

红外制冷机驱动系统的电磁干扰滤波器设计与仿真

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 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 完成了红外制冷机驱动系统滤波器的设计与仿真。针对系统关键器件的特性, 采用合理算法建立精确的联合仿真模型。并借助联合仿真模型提取分析了系统的干扰机理。基于阻抗失配理论分析了不同滤波器拓扑的插入损耗与源和负载阻抗间的关系。最终提出了一套基于干扰机理的传导干扰滤波器设计及优化方法, 该方法有效地优化了滤波器的性能, 并降低了设计冗余。通过实验验证了该方法的准确性与可行性。

关键词: 红外制冷机; 联合仿真模型; 干扰机理; 电磁干扰滤波器设计

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A

Design and simulation of a EMI filter for infrared cryocooler driving system

ZHANG Jia-Kun^{1,2}, YANG Bao-Yu^{1*}, SUN De-Xin^{1*}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The EMI filter of infrared cryocooler driving system was designed and simulated. With considering the characteristic of the crucial components in system, the co-simulation model of the system was built by using the appropriate algorithm. The interference mechanism was extracted and analyzed with the assist of the co-simulation model. Based on the impedance mismatch theory, the relationship of the filter performance and the impedance of the source and load was analyzed. Finally, based on interference mechanism, a method for filter design and optimization was raised, and it can optimize the filter's performance and reduce redundancy effectively. A test was established and proved the feasibility and accuracy of the method.

Key words: infrared cryocooler, co-simulation model, interference mechanism, EMI filter design

PACS: :41. 20. -q, 07. 50. -e, 84. 32. -y

引言

现如今各类红外探测器均需要工作在稳定的低温环境, 以实现更高的工作性能。由于机械制冷机具有可靠性高、寿命长、结构简单等优点, 已经广泛应用于不同类型的红外载荷系统中^[1-3]。作为机械制冷机最主要的应用场景, 随着红外探测器对性

能要求的不断提升, 良好的电磁兼容环境已经逐渐成为红外探测器性能提升的一个需要攻克的难点。而机械制冷机及其驱动系统由于工作功率大、驱动频率高等特点, 其产生的电磁干扰, 特别传导干扰, 已经成为影响红外光电系统良好电磁环境的不可忽视的因素。

现今针对制冷机驱动系统传导干扰的抑制设

收稿日期: 2019- 11- 01, 修回日期: 2020- 04- 17

Received date: 2019- 11- 01, Revised date: 2020- 04- 17

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

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0500400), National Natural Science Foundation of China (51806231)

作者简介(Biography): (Biography): 张家昆(1993-), 男, 河南焦作人, 博士, 主要研究领域为系统电磁兼容, E-mail: zhangjiakun2008@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): Email: byyang@mail. sitp. ac. cn, dxsun@yeah.net

计,很少能够在系统设计初期完成较为精准的电磁干扰抑制设计,导致需要在工程后期再进行电磁兼容整改,大幅增加了项目成本。同时,EMI滤波器作为抑制传导干扰的主流方法,大多整改时未能基于干扰机理定量的进行抑制设计,导致设计偏经验化与理想化,未能达到良好的抑制性能,甚至使得系统电磁兼容性能变差^[4-5]。

本文使用联合仿真技术,对红外用制冷机驱动系统完成了精确的建模与仿真,分析了阻抗因素对滤波器性能的影响,创新性地提出了一套基于精确干扰机理的滤波器设计及优化方法,实现了系统的电磁干扰滤波器设计的高效化与准确化。最终通过符合GJB151A测试标准的实验,验证了方法的可行性和精确性。对于改善红外探测器系统供电质量,提高红外探测器系统性能,降低制冷机驱动电路滤波器设计冗余以及降低后期整改成本等方面有着重要的意义。

