

〈制冷技术〉

旋转式微型斯特林制冷机电磁屏蔽工艺改进

吉凤强, 陈 军, 赵玉琼, 李飞艳, 唐天敏, 聂喜亮, 李黎彬

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 基于电磁屏蔽理论及相关影响因素, 针对某型旋转式微型斯特林制冷机在正常工作状态中产生的电磁干扰影响成像效果的问题, 提出了缝隙改进和屏蔽体良好接地的解决办法, 并通过试验验证可行性。然后结合实际情况, 将该解决办法推广至其他型号制冷机, 系统提出缝隙、过孔、线缆和连接器的相关改进措施, 并进行电磁兼容测试, 最后在工程实践中推广应用。

关键词: 旋转式微型斯特林制冷机; 电磁屏蔽; 缝隙; 连接器

中图分类号: TN304.2; O484.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2019)03-0284-06

Electromagnetic Shielding Technology for Rotating Micro Stirling Refrigerators

Ji Fengqiang, CHEN Jun, ZHAO Yuqiong, LI Feiyan, TANG Tianmin, NIE Xiliang, LI Libin

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Based on electromagnetic shielding theory and related influencing factors, a solution to improve the gap and grounding of the shield for the electromagnetic imaging effect of a rotating micro-Stirling cooler under normal working conditions was proposed. Feasibility of this method was verified through experiments. Then, solutions were derived for other types of rotating refrigerators. Several improvement measures for gaps, vias, cables, and connectors, and methods for electromagnetic compatibility testing were proposed, and applied in engineering practice.

Key words: rotary miniature Stirling refrigerator, electromagnetic shield, slot, connector

0 引言

旋转式微型斯特林制冷机组件(以下称制冷机组件)主要利用斯特林循环原理, 能为红外探测器芯片提供 60 K~100 K 左右的低温工作环境, 具有体积小、重量轻、控温精度高以及制冷效率快的特点, 已经成为红外热成像系统的首选制冷装置。

制冷机组件作为一个数字电路和模拟电路集成的机电一体化产品, 是热成像系统中主要的电磁干扰源之一。通过对制冷机组件电磁屏蔽工艺设计的改进, 可以切断电磁辐射的传播途径, 抑制制冷机的电磁干扰, 有利于红外成像系统质量的提高。因此, 对制冷机组件电磁屏蔽的改进设计是很有意义的。

1 电磁屏蔽介绍

用于减弱某些源所产生的空间某个区(不包括这些源)内的电磁场的结构, 称为电磁屏蔽^[1]。它是以

某种材料(通常为金属材料)制成的屏蔽外壳, 将需要屏蔽的区域进行封闭和覆盖, 使壳内的发射源产生的电磁场不能透过壳体向外辐射, 和外来的辐射电磁场也不能透过壳体对壳内进行干扰(或进出该区域的电磁能量将受到很大的衰减)。电磁屏蔽作为线性系统, 具有可逆性, 是抗电磁干扰的重要手段。

1.1 电磁屏蔽原理

图 1 为电磁屏蔽原理示意图, 是利用屏蔽体对外部电磁波和内部电磁波均起着反射能量(电磁波在屏蔽体上的界面反射)、吸收能量(涡流损耗)和抵消能量(电磁感应在屏蔽层上产生反向电磁场, 可抵消部分干扰电磁波)的作用, 产生屏蔽效果^[2]。屏蔽效能 SE 可以用不存在屏蔽时空间防护区的场强与存在屏蔽时该区的场强的比值进行表征。若将屏蔽效能细分为反射损耗和吸收损耗, 则其值等于反射损耗 R (一次反射)加上吸收损耗 A , 加上多次反射损耗 B 表示:

$$SE = R + A + B \text{ (dB)}$$

收稿日期: 2018-12-24; 修订日期: 2019-03-03.

作者简介: 吉凤强, (1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 制冷机电磁兼容。E-mail: 1224024331@qq.com.

其中:

$$A=131.43t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}$$
$$R=\begin{cases} 168.2+10\lg\left(\frac{\sigma_r}{f\mu_r}\right) & (\text{平面波}) \\ 20\lg\left(5.35r\sqrt{\frac{f\sigma_r}{\mu_r}}+0.354+\frac{1.17\times10^{-2}}{r}\sqrt{\frac{\mu_r}{f\sigma_r}}\right) & (\text{磁场}) \\ 3.217+10\lg\left(\frac{\sigma_r}{f^3r^3\mu_r}\right) & (\text{电场}) \end{cases}$$
$$B=10\lg\left[1-2\times10^{-0.1A}\cos(0.23A)+10^{-0.2A}\right]$$

