

ICS 25.040.30
J 28



中华人民共和国国家标准

GB/T 39004—2020

工业机器人电磁兼容设计规范

Industrial robot electromagnetic compatibility design specification

2020-09-29 发布

2021-04-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 缩略语	3
4 工业机器人组成及电磁兼容关键部件	3
4.1 概述	3
4.2 示教器	4
4.3 控制柜	4
4.4 工业机器人本体	4
5 工业机器人电磁兼容设计框架	4
6 示教器	5
6.1 概述	5
6.2 示教器电磁兼容技术指标要求	5
6.3 示教器电磁兼容设计要求	6
7 控制柜	8
7.1 概述	8
7.2 控制柜系统电磁兼容设计要求	8
7.3 控制柜内关键零部件电磁兼容设计要求	11
8 工业机器人本体	13
8.1 概述	13
8.2 工业机器人本体系统电磁兼容设计	13
8.3 本体内关键零部件电磁兼容设计要求	13
9 工业机器人的 PCB 电磁兼容设计	14
9.1 概述	14
9.2 基于 PCB 原理图部分的电磁兼容设计	14
9.3 PCB 布局布线电磁兼容设计	16
10 证实方法	18
10.1 电磁兼容性测试方法	18
10.2 设计过程记录	18
附录 A (资料性附录) 工业机器人 EMC 设计的关键要素	19
参考文献	20

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国自动化系统与集成标准化技术委员会(SAC/TC 159)归口。

本标准起草单位：上海电器科学研究所、广东省珠海市质量计量监督检测所、安徽宝信信息科技有限公司、中国工程物理研究院电子工程研究所、安徽省配天机器人技术有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、上海电器科学研究所(集团)有限公司、中国电子技术标准化研究院、山东鲁能智能技术有限公司、上海机器人产业技术研究院有限公司、上海电器设备检测所有限公司、上海添唯认证技术有限公司、广东汇兴精工智造股份有限公司。

本标准主要起草人：郑军奇、李军、李广垒、陈鑫、王鹏、朱文立、陈灏、邢琳、崔强、周雷、钟辉、梁观胜。

工业机器人电磁兼容设计规范

1 范围

本标准规定了工业机器人的示教器、控制柜、机器人本体、印制电路板(PCB)的电磁兼容(EMC)设计要求。

本标准适用于工业机器人的 EMC 设计。

注：本标准给出的内容是一种趋近式设计，当工业机器人制造商采用以下设计时，将会获得更好的电磁兼容性。当本标准与其他设计要求产生冲突时，制造商宜根据实际情况，综合考虑，采用最优设计方式。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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/T 4365 电工术语 电磁兼容

GB 4824—2019 工业、科学和医疗设备 射频骚扰特性 限值和测量方法

GB/T 6113.201 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 2-1 部分：无线电骚扰和抗扰度测量方法 传导骚扰测量

GB/T 6113.203 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范 第 2-3 部分：无线电骚扰和抗扰度测量方法 辐射骚扰测量

GB/T 12643—2013 机器人与机器人装备 词汇

GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验

GB/T 17626.3 电磁兼容 试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验

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

GB/T 17626.5 电磁兼容 试验和测量技术 浪涌(冲击)抗扰度试验

GB/T 17626.6 电磁兼容 试验和测量技术 射频场感应的传导骚扰抗扰度

GB/T 17626.11 电磁兼容 试验和测量技术 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验

GB/T 17626.14—2005 电磁兼容 试验和测量技术 电压波动抗扰度试验

GB/T 17799.2 电磁兼容 通用标准 工业环境中的抗扰度试验

GB/T 38326 工业、科学和医疗机器人 电磁兼容 抗扰度试验

GB/T 38336 工业、科学和医疗机器人 电磁兼容 发射测试方法和限值

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 4365 和 GB/T 12643—2013 界定的以及下列术语和定义适用本文件。

3.1.1

工业机器人 industrial robot

自动控制的、可重复编程、多用途的操作机，可对三个或三个以上轴进行编程。它可以是固定式或移动式。在工业自动化中使用。

注 1：工业机器人包括：

- 操作机,含致动器;
- 控制器,含示教器和某些通信接口(硬件和软件)。

注2:还包括某些集成的附加轴。

注3:改写 GB/T 12643—2013,定义 2.9。

3.1.2

工业机器人 EMC industrial robot EMC

工业机器人的设备或系统在所处的电磁环境中可正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

注1:EMC包括电磁骚扰(EMD)和电磁抗扰度(EMS)两方面内容。

注2:EMI为工业机器人在执行其功能的过程中所产生不利于其他系统的电磁骚扰,工业机器人对所在环境产生的电磁骚扰不能超过规定的限值。

注3:EMS为工业机器人在执行应有功能的过程中不受周围电磁环境影响的能力,工业机器人对所在环境中存在的电磁干扰具有规定程度的抗扰度。

3.1.3

示教器 pendant;teach pendant

与控制系统相连,用来对机器人进行编程或使机器人运动的手持式单元。

3.1.4

控制柜 control cabinet

一套具有逻辑控制和动力功能的装置,能控制和检测机器人机械结构并与环境(设备和使用者)进行通信。

注:改写 GB/T 12643—2013,定义 2.7。

3.1.5

滤波器 filter

用于抑制电磁骚扰的由单一元件(例如电感、电容)组成的组合器件。

[GB/T 7343—2017,定义 3.1.5]

