

T / JXEA

江西省工程师联合会团体标准

T/JXEA-369-2026

机电一体化设备安全控制技术规范

Technical specification for safety control of mechatronics equipment

（征求意见稿）

2026—XX—XX 发布

2026—XX—XX 实施

江西省工程师联合会 发布

目 次

前 言 II

引 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 安全控制系统总体要求 2

5 传感与检测装置要求 2

6 执行机构与驱动控制要求 3

7 电气安全与电磁兼容要求 4

8 软件安全要求 4

9 安全功能验证与检验 5

10 安装调试与维护管理 6

附 录 A（规范性）机电一体化设备安全控制技术检验记录表 8

前 言

本文件依据GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由***提出。

本文件由***归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

引 言

机电一体化设备集机械、电子、控制与信息技术于一体，广泛应用于工业生产与智能制造领域。其安全控制系统的可靠性直接关系到操作人员生命安全与设备稳定运行。当前，部分设备存在安全功能设计缺失、传感器选型不当、软件安全验证不足等问题，导致机械伤害、电气事故等风险频发。为规范机电一体化设备安全控制系统的设计、制造与检验，降低运行风险，特制定本文件。本文件依据GB/T 15706、GB/T 16855.1等标准，规定了安全控制系统总体要求、传感检测、执行驱动、电气安全、软件安全、功能验证及维护管理等技术要求，构建了从风险评估到安全功能验证的全流程技术规范。本文件适用于机电一体化设备安全控制的全生命周期管理，旨在提升设备本质安全水平，促进智能制造安全发展。

机电一体化设备安全控制技术规范

1 范围

本文件规定了机电一体化设备安全控制系统的总体要求、传感与检测装置要求、执行机构与驱动控制要求、电气安全与电磁兼容要求、软件安全要求、安全功能验证与检验，以及安装调试与维护管理等内容。

本文件适用于工业生产、自动化制造、智能装备等领域中机电一体化设备安全控制系统的设计、制造、检验、安装、调试和维护管理活动。含有可编程电子安全控制系统的机电一体化设备，以及配置伺服驱动、变频调速、运动控制器等驱动单元的自动化设备，均适用本文件。其他类型机械设备的安全控制系统可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件

GB/T 15706 机械安全 设计通则 风险评估与风险降低

GB/T 16855.1 机械安全 控制系统安全相关部件 第1部分：设计通则

GB/T 20438.1 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全 第1部分：一般要求

GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

机电一体化设备 mechatronics equipment

将机械技术、电子技术、信息技术、控制技术有机结合，通过系统优化设计，实现特定功能的自动化设备或装置的总称。

[来源：GB 5226.1，3.1]

3.2

安全控制系统 safety control system

专门用于实现一个或多个安全功能的控制系统，通常由传感器、逻辑控制器和执行器组成，用于将机电一体化设备维持在安全状态或使其进入安全状态。

[来源：GB/T 16855.1，3.2]

3.3

安全功能 safety function

设备控制系统为维持设备安全运行状态或防止危险发生，以特定方式实现的控制功能。典型安全功能包括安全停止、紧急停止、防护门联锁、双手操作控制等。

[来源：GB/T 16855.1，3.3]

3.4

性能等级 performance level, PL

表征控制系统安全相关部件在可预见的条件下执行安全功能能力的等级，分为a、b、c、d、e五个等级（a级最低，e级最高）。

3.5

功能安全 functional safety

整体安全的组成部分，取决于电气/电子/可编程电子安全相关系统以及其他技术安全相关系统和外部风险降低设施是否正确发挥功能。

[来源：GB/T 20438.1，3.5]

危险状态 hazardous state

机电一体化设备运行过程中，因控制系统故障、传感器失效或执行机构异常等原因，导致设备偏离预定安全运行包络，可能对人员造成伤害或对设备造成损坏的运行状态。[源自：GB/T 15706，3.6]

