

电动汽车PTC传导干扰噪声的预测与抑制

黄才源 胡安琪

(福建理工大学,福州 350118)

【欢迎引用】黄才源,胡安琪.电动汽车PTC传导干扰噪声的预测与抑制[J].汽车文摘,2025(4):56-62.

【Cite this paper】HUANG C Y, HU A Q. Prediction and Suppression of PTC Conducted Interference Noise in Electric Vehicles[J]. Automotive Digest (Chinese), 2025(4): 56-62.

【摘要】针对开关电源DC/DC变换器工作时产生的强烈的电磁干扰(EMI),提出并分析了DC/DC变换器的电磁干扰源,构建了该变换器产生EMI的传播路径,对比分析了纯电路和有印刷电路板(PCB)影响下的传导干扰,提出了添加II型滤波器抑制DC/DC变换器电磁干扰的措施,并应用CST软件建模仿真,对抑制结果进行验证,提出的抑制方法可有效抑制开关电源电磁干扰。

关键词:电动汽车PTC;开关电源;传导干扰

中图分类号:U469.72+2 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20240049

Prediction and Suppression of PTC Conducted Interference Noise in Electric Vehicles

Huang Caiyuan, Hu Anqi

(Fujian University of Science and Technology, Fuzhou 350118)

【Abstract】Aiming at the Electromagnetic Interference (EMI) caused by DC/DC converter in switching power supply, the electromagnetic interference source of DC/DC converter is proposed and analyzed, and the EMI propagation path generated by the converter is constructed. The conducted interference under the influence of pure circuit and Printed Circuit Board (PCB) is compared and analyzed, and the measures of adding II filter to suppress the electromagnetic interference of DC/DC converters are proposed, and the simulation of CST software is used to verify the suppression results. The results show that the suppression method proposed in this paper can effectively suppress the electromagnetic interference of switching power supply.

Key words: Electric vehicle PTC, Switching power supply, Conducted interference

0 引言

随着电动化成为汽车行业的发展趋势,其电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)问题愈发受到关注。然而,当前工程上解决电动汽车电气设备EMC问题的方法大多停留在现场测试与整改阶段,对于印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)电磁干扰的仿真分析与预测尚未广泛应用于工程实际问题中。电动汽车正温度系数(Positive Temperature Coefficient, PTC)加热器的开关电源通常采用DC/DC反激式降压变换器,这种拓扑结构因结构简单、功率转换效率高而被广泛应用于汽车电子领域。近年来,针对DC/DC变换器的分析建模及噪声抑制方面研究成果丰硕。江心怡^[1]

基于软开关技术解析了DC/DC开关电源的电磁兼容原理,并提出了抑制措施,并分析了有关研究现状和发展趋势。汪晓文^[2]从开关电源自身特性出发,设计了一种输入滤波器,对抑制差模干扰和共模干扰的影响给出了定性分析,并提出了滤波器参数设计优化方案。Dalal等^[3]研究了开关电源中元器件的寄生参数对开关电源传导干扰幅值的影响,使开关电源电磁干扰预测模型更接近实际。王建渊^[4]提出的通过减小寄生电容进行共模抑制的方法,对于解决逆变器EMC设计及逆变器共模干扰问题具有实际指导意义。

为了解决电动汽车PTC产生电磁干扰的问题,本文采用CST软件建立了PCB加热器开关电源工作时开关电源的电路模型,分析电磁干扰产生的机理,探

究对比有无PCB板对传导发射干扰幅值的影响。在干扰源前级添加 Π 型滤波器,通过仿真验证有PCB板时干扰源频谱特性的差异以及滤波器的滤波效果,旨在为电动汽车电气设备的电磁兼容设计提供理论支持和实际指导,推动电磁干扰仿真分析从理论研究向工程实际应用的转化。

1 PTC开关电源电磁干扰源分析

电动汽车PTC开关电源的DC/DC降压模块结构简单,通过控制电路使功率开关器件周期性地开通和关断,对输入电压进行脉冲调制,从而完成电压变换,并实现输出电压的可调性和自动稳压功能^[5]。本研究中,该模块的主要器件包括金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET),输出整流二极管和隔离变压器,以上器件均是电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)问题的主要干扰源^[6]。

1.1 MOS开关管的干扰

MOS开关管在高速开关循环状态下,其电压变化率(du/dt)和电流变化率(di/dt)会随开关动作快速变化。在开关管断开瞬间,由于电路中电流的突变,变压器原边会产生一个较大的感应电压,以阻碍电流的迅速变化。这个感应电压以浪涌的形式反馈到开关管上,从而在开关管两端形成电压尖峰,电压尖峰波形如图1所示。

