

红外用机械制冷机驱动电路的共模干扰机理

张家昆^{1,2}, 杨宝玉¹, 孙德新¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 机械制冷机是提供红外载荷工作所需低温环境的主要设备, 其驱动系统的传导干扰是影响红外载荷精度的重要因素。传导干扰中的共模干扰具有较高的分析难度, 为研究其机理, 以某红外用机械制冷机及驱动系统为研究对象, 使用一种新型多物理域联合仿真的方法对共模干扰机理进行定量分析, 并通过实验测试验证了仿真模型的准确性。最终对其干扰路径及干扰源特性进行了分析, 并总结出共模干扰机理。结果表明: 测试频段内制冷机的寄生参数是影响共模干扰通路的最主要因素, 但随频率增加, 输入输出电缆的寄生参数对干扰通路的影响逐渐增大, 同时, 干扰机理显示: 系统产生的共模干扰最可能导致 CE102 标准在频段 500 kHz~1 MHz 干扰超限。

关键词: 红外载荷; 共模干扰; 机械制冷机驱动系统; 联合仿真; 干扰机理

中图分类号: TN972 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0104001

Common-mode interference mechanism of the driving circuit of cryocooler used on infrared system

Zhang Jiakun^{1,2}, Yang Baoyu¹, Sun Dexin¹

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Cryocooler is an important equipment to provide low temperature working environment for infrared device. However, its driving system's conducted interference severely affects the precision of the infrared loading. It's not easy to analyze the common-mode part included in conducted interference. To study the common-mode interference mechanism, based on an existing infrared system project's cryocooler and its driving system, the mechanism was quantitatively analyzed using a new multi-physics co-simulation method and the model's accuracy was verified by specific experiment measurement. Finally, the characteristic of disturbance pathway and source were analyzed and the mechanism of the common-mode interference was concluded. Results show that, the parasitic parameter of the cryocooler is the most important factor of transmission path within the range of test frequency. However, with frequency increase, the effect of cable's parasitic parameter is increasing and can't be ignored. The interference mechanism concludes that the common mode interference produced by system may induce

收稿日期: 2019-10-11; 修订日期: 2019-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500400); 国家自然科学基金(51806231)

作者简介: 张家昆(1993-), 男, 博士生, 主要从事系统级电磁兼容方面的研究。Email: zhangjiakun2008@163.com

导师简介: 杨宝玉(1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事载荷热管理综合控制电子学方面的研究。Email: byyang@mail.sitp.ac.cn

the overrun of the CE102 standard from 500 kHz to 1 MHz.

Key words: infrared loading; common-mode interference; cryocooler driving system; co-simulation; interference mechanism

0 引言

机械制冷机凭借其效率高,体积小,质量轻,可靠性高等一系列特性,被广泛应用于航天航空领域,其中包括红外相机系统精密载荷的制冷。红外光电载荷对电磁干扰具有较高的敏感度,容易受到内部外部的干扰,导致工作精度降低^[1]。为实现高精度工作,机械制冷机驱动电路作为整个制冷系统的主要电功率输出部分,具有严格的电磁干扰标准。机械制冷机驱动系统的传导干扰按照传导路径的不同分为差模和共模两种,其中差模干扰与工作主电路拓扑电流流向相同,比较易于分析及抑制^[2]。而共模的传导路径受到各类非线性寄生参数的影响,并通过大地形成干扰回路,不容易进行定量分析^[3]。同时传导共模干扰还是引起辐射干扰的主要源头,对于传导共模干扰的合理抑制才能更优化地处理辐射干扰^[4]。因此,共模干扰的机理分析是制冷机电磁兼容设计的一个重要问题。

针对驱动系统的共模干扰,已经存在多种分析方法。早期多采用经验法进行干扰的分析及其抑制的设计^[5],但此类方法只能实现大概的经验性分析,无法定量定位干扰并设计抑制措施。之后出现通过建立电磁干扰的等效电路,并进行电磁干扰计算的方法^[6-7],但这类方法对高频状态下各个部分的非线性认知不足,会导致结果过于理想化,因此,难以准确预测干扰。后来有人提出通过测试法计算整个系统的关系方程组来建模分析的方法^[8-9],但该方法对于具有复杂结构的系统会产生较大的建模难度,不具有普适性,同时无法在设计阶段就完成对干扰的仿真预测。

针对以往国内外红外用机械制冷机驱动系统的共模干扰机理分析偏经验性、精确度差和不具有普适性等缺点,文中采用联合仿真和理论分析相结合的方式,对共模干扰机理进行定量分析。通过特征化建模再联合仿真的方法,实现对系统干扰的精确仿真。最终结合仿真模型与理论计算对制冷机驱动系统的共模干扰相关特性进行分析,总结出共模干扰机理。