4 安全控制系统总体要求

风险评估原则。机电一体化设备安全控制系统的设计，应以GB/T 15706规定的风险评估方法为基础，识别设备在全寿命周期各阶段（含安装、调试、正常运行、维护及拆除）可能引发的危险，确定所需安全功能及其对应的性能等级要求（PLr），作为安全控制系统设计的输入依据。

冗余与多样性原则。对于PLd及以上等级的安全功能，其控制系统安全相关部件宜采用冗余结构设计（如双通道架构），并在条件允许时引入多样性原则（不同技术实现方式），以防止共因失效导致安全功能丧失。系统架构应符合GB/T 16855.1规定的指定架构要求，并满足相应的平均危险失效时间（MTTFd）、诊断覆盖率（DC）及共因失效（CCF）指标。

最小化原则。安全控制系统应采用最小化设计理念，即仅包含实现安全功能所必需的硬件和软件组件，避免不必要的功能复杂性增加失效概率。安全功能的实现宜通过硬接线逻辑或经认证的安全控制器完成，不宜将安全功能集成在通用可编程逻辑控制器（PLC）中与非安全功能混用，除非该PLC已通过相应功能安全认证。

失效安全原则。安全控制系统的各组成部件发生可预见的单一故障时，系统应能自动转换至安全状态（即断电安全原则）。传感器、开关等安全输入元件应以常闭方式接入控制回路，确保元件失电或线路断路时触发安全停止响应，而非允许危险状态持续。

诊断监测原则。PLc及以上等级的安全控制系统应具备内置诊断功能，能够在每次设备启动前或在规定诊断测试间隔内，自动检测安全功能相关部件（传感器、联锁开关、输出继电器等）的完整性，并在发现故障时拒绝设备启动或强制设备进入安全停止状态，诊断覆盖率（DC）应满足GB/T 16855.1对应架构的最低要求。

验证与确认原则。安全控制系统在交付使用前，应按照本规范第9章要求进行系统级安全功能验证，证明所实现的安全功能满足风险评估确定的PLr要求。验证过程中应产生文件化证明记录，作为设备安全合规的技术依据，并在设备服役期间随设备档案保存，保存期限不少于设备使用年限加5年。

安全控制系统设计的技术依据主要包括：

- a) 现行国家标准：GB 5226.1—2019、GB/T 15706—2012、GB/T 16855.1—2018、GB 4208—2017、GB/T 20438.1—2017、GB/T 17626.4—2018；
- b) 产品专用标准：特定机电一体化设备对应的国家标准或行业标准中关于安全控制的强制性条款；
- c) 用户技术规格书：设备采购方在合同中提出的安全功能及性能等级要求；
- d) 设计文件：风险评估报告、安全需求规格说明书、安全控制系统设计文件及验证计划。

5 传感与检测装置要求

5.1 传感器选型与配置基本要求

用于安全功能的传感器（位置传感器、光电保护装置、压力传感器等）应符合以下基本选型要求：

- a) 安全传感器的类型、量程、精度和响应时间应满足安全功能响应时间要求，确保在设备达到危险状态前完成检测并触发安全响应；
- b) 用于PLc及以上安全功能的传感器，应优先选用经第三方功能安全认证（符合GB/T 16855.1要求）的安全传感器或安全型开关；
- c) 传感器防护等级应依据安装环境（粉尘、液体、振动等）选取，满足GB 4208规定的相应IP防护等级；工业环境中用于安全功能的传感器，防护等级不应低于IP54；
- d) 传感器安装位置应确保可靠检测目标状态，安装固定应牢固可靠，避免因振动或冲击导致位置偏移影响检测精度；安装方式应使传感器在设备运行过程中不可被非授权人员轻易触及或调整。
- e) 安全传感器的电气连接应采用屏蔽电缆，信号线与动力线应分开敷设，间距不小于100 mm，以避免电磁干扰导致误动作或拒动，符合GB/T 17626.4抗扰度要求。