3.1.6

屏蔽 shield

隔离电磁环境、显著减小在其一边的电场或磁场对另一边的设备或电路的影响的一种装置或措施。

注:如屏蔽盒、屏蔽室、屏蔽笼或其他通常的导电物体。

3.1.7

机械架构 architecture

组成电子电气产品各个部件在产品中的相对位置。

3.1.8

原理图 schematic diagram

一种表达电路连接关系的图。

3.1.9

印制电路板 printed-circuit board

电子元器件的支撑体,为电子元器件提供电气连接。

注:由于印刷电路板是采用电子印刷术制作的,故又被称为“印刷”电路板。

3.1.10

参考地 reference ground

一块导电平面,其电位用作公共参考电压。

注:参考地又称参考地平面(GRP)。

3.1.11

寄生电容 parasitic capacitance

存在于导线之间、线圈与机壳之间以及某些元件之间的电容。

注 1: 它们的数值虽小,却是引起干扰的重要原因。

注 2: 寄生电容一般是指电感、电阻、芯片引脚等在高频情况下表现出来的电容特性。

3.1.12

高速信号 high-speed signal

上升时间小于其 4 倍传输时延的信号。

3.1.13

浪涌防护 surge protect

由浪涌保护电路构成,为保护后续电路免于浪涌损毁或干扰的措施。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AC/DC:交流电转直流电(Alternating Current/Direct Current)

AGV:自动导引车(Automated Guided Vehicle)

CAN:控制器局域网(Controller Area Network)

CMC:共模电感(Common Mode Choke)

DC/AC:直流电转交流电(Direct Current/Alternating Current)

EMC:电磁兼容性(Electro Magnetic Compatibility)

EMI:电磁干扰(Electromagnetic Interference)

EMS:电磁抗扰度(Electromagnetic Susceptibility)

ESD:静电放电(Electrostatic Discharge)

EtherCAT:以太网控制自动化技术(Ethernet for Control Automation Technology)

GND:地(Ground)

PCB:印制电路板(Printed Circuit Board)

PWM:脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation)

SELV:安全特低电压(Safety Extra Low Voltage)

4 工业机器人组成及电磁兼容关键部件

4.1 概述

根据使用需求,工业机器人设计可以分为一体式或分体式。一体式设计是将工业机器人本体与控制柜(驱动系统)设计为一个整体。分体式设计是将工业机器人本体与控制柜(驱动系统)设计成通过电缆连接的两个相对独立的部分。

分体式工业机器人由示教器、控制柜、机器人本体和连接线缆构成,见图 1。

注:一体式设计的工业机器人的结构组成可能与图 1 存在差异。

工业机器人电磁兼容设计的关键要素有电磁骚扰源、电磁耦合路径及电磁敏感部件,其相关资料参见附录 A。

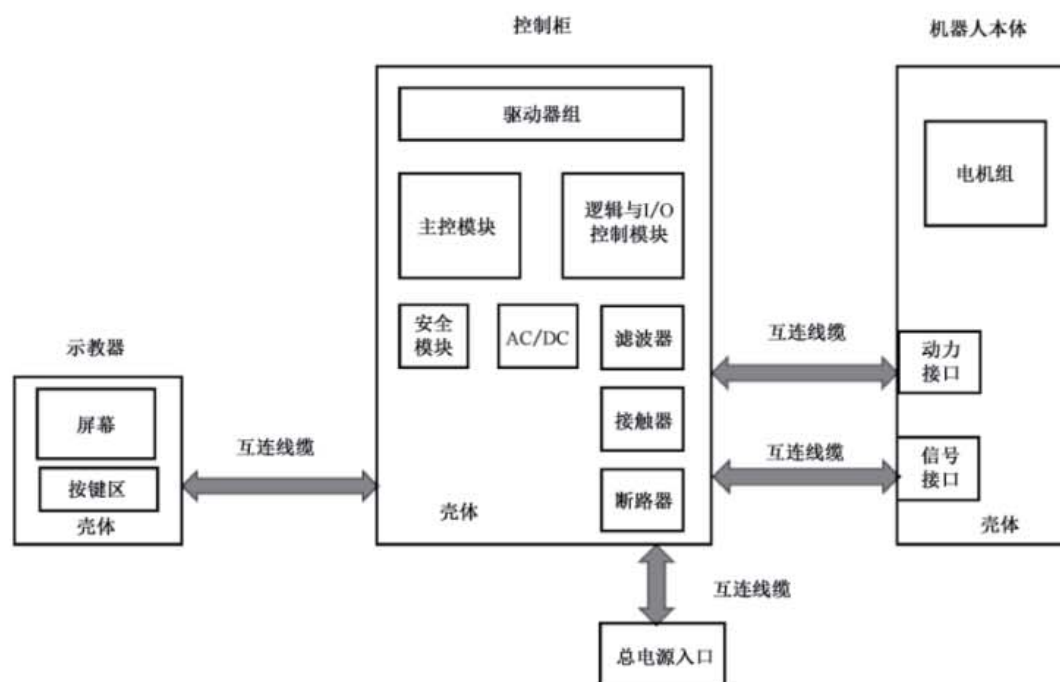


图 1 工业机器人的构成示意图

4.2 示教器

影响示教器电磁兼容性能的部件主要有壳体、PCB、显示屏和接口等。

4.3 控制柜

影响控制柜电磁兼容性能的部件主要有壳体、PCB、电源和电缆等。

4.4 工业机器人本体

影响工业机器人本体电磁兼容性能的部件主要有壳体、电机、电缆、传感器和电池(AGV适用)等。

5 工业机器人电磁兼容设计框架

本标准考虑的是典型工业机器人的电磁兼容设计,对制造商实际设计时不适用的条款,其要求无需考虑。

工业机器人各厂商实际的电磁兼容设计能力存在差异,机器人关键零部件存在外购件、自制件或两者结合的情况,相应的电磁兼容设计时关注点不尽相同,图 2 给出了工业机器人示教器、控制柜和本体与本标准条款对照图。

