

ICS 43.040

CCS T 35



团体标准

T/CEATEC XXX—2025

新能源车用电机控制器(MCU)电磁兼容性(EMC)设计指南

New energy vehicle motor controller (MCU) electromagnetic compatibility

(EMC) design guidelines

(征求意见稿)

2025-X-XX 发布

2025-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 EMC 设计总则	2
4.1 设计目标	2
4.2 设计原则	2
4.3 设计流程	2
5 硬件 EMC 设计	2
5.1 接地设计	2
5.2 滤波设计	2
5.3 屏蔽设计	3
5.4 布线设计	3
5.5 器件选型	3
6 软件 EMC 设计	4
6.1 信号处理抗干扰设计	4
6.2 控制逻辑优化设计	4
6.3 通信接口抗干扰设计	4
6.4 故障处理与容错设计	4
7 EMC 测试与验证	4
7.1 测试环境要求	4
7.2 核心测试项目及要​​求	5
7.3 测试结果判定	5
8 EMC 整改与优化	5
8.1 干扰源定位方法	5
8.2 典型不合格项整改措施	5
8.3 整改后验证	6

前言

本文件按照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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

新能源车用电机控制器 (MCU) 电磁兼容性 (EMC) 设计指南

1 范围

本文件规定了新能源车用电机控制器（以下简称“MCU”）电磁兼容性设计的EMC设计总则、硬件EMC设计、软件EMC设计、EMC测试与验证、EMC整改与优化。

本文件适用于新能源汽车用交流异步电机、永磁同步电机控制器的EMC设计、研发、生产及验证。

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/T 5993 电子设备用固定电容器 第4部分：分规范 固体和非固体电解质铝电容器
- GB/T 6346.14 电子设备用固定电容器 第14部分：分规范 抑制电源电磁干扰用固定电容器
- GB/T 17619 机动车电子电器组件的电磁辐射抗扰性限值和测量方法
- GB/Z 17626.1 电磁兼容 试验和测量技术 第1部分：抗扰度试验总论
- 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 第3部分：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 17702 电力电子电容器
- GB/T 18655 车辆、船和内燃机 无线电骚扰特性 用于保护车载接收机的限值和测量方法
- GB/T 18802.11 低压电涌保护器（SPD） 第11部分：低压电源系统的电涌保护器 性能要求和试验方法
- GB/T 19951 道路车辆 电气/电子部件对静电放电抗扰性的试验方法
- GB/T 21437.2 道路车辆 电气/电子部件对传导和耦合引起的电骚扰试验方法 第2部分：沿电源线的电瞬态传导发射和抗扰性
- GB/T 28046.1 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第1部分：一般规定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电机控制器 motor control unit, MCU