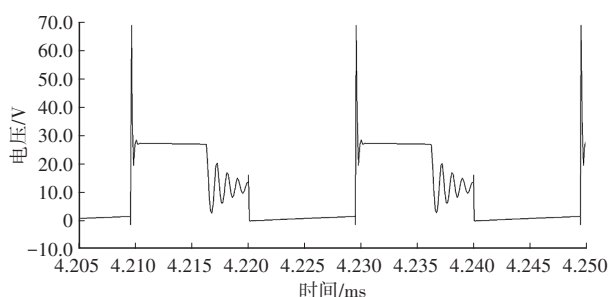


图1 开关管工作电压波形

在高频工作的开关电源中,功率开关管的寄生电容与变压器初级线圈的漏感以及布线中的引线电感共同作用,形成LC谐振电路,导致开关电压波形出现振荡波动。如如图1所示,振荡波形分为2段:第1段振荡由初级线圈的漏感与开关管输出端的寄生电容谐振引起,第2段振荡是由初级线圈的励磁电感与开关管输出的寄生电容谐振产生。振荡变化的电压和电流波形必然会产生电磁干扰。

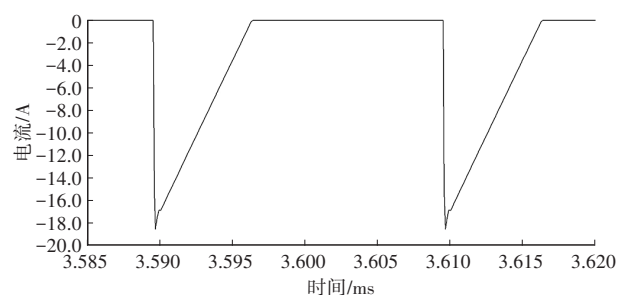
从电路机理分析,功率开关器件既是电场耦合噪声的来源,也是磁场耦合噪声的来源。一方面,开关

器件的寄生电容与电路中的分布参数相互作用,形成电场耦合噪声;另一方面,开关器件在高速开关过程中产生的瞬态电流与变压器线圈的耦合作用,会引发磁场耦合噪声。因此,开关电源在高频工作时的电磁干扰问题需要从电场和磁场耦合两方面综合考虑,并采取有效的抑制措施。

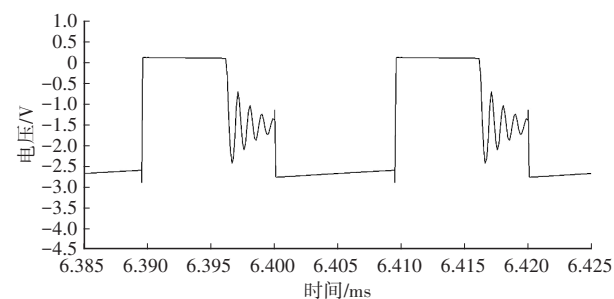
1.2 输出整流二极管的干扰

当功率二极管从导通状态变为截止状态时,由于关断时间很短,容易产生反向电流浪涌。由于反向恢复电流迅速降为0,电流变化率(di/dt)非常大,其电流波形如图2a所示。二极管在反向电流降为零后应完全关断,此时反向电流仅为漏电流。然而,由于PN结的特性,正向电流降低为0后,反向电流会持续增大,直至达到反向峰值电流。这个反向峰值电流会对电路中的寄生电感和电容进行充放电,从而产生反向尖峰电压和寄生振荡。输出整流二极管的寄生参数与电路中走线寄生电感、变压器的二次侧漏感以及器件引线电感等参数相互作用,产生高电压变化率(du/dt)的振荡,其电压波形如图2b所示。因此,电路中的输出整流二极管不仅是电场耦合噪声的主要来源,还可能通过其快速变化的电压和电流对周围电路产生电磁干扰。

总结来说,输出整流二极管在关断过程中产生的反向恢复电流和寄生振荡,使其成为电路中电场耦合噪声的重要干扰源。



(a)整流二极管反向电流波形



(b)整流二极管工作电压波形

图2 整流二极管工作波形

1.3 隔离变压器的干扰

在PTC加热器的DC/DC功率变换器中,需要将

12 V 低压变换成 5 V, 以供给高压侧的微控制单元 (Microcontroller Unit, MCU) 使用。因此, 为了实现低压侧与高压侧的电气隔离, 必须采用隔离变压器进行电压转换。由于 PTC 加热器的开关电源工作在高频条件下, 隔离变压器在高频工作时会因其自身的寄生参数 (如漏感、分布电容等) 引发谐振现象^[8]。为了深入分析这一现象, 建立了隔离变压器的高频等效模型, 如图 3 所示。该模型能够帮助研究变压器在高频工作时的谐振特性及其对电路性能的影响。