1 模型建立

红外制冷机驱动电路是结合电、磁、热、机械、材料等多个物理域的综合性系统。其中各类非线性因素,例如开关元器件的动态特性^[6]、元器件与结构的寄生参数^[7]等,都是影响系统传导干扰特性的重要因素。只有针对这些关键子模块完成精确的建模,才能实现对传导干扰的精确仿真,完成精准的干扰机理分析,从而辅助滤波器的设计优化。

通过调研,本文提出了针对系统的不同子模块的特性采用不同建模方法独立建模^[8],再联合仿真的策略以实现精确的系统级干扰仿真。各个关键子模块使用的建模方法及对应的建模工具,如图1所示:

通过将各个建立的子模块模型整合于多物理

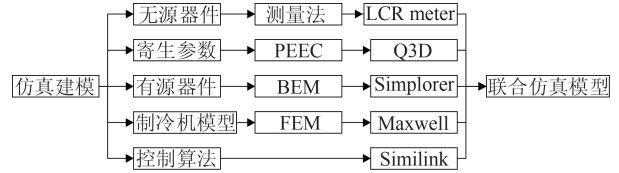


图1 联合仿真建模示意图
Fig. 1 Schematic of the co-simulation modeling

域仿真软件中,实现传导干扰系统的联合仿真建模。最终得到的系统联合模型如图2所示。

2 源及负载阻抗特性对滤波器性能的影响

滤波器的性能与源和负载的阻抗特性关联密切。不同的滤波器拓扑结构,对源和负载的阻抗变化具有不同敏感度和相关性。本文针对三种常用滤波器拓扑进行仿真分析,并总结出对应的优势应用环境。三种拓扑结构分别为Γ型、L型和Π型,其结构如图3(a-c)。

2.1 Γ型滤波器

Γ型滤波器拓扑结构如图4所示,其中 R_s 为源阻抗, R_l 为负载阻抗,通过构造其传递函数矩阵,可以得到其插入损耗式(1)。

$$A_r = \text{dB} \left[\text{mag} \left(\left(1 - K^2 + \frac{R_s}{R_l} \right) + jK \left(\frac{R_d}{R_l} + \frac{R_s}{R_d} \right) \right) \right] - 20 \log_{10} \left(1 + \frac{R_s}{R_l} \right) \quad (1)$$

其中 K 为频率与截止频率之比, R_d 为滤波器截止频率下的特征阻抗。滤波器参数设定为 R_d 不变,分别变化 R_l 和 R_s 的值,得到对应的插入损耗曲线如图4(a-b)所示。

