

扫地机器人回充场景下 电源模块静电冲击解决方案

Electrostatic discharge (ESD) solution for power modules in robot vacuum cleaner recharging scenarios

围绕塑料外壳·毛皮地毯环境积电·隔离电源耦合·共模电感跨绕组
GDT 方案的工程化整理



文档定位: 技术分析文章 / 客户交流资料 / 内部培训底稿

核心结论: 问题本质不是常规 CE 传导,而是“带电机身回充瞬间”的异常静电耦合与前端器件过应力

方案概述: 在共模电感两组绕组两端跨接 GDT,重构瞬态能量路径;其效果取决于位置、动作时序、桥堆承压方式与整机结构

一、痛点与应用场景

1.1 为什么扫地机器人在“回充瞬间”更容易出问题

扫地机器人通常采用塑料外壳,长期运行于毛皮、地毯、纤维、干燥空气等易起电环境。机身表面、轮组、风道、刷体以及与外壳邻近的低压系统会逐步积累静电电荷;在自由运行时,整机往往处于悬浮带电状态,缺少稳定泄放路径。

一旦机器人返回充电座,新的金属接触与新的电位参考同时建立,积累电荷会在极短时间内寻找泄放回路。此时失效并不一定出现在低压端,而可能经隔离电源的寄生耦合传递到原边,最终表现为整流桥、主开关 MOS、PWM 控制芯片等前端器件损伤。

因此,该问题不能简单归为“EMI 不良”或“桥堆选型不足”,更准确的定义应为:回充工况下的异常静电冲击、原副边寄生耦合以及前端器件瞬态过应力问题。

1.2 典型痛点

痛点	工程表现
积电来源复杂	毛皮 / 地毯 / 纤维摩擦、塑料外壳、轮胎与地面摩擦、气流与粉尘摩擦共同造成机身积电
触发时刻特殊	不是持续运行时出问题,而是回充接触瞬间出问题
失效位置前移	整流桥、桥后高压母线、主开关 MOS、SMPS 控制芯片首先受害
传统 EMI 网络不足	Y 电容、X 电容、NTC、共模电感能够改善 CE,却未必能承受该类异常放电场景
整改难点	波形上升沿极快、路径混合了导通与寄生耦合,既像共模又会转化成差模或桥臂不对称应力

1.3 电路背景示意

下图分别表示“未加 GDT 的前端结构”和“在共模电感两组绕组两端跨接 GDT 的结构”;它们是理解后续分析的最关键图示:

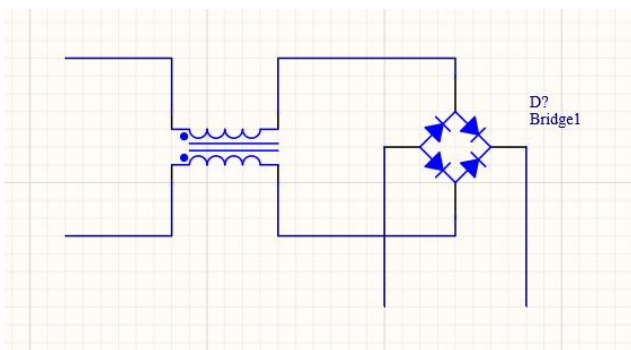


图 1 未加 GDT 的共模电感 + 整流桥前端示意

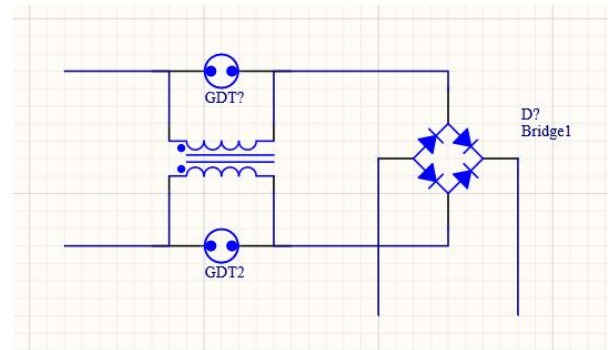


图 2 在共模电感两组绕组两端跨接 GDT 的示意

二、分析过程与理论依据

2.1 机理总览：不是单一“电流直通”，而是“积电 - 耦合 - 重分布 - 泄放”的复合过程

从工程角度看, 回充瞬间的异常过程至少包含四步:

- (1) 机身与低压侧先带高电位
- (2) 次级参考系统电位骤变
- (3) 通过变压器原副边寄生电容向原边注入位移电流
- (4) 原边高压回路、桥堆、母线、MOS 与控制芯片共同参与电位重分布与泄放