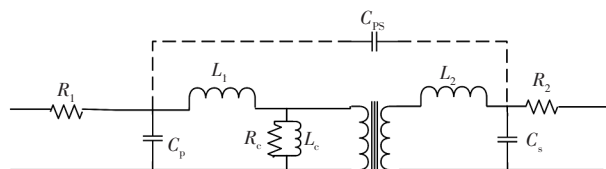


图3 高频变压器模型

图 3 中, C_p 、 C_s 分别表示变压器绕组原边、副边的寄生电容; C_{ps} 表示原/副边间寄生电容; R_1 、 R_2 、 R_c 分别代表原边、副边、磁芯的阻抗; L_1 、 L_2 表示变压器绕组原边、副边的漏感; L_c 表示励磁电感。

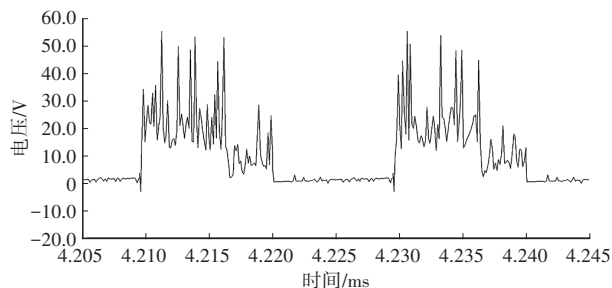
隔离变压器的一次侧漏感是高频干扰的最主要原因。由于漏感无法耦合到二次侧, 且缺乏低阻抗通路, 因此变压器一次侧漏感和 MOS 管输出端的等效电容会形成谐振。此外, 一次侧漏感还与变压器一次线圈绕制过程中产生的寄生电容 C_p 产生谐振。一次侧漏感 L_1 和寄生电容 C_p 共同作用, 会产生高电压。同时, 在电路能量耗尽后, 励磁电感 L_c 和原/副边间寄生电容 C_{ps} 之间的振荡也会引发谐振。这些谐振现象导致电压波形出现多次振荡, 如图 4a 所示。电压的高频振荡变化是隔离变压器产生 EMI 的主要原因。

变压器的漏感及其他电感参数会随着开关器件的高速循环而快速变化, 其对应的电流变化率 (di/dt) 也会高速循环变化, 原/副边绕组的电流都会存在 di/dt , 并相互形成交变电流。通过仿真可知, 变压器原边绕组的电流会出现尖峰和波动, 如图 4b 所示。根据电磁感应定律, 交变电流会在电路中产生交变磁场, 因此变压器成为电路中磁场耦合噪声的主要来源。这种磁场耦合噪声会进一步影响电路的稳定性和电磁兼容性。

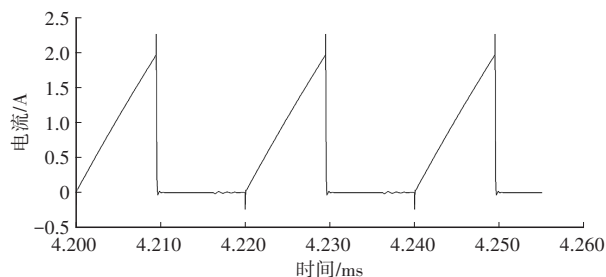
2 PTC 开关电源干扰路径分析

对于噪声源而言, 信号总是需要返回其源头, 因此建立信号源的等效回流路径是分析噪声问题的关键。干扰分为差模干扰和共模干扰: 差模干扰是指信号线与回流线之间的噪声, 通常由电路内部的电流环路引起; 而共模干扰则是指信号线与地线之间的噪

声, 通常由外部电磁场或不对称的电路结构引起。只有明确干扰是通过差模路径还是共模路径产生的, 才能有针对性地快速找到抑制干扰的方法^[7]。



(a) 变压器原边绕组电压波形



(b) 变压器原边绕组电流波形

图4 变压器波形

2.1 差模干扰路径分析

通过在 DC/DC 变换器中引入线路阻抗稳定网络模块 (Line Impedance Stabilization Network, LISN), 可以建立差模电流信号的传递路径, 如图 5 所示。

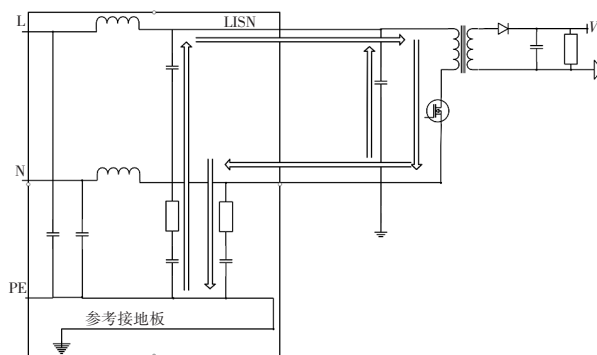


图5 差模干扰路径

差模干扰成分主要通过 2 条路径传播: 第 1 条路径, 差模干扰源从变压器原边和 MOS 管处产生, 流经电源负极, 进入 LISN 的接收电阻, 并被接收机检测到。随后, 干扰电流通过正极通路返回到干扰源, 形成完整的差模干扰回路。第 2 条路径, 由输入滤波电容提供了差模路径。干扰电流直接从近端的滤波电容回到干扰源, 而未经过 LISN。因此, 这部分差模干扰不会被 LISN 捕获, 也不会被转化为整个电路的差模干扰。