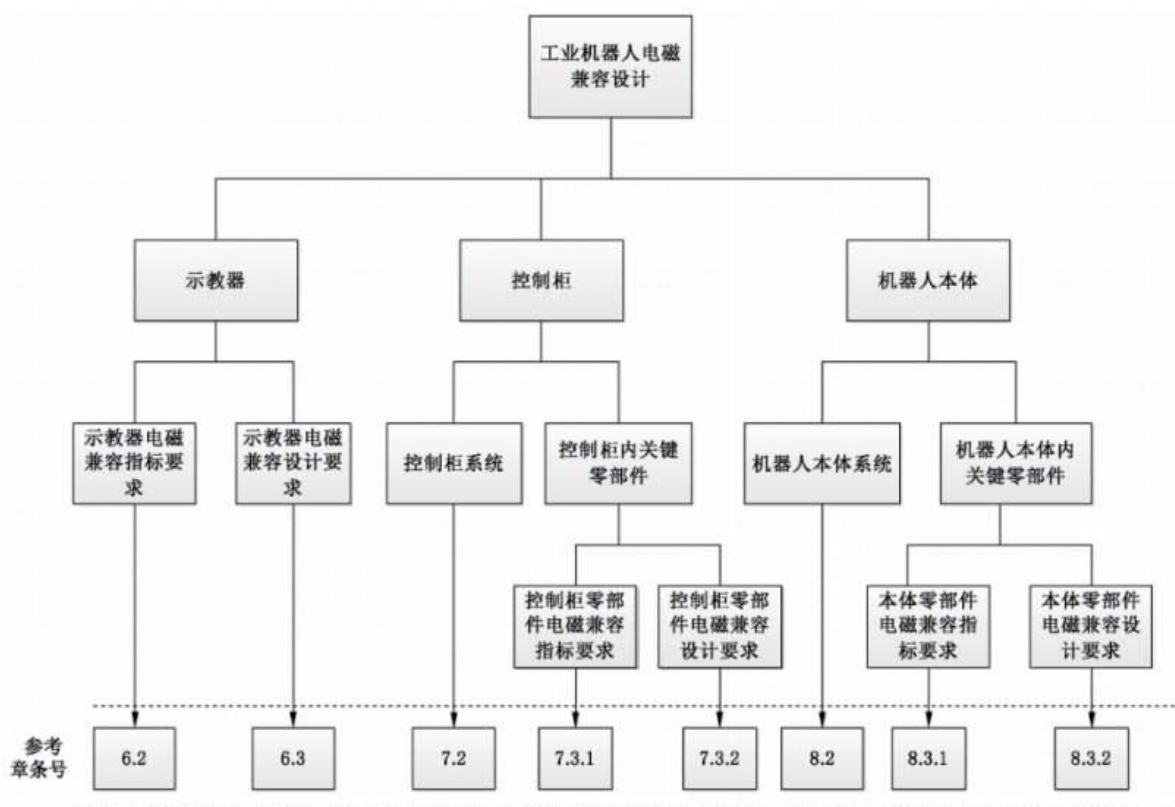


图2 工业机器人电磁兼容设计章节对照图

6 示教器

6.1 概述

工业机器人的示教器可以由机器人制造商自行设计或采购。其电磁兼容指标要求见6.2,电磁兼容设计要求见6.3。

6.2 示教器电磁兼容技术指标要求

对于外购的示教器,工业机器人厂家宜采用设置电磁兼容指标的形式,对采购的示教器的电磁兼容水平加以控制,其电磁兼容指标要求见表1。

示教器宜选用制造厂商推荐的典型工作状态,参照台式设备进行布置,并运行制造厂商规定的功能。

在进行抗扰度试验时,表1中给出的性能判据应参照GB/T 17799.2进行。

表 1 示教器电磁兼容指标要求

测试端口	项目	频率范围	限值	测试方法参考标准	性能判据等级
外壳端口	电磁辐射骚扰	30 MHz~1 GHz	见 GB 4824—2019 表 6	GB/T 6113.203	—
	静电放电抗扰度	—	±6 kV (接触) ±8 kV (空气)	GB/T 17626.2	B
	射频电磁场辐射抗扰度	80 MHz~ 1 000 MHz	10 V/m	GB/T 17626.3	A
信号和控制端口	电快速瞬变脉冲群抗扰度	—	±1 kV 100 kHz 重复频率	GB/T 17626.4	B
	浪涌抗扰度	—	±2 kV (共模, 电压逐级施加)	GB/T 17626.5	B
		—	±1 kV (差模, 电压逐级施加)	GB/T 17626.5	B
	射频共模/射频连续波传导抗扰度	0.15 MHz~ 80 MHz	10 V	GB/T 17626.6	A

6.3 示教器电磁兼容设计要求

6.3.1 概述

示教器机械架构电磁兼容设计要求会提升工业机器人示教器的电磁兼容性,设计时,若只采用本标准的部分要求,电磁兼容测试过程中存在测试不通过的风险。

6.3.2 示教器机械架构设计

6.3.2.1 示教器中电缆连接器的相对位置

电缆连接器宜集中放置在电路板的同一侧,这样可使流经整个电路板及其工作地(GND)的共模干扰电流变小,也可减小流经产品等效天线(如电缆)的共模干扰电流,在电路板中分散放置连接器的方式会提高 EMC 风险。

6.3.2.2 示教器屏蔽电缆屏蔽层的搭接

当示教器输出电缆采用屏蔽电缆时,屏蔽电缆的连接位置应满足如下要求:

- 金属外壳示教器,电缆屏蔽层在连接器入口处与接地的金属板或金属连接器外壳相连,并形成 360° 搭接;
- 对于非金属外壳示教器,以最短距离与 GND 搭接。

6.3.2.3 示教器内部 PCB 的电源和信号输入端口的滤波及防护

示教器与控制柜之间的互联电缆未屏蔽且该电缆需要通过浪涌测试时,则应增加滤波电路。

示教器内有开关电源时,其电源端口一定要进行 EMI 滤波。

6.3.2.4 示教器 PCB 板的工作地与金属壳体之间的互连

示教器 PCB 板的工作地与金属壳体(包括连接器金属壳)之间的互连应满足以下要求:

- a) 对于 SELV 电路,PCB 板的工作地与金属壳体之间在连接器附近直接等电位互连;
- b) 对于非 SELV 电路,PCB 板的工作地与金属壳体之间在连接器附近则通过 Y 电容与金属壳体连接。

6.3.2.5 示教器内不同 PCB 板之间的工作地的互连

由于互连排针/排线上存在的寄生电感,所以 PCB 板之间的地互连对所传高速信号是一种高阻抗的互连,当高速信号电流经过互连排针/排线时会产生压降。针对 PCB 板之间的工作地互连宜采用如下方式:

