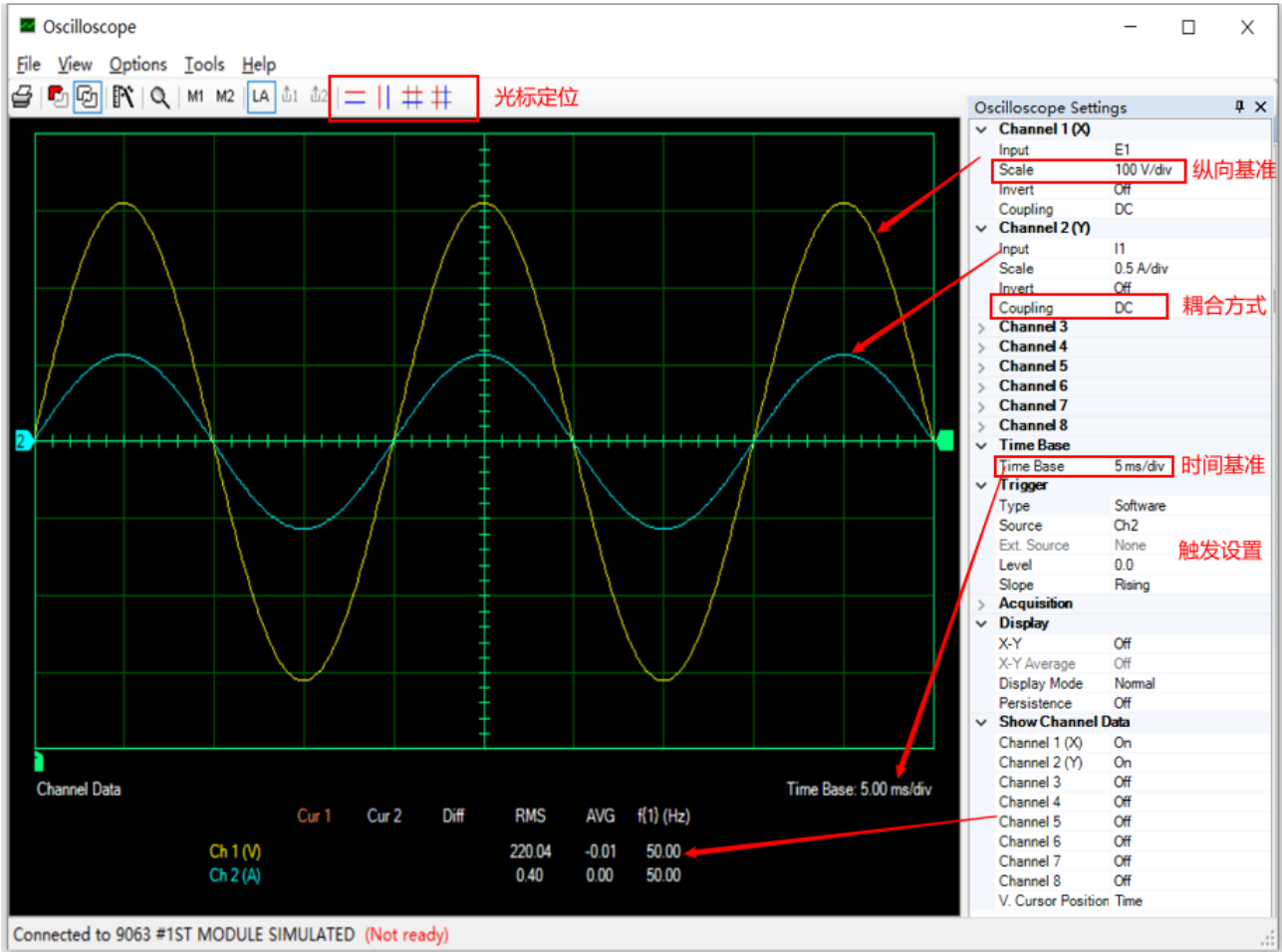


图 2-5 示波器功能界面

### 2.3.3 Phase Analyzer (相位分析仪)

相位分析仪, 如图 2-6 所示, 可测量的电压、电流与参考变量的相位之间的关系, 显示其相对幅值和相位差, 还可显示每个通道的电压或电流的有效值 (RMS)、相位和频率。

