



·粒子束及加速器技术·

基于新型安全架构的 HEPS 插入件安全控制系统

赵述涛^{1,2}, 曹建社¹, 陆辉华¹, 孙舒晨¹, 巩克云¹, 孙亚军¹, 张祥镇¹,
李啸宇¹, 张磊¹, 李煜辉¹, 李志强^{1,2}, 陈宛¹, 龚玲玲¹,
郭青¹, 黄永胜¹, 杨燕伟²

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 高能同步辐射光源(HEPS)插入件控制系统的主要功能是实现插入件磁间隙的开合运动控制。插入件控制系统的安全运动对插入件、储存环和光束线站的设备和人员安全至关重要。针对 HEPS 插入件控制系统的安全需求, 研究了工业安全设计标准和规范, 在国内外同类型插入件控制系统中首次设计和实现了基于新型安全架构的安全系统。安全系统的设计和实施符合国际安全标准, 并达到了安全完整性三级的高安全等级。该系统已成功应用在 HEPS 测试束线低温波荡器中, 并完成了系统性的测试。测试结果表明, HEPS 插入件安全系统实现了所有预期的安全指标, 达到了高安全等级工业控制系统的标准。

关键词: 高能同步辐射光源; 插入件; 安全控制系统; 安全 PLC; Safety over EtherCAT

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210087

Safety control system for HEPS insertion device based on new safety architecture

Zhao Shutao^{1,2}, Cao Jianshe¹, Lu Huihua¹, Sun Shuchen¹, Gong Keyun¹, Sun Yajun¹, Zhang Xiangzhen¹,
Li Xiaoyu¹, Zhang Lei¹, Li Yuhui¹, Li Zhiqiang^{1,2}, Chen Wan¹, Gong Lingling¹,
Guo Qing¹, Huang Yongsheng¹, Yang Yanwei²

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The control system of Insertion Device (ID) for High Energy Photon Source (HEPS) is mainly responsible for the opening and closing motion control of the magnetic gap of ID. The safe movement of the ID control system is essential for the safety of ID, storage ring and beamline station. Based on the safety requirements of HEPS ID control system, a high-level and multi-level safety system based on the new safety architecture has been designed and applied. It is the first time that this kind of safety system has been applied to the same type of ID control system worldwide. The safety system is designed and implemented in accordance with international safety standards and achieves the high safety level of Safety Integrity Level. The safety system has been successfully applied in the Cryogenic Permanent Magnet Undulator (CPMU) for HEPS, and the systematic tests have been accomplished. These tests results show that the safety system meets all the expected safety specifications, and achieves the standard of industrial control system with high safety level.

Key words: HEPS; insertion device; safety control system; safety PLC; Safety over EtherCAT

高能同步辐射光源(HEPS)属于第四代光源, 采用大量的高性能插入件来产生同步辐射光^[1-3]。控制系统是插入件重要的组成部分, 主要负责插入件磁间隙的运动控制^[4-5]。插入件磁间隙必须控制在安全范围内, 否则将会对插入件、储存环设备、光束线站设备和人员造成严重威胁, 因此需要设计独立的安全控制系统。国内外光源插入

* 收稿日期: 2021-03-09; 修订日期: 2021-08-20
基金项目: 国家自然科学基金项目(Y61626106A)
联系方式: 赵述涛, zhaost@ihep.ac.cn。
通信作者: 曹建社, caojs@ihep.ac.cn。

件安全控制系统一般采用多重保护措施,其中最主要的保护措施是采用断路限位开关和继电器构成外部电气保护回路,当断路限位开关被触发后,继电器能切断驱动器和电机供电^[6-9]。这种安全措施故障率较高,不符合工业安全设计标准,只能达到很低的安全级别。本文研究了工业安全设计标准和规范,在国内外同类型插入件安全系统中率先设计和实现了基于 Safety over EtherCAT 技术的新型安全架构,插入件安全系统安全级别达到了工业安全高等级。研究成果已经应用于 HEPS 测试束线低温波荡器中,实现了预期的设计指标,后期将应用在 HEPS 所有插入件中,以实现 HEPS 所有插入件的高等级安全保护。

1 插入件控制系统安全需求

插入件控制系统最重要的任务是实现磁间隙的开合运动控制,通过对插入件磁间隙的开合控制,储存环和光束线站可以分别实现调束要求和同步光能量调谐需求。在此以 HEPS 一种典型的真空内插入件-低温波荡器为例,介绍插入件控制系统的安全需求。

该低温波荡器用于 HEPS 工程材料线站,运行在真空和低温环境中,其真空室与储存环真空室相连接。磁间隙可调范围为 5.2~40 mm,真空室最大外径 410 mm。控制系统必须严苛地保证磁间隙开合运行在 5.2~40 mm,否则将造成安全事故,见表 1。