文章的第二部分,介绍了整个系统的工作模式,用以配合后续的干扰机理分析;文章的第三部分介绍了使用的传导干扰特性仿真方法,并对电机驱动系统传导干扰特性进行了仿真和验证;文中第四部分,利用建立的仿真干扰模型,对干扰源、干扰路径和敏感设备三要素进行定量分析,并总结出干扰机理。

1 系统工作模式

文中所研究的机械制冷机的压缩机驱动电路拓扑如图 1 所示。采用 2 个 N 型金属-氧化物半导体场效应晶体管(N-channel Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, N-MOSFET) 和 2 个 P 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (P-channel MOSFET, P-MOSFET) 搭建单相全桥用于驱动压缩机,4 个 MOSFET 均安装于接地金属散热器上。采用无源电感电容用于驱动波形的平滑。用于驱动 MOSFET 的正弦脉冲宽度调制方法 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 频率为 21 kHz。

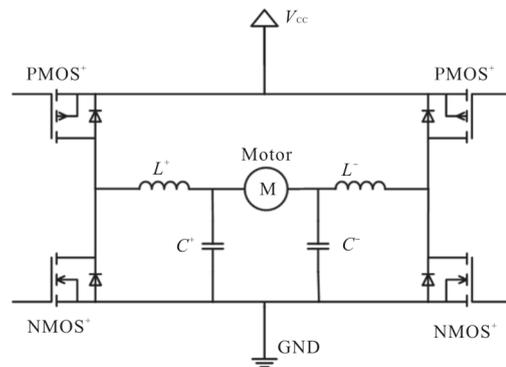


图 1 全桥驱动拓扑图

Fig.1 Topology graph of full bridge driver

构建主电路的工作拓扑,用于进一步分析干扰机理。对 N-MOSFET 采用半周期常通常断,对 P-MOSFET 采用 SPWM 的控制策略。

P-MOSFET 开通时:

工作电流通过开通的 P-MOSFET 和 N-MOSFET 形成回路,如图 2 所示。

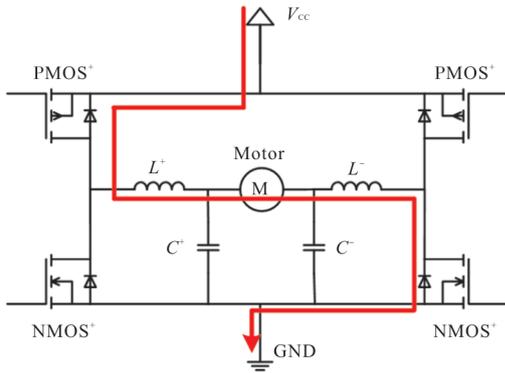


图 2 PMOS+ 开通时电流流向图

Fig.2 Current flow direction when PMOS+ opens

P-MOSFET 关断时:

工作电流通过开通的 N-MOSFET 和关断的 N-MOSFET 的续流二极管形成回路, 如图 3 所示。

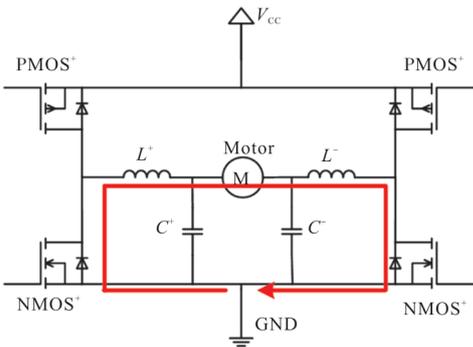


图 3 PMOS+ 关断时电流流向图

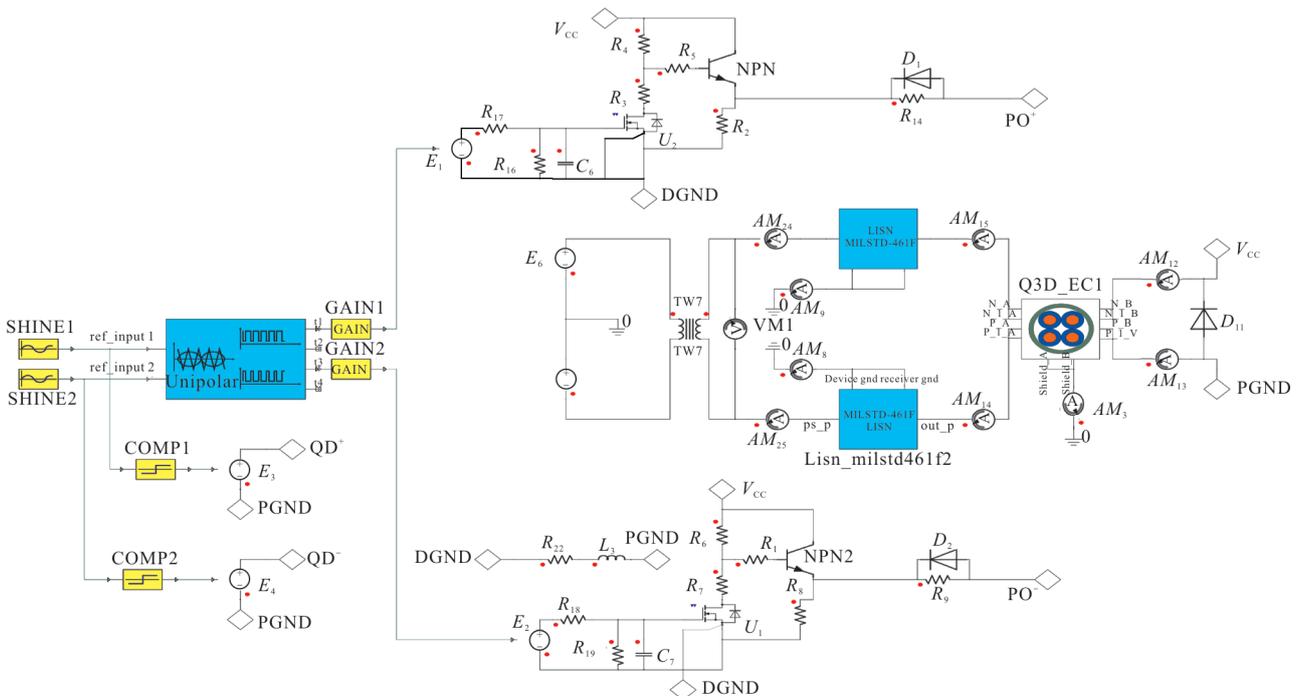
Fig.3 Current flow direction when PMOS+ closes