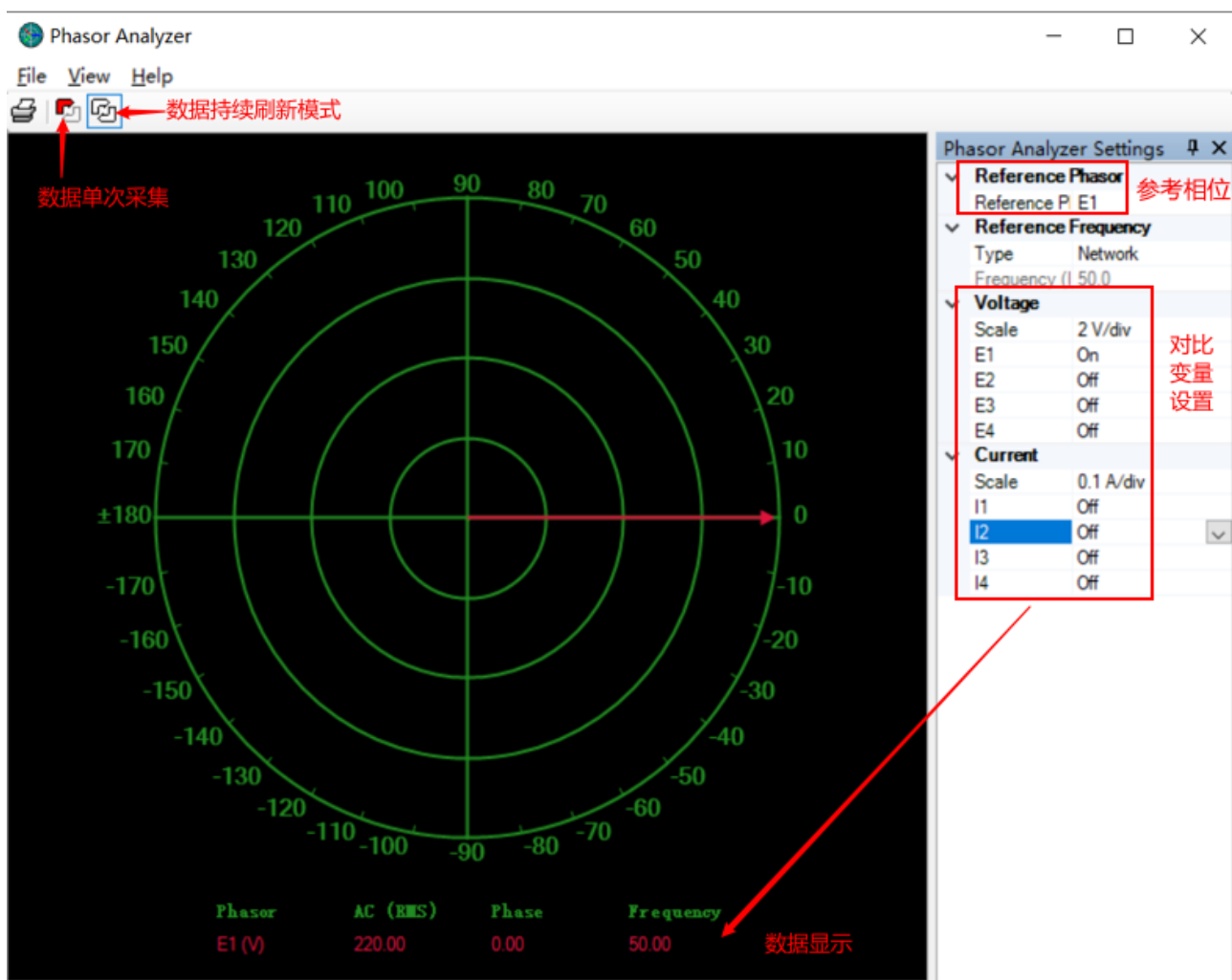


图 2-6 相位分析仪功能界面

### 2.3.4 Harmonic Analyzer（谐波分析仪）

谐波分析仪，如图 2-7 所示，主要是观察和分析所测电压或电流中的谐波分量。可将基频设置为用电网络的频率，即我国国标中的 50Hz，也可自动将其设置为所选电压或电流的基频。显示的谐波分量数量可选择 5 次、10 次、15 次、20 次、25 次、30 次、35 次和 40 次。可以绝对值或相对值的形式表示所选电压或电流的谐波分量数值，在数据表格中可以显示所测电压或电流的直流分量（DC）、基波分量（1f）、其他次数谐波分量（2f~40f）的值，以及总谐波畸变率（THD）。此外，还可以使用光标，测量特定点的数值。

