

附件一.TMSR 缩比仿真堆堆芯加热装置电源技术规格说明书

1. 简介

缩比仿真堆是重要的实验平台，它可以模拟熔盐堆的多种实验工况，进行多种实验测试，对熔盐堆的研究与设计具有重要意义。缩比仿真堆供热系统为缩比仿真堆提供热源，模拟堆芯的供热系统。缩比仿真堆的供热系统主要包含加热器装置和电加热器电源装置两个关键设备。本项目目标为研制缩比仿真堆供热系统电加热器直流电源。电加热器电源电流较大，稳定性和纹波电流技术指标要求较高，必须精心设计，在设计和工艺上保证电源的稳定性技术指标。在满足稳定性要求基础上，注重可靠性和可维护性设计，同时兼顾降低功耗的可行方案。

2. 用途

电加热器电源为 19 根棒束型加热器提供电功率，电功率需要模拟反应堆的瞬态，需要能按照既定要求快速升降功率，同时需快速准确地测定电功率。

电加热器电源包括 3 个整机电源机柜；3 个整机电源机柜分别内设三组直流源，每台机柜内设 8 台 375A/85V 电源模块为加热器提供电功率；加热器电源同时在线电源模块为 19 台，其余 5 台电源模块离线备用。直流源及电源模块的主控制器采用本所研制的基于通用 10/100BASE-TX 自适应网络接口的高精度双核数字控制器，反馈电流检测器件采用本所研制的高精度低温漂 400A 的 DCCT 电流传感器。所有电源模块通过网络接口连接到网络交换机与中控建立通信连接。

3. 技术规格

表 3-1 电加热器电源技术规格

直流源（3 套）	整流模式	12 脉波二极管整流
	母线电压	>110V
	*电压纹波	≤1%
	负载	阻性负载：0.213 Ω

电源模块（24台）	**电源规格	375A/85V
	**模块输出电流	0 到 375A 可调
	**模块输出电压	0 到 85V 可调
	**模块长期稳定性	≤250ppm/24 小时@375A
	*变换器类型及开关频率	斩波器变换器，≥20kHz
	*输出电流纹波	≤100ppm
	*电流分辨率	≤100ppm
	*重复性	≤100ppm
	*最大超调量	≤0.15%
	*零电流到稳态额定电流上升时间	≤0.70s
整机电源（3台）	*功率因数	≥95%
	*电源效率	≥80%
	**冷却方式	水冷，流量保护

## 4. 工作条件

电源：电源采用 380VAC/50Hz 交流供电，电压波动范围不大于±10%。采用三相四线制带接地线供电模式（ABCN+PE）。

供水：冷却用去离子水，去离子的电导率小于  $6\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，水温控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内，冷却水温在  $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。对冷却水系统，在  $10\text{kg/cm}^2$  压力下，测试 3 小时，不渗不漏，在  $6\text{kg/cm}^2$  压力下，长期稳定工作。

温度：电源可以在环境温度为  $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$  的条件下工作，稳定工作条件下，环境温度波动小于 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

工作湿度： $20\%\leq \text{相对湿度}\leq 80\%$ 。

连续工作时间：长期，连续稳定工作。

## 5. 设计方案

电加热器电源为高精度低纹波稳流电源，要求长期可靠运行。设计要兼顾输

出电流指标和功率因数等电网特性指标；电源具有良好的 EMC 预兼容设计，在原理设计和工艺设计上保证电源的 EMC 预兼容特性。

## 5.1. 电源结构设计

电源包括 3 个机柜，机柜宽度 2\*800mm、机柜深度 1 米、高度不超过 2.2 米（带 300mm 高底座，无前门，带后门）；每台机柜内设 8 台 375A/85V 电源模块为加热棒提供电功率，同时在线电源模块为 19 台，剩余 5 台电源模块离线备用；每个电源机柜内置独立直流源，直流源的功率按照 6 台模块的功率设计，直流源内变压器按 1.3 倍容量设计；电源模块以机箱为单位，采用标准尺寸机箱。