根据分析可知, 差模干扰的传播路径是从干扰源发出, 通过连接线缆的正负极间流通。根据电磁干扰

的三要素(干扰源、传播路径和敏感设备),只要切断其中任一要素即可有效解决电磁干扰问题。针对差模干扰的第1条路径,可以在正负极输入端口处添加差模滤波元件或增大变压器的励磁电感的电感值来提高阻抗,从而减小差模电流的幅值,达到降低差模干扰的目的。对于差模干扰的第2条路径,可以通过减小输入滤波电容的阻抗,使更多的差模电流成分通过输入滤波电容,而不是通过LISN。这样,LISN检测到的差模电流会显著减少,从而有效降低差模干扰的幅值。通过上述方法,可以有针对性地抑制差模干扰,提升电路的电磁兼容性。

2.2 共模干扰路径分析

在电路中,除了差模噪声引起的干扰外,共模噪声也是导致噪声超标的主要原因。共模噪声通常更加隐蔽,且对电磁兼容性的影响更为显著。在开关电源中,功率开关管工作在高频通断状态,将产生大量的热量,因此需要加载散热器进行散热。由于散热器与开关管之间存在平板电容效应,形成了寄生电容 C_{p3} ,这为共模噪声信号提供了一个流向地网络的通道。基于共模噪声信号返回其源头的思路,可以建立共模电流信号的传递路径,如图6所示。

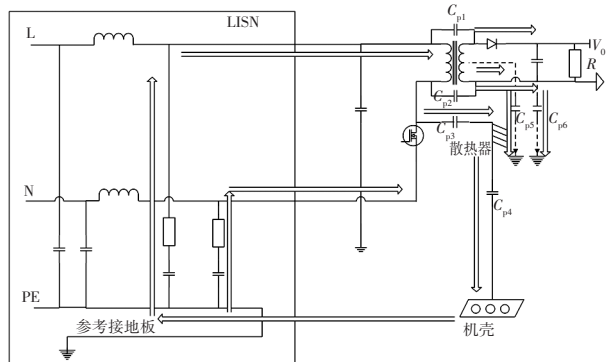


图6 共模干扰路径

共模电流路径的分析需要考虑电路中的寄生参数效应。在导线之间、线缆之间、变压器的一次侧与二次侧之间、变压器绕组之间以及导线与参考地之间都存在寄生电容,而寄生电容是导致EMC问题的主要原因。

在PTC的反激隔离DC/DC变换器上,共模噪声路径通过以下4条路径传播:

(1)第1条路径:噪声从开关器件通过分布电容 C_{p3} 耦合到散热器,散热器通过寄生电容 C_{p4} 与机壳相连,机壳通过接地通路进入LISN,最后返回到开关管,形成共模回路。

(2)第2条路径:变压器的次级绕组通过分布电容 C_{p5} 进入地,再进入LISN,最后返回到变压器原边绕

组,形成共模回路。

(3)第3条路径:噪声从隔离变压器的原边线圈通过分布电容 C_{p2} 耦合到次级绕组,再通过电路零点位点和地分布电容 C_{p6} 进入地,随后进入LISN,最后返回到变压器原边绕组,形成共模回路。

(4)第4条路径:噪声从隔离变压器的原边线圈通过分布电容 C_{p1} 耦合到次级绕组,经过整流二极管和输出电容通过分布电容 C_{p6} 进入地,再进入LISN,最后返回到变压器原边绕组,形成共模回路。

以上分析表明,共模噪声的传播路径主要通过电路中的寄生参数(如分布电容和寄生电感)形成回路。因此,PTC开关电源在高频工作时,由寄生参数引起的共模干扰是导致电磁干扰的主要原因。通过干扰传播路径有效抑制共模干扰,从而降低电磁干扰的影响,是一种直接且有效的电磁干扰解决方案。

3 DC/DC 仿真回路搭建与分析

3.1 纯电路传导干扰仿真

在CST仿真软件中,建立了PTC的DC/DC变换器仿真电路,如图7所示。为了便于分析,在电源输入端加入了LISN,并在LISN的正负极之间分别设置了 $50\ \Omega$ 的接收电阻。MOS管输入的PWM信号使用脉冲波形电压源,同时在CST软件中添加了额外的等效端口脉冲电压信号源以模拟实际工作条件。此外,MOS管、隔离变压器和输出整流二极管导入包含寄生参数的SPICE模型,以确保仿真结果能够准确反映实际电路的高频特性。