通过对 R_s 和 R_l 在式(3)进行求导并结合仿真,可以分析出Γ型滤波器在谐振频率后,插入损耗与

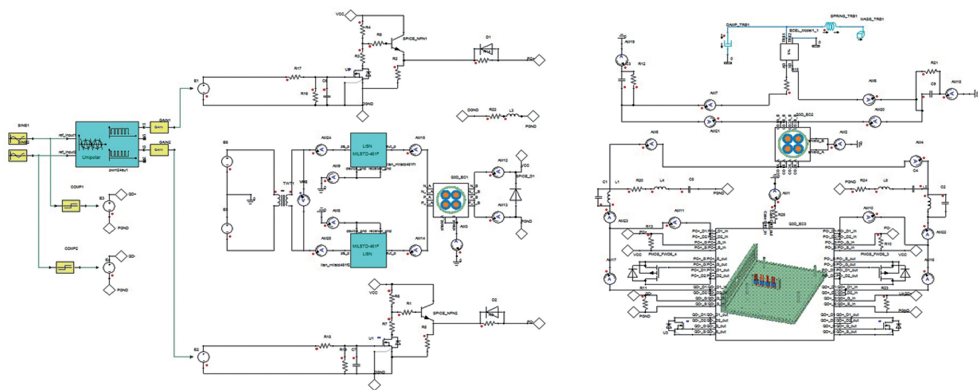


图2 驱动系统联合仿真模型
Fig. 2 Co-simulation model of the driving system

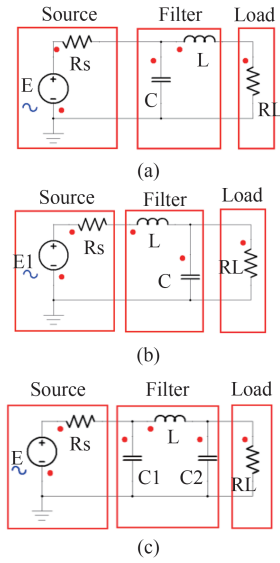


图3 滤波器拓扑结构 (a) Γ 型滤波器, (b) L型滤波器, (c) Π 型滤波器
Fig.3 Topology of filter (a) Γ type filter, (b) L type filter, (c) Π type filter

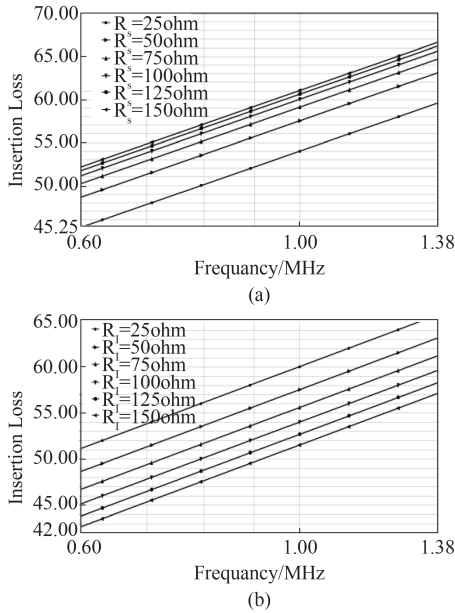


图4 阻抗特性对 Γ 型滤波器插入损耗影响 (a) 源阻抗 R_s , (b) 负载阻抗 R_L
Fig. 4 Insertion loss of Γ type filter vs. impedance characteristic (a) Source impedance R_s , (b) Load impedance R_L

源阻抗成正相关关系, 并随着源阻抗增大, 插入损耗变化率逐渐减小; 插入损耗与负载阻抗成负相关关系, 并随着负载阻抗增大, 变化率减小。

2.2 L型滤波器

通过构建传递函数矩阵, 可以计算得到 L 型滤

波器的插入损耗式(2):

$$A_L = \text{dB} \left[\text{mag} \left(\left(1 - \frac{K^2 R_s}{R_L} + \frac{R_s}{R_L} \right) + jK \left(\frac{R_d}{R_L} + \frac{R_s}{R_d} \right) \right) \right] - \text{dB} \left(\frac{R_L + R_s}{R_L} \right) \quad (2)$$

滤波器参数设定为 R_d 不变。分别变化 R_L 和 R_s 的值, 得到对应的插入损耗曲线如图 5(a-b)

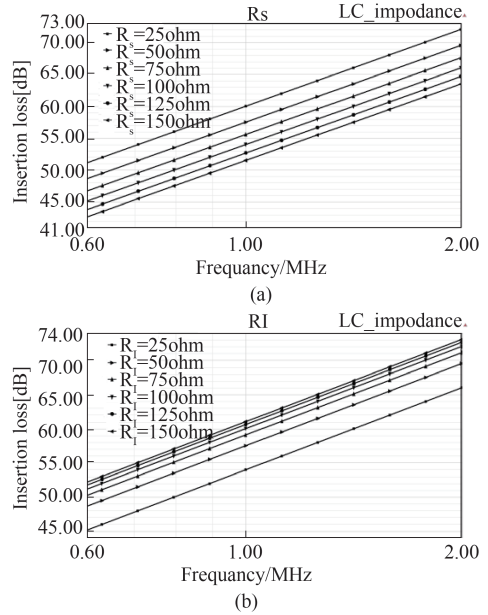


图5 阻抗特性对 L 型滤波器插入损耗影响 (a) 源阻抗 R_s , (b) 负载阻抗 R_L
Fig. 5 Insertion loss of L type filter vs. impedance characteristic (a) Source impedance R_s , (b) Load impedance R_L