表 1 低温波荡器安全事故

Table 1 Safety incidents of Cryogenic Permanent Magnet Undulator

	gap < 5.2 mm	gap > 40 mm
Insertion Device	<ul style="list-style-type: none"> ● mechanical structure deformation 	<ul style="list-style-type: none"> ● mechanical structure deformation
Device	<ul style="list-style-type: none"> ● magnet array damage (when gap equals 0) ● the magnetic field is strengthened, the beam loss increases or even the beam is interrupted 	<ul style="list-style-type: none"> ● the vacuum chamber deformation, even vacuum leakage ● vacuum leakage of Storage Ring
Storage Ring	<ul style="list-style-type: none"> ● the radiation dose increases and damages the equipment of the storage ring 	<ul style="list-style-type: none"> ● the beam loss increases or even beam interruption ● the radiation dose increases and the equipment damages of the Storage Ring
BeamLine Station	the increase of radiation dose will damage the optical equipment of BeamLine Station and threaten the safety of personnel	

为保证磁间隙开合不超过安全范围,插入件必须设计独立的安全保护系统。国内外光源插入件安全控制系统一般采用被动保护和主动保护相结合的方式^[6-9],如上海光源 EPU、IVU 和欧洲 EXFEL 波荡器等。被动保护包括软件保护、限位开关、断路限位开关和硬挡块等四重保护;主动保护为急停按钮人为触发保护。

目前,国内外先进插入件的磁间隙运动控制均采用四轴控制,即构成磁间隙的上下 2 个磁极大梁各由 2 个电机轴驱动。控制安全系统分别在磁间隙最小、最大处的每一个电机轴处均布置四重被动安全保护,硬件架构如图 1 所示。

软件保护是指通过软件程序限制操作者输入超出范围的磁间隙,若软件保护失效,则触发限位开关。限位开关接入可编程逻辑器件(PLC),当限位开关被触发时,PLC 将阻止电机继续向原方向运动,若限位开关失效,则断路限位开关被触发。断路限位开关常闭触点接入继电器控制回路,驱动器接入继电器主回路,断路限位开关常闭触点断开后,继电器将切断主回路供电,驱动器电源将被切断,电机也将断电停止运行。若断路限位开关失效,磁极大梁将碰触机械硬挡块,通过机械硬接触形式阻止磁极大梁继续运动,但是这将损坏插入件机械结构,从而影响插入件性能。急停按钮作为主动触发方式,其工作方式与断路限位开关相似,按下时通过继电器断开驱动器主供电。

在上述保护措施中,断路限位开关和急停按钮起最主要的保护作用,可直接通过外部硬件电路切断驱动器供

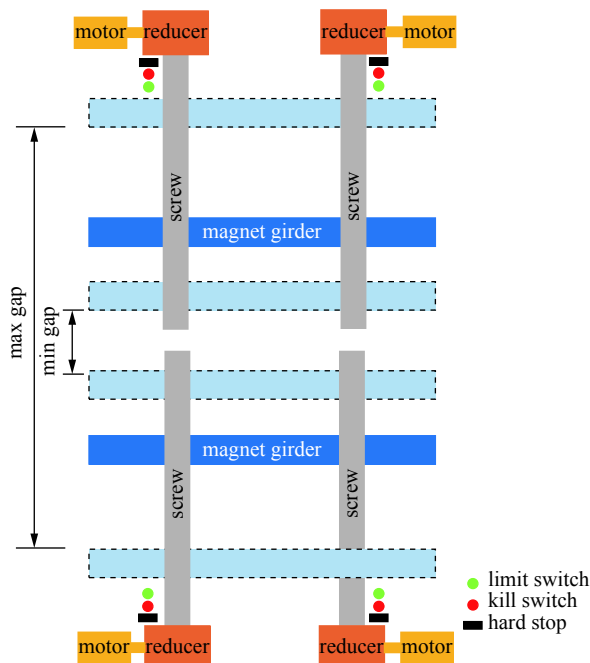


Fig. 1 Hardware architecture of safety control system of Insertion Device

图 1 插入件安全控制系统硬件架构

电,比其他几种保护措施安全性更高。但是其从触发到切断电源的整个过程中,多个环节会出现非安全因素,将会导致安全保护失效,如断路限位开关(或急停按钮)触点熔接导致触发后不输出信号;继电器主触点熔接,无法正常断开主回路电路等。这些非安全因素可以通过多个继电器冗余等方法来改善,但是仍然不能达到很高的安全性,因此,必须设计具有更高的安全性、可靠性且符合工业安全标准的安全控制系统。