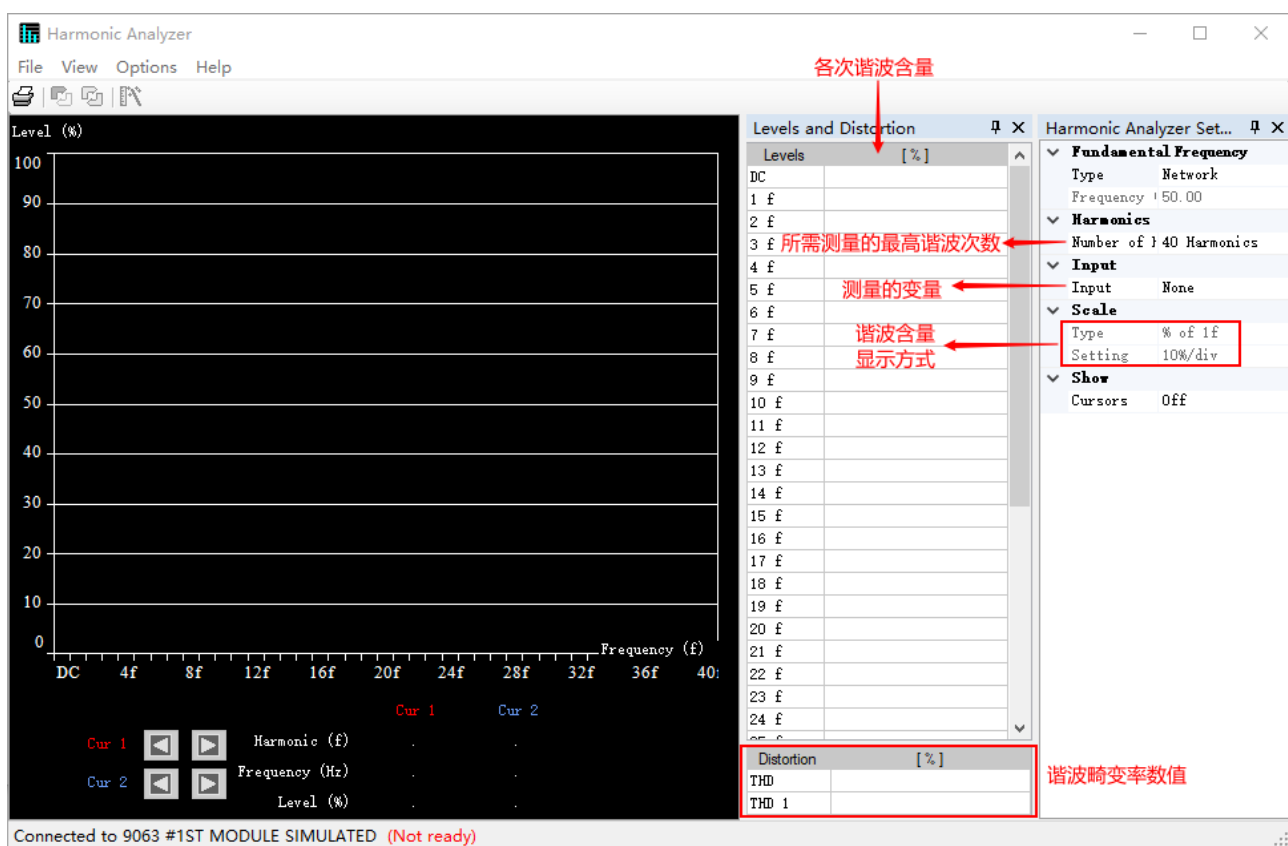


图 2-7 谐波分析仪功能界面

## 2.4 DACI 功能

硬件中的 DACI 模块主要实验数据的采集和控制信号的执行，对其控制设置则主要通过软件中的 DACI 模块完成。点击菜单栏中的 DACI 选项，可以看到该菜单下的功能列表，如图 2-8 所示，包括模拟输出 1、模拟输出 2、数字输出、斩波器/逆变器控制、功率晶闸管控制和直流无刷电机/永磁同步电机控制。选定某一项控制功能前，需确认对应的硬件电路是否连接正确。本节将主要介绍斩波器/逆变器控制、功率晶闸管控制功能。

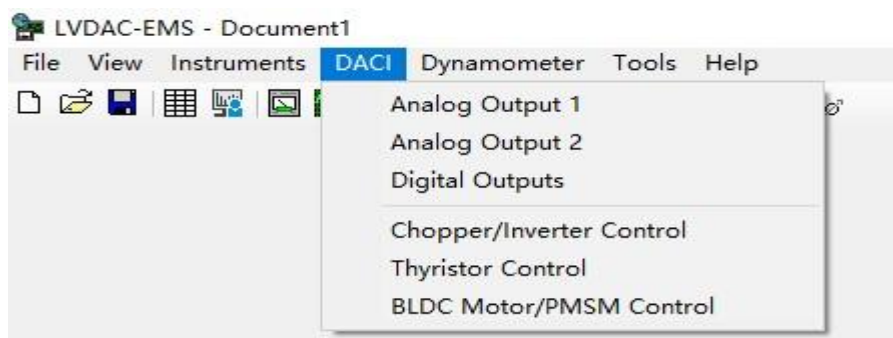


图 2-8 DACI 菜单功能

### 2.4.1 Chopper/Inverter Control（斩波器/逆变器控制）

Chopper/Inverter Control（斩波器/逆变器控制）模块的界面如图 2-9 所示，该部分可实现

对由 IGBT 组成的不同电路类型的控制，如图 2-10 所示。其作用原理如下：

- (1) 在硬件实验平台连接电路、计算机与 DACI 硬件模块建立通讯，DACI 模块中的控制信号通过 DB9 线缆接至功率器件模块，DACI 硬件模块中电压、电流测量通道接入主电路；
- (2) 在 LVDAC-EMS 软件中选择 DACI 菜单下的 Chopper/Inverter Control, 通过“Function Selection” 确定工作电路；
- (3) 设置对应电路的工作参数，注意参数的调整可直接设置数值，也可通过旋钮完成；
- (4) 点击“Start/Stop”开始实验，结束时则再次点击“Start/Stop”。

