纵向梯度拼接波荡器样机
控制系统技术要求

一、项目简介

衍射极限储存环要求在较短的波荡器周期内获得较高的峰值磁场，并利用横向磁场梯度调节辐射能量随观测位置的分布，以提升振荡器型 X 射线自由电子激光（XFELO）的增益。为兼顾短周期、高场强和高梯度，本项目采用磁极倾斜和分段拼接方案，研制一台纵向梯度拼接波荡器样机。

样机用于验证周期长度 18 mm、峰值磁场不低于 1.07 T、横向磁场梯度不低于 100 T/m 的工程方案，并验证拼接过渡段设计、磁极精密加工和整机集成装配。控制系统负责样机磁间隙的精密调节，提供两轴运动、位置闭环、状态监控和安全联锁。

二、总体技术要求

2.1 系统组成

控制系统应包含主控制器、双轴伺服驱动系统、两套电机、减速器及配套联轴器、两路绝对式直线位置反馈、常规及安全输入输出、不间断电源、现场人机界面和上位控制接口。柜内元件及现场连接应形成完整的控制、反馈和保护回路。

2.2 主要运动指标

指标项目	技术要求
实际控制轴数	2 个伺服轴，每轴具备独立的驱动、反馈和限位。
扩展能力	点位运动控制运行授权覆盖不少于 10 轴。
运动模式	支持单轴点动、单轴绝对定位及双轴同步开合。
轴运行范围	覆盖机械设计批准的有效行程。单轴和同步模式均应受行程限制。
正常运行转速	单轴电机正常运行转速上限设为 500 r/min。在该范围内可设定速度和加减速参数。
位置反馈	每轴采用旋转变压器与绝对式直线光栅尺双反馈。光栅尺分辨率不大于 0.1 μm。

2.3 同步与磁间隙控制

控制系统应按机械坐标定义，将两轴负载侧位置转换为磁间隙和同步偏差。双轴同步模式下应实时监测两轴偏差，提供预警及停机阈值。任一轴失去使能、反馈异常或同步偏差达到停机阈值时，应停止该组运动并报告原因。

三、核心部件技术要求

3.1 主控制器

控制器应支持实时 PLC 和点位运动控制，具备不少于 10 轴的运行授权，并配置人机界面运行授权。应提供独立的现场实时总线接口和上位以太网接口，支持伺服驱动、远程 I/O、安全逻辑和安全 I/O 的集成与扩展。

在两轴同步运行且人机界面和上位通信同时工作的条件下，控制器应持续采集负载侧位置和报警状态。控制任务与现场总线周期应满足所设定的运动控制周期及同步要求，联调时记录周期设置及运行情况。

3.2 伺服驱动器与伺服电机

驱动系统应具备 2 个独立伺服通道，支持各轴独立使能、故障诊断及位置反馈配置。各通道连续输出电流和峰值输出电流应满足电机额定工况及加减速工况要求，并可对所配电机设置电流、转矩和速度限制。

采用带旋转变压器和断电保持制动器的交流伺服电机。电机连续及峰值转矩应按磁力、重力、机构摩擦、传动效率和加减速工况校核，并保留设计所需裕量。保持制动器的释放及闭合应与驱动使能、停机及失电状态相协调。

伺服驱动系统应具备安全扭矩关断（STO）功能，支持安全控制器触发并提供状态诊断。每个轴均应能在安全功能触发后进入经设计确认的安全状态。

3.3 减速器与机械安装接口

采用具备自锁能力的蜗轮蜗杆减速器，名义减速比为 14.5:1。单轴传动选型按丝杠轴向设计载荷 3 000 N 校核。计入载荷与输出转矩两级裕量后，每轴减速器在规定工况下的额定输出转矩应不小于 5.3 N·m。应根据该输出要求及实际传动效率校核电机转矩，并结合实际载荷和安装方向验证断电保位能力。

电机轴径、轴伸、法兰止口和安装孔位应与减速器输入法兰及联轴器匹配。联轴器两端孔径、夹持长度、轴端间隙和装配空间应符合装配图要求。装配后应检查对中情况，并确认联轴器与壳体及内部零件之间有足够间隙。

3.4 绝对式直线光栅尺

两轴各配置 1 套绝对式直线光栅尺，有效测量范围覆盖对应运动轴的全行程。读数头采用 BiSS-C 接口，分辨率不大于 0.1 μm。反馈接口应支持两路光栅信号同时接入，并能读取有效位置及信号诊断状态。

电机侧反馈用于伺服控制，负载侧反馈用于位置闭环和同步偏差监测。应支持位置方向、零位和比例参数设定，上电后应校验绝对位置有效性及其与行程边界的一致性。

四、安全联锁与故障保护

4.1 分级限位

每轴正、反方向分别设置软件限位、工作限位及独立的硬件安全限位。各级限位应依次布置，触发点之间应预留相应的制动距离及机械安全余量。机械行程末端设置硬挡块，其位置与行程开关安装点应在机电联调前依照机械图纸确认。

保护层级	动作及复位要求
软件限位	启动前检查指令目标是否在允许范围内。运动中达到软件限位时停止向该方向运动，并显示对应轴及限位方向。
工作限位	触发后禁止受影响轴向超程方向运动。在满足退限条件时，可在调试模式下向安全方向退出。
硬件安全限位	采用独立安全输入接入安全控制回路，触发后执行 STO。应锁定安全停机状态，并在条件恢复后由操作人员复位。
机械硬挡块	位于机械行程末端，用于限制机构的最终运动范围。