2 插入件安全控制系统设计

2.1 安全级别评估

工业安全控制系统是指系统必须提供一种高度可靠的安全保护手段,最大限度地避免机器的不安全状态,保护生产装置和人身安全,防止恶性事故的发生。安全控制系统的设计及系统结构既要满足工业过程的安全等级要求,又要保证可靠性和可用性,因此,必须对安全系统器件、系统结构等所有工业过程进行验证和安全评估^[9]。国际上通用的安全标准有德国的 DIN19250、美国的 ISA S84.01 和 IEC61508、我国的 GB/T 20438.1-2017 和 GB/T 20438.2-2017。以国际电工委员会(IEC)发布的 IEC61508《电气/电子/可编程电子安全系统的功能安全》标准为例,在安全控制系统的设计中,为了定量地分析各种生产装置的安全性,IEC61508 定义了 4 个安全完整性等级(SIL),每个等级包括 2 个定量的安全要求,即系统连续高要求操作每小时故障概率(PFH)和低要求指定模式操作每小时故障概率(PFD)^[11],不同安全等级的 PFH、PFD 以及使用范围如表 2 所示,SIL 值越大,发生故障的概率越低,系统越安全。

表 2 安全完整性等级
Table 2 Safety Integrity Level

SIL	PFH	PFD	application range
4	$\geq 10^{-9} \sim 10^{-8}$	$\geq 10^{-5} \sim 10^{-4}$	threat to personal safety
3	$\geq 10^{-8} \sim 10^{-7}$	$\geq 10^{-4} \sim 10^{-3}$	threat to personal safety
2	$\geq 10^{-7} \sim 10^{-6}$	$\geq 10^{-3} \sim 10^{-2}$	threat to device safety
1	$\geq 10^{-6} \sim 10^{-5}$	$\geq 10^{-2} \sim 10^{-1}$	threat to device safety

根据 IEC61508 标准,对人身安全造成威胁的安全事故,应当将其安全完整性等级定义为 SIL-3 及以上。由于插入件安全系统事故可能会导致辐射剂量加大,进而威胁人身安全,所以将插入件安全系统安全完整性等级定义为 SIL-3。

2.2 安全系统组成

典型的安全系统由安全输入(安全限位开关、安全急停等传感器)、安全控制中心(安全继电器、安全 PLC 等)、安全输出(主电路中的接触器、继电器阀等)3 部分组成,其中安全控制中心是核心。要达到 SIL-3 安全级别,上述 3 个部分都必须符合 SIL-3 级别的规范。

(1) 安全输入装置。

HEPS 插入件安全输入采用两种装置:安全限位开关和安全急停按钮,取代其他光源插入件所采用的断路限位开关和急停按钮。

断路限位开关闭合触点不能断开可能是过电流等造成的。安全限位开关通过特殊的机械结构可以强制断开常闭触点,解决了这一关键安全问题,这是其相较于断路限位开关最主要的特点^[12]。插入件安全限位开关选择德国 EUCHNER 公司的 EGZ 系列,其包含 2 个强制断开常闭触点,安全等级达到 SIL-3。将这 2 个强制断开常闭触点同时接入安全控制中心构成双通道冗余,只要有一路被触发即认为安全限位开关被触发,安全性得到进一步提高。

相比于普通急停按钮,安全急停按钮也采用了强制断开常闭触点的结构,能够达到 SIL-3 级别安全等级,选择德国 BALLUFF 公司的 BAM 系列,包括两个强制断开常闭触点,将其接入安全控制中心,构成双通道冗余。

(2) 安全控制中心。

安全控制中心是在接收到安全输入信号后,经过纯硬件(安全继电器)或软硬件结合(安全 PLC)做出逻辑判断,最后输出安全信号的一种装置。其发展大致经历了三个阶段:普通继电器、安全继电器、安全 PLC。下面简单介绍普通继电器和安全继电器的工作原理和优缺点,并重点介绍插入件安全系统所采用的安全 PLC。

①普通继电器和安全继电器。

断路限位开关接入的继电器即为普通继电器,其最大的缺点是安全等级很低甚至没有安全等级,此外其布线、维护和改造十分复杂,因此不能用于插入件安全系统。

安全继电器与普通继电器的主要区别在于:强制导向触点结构和通道冗余。安全继电器在结构上采用了特殊的设计,即强制导向触点结构,能够保证安全输出触点强制断开,解决了普通继电器触点可能发生熔接的问题。安全继电器采用至少2个通道进行输入和输出控制,称为通道冗余,在一个输出通道出现故障的情况下,另外一个冗余的通道依然能够保证安全继电器的安全功能^[13],此种控制方式可以达到 SIL-3 的安全等级。图2为采用安全继电器的典型安全控制示意图,安全输入通过物理硬线接入安全继电器,安全继电器通过物理硬线控制安全输出,在非安全状态下切断驱动器电源。除安全系统外,PLC、标准 I/O(接入限位开关)、驱动器等通过标准工业总线连接,构成主运动控制系统,驱动电机运转。安全系统和主运动控制系统互相独立,PLC 仅可通过安全继电器物理硬线获得基本的故障信息。