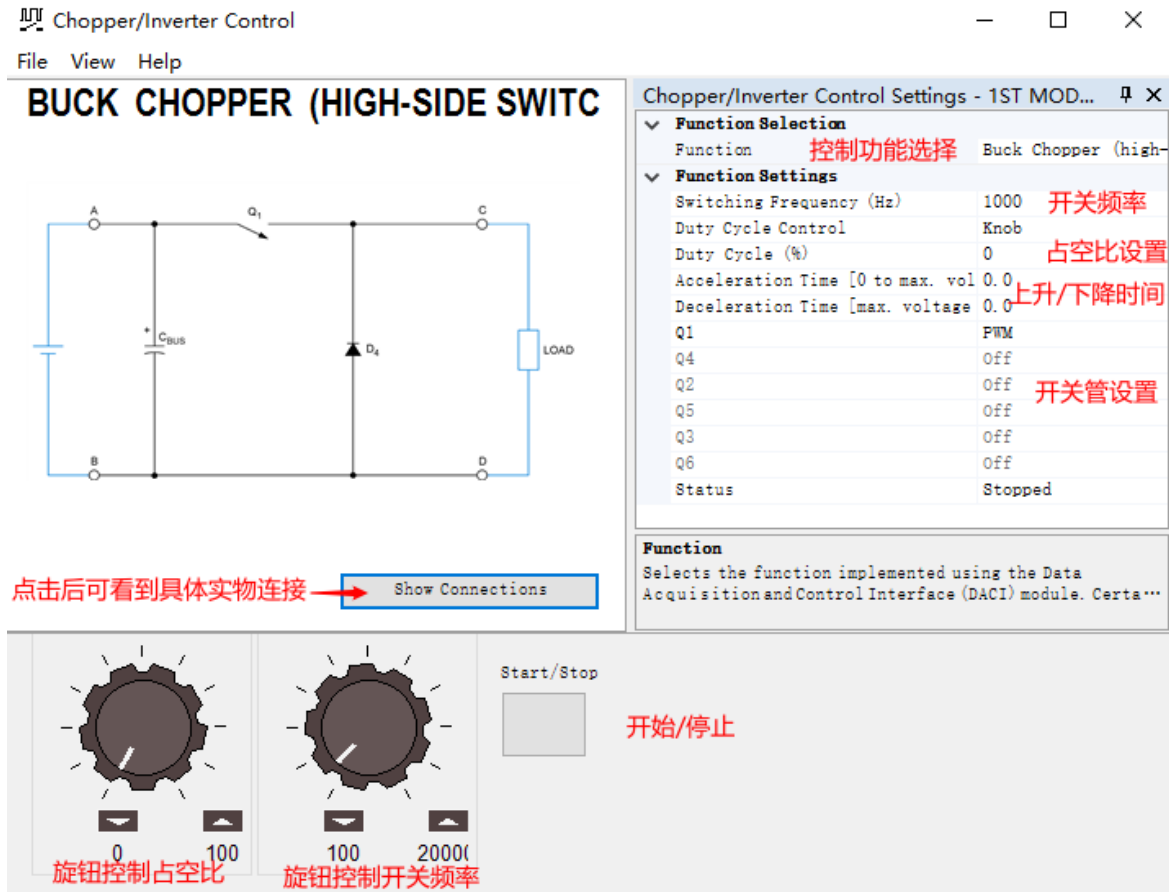


图 2-9 Chopper/Inverter Control（斩波器/逆变器控制）设置及控制界面

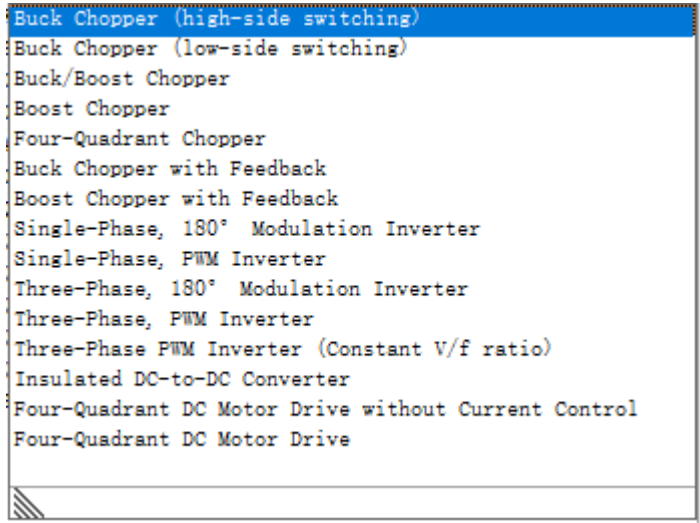


图 2-10 Chopper/Inverter Control（斩波器/逆变器控制）功能选项



### 2.4.2 Thyristor Control（功率晶闸管控制）

Thyristor Control（功率晶闸管控制）模块的界面如图 2-11 所示，该部分可实现对由功率晶闸管组成的不同电路类型的控制，如图 2-12 所示。其作用原理同斩波器/逆变器，但需注意：