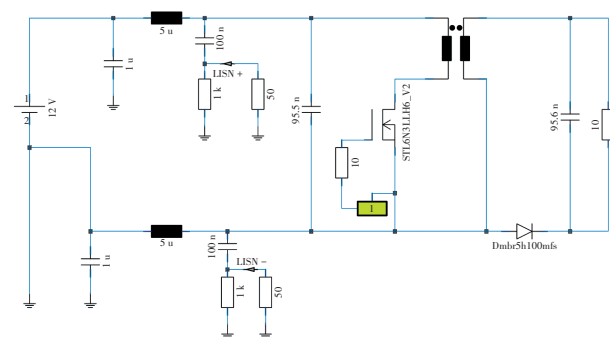


图7 纯电路传导干扰仿真

该电路的输入电压为电动汽车低压系统提供的12V直流电压,输出端并联2个 $10\ \Omega$ 的电阻作为负载。电路采用脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)的矩形脉冲电压信号源来驱动MOS开关管的通断。脉冲电压信号源的具体参数设置如表1所示,其频率由脉冲周期决定,设定周期为 $2.049\ \mu\text{s}$,对应的开关频率为488 kHz。

表1 激励设置

信号类型	信号参数
激励波形	脉冲方波
激励源	电压源
初始电压 V_{init}/V	0
脉冲电压 V_{pulse}/V	3
延迟时间 $T_{delay}/\mu s$	0
上升时间 $T_{rise}/\mu s$	0.1
下降时间 $T_{fall}/\mu s$	0.1
导通时间 $T_{hold}/\mu s$	0.9
周期 $T_{total}/\mu s$	2.049
信号频率/kHz	488

通过仿真运行瞬态分析,测得输入和输出电压波形如图8所示。当电路达到稳定状态后,输入电压约为11.5 V,符合电路工作要求;输出电压约为5 V,能够为PTC电路上的芯片提供稳定的供电。仿真结果表明,该电路能够实现稳定的降压功能,满足设计要求,同时也具备了进一步分析传导干扰(Conducted Interference)的前提条件。

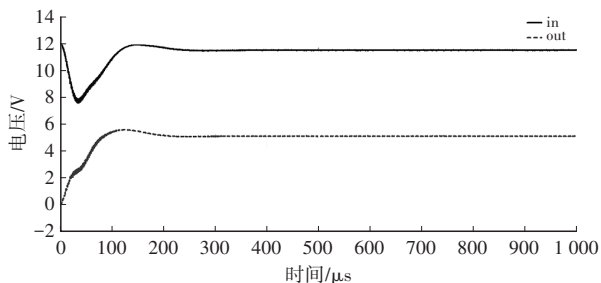


图8 输入输出电压波形

为了评价DC/DC变换器中的传导耦合干扰,采用线性阻抗稳定网络即LISN进行传导干扰测试。不管是差模干扰还是共模干扰,都通过差模电流和共模电流流经LISN到接收机,通过计算机分析得出传导干扰的频谱图。共模和差模电流的计算公式为:

$$I_{CM} = (I_L + I_N)/2 \quad (1)$$

$$I_{DM} = (I_L - I_N)/2 \quad (2)$$

式中: I_{CM} 为共模电流, I_{DM} 为差模电流, I_L 为流经火线上的电流, I_N 为流经零线上的电流。

由欧姆定律,推导得共模和差模干扰电压为:

$$U_{CM} = 50I_{CM} = (U_1 + U_2)/2 \quad (3)$$

$$U_{DM} = 50I_{DM} = (U_1 - U_2)/2 \quad (4)$$

式中: U_{CM} 为共模电压, U_{DM} 为差模电压, U_1 为流经LISN正极的电压, U_2 为流经LISN负极的电压。

在CST中设置瞬态仿真任务,对传导干扰电压法进行仿真,结果如图9所示。

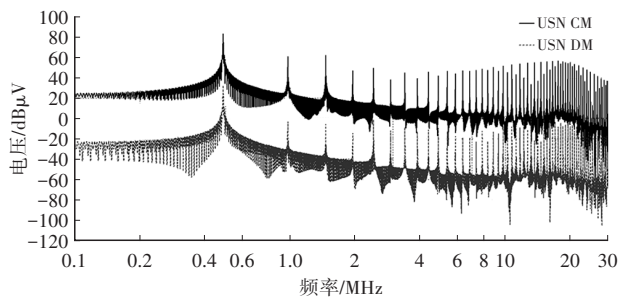


图9 纯电路传导干扰仿真结果

图9显示了PTC开关电源的工作回路在0.1~30 MHz频段内的共模干扰和差模干扰分布情况。实线代表共模干扰幅值,虚线代表差模干扰幅值,由图9可看出,共模干扰的幅值明显高于差模干扰,仿真结果符合理论公式。因此,针对传导干扰超标的问题,应主要从共模干扰回路入手,采取有效的措施来降低电磁干扰。