接收整车控制器指令，控制电机按照既定工况运行的电力电子装置，主要包含功率模块、控制单元、驱动电路、检测电路等核心部件。

3.2

电磁兼容性 electromagnetic compatibility, EMC

设备或系统在其电磁环境中能正常工作，且不对该环境中的其他设备或系统造成不可接受的电磁骚扰的能力，包含电磁骚扰（EMI）和电磁抗扰度（EMS）两个方面。

3.3

电磁骚扰 electromagnetic interference , EMI

任何可能引起装置、设备或系统性能降低，或者对生物、无生命物体产生不良影响的电磁现象。

3.4

电磁抗扰度 electromagnetic susceptibility , EMS

设备或系统在电磁环境中抵抗电磁骚扰，保持其正常工作性能的能力。

4 EMC 设计总则

4.1 设计目标

MCU的电磁发射指标应符合GB/T 19951、GB/T 18655的限值要求；电磁抗扰度指标应满足GB/T 17626。

1、GB/T 21437.2的测试等级要求，在车载电磁环境中无功能失效、数据错误或性能下降。

4.2 设计原则

4.2.1 源头抑制

从电磁骚扰产生的根源进行控制，如优化功率器件开关特性、减小电路谐波干扰。

4.2.2 路径阻断

通过滤波、屏蔽、接地等方式，阻断电磁骚扰的传导和辐射路径。

4.2.3 敏感防护

对MCU内部敏感电路（如ADC采样、CAN通信、主控芯片）采取针对性防护措施，提升抗干扰能力。

4.2.4 软硬结合

硬件设计为EMC防护基础，软件设计作为补充，实现电磁兼容性能的优化。

4.3 设计流程

4.3.1 需求分析

根据整车EMC要求，确定MCU的EMC指标限值和测试等级。

4.3.2 方案设计

结合MCU硬件架构和软件逻辑，制定EMC整体设计方案，包括硬件防护和软件抗干扰设计。

4.3.3 样件验证

制作MCU样件，开展EMC初测，验证设计方案的有效性。

4.3.4 优化整改

针对初测不合格项，分析干扰源和传播路径，进行软硬件优化整改。

4.3.5 定型验证

完成整改后开展EMC定型测试，确保指标全部符合要求。

5 硬件 EMC 设计

5.1 接地设计

5.1.1 MCU应采用单点接地为主、多点接地为辅的接地方式，低压控制模块单点接地阻值 $\leq 0.1 \Omega$ ，高压功率模块接地阻值 $\leq 0.05 \Omega$ 。

5.1.2 数字地、模拟地、功率地应独立设计，在电源端单点共地，共地节点与接地铜排的连接导线截面积 $\geq 4\text{mm}^2$ 。

5.1.3 屏蔽层接地采用360°全周接地，接地引线长度 $\leq \lambda/20$ （ λ 为对应频率的电磁波波长），高频段（ $\geq 30\text{MHz}$ ）接地引线长度 $\leq 50\text{mm}$ 。

5.2 滤波设计

滤波设计应覆盖电源端口、信号端口和高压功率端口，滤波元件选型应符合表1要求，所有滤波电路应靠近端口布置，减少骚扰信号的传导路径。

表1 MCU关键端口滤波元件选型参数

端口类型	滤波电路形式	核心元件	规格参数	参考标准
12V/24V 低压电源端	π 型滤波	共模电感	阻抗 $1k\ \Omega$ @100MHz, 额定电流 20A	GB/T 17702
		X 电容	$0.1\ \mu\text{F}$ /275VAC, 聚丙烯材质	GB/T 6346.14
		Y 电容	2.2nF /500VAC, 安规认证	GB/T 6346.14
CAN/LIN 信号端	差模滤波	共模扼流圈	阻抗 $800\ \Omega$ @80MHz, 额定电流 1A	GB/T 18655
		TVS 管	结电容 $<5\text{pF}$, 反向击穿电压 18V	GB/T 18802.11
300V~750V 高压直流端	LC 滤波	电感	$10\ \mu\text{H}$, 额定电流 100A, 磁芯材质铁硅铝	GB/T 5993
		电容	$1\ \mu\text{F}$ /1200VDC, 陶瓷叠层电容	GB/T 5993
三相交流输出端	差模滤波	吸收电容	$0.01\ \mu\text{F}$ /2000VDC, 无感电容	GB/T 5993
静电防护端口	瞬态抑制	TVS 管	瞬态功率 3kW, 接触放电 $\pm 8\text{kV}$	GB/T 17626.2
注: 1. 高压功率模块的IGBT/MOS管两端应并联RC吸收电路, 电阻取值 $10\ \Omega \sim 20\ \Omega$, 电容取值 $0.01\ \mu\text{F} \sim 0.1\ \mu\text{F}$, 抑制功率器件开关产生的尖峰电压; 2. ADC采样端口应增加RC低通滤波, 截止频率设置为采样频率的1/10, 减少高频骚扰对采样精度的影响。				

5.3 屏蔽设计

5.3.1 MCU外壳

应采用金属屏蔽体, 材质宜为铝合金, 厚度 $\geq 2\text{mm}$, 屏蔽体的屏蔽效能在30MHz~1GHz频段 $\geq 60\text{dB}$ 。

5.3.2 屏蔽体

拼接处采用导电胶密封, 搭接面接触电阻 $\leq 5\text{m}\ \Omega$, 屏蔽层覆盖率 $\geq 95\%$; 盖板与壳体之间增加导电弹片, 保证全周接触。