- （1）该部分控制的主要是晶闸管的触发角大小；
- （2）使用旋钮或鼠标滚轮调节时注意调整幅度不要过快，以免损伤设备。

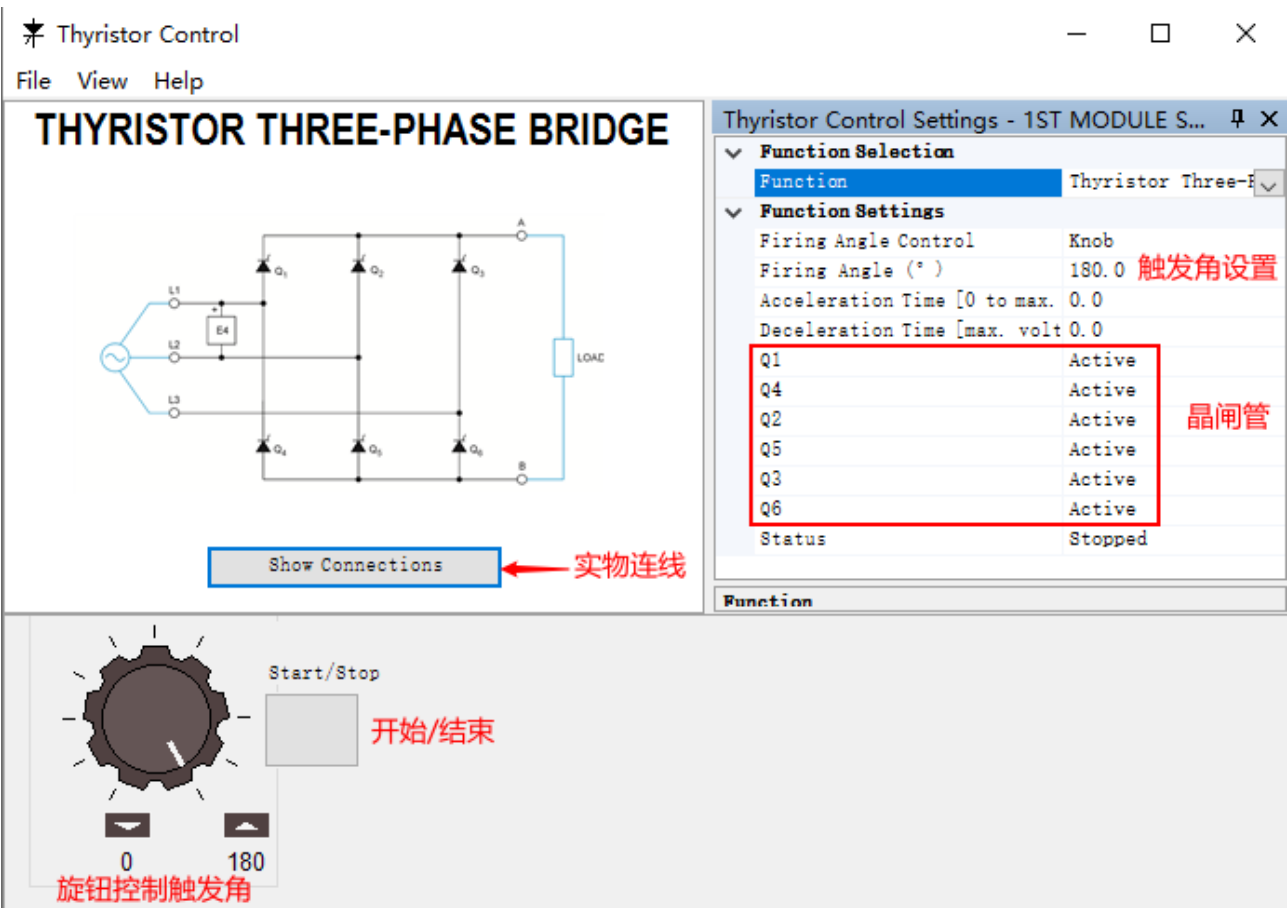


图 2-11 Thyristor Control（功率晶闸管控制）设置及控制界面

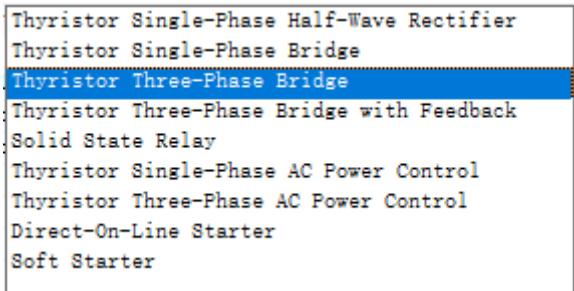


图 2-12 Thyristor Control（功率晶闸管控制）功能选项

### 2.5 Dynamometer（测功机）功能

点击 Dynamometer 选项，可以看到该菜单下的功能列表，如图 2-13 所示，包括 Four-Quadrant Dynamometer 和 Power Supply 两种工作模式。点击选项后出现功能设置界面。

当四象限测功机/电源硬件模块通过拨码开关选择**测功机模式**时（见【附录 1】1.2），既可以充当**机械负载**，也可以充当**原动机**，其功能如表 2-2 所示。实际功能由用户选择的控制功能决定。通过转轴上的皮带轮可以连接被测电机。

当四象限测功机/电源硬件模块通过拨码开关选择**电源模式**时，既可以用作**直流电压源**、**直流电流源**，也可以用作**交流电源**等，其功能如表 2-3 所示。实际功能由用户选择的控制功能决定。通过前面板的电源输出端子接入电路。

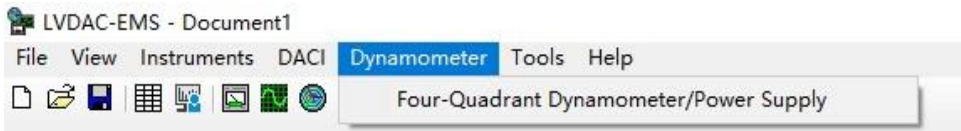


图 2-13 Dynamometer 菜单功能

表 2-2 四象限测功机模式下基本功能

序号	功能	序号	功能
1	两象限恒转矩制动器	6	四象限恒速原动机/制动器
2	顺时针原动机/刹车	7	顺时针恒转矩原动机/制动器
3	逆时针原动机/刹车	8	逆时针恒转矩原动机/制动器
4	顺时针恒速原动机/制动器	9	机械负荷
5	逆时针恒速原动机/制动器	10	速度扫描

表 2-3 电源模式下基本功能

序号	功能	序号	功能
1	正电压源	7	交流电源/50Hz
2	负电压源	8	交流电源/60Hz
3	直流电压源（可正可负）	9	交流电源
4	正电流源	10	200V 直流母线电压
5	负电流源	11	铅酸电池浮充
6	直流电流源（可正可负）	/	/

2.5.1 四象限测功机功能

根据表 2-2 可知，在四象限测功机模式下，可实现 10 种功能，具体如下：

（1）两象限恒转矩制动器（Two-Quadrant, Constant-Torque Brake）

此功能使内部永磁直流电机作为发电机运行，以产生与被测电机旋转方向相反的恒定转矩。当转速变化时，闭环控制用于保持反向转矩恒定。转矩大小可在软件中设定。

（2）顺时针原动机/刹车（CW Prime Mover/Brake）

此功能使用永磁直流电机使被测电机以一定速度顺时针旋转。用户可以设置空载转速。此功能非常适合研究交流发电机同步。

（3）逆时针原动机/刹车（CCW Prime Mover/Brake）

除旋转方向外，与顺时针原动机/制动功能相同。

#### (4) 顺时针恒速原动机/制动器 (CW Constant-Speed Prime Mover/Brake)

此功能使用永磁直流电机使被测电机以固定速度顺时针旋转。闭环控制用于在变化的负载条件下保持转速恒定。用户可以设置转速大小。

#### (5) 逆时针恒速原动机/制动器 (CCW Constant-Speed Prime Mover/Brake)

移动器/制动器除旋转方向外，与顺时针恒速原动机移动器/制动器相同。

#### (6) 四象限恒速原动机/制动器 (Four-Quadrant, Constant-Speed Prime Mover/Brake)

即功能(4)和(5)的结合，用户可以给定转速的大小和方向，注意，规定顺时针为正方向。

#### (7) 顺时针恒转矩原动机/制动器 (Positive Constant-Torque Prime Mover/Brake)

此功能使用永磁直流电机向被测电机施加顺时针方向恒定转矩。闭环控制用于在转速变化时保持转矩恒定，无论被测电机是作为电动机还是作为制动器（即发电机）运行。用户可以设置转矩大小。