3.2 有PCB布局影响下的传导干扰仿真

由于实际器件在PCB上的布局分布对电磁兼容性有重要影响,因此有必要将PCB布局和电路设计进行协同仿真^[9]。本文使用Altium Designer(AD)软件构建了DC/DC功率回路的PCB布局,采用两层板设计,将电路元件和走线逐一规划后,将DC/DC电路的PCB板以ODB文件格式导入到CST中,对PCB板上的元器件建立离散端口,并添加了输入端和输出端的离散端口,如图10所示。

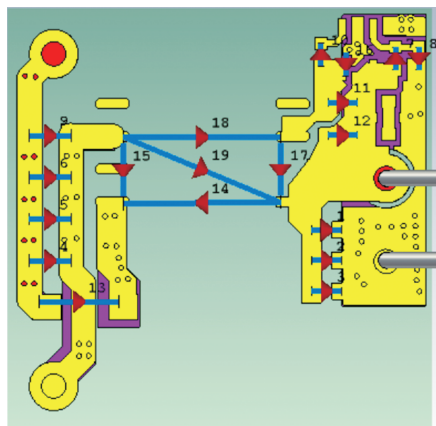


图10 DC/DC回路的PCB布局

在PCB布局确定情况下,在协同仿真搭建页面将元器件一一对应连接到PCB建模中设置的端口,搭建场路协同仿真,如图11所示。设置仿真频率范围为传导干扰最为显著的0~30 MHz,仿真时间为1 000 μs。边界条件方面,将X和Z方向设置为电边界,勾选CombineResults选项,以实现电路级仿真和板级仿真联合分析。通过瞬态仿真,得到了考虑PCB布局影响下的传导干扰频谱,如图12所示。