通过对式(2)中 R_s 和 R_L 分别进行求导并结合仿真, 分析得出对于 L 型滤波器, 谐振频率后, 插入损耗与 R_s 成负相关关系, 随着 R_s 增大, 插入损耗变化率逐渐减小; 插入损耗与 R_L 成正相关关系, 随着 R_L 增大, 变化率减小。

2.3 Π 型滤波器

通过构建传递函数矩阵, 可以计算得到 Π 型滤波器的插入损耗式(3)。

$$A_{\Pi} = \text{dB} \left[\text{mag} \left(\left(1 + \frac{R_s}{R_L} - \frac{K^2 R_s}{2 R_L} - \frac{K^2}{2} \right) + j \left(\frac{K R_d}{R_L} + \frac{K R_s}{R_d} - \frac{K^3 R_d}{4 R_L} \right) \right) \right] - \text{dB} \left(\frac{R_L + R_s}{R_L} \right) \quad (3)$$

滤波器参数设定为 R_d 不变。分别变化 R_L 和 R_s 的值, 得到对应的插入损耗曲线如图 6(a-b) 所示。

通过对式(3)中 R_s 和 R_L 分别进行求导并结合仿真, 分析得出对于 Π 型滤波器, 谐振频率后, 插入损耗与 R_s 成正相关关系, 随着 R_s 增大, 插入损耗变化

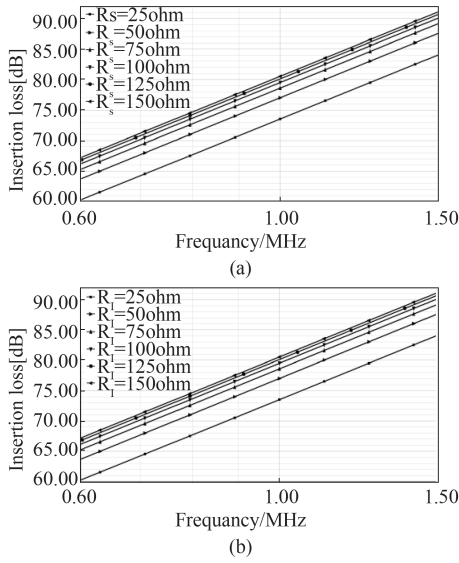


图6 阻抗特性对II型滤波器插入损耗影响 (a)源阻抗 R_s (b)负载阻抗 R_L
Fig. 6 Insertion loss of II type filter vs. impedance characteristic (a)Source impedance R_s , (b)Load impedance R_L

率减小;插入损耗与 R_L 成正相关关系,随着 R_L 增大,变化率减小。

3 干扰滤波器设计与优化

针对以往滤波器设计,不能结合干扰机理从而导致滤波器设计冗余的问题。本文通过结合差模与共模的干扰机理,分析传导通路的阻抗特性,选定合理的拓扑及并计算最优化的滤波器参数,以实现滤波器性能的优化,并降低滤波器过冗余设计。

3.1 差模干扰机理及滤波设计

差模干扰与工作电流的传导路径相同,借助联合仿真模型,对于系统的各个节点的电流进行分析,可以得到各节点的差模和共模干扰的幅频特性,从而提取差模干扰机理如图7所示。其中 C_{DC} 为直流负载, L_{AC} 和 C_{AC} 为输出平滑滤波器, R_M 和 L_M 为制冷机参数, C_{MOS} 为MOS管的漏源极间电容, R_L 为LISN的采集阻抗。可以得出 R_L 上的干扰电压如式(4,6)。

