



人形机器人的 EMC 电磁兼容

EMC (Electromagnetic Compatibility) of Humanoid Robots

- 一、人形机器人电源架构 (48 V/24 V/多母线)
- 二、关节驱动 EMC 问题
- 三、执行器设计与功率器件选型
- 四、通讯网络 (Ether CAT/CAN FD)

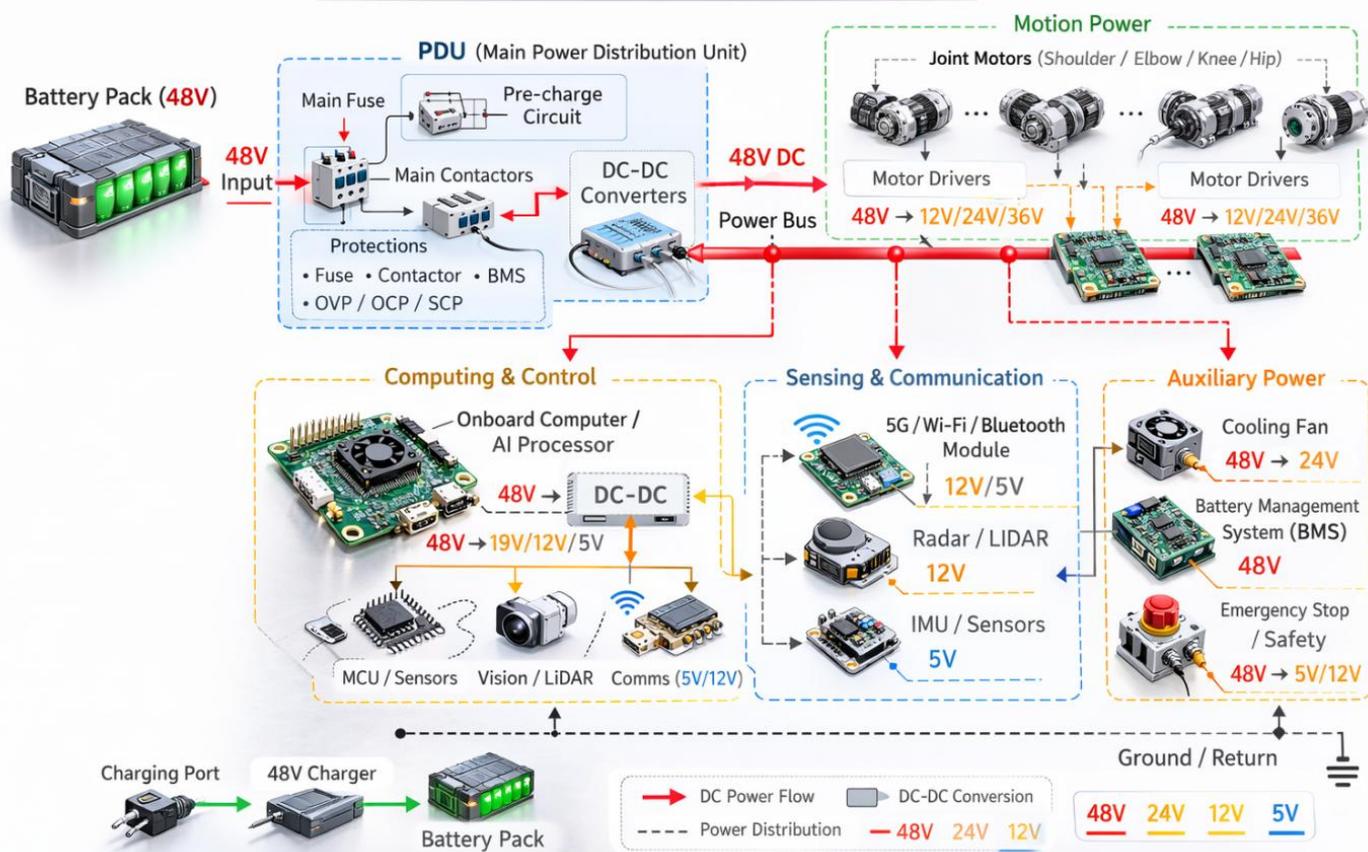
第一部份：关于电源架构

1.1、人形机器人电源架构的本质目标

- 高功率密度（驱动关节）
- 高效率（续航受限）
- 低噪声（传感器与计算）
- 安全（人体接触）



Humanoid Robot Power Architecture



1.2、为什么普遍选 48V？目前人形机器人行业最常见电压等级的原因：

- 原因 1：在安全电压范围内（SELV 上限附近）
- 原因 2：功率密度高
- 原因 3：电流相对可控
- 原因 4：与电池系统匹配

1.3、电源架构设计的关键技术

技术点 1	母线阻抗控制，尤其是 48V 影响电机瞬态电流和影响稳定性
技术点 2	能量回馈处理，关节减速时再生能量回灌母线，需要电池吸收、制动电阻、超级电容
技术点 3	EMI 管理，最大干扰源、电机逆变器、需要共模路径设计、分区接地
技术点 4	安全隔离，部分系统会将动力与控制隔离、防止故障传播
经验功率占比	执行器 60~80% 计算 10~20% 传感器 5~10% 其它 5%

人形机器人采用 48 V/24 V/低压多母线架构，本质是为了在高功率驱动与低噪声控制之间实现能量与电磁环境的分区管理

1.4、电源部份人形机器人 48V 动力母线 /24V 系统母线的 TVS 选型

1. TVS 在电源口通常承担两类任务（可同时存在）：

钳位外部瞬态：线束耦合、热插拔、电机/继电器断开尖峰、ESD/EFT 间接耦合

吸收母线再生尖峰：执行器减速回馈导致母线抬升，这是机器人/伺服系统里很常见的源头

注：如果系统存在回馈尖峰，TVS 很容易从“保护器件”变成“热耗散器件”并过热失效



2. TVS 选择的原则

第一：VRWM 必须高于正常最高电压

第二：48V 母线：别把它当“恒定 48V”，这样计算