2.2 关键理论一：寄生电容耦合电流

隔离变压器对直流和工频是隔离的, 但对高 dv/dt 的静电脉冲并不是绝对屏障。若原副边存在寄生电容 C_p , 则位移电流近似满足:

$$I_d = C_p \cdot dv/dt$$

dv/dt 越大, 即使 C_p 很小, 耦合到原边的位移电流也可能非常可观

2.3 关键理论二：电感两端电压与瞬态前后端压差

对任一绕组在时间变化过程中满足 $V_L = L \cdot di/dt$ 。静电脉冲不是稳态工频, 而是极快的瞬态; 当某一侧节点先被拉高而另一侧尚未同步时, 绕组前后端会建立显著的瞬时压差。未加 GDT 时, 这一压差没有就地旁路路径, 会继续逼迫桥堆和桥后母线参与重分布

2.4 关键理论三：整流桥的失效不只看平均电流

桥堆失效更常由瞬时峰值电压、峰值脉冲电流、桥臂不对称导通、 dV/dt 和 dI/dt 过快引发, 而不是由平均工作电流决定, 可用脉冲能量的概念粗略表示:

$$E_p \approx \int v(t) \cdot i(t) dt$$

当桥堆承担的不是正常整流波形, 而是异常高压、极陡前沿、极短时宽的放电脉冲时, 即使总电荷量不大, 也可能导致桥臂局部雪崩或瞬时过流损伤。

2.5 结合实际电源原理图的观察

下图为实际离线反激电源局部。红圈区域表明: 整流桥、高压母线、电源控制芯片 U1、主开关 MOS Q1 处于同一高压敏感链路, 是回充异常静电冲击下最容易受损的区域。

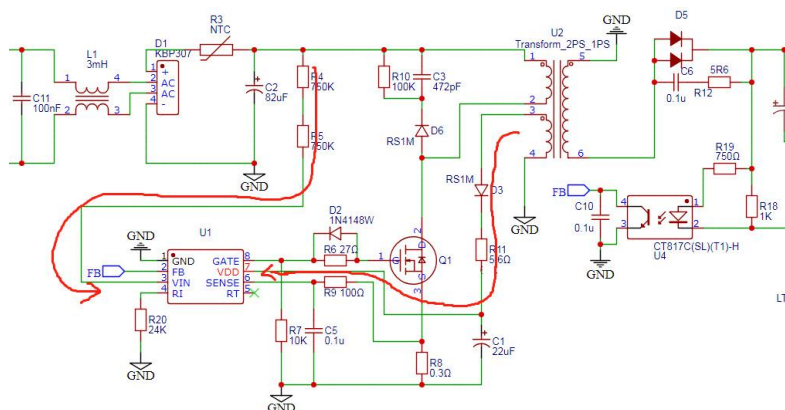


图 3 实际离线反激电源原理图 (红圈为重点敏感区域, 电路仅作技术研讨)



工程提示：不要把该问题理解为“某一条线直接把静电打进桥堆”，更准确的理解是：机身积电先作用于次级/低压参考系统，再经寄生电容耦合到原边，随后在整流桥、母线、MOS 与控制器之间发生瞬态重分布。

三、解决方案：共模电感跨绕组 GDT 方案

3.1 方案定义

在共模电感两组绕组两端分别跨接一颗 GDT：即 1-4 脚之间并联一颗，2-3 脚之间并联一颗。该方案不是“对地泄放”，也不是简单的“线间钳位”，而是针对共模电感绕组前后端异常压差的跨接式保护方案。

3.2 方案的真实作用

GDT 不是理想导线，而是击穿触发型气体放电器件，当两端电压达到动作阈值时，内部气体被击穿，形成等离子体放电通道，并在放电过程中产生闪光、热耗散及导通压降；因此 GDT 既会重构瞬态电流路径，也会消耗与转移一部分脉冲能量。

3.3 设计边界

GDT 是否真正起保护作用，取决于安装位置、击穿电压、冲击波形、桥堆承压方式、走线环路与外部充电系统参考路径；它并不是“加上必然更安全”的万能器件。若放置位置不当，也可能把原本由电感拖住的冲击更快地送到桥堆前端。