- a) 连接器中的地与连接器的金属外壳在互连线的两端直接相连或通过电容相连;
- b) 或对于排线扁平电缆或类似互连电缆有地平面存在;
- c) 或通过长宽比小于 5 的金属体互连。

6.3.2.6 示教器内部 PCB 互连信号

PCB 互连信号是产品抗干扰性能最薄弱的环节,如果 PCB 板之间互连线两边的工作地未通过低阻抗的金属体进行互连,就意味着干扰电流一定会流经互连排线/针,则应对互连连连接器中所有信号进行滤波处理。

PCB 板上的周期性信号(如时钟/PWM 信号等)的回流,在流经互连排线/针时,就会产生 EMI 共模压降,产生 EMI 问题。PCB 板之间的互连信号中不宜存在时钟信号或 PWM 信号。

6.3.2.7 示教器壳体各个金属部件之间的搭接(考虑阻抗与缝隙处理)方式

示教器的壳体应是一个完善的屏蔽体,为此应:

- a) 屏蔽体各金属表面之间实施面与面的连接。
- b) 屏蔽体中各金属体长宽比小于 3:1。
- c) 孔缝的最大尺寸不超过以下两种情况下的最小尺寸:
 - 1) 电路最大工作频率波长的 1/100;
 - 2) 当这个屏蔽体有共模干扰电流流经时,小于 0.15 m。
- d) 严禁屏蔽电缆不与屏蔽体连接直穿屏蔽体(此时,电缆屏蔽层应与屏蔽体做 360°搭接)。

6.3.2.8 进入示教器壳体后的电缆、连接器、PCB 板的工作地与金属壳体之间的互连及产品金属壳体之间所组成的回路面积控制

如图 3 所示输入回路面(回路 H)与和后续回路(回路 K)之间的耦合,他们在信号传输时会产生互感,当流向地平面的干扰电流经过此互感后,会形成压降,并对外进行干扰。

为了使互连电感最小,示教器设计时,回路 H 面积应趋于零。

注:回路面积越大寄生电感越大,大的电感将阻挠干扰电流的泄放。

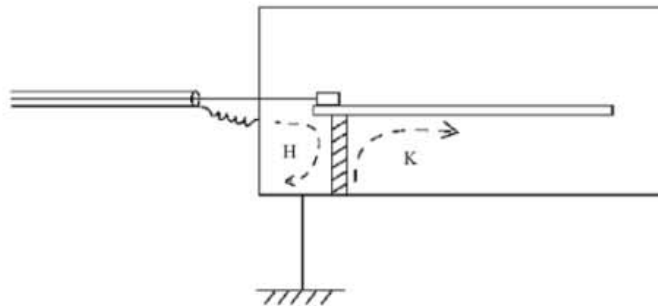


图3 输入回路与和后续回路之间的耦合

6.3.2.9 示教器防 ESD 击穿设计

对于非金属外壳的示教器,示教器的可接触表面与内部的任何金属体之间宜具有足够的爬电距离(金属体可接触表面之间沿绝缘体表面的最短距离),如 6 mm 爬电距离,壳体可承受 ± 8 kV 的空气放电,10 mm 爬电距离,壳体可承受 ± 15 kV 的空气放电。

6.3.2.10 示教器电路板设计

示教器电路板设计见第 9 章。

7 控制柜

7.1 概述

工业机器人控制柜电磁兼容设计需要考虑关键零部件系统集成的电磁兼容性,其电磁兼容要求见 7.2。

工业机器人的控制柜中开关电源、控制器、伺服驱动器等关键零部件,应满足 7.3 的电磁兼容要求。

控制柜电磁兼容设计要求将会提升工业机器人控制柜的电磁兼容性,若设计时只采用部分内容,这将存在控制柜通不过电磁兼容测试的风险。

7.2 控制柜系统电磁兼容设计要求

7.2.1 控制柜内电缆

电缆中传输的信号和能量,能在其附近产生电磁场。同时电缆也会从周围的环境中吸收电磁信号,并将其传输给设备,是辐射干扰的主要来源,也是电磁干扰的接收器。

控制柜内的电缆根据电缆上的信号共分为 4 类(如有),分别为:

- 敏感信号线:EtherCAT 通信线、CAN/Modbus 信号线、编码器信号线、示教器通信线缆(常与示教器电源线共同组成线束);
- 带快速开关切换的功率信号线:电动力线(含三相电源线和抱闸信号线)、PWM 信号排线;
- 电源线:控制柜供电线缆、伺服驱动器供电线缆、各模块供电线缆(典型为 24 V,有主控模块供电、通信模块供电、I/O 模块供电、安全模块供电等,上述模块在有些控制柜中是分立供电、有些控制柜中是合并供电);
- 一般信号线:指示灯/按键相关线缆、风扇控制信号线(常与风扇电源线共同组成线束)、驱动控制信号线(与功率模块之间的信号连接,常与 PWM 信号线共同组成线束)、驱动控制上位机接口 I/O 信号线(除通信总线外的硬件连接线)。

7.2.2 控制柜内电缆加装 EMC 装置

电缆中的 EMC 装置是放置在电缆上用来增加电缆共模阻抗或旁路共模电流的装置,如套在线缆上的铁氧体磁环、串联在线缆上的滤波器等。

控制柜内电缆应根据表 2 中的分类,对于其中敏感信号线和快速开关功率信号线,应考虑加装 EMC 装置,并采用屏蔽电缆。

表 2 电缆 EMC 装置要求表

电缆属性	是否需要 EMC 装置	线缆类型要求	典型装置列举
EtherCAT/EtherCAT 通信线、CAN/MODBUS 信号线、编码器信号线、示教器通信线缆	是	屏蔽电缆	屏蔽、磁环
电机动力线(含三相电源线 和抱闸信号线)、PWM 信号排线	是	屏蔽电缆	屏蔽、磁环
控制柜供电线缆、伺服驱动器供电线缆、各模块供电线缆	否	—	—
指示灯/按键相关线缆、风扇控制信号、驱动控制信号、驱动控制上位机接口 I/O 信号	否	—	—