2 仿真模型的建立与验证

针对整个驱动系统, 为实现共模干扰的精确定位分析, 定量建立共模干扰机理模型, 提出并采用了一种新型的多物理域联合仿真的方法来实现系统瞬态时域的精确仿真。针对系统各个模块的特性, 选用包括有限元法、部分元等效电路法及测量法等算法及相应软硬件, 进行各子模块的特征化建模, 建立包括线缆、结构、开关元器件、压缩机等涵盖电、磁、力等不同物理域精确非线性模型^[10]。最终在软件 ANSYS EM 中实现系统的多物理域联合模型建立。从而将各物理域的非线性因素综合考虑在模型内, 对系统电路实现相较于以往方法更为精确、普适的联合仿真, 系统模型如图 4 所示。

为检验建立的系统模型的准确性, 按照 GJB-151B 标准搭建了 CE102 传导干扰实验测试平台, 对仿真效果进行了实验验证, 搭建实验平台如图 5 所示。

实验验证系统连接如图 5 所示。供电电源采用 42 V 直流, 通过 LISN 输送至制冷机电控箱, 用于驱动与控制电路的供电。电控箱内部驱动控制电路和相关结构与仿真模型相同, 电控箱输出驱动脉管式制冷机。输入输出线缆均采用长度 2 m 的双绞屏蔽线, 并且屏蔽层与对应金属外壳充分连