5.2 位置检测与限位开关

机电一体化设备运动轴的行程限位检测应配置安全限位开关或安全接近开关，用于防护门/盖联锁的开关应选用经认证的安全门联锁开关，其技术要求应符合GB 5226.1第9章的相关规定。

硬限位开关：在运动轴行程末端应设置物理硬限位保护，硬限位动作后应通过安全回路切断驱动器使能信号，并触发设备进入安全停止状态；硬限位开关与软件行程限制之间应保留足够的缓冲距离。

防护门联锁：凡设置固定式或活动式防护装置（含防护门、防护罩、可移动防护板）以防止人员进入危险区域的机电一体化设备，其防护门联锁开关应接入安全回路，确保防护门打开时设备自动停止，防护门关闭且联锁有效后方可重新启动设备。

急停装置：急停按钮应安装在操作人员可快速触达的位置，颜色为红色，背景色为黄色，符合GB 5226.1第10.7条要求；急停回路应为自锁型，手动复位后方可使设备恢复运行；急停回路应以冗余方式接入安全控制器，响应时间不超过500 ms。

零速检测：对于需要在停机后人员进入的危险区域，应配置零速检测传感器（如磁编码器或轴转速传感器），仅当检测到运动轴速度为零时，方可允许防护装置开启或联锁开关释放，防止设备在惯性运动中造成人员伤害。

限位开关和联锁装置应定期检验（建议周期不超过12个月），验证其动作可靠性，检验记录应归入设备档案。

5.3 速度与位移检测

对于具有速度控制安全功能（安全限速、安全操作速度监控等）的机电一体化设备，速度检测装置应满足以下要求：

速度传感器（编码器、测速发电机等）的分辨率和频响特性应满足安全速度监控的实时性要求，最大响应延迟不得超过安全响应时间预算的20%；

安全速度监控功能宜通过具有安全认证的安全控制器内置的速度监控模块实现，或通过独立的安全速度监控继电器实现，监控精度应满足GB/T 16855.1对对应PLr等级的要求；

多轴联动设备应分别对每个运动轴进行速度监控，避免单轴失控导致整体系统危险；轴速度监控阈值设定应经过充分验证，并在设备调试记录中留存文件化证明。

位移检测精度应满足设备定位安全要求，编码器信号线应采用屏蔽双绞线，并与动力电缆分开敷设，避免高频变频器干扰导致位置数据错误。

5.4 温度、压力及流量检测

机电一体化设备中涉及高温、高压、高速液体/气体介质的子系统，应配置相应的温度、压力及流量检测装置，用于实现安全联锁保护：

- a) 驱动电机、驱动器及制动电阻的温度监控：应配置热敏电阻（PTC/NTC）或热电偶检测驱动系统关键热节点温度，超温时自动触发安全降速或安全停止，防止绝缘损坏和过热火灾风险；
- b) 液压/气压系统压力监控：液压缸驱动的机电一体化设备应设置压力安全阀和压力传感器，当系统压力超过额定压力的110%时应触发安全卸压动作；气动系统在供气压力低于最低工作压力时应禁止危险运动执行；
- c) 冷却液流量监控：对于依赖冷却系统维持安全运行温度的驱动器和主轴单元，应配置流量开关或流量传感器，检测冷却流量异常时触发安全停机；
- d) 上述检测信号应接入安全控制系统，报警阈值应根据设备设计文件和制造商规范确定，设定值不得高于相关元器件额定值的90%，并在设备调试报告中记录存档。

6 执行机构与驱动控制要求

执行机构（伺服电机、步进电机、液压缸、气缸等）与驱动控制器的配置应满足GB 5226.1第9、11章的相关规定，并符合以下安全控制要求：

伺服驱动安全功能：采用伺服驱动器的轴应充分利用驱动器内置安全功能（STO——安全转矩关闭、SS1——安全停止1、SS2——安全停止2、SOS——安全操作停止等），通过安全控制器的安全输出直接驱动驱动器安全功能使能端，取代传统接触器断开主回路的方式，以降低系统响应时间并提高安全功能可靠性；所选驱动器的内置安全功能性能等级应不低于相应安全功能要求的PLr，并具备第三方功能安全认证证书。