安全继电器也存在一些缺陷,如在安全信号多的情况下安全回路布线复杂,修改或添加安全回路困难,接线繁琐,不利于后期扩展和维护;只能处理外部简单安全故障,不能监控和处理 PLC 内部的安全指令等。因此 HEPS 插入件安全系统采用了更为先进的安全 PLC,能够安全可靠、高效地完成功能,并且可以使复杂的安全系统变得简单清晰,有利于后期扩展和维护。

②安全 PLC 及其安全总线。

不同于安全继电器采用物理硬线,安全 PLC 采用安全总线连接硬件和传输信息,这是其区别于安全继电器最主要的特征。目前最新型的安全 PLC 架构将安全总线和工业控制总线合二为一,为工业安全系统带来了新的变革,如倍福 FSoE(Safety over EtherCAT)、西门子 FSoP(Safety over Profinet)等。HEPS 插入件安全系统即选用 FSoE 安全架构,如图3所示。

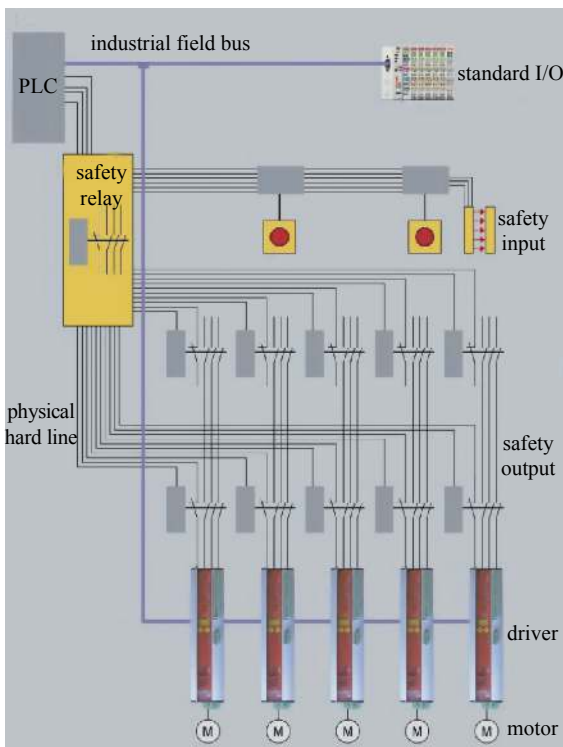


Fig. 2 Hardware architecture of safety relay

图2 安全继电器硬件架构

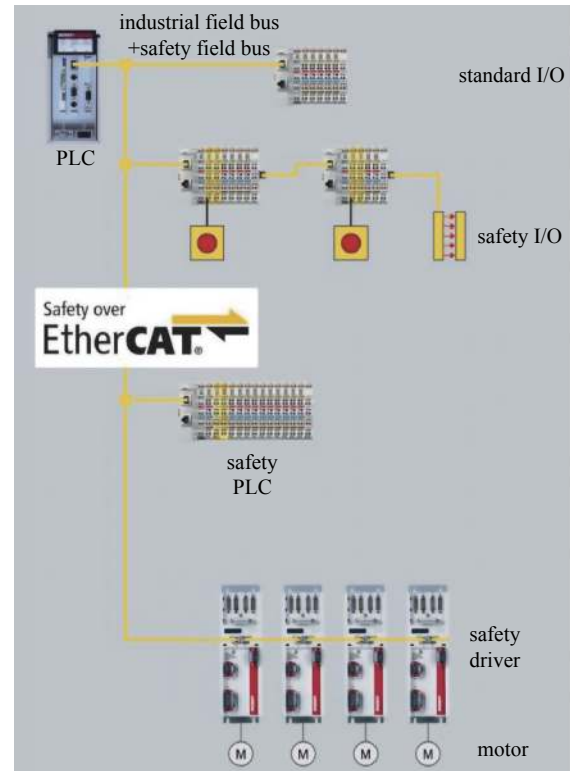


Fig. 3 Safety system architecture of HEPS Insertion Device based on FSoE

图3 基于 FSoE 的 HEPS 插入件安全系统架构

在 FSoE 架构下,安全数据和主控制数据共用 1 根 EtherCAT 总线,共享 1 个总线协议,其最大的优势是使得安全架构变得异常简单清晰,某种程度上,“简单就是安全”^[14]。首先,后期安全功能拓展只需添加安全模块并接入 EtherCAT 总线即可,在硬件层面的接线几乎可以忽略不计,这为系统后期的拓展和维护提供了极大地便利。其次,由于安全系统和主控制系统已合二为一,安全系统可以执行主控制系统的安全指令,使得系统可以实现复杂的

软件逻辑保护；主控制系统也可以实时监视安全系统状态，为用户提供更多更加直观、多样化的故障信息，并远程反馈至更高层次控制中心。这些优点为 HEPS 插入件安全系统的设计提供了极大的便利。