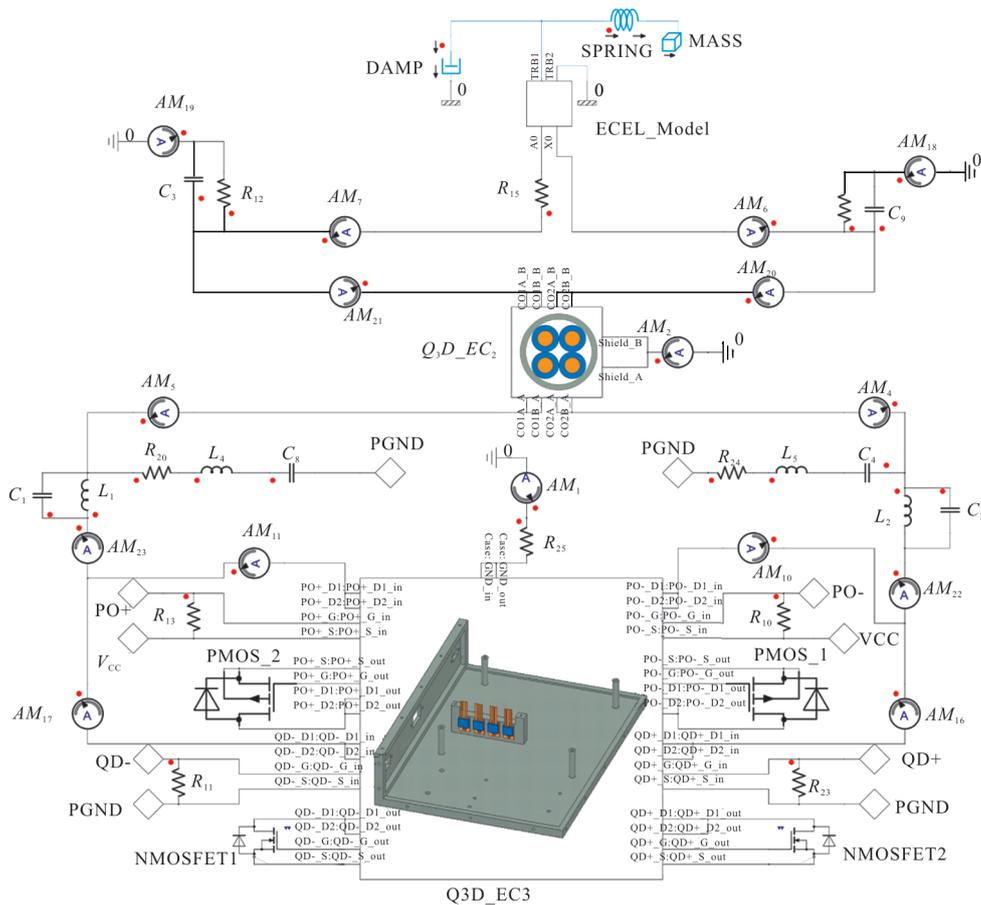


图 4 系统多物理域模型

Fig.4 Multi-physics model of system

接。整个系统按照 GJB151B 标准安装放置于测试铺铜平面并实现系统的金属外壳与大地平面的良好搭接。

计的研究,并用于仿真结果的进一步分析与验证)如图 6 所示。蓝色为联合仿真结果,红色为实验测试结果。可以证明该方法具有较高的精确度,可用于后续的共模干扰机理的具体定量分析。

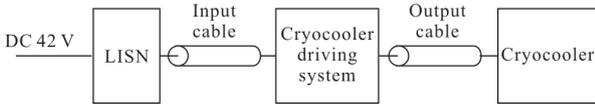


图 5 实验测试接线图

Fig.5 Wiring diagram of measurement

比较实验和仿真在供电正线上的线性阻抗稳定网络(Line Impedance Stabilization Network, LISN)上采集到的传导干扰结果(试验设备及标准限制,测试结果包含差模干扰和共模干扰。该测试在第三方测试机构完成,由于相应测试标准要求 and 缺乏相关分离工具,因此,没有实现共模和差模噪声分离。后续可结合相关技术进行共模干扰与差模干扰的分离设

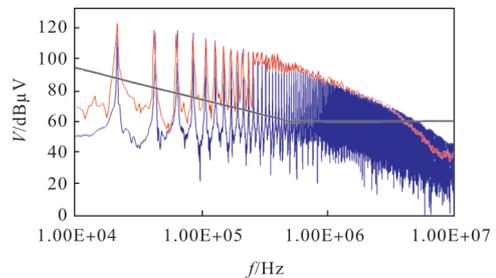


图 6 CE102 仿真实验对比图

Fig.6 Simulation and experiment comparison of CE102

3 共模干扰机理分析

针对整个制冷机驱动系统的共模干扰机理进行

定量分析,构建干扰机理模型,可以用于后续的共模干扰抑制措施的最优化设计。

共模干扰机理通常分成干扰源、干扰路径和敏感器件三部分。其中对于敏感器件,基于方针和试验进行分析,文中以系统中符合国军标 CE102 标准的 LISN 作为敏感设备,不再详细分析。主要分析干扰源和干扰路径的具体特性。

3.1 干扰源特性分析

共模噪声源会通过大地传输形成回路,通常以共模电压来分析噪声源的特性。结合工作模式,分析在 P-MOSFET 的一个开断周期内,可以将噪声源按噪声回路不同分为两部分:开通时,以 P-MOSFET 作为噪声源,通过电源正极组成回路;关闭时,下桥臂关闭的 N-MOSFET 的续流二极管作为关断时的噪声源,通过供电负极形成噪声回路。通过分析两者漏极连接点对大地的共模电压,可以得到一个周期内的共模干扰源的幅频特性。

通过仿真可以得到半个周期内的共模噪声源对大地电压的时域波形如图 7 所示。

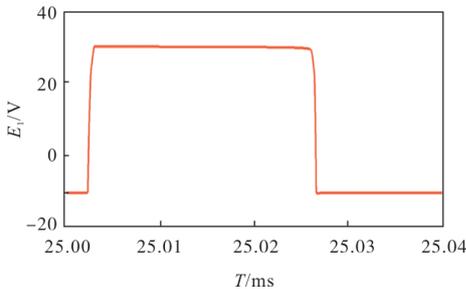


图 7 共模噪声源仿真电压图
Fig.7 Simulation voltage of CM noise source

针对共模噪声的干扰源计算其傅里叶级数,分析其幅频特性。其傅里叶级数为:

$$a_n = -j \frac{A}{2\pi n} e^{-\frac{j\omega(t+t_r)}{2}} \cdot \left(\frac{\sin(0.5n\omega t_r)}{0.5n\omega t_r} e^{jn\omega t_r} - \frac{\sin(0.5n\omega t_f)}{0.5n\omega t_f} e^{-jn\omega t_f} \right) \quad (1)$$