5.3.3 高压线束

采用金属编织网屏蔽, 编织密度 $\geq 90\%$, 屏蔽网两端分别与MCU外壳和电机外壳 360° 接地。

5.3.4 低压线束

采用镀锡铜丝屏蔽, 编织密度 $\geq 85\%$ 。

5.4 布线设计

5.4.1 高压铜排与低压信号线的间距 $\geq 50\text{mm}$, 高压电路与敏感电路(ADC、CAN)之间增加金属隔板, 隔板接地。

5.4.2 印刷电路板(PCB)设计中, 高压功率层与低压控制层的间距 $\geq 0.8\text{mm}$, PCB板厚 $\geq 1.6\text{mm}$, 接地层占比 $\geq 70\%$ 。

5.4.3 PWM驱动信号线采用差分布线, 线宽 $\geq 0.2\text{mm}$, 线间距 $\leq 0.1\text{mm}$, 特征阻抗控制在 $100\ \Omega \pm 10\%$; 模拟信号线避免与数字信号线平行布线, 交叉布线时采用 90° 交叉。

5.4.4 高压铜排采用短、粗、直的布线方式, 减少铜排长度和弯折, 降低电磁辐射, 铜排截面积根据额定电流选取, 电流密度 $\leq 4\text{A}/\text{mm}^2$ 。

5.5 器件选型

5.5.1 主控芯片、驱动芯片

应选用车规级器件, 工作温度 $-40^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$, 优先选用集成EMC防护功能的芯片。

5.5.2 功率器件（IGBT/MOS 管）

应选用低开关损耗、高 dv/dt 抑制的车规级产品， $dv/dt \leq 50V/ns$ ，减小开关过程中的电磁骚扰。

5.5.3 传感器（电流、电压、旋变）

应选用抗电磁干扰等级 $\geq 200V/m$ 的产品，输出信号为差分信号，提升抗扰能力。

6 软件 EMC 设计

6.1 信号处理抗干扰设计

应满足以下要求：

a) ADC采样采用多次采样平均法，采样次数选取8次或16次，剔除异常采样值（偏差超过平均值 $\pm 10\%$ ）；

b) 旋变信号解码时增加数字滤波算法，采用一阶低通滤波，滤波系数设置为0.8~0.95，抑制高频骚扰对转子位置检测的影响；

c) 对电压、电流信号进行阈值判断，设置合理的上下限阈值，当信号超出阈值时，触发信号失效保护，避免错误信号导致的控制失常。

6.2 控制逻辑优化设计

应满足以下要求：

a) PWM波生成时优化开关时序，设置死区时间 $2\mu s \sim 5\mu s$ ，根据功率器件的开关特性动态调整，避免上下桥臂同时导通，同时减小死区时间带来的波形畸变；

b) 采用变频PWM控制，将PWM开关频率在10kHz~20kHz范围内小幅跳变（ $\pm 1kHz$ ），降低固定频率的谐波辐射强度，跳变周期设置为10ms；

c) 电机启动和制动过程中，采用软启动、软制动策略，控制电流变化率 $di/dt \leq 50A/ms$ ，减小电流突变产生的电磁骚扰。

6.3 通信接口抗干扰设计

应满足以下要求：

a) CAN/LIN通信采用CRC校验+帧计数+重传机制，CRC校验采用16位校验码，帧计数连续判断，当帧丢失或校验错误时，触发重传，重传次数 ≤ 3 次；

b) 通信波特率根据传输距离优化，CAN总线波特率为500kbps时，传输距离 $\leq 10m$ ；波特率为250kbps时，传输距离 $\leq 20m$ ，减少信号衰减和干扰；

c) 通信空闲时，发送空闲帧填充，避免总线处于高阻抗状态，降低外界骚扰的耦合概率；对接收的通信数据进行有效性判断，剔除错误帧和无效帧。

6.4 故障处理与容错设计

应满足以下要求：

a) 引入独立看门狗定时器，喂狗周期 $\leq 100ms$ ，当MCU因电磁骚扰出现程序跑飞时，看门狗触发复位，复位时间 $\leq 10ms$ ，确保系统快速恢复；