相比于纯硬件组成的安全继电器系统，安全 PLC 系统因采用了软硬件结合的方式，其自身处于非安全状态，因此需采取一系列措施来达到安全要求，包括：冗余多样性控制、频繁和可靠的自检、安全认证等。如冗余多样性控制指的是安全 PLC 采用了多套中央处理器进行控制，并且这些处理器来自不同的生产商，当一定数量的处理器出现故障后，完好的处理器依然执行安全功能。安全 PLC 采用了一系列的时间检测、地址检测、连接检测和 CRC 冗余校验等措施，并且能够以较短时间完成整套系统的安全功能自检^[15]。安全 PLC 的硬件及软件必须经过专业认证机构极其严苛的检验和认证。FSoE 经过国际权威认证机构德国 TÜV 认证，达到了 SIL-3 安全等级。

(3) 安全输出装置。

由安全继电器构成的安全系统常见的安全输出装置为主回路安全接触器，其采用强制导向触点结构和冗余措施来保证安全。由安全 PLC 构成的安全系统，其安全输出装置也可以采用安全接触器，由安全 PLC 的安全输出模块控制其切断主回路。在 FSoE 安全架构中，安全输出装置为安装于驱动器内部的安全驱动板卡，无需外部接线，通过 FSoE 传输安全信号，可以实现电机急速停止、电机慢速停止（在保证人员安全的情况下，慢速停止可以保护电机）等多种安全模式，提供了更强、更完整的安全运动防护，系统架构也更为简洁。

2.3 基于 FSoE 的插入件安全系统

与其他国内外先进光源插入件类似，HEPS 插入件主控制系统也采用了先进的四电机驱动的方式，安全系统采用了多重保护的措施，但是在安全系统的具体设计上，HEPS 插入件在国内外首次设计了基于新型 FSoE 架构的安全系统，最终实现了 SIL-3 级别的安全保护，其硬件架构见图 3。

软件保护和限位开关保护作为第一、第二层保护措施上述已有介绍，此处不赘述。下面主要介绍安全限位开关、硬挡块和安全急停等 3 种采用 FSoE 架构的特殊保护。

(1) 安全限位开关。

8 个安全限位开关均将 2 个强制断开常闭触点接入安全输入模块，信号由 FSoE 传输至安全 PLC，任一安全限位被触发后，安全 PLC 控制驱动器安全板卡将电机断电，起到第三层级保护作用。该层级保护可以达到 SIL-3 级别安全。

安全 PLC 的程序与标准 PLC 程序有所不同，为符合安全标准，安全程序不支持自定义功能块，只能使用安全系统规定的功能块。在编程时，只需将输入和输出链接到功能块，配置功能块参数，编译执行即可。图 4 为由安全限位开关经过安全 PLC 程序，最终触发驱动器保护的逻辑图。FB_EmergencyStop 功能块为安全 PLC 程序主逻辑块，安全限位开关两个常闭强制断开触点接入安全输入模块，安全输入信号通过 FSoE 接入 FB_EmergencyStop 功能块输入，经 FB_EmergencyStop 功能块逻辑处理后，通过 FSoE 输出安全信号给驱动器安全板卡。

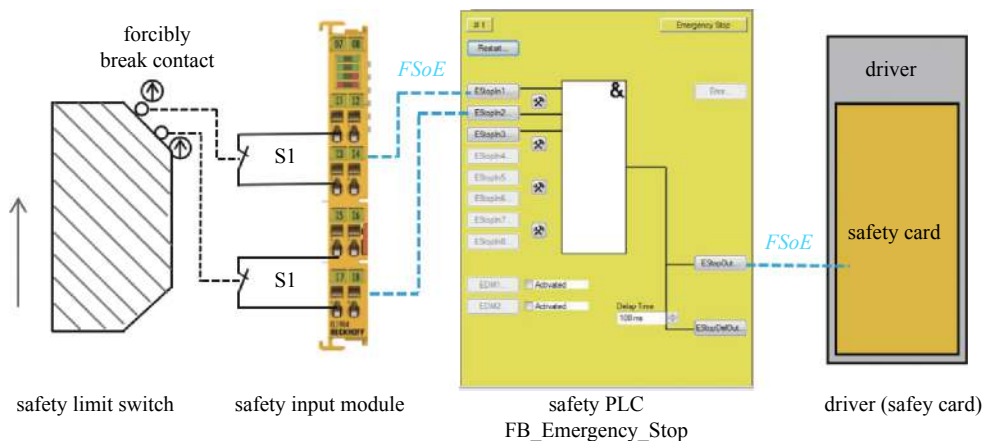


Fig. 4 Program logic of safety PLC

图 4 安全 PLC 程序逻辑

(2) 硬挡块保护。

若以上 3 层保护均失效，磁极大梁将碰触机械硬挡块。而碰触硬挡块后，电机并未停止，因此这种纯机械保护的方式缺乏足够的可靠性和稳定性，且无法在实验室进行离线测试。HEPS 插入件利用主 PLC 和安全 PLC 可以通