$VRWM \geq V_{BUS, MAX} \times (1 + \text{裕量})$	裕量工程上常取 5% - 15%
$V_{BUS, MAX}$	48 V 系统的电池组可能是 13S/14S 锂电或其他方案，充满电压、充电策略、允许过冲都不同

第三：钳位电压 VCLAMP 要保护“最脆弱的下游器件”，而不是追求越低越好

1	保护的通常是 DC/DC 输入、驱动器母线电容、MOSFET/IGBT、采样/计量前端等
2	这些器件的耐压往往高于母线不少
3	如果你把钳位设得太低：TVS 会频繁导通 → 发热 → 早死
误区	很多人选 TVS 会犯一个错：越低越安全，电源母线不是这样

第四：只看峰值功率 P_{ppm}，重点看脉冲波形与你的实际能量

1	规格书标称的 P _{ppm} (比如 600W/1500W/5000W) **通常对应 10/1000 μs 或类似波形
2	实际系统里的瞬态可能是：热插拔：更短、更尖（寄生电感主导）、电机回馈：可能更长、更频繁（母线电容与控制策略主导）
音特经验	如果是偶发外部瞬态：P _{ppm} 通常能工作；如果是频繁回馈尖峰：要看重复脉冲能力、结温上升、平均功耗，仅靠 P _{ppm} 很可能误判

第五：引线电感 L_{par} 才决定“真实钳位”、动态电阻 R_{dyn}，系统里你看到的“残压”常常比 datasheet 大，原因主要是：

$R_{dyn} \approx \frac{\Delta V}{\Delta I}$	TVS 的动态电阻 R _{dyn} 本质上是某个工作区间内的斜率
$V(I) \approx VC + (I-IPP) \cdot R_{dyn}$	在钳位区附近，把曲线当成一条近似直线来用
$V_{real}(t) \approx V_{TVS}(I(t)) + L_{loop} \frac{dI}{dt}$	这里 L _{loop} 是整个回路（走线 + 焊盘 + 地回路 + 连接器）的电感，不是只有 TVS 引线电感

1.5、NR5.0SMDJ58CA 专为机器人电源设计
Maximum Ratings (TA=25°C unless otherwise noted)