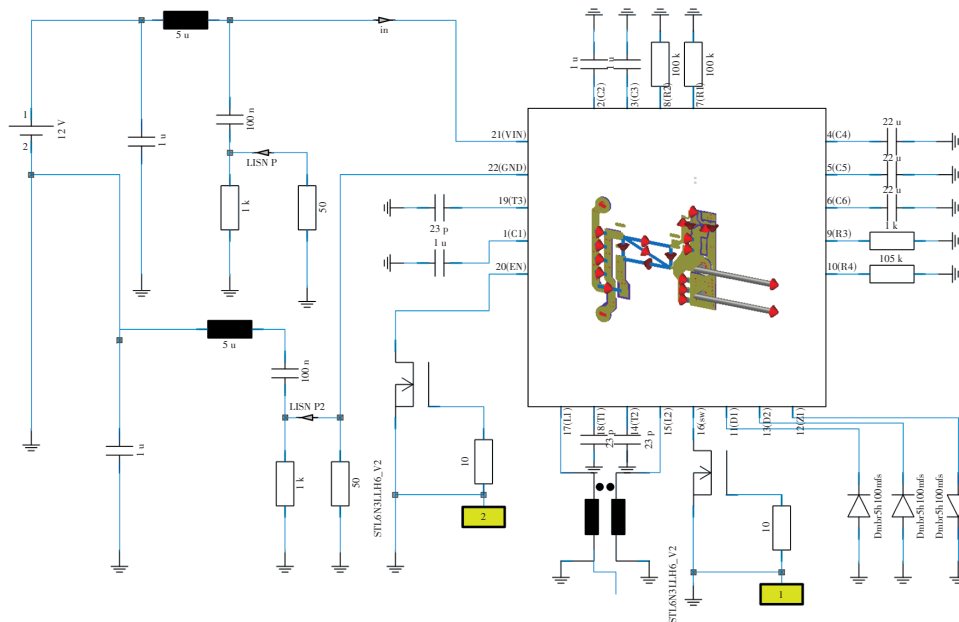


图 11 场路协同仿真电路

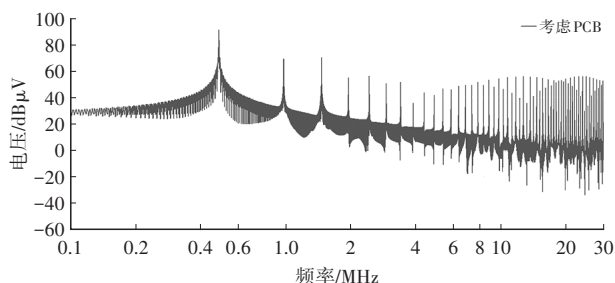


图 12 有 PCB 下的传导干扰频谱

由仿真结果可知,在场路协同仿真下,DC/DC 的传导干扰频谱图波形趋势与纯电路仿真的频谱波形基本一致,但在有 PCB 影响下的传导干扰幅值整体比纯电路的传导干扰幅值更大,且在高频段表现得更为显著。这是由于在 PCB 布局走线时存在寄生参数,导致整体传导干扰情况恶化,且寄生参数在高频时的影响尤为明显。PCB 的元器件布局、走线设计、传输带长度、回路面积、地线走向以及整体布局等因素都会对电磁干扰产生重要影响。本文通过对比仿真得出的 PCB 整体布局传导干扰情况与纯电路仿真的传导干扰情况,进一步验证了 PCB 布局对传导干扰的显著影响,如图 13 所示。

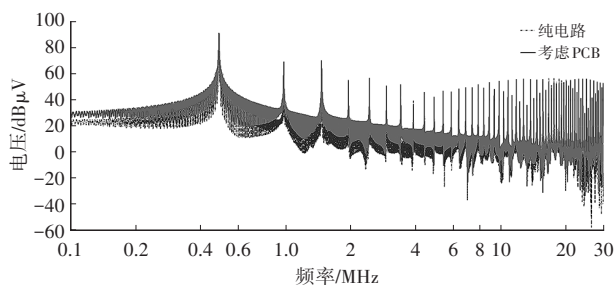


图 13 有无 PCB 影响下传导干扰结果对比

图 13 中,实线的频谱代表考虑 PCB 布局影响下的传导干扰情况,虚线频谱线代表纯电路仿真的传导干扰情况。从图中可以看出,在 PCB 结构的影响下,传导干扰的整体幅值比纯电路仿真结果高 1~5 dBμV,这验证了 PCB 结构对电磁干扰的决定性作用。

3.3 II 型滤波器设计和验证

针对 DC/DC 回路在工作中发出的传导干扰,本文设计了一种 II 型滤波器。该滤波器由靠近 LISN 端的电容和共模电感以及靠近干扰源的电容组成。为评估该滤波器的性能,重点分析了其插入损耗。插入损耗越大,表明该滤波器抑制干扰的能力越强。插入损耗的定义为:

$$L_{in} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} \quad (5)$$

式中: L_{in} 为插入损耗, U_1 为无电源滤波器时负载端的电压, U_2 为加入电源滤波器后负载端的电压。

设 U_{cm1} 为不加滤波器时的共模噪声电压值, U_{cm2} 为加上滤波器时的共模噪声电压值, Z_{Ncm} 为共模噪声源的阻抗, I_{Ncm} 为共模噪声源的电流, R_{LISNcm} 为共模情况下线性稳定阻抗网络的阻抗, Z_{Lcm} 为共模电感的阻抗, $L_{in cm}$ 为共模插入损耗,则:

$$U_{cm1} = \frac{R_{LISNcm} Z_{Ncm}}{R_{LISNcm} + Z_{Ncm}} I_{Ncm} \quad (6)$$

$$U_{cm2} = \frac{R_{LISNcm} Z_{Ncm}}{R_{LISNcm} + Z_{Ncm} + Z_{Lcm}} I_{Ncm} \quad (7)$$

将式(6),式(7)代入式(5)中得:

$$L_{in cm} = 20 \log \frac{R_{LISNcm} + Z_{Ncm} + Z_{Lcm}}{R_{LISNcm} + Z_{Ncm}} \quad (8)$$

若 $L_{in,cm} > 0$, 则插入损耗 > 0 , 表明共模电感能够有效衰减共模噪声电压。阻抗匹配度越高, 插入损耗越大, 滤波效果越显著^[10]。

设 U_{dm1} 为未加滤波器时的差模噪声电压值, U_{dm2} 为加入滤波器时的差模噪声电压值, Z_{Ndm} 为差模噪声源的阻抗, I_{Ndm} 为差模噪声的电流, R_{LISNdm} 为差模情况下线性稳定阻抗网络的阻抗, Z_{Cdm} 为差模滤波电容的阻抗, $L_{in,dm}$ 为差模插入损耗, 则:

$$U_{dm1} = \frac{R_{LISNdm} Z_{Ndm}}{R_{LISNdm} + Z_{Ndm}} I_{Ndm} \quad (9)$$

$$U_{dm2} = \frac{R_{LISNdm} Z_{Ndm} Z_{Cdm}}{R_{LISNdm} Z_{Cdm} + Z_{Ndm} (R_{LISNdm} Z_{Cdm})} I_{Ndm} \quad (10)$$

将式(9), 式(10)代入式(5)中得:

$$L_{in,dm} = 20 \log \left[1 + \frac{R_{LISNdm} Z_{Ndm}}{Z_{Cdm} (R_{LISNdm} + Z_{Ndm})} \right] \quad (11)$$