制动器安全要求：对于可能因重力下落造成危险的垂直轴，应配置具有失电制动功能的电磁制动器（断电抱闸），制动器释放电路应接入安全回路，仅在驱动器伺服使能有效且目标位置指令正常时释放；制动器制动力矩应依据负载惯量和下落距离计算确定，并留有不小于25%的安全余量。

变频驱动安全要求：变频器驱动的电机安全停止功能应通过安全继电器切断变频器驱动使能（STO功能）实现，不宜通过切断变频器主电源实现安全停止（防止产生过电压损坏变频器）；变频器输出侧应避免安装输出断路器，如需安装应确保变频器在断路器断开时已处于停止状态。变频器选型应满足所驱动负载在恶劣工况下的连续额定电流要求，降容系数应依据GB 5226.1附录A确定。

执行机构机械行程限制：机电一体化设备的每个运动轴除配置电气限位保护外，还应设置物理机械止挡（硬挡块），作为最终的机械安全冗余保护；硬挡块材料强度应能承受轴在最大速度下的冲击而不发生

断裂，其安装位置应设在电气限位开关动作后运动轴完全停止前的最大超程距离之外，留有足够的缓冲余量。

协作机器人与人机协作场景：用于人机协作的机器人和机电一体化设备，应依据风险评估配置力/力矩传感器或功率监控功能，实现安全限力（SFL）或安全限功率（SLP）功能；系统应在检测到与人员发生意外接触时在规定时间内停止运动，接触力峰值和持续时间应满足相关标准对人体损伤阈值的限制要求。

执行机构与驱动控制系统的维护记录应包括：定期润滑记录、制动器磨损检查记录、安全功能定期测试记录（建议每6个月开展一次），以及任何异常情况和处置措施记录，全部记录应归入设备安全档案，按照GB 5226.1第17章要求保存。

7 电气安全与电磁兼容要求

7.1 电气安全基本要求

机电一体化设备电气系统的设计与制造应符合GB 5226.1的全部强制性条款，主要包括以下电气安全基本要求：

电源进线保护：设备总电源进线应配置熔断器或断路器，其额定电流和分断能力应按GB 5226.1—2019第7.2条计算选型；三相供电设备应配置缺相保护，防止缺相工况导致电机过热和控制系统逻辑错误。

保护接地：设备所有外露导电部件（柜体、防护罩、电机外壳等）应可靠接地，保护导体（PE线）截面积应满足GB 5226.1第8.2条要求；接地电阻应不大于4 Ω （设备单独接地时），接地连接应采用不易松动的紧固方式，并标记黄绿接地标识。

7.2 绝缘与耐压要求

机电一体化设备电气系统绝缘与耐压要求应满足以下规定：

绝缘电阻：额定电压不超过500 V的电气回路，用500 V绝缘电阻表测量，绝缘电阻不应低于1 M Ω ；超过500 V的回路，用1000 V绝缘电阻表测量，绝缘电阻不应低于1 M Ω ；测量应在所有相关电气元件断电且所有半导体器件短路保护状态下进行。

耐压测试：设备出厂前应对主回路与保护导体之间进行耐压测试，试验电压为额定工作电压的2倍加1000 V（最低1500 V），持续时间1 s；安全回路（24 V DC）的主回路与控制回路之间的电气隔离，应通过光电隔离或变压器隔离方式实现，确保主回路故障不传导至安全控制回路。

电气柜防护等级：电气控制柜的防护等级应依据安装环境选取，符合GB 4208规定；一般工业环境电气柜防护等级不低于IP54，有喷水清洗工艺的环境不低于IP65；电气柜内部应安装热继电器过载保护，或通过变频器/伺服驱动器内置热保护功能实现电机过载保护。