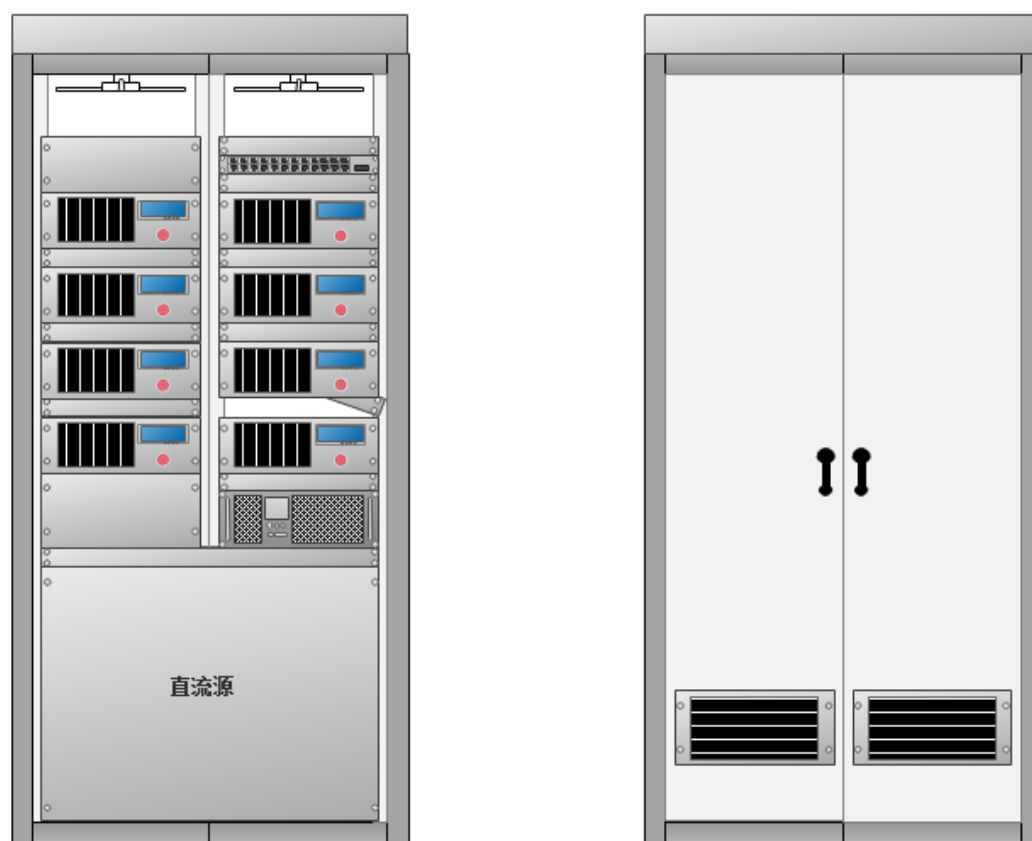


图 5-1 电加热器整机电源结构

### 5.1.1. 结构要求

- 电源采用模块化设计，采用一种单体电源模块进行组合，减少维护种类和备件种类，节省成本、维护、备件费用；
- 减重设计：通过优化散热器重量使电源模块维护方便可单人维护，设计

模块电源重量小于 30kg；

- 整机电源现场安装方便：并柜后机柜底座一体化，减少现场人员恢复机柜间多根并机线及并机铜排；
- 机柜的正面、背部的下端设置两个专用接地端子。
- 机柜内提供维护用光源，在柜门或面板打开时，自动点亮灯光。
- 整机内部结构功率线缆采用从机柜底部进出线的方式，方便接线。交流输入端子标明电压和对应的相别，电源输出端子标明端子的极性。输入、输出端子设计在设备的后方、底部合理位置，要求电气安全，操作方便，结构美观。
- 电源顶部具有吊环，支持吊装、支持叉装；
- 考虑到单体电源模块需要通过网线连接置机柜内交换机，需要考虑网线布线时美观，同时兼顾维护的方便性。
- 机柜内交换机与中控连接线采用光纤或者普通网线，需要提前设置合理的布线通道。
- 无论是直流源模块，还是单体电源模块，布局布线均需要美观大方。强弱电缆无交叉，内外走线合理。