过 FSoE 通讯的特点,创造性地开发了安全系统软件触发的保护措施,解决了硬挡块触发后的安全问题,使 HEPS 插入件系统安全更加完备,程序逻辑如图 5 所示。

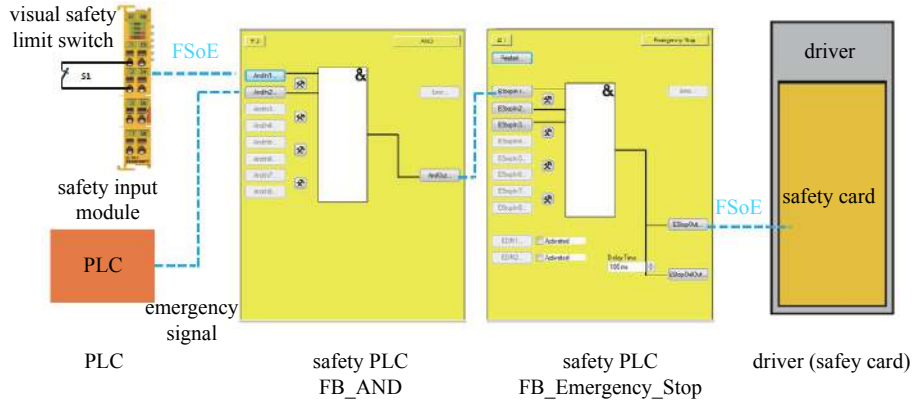


Fig. 5 PLC software control safety system

图 5 PLC 软件控制安全系统

当磁极大梁接触到硬挡块后,4 个电机的位置差和速度差都会立即超出正常阈值;电机由于堵转,温度也会急剧上升,超过正常阈值。主 PLC 实时监测 4 个电机位置差、速度差和温度差等多个变量,超出规定阈值后,输出急停信号,将该信号输入安全 PLC,就能通过安全 PLC 触发保护。但是安全标准规定安全 PLC 的输入必须有安全输入硬件参与,因此我们创造性地构造了一个“虚拟安全限位”,即将安全输入模块输入端直接接通 24 V 电源,模拟其接入了一个常闭的安全限位开关,其输入信号恒定为“1”。调用 FB_AND 安全功能块,将“虚拟安全限位”信号和主 PLC 急停信号相“与”,FB_AND 输出信号作为 FB_EmergencyStop 功能块输入。当主 PLC 急停信号被触发,信号为“0”,与“虚拟安全限位”信号相“与”后,FB_AND 输出为“0”,FB_EmergencyStop 功能块即可触发驱动器安全板卡。

(3) 安全急停保护。

与安全限位开关连接方式相同,安全急停 2 个常闭强制断开触点接入安全数字量输入模块,在紧急状态按下后,触发安全 PLC 保护,起到主动保护的作用,安全级别可以达到 SIL-3。

2.4 插入件安全系统远程监控和控制

由于安全系统与主 PLC 系统可以通过 FSoE 通信,因此安全系统被触发后,主 PLC 即可收到详细的故障诊断数据,该数据可以实时共享给远程控制系统,实现故障的远程诊断和存储,主 PLC 也可以在现场安全故障排除后,远程恢复安全系统。HEPS 远程控制采用 (EPICS) 构建, BECKHOFF PLC 可通过 modbusTCP 协议与 EPICS 通信^[16]。

3 硬件连接与调试

插入件控制系统包含驱动系统和安全系统,目前已经将整个系统集成到 1 个控制柜中,统一由 1 套低压系统供电,控制柜实物图及说明如图 6 所示。

安全输入包括安全限位开关和安全急停按钮,实物图如图 7 所示。将其接入安全 IO 模块,即完成安全输入的接入。

系统硬件连接完成后,编写安全 PLC 程序对系统进行调试,在软件编程前,需要对安全 PLC、安全 IO、驱动板卡的地址进行拨码物理设置,否则安全系统将无法识别。安全 PLC 和安全 IO 物理拨码如图 8 所示。