7.2.3 控制柜内屏蔽电缆屏蔽层连接

控制柜输出的动力电缆、编码器电缆宜采用屏蔽电缆,其输出端口宜靠近控制柜壳体处放置。

采用屏蔽电缆时,其屏蔽层在输入和输出端口处,应与接地的金属板或金属连接器外壳形成 360° 搭接。

对于浮地关键零部件,其屏蔽电缆应与公共地 360° 搭接。

屏蔽电缆在穿过屏蔽壳体时,电缆屏蔽层应与屏蔽体形成 360° 搭接。

7.2.4 控制柜内关键零部件接地

为使流经关键零部件的共模干扰(电流)就近流向大地,关键零部件接地要求如下:

- a) 零部件的壳体应就近与控制柜金属壳体低阻抗连接;
- b) 接地采用接地导体时,其长宽比应小于 3:1。

7.2.5 控制柜内电缆间串扰

表 2 所述各类线缆之间应有串扰抑制措施,以有效降低各类电路之间通过寄生参数传递的干扰信号,不同电缆之间是否需要串扰抑制见表 3。

表 3 不同类型电缆之间的串扰抑制需求

类型	EtherCAT/EtherCAT 通信线、CAN/MODBUS 信号线、编码器信号线、示教器通信线缆	电动力线(含三相电源线和抱闸信号线)、PWM 信号排线	控制柜供电线缆、伺服驱动器供电线缆、各模块供电线缆	指示灯/按钮相关线缆、风扇控制信号线、驱动控制信号线、驱动控制上位机接口 I/O 信号线
EtherCAT/EtherCAT 通信线、CAN/MODBUS 信号线、编码器信号线、示教器通信线缆	需要	需要	需要	需要
电动力线(含三相电源线和抱闸信号线)、PWM 信号排线	需要	不需要	需要	需要
控制柜供电线缆、伺服驱动器供电线缆、各模块供电线缆	需要	需要	不需要	不需要
指示灯/按钮相关线缆、风扇控制信号线、驱动控制信号线、驱动控制上位机接口 I/O 信号线	需要	需要	不需要	不需要

表 3 中电缆之间需要串扰抑制处理的,其措施方法有:

- 电缆间距离宜在 0.3 m 以上,如动力电缆和编码器电缆在控制柜内部走线时,宜保持与内部数据控制电缆 0.3 m 以上;
- 线缆间垂直布线;
- 相邻两条平行布置的电缆,至少其中有一条为屏蔽电缆。

7.2.6 控制柜系统地阻抗或壳体金属部件间阻抗

控制柜系统的地阻抗是一个完善的屏蔽体的各金属部件之间的阻抗,为满足控制柜壳体的屏蔽性能要求,应考虑如下内容:

- 控制柜各金属表面之间实现完整、连续的低阻抗搭接;
- 各金属体长宽比都小于 5 : 1;
- 控制柜壳体上孔缝的最大尺寸不应超过以下两种情况下的最小尺寸:
 - 电路中有源器件的最大工作频率波长的 1/100;
 - 当这个屏蔽体有共模干扰电流流经时,其孔缝小于 0.15 m。

7.2.7 线缆环路

电缆与参考地或大地组成的环路面积直接与电缆的辐射发射大小相关,环路面积越大辐射越大。同样,环路面积越大,也越容易耦合外部的电磁场,在电缆中感应较高的共模电压和共模电流。

控制柜内部电缆设计时,电缆与参考地或大地之间组成的环路面积应趋近于零,为满足以上要求,电缆宜靠近控制柜壳体走线。

7.3 控制柜内关键零部件电磁兼容设计要求

7.3.1 控制柜内关键零部件电磁兼容技术指标要求

对于购置的控制柜内关键零部件,工业机器人厂家宜采用设置电磁兼容指标的形式,对采购的关键零部件的电磁兼容水平加以控制,其电磁兼容指标要求见表4和表5。

关键零部件应依照制造厂商规定的典型工作状态,参照台式设备进行布置,并运行制造厂商规定的功能。

在进行抗扰度试验时,表4和表5中给出的性能判据等级应按照GB/T 17799.2执行。

表4 开关电源的电磁兼容指标要求

测试端口	项目	频率范围	限值	测试方法	性能判据等级
外壳端口	电磁辐射骚扰	30 MHz~1 GHz	见GB 4824—2019表6	GB/T 6113.203	—
	静电放电抗扰度	—	±6 kV(接触) ±8 kV(空气)	GB/T 17626.2	B
	射频电磁场辐射抗扰度	80 MHz~ 1 000 MHz	10 V/m	GB/T 17626.3	A
交流电源输入 端口	传导骚扰	150 kHz~30 MHz	见GB 4824—2019表2	GB/T 6113.201	—
	电快速瞬变脉冲群抗扰度	—	±2 kV 100 kHz 重复频率	GB/T 17626.4	B
	浪涌抗扰度	—	±2 kV(共模,电压 逐级施加)	GB/T 17626.5	B
			±1 kV(差模,电压 逐级施加)	GB/T 17626.5	B
	射频共模/射频连续波传导抗扰度	0.15 MHz~80 MHz	10 V	GB/T 17626.6	A
	电压暂降和短时中断抗扰度	—	40%,持续10周期 (暂降) 70%,持续25周期 (暂降) 80%,持续250周期 (暂降) 0%,持续250周期 (中断)	GB/T 17626.11	C
	电压波动抗扰度	—	GB/T 17626.14— 2005表1等级3	GB/T 17626.14— 2005	A