4.2 急停与安全回路

设置现场急停输入，支持接入手持急停装置。急停及安全限位应由安全逻辑和安全输入输出处理，执行路径独立于普通运动程序、人机界面和上位通信。急停动作应覆盖两轴，并在现场界面显示触发源和安全状态。

安全逻辑、安全 I/O 及驱动 STO 应具备构成 SIL 3 安全功能的能力。安全回路应依据风险评估确定安全功能、停机方式、作用范围和允许响应时间，并对输入、逻辑和执行环节组成的完整功能逐项验证。机构应在切除驱动扭矩后依靠经验证的保持措施达到规定的安全状态。

4.3 故障检测与运行恢复

应检测驱动故障、反馈丢失或无效、跟随误差超限、同步偏差超限、现场总线中断及安全回路故障。影响同步运动的任一轴故障应触发联停。故障记录应包含时间、故障源、受影响轴和触发时的运行状态。

急停释放、限位解除、通信恢复或供电恢复后，控制系统应保持运动禁止状态，待联锁条件重新满足并由操作人员确认后才允许再次启动。安全复位和运动启动应分别操作。

五、现场总线与上位通信

5.1 现场总线

采用支持多轴时钟同步的工业实时以太网，连接伺服驱动和分布式 I/O。现场总线应支持节点状态诊断、通信超时检测和后续节点扩展。应提供网络拓扑、接口分配和通信故障处理说明。

5.2 上位控制接口

通过以太网提供 EPICS 控制接口和远程操作界面（OPI）。应支持运动模式、目标位置、运行速度、启动、停止及故障复位等操作，并发布两轴实际位置、磁间隙、同步偏差、运动状态、限位、联锁、急停和报警状态。

过程变量（PV）表应注明变量名称、单位、读写属性、有效范围和指令生效条件。现场与远程操作应设控制权限及切换机制，运动指令执行前应核验当前控制权和联锁状态。上位接口应能读取急停状态，现场急停由独立安全回路执行。

六、控制柜及供电技术要求

6.1 柜体与电气布置

采用紧凑型工业控制柜，柜体尺寸、进出线方向及维护空间应与现场安装条件匹配。柜内应集中布置控制器、驱动器、电源、安全控制与输入输出模块，并为端子接线、散热及维护预留空间。柜内设备、端子和外部接插件应有清晰且与电气图一致的标识。

进线应配置隔离、过流及短路保护，控制和驱动供电应分支保护。动力线、反馈线和通信线应按电气设计分区布设，并做好屏蔽端接、保护接地和电缆固定。电机动力线与旋转变压器反馈线每轴各 1 根，单根长度不小于 10 m。光栅、限位和急停线缆长度应覆盖现场布线距离，并预留检修余量。

6.2 不间断电源

配置 24 V DC 不间断电源，额定储能不低于 30 Wh，最大输出功率不低于 220 W。应按控制器及所接入设备的负载和充电电流校核电源容量，并验证断电后可完成状态保存和有序关机。

系统应能识别主电源中断及不间断电源状态。供电中断后，运动系统按设计进入停机和保位状态，不间断电源维持所需控制及监测功能至关机流程完成。恢复供电后应校验反馈及联锁状态。

七、软件与调试要求

7.1 应用软件与操作界面

控制程序应实现初始化、轴使能、参数设置、单轴和同步模式切换、限位及联锁处理、故障记录和断电处理。参数应按权限管理，并支持备份和恢复。

现场人机界面应通过显示终端操作，提供位置及速度显示、磁间隙和同步偏差显示、点动与定位、参数设置、联锁与报警查询。远程操作界面应提供相应的监控与授权操作功能。应提供控制工程、EPICS IOC 源程序、远程操作界面工程、变量表及编译、部署和恢复说明。

7.2 联调条件

联调前应确认轴向定义、位置基准、行程边界、开关位置、制动器和安全回路。定位偏差、重复定位偏差、同步偏差和安全响应时间的验收限值，应根据磁间隙调节需求与机械设计条件，在联调前确定并写入试验方案。

八、验收与技术资料

验收项目	检查内容与记录要求
运动与精度	检查两轴分别点动、绝对定位和同步开合。按方案在行程内选取多处位置，进行双向重复定位，并用经校准的独立量具核验，记录定位偏差、重复定位偏差和同步偏差，并与确认的限值比较。
反馈与接口	检查两路旋转变压器及光栅反馈、位置方向和重新上电后的位置一致性。验证现场与远程显示、过程变量读写及操作权限切换。
限位与安全	在受控试验条件下分别验证两轴正、反方向各级限位、急停、STO、反馈异常和总线故障。记录触发条件、实际动作、响应时间和安全复位行为。
断电与恢复	在规定载荷及位置下验证断电保位。以实际后备负载验证电源状态识别、数据保存及关机，记录可用后备时间并检查复电后的启动联锁。
机械安装接口	对照装配图检查电机、减速器、法兰和联轴器配合，验证全行程运行无干涉、卡滞。

应提供电气原理图、端子接线图、柜体布置图、I/O 点表、网络拓扑、控制与安全程序、驱动参数备份、操作维护说明及联调验收记录。记录应列明测试工况、判定依据和实测结果，支持后续复验。