### 5.1.2. 水路要求

三组冷却水管从底部接入三个电源机柜，冷却水进出水配水管路内径 20mm。电源内部冷却水的相关设备，冷却水排只能使用紫铜或不锈钢材质，冷却水管采用高聚物复合液压软管，水流监测位置在电源机柜的回水通道上。

由于每个机柜采用一路总冷却水，直流源与分体模块在分享冷却水时需要考虑存在位置较高的电源模块可能供水不足的情况。

电源机柜的进水和回水通道分别要求有总阀门，便于调试和检修。冷却用去离子水，去离子的电导率小于  $6\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，进水水温控制在  $\pm 3^\circ\text{C}$  以内，冷却水温在  $25 \pm 3^\circ\text{C}$ ，出水冷却水系统在  $10\text{kg}/\text{cm}^2$  压力下测试 3 小时，不渗不漏，在  $6\text{kg}/\text{cm}^2$  压力下，长期稳定工作。

### 5.1.3. 门楣及外观要求

- 铭牌标签：聚酯无光标签打印纸。
- 表面处理：机柜磷化后喷塑 RAL7035 小皱；底座磷化后喷塑 RAL7022 平光
- 主要工艺：模块采用铝型材插箱，内部连接基本全部为硬连接，安装维护方便

## 5.2. 电源电气设计

电源采用共直流母线的运行方式，每台电源机柜的下部空间设置一套直流源系统，作为直流模块的输入电源。

### 5.2.1. 电源控制器

电源控制器由投标方采购。

直流源与电源模块的主控制器采用本所研制的基于通用 10/100BASE-TX 自适应网络接口的高精度双核数字控制器。数字控制器主要特性如下：

- 多核处理器系统，高效的通信与运算效率；
- 内嵌硬件浮点运算器，峰值浮点处理速度达到 150Mflop/s；
- 内嵌大容量 FLASH，可存储超过 400 万浮点波形数据；
- 通用的 10/100BASE-TX 自适应网络接口，支持两路独立 socket；
- 高速、稳定的 OFC 通信，抗干扰性强，支持基于 OFC 的快校正无相位差控制；
- 8 路隔离的数字输出接口，16 路隔离的数字输入接口；
- 高精度 PWM 发生器，输出频率 1Hz~100kHz 连续可调；
- 支持多控制器 PWM 同步、移相、级联控制；
- 先进的 PID 控制算法；
- 可编程动态波形控制，支持自触发，光纤同步外触发；

- 优于 18 位有效分辨率的电流采样通道（1ksps~100ksps）；
- 优于 14 位有效分辨率的电压采样通道（1ksps~100ksps）；
- 支持控制器板卡温度探测及温漂修正；
- 卡间采用高速信码互联，抗干扰性强；
- 输入直流电压范围 18~36V，最大输入功率 20W；

### 5.2.2. 电流传感器

电流传感器由投标方统一采购。

电源模块的反馈电流检测器件采用本所研制的高精度低温漂 400A 的 DCCT 电流传感器，传感器主要特性如下：

- long term stability1): <5ppm/24h；
- Linearity error2): <10ppm；
- Temperature coefficient @ Is=0A: <5ppm/°C；

### 5.2.3. 主电路设计

电源基本组成应包括以下部分：EMI 滤波器、进线断路器、整流变压器、全波整流桥、工频滤波电路、储能电容。直流源需要设置软启动功能，以降低开机瞬间对电网的冲击和提高电源的可靠性，开机的浪涌电流小于额定工作电流。储能电容器要有充电保护措施，包括采用并联过压泄放支路等措施。储能电容器的最高工作电压不得超过电容器额定电压 85%。