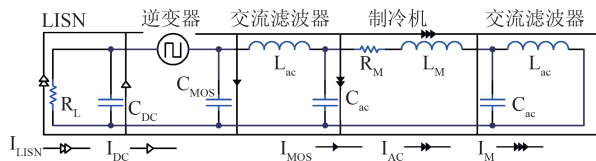


图7 差模干扰机理(未安装滤波器)
Fig. 7 DM mechanism (with no filter)

$$Z_{inv} = \frac{1}{j\omega C_{MOS}} // \left((j\omega L_{ac} // \frac{1}{j\omega C_{ac}} + R_M + j\omega L_M) // \frac{1}{j\omega C_{ac}} + j\omega L_{ac} \right), \quad (4)$$

$$Z_{LOAD} = R_L // \frac{1}{j\omega C_{DC}}, \quad (5)$$

$$V_{LISN} = V_{DM} / (Z_{inv} + Z_{LOAD}) * Z_{LOAD}. \quad (6)$$

将非线性因素带入,借助仿真计算可以得到差模干扰的幅频特性。考虑使用二阶滤波器,使用逼近法^[9],可以得到差模抑制需求为 $f_{need}=21$ kHz 及 $A_{DM_attenuation}$ (dB) = 12 dB。借助仿真计算,可以提取差模通路的频率阻抗特性如图8所示。

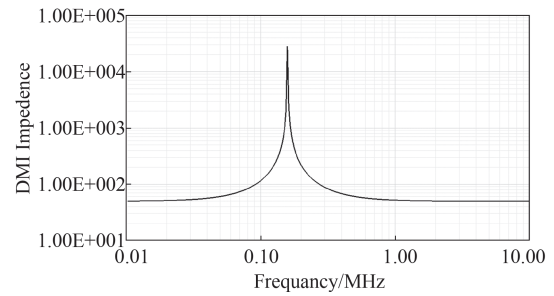


图8 差模耦合通路阻抗特性
Fig. 8 Impedance characteristic of DM coupling path

分析可以得到,除去 150 kHz 频率附近由于谐振导致的阻抗激增,差模整体阻抗处于较小的量级,处于 50Ω 大小,适用于L型滤波器拓扑结构,考虑使用二阶L型滤波器,加入滤波器后的差模干扰电流耦合路径如图9所示。

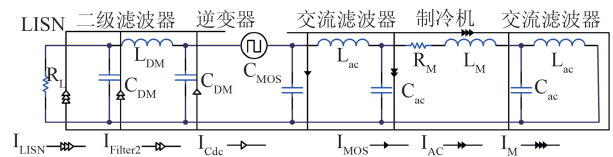


图9 差模干扰机理(安装滤波器)
Fig. 9 DM mechanism (with filter)

可以计算:

$$I_{DM} = V_{DM} / \left(\frac{1}{j\omega C_{dc}} // (j\omega L_{DM2} + \frac{1}{j\omega C_{DM2}} // R_L) + Z_{inv} \right), \quad (7)$$

$$Z_{inv} = \frac{1}{j\omega C_{MOS}} // \left((j\omega L_{ac} // \frac{1}{j\omega C_{ac}} + R_M + j\omega L_M) // \frac{1}{j\omega C_{ac}} + j\omega L_{ac} \right), \quad (8)$$

$$V'_{LISN} = I_{DM} * R_L / \left(\left(1 + \frac{R_L}{Z_{CDM2}} \right) \left(1 + \frac{Z_{LDM2}}{Z_{CDM1}} \right) \right), \quad (9)$$