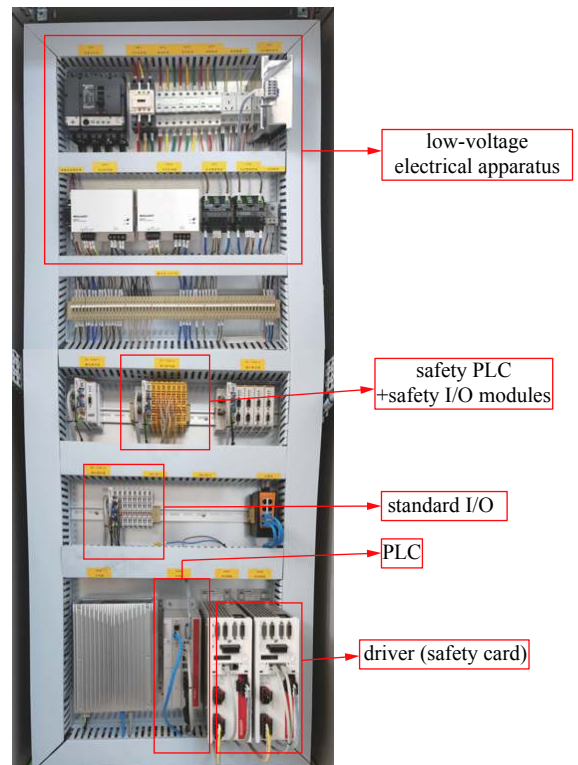


Fig. 6 Photo and description of control cabinet

图 6 控制柜实物图及说明

安全系统软件编程采用 TwinCAT3 软件, 以功能最复杂的硬挡块保护为例, 采用安全功能块编写的程序如图 9 所示。

4 测试

安全限位开关被动触发或安全急停按钮主动触发后, 安全系统立即停止驱动器的供电并推送报警信息至远程控制中心, 只有解除安全限位开关或安全急停按钮的触发状态后, 远程控制中心才可以解除报警, 恢复安全系统。硬挡块碰撞测试采用间接方式, 以避免硬接触对机械结构的损坏。测试步骤为: 第一, 实时记录 4 个电机在正常运动过程中的位置和速度, 计算出正常范围内的位置差和速度差; 第二, 在安全系统中设置小于正常位置差和速度差的阈值; 第三, 4 个电机重新启动运动, 安全系统监控位置差和速度差。最终, 若有位置差或速度差超过阈值, 即触发安全保护。这种测试步骤充分模拟了碰触硬挡块后电机出现的位置差和速度差。电机温度阈值触发与硬挡块碰撞测试类似, 也采用间接方式, 即设置略超室温的温度阈值, 当电机运行一段时间后, 电机温度升高, 超过温度阈值, 安全系统触发保护。