式中: t 为脉冲宽度; t_r 为上升沿时间; t_f 为下降沿时间; n 为谐波阶次; A 为波形幅值。通过分析仿真波形可以得到:

$$t_r \approx t_f \quad (2)$$

进一步推导出:

$$a_n = -j \frac{At}{T} \frac{\sin(0.5n\omega t_r)}{0.5n\omega t_r} \frac{\sin(0.5n\omega t)}{0.5n\omega t} e^{-jn\omega(t+t_r)/2} \quad (3)$$

推导出干扰源的包络 B 为:

$$B = 2 \frac{At}{T} \left| \frac{\sin(\pi f t_r)}{\pi f t_r} \right| \left| \frac{\sin(\pi f t)}{\pi f t} \right| \quad (4)$$

对其做对数运算,并将仿真得到的各个参数代入可以得出干扰源的幅频特性,会在频率 $1/t=42$ kHz (50% 占空比时) 和 $1/t_r=1.26$ MHz 处形成 -20、-40 dB 的下降拐点。通过对噪声源进行频谱分析,得到噪声源的幅频关系如图 8 所示,其中黑色曲线为仿真得到的共模噪声源频谱,红色折线为黑色曲线下下降趋势折线图。仿真分析的幅值与斜率变化拐点吻合,验证了分析的准确性。

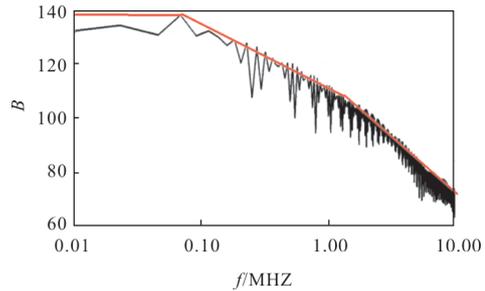


图 8 共模噪声源幅频关系图

Fig.8 Amplitude-frequency relation of CM noise source

3.2 共模干扰耦合路径定量分析

结合工作模式分析,在 P-MOSFET 开断的两个时间状态下,主电路拓扑存在差别。考虑两个不同状态的噪声通路,分别建立等效回路模型,两者模型均如图 9 所示,具有相同的共模干扰回路拓扑,只存在寄生参数数值的细微差异。所以认定该主驱动电路拓扑的差异对共模干扰回路基本没有影响。在此以电源正极的共模干扰回路作为对象进行分析。

图 9 中各个元器件分属于不同的独立模块的寄生参数,不同频率的寄生参数会发生变化,分析时需结合寄生参数模型进行具体分析。通过联合仿真方法,可以提取模型在不同频率时的各个寄生参数,并直接同步应用于联合仿真。

通过对仿真结果中各个部分的共模电流进行频域分析,得到在不同频率下共模电流的分布量级差异。配合计算能够定量总结出在不同频段下共模干扰噪声耦合通路的具体特性。

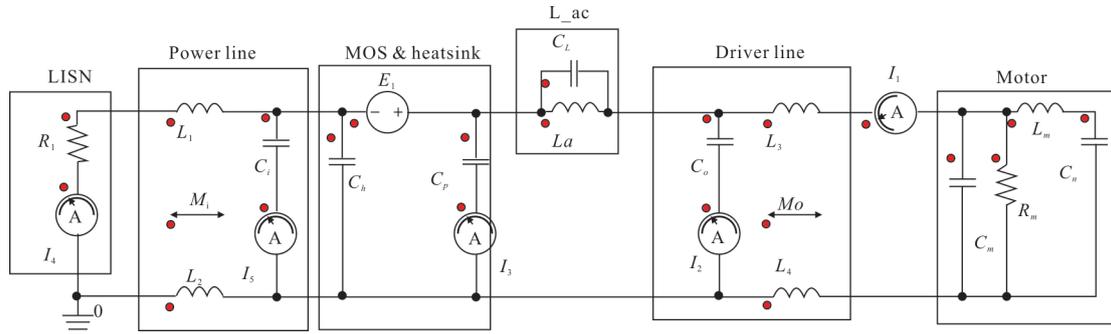


图 9 共模通路模型图

Fig.9 CM path model

共模电流频谱在图10中对应关系如表 1 所示。

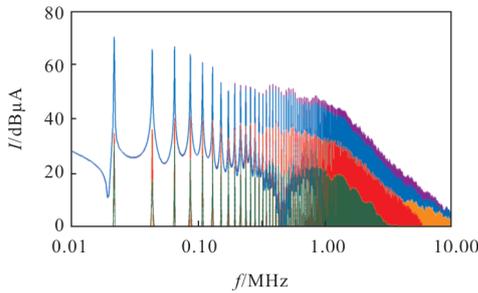


图 10 共模电流幅频关系图

Fig.10 Amplitude-frequency relation of CM current

表 1 共模电流频谱颜色对应表

Tab.1 Reference of CM current and frequency spectrum

I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
Blue	Red	Green	Purple	Orange

