

文章编号: 1001 - 893X(2012)04 - 0586 - 05

一种腔体滤波器悬臂螺旋振子的抗冲振优化设计^{*}

胡国高

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘 要: 针对大功率腔体滤波器螺旋振子刚度小, 在载机环境条件下特性响应曲线不稳定的问题, 提出了一种螺旋振子的抗冲振创新设计思路与方法。通过铝材铣制成梯形截面螺旋振子增加其刚度, 采用对称局部环抱的异形结构件对悬臂螺旋振子进行加固以提高抗冲振能力。优化设计后的振子顺利通过载机环境试验考核和电性能指标测试。该设计方案已成功应用于大功率跳频滤波器设备中, 效果良好。

关键词: 腔体滤波器; 跳频滤波器; 悬臂; 螺旋振子; 抗冲振设计

中图分类号: TN703 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.04.033

Optimization Design of Helix Resonator of Cavity Filter for Improving the Impact and Vibration Resistance Capability

HU Guo-gao

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: The rigidity of helix resonator of high - power cavity filter is low and the characteristic response curve is unstable in the environmental condition of carrier aircraft. To solve the problems, this paper introduces a novel measure to improve the impact and vibration resistance capability. Aluminum milling trapezoidal section and special - shaped symmetrical structure is used to reinforce the cantilevered helix resonator in order to enhance the resistance of impact and vibration. The helix resonator optimized has passed the check of environmental test in the carrier aircraft and electrical properties. The design has been successfully applied in high - power frequency hopping filter and a good effect is obtained.

Key words: cavity filter; FH filter; cantilever; helix resonator; anti-vibration design

1 引 言

在现代军事电子通信系统中, 滤波器是其中的重要部件之一, 其各项性能的好坏直接影响通信系统的接收灵敏度和发射功率^[1], 而腔体滤波器因具有稳定的电性能指标、较高的可靠性、优越的综合性能而被广泛应用。腔体滤波器主要指标是插入损耗和驻波, 根据文献[2]的研究结论, 谐振腔尺寸匹配性与谐振振子的稳定性分别是插入损耗和驻波的主

要影响因素。腔体滤波器在其谐振腔尺寸一定的情况下, 要降低其插入损耗, 内部谐振振子尺寸和谐振腔需要匹配, 同时谐振振子在谐振腔内合理布局, 使谐振腔内部电场和磁场分布科学合理且相对稳定。通过查阅相关资料, 以往典型滤波器的螺旋式谐振振子大多数是用铜丝绕制而成, 铜丝绕制的螺旋振子自身刚度差, 加工工艺过程复杂, 加工装配公差很难控制, 难于采取有效措施控制其振动响应量, 其固有频率相对较低, 容易产生共振现象, 谐振振子摆动而改变腔体滤波器的内部电磁场分布, 影响其组成

^{*} 收稿日期: 2011 - 11 - 11; 修回日期: 2012 - 03 - 27

器件的电性能。

随着电子产品的载机环境适应性要求的不断提高,腔体滤波器的振动环境适应性越来越受到人们的关注,要降低腔体滤波器的插入损耗,减小体积和重量,需对腔体滤波器谐振振子的结构形式和加固方法进行优化设计,振子加固介质材料进行应用研究,因此谐振振子的抗冲振优化设计与加固材料应用研究在腔体腔滤波器结构设计中占有尤为重要的地位。

2 谐振腔滤波器理论模型

腔体滤波器的谐振振子采用铝材铣制成的梯形截面螺旋振子,据模态分析理论^[3],腔体滤波器谐振振子可视为一个多自由度悬臂梁振动系统,其理论模型如图 1 所示。

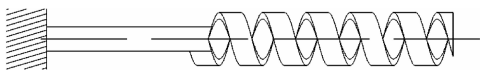


图 1 腔体滤波器理论模型
Fig. 1 The theoretical model of cavity filter

据模态分析理论,其动力学方程如式(1)所示:
$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K](x) = \{f\} \quad (1)$$

式中, $\{f\}$ 为 N 维激振力向量; $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ 分别为 N 维位移、速度和加速度响应向量; $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为振动系统的质量与刚度矩阵。对式(1)作摄动变形,可得式(2):

$$[M + \Delta M]\{\ddot{x}\} + [C + \Delta C]\{\dot{x}\} + [K + \Delta K]\{x\} = \{f + \Delta f\} \quad (2)$$

式中, ΔM 、 ΔC 、 ΔK 与 Δf 分别是质量矩阵 $[M]$ 、阻尼矩阵 $[C]$ 、刚度矩阵 $[K]$ 与外部激励力向量 $\{f\}$ 的摄动量。