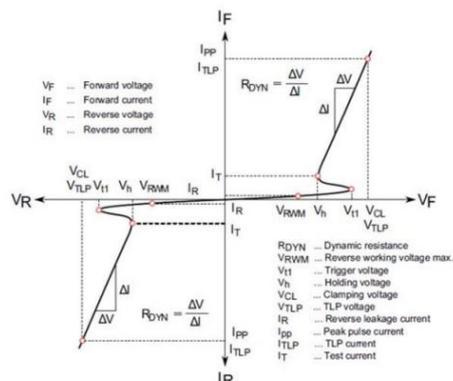
Parameter	Symbol	Value	Unit
Peak power dissipation with a 10/1000μs waveform ¹	P _{PK}	5000	Watts
Steady State Power Dissipation @ TL = 75 °C	P _D	6.5	Watts
Operating Temperature Range	T _J	-55 to +150	°C
Storage Temperature Range	T _{STG}	-55 to +150	°C

Note:

1. Non-repetitive current pulse per Fig.4 and derated above TA= 25 °C per Fig.1
2. Measured on 8.3 ms single half sine-wave or equivalent square wave, duty cycle = 4 pulses per minute maximum

Electrical Characteristics (TA = 25 °C unless otherwise noted)

Part Number (Bi)	Marking Bi	Reverse Stand off Voltage V _R (Volts)	Breakdown Voltage V _{BR} (Volts)@I _T		Test Current I _T (mA)	Maximum Reverse Leakage I _R @ V _R (μA)	Maximum Peak Pulse Current I _{pp} (A)	Maximum Clamping Voltage V _C @ I _{pp} (V)	I _{sp} (A)	VC (A)
			Min .V	Max .V						
NR5.0SMDJ58CA	NR5BG	58	64.40	71.20	1	2	53.50	70	1000	85



第二部份：关节驱动 EMC 问题

2.1、分析思路

1. 噪声从哪来 → 走哪条路 → 变成什么问题 → 怎么压下去

a. 关节驱动 EMC 的本质：高 dv/dt 与高 di/dt 的“共模电流管理”

b. 关节驱动，无论 BLDC/PMSM、FOC、SVPWM 都会产生，高 dv/dt ：开关节点电压快速跳变几十 V/ns 到更高；高 di/dt 相电流脉动与开关环路尖峰

c. 噪声源：最“脏”的两个地方

A. 半桥开关节点 (SW node)	MOSFET/IGBT 的 C_{oss} 、反向恢复、寄生电感导致尖峰与振铃，这是 dv/dt 的源头
B. 功率回路与母线回路	半桥—母线电容—半桥 的高频电流环路面积决定了 di/dt 尖峰母线电容 ESR/ESL、布局、回路电感会决定尖峰有多高
音特经验	开关节点决定“产生多少共模电压”，回路布局决定“产生多少共模电流”

2. 3 条电流路耦合路径

路径 1	开关节点 → 寄生电容 → 机壳/结构件/人体 → 回到电源	电机绕组、散热器、铜箔、屏蔽层对地电容都会把 dv/dt 转成共模电流
路径 2	电机电缆 → 共模电流 → 整机线束/地 → 通讯/传感器	三相线束像“共模天线”，辐射与串扰都很强
路径 3	母线回路 → 地弹噪声 (ground bounce) → 低压电子系统	驱动开关瞬态把 0V 参考抬起来，造成 MCU/DSP/传感器，看见假的电压

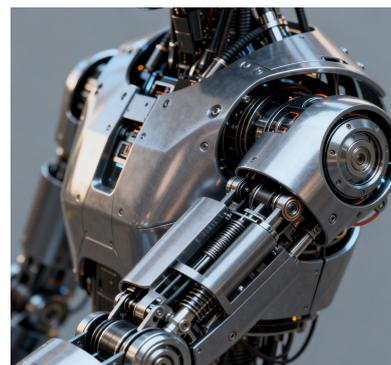
2. 机器人或调试终端会看到现象

通讯： CAN/CAN-FD/EtherCAT 偶发丢帧、CRC 错、掉线重连

控制： 编码器毛刺、零位漂、FOC 失步、扭矩抖动

系统： MCU 复位、DC/DC 抖动、传感器读数跳变

测试： 辐射超标、传导超标、EFT 时功能失效，尤其是线束耦合



2.2、解决策略“三板斧”