3.2.1 共模干扰源进入大地通路

共模干扰自 P-MOSFET 流出后,会通过各类寄生参数进入大地,结合仿真分析结果,可初步定性分析得到:在低频阶段,可以结合等效模型,基于基尔霍夫电流定律得到公式(7)。

$$I_{E1}=I_3+I_2+I_1 \quad (5)$$

从而推导出三条潜在通路经过的电流大小。

$$I_3=E_1/Z_p \quad (6)$$

$$I_2=E_1/\left(1+\frac{Z_a}{Z_c}+\frac{Z_a}{Z_L+Z_m}\right) \quad (7)$$

$$I_3=I_2 \times \frac{Z_c}{Z_L+Z_m} \quad (8)$$

其中,

$$Z_c=\frac{1}{j\omega C_o} // R_m \quad (9)$$

$$Z_p=\frac{1}{j\omega C_p} \quad (10)$$

$$Z_L=j\omega(L_3-M_o) \quad (11)$$

$$Z_a=\frac{1}{j\omega C_L} // j\omega L_a \quad (12)$$

$$Z_m=\frac{1}{j\omega C_m} // \left(\frac{1}{j\omega C_n} + j\omega L_m\right) \quad (13)$$

(1) 在中低频时(<1 MHz),电感参数等对应的等效阻抗较小,不同通路的阻抗主要受到寄生电容和电阻参数影响。经计算分析,阻抗满足公式(14),从而流过的电流满足公式(15)。

$$Z_m+Z_L \ll Z_c < Z_p \quad (14)$$

$$dB(I_3)+30 \text{ dB}\mu\text{A} \geq dB(I_2)+10 \text{ dB}\mu\text{A} \geq dB(I_1) \quad (15)$$

可以分析得到:在<1 MHz 的频率范围内,共模电流基本通过电机的共模寄生参数进入大地。

(2) 在高频情况(>1 MHz)时,虽然逆变桥后的滤波无源电感的阻抗会随着频率增大,但大电感的匝间电容的存在,使得高频情况下无源电感等效阻抗影响效果有限。输出线缆的寄生电感对干扰通路影响随着频率增加。高频段时,电机内部阻抗增长迅速,共模干扰不通过电机内部,而是从电机入口处的寄生参数进入大地。相比较中低频时,此时已经需要考虑通过输出线缆寄生电容进入大地的噪声的影响。阻抗之间的关系近似符合公式(16)。

$$Z_m \approx 4Z_c \approx 10Z_p \quad (16)$$

对应于高频时的电流符合仿真公式(17)。

$$dB(I_3)+20 \text{ dB}\mu\text{A} \approx dB(I_2)+10 \text{ dB}\mu\text{A} \approx dB(I_1) \quad (17)$$

3.2.2 大地返回共模干扰源通路

由于工作拓扑对传导路径影响较小,因此只分析共模干扰通过电源供电正线形成闭合干扰回路的情况。

考虑从大地返回共模干扰源的路径, 可以给出公式(20)~(22)。

$$I_h = E_1 / \frac{1}{j\omega C_h} \quad (18)$$

$$I_5 = E_1 / \frac{1}{j\omega C_i} \quad (19)$$

$$I_3 = E_1 / (j\omega(L_i - M_i) + 50 \Omega) \quad (20)$$

$$\left| \frac{1}{j\omega C_h} \right| \gg |50 + (j\omega(L_i - M_i))| \quad (21)$$

$$\left| \frac{1}{j\omega C_h} \right| \gg \left| \frac{1}{j\omega C_i} \right| \quad (22)$$

结合寄生参数模型, 可以分析在整个测试频段中, 另一侧桥臂上的 P-MOSFET 带来的寄生电容 C_h 都满足阻抗公式(23)、(24)。

所以共模干扰的在整个频段中, 基本极少会通过另一侧桥臂上的 P-MOSFET 的寄生电容返回噪声源。

在中低频部分(<1 MHz)时, 供电线与其接地屏蔽层直接的互感系数约为 0.94, 电感等效阻抗相对于 LISN 的 50 Ω 电阻可以忽略。同时电源线对屏蔽层寄生参数 C_i 为 100 pf 量级, 满足公式(23)、(24)。

$$|50 + (j\omega(L_1 - M_i))| \approx 50 \Omega \quad (23)$$

$$\left| \frac{1}{j\omega C_i} \right| \geq 1300 \quad (24)$$

在中低频阶段, 通过返回噪声源的干扰与通过 LISN 返回噪声源的关系为公式(25)。共模干扰基本通过 LISN 的 50 Ω 返回干扰源。

$$dB(I_3) + 28 \text{ dB} \leq dB(I_2) \quad (25)$$

当处于高频阶段(>1 MHz)时, 随着频率增加, C_i 对应等效阻抗值减小。同时相较于 LISN 的 50 Ω 阻

抗, 供电电缆的串联电感阻抗值 $j\omega(L_1 - M_i)$ 也随着频率增大而不可忽视。在高频阶段时, 两者基本满足公式(27)。

$$\left| \frac{1}{j\omega C_i} \right| < 3 \times |50 + (j\omega(L_1 - M_i))| \quad (26)$$

$$dB(I_3) + 9 \text{ dB} < dB(I_2) \quad (27)$$

相应的干扰电流关系如公式(27), 符合图 10 仿真结果中的共模电流幅值关系, 可以验证分析符合结果。所以高频部分时, 共模干扰会同时通过 LISN 和供电电缆的寄生参数返回干扰源。