低压控制回路：控制回路电压宜采用AC 24 V或DC 24 V，以降低人员触电风险；24 V DC供电应通过隔离型开关电源（PELV回路）提供，输出不接地端不得与机器框架直接连接，以防止接地故障导致控制功能异常。

7.3 电磁兼容要求

机电一体化设备的安全控制系统应具备足够的电磁抗扰能力，以确保在工业电磁环境中安全功能不受干扰影响。电磁兼容要求参照GB/T 17626.4执行：

传导干扰防护：驱动器（变频器、伺服驱动器）进线侧应安装EMI滤波器，滤波器参数应依据驱动器制造商推荐选型；驱动器至电机的动力电缆应采用屏蔽电缆，屏蔽层两端均应360°低阻抗接地，以抑制高频共模噪声；变频器输出端不宜安装LC滤波器（可能引起谐振），如有需要应使用驱动器厂商指定的dV/dt滤波器。

辐射干扰防护：安全控制系统（安全PLC、安全继电器、传感器信号处理器）应安装在金属接地电气柜内，所有信号线和电源线穿出柜体时应通过金属密封接头，电柜柜门密封条应确保良好的电磁屏蔽连接；无线通信设备（Wi-Fi、蓝牙、工业无线以太网）不宜在安全控制系统同一柜内使用，如无法避免应保持足够的空间隔离距离。

瞬态抗扰度：安全控制系统输入/输出端口的电快速瞬变（EFT/B）抗扰度试验按GB/T 17626.4要求，交流电源端口测试等级应不低于3级（ ± 2 kV），信号端口测试等级应不低于2级（ ± 1 kV）；安全功能相关的输入信号，应设置消抖滤波时间（不影响安全响应时间的前提下），防止瞬态干扰误触发安全停止。

静电防护：操作人员频繁触及的操作面板、触摸屏等，应通过设计防止静电积累，面板金属部件应与保护地连接；人机界面（HMI）安装位置应避免静电积累区域，必要时铺设防静电地垫。

8 软件安全要求

8.1 软件设计安全要求

机电一体化设备安全控制系统中运行的软件（包含安全PLC程序、驱动器安全参数配置、嵌入式控制器固件等）应按照GB/T 20438.1关于安全相关软件的要求进行开发。

软件功能安全等级要求按以下原则确定：

- a) 实现PLC安全功能的软件，应至少满足GB/T 20438.1 SIL1级软件完整性要求，采用结构化程序设计方法，程序中不应使用跳转语句（GOTO）和递归调用；
- b) 实现PLD及以上安全功能的软件，应满足SIL2级要求，软件开发过程应遵循V模型开发流程，在每个开发阶段产生相应的文件化工作产品，并通过独立的软件安全分析（如故障模式影响分析FMEA）验证软件安全需求的完整性；
- c) 安全功能软件与非安全功能软件应在逻辑上严格隔离，不得共享全局变量，安全相关变量应通过专用安全内存区域或安全通信协议进行交换；安全控制器的硬件看门狗应始终使能，程序超时自动触发安全停机动作。

8.2 软件变更管理与版本控制

机电一体化设备安全控制系统的软件（程序和参数）应实施严格的变更管理：

版本控制：所有安全相关软件应实施版本控制管理，版本号应包含主版本号、次版本号和修订号，每次变更均应记录变更内容、变更原因、变更人员和变更日期；软件版本信息应在设备铭牌上或HMI“关于”界面中可读，便于现场核查。

变更审批程序：安全相关软件的任何变更在实施前，应经过正式的变更影响分析，评估变更对安全功能完整性的影响；涉及安全功能的变更须经具备相应功能安全资质人员（TuV认证功能安全工程师或同等资质）审查批准，审批记录应归档保存。