3.4 未加 GDT 与加 GDT 的区别

比较项	未加 GDT	加 GDT（跨绕组）
绕组前后端压差	压差容易被拉高，主要靠后级器件与寄生网络共同分担	压差达到阈值后，GDT 先击穿，限制绕组前后端继续抬升
能量处理方式	系统被动承受，桥堆与母线更易卷入	部分能量在 GDT 放电过程中被转移和耗散
桥堆承压特点	桥堆更可能承担原始尖峰	桥堆所见波形可能被削弱，也可能因位置不当而遭遇更陡冲击；需实测验证
工程含义	天然结构更简单，但缺少专门放电点	方案更主动，但必须关注击穿时序、走线环路和桥堆实际波形

四、泄放路径与效果

4.1 建议采用“分段路径”来理解

- 第 1 步：毛皮/地毯/塑料外壳摩擦，机身与低压参考系统逐步积电
- 第 2 步：机器人回充，充电触点接触，悬浮带电状态被打破，新的电位参考建立
- 第 3 步：异常电位首先作用于次级/低压侧，尤其是变压器 U2 次级 5、6 脚所对应的低压参考区域
- 第 4 步：由于变压器原副边存在寄生电容，次级高 dv/dt 瞬态以位移电流形式耦合到原边
- 第 5 步：原边高压系统被抬动，Q1 漏极、桥后母线、整流桥与控制器共同参与瞬态重分布
- 第 6 步：若跨绕组 GDT 动作，则在共模电感前后端建立新的放电点，改变原有泄放链路与波形形态

效果判断原则：评价方案优劣，不能只看“电流有没有经过整流桥”，而要看桥堆所承受的峰值过压、峰值脉冲电流、 dV/dt 、 dI/dt 、桥臂是否不对称导通，以及 GDT 是否把能量引到了更合适的位置

4.2 对实际测试结果的解释建议

如果实测中发现“加 GDT 后桥堆更容易坏”，并不矛盾，说明在该真实波形和实物参数下，GDT 可能旁路了共模电感对高频瞬态的缓冲作用，使桥堆更快、更猛地暴露在冲击前沿之下。

反之，如果加 GDT 后桥堆更稳定，则可理解为：

GDT 在该位置首先吃掉了更危险的绕组前后端压差，

并把部分脉冲能量提前泄掉或改写了波形。

因此，最终判断必须以实测波形和样机失效结果为准，

理论分析的价值在于帮助识别路径、解释现象、优化器件位置，而不是替代测试。



4.3 推荐的验证量测点

序号	建议量测点	目的
1	共模电感前端与后端节点	观察绕组前后端压差是否被 GDT 限制
2	GDT 两端电压与动作时序	确认是否击穿、何时击穿、击穿后残压如何
3	桥堆 AC 两脚波形	判断桥堆是否被更快前沿直接拉动
4	桥堆+/-两端及母线电容	观察桥后母线是否出现异常抬升与冲击充电
5	MOS 漏极、Gate、控制器 VDD	确认桥后高压冲击是否继续传到原边开关链路

4.4 GDT 参数

Part Number	DC Spark-over Voltage	Lmpulse Life Test	Minimum Insulation Resistance		Maximum Capacitance	Nominal Impulse Discharge Current	Impulse Discharge Voltage
	100V/s (V)	Times(8/20 us 100A)	Test Voltage(v)	(GΩ)	1MHz (pF)	8/20us	10/700uS(± 5 Times)
GDT/SMD1812-071	75+30%	300	50	1	0.5	2KA	4KV
GDT/SMD1812-091	90+30%	300	50	1	0.5	2KA	4KV
GDT/SMD1812-121	120+30%	300	50	1	0.5	2KA	4KV
GDT/SMD1812-151	150+30%	300	50	1	0.5	2KA	4KV
GDT/SMD1812-201	200+30%	300	100	1	0.5	2KA	4KV
GDT/SMD1812-231	230+30%	300	100	1	0.5	2KA	4KV

五、结论

- 1) 扫地机器人该类问题的核心痛点,是“塑料外壳 + 易起电工况 + 回充瞬间建立新参考”的复合场景,不宜简单归结为普通 CE 问题
- 2) 隔离变压器对工频与直流是隔离的,但对高 dv/dt 静电脉冲并非绝对屏障;原副边寄生电容是必须正视的耦合通道
- 3) 跨绕组 GDT 方案的本质,不是单纯增加一条通道,而是在击穿、发光、耗能的同时重构瞬态能量路径;它可能保护桥堆,也可能在位置不当时把桥堆暴露在更猛的前沿下
- 4) 真正的工程判断标准,应当是:桥堆与原边关键器件所见的峰值电压、峰值脉冲电流、 dV/dt 、 dI/dt 是否下降,而不是只看某条路径是否“还经过桥堆”



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



音特技术研究院

中国上海市松江工业区车墩镇泖亭路 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