插入损耗计算可得:

$$A_{DM} = dB(V_{LISN} / V'_{LISN}) \quad (10)$$

结合式(7,10)及抑制需求,通过计算仿真可以得到滤波器参数,通过调整滤波器为平衡形式以协助抑制共模^[10],最终参数如表1所示。

表1 差模滤波器参数表

Table 1 Parameter of DM filter

元器件	L_{DM}	C_{DM}
数值	500 μ H	0.5 μ F

3.2 共模干扰机理及滤波设计

与差模干扰不同,共模干扰的耦合通路很大程度上取决于各类寄生参数,通过从仿真模型中提取出共模干扰的等效机理电路如图10所示。

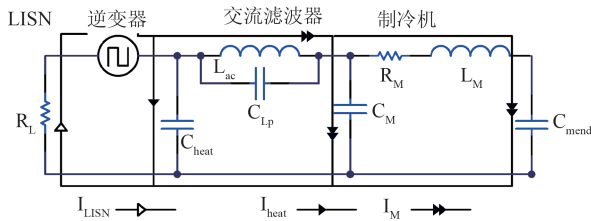


图10 共模干扰机理(未安装滤波器)

Fig. 10 CM mechanism (with no filter)

其中 C_{heat} 为 MOS 管对散热器的寄生参数, L_{ac} 和 C_{Lp} 为驱动输出交流电感及其寄生电容, C_m , R_m , L_m 和 C_{mend} 为提取出来的制冷机无源模型,可以得到:

$$V_{LISN} = V_{CM} * R_L / (Z_{CM} + R_L) \quad (11)$$

$$Z_{CM} = \frac{1}{j\omega C_{heat}} // \left((j\omega L_{ac} // \frac{1}{j\omega C_{Lp}}) + (R_M + j\omega L_M + \frac{1}{j\omega C_{mend}}) // \frac{1}{j\omega C_M} \right) \quad (12)$$

借助仿真计算,可以得到共模干扰的幅频特性,在使用二阶滤波器的条件下,使用逼近法^[9],可以得到共模抑制需求为 $A_{CM_attenuation} = 23$ dB, $f_{need} = 473$ kHz。通过计算,可以提取共模干扰通路的频率阻抗特性 Z_{CM} ,如图11所示。

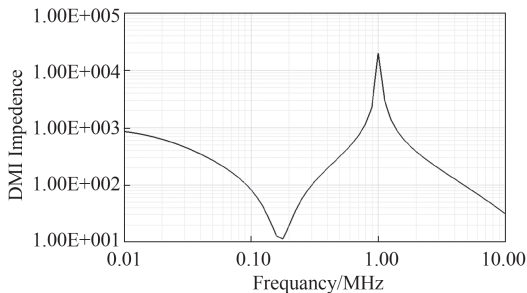


图11 共模耦合通路阻抗特性

Fig. 11 Impedance characteristic of CM coupling path

分析得知,除在 150 kHz 附近谐振处具有较小阻抗,其余频段的阻抗均为较大数量级。结合滤波器拓扑特性,选择二阶 Γ 型滤波器,安装后的干扰电流耦合路径如图12所示。

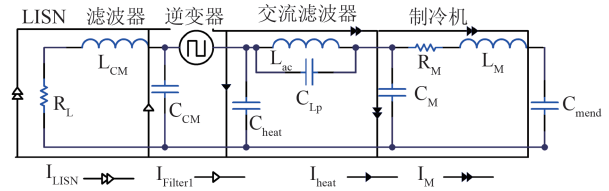


图12 共模干扰机理(安装滤波器)

Fig. 12 CM mechanism (with filter)

$$I_{CM} = V_{CM} / (Z_{CM} + (R_L + j\omega L_{CM}) // \frac{1}{j\omega C_{CM}}) \quad (13)$$

$$Z_{CM} = \frac{1}{j\omega C_{heat}} // \left((j\omega L_{ac} // \frac{1}{j\omega C_{Lp}}) + (R_M + j\omega L_M + \frac{1}{j\omega C_{mend}}) // \frac{1}{j\omega C_M} \right) \quad (14)$$

$$V'_{LISN} = I_{CM} * R_L * ((R_L + j\omega L_{CM}) // \frac{1}{j\omega C_{CM}}) / (R_L + j\omega L_{CM}) \quad (15)$$