软件备份与恢复：安全控制器的程序和安全参数应定期备份（至少每次变更后备份），备份文件应存储在至少两个独立介质上（如工程师站硬盘和可移动存储介质），备份文件应标注版本号、设备编号和备份日期；恢复操作后应重新执行安全功能验证测试，确认程序正确恢复。

访问权限控制：安全相关软件的修改权限应通过硬件钥匙开关和/或软件密码进行分级保护，一般操作人员不应具备修改安全参数的权限；调试工程师和维护工程师的操作权限应分级设置，权限变更应有操作日志记录。

开机自检：设备上电启动时，安全控制器应执行上电自检程序（POST），验证安全功能关键内存区域数据完整性（CRC校验），检测安全I/O模块通信状态；自检失败时，设备应保持上电抑制状态（不允许运动），直至故障排除并人工确认后方可重新启动。

9 安全功能验证与检验

9.1 安全功能验证要求

机电一体化设备在首次投入使用前，应对所有已实现的安全功能逐项进行验证测试，验证测试范围应覆盖风险评估报告中识别的全部安全功能，验证测试依据和方法应与GB/T 16855.1规定的验证要求相符：

- a) 安全停止功能验证：模拟触发急停、防护门开启、超行程等各类安全停止条件，测量设备从触发信号到运动完全停止的响应时间，验证是否满足设计文件规定的停止时间要求；验证应涵盖各种负载条件（额定负载和最大负载）下的停止性能；
- b) 联锁功能验证：逐一测试每个安全联锁回路（防护门开关、安全光幕、双手操作开关等）的动作可靠性，并验证联锁解除后设备不能自动重启（防止意外重启），必须通过手动确认操作后才能重新使能；
- c) 安全参数验证：核查驱动器安全功能参数（STO延时、SS1时间、速度限制值等）是否与安全需求规格说明书一致，参数验证应通过实际测量或驱动器诊断功能读取确认，不接受仅凭程序文档核查替代实测。

9.2 型式检验

机电一体化设备安全控制系统的型式检验应委托具有CMA资质且通过国家功能安全检测认可的第三方检测机构承担，型式检验项目应按以下程序执行：

文件审查：审查安全控制系统设计文件、风险评估报告、安全需求规格说明书、电路图、软件文档及安全功能验证报告的完整性和一致性，文件审查结论形成书面记录；

性能等级验证：依据GB/T 16855.1附录K的PL计算方法，对安全相关部件的架构、MTTFd值、DC水平和CCF措施进行计算分析，验证所声明的PL是否通过计算得到充分支撑；

功能测试：对安全功能逐项进行功能性测试，包括正常功能测试和故障注入测试；故障注入测试应模拟典型故障模式（传感器断线、短路、控制器电源失效、通信故障等），验证系统在故障条件下能否可靠转换至安全状态；型式检验报告由授权工程师签发，有效期为设备型号规格不变条件下5年。

9.3 出厂检验与验收

每台机电一体化设备出厂前应进行出厂检验，出厂检验应包含以下安全控制相关检验项目：

- a) 电气绝缘检验：按照7.2条规定的绝缘电阻和耐压测试要求，对主回路进行绝缘检测，出具合格检验报告；
- b) 安全功能功能性测试：对全部安全功能逐项进行功能性触发测试，记录测试结果，测试项目数量不得少于安全需求规格说明书中安全功能清单总项数；
- c) 防护等级检查：核查电气柜、操作面板及传感器的实际防护等级标记与设计文件是否一致，并对密封状态进行目视检查；
- d) 接地连接检查：使用毫欧表测量保护导体连接点之间的电阻，任意两个接地点之间的接地电阻不应超过0.1 Ω 。

用户验收时，应由用户方安全工程师与制造商代表共同对安全功能逐项进行现场验收测试，验收测试结果填入本规范附录A规定的验收记录表，并由双方签字确认；验收合格后，制造商应向用户移交全套安全技术文档，包括安全手册、风险评估报告、维护手册和备件清单。