直流源采用 12 脉波整流方式，直流母线电压建议选择 110V。为提高电源的整体可靠性，整流二极管容量必须大于电源额定工作状态下整流二极管容量的 1.5 倍；为降低整流低频纹波，三相整流不平衡度要求小于 0.5%；直流源滤波器参数设置优先考虑 8 个电源模块动态情况下能够有效抑制直流母线的电压波动，并考虑电网波动情况下能够有效抑制直流母线的电压波动。

电源模块基本组成应包括以下部分：输入滤波电容，输出级 2Q 变换电路，以及电流测量器件 DCCT、电压测量器件、控制和保护电路，IGBT 功率器件驱动

器，EMC 滤波器等。电源模块主要参数指标要求如下：

为了保证电源纹波要求，2Q 变换器的等效开关频率设置在 20kHz 以上。输出滤波器采用两级 LC 滤波器以确保开关频率纹波低于设计限值，两级滤波器设置可以在保证输出电流纹波限制的要求下提高滤波电路的转折频率，提高电源的相应速度。如果电源模块的输出采用补偿支路提高控制带宽，则补偿支路参数的设置不应应对负载电流的稳定性和纹波电流值产生不利影响。

为保证电源的可靠工作，主要开关器件电流电压具有 1.5 倍余量，并要求采用商用集成驱动电路模块，并保证足够的驱动能力。

#### 5.2.4. 操作功能

单电源模块的操作主要由网络控制，这里的操作功能主要针对的是直流源操作。

- 待机操作：手动控制电钥匙开关给控制加电，如果一切正常，电源进入“待机”状态。
- 开机操作：由计算机（通过以太网接口连接控制系统或根据授权进入本地计算机）送出开机指令，电源执行开机操作，顺利开启，从“待机”——“运行”。
- 关机操作：由计算机送出关机指令后，电源执行关机操作，从“运行”——“待机”。（若为直流源，断开主回路开关，顺利关机，直流源转入“待机”）
- 复位操作：清除检测到的故障，使得电源由“故障”返回到“待机”状态，本地设复位按钮。
- 急停操作：急停按钮按下，电源断开主回路，停止输出，并对主回路进行紧急放电操作。
- 单体电源模块配置有急停按钮，急停按钮按下，单体电源模块输出电流快速下降至零，进入关机状态。

#### 5.2.5. 显示功能

- 配电指示：红色指示灯，灯亮有电，灯灭无电。
- 电源运行/待机状态指示：绿色指示灯，灯亮电源运行状态，灯灭电源待机。
- 电源故障指示：黄色指示灯，灯亮电源故障状态（只有柜门打开故障灯不亮），电源停机。
- 电源报警指示：声光报警器，声光报警工作，电源故障状态或柜门打开。
- 单体电源模块面板配有显示模块，显示模块当前输出的电流、电压。

#### 5.2.6. 放电功能

电源具有关机后母线安全放电功能，要求母线放电时间 $\leq 10s$ 。

#### 5.2.7. 联锁保护

电源的联锁保护功能对电源的稳定、安全运行极为重要。电源的联锁功能分为内联锁与外联锁。内联锁主要是将电源自身的重要故障信号作为电源关机条件，用于保护电源安全运行。外联锁主要是将外部需要保护对象的故障信号作为电源的关机条件。所有输入、输出联锁信号需要做锁存处理，联锁信号发生后通过复位按钮解除锁存。电源的内联锁信号包括但不限于以下内容：