斧一：源头把尖峰变软，目标是降低 dv/dt 、降低振铃能量，而不是靠末端硬扛，常用手段：

门极电阻/分段开关速度（必要时分开 turn-on/turn-off 电阻）

RC Snubber /RCD 吸收（针对特定振铃频率）

优化母线电容组合：低 ESL 薄膜/陶瓷靠近半桥 + 足够能量的电解/聚合物在稍远处

最小化功率环路面积：这条往往比“换更贵器件”更管用

经验小结：如果在示波器上看到“高频振铃很大”，先别急着加滤波器，80% 是回路 + 吸收网络的问题

斧二：关牢共模电流笼子，目的是不要让它跑到整机地与线束上；给共模电流一条低阻、短回路的回家路，别让它在板和线束里乱找回路

电机侧共模电感/共模扼流圈，对共模有效，对差模影响较小

屏蔽电机电缆+ 360 度端接，端接方式比“有没有屏蔽”更关键

Y 电容/泄放路径设计，把高频共模电流导回你希望的参考点——通常是机壳地/PE/“干净的”回路

驱动功率地与信号地分区加单点/受控连接避免让开关电流流经信号参考

斧三：保护通讯/传感/电源等模块，源头与路径都做了，剩下的再做“免疫力”：

通讯口共模电感/CMC、TVS、隔离（必要时）、参考地策略：

编码器/传感：差分传输、屏蔽、滤波、供电 LDO/ π 滤波；

低压电源输入 π 滤波、布局隔离、PGND/AGND 管控、DC/DC 的热插拔/欠压复位策略

第三部份：执行器设计与功率器件选型

3.1 关节执行器讲究“力矩密度+可控性+热管理”的综合最优，人形机器人关节最难的不是“能转”，而是高力矩密度（单位体积/重量输出）、高带宽力矩控制（可回驱、柔顺、安全）、高效率（续航）可量产一致性（摩擦、齿隙、噪声、温漂）、EMC 可控（不把整机搞死机）功率器件选型必须服务于这些目标，而不是只看 $R_{ds(on)}$ 最小