3.2.3 共模干扰通路总体分析

综上所述, 具体的定量耦合通路路线模型如下:

(1) 中低频时(10 kHz~1 MHz)

如图 11 所示, 结合之前的分析, 共模干扰 90% 通过制冷机的寄生参数 C_m 进入大地, 8% 干扰通过线缆寄生参数进入大地, 2% 干扰通过散热器进入大地。

进入大地的共模干扰至少 96% 通过 LISN 返回噪声源, 最小约为其他方式的 25 倍(约 28 dB), 所以在中低频段, 噪声主要通过 LISN 的 50 Ω 从大地返回噪声源形成干扰回路。

(2) 高频时(>1 MHz)

结合之前的分析, 共模干扰 66% 通过制冷机的寄生参数 C_m 进入大地, 17% 干扰通过线缆寄生参数进入大地, 7% 干扰通过散热器进入大地, 如图 12 所示。

在 >1 MHz 后, 供电电缆的寄生参数的影响逐渐增大, 使得从 1 MHz 时 4% 通过供电电缆寄生电容返回, 到 10 MHz 时上升为 25%。

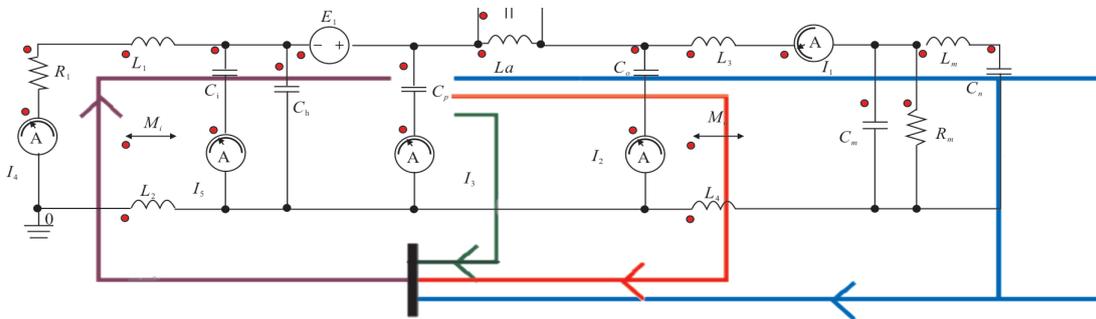


图 11 中低频共模电流流向图

Fig.11 Diagram of CM current flow direction in low-medium frequency range

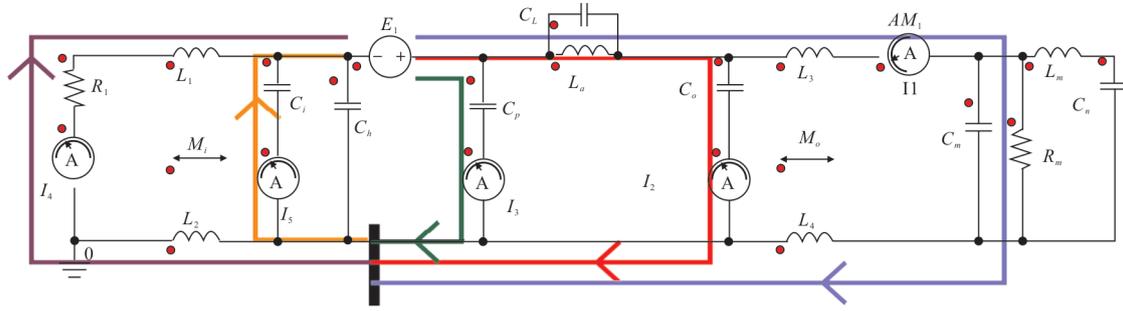


图 12 高频共模电流流向图

Fig.12 Diagram of CM current flow direction in high frequency range

3.3 干扰机理总结

结合共模干扰源特性与耦合通路特性进行综合分析。其中耦合通路考虑占主要成份的耦合通路,也就是共模干扰通过制冷机寄生参数进入大地,并通过 LISN 返回噪声源的路径。可以算得该路径下:

$$Z_t \approx \frac{1}{j\omega C_m} + 50 \quad (28)$$

$$dB\mu A(I) = dB\left(\frac{B}{Z_t}\right) = dB\left(2\frac{At}{T}\right) + dB\left(\left|\frac{\sin(\pi ft_r)}{\pi ft_r}\right|\right) + dB\left(\left|\frac{\sin(\pi ft)}{\pi ft}\right|\right) + 120 - 0.5dB\left(2500 + \frac{1}{\omega^2 C_m^2}\right) \quad (29)$$