- 直流源：输入过压（ $>10\%$ 额定输入电压）、欠压（ $<10\%$ 额定输入电压）、缺相（4路 $\times$ 3相）；
- 斩波器模块：输出过压（ $>10\%$ 额定电压）、过流（ $>10\%$ 额定电流）；
- 冷却水：断水（ $<70\%$ 额定水流量）；
- 主断路器故障（吸合、断开异常）、变压器过热（ $>85^{\circ}C$ ）、整流桥过热（ $>55^{\circ}C$ ）、平波电抗器过热（ $>85^{\circ}C$ ）、储能电容过热（ $>45^{\circ}C$ ）、储能电容过压（ $>85\%$ 电容额定电压）、DC/DC变换器过热（ $>55^{\circ}C$ ）、变换器扼流圈过热（ $>85^{\circ}C$ ）、功率器件驱动故障（驱动异常）等。
- 预留外部连锁端子，实现电源的输入、输出联锁功能。

#### 5.2.8. 兼容与安全防护

电磁兼容：输入选用专用常州坚立 EMI 电源滤波器，极佳的低频衰减特性，



具有良好的共模和差模干扰。

机箱屏蔽设计，机箱散热孔按照屏蔽孔尺寸设计，同时具备散热和屏蔽双重功能。

静电放电抗扰度满足等级三要求（工业级）；

电快速瞬变脉冲群抗扰度满足等级三要求（工业级）；

安全防护：机柜门板接地端子、机柜底部设计接地铜排，保护人身安全，输入强电配电部分采用有机玻璃板安全防护，电源高压大电流危险处有安全标示。

输出对保护地绝缘阻抗：100M $\Omega$ /DC500V，绝缘电压：AC2500V；输入对保护地绝缘阻抗：100M $\Omega$ /DC500V，绝缘电压：AC2500V；输入对输出绝缘阻抗：100M $\Omega$ /DC500V，绝缘电压：AC2500V。绝缘耐压测试时漏电流 $\leq 10\text{mA}$ 。

### 5.3. 电源控制与保护

#### 5.3.1. 控制卡输入及查询

计算机通过控制卡以太网接口进行控制卡参数设置（控制器参数设置、单体输出电流采样系数设置、16路DI和8路DO配置、及控制器其他配置）以及输出电流、电源状态及故障查询功能。

#### 5.3.2. 加热器过温保护

电源外连锁信号主要以加热器过温信号为电源模块关机条件。主要由硬件，软件两重信号保护机制构成。硬件保护信号为：当加热器过温时，外部控制系统产生无触点开关信号，通给电源，进行关机操作，触点闭合表示加热器温度正常，触点断开表示加热器过温。软件保护信号为：当加热器过温时，外部控制系统通过网络接口发送电源关机指令，达到实时控制电源，断电保护的目的。

## 6. 必备的附件、备件或者专用设备工具

加热器电源在测试验收时需要配备专用的测试设备，主要但不限于：

- 数字化电流稳定性采集平台，包括：高精度6位半数字表、400A/DCCT、转换机箱、PC机；

- Tektronix TDS3034 示波器（或性能相当的其它示波器）；
- A6302，A6303 电流探头（600A）
- 数字万用表；
- 直流钳表。

电源在厂内进行测试时，上述测试设备由投标方提供；电源在实地交付验收时，由中国科学院上海应用物理研究所磁铁电源组提供。

## 7. 质量保证

供货范围内的设备和材料投标方在出厂前对其质量检验、检查和试运行，合格后运出。提供工厂的测试通过报告，并提供出厂质量合格证书、装箱单等。

电源的设计、制造、和元器件的测试遵循 ISO-9001 所提供的质量保证和程序规范。

电源主部件必须取得相关部门的质量检测认证。

生产过程，必须按一定格式提交项目工作相关的进展月报、质量跟踪卡、测试程序和结果报告。

下列文件是技术要求的一部分，电源设计和加工、装配以及测试验收必须遵从和满足以下标准，但不限于如下标准，

- GB4793.1-2007：测量、控制和实验室用电气设备的安全要求 第一部分：通用要求
- GB5226.1-2008：机械电气安全 机械电气设备 第一部分：通用技术条件
- GB9969-2008：工业产品使用说明书总则
- GB191-2008：包装储运图示标志