表 5 控制器、伺服驱动器等的电磁兼容指标要求

测试端口	测试项目	频率范围	限值	测试方法	性能判据等级
外壳端口	电磁辐射骚扰	30 MHz~1 GHz	见 GB 4824—2019 表 6	GB/T 6113.203	—
	静电放电抗扰度	—	±6 kV (接触) ±8 kV (空气)	GB/T 17626.2	B
	射频电磁场辐射抗扰度	80 MHz~1 000 MHz	10 V/m	GB/T 17626.3	A
直流电源端口	电快速瞬变脉冲群抗扰度	—	±2 kV 100 kHz 重复频率	GB/T 17626.4	B
	浪涌抗扰度	—	±2 kV (共模, 电压逐级施加)	GB/T 17626.5	B
		—	±1 kV (差模, 电压逐级施加)	GB/T 17626.5	B
	射频共模/射频连续波传导抗扰度	0.15 MHz~80 MHz	10 V	GB/T 17626.6	A
信号和控制端口	电快速瞬变脉冲群抗扰度	—	±1 kV 100 kHz 重复频率	GB/T 17626.4	B
	浪涌抗扰度	—	±2 kV (共模, 电压逐级施加)	GB/T 17626.5	B
		—	±1 kV (差模, 电压逐级施加)	GB/T 17626.5	B
	射频共模/射频连续波传导抗扰度	0.15 MHz~80 MHz	10 V	GB/T 17626.6	A

7.3.2 控制柜内关键零部件电磁兼容设计要求

7.3.2.1 控制柜内关键零部件机械架构设计要求

7.3.2.1.1 概述

控制柜内关键零部件机械架构设计可参考 6.3.2, 还宜考虑 7.3.2.1.2。

7.3.2.1.2 控制柜内关键零部件壳体接地

为了让共模干扰(电流)就近流向大地, 避免共模电流流经产品内部 PCB 的工作地平面或扁平电缆等内部互连电缆, 控制柜壳体应有接地线或与地直接搭接。

7.3.2.2 控制柜内关键零部件电路板设计要求

控制柜内关键零部件电路板设计见第 9 章。

8 工业机器人本体

8.1 概述

工业机器人的本体电磁兼容设计需要考虑关键零部件系统集成的电磁兼容性,其电磁兼容要求见 8.2。

工业机器人的本体中伺服电机、编码器等关键零部件,应满足 8.3 的电磁兼容要求。

8.2 工业机器人本体系统电磁兼容设计

8.2.1 本体内屏蔽电缆屏蔽层连接

连接到本体的动力电缆、编码器的输入端口宜放置在靠近本体壳体处。

采用屏蔽电缆时,其屏蔽层在输入和输出端口处,应与接地的金属板或金属连接器外壳形成 360° 搭接。

8.2.2 本体内关键零部件接地

为使流经关键零部件的共模干扰(电流)就近流向大地,关键零部件接地要求如下:

- a) 零部件的壳体应就近与控制柜金属壳体低阻抗连接;
- b) 接地采用接地导体时,其长宽比应小于 $3:1$ 。

8.2.3 本体内电缆间串扰

本体内电缆之间宜进行串扰抑制处理,其措施方法如下:

- a) 线缆间宜尽可能远布线;
- b) 线缆间垂直布线;
- c) 相邻两条平行布置的线缆,至少其中有一条为屏蔽电缆。

8.2.4 本体系统地阻抗或壳体金属部件间阻抗

本体系统的地阻抗是一个完善的屏蔽体的各金属部件之间的阻抗,为满足本体壳体的屏蔽性能要求,应考虑如下内容:

- a) 本体各金属表面之间实现完整、连续的低阻抗搭接;
- b) 各金属体长宽比都小于 $5:1$;
- c) 本体壳体上孔缝的最大尺寸不能超过以下两种情况下的最小尺寸:
 - 1) 电路中有源器件的最大工作频率波长的 $1/100$;
 - 2) 当这个屏蔽体有共模干扰电流流经时,其孔缝小于 0.15 m 。

8.2.5 本体内线缆环路

电缆与参考地或大地组成的环路面积直接与电缆的辐射发射大小相关,环路面积越大辐射越大。同样,环路面积越大,也越容易耦合外部的电磁场,在电缆中感应较高的共模电压和共模电流。

本体内部电缆设计时,电缆与参考地或大地之间组成的环路面积应趋近于零。为满足以上要求,电缆宜靠近控制柜壳体走线。

8.3 本体内关键零部件电磁兼容设计要求

8.3.1 本体内关键零部件电磁兼容技术指标要求

对于购置的本体内关键零部件,工业机器人厂家宜采用设置电磁兼容指标的形式,对采购的关键零

部件的电磁兼容水平加以控制,其电磁兼容指标要求见表 5。

8.3.2 本体内关键零部件设计要求

8.3.2.1 本体内关键零部件机械架构设计要求

8.3.2.1.1 概述

控制柜内关键零部件机械架构设计可参考 6.3.2,还宜考虑 8.3.2.1.2。

8.3.2.1.2 本体内关键零部件壳体接地

为了让共模干扰(电流)就近流向大地,避免共模电流流经产品内部 PCB 的工作地平面或扁平电缆等内部互连电缆,因此机器人本体应有接地线或与地直接搭接。

8.3.2.2 本体内关键零部件电路板设计

本体内关键零部件的电路板设计见第 9 章。

9 工业机器人的 PCB 电磁兼容设计

9.1 概述

PCB 的 EMC 设计可分为电路原理图设计和 PCB 布局布线设计。

一份 EMC 性能良好的电路原理图可明确识别以下各个电路部分并在 PCB 布局布线时分区设计:

- A 区域:电路中易被外部干扰注入或产生电磁发射的信号线和元器件,包括 PCB 连接器中的信号延伸至电缆部分的导体,如电源端口的电路,通信端口的电路,其他输入输出电路;
- B 区域:PCB 中易被电磁干扰的信号和元器件是电路中比较特殊的部分,通常是极其敏感的电路,会引起 EMS 问题而需做特殊处理,如复位电路、低电压/低电流检测电路、低电压模拟电路和高输入阻抗电路等;
- C 区域:PCB 中易产生电磁发射干扰的信号和元器件,是电路中比较特殊的部分,通常会引起 EMI 问题而需做特殊处理,如时钟信号、PWM 信号、晶振及其他周期信号;
- D 区域:电路中既不容易受到干扰也不会产生 EMI 噪声的信号线和元器件,如,为实现隔离功能的器件,包括光耦、磁耦、变压器、继电器等。