10 安装调试与维护管理

10.1 安装技术要求

机电一体化设备安全控制系统的安装应由具备相应资质的专业人员执行，安装前应充分了解设备安全手册和风险评估报告，安装过程中应严格执行以下技术要求：

- a) 安装环境要求：电气控制柜安装场所应防止水汽、腐蚀性气体及导电性粉尘进入，环境温度应在0~40 $^{\circ}\text{C}$ 范围内（运行时），海拔超过1000 m时应依据GB 5226.1附录B对元器件额定值进行降容；
- b) 电缆敷设要求：动力电缆与安全信号电缆必须分槽分开敷设，禁止同槽混行；安全信号电缆宜采用金属保护管或金属线槽保护；电缆固定间距不超过600 mm，进出柜体时应采用密封电缆固定头，防止水分、粉尘侵入；
- c) 接地连接要求：设备安装完成后，应按照设计文件的接地图纸，逐点核查保护接地连接的完整性，使用校准接地电阻测试仪测量接地电阻，测试结果应符合7.1条要求；
- d) 安装文件管理：安装过程中发现的与设计文件不符的情况，应书面记录并通知制造商确认处理，不得擅自更改安全相关回路的连接方式；安装完成后，安装单位应提供竣工安装报告，作为后续调试和维护的基础文件。

10.2 调试与验收要求

机电一体化设备安全控制系统调试应分阶段进行，调试过程中应确保人员安全：

调试前检查：调试启动前，应检查所有安全相关元器件的安装状态和接线正确性，对照设计文件逐一核查传感器安装位置、限位开关安装间距、急停按钮可达性及联锁装置机械动作顺畅性；所有安全回路应在上电前完成静态导通性检查。

分步调试程序：首次通电调试应在无负载状态下进行，先验证安全功能的响应性（急停、联锁等），再逐步扩展至低速负载运行测试；每个阶段调试完成后，应记录调试数据并由调试工程师签字确认；安全功能调试数据（触发时间、响应时间等）应与型式检验报告中的基准值进行比对，偏差超过10%应分析原因并处置。

调试验收标准：调试验收测试应严格按照9.3条规定的出厂检验项目和验收程序执行；现场调试发现的安全功能不符合项，应在验收合格前全部整改完毕，不允许带安全功能缺陷交付使用；验收签字后，调试记录和验收报告应分别由制造商和用户各留存一份。

10.3 日常维护与保养

机电一体化设备安全控制系统的日常维护应制定年度维护计划，维护内容及周期如下：

- a) 每月检查：目视检查电气柜内部元器件状态（异味、变色、破损）、电缆绑扎固定状态、散热风扇运转状态、滤网清洁状态（必要时清洁），检查操作面板急停按钮机械动作顺畅性；
- b) 每季度检查：对安全功能进行功能性测试（可选典型安全功能抽查），测量驱动电机接地电阻，检查安全传感器固定状态及外观完整性，记录检查结果；
- c) 每年检查：对电气柜内主要元器件（断路器、接触器、继电器）进行动作测试；对安全控制系统全部安全功能进行完整的功能测试，测试方法应与出厂检验程序一致；对关键电气连接点（端子排、PE连接等）进行紧固检查，用毫欧表复测接地电阻；年度维护完成后应出具年度维护报告，并更新设备档案。

- d) 大修检查：设备运行满5年或按照制造商规定的大修周期，应对安全控制系统进行全面检修，包括更换达到设计寿命的安全元器件（安全继电器、联锁开关、急停按钮等），大修后应重新进行安全功能全项验证测试，并更新设备安全档案。

10.4 故障诊断与应急处置

机电一体化设备安全控制系统发生故障时，维护人员应参照设备安全手册和故障诊断手册，按照以下原则进行故障诊断与处置，不得擅自短接或旁路安全回路：

故障诊断基本原则：发生安全功能相关故障时，应先确认设备处于安全停机状态，再通过安全控制器故障诊断界面、驱动器报警代码和传感器状态指示灯等多渠道信息综合判断故障原因；维修操作前，应对电气柜和驱动器进行充分放电（至少等待5分钟后，用电压表确认母线电压低于36 V），再进行接线操作，防止直流母线残压触电伤害。