## 8. 到货周期

- 1) 自合同签订日起，6 个月内，加热器电源及采集器可到达合同指定地点。
- 2) 延误到货按合同规定赔偿招标方损失。

完成设计	合同签订后 1 个月
完成加工	设计确认后 4 个月
出厂测试	加工完成后半个月

完成现场安装和测试	出厂测试完成后半个月
-----------	------------

## 9. 安装、调试

- 1) 投标方须在设备交付前 1 个月提供一套用户现场安装准备要求资料。
- 2) 投标方在实地安装条件具备后，收到招标方通知 7 日内，派技术人员前来免费安装，并调试至正常使用。

## 10. 电源验收

验收分为出厂验收和上海应用物理研究所现场验收两个阶段。出厂验收指电源在工厂加工完后，在工厂进行出厂测试，以功能实现和功率考核项目为主，性能指标测试为辅；现场验收指电源在实际安装现场连接实际负载，或在专用测试场地连接实际负载，根据测试项目和测试方法对电源作验收测试，并证实测试结果满足电源的技术要求。对电源各项指标测试结果满足或优于设计指标之日定义为电源验收合格之日。

在电源的制造和测试期间，根据需要安排进驻工厂，监督建造和测试。如果发现在设计上或者测试性能存在指标临界的情况，可以根据需要进行额外的测试或在更大范围上进行测试。电源的测试验收项目包括，但不限于以下项目

### （1） 直流母线电压纹波

母线电压纹波计算方法如下：

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\%$$

$\Delta U$ ：母线纹波电压峰峰值

$U_U$ ：母线电压电压

### （2） 电源模块长期稳定性：

电源模块 100%额定电流/24 小时测定，计算方法如下：

$$\gamma = \frac{I_{MAX} - I_{MIN}}{I_N}$$

$I_{MAX}$ ：1 小时预热后，在设定值不变条件下，测试期间输出最大电流；

$I_{MIN}$ : 1 小时预热后, 在设定值不变条件下, 测试期间输出最小电流;

$I_N$ : 额定电流值。

(3) 电源模块输出电流纹波;

输出电流纹波包括: 低频 (交流电 50Hz 及倍频成分) 纹波电流和高频 (电源开关频率) 纹波电流, 计算方法如下:

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I_N}$$

$\Delta I$ : 纹波电流峰峰值

$I_N$ : 额定电流值

(4) 电源模块输出电流分辨率;

电流分辨率计算方法如下:

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I_N}$$

$\Delta I$ : 可以输出的最小电流步长;

$I_N$ : 额定电流值。

(5) 电源模块输出电流重复性;

电源模块在不同时刻, 设置相同的额定输出参考电流时, 输出电流的差值与平均值的比值, 以百分比表示。计算公式如下:

$$\delta = \frac{|I_{t1} - I_{t2}|}{I_N}$$

$I_t$ : 不同时刻输出的电流值;

$I_N$ : 额定电流值。

(6) 电源模块动态指标;

测试电源由 0A 输出到额定输出的阶跃响应指标。

最大超调量:

$$\sigma = \frac{I(t_p) - I(\infty)}{I(\infty)} \times 100\%$$

$I(t_p)$ : 响应的最大偏离电流;

$I(\infty)$ : 稳定电流值。

(7) 整机电源功率因数;

$$\cos \varphi = \frac{P}{Q} \times 100\%$$

$P$ : 整机电源所有在线模块全部满载额定输出时的有功功率;

$Q$ : 整机电源所有在线模块全部满载额定输出时的无功功率;

(8) 整机电源效率。

$$\sigma = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \times 100\%$$

$P_{IN}$ : 整机电源所有在线模块全部满载额定输出时的瞬时输入功率;

$P_{OUT}$ : 整机电源所有在线模块全部满载额定输出时的瞬时输出功率;