由式(2)可知,降低外部环境机械振动对腔体滤波器的影响的基本途径有两个:其一,减小外部环境对振动系统的激励力,即实现上式中的 $\{f + \Delta f\}$;其二,改变振动系统本身的动力学特性,提高抗振动影响的能力,即实现上式中的 $[M + \Delta M]$ 、 $[C + \Delta C]$ 与 $[K + \Delta K]$ 。

在实际工程应用中,改变腔体滤波器的外环境振动力一般不易实现,提高腔体滤波器的悬臂螺旋振子抗振性的主要途径是改变振动系统的 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 。就具体实现方法而言,则有结构动力学修改提高螺旋振子的动刚度,即改变 $[M]$ 和 $[K]$;附加振动控制结构,即改变 $[C]$ 。

而结构动力学修改方法是通过修改系统动力学特性使振动系统具有良好的动力学特性以达到抗冲振目的,它不需要增加任何附加部件,一般是优先选择的振动控制方法,但是腔体滤波器的螺旋振子是悬臂梁结构形式,修改系统动力学特性有限,需要在改善系统本身动力学特性的同时增加加固结构件。本文将以改变螺旋振子刚度和增加结构加固件进行结构动力学修改振动分析与抗冲振控制设计,找到一种腔体滤波器抗冲振创新设计与优化的思路和方法。

3 加固介质材料选择

腔体滤波器要满足低插损、大功率要求,在确定螺旋振子结构刚度情况下,使加固介质材料对电性能指标影响最小。螺旋振子对称放置在微波腔中,接地端设计在腔体侧壁,使其表面电流相对稳定,电场分布相对均匀,磁场变化相对较小。螺旋振子通过接地端与腔体连接,形成悬臂简支梁结构形式。根据动力学分析,对螺旋振子增加加固介质以改变 $[C]$,提高抗冲振性能。通过查阅工程材料手册^[4]及对比试验测试,采用使用温度广泛、介电常数与介电损耗较好且加工性能良好的聚四氟乙烯作为加固介质材料最优,满足电子设备的工作温度范围 $(-55^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C})$ 的要求,且对腔体滤波器的插入损耗等电性能指标影响最小。

4 抗冲振设计

腔体滤波器主要由谐振腔和分布在谐振腔内的一系列谐振振子组成,谐振腔可以认为是一个强度足够的刚体,其抗冲振设计简单易实现,因而抑制谐振振子的振动响应量或降低共振放大率便成为该类滤波器抗冲振设计的主要目标。由于螺旋式谐振振子是一种悬臂梁结构形式,在车载、机载等严酷环境下,谐振振子会在腔内往复摆动,同时可能产生共振现象,使其振动响应量变大,需约束该螺旋式谐振振子的自由度,对其进行抗冲振优化设计,抑制振动响应量和降低共振放大率,防止振动环境下改变腔体滤波器内部的电磁场分布,以解决腔体滤波器性能稳定性和可靠性问题。

谐振振子的抗冲振优化设计主要对振子本身刚度优化设计和采用非金属加固结构件对其自由度进行限制。为了提高谐振振子自身刚度和固有频率,典型铜丝绕制的谐振振子常采用增加振子线圈直径

和与之匹配的谐振腔尺寸,其体积和重量无法减小。同时对铜丝绕制的悬臂谐振振子灌封加固,增加约束,提高其抗冲振性,其维修工艺性差,灌封对谐振腔内部电磁场有一定影响,会增大插入损耗,降低电性能指标。对谐振振子结构形式进行创新优化设计,并对新结构的螺旋振子进行动力学特性分析和电性能仿真,在腔体尺寸已定条件下,制作多种铜丝绕制线圈和截面尺寸不同的梯形螺旋振子,对比螺旋振子刚度和电性能指标,得出采用铝材铣制而成的梯形螺旋式谐振振子自身刚度较好,可以减小其振动响应量和降低其共振放大率。同时对其进行抗冲振控制设计,创新优化设计加固件的结构形式,提高系统的一阶固有频率,避免在车载、机载环境条件下产生共振现象。但是任何加固介质的加入都会改变腔体滤波器内部的介电常数,增加内部介电损耗,影响谐振腔内部电磁场分布^[5-6],通过计算机对加固介质的结构形式进行多次仿真及优化迭代设计,制作了灌封、全部嵌套、局部内嵌和局部环抱结构样件,结合试验件实物测试,确定螺旋式谐振振子的加固介质结构形式采用异形局部环抱结构方式对其性能影响最小。螺旋振子环抱加固结构形式见图 2。通过测试仪器对腔体滤波器的插入损耗进行测试,在腔体滤波器加入异形局部环抱加固件后的插入损耗只比原来的降低0.002 dB,对性能几乎没有影响。该加固技术对悬臂螺旋振子进行有效加固,保证了性能指标的稳定,满足较为严酷的机载、车载环境条件要求。