共模插入损耗如式:

$$A_{CM} = dB(I_{LISN} // I'_{LISN}) \quad (16)$$

结合式(13,16)和共模抑制需求,利用仿真可以计算得到共模参数如表,考虑安全因素,调整 Y 电容不超过 0.1 μ F。计算得到的共模电感量小于平衡差模电感,所以不再需要单独增加额外的共模电感。此外通过增加 RC 降 Q 网络,降低高 Q 值导致的谐振^[10]。

3.3 滤波器拓扑结构及性能

最终 EMI 滤波器拓扑如图所示,参数如表 1 和表 2 所示。

借助仿真计算,得到应用于该制冷机驱动系统时滤波器差模和共模的插入损耗如图 14(a-b)所示。

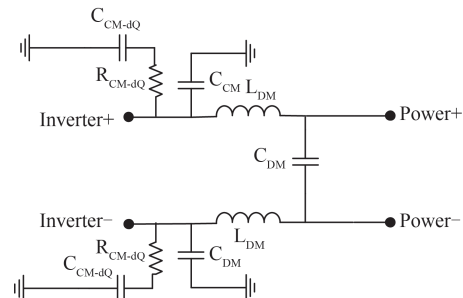


图13 滤波器拓扑结构图

Fig. 13 Topology of EMI filter

表 2 共模滤波器参数

Table 2 Parameter of CM filter

元器件	C_{CM-dQ}	C_{CM}	R_{CM-dQ}
数值	0.1 μF	0.1 μF	85 Ω

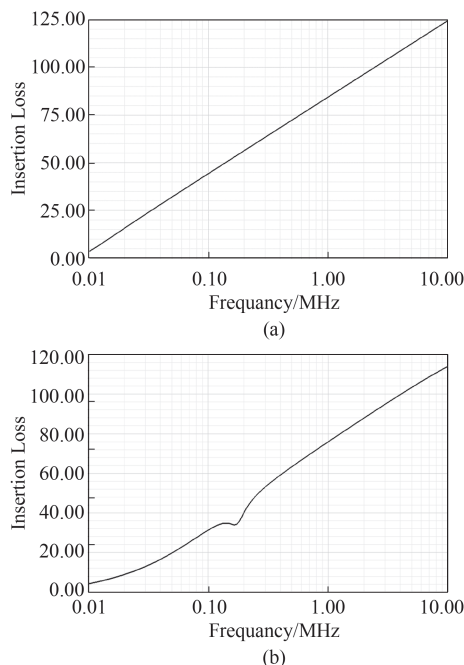


图 14 滤波器插入损耗 (a)差模, (b)共模

Fig.14 Insertion loss of filter (a)DM, (b)CM

4 实验验证

通过搭建符合 GJB151A 标准的 CE102 实验测试平台,其中制冷机采用真实杜瓦的短波红外制冷机,供电电压直流 42 V, PWM 频率为 21 kHz。

得到滤波前和滤波后,仿真和测试的结果如图 15 所示,对比可以看出,联合仿真模型能够精确的仿真出滤波前后传导干扰的幅频特性,并能够在电路设计阶段高效的辅助抑制设计,使得符合干扰抑制标准的同时,有效的降低滤波器设计冗余。但实际实现时滤波器性能与仿真还存在一定差异,分析与滤波器所选用器件的寄生效应和材料非线性因素相关。

5 结论

针对红外制冷机驱动系统的各个独立器件的特性入手,建立了驱动系统的电磁干扰的联合仿真模型,从理论层面定量分析了驱动系统差模与共模的干扰机理。结合计算和仿真,分析了源负载的阻抗特性与滤波器性能的关系。结合机理分析,定量地设计了滤波器并完成了滤波器的优化,通过实验