(9) 故障保护

故障保护验收主要考察电源内联锁/外联锁或故障信号发生后, 电源能否及时响应并进行电源保护, 并且所有联锁或故障信号发射后能够自动锁存, 复位后解锁。

(10) 满载时电源开关机

整机电源所有在线电源模块全部额定输出情况下, 进行满负载关机操作。反复 3 次, 考察电源能否正常工作。

(11) 其它

EMC/EMI 测试, 根据测试条件和应用需要确定。

## 11. 技术培训

- 1) 投标方免费提供技术培训, 培训的时间与内容由双方商定。
- 2) 投标方负责现场安装调试, 正常运转验收合格后方能交付使用。现场培训应包括仪器原理、操作、维护、故障排除等方面的免费培训, 时间为 1 周。应达到招标方操作人员能独立操作仪器, 迅速投入使用。

- 3) 安装调试所发生的费用，全部由投标方承担。

## **12.售后服务**

- 1) 保质期：仪器到达后 15 个月或设备验收报告签字之日起 12 个月，两者以先到为准，投标方应当定期访问招标方，检查仪器的运行情况，交流应用方面技术。在保质期内如出现仪器运行不正常，投标方将无偿提供服务。人为因素除外。
- 2) 保质期内投标方服务中心为招标方提供优质服务，接到招标方维修邀请后，24 小时内电话应答，投标方工程师接到电话起 48-72 小时之内到达招标方现场，恢复仪器正常运行。
- 3) 在保质期内还是在保质期外，投标方将为招标方提供优质的服务，投标方应当在 24 小时内回答招标方提出的仪器故障。在招标方提出现场维修后 72 小时内到达招标方现场，尽快使仪器正常工作。

## **13.其它事项**

### **13.1. 双方沟通和联合工作形式**

根据工作需要可安排人员驻厂参与各阶段设计、调试、试验和测试等工作，投标方提供工作和生活方便，费用由招标方自理。

投标方必须每两周提供一份项目进度报告，包含次两周详细工作计划，可根据此计划决定参与环节和具体细节。

### **13.2. 图纸文档要求**

电源图纸文档用于电源使用和维护，包括图纸、程序、用户手册等。以及所有部件和子系统的完整的文档说明。手册、以及文档使用中文。所有文档制成纸质文档和电子文档。文档内容和格式必须符合文档规范和归档要求。文档包括如下部分，但不限于如下部分：

- 用户手册，操作手册，维护手册。
- 维护手册包括如下内容，但不局限于这些内容：
- 技术规格，使用说明书，控制接口命令集/控制协议，接线说明书，电路图，结构框图，维护流程（运行和防护），部件参数表，常规调整和标定流程，故障检查表等。以及最终部件列表，推荐备件列表以及相关价格信息；

- 维护手册应到包括完整的线路图集和机械图集，每台电源一套。
- 电子文档图表可以用如下的一种软件打开，Autocad, Altium Designer, 或转换为 pdf 格式。
- 提供符合 PDM 标准(详细规定待定)的电子版文档，以使用户档案存档。
- 对于用户定制研发的程序源代码，PLC 程序以及嵌入式逻辑的源代码和二进制编码，投标方必须提供相关程序完整的电子文档。
- 电源的调试记录和质量跟踪卡，也属于归档文档的一部分。

### 13.3. 包装运输

所有电源都需要配备不锈钢的或铝质的铭牌，铭牌上应该包括如下信息：

- 生产研制单位名称位于标牌。
- 电源类型和序列号
- 输入电压电流额定值
- 输出电压电流额定值
- 设备总重量
- 出厂日期
- 极限水压
- 标签使用中文。铭牌信息字体和大小以美观为主。

所有货运包装都必须标注或使用标签注明如下信息：

- 订货编号
- 货运双方地址，依照合同填写
- 投标方名称
- 每个包装中的内容
- “向上”标记
- “易碎”标记

运输时，建议使用带有空气减震装置的卡车，避免使用火车。

### 13.4. 其他事项

本说明书未尽事宜，另行商议，必要时以附件给出。