若 $L_{in,dm} > 0$, 差模噪声就可得到衰减。

根据汽车电子电磁兼容测试标准要求, 将考虑 PCB 布局影响下的仿真传导干扰的幅值结果与标准限值进行对比, 结果显示整体传导干扰幅值超出了标准限值。为了满足标准要求, 设计的 Π 型滤波器需要在差模和共模噪声上均具有显著的插入损耗。根据阻抗极大不匹配原则, 通过代入电路滤波前后的参数进行计算, 最终选择了 1 个 $10 \mu\text{H}$ 的电感和 2 个 $4.7 \mu\text{F}$ 的电容构成 Π 型滤波器, 其结构如图 14 所示。电感采用 SPICE 模型进行建模, 仿真结果如图 15 所示。

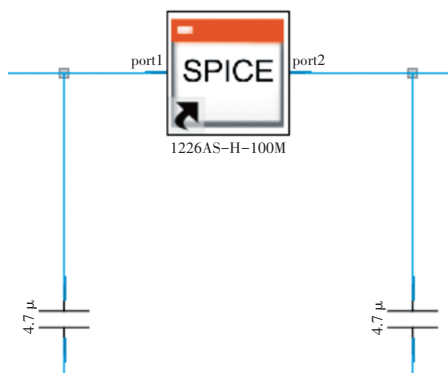


图 14 Π 型滤波

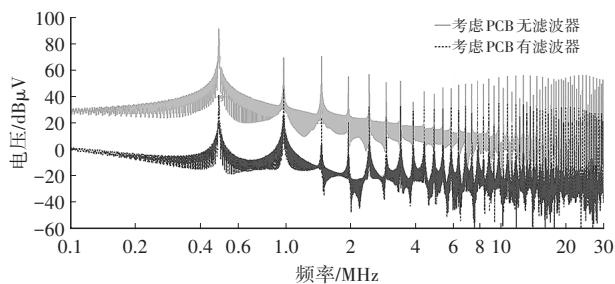


图 15 加入滤波器后传导干扰结果对比图

仿真结果表明, 加入 Π 形滤波器后, 传导干扰幅值在整个仿真频段上都有明显的下降, 最高干扰幅值下降到 $44.6 \text{ dB}\mu\text{V}$, 满足了汽车电子 EMC 测试标准的要求, 符合汽车电子传导干扰标准, 验证了本文设计的 Π 型滤波器的有效性。

4 结束语

本文仿真分析了电动汽车 PTC 加热器开关电源的电磁传导干扰情况, 从干扰源的提取和产生机理, 到干扰路径的分析和 DC/DC 功率回路的仿真搭建, 将抽象的电磁干扰可视化地分析, 通过仿真验证了在有 PCB 影响下 DC/DC 回路的传导干扰幅值比纯电路传导干扰幅值大并更贴合实际。提出了加入 Π 形滤波器的方式有效降低了 DC/DC 功率回路的传导干扰, 并验证了有效性, 为电动汽车 PTC 加热器开关电源的电磁干扰仿真分析预测提供了有力的理论依据和抑制措施的参考。

参 考 文 献

- [1] 江心怡, 陈泓霖. 基于软开关技术的 DC/DC 变换器电磁干扰抑制研究现状及发展趋势[J]. 机电工程技术, 2023, 52(11): 11-17.
- [2] 汪晓文, 康婷, 康端刚等. 开关电源的输入滤波器设计及传导干扰抑制[J]. 电源技术, 2020, 44(12): 1822-1825+1830.
- [3] DALAL D N, CHRISTENSEN N. Impact of Power Module Parasitic Capacitances on Medium-Voltage SiC MOSFET Switching Transients[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(1): 298-310.
- [4] 王建渊, 栗俊明, 陈晓焯等. 逆变器共模电压干扰及抑制措施研究[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 195-201.
- [5] 张淙哲, 房育良, 刘昊天. 电磁兼容技术及其在开关电源中的运用[J]. 通信世界, 2022(11): 41-43.
- [6] 崔晓, 曾光, 熊宇等. 开关电源电磁干扰的成因及对策[J]. 中国新技术新产品, 2021(14): 45-48.
- [7] 游冬, 熊昶智. 开关电源电磁兼容问题解决方法的研究[J]. 电子测试, 2019(11): 107-108.
- [8] 郑曦, 尹华. 反激变压器高频寄生参数的仿真分析研究[J]. 微电子学, 2022, 52(03): 372-375+382.
- [9] 刘博亚. 基于开关电源模块的 EMI 建模仿真及干扰特征分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [10] 廖臻, 廖志斌, 刘宇平. 基于 CST 仿真软件的阻抗匹配设计教学实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(2): 204-207.

(责任编辑 明慧)