安全功能临时旁路管理：因调试或特殊维修需要临时旁路安全功能时，应遵循最小化旁路原则，仅旁路维修所需的最小范围的安全功能，同时采取替代安全措施（如增派安全监护人员、划定隔离区域等）；旁路操作应经主管工程师书面授权，并在操作现场悬挂警告标识；旁路时间应尽量缩短，维修完成后立即恢复安全回路，并重新进行安全功能测试验证后方可恢复生产。应急处置记录应及时归入设备档案。

附录 A
(规范性)
机电一体化设备安全控制技术检验记录表

表A.1 机电一体化设备安全控制技术检验记录表

检验类别	检验项目	检验内容与判定标准	备注
A 电气安全检验	A1 绝缘电阻	主回路对PE: $\geq 1 \text{ M}\Omega$ (500 V绝缘表) 控制回路对PE: $\geq 1 \text{ M}\Omega$ 检验结果: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 测量值: _____ $\text{M}\Omega$	依据GB 5226.1—2019第18.3条
	A2 保护接地	接地电阻测量(毫欧表): 柜体与PE排之间: $\leq 0.1 \text{ }\Omega$ 电机外壳与PE排之间: $\leq 0.1 \text{ }\Omega$ 检验结果: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	依据GB 5226.1—2019第8.2条
B 安全功能检验	B1 急停功能	触发急停按钮, 测量停止响应时间: _____ ms 急停自锁功能: <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 异常 手动复位后可重启: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 检验结果: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	响应时间 $\leq 500 \text{ ms}$
	B2 防护门联锁	开门状态下禁止启动: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 运行中开门自动停止: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 联锁释放后需手动确认: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 检验结果: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	依据GB/T 16855.1—2018
	B3 超行程保护	软限位触发停止: <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 异常 硬限位触发停止: <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 异常 硬挡块机械止挡有效: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 检验结果: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	测试各轴正负方向
C 传感器检验	C1 位置传感器	安装固定状态: <input type="checkbox"/> 牢固 <input type="checkbox"/> 松动 检测可靠性测试: <input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 未通过 IP防护等级标记: _____ 检验结果: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	依据GB 4208—2017
	C2 速度检测	编码器信号正常: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 安全速度监控功能验证: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格 速度限制值 (mm/s): _____ 实测停止时间: _____ ms	
D 电磁兼容检验	D1 接地与屏蔽	EMI滤波器安装: <input type="checkbox"/> 有 <input type="checkbox"/> 无 动力/信号电缆分开敷设: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 屏蔽电缆两端360°接地: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 检验结果: <input type="checkbox"/> 合格 <input type="checkbox"/> 不合格	依据GB/T 17626.4—2018
E 软件检验	E1 版本核查	安全PLC程序版本: _____ 驱动器固件版本: _____ 与备案版本一致: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 上电自检结果: <input type="checkbox"/> 通过 <input type="checkbox"/> 失败	
	E2 安全参数	安全参数与安全需求规格书一致: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 安全参数访问权限保护有效: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 程序备份状态: <input type="checkbox"/> 已备份 <input type="checkbox"/> 未备份	
F 综合验收	F1 验收结论	全部检验项目合格: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否 存在不合格项数: _____项 不合格项描述: _____ 整改完成确认: <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否	
	F2 签字存档	制造商代表签字: _____ 用户方代表签字: _____ 检验日期: _____年____月____日 归档编号: _____	档案保存期限 ≥ 5 年

注: 本表适用于机电一体化设备安全控制系统的出厂检验、现场验收及定期维护检验, 由检验人员逐项填写, 所有项目检验合格后双方签字确认。