PCB 布局布线的 EMC 设计通过使得 PCB 完整地平面的阻抗最小化、不同类型的信号线之间无非期望的串扰发生、信号层和电源边缘包地处理以防止边缘效应等措施来实现的。

9.2 基于 PCB 原理图部分的电磁兼容设计

9.2.1 PCB 中 A 区域电磁兼容设计

PCB 中 A 区域的电磁兼容设计是:

- a) 若其中电路相连的 I/O 电缆为非屏蔽线,那么这些信号端口处应具有滤波电容;
- b) 当端口需要通过浪涌测试时,还应增加对应等级的浪涌保护电路;
- c) 一般不准许这类电路直接延伸到芯片端口。

注:滤波电容不能影响信号质量。

滤波与防护电路是介于 A 区域与 D 区域之间的,也是为了保护 D 区域电路,使其不受外界干扰的影响。

滤波与防护电路的电磁兼容设计要求:

- a) 端口信号线或敏感信号/电路上滤波在不影响信号质量的情况下,通常采用 1 nF~100 nF 范围内的电容。当不能使用电容滤波时,建议使用共模电感。如果后一级电路电平在 10 mV 以

下,则采用 LC,RC 或多级滤波。

b) 具有开关电源的电源端口采用 EMI 滤波。

表 6 是金属壳体及带接地线塑胶壳体产品电源端口 EMI 抑制推荐滤波电路,表 7 是塑料壳体产品电源端口 EMI 滤波电路理想模型。

表 6 金属壳体及带接地线塑胶壳体产品电源端口 EMI 抑制推荐滤波电路

电源类型	电压/V	电源 0 V 是否接机壳	滤波模型	参数
DC	12~24	是	C_X-L_{DM}	LC 谐振点小于 50 kHz
		否	$C_X-CMC-C_Y$	共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 50 kHz
	24~60	是	C_X-L_{DM}	LC 谐振点小于 40 kHz
		否	$C_X-CMC-C_Y$	共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 50 kHz
	60~100	否		共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 20 kHz
	100~400	否		共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 17 kHz
>400	否	共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 15 kHz		
AC	110~220	否		共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 20 kHz
	380	否	共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 17 kHz	
	>380	否	共模和差模滤波电路 LC 谐振点小于 15 kHz	

注:滤波电路可以采用单独的滤波器,安装在 PCB 外部,如控制柜电源入口处。

表 7 塑料壳体产品电源端口 EMI 滤波电路理想模型

电源类型	电压/V	滤波模型	参数
DC	12~24	C_X-CMC	$C_X \geq 22 \text{ nF}, CMC > 1 \text{ mH}$
	24~60		$C_X \geq 470 \text{ nF}, CMC > 5 \text{ mH}$
	60~100		$C_X \geq 0.1 \mu\text{F}, CMC > 10 \text{ mH}$
	100~200		$C_X \geq 0.1 \mu\text{F}, CMC > 30 \text{ mH}$
	>200		$C_X \geq 0.1 \mu\text{F}, CMC > 30 \text{ mH}$
AC	110~220	$C_X \geq 0.1 \mu\text{F}, CMC > 10 \text{ mH}$	
	380	$C_X \geq 0.1 \mu\text{F}, CMC > 20 \text{ mH}$	
	>380	$C_X > 1 \mu\text{F}, CMC > 30 \text{ mH}$	

9.2.2 PCB 中 B 区域和 C 区域电磁兼容设计

9.2.2.1 B 区域电磁兼容设计

PCB 中 B 区域的电磁兼容设计要求是对以下敏感信号线/电路进行电容滤波：

- a) 高输入阻抗的信号线；
- b) 低电平模拟信号线；
- c) 外部中断信号线；
- d) 复位信号线。

9.2.2.2 C 区域电磁兼容设计

PCB 中 C 区域的电磁兼容设计要求是：

- a) 芯片电源应进行去耦，去耦的要求如下：
 - 1) 芯片的每个电源管腿至少有一个去耦电容；
 - 2) PWM 功率电路供电电源的电源与地之间至少有一个去耦电容；
 - 3) 去耦电容的大小通常由器件的工作频率决定。当频率小于 20 MHz，采用 0.1 μF 的去耦电容，主频超过 20 MHz 的电路中，采用 0.01 μF （甚至 0.001 μF ）的去耦电容。
- b) 时钟线、高速信号线、PWM 信号线等其他周期信号线采取的串扰防止的方法，可采用包地处理的方式进行处理。
- c) 此类区域电路同时也是 A 区域电路时，则连接的电缆需要进行屏蔽处理。

注：PCB 中数字电路内部芯片的电源管腿与 PCB 的电源网络之间的电路及 PCB 中 PWM 功率电路供电电源的电源与地之间（如开关电源中的储能电容）的电路通常具有去耦作用。

9.2.3 PCB 中 D 区域电磁兼容设计

PCB 中 D 区域内悬空的金属、一端与电路相连另一端悬空的信号线或线缆应进行直接接地或通过电阻接地处理，未用到的元器件（如多组封装器件中未用的与非门、二极管、LED 等）引脚输入端直接或通过电阻接电源或接地，输出端悬空不连接。

9.2.4 PCB 中隔离电路电磁兼容设计

当隔离器件（如光耦、变压器、继电器）存在时，隔离电路电磁兼容设计要求如下：

- a) 被分割在主电路之外的地平面需要通过 Y 电容旁路到地，不应有悬空的地平面。特别是 I/O 端口被隔离的地平面，如光耦、变压器、继电器隔离的地。Y 电容容值范围为 1 nF~10 nF。
- b) 隔离的 AC/DC 或 DC/DC 开关电源的初级 0 V 与次级所有的地之间需要接 Y 电容。

注：虽然该 Y 电容在抑止 EMI 方面取得很好的效果，但是由于该电容的存在必然会导致外界共模电流通过该电容进入变压器次级，这一点值得注意。（变压器初次级间的寄生电容已经足够大，也会使外界的共模干扰电流进入变压器次级）尽管如此，没有特殊原因该电容宜保留。