#### (8) 逆时针恒转矩原动机/制动器 (Negative Constant-Torque Prime Mover/Brake)

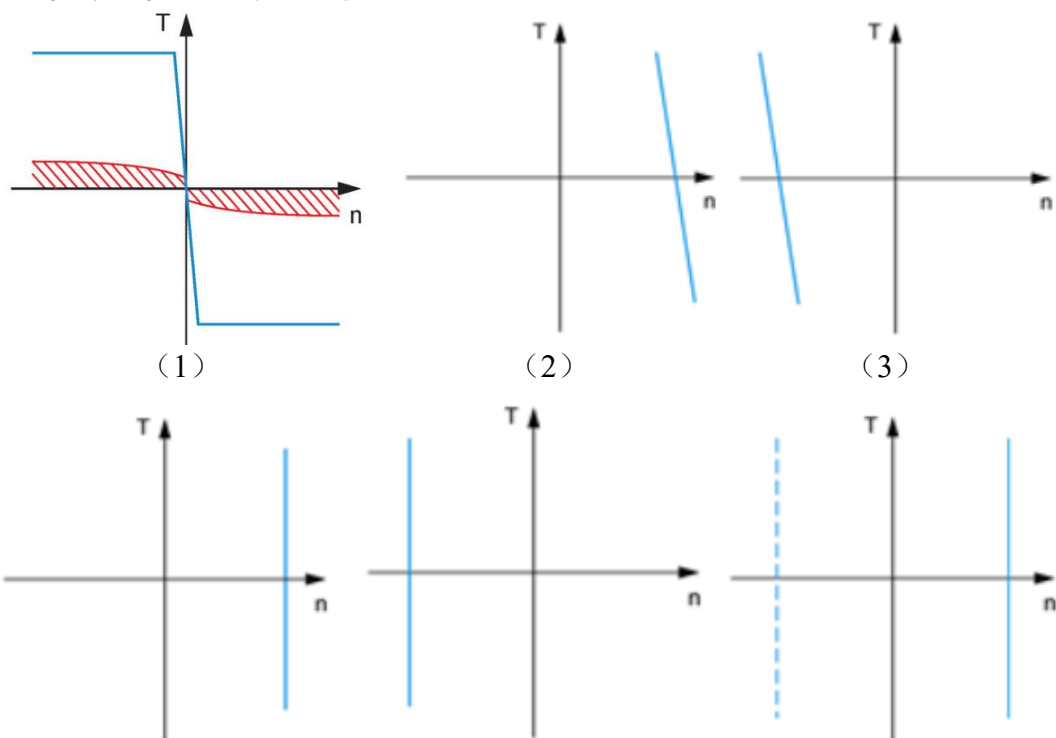
除转矩为逆时针方向外，与顺时针恒转矩原动机/制动器相同。

#### (9) 机械负荷 (Mechanical Load)

此功能用来模拟各种机械负载的转矩-转速特性，如飞轮、风机、磨床、传送带、起重机，根据不同的机械负荷，用户可以设定转动惯量、摩擦系数等参数。

#### (10) 速度扫描 (Speed Sweep)

此功能使用永磁直流电机使被测电机在特定速度范围，特定数量的步长和特定时间间隔内以各种速度旋转。闭环控制用于确保精确的速度扫描。用户需设置四个参数，即开始速度、结束速度、步数和步长，来定义执行的速度扫描。