式中: t 取为 32 s(对应占空比 68%)。通过 MATLAB 计算并生成关系图,如图 13 所示。对比图 10 联合仿真中的通过 LISN 的共模电流幅频,可以发现两者包络基本吻合。

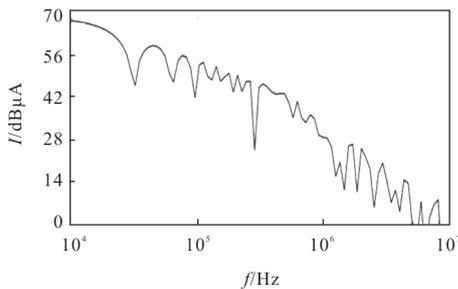


图 13 Matlab 仿真电流幅频关系图

Fig.13 Current amplitude–frequency with Matlab simulation

结合联合仿真与理论分析,可以总结出干扰机理特性如下:小于 1 MHz 时,干扰源拥有较低下降趋势,同时干扰通路的阻抗初始较大但随频率开始减少,两者相互作用使得敏感器件(LISN)上的干扰以较缓慢的趋势下降,总体干扰量变化不大;大于 1 MHz 时,干扰源下降速率增加,同时供电线缆在高频时对干扰的旁路作用,使得敏感器件上的干扰

噪声呈现出快速下降的趋势。最终结合 CE102 标准的限值特性,可以预见机械制冷机驱动系统的共模干扰,在频段 500~900 kHz 可能导致 CE102 的超限风险最大。

4 结论

对于红外用机械制冷机驱动系统的传导共模干扰的干扰机理进行了定量分析研究。分析了系统主要电路的工作拓扑,得出电路拓扑的变化对共模干扰的特性没有影响。通过对系统各个独立模块进行特征化建模,并利用整合成多物理域联合模型的方法,对整个机械制冷机驱动系统完成了多物理域建模与联合仿真,实现了对于驱动系统传导干扰的精确仿真,并通过具体 CE102 对照实验验证了仿真的准确性。配合仿真模型,进行理论计算,定量分析了共模干扰源和耦合通路等系统干扰特性并整合为系统干扰机理。

最终得到的干扰机理结果表明:机械制冷机自身的共模寄生参数是影响共模耦合通路的最主要因素,驱动系统产生的共模干扰最可能导致 CE102 测试中 500~900 kHz 频段超限。

参考文献:

[1] Zheng Xinbo, Pan Ming, Pei Yuntian. Research on EMC problems of stirling cooler[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(2): 114–117. (in Chinese)
郑新波, 潘鸣, 裴云天. 斯特林制冷机的电磁兼容性问题研究[J]. *红外技术*, 2012, 34(2): 114–117.
[2] Paul C R, Hardin K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emissions [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1988, 30(4): 553–560.

- [3] Zhang H, Wang S, Puukko J. Common mode EMI noise modeling and prediction for a three-phase, three-level, grid tied photovoltaic inverter [C]//Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2016: 1188-1194.
- [4] Liu Jian, Li Yonggang, Huang Meng. Design of electromagnetic shielding for minitype airborne electric-optical platform[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0920002. (in Chinese)
刘剑, 李永刚, 黄猛. 小型机载光电平台电磁屏蔽设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0920002.
- [5] Wei Guang, Ma Shaojun, Li Yuanming, et al. Electromagnetic compatibility design and experiment on controller of Stirling cryocooler for space use[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2013, 41(12): 28-31. (in Chinese)
魏广, 马少君, 李元明, 等. 空间用斯特林制冷机电控箱的 EMC 设计与试验[J]. *低温与超导*, 2013, 41(12): 28-31.
- [6] Zhai L, Lin L, Song C, et al. Mitigation conducted-EMI emission strategy based on distributed parameters of power inverter system in electric vehicle [C]//Power Electronics Conference, IEEE, 2017.
- [7] Sunitha P M, Banakara B, Reddy S. Modeling, simulation and analysis of common mode voltage, bearing voltage and bearing current in PWM multilevel inverter fed induction motor with long cable [C]//IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, IEEE, 2018.
- [8] Toure B, Schanen J L, Gerbaud L, et al. EMC modeling of drives for aircraft applications: modeling process, EMI filter optimization, and technological choice[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, 28(3): 1145-1156.
- [9] Shinde S, Masuda K, Shen G, et al. Radiated EMI estimation from DC-DC converters with attached cables based on terminal equivalent circuit modeling [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2017, 99: 1-8.
- [10] Gwon O H, Jeon J W, Ahn J, et al. Component characteristics of motor drive system in EV/HEV and its noise spectrum analysis [C]//International Conference on Electrical Machines & Systems, IEEE, 2014.