9.3 PCB 布局布线电磁兼容设计

9.3.1 PCB 布线

良好的布线会防止 PCB 中不同区域之间可能存在串扰的影响。

串扰防止是有效降低各类电路之间的干扰信号通过寄生电容或电感传递的有效方法，PCB 中各区域电路之间的串扰防止的需求见表 8。

表 8 不同区域电路之间的串扰防止要求

类型	A	B	C	D
A	不需要	不涉及	需要	需要
B	不涉及	不需要	不涉及	不涉及
C	需要	不涉及	不需要	需要
D	需要	不涉及	需要	不需要

PCB 中不同区域防止串扰的方法如下：

- a) 印制线间距离在 5 mm 以上；
- b) 相邻层之间垂直布线；
- c) 带 0 V 地平面，并印制线之间插入屏蔽地线，并将屏蔽地线用多个过孔与地平面互连；
- d) 不同层之间有地平面隔离。

9.3.2 PCB 布层

PCB 布局设计也认为是地平面设计的一部分，PCB 层叠的理想模型按层数分，有如下几种：

- a) 四层 PCB 板层的层叠排布设计见表 9，其中优选方案 1，可用方案 3；
- b) 六层 PCB 板层的层叠排布设计见表 10，其中优选方案 3，可用方案 1，备用方案 2、4。

表 9 四层 PCB 板层的层排布方式

方案	电源层数	地层数	信号层数	1	2	3	4
1	1	1	2	S	G	P	S
2	1	1	2	G	S	S	P
3	1	1	2	S	P	G	S

注：方案 1 为四层 PCB 的首选层置方案，在元件面下有一地平面，关键信号优选布第一层。

表 10 六层 PCB 板层的层排布方式

方案	电源	地	信号	1	2	3	4	5	6
1	1	1	4	S1	G	S2	S3	P	S4
2	1	1	4	S1	S2	G	P	S3	S4
3	1	2	3	S1	G1	S2	P	G2	S3
4	1	2	3	S1	G1	S2	G2	P	S3

从 EMC 方面考虑，除非 2 层板也能设计出较为完整地平面，否则最好采用带有地层和电源层的 4 层以上的 PCB 板。2 层板通常地平面很难设计完整。如果使用 2 层板，那么工程师要特别注意地平面的设计。

注：实践证明，4 层板与 2 层板相比，4 层板能取得高于 2 层板 100% 的 EMC 性能（注意：4 层板以上，并非层数越多越好）。

其他情况下，PCB 布局需考虑：

- a) 元件面下面（第二层）为地平面，提供器件屏蔽层以及为顶层布线提供参考平面；

- b) 所有信号层尽可能与地平面相邻；
- c) 尽量避免两信号层直接相邻；
- d) 主电源尽可能与其对应地相邻；
- e) 层厚设置,满足阻抗控制的前提下越薄越好。

9.3.3 PCB 中地平面电磁兼容设计

PCB 完整的地平面将降低地阻抗。完整地平面意味着一块没有任何过孔、开槽、裂缝长宽比小于 3 的 PCB 铜箔。PCB 中地平面应考虑：

- a) PCB 具有地平面；
- b) 以下几个区域电路还需要有完整的地平面：
 - 1) PWM 信号线和时钟线下方；
 - 2) 端口上的滤波器电容、芯片去耦电容、旁路电容与地之间的互连线。

9.3.4 信号层和电源层的边缘处理

PCB 板边缘的印制线或电源线会与 PCB 板之外的参考地之间形成较大的寄生电容,造成额外的共模回路,PCB 中信号层和电源层应考虑：

- a) 信号层和电源层在 PCB 边缘增加屏蔽地线或铺铜；
- b) 时钟线、PWM 线等周期高速信号线不应布线在 PCB 板的地层边缘；
- c) 敏感信号/电路不应布线在 PCB 板边缘。

10 证实方法

10.1 电磁兼容性测试方法

应用本标准进行电磁兼容设计的工业机器人,其电磁兼容设计结果可参考工业机器人电磁兼容测试结果,测试方法见 GB/T 38326 和 GB/T 38336。

10.2 设计过程记录

工业机器人 EMC 设计过程及结果记录在设计文档中,该文档应至少包括以下内容：

- 工业机器人的品牌、规格、型号等产品相关信息；
- 采用的设计要素；
- 设计要素在产品中的体现形式；
- 本标准进行了规定但在产品设计中未考虑的要素及其原因；
- 设计过程中的其他相关记录,如所采用的设计要素的变更等；
- 电磁兼容设计的结果(可以是具体的测试结果)。

附录 A

(资料性附录)

工业机器人 EMC 设计的关键要素

A.1 概述

工业机器人通常由示教器、控制柜、机器人本体和连接线缆构成,其 EMC 设计一般应考虑电磁骚扰源、电磁耦合路径及电磁敏感部件三项关键要素。

A.2 工业机器人电磁骚扰源

工业机器人电磁骚扰源主要是高频信号或非线性结构的电子电气零部件,其中高频信号主要由控制电路、驱动电路和通信电路等产生,电子电气零部件主要包含上位机、电机、示教器和供电电源等。

A.3 工业机器人电磁耦合路径

工业机器人电磁耦合路径包括两种模式:传导耦合和辐射耦合。

传导耦合是指一个设备中电压/电流变化通过电源线缆、信号线缆及其他导电结构传导并影响其他设备的耦合模式。如,工业机器人通过电源线对交流电网的干扰。

辐射耦合是指通过空间传播,并对其他设备电路产生电压/电流变化的耦合模式。如,工业机器人伺服系统对无线通信产生的干扰。

当骚扰源频率较低时,主要通过传导方式进行耦合;但骚扰源频率较高时,则主要以辐射方式对外发射。

瞬态骚扰,主要包括各类快速脉冲瞬变、各类浪涌、静电放电等,它既有可能通过传导方式传递,也有可能通过辐射方式传递。

A.4 工业机器人敏感部件

工业机器人敏感部件包括:电机驱动电路、控制电路、通信电路、示教器、传感器等。

参 考 文 献

- [1] GB/T 7343—2017 无源 EMC 滤波器件抑制特性的测量方法
-