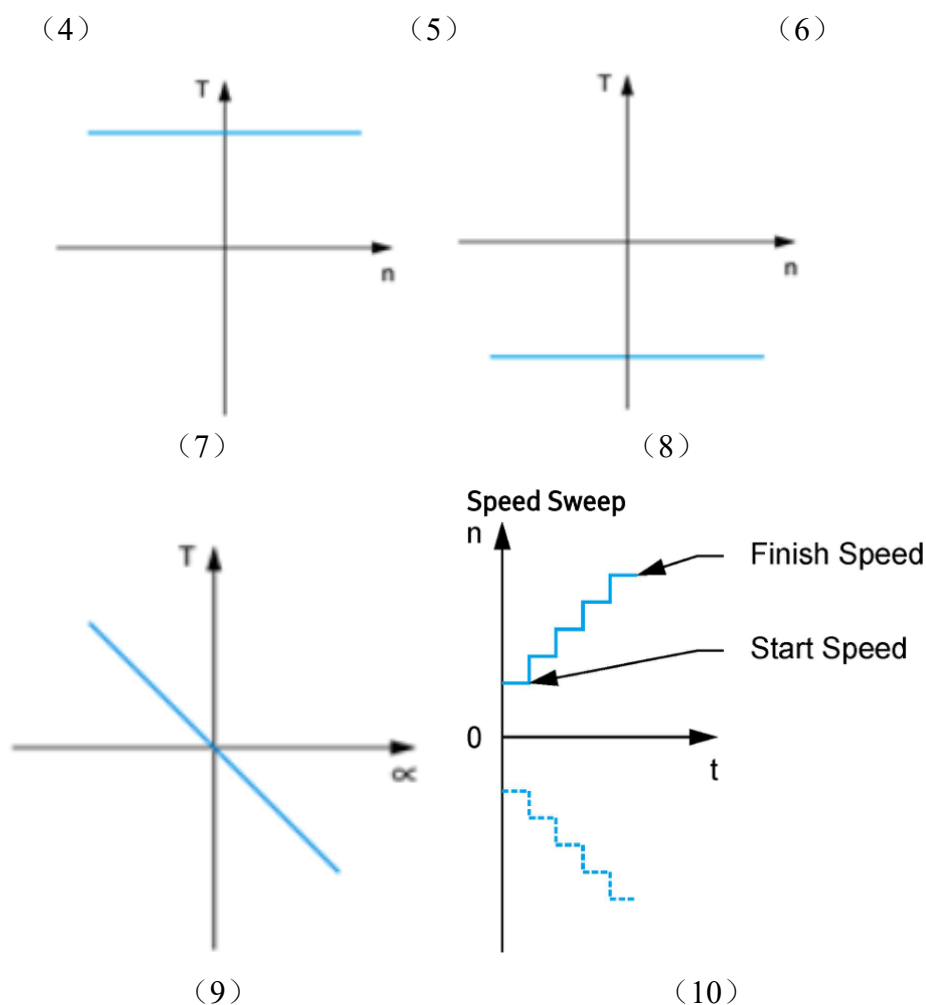


图 2-14 Dynamometer 功能模式

## 2.5.2 电源功能

根据表 2-3 可知，在电源模式下，可实现 11 种功能，具体如下：

### (1) 正电压源 (Positive Voltage Source)

此功能使用四象限电源来实现具有**正极性的直流电压源**，可以提供电流或吸收电流（双象限操作）。用户可以设置电源电压的大小。

### (2) 负电压源 (Negative Voltage Source)

除极性外，与正电压源功能相同。

### (3) 直流电压源 (DC Voltage Source)

此功能使用四象限电源来实现具有正极性或负极性的直流电压源。无论电源电压极性为正还是负，均可提供或吸收电流（四象限工作）。用户可以设置电源电压的极性和大小。

### (4) 正电流源 (Positive Current Source)

该功能使用四象限电源来实现直流电流源，该电流源在其输出端提供电流。电源两端的电压极性可以为正或负（双象限工作）。用户可以设置输出电流的大小。

### (5) 负电流源 (Negative Current Source)

除电流方向外，与正电流源功能相同。

#### (6) 直流电流源 (DC Current Source)

此功能使用四象限电源来实现一个直流电流源，该直流电流源在其输出端提供电流（正极性）或吸收电流（负极性）。无论电流的方向如何，源极两端的电压极性可以为正或负（四象限工作）。用户可以设置电流的方向和大小。

#### (7) 50Hz 交流电源 (50 Hz Power Source)

用户可以设置空载时电源输出电压的有效值（均方根值），注意，负荷变化时该电源的输出电压会发生变化（非稳压电源）。

#### (8) 60Hz 交流电源 (60 Hz Power Source)

#### (9) 交流电源 (AC Power Source)

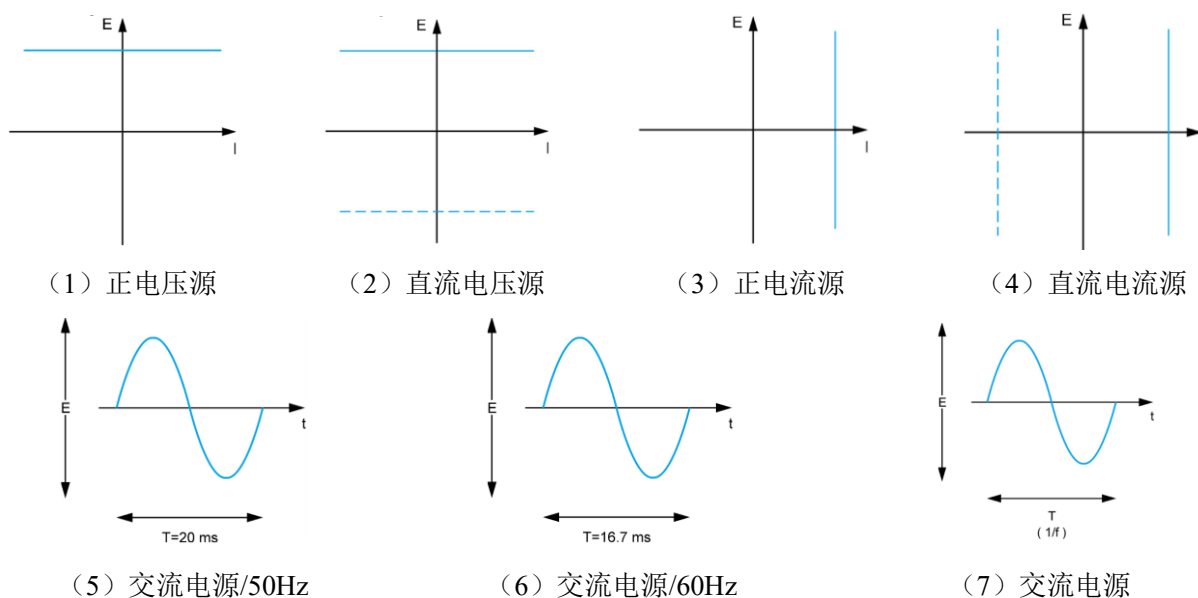
此功能使用四象限电源来实现非稳压可变电电压，可变频率交流电源。无论源电压极性（瞬时）为正还是负，均可提供或吸收电流（四象限工作）。用户可以设置空载时电源电压的有效值（均方根值）和频率。

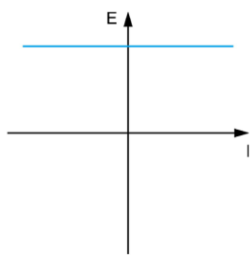
#### (10) 200V 直流母线 (200 V DC Bus)

此功能使用四象限电源来实现 200 V 的固定电压直流母线。该直流母线可提供或吸收电流（双象限运行）。

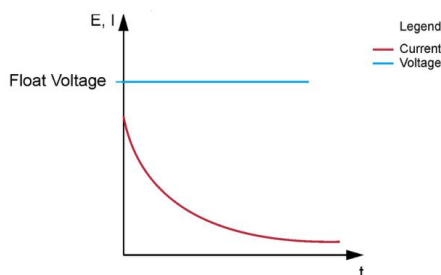
#### (11) 铅酸电池浮充 (Lead-Acid Battery Float Charger)

此功能使用四象限电源来实现铅酸电池浮充充电器。该充电器向电池施加恒定电压。用户只需指定电池浮动充电电压即可。该功能指示充电器输出端的电压，电流和电功率。铅酸电池浮充充电器功能非常适合为并联连接的数个铅酸电池充电过夜，从而保证次日实验的进行。





(8) 200V 直流母线电压



(9) 铅酸电池浮充

图 2-15 电源功能模式

## 2.6 数据处理

在 LVDAC-EMS 软件中，可实现数据的记录、处理和展示，主要利用工具（Tools）菜单下的数据表格 Data Table 功能选项完成，如图 2-16 所示。