式中: σ_r 为相对电导率; μ_r 为相对磁导率; f 为电磁波频率; r 为辐射源到屏蔽体的距离; t 为屏蔽材料的厚度。

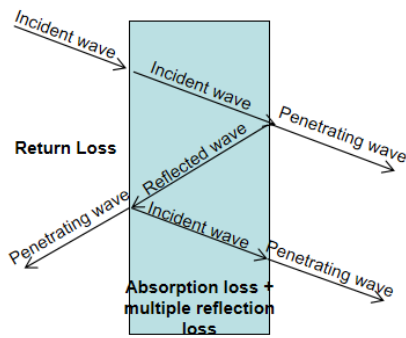


图1 电磁屏蔽原理示意图

Fig.1 Electromagnetic shielding principle diagram

从上述公式可以看出: 金属屏蔽体的导磁、导电能力与吸收损耗、反射损耗都有关系, 导磁、导电能力越强, 吸收损耗越大; 所接收的电磁波频率越高, 金属吸收能力越强, 在高频中信号的屏蔽衰减越明显; 屏蔽体的厚度也与吸收损耗成正比, 屏蔽体越厚, 吸收损耗越大。

1.2 影响电磁屏蔽的因素

影响金属屏蔽体的因素是多方面, 但从屏蔽体自身状态分析, 则受到屏蔽外壳材质、物理结构的影响, 包括金属材料参数、屏蔽体结构、缝隙和过孔^[3]。

1.2.1 屏蔽材料

在绝大多数工程应用中, 电磁屏蔽主要由常用金属(铜、铝、钢)制成, 表1列举了常用金属材料的 μ_r (相对磁导率)及 σ_r (相对电导率)值, 其中铂和银的相对磁导率和相对电导率相近; 纯铁和不锈钢的相对电导率值较低, 但其两者的相对磁导率高。图2为常用均匀金属材料(铜、铝、铅、钢)的屏蔽衰减(厚度为0.1mm)与频率之间的关系, 可得出: 均匀厚度的金属屏蔽体在 10^6 Hz以下的频带内, 衰减效果

相似, 其中铜和铝屏蔽体衰减效果最佳; 而在更高的频谱内占优势的是钢屏蔽体, 随着频率的增长, 钢的屏蔽衰减增长速率远大于其他3种金属, 其原因在于钢的相对导磁率大, 在高频段时屏蔽体吸收效果明显。因此, 由于不同屏蔽材料的材质参数不同, 在实践应用中需要考虑屏蔽材料的使用环境、加工条件、生产成本等多方面因素。

表1 常用材料的 σ_r 及 μ_r 值

Table 1 Relative magnetic permeability and relative conductivity of commonly used materials

Material	σ_r	μ_r
Ag	1.05	1
Au	0.7	1
Al	0.61	1
Pt	1	1
Cu	0.26	1
Fe	0.17	1000
12CrNi3A	0.02	1000

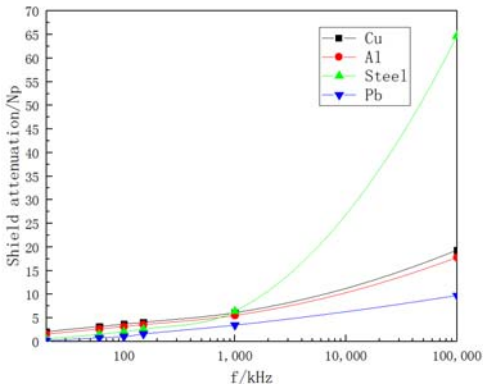


图2 均匀金属的屏蔽衰减(厚度为0.1 m)

Fig.2 Shielding attenuation of uniform metals (thickness is 0.1 m)

1.2.2 屏蔽体结构

屏蔽体的屏蔽效能还和屏蔽体的物理结构和具体参数有关^[4]。在实际工程应用中, 屏蔽体单体结构主要分为3种: 平面形屏蔽体、圆筒屏蔽体和球壳屏蔽体, 复杂的结构外形可以看做三者的结合体。在参量 N 中各种屏蔽体的波阻抗值是不一样的, 介电媒质对各种电磁波呈现的波阻抗可用下列公式来表示(当 $n=1$ 时):

平面波: $Z_d^r=j\omega\mu_02r_0$

圆柱波: $Z_d^c=j\omega\mu_0r_0$

球面波: $Z_d^s=j\omega\mu_0r_0/2^{1/2}$

$$Z_m=\sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}}$$

式中: r_0 为半径; ω 为辐射频率; μ_0 为磁导率; μ 为相对磁导率; σ_0 为电导率; σ 为相对电导率; t 为厚度。

从理论上可以通过测量尺寸参数结合相关计算公式算出完整屏蔽导体的理论屏蔽系数, 公式如下:

$$S = \frac{1}{ch\gamma t} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) th\gamma t}$$

式中: $N = \frac{Z_d}{Z_m}$; $\gamma = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_0}$