b) 设置关键参数备份，将电机转速、扭矩、母线电压等关键参数实时备份到片内Flash，当数据丢失时，从Flash中读取备份数据，保证控制连续性；

c) 制定分级故障保护策略，根据电磁骚扰导致的故障程度，分别触发降功率运行、暂停输出、系统复位等保护动作，避免故障扩大。

7 EMC 测试与验证

7.1 测试环境要求

测试环境应符合GB/T 28046.1的规定，并满足以下要求：

a) 传导发射、静电放电、电快速瞬变脉冲群等测试在屏蔽室中进行，屏蔽室的屏蔽效能 $\geq 80dB$ （30MHz~1GHz）；

b) 辐射发射、辐射抗扰度测试在3m法全电波暗室中进行，暗室归一化场地衰减(NSA)偏差 $\leq \pm 3$ dB，背景噪声比测试限值低10dB以上；

c) 测试电源采用线性稳压电源，电压波动 $\leq \pm 1\%$ ，纹波系数 $\leq 0.1\%$ ，避免测试电源引入额外骚扰。

7.2 核心测试项目及技术要求

EMC 核心测试项目及技术要求见表 2。

表 2 EMC 核心测试项目及技术要求

测试项目	测试频段/等级	合格判据	参考标准
电源端传导发射	150kHz~30MHz， 准峰值检测	$\leq 66\text{dB } \mu\text{V}$ (150kHz~5MHz)； $\leq 60\text{dB } \mu\text{V}$ (5MHz~30MHz)	GB/T 17626.6
辐射发射	30MHz~1GHz，电场强度	$\leq 30\text{dB } \mu\text{V/m}$ (3m法，垂直/水平极化)	GB/T 18655
静电放电抗扰度	接触放电 $\pm 8\text{kV}$ ， 空气放电 $\pm 15\text{kV}$	无功能失效、数据错误，测试后正常工作	GB/T 17626.2 /GB/T 19951
电快速瞬变脉冲群抗扰度	电源端 $\pm 2\text{kV}$ ， 信号端 $\pm 1\text{kV}$ ，5kHz	无通信中断、采样偏差 $\leq 5\%$	GB/T 17626.4
浪涌抗扰度	电源端 $\pm 2\text{kV}$ (差模)， $\pm 4\text{kV}$ (共模)	无器件损坏、系统不复位	GB/T 17626.5
沿电源线电瞬态传导	脉冲 3a: -150V ， 脉冲 5b: $+87\text{V}$	复位次数 ≤ 1 次/1000次测试	GB/T 21437.2
辐射抗扰度	20MHz~6GHz，200V/m	无功能失效，CAN 通信误码率 $\leq 10^{-6}$	GB/T 17619/GB/T 17626.3

7.3 测试结果判定

应按以下要求进行判定：

- 所有测试项目的指标均满足表2要求，且测试后MCU进行功能测试无异常，判定为EMC合格；
- 若单项指标超标但未导致MCU功能失效，可进行针对性整改后重新测试；
- 若测试中出现器件损坏、系统崩溃、功能永久失效，判定为EMC不合格，应重新优化设计方案。

8 EMC 整改与优化

8.1 干扰源定位方法

应按照以下方法进行：

- 采用频谱分析仪结合电流探头、电场探头，检测骚扰信号的频率、幅值和发射位置，确定干扰源（如功率器件开关、PWM 驱动电路、高压铜排）；
- 通过断开法逐步断开MCU的各模块，观察骚扰信号的变化，定位具体的骚扰产生模块；
- 对敏感电路进行信号监测，通过示波器捕捉干扰信号的时域和频域特征，确定敏感点和干扰耦合方式。

8.2 典型不合格项整改措施

8.2.1 传导发射超标

增加电源端滤波电路的阶数，更换高阻抗共模电感，优化滤波元件的布局，确保滤波电路靠近端口；对高压功率端口增加RC吸收电路，减小尖峰骚扰。

8.2.2 辐射发射超标

优化高压铜排的布线，增加屏蔽罩或屏蔽隔板，缩短高频骚扰的辐射路径；调整PWM开关频率或采用变频PWM，降低谐波辐射强度。

8.2.3 通信接口抗扰度不合格

在信号端增加共模扼流圈和TVS管，优化通信软件的校验和重传机制，降低通信误码率；对通信线束进行屏蔽处理，确保屏蔽层可靠接地。

8.2.4 静电放电失效

在静电敏感端口增加ESD防护器件，优化PCB板的接地设计，增加静电放电的泄放路径；软件中增加静电放电后的复位和数据恢复机制。

8.3 整改后验证

整改完成后，应对MCU重新开展全项目EMC测试，确保所有指标均符合要求；同时进行整车级联调测试，验证MCU与整车其他电子设备的电磁兼容性能，无相互干扰。