3.2、关节执行器三条路线

3.2.1 低速大扭矩：电机 + 减速器（谐波/行星）+ FOC

优点：成熟、成本可控

难点：摩擦、齿隙、冲击、热堆积

功率器件关键：效率和 $dv/dt/di/dt$ 可控 + 可靠性

3.2.2 直驱/低减速：高阶对数电机 + 高电流控制

优点：可回驱、顺从性强

难点：电流大、铜损大、驱动更难

功率器件关键：导通损耗 (R_{ds}) + 封装电阻/电感（寄生）+ 热阻

3.2.3 串联弹性/力控执行器（SEA/TSA）：传动中引入弹性

优点：力控好、抗冲击

难点：控制复杂、能量往返更频繁

功率器件关键：反向能量处理、SOA、吸能路径设计



3.3 三相六管逆变器 48V 母线，多数关节驱动是三相桥加 FOC；

电机相电流峰值：看关节等级从几十到上百安，PWM 常见 10 - 40kHz，而高频更安静但损耗更大；

MOS 耐压决定 60V/80V/100V MOSFET 是主战场，SiC 通常不划算，GaN 要看电压裕量和成本。

3.4 MOS 选择通用指标， V_{ds} 额定电压是要按“母线最高 + 尖峰 + 裕量”定，而不是按 48V 工程上你要留出，母线抬压（回灌）+ 布局寄生尖峰；

如果母线最高可能到约 60V 附近，且布局尖峰控制得一般：80V MOSFET 会非常紧；

更稳健的量产选择通常会走向 100V，代价是 R_{ds} 更大、 Q_g/C_{oss} 可能更大

注：音特电子的 NR5.0SMDJ58CA 等 NR 系列产品，在母线入口设计，会显著帮助把 V_{ds} 风险压下来，这就是它在机器人好用的一个现实原因

3.5 三元锂的母线电压范围，满充电压 $4.2V \times 13 = 54.6V$ ，标称电压 $3.7 \times 13 = 48.1V$ ；

假如电池 SOC 接近满电，BM 在低温/满电/保护策略下，限充/不允许回充；

没有制动电阻或有源吸能情况下，母线就会被电容冲上去，导致 V_{ds} 压力大

第四部份：人形机器人内部通讯网络 Ether CAT 和 CAN FD

整机可靠性的“神经系统”，也是 EMC 问题最容易显现的地方

层级	常用总线	作用	常用 EMC 组合
关节实时控制	Ether CAT	硬实时闭环	CMLA3225A-510T, NRES DLC24VAPBETH
子系统控制	CAN FD	状态/控制	CMLA3225A-101T、ESDCANFD24VAPB
低速设备	UART / SPI / I ² C	传感器	ESDULC5V0D8B、ESD0524P

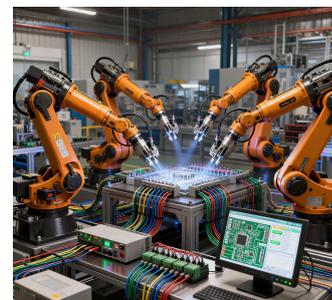
4.1 众所周知 Ether CAT：实时控制主干，技术本质是一种基于标准以太网物理层，但采用“on-the-fly”帧处理，也就是帧在经过每个节点时直接被硬件处理，不存储转发；在机器人里的典型用途是关节驱动同步控制，力矩/位置闭环，IMU 高速数据等等；日常说的“运动控制总线”

EMC 关注点，Ether CAT 的问题通常不是协议，而是物理层关键风险

共模噪声 → PHY 误码

地电位差 → 变压器饱和

屏蔽不当 → 辐射



4.2 CAN FD 控制与状态网络，这种协议大家就比较熟悉，优点就是更高数据速率，数据段可到几 Mbps，更长帧，同样强抗干扰，在机器人里的典型用途：

电源/BMS、传感器模块、辅助执行器、安全系统，总之就是机器人的管理与状态网络

EMC 关注点，共模电流进入通信物理层，来源主要电机驱动 dv/dt 、电源地弹噪声、长线束耦合

4.3 音特电子团队预测人形机器人的通讯方向，EtherCAT 逐步向 TSN 以太网融合，未来就是光纤通信，它有很高的抗 EMI 性能



公司总部(华东地区)

中国上海市松江区广富林东路 199 号启迪漕河泾(中山)科技园水木园 9 幢 4 层

Floor 4, No.9 Building,Tus-Caohejing (Zhongshan) Science Park No.199,East Guangfulin Road Songjiang District, Shanghai, China

Tel: +86-21-22817269

Fax:+86-21-67689607

Email: sales@yint.com.cn



音特技术研究院

中国上海市松江工业区车墩镇柳亭路 188 弄财富兴园·国际企业园 35 号 101 栋

No.101 Building, No.35 Fortune Zone International Office Park,No.188Lane, Maoting Road.

Chedun Town, Songjiang District,Shanghai,China



工厂地址

安徽省芜湖市湾沚区科创二路 17 号

No.17 Kechuang 2nd Road,Wanzhi District,Wuhu,Anhui Province,China

华北地区

北京市昌平区黄平路 19 号院龙旗广场 D 座 10 层 1001 室

Room 1001,10/F,Building D,No.19 Longqi Plaza, Huangping Road,Changping

District,Beijing

电话: 013661308320

传真: 010-63364844

邮箱: sales@yint.com.cn

西南地区

重庆市南岸区同景路 5 号同景国际广场 A2 栋 23-1

Room 23-1,Building A2,Tongjing International Plaza,No.5 Tongjing

Road,Chayuan Area,Nanan District,Chongqing

电话: 023-62948995 ; 13101384835

传真: 023-62937530

邮箱: cq@yint.com.cn

Office in Poland

ul. Rdestowa 53d, 81-577 Gdynia, Poland

phone: +48 58 622-89-00

E-mail: maritex@maritex.com.pl

aktywne@maritex.com.pl