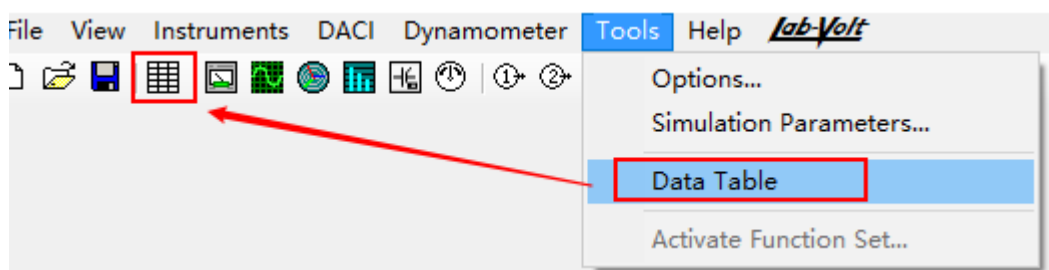


图 2-16 数据表格

Data Table 工具可以记录 LVDAC-EMS 中所有仪器和控制功能的仪表所测量的值。可利用计时器，以特定时间间隔记录数据。数据表中记录的值可以保存到文件中。通过在“图形”窗口中选择要绘制的参数，记录的数据也可以用于绘制图形。这样可以快速轻松地绘制实验结果。所记录的内容也可以导出至 Excel 等文件中，便于分析和绘制复杂图形。具体工具如图 2-17 所示。

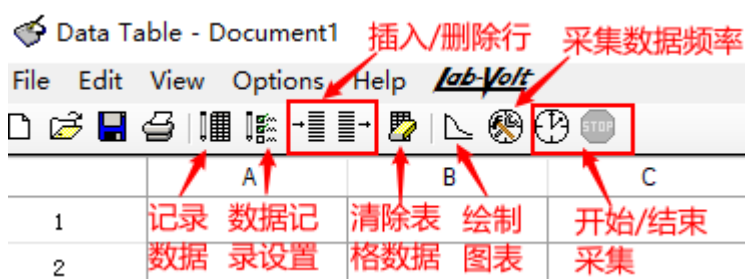


图 2-17 数据表格工具栏

### 1、数据记录设置 Record settings

采集的数据一般涉及四象限测功机/电源、示波器、电力电子变换器等运行界面或模块的相关数据，每个模块或界面涉及的数据种类不同，如四象限测功机状态下的转速、扭矩、功率等，示波器界面中的各通道波形的平均值、有效值等，电力电子变换器中的工作频率、占空比等数据。

在以上数据采集涉及的模块或界面打开后，方可在 **Record setting** 功能界面选择对应的数据类型，当所有需采集数据类型全部勾选完以后，点击确认。

2、采集数据频率 Timer settings

Timer settings 功能则主要是设置采集数据的间隔和数量，如图 2-18 所示，表示在 1s 的实践内采集 100 个数据。

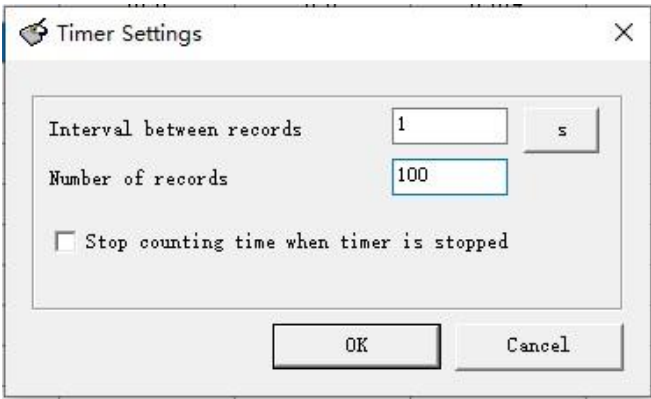


图 2-18 Timer settings 参数设置界面

3、绘制图表 Graph

图表绘制界面可以选择数据的显示方式（Appearance），如散点图、线图、点线图。此外，还可以根据需要设置图表的坐标轴、线条颜色、量程等信息。

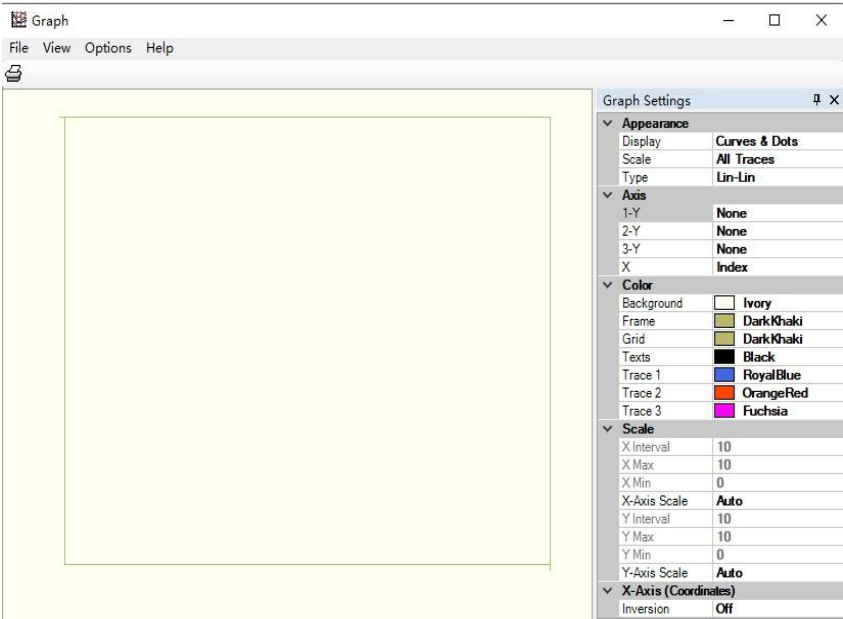


图 2-19 Graph 设置界面