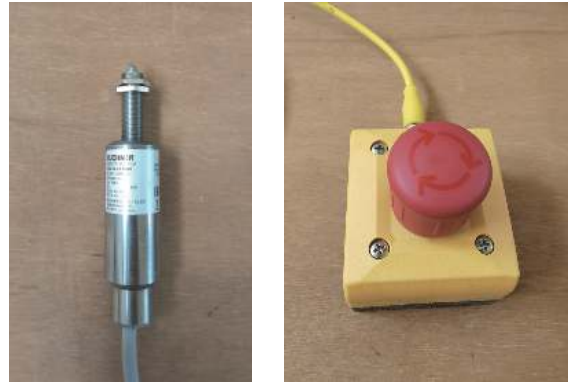


Fig. 7 Photo of safety limit switch and safety emergency stop

图 7 安全限位开关和安全急停实物图

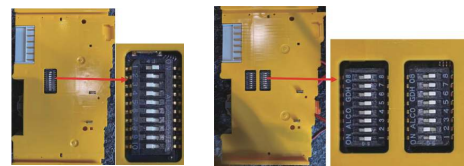


Fig. 8 Physical dialing code of safety PLC and safety IO

图 8 安全 PLC 和安全 IO 物理拨码

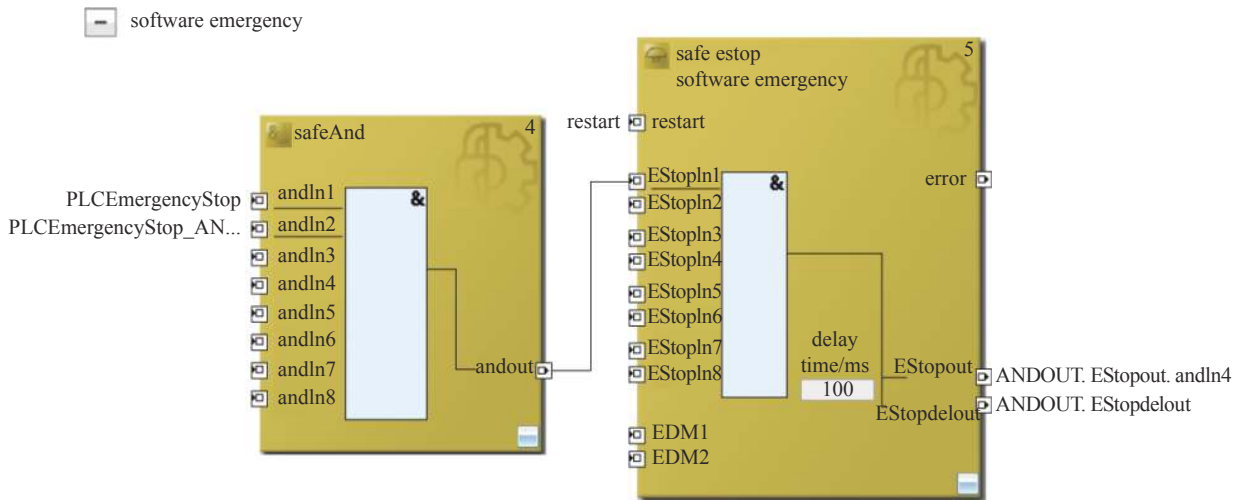


Fig. 9 Software program of hard stop protection

图 9 硬挡块保护软件程序

5 结论

本文设计和实现了基于新型 FSoE 安全架构的 HEPS 插入件安全控制系统, 安全等级达到了 SIL-3, 并成功应用到 HEPS 测试线站低温波荡器中。经过系统的测试, 实现了预期指标, 系统安全、可靠、稳定。安全控制系统通过主 PLC 与 EPICS 远程系统实现了通信。此安全系统将在 HEPS 后续所有插入件中进行推广, 以实现所有插入件的高等级安全保护。

参考文献:

- [1] 姜晓明, 王九庆, 秦庆, 等. 中国高能同步辐射光源及其验证装置工程[J]. 中国科学(中国科学(物理学 力学 天文学), 2014, 44(10): 1075-1094. (Jiang Xiaoming, Wang Jiuqing, Qin Qing, et al. Chinese high energy photon source and the test facility[J]. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2014, 44(10): 1075-1094)
- [2] Lu Huihua, Chen Wan, Gong Lingling, et al. et al. Development of a PrFeB Cryogenic Permanent Magnet Undulator (CPMU) prototype at IHEP[C]//Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. 2017..
- [3] kitegi C. Development of a cryogenic permanent magnet undulator at the ESRF[D]. Grenoble: Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2008.

- [4] Karabekyan S, Pannier R, Pflüger J, et al. The local control system of an undulator cell for the European XFEL[C]//Proceedings of ICALEPCS2011. Grenoble, 2011: 450-453.
- [5] Rose A J, Lay S C, Bell A I, et al. Permanent magnet insertion device control systems on diamond[C]//Proceedings of PCaPAC08. Ljubljana, 2008: 174-176.
- [6] Gu M, Yuan Q B, Chen Z H, et al. In-vacuum undulator controller design for SSRF[C]//Proceedings of IPAC'10. 2010: 3168-3170.
- [7] Zhang J, Zhou Q, Zhuo J. Local control system of the elliptically polarized undulator at SSRF[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, 20(3): 332-335.
- [8] Chang C H, Hwang C S, Chang C H, et al. Progress in Insertion Devices for TPS in Phase I[C]//Proceedings of IPAC2011. San Sebastian, Spain, 2011.
- [9] Kulesza J, Deyhim A, Chen Nian. Design of control instrumentation of two in-vacuum undulators IVU25[C]//Proceedings of PAC07. 2007: 1236-1238.
- [10] 吴宁宁, 刘进, 云建军, 等. 安全继电器的安全验证技术[J]. *自动化与仪器仪表*, 2012(3): 82-83,88. (Wu Ningning, Liu Jin, Yun Jianjun, et al. Safety relay safety authentication technology[J]. *Automation & Instrumentation*, 2012(3): 82-83,88)
- [11] 华伟, 张永, 年华. 安全型PLC系统在锅炉FSSS中的应用[J]. *吉林电力*, 2007, 35(2): 32-35. (Hua Wei, Zhang Yong, Nian Hua. Application of safe PLC system on the boiler FSSS[J]. *Jilin Electric Power*, 2007, 35(2): 32-35)
- [12] 南通亨特电器有限公司. 一种具有强制断开机构的限位开关: 201620023453.0[P]. 2016-08-17 (Nantong Hunter Electrical Equipment Co Ltd. Limit switch with force disconnected opening mechanism: 201620023453.0[P]. 2016-08-17)
- [13] 杨帆. 分布式安全PLC和继电器在炼钢领域的应用[J]. *设备管理与维修*, 2019(22): 148-150. (Yang Fan. Application of distributed safety PLC and relay in the field of steelmaking[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2019(22): 148-150)
- [14] 倍福自动化设备贸易(上海)有限公司. Safety over EtherCAT: 工厂级安全架构的基础[J]. *国内外机电一体化技术*, 2013(2): 51-52. (Beckhoff Automation Equipment Trading (Shanghai) Co. Ltd Safety over EtherCAT: the foundation of factory level safety architecture[J]. *Mechatronics Technology at Home and Abroad*, 2013(2): 51-52)
- [15] 吕红卓. 基于安全PLC的新型楼宇消防控制系统的可行性研究[J]. *消防技术与产品信息*, 2013(9): 47-50. (Lv Hongzhuo. Feasibility study of new building fire control system based on safety PLC[J]. *Fire Technique and Products Information*, 2013(9): 47-50)
- [16] Zhao Shutao, Cao Jianshe, Lu Huihua, et al. Control system for Cryogenic Permanent Magnet Undulator (CPMU) of High Energy Photon Source (HEPS)[J]. *Radiation Detection Technology and Methods*, 2021, 5(1): 117-121.