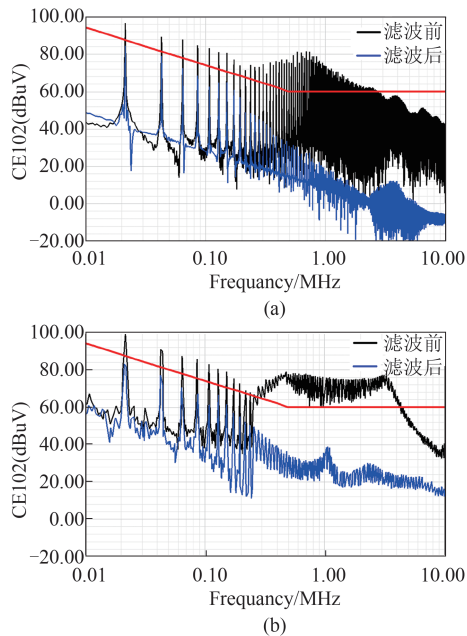


图 15 CE102 结果(安装滤波器前后)(a)仿真结果, (b)测试结果

Fig.15 Result of CE102 (with filter vs. no filter) (a) simulation result, (b) test result

验证了该电磁干扰滤波器设计优化方法的可行性与高效性。

通过理论和实验可以得出结论:

1) 结合各个元器件特性独立建模再联合仿真的方法,可以有效地实现系统干扰机理的精准仿真,抑制前后的仿真与实验的结果具有较高的吻合性。

2) 随着频率增大,不同滤波器拓扑的插入损耗与源和负载阻抗特性具有不同的相关性,并随着阻抗增大,其变化率都会减小,设计滤波器时应结合具体干扰的频率阻抗特性进行拓扑选择。

3) 基于干扰机理的滤波器设计优化方法,可以使得驱动系统高效的精准的满足各类应用需求标准,并能够有效地降低滤波器的设计冗余。

References

- [1] WANG Han, LI Shi-Long, ZHEN Hong-Lou, *et al.* A tubular quantum well infrared photodetector under vertically-incident light coupling [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王晗, 李世龙, 甄红楼, 等. 一种可吸收垂直入射光的管状量子阱红外探测器. 红外与毫米波学报), 2017, **36** (2): 191-195.
- [2] LIU Shao-Shuai, JIANG Zhen-Hua, ZHANG An-Kuo, *et al.* Study on high energy efficiency 30 K single-stage pulse tube cryocooler for a space infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘少帅, 蒋珍华, 张安阔, 等. 空间红外探测用 30 K 单级脉管制冷机高效研究. 红外与毫米

- 波学报), 2018, **37**(04):21-28.
- [3] MOU Hong-Shan, CHEN Jing, QIAO Yu-Hua. Design of a fast cool-down IRFPA image guidance system[J]. *J.Infrared Millim.Waves* (牟宏山,陈静,乔育花.快速制冷型红外焦平面成像制导系统设计.红外与毫米波学报), 2016, **35** (3):310-316.
- [4] WEI Guang, MA Shao-Jun, LI Yuan-Ming, *et al.* Electromagnetic compatibility design and experiment on controller of Stirling cryocooler for space use[J]. *Cryo. & Supercond.* (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.低温与超导), 2013, **41**(12): 28-31.
- [5] ZHENG Xin-bo, PAN Ming, PEI Yun-tian. Research on EMC Problems of Stirling Cooler [J]. *Infrared Technology* (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).
- [6] Shim H, Kim H, Kwack Y, *et al.* Inverter modeling including non-ideal IGBT characteristics in Hybrid Electric Vehicle for accurate EMI noise prediction[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), IEEE, 2015.
- [7] Chen M, Sun X, Huang L. A method to model the conducted EMI propagation path for PFC [C]. Power Electronics and Motion Control Conference, IEEE, 2009.
- [8] 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]. 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, Korea, 2013
- [9] Maillet Y, Lai R, Wang S, *et al.* High-Density EMI Filter Design for Dc-Fed Motor Drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, **25**(5):1163-1172.
- [10] Ozenbaugh R L, Pullen T M. *EMI Filter Design, Third Edition*[M]. CRC Press, 2011.