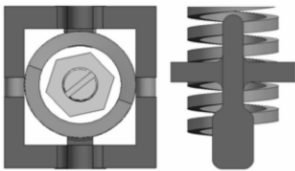


图 2 螺旋振子环抱加固结构形式
Fig.2 The strengthening structure of helix resonator

5 仿真分析

腔体滤波器中的螺旋式谐振振子在实际工作条件下,常因宽带随机振动使其自由端产生相对较大位移而改变谐振腔内部电磁场分布,导致器件性能下降,在滤波器高可靠性、高集成化的趋势下,对螺旋式谐振振子的结构形式和抗冲振设计进行优化设计势在必行。由于主要分析螺旋振子的固有频率,

将腔体作为理想刚体,因此在本文分析中,主要建立螺旋振子的有限元模型。在 UG 中建立螺旋振子的实体模型,然后导入 ANSYS 中对其进行有限元分析。谐振振子是螺旋式铣制微弹性结构件,结构形式微螺旋状,此设计中采用 HEX 单元来模拟螺旋振子实体。在螺旋振子没有进行加固设计的情况下进行模态分析及随机振动分析,将接地端与腔体壁简化为刚性连接,其螺旋振子的一阶振型见图 3。将螺旋振子的 6 个自由度进行约束,选择 block - lanczos 模态扩展方法进行模态分析^[7],螺旋振子加固后的一阶振型见图 4。

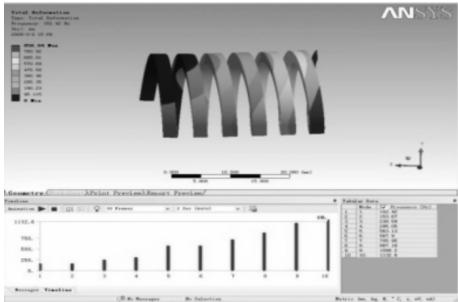


图 3 振子的一阶阵型
Fig.3 The first order system of resonator

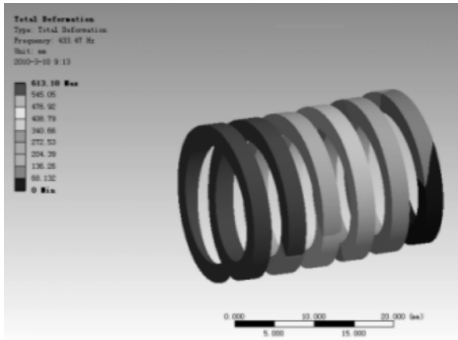


图 4 振子加固后的一阶阵型
Fig.4 The first order system of strengthened resonator

从图 3 可看出,不加固的螺旋振子位移变化较大,明显改变了腔体内部的电磁场分布,对该类滤波器的电性能影响较大,不能在车载、机载环境下正常工作,必须对螺旋振子进行加固设计。从图 4 可看出,加固后的螺旋振子位移变化明显变小,对腔体内部的电磁场改变相对较小,能够在车载、机载环境下正常工作。

用矢量网络分析仪对螺旋振子进行电性能测试,从图 5 的测试曲线可看出,在螺旋振子工作情况下,不加固的螺旋振子位移变化较大,驻波较大,特

性响应极差,曲线抖动较厉害,电性能指标不稳定,不能满足车载、机载环境下的正常工作。从图 6 的测试曲线可看出,加固后的螺旋振子位移变化较小,驻波较小,特性响应较好,曲线平稳,能够满足车载、机载工作环境的要求。通过 HFSS 软件对加固介质进行建模仿真和试验件的调试测试,载机振动条件下的仿真与测试结果见表 1,最终确定采用异形局部环抱结构方式其性能影响最小。

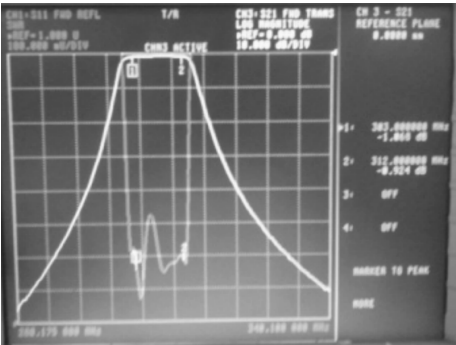


图 5 振子振动测试曲线
Fig.5 The vibration test curve of resonator



图 6 加固振子振动测试曲线
Fig.6 The vibration test curve of strengthened resonator

表 1 腔体滤波器振动条件下插入损耗、驻波仿真与测试结果
Table 1 The insertion loss,standing wave simulation and test results of cavity filter in the condition of vibration

方法	插入损耗/dB		驻波	
	仿真	实测	仿真	实测
铜丝绕制	1.35	1.41	1.25	1.42
铜丝灌封加固	1.40	1.45	1.25	1.40
铝材铣制	1.00	1.05	1.25	1.27
铝材内嵌加固	1.20	1.24	1.25	1.35
铝材环抱加固	0.90	0.93	1.25	1.26

由于在设备工作环境下,螺旋振子出现随机振动,自由端产生位移,从而导致电性能失效。从图中可以看出,螺旋振子位移变化较大的部分主要是没

有固定的自由端,与简支梁结构模型一致,故可得出结论:有限元模型准确可信,基本反应了螺旋振子实际模型。

不加固的螺旋振子第一阶频率约为 153 Hz,由倍频法可知容易产生共振现象,需要对其进行加固,以提高第一阶频率,使之符合频率要求。加固的螺旋振子第一阶频率约为 433 Hz,提高了螺旋振子的固有频率,螺旋振子第一阶和第二阶固有频率均为弯曲振型,振子自由端顶部振幅最大,第二阶固有频率为二阶弯曲,振子自由端顶部振幅最大。

6 结 论

本文主要介绍了一种腔体滤波器悬臂螺旋振子的抗冲振优化设计方法,同时应用三维建模软件建立螺旋振子有限元模型,通过模态仿真分析与试验测试相结合,验证了模型的准确性,在进行的随机振动分析中明确了初始设计螺旋振子的动态特性。通过对模态和随机振动有限元计算结果的分析确定了模型的振幅较大位置,通过铝材铣制成梯形截面螺旋振子增加自身刚度,采用对称局部环抱的异形加固件对悬臂螺旋振子进行加固来提高腔体滤波器抗冲振能力,试制的加固结构通过了环境试验,验证了有限元模型分析的可靠性和抗冲振设计方案的可行性。同时,通过 HFSS 软件对腔体滤波器进行内部电磁场分析仿真,在腔体滤波器工作时,其螺旋振子作为一个梯形截面的电感线圈,根据电磁场理论^[8],线圈内部其磁力线较密,利用螺旋振子周围空间电磁密度分布规律,谐振振子采用外部环抱比内部嵌套性能较优,实测证明与分析一致,效果良好。随着新型材料的不断发展,需要进一步研究加固材料特性,选择加工性、介电损耗比聚四氟乙烯更好的加固件材料。通过螺旋振子自身结构优化和加固件优化设计迭代,找到了抗冲振创新优化设计思路和方法,解决了大功率跳频滤波器在车载和机载环境条件下特性响应曲线不稳定、驻波变化大、插入损耗较大的技术难点。

参考文献:

[1] 甘体国.现代微波滤波器的结构与设计[M].北京:科学出版社,1981.
GAN Ti - guo.The Structure and Design of Modern Microwave Filter[M]. Beijing: Science Press,1981.(in Chinese)
[2] 杨玲玲.高性能跳频滤波器设计[J].电讯技术,2011,51

- (7):161 – 165.
- YANG Ling – ling. Design of a High – performance Frequency – hopping Filter [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(7):161 – 165. (in Chinese)
- [3] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- FU Zhi – fang. Parameter Identification and Analysis for Libration Mode[M]. Beijing. Mechanical Industry Press, 1990. (in Chinese)
- [4] 工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- The Editorial Committee of Practical Manual of Engineering Materials. The Practical Manual of Engineering Materials [M]. Beijing: China Standard Press, 1988. (in Chinese)
- [5] 熊长武, 胡国高, 王勇. 射频电导轮廓的概念及应用[J]. 电讯技术, 2008, 48(6): 21 – 24.
- XIONG Chang – wu, HU Guo – gao, WANG Yong. The Concept and Application of RF Conductance Resonators [J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48 (6): 21 – 24. (in Chinese)
- [6] 熊长武. 机械结构因素对谐振腔无载 Q 值的影响[J]. 电讯技术, 2011, 51(6): 146 – 150.
- XIONG Chang – wu. Influence Analysis of Mechanical Structure Factors on Unloaded Q Value of Resonant Cavity [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51 (6): 146 – 150. (in Chinese)
- [7] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- GONG Shu – guang. Analysis for Engineering Application Example of ANSYS [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 宋文森. 现代电磁场理论的工程应用基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- SONG Wen – miao. The Basis of Engineering Application of Modern Electromagnetic Field Theory [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:

胡国高(1977—), 男, 四川德阳人, 工程师, 主要从事航空电子产品结构工艺设计方面的工作。

HU Guo – gao was born in Deyang, Sichuan Province, in 1977. He is now an engineer. His research concerns the structure and design technology of aviation electronic equipment.

Email: hugg_gcx@163.com