屏蔽系数和屏蔽衰减之间可以进行数值等量对换。屏蔽金属的屏蔽系数值在 0 和 1 之间, 值越低, 对应的屏蔽衰减值越大, 屏蔽效能也越好^[5]。从计算公式中可以得出: 屏蔽系数的大小与屏蔽体的材料、屏蔽体的厚度和屏蔽体结构半径有直接关系。

1.2.3 孔缝泄露

理想的金属屏蔽壳材质均匀, 金属颗粒饱满, 无缝隙和断裂, 具有完好的导电连续性。对于封闭的屏蔽外壳, 外射场或内射场仅能透过屏蔽壁穿入或穿出屏蔽体, 若恰当地选择屏蔽材料及其壁厚, 原则上可获得任意大的屏蔽效能^[6]。但是在现实生活中, 完全封闭的屏蔽体很少存在, 产品上通常会出现过孔、缝隙或者横穿导体。若屏蔽体不完整, 将为场的穿透增加了附加的渠道, 造成电磁场泄露, 影响屏蔽体导电连续性, 从而大大降低屏蔽效能。

孔缝泄露的原理可以通过电路理论来解释, 当屏蔽体受到电磁波透射时会产生感应电流 \vec{J}_s :

$$\vec{J}_s = \vec{n} \times \vec{H}^i$$

但是只有在金属屏蔽体内感应出的感生电流 \vec{J}_s 才会在周围生成与入射场相反方向的磁场, 两者磁通相互抵消, 起到抑制原场的作用。孔缝的存在势必导致金属屏蔽体的导电结构发生变化, 从而导致电流的流动方向发生改变, 则二次场的方向也发生改变, 对原场的抑制能力被削弱。同时未被抵消的电磁场会在屏蔽体的缝隙处形成如图 3 的电压差 \vec{E} , 孔缝处会形成缝隙天线, 引起磁场能量的泄露, 降低屏蔽体的屏蔽效能^[7]。

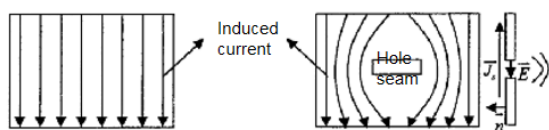


图3 孔缝泄露原理图

Fig.3 Hole leakage schematic diagram

赵婷^[7]通过仿真分析得出: 在开孔过程中, 应开线性尺寸较小的孔, 少开细长孔, 多开方孔或圆孔; 缝隙长度需要根据实际的电磁波频率和腔体结构来

设定, 缝隙长度增加, 腔体的屏蔽效能和谐振点则会降低。因此需要对屏蔽体进行连续性设计, 其主旨为要求屏蔽体及其所开的窗口和缝隙在结合部分应具有良好导电率或导磁率, 不能因为缝隙而断开磁路和最短电流回路。主要的解决办法: 首先在缝隙或过孔处添加导电材料, 延续屏蔽体的导电连续性; 或者修改孔缝的结构和大小, 减少电磁泄露。

虽然影响电磁屏蔽的因素众多, 但是在工程应用中很难面面俱到, 可能改进某一项因素就可以使产品的电磁兼容测试达标或者性能满足要求, 因此需要具体情况具体分析。

2 某型制冷机组件电磁干扰问题分析

某控制器外置型号制冷机组件总体设计如图 4 所示, 产生电磁干扰的部分包括机械制冷机产生的低频交变磁干扰、无刷直流电机换向及绕组上产生的电磁干扰和驱动控制电路中 DC/DC 电源模块、驱动控制模块等产生的电磁干扰。本文着重于切断电磁辐射向外的传播途径, 结合金属屏蔽外壳的特性对工艺设计中存在的问题进行分析。

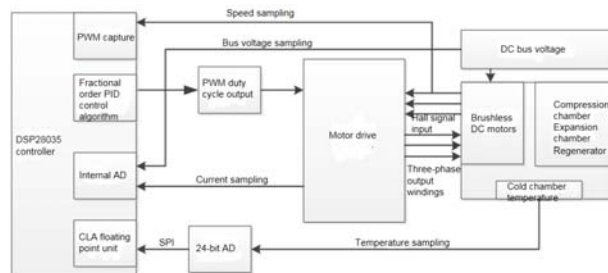


图4 制冷机总体结构设计

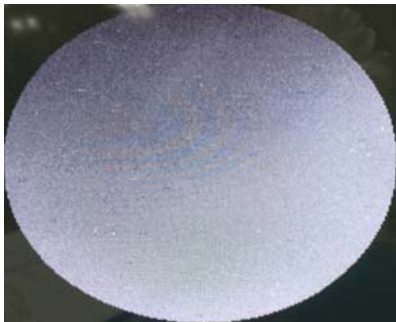
Fig.4 Over all structure Design of refrigerator

2.1 电磁兼容问题分析

首先, 上述制冷机组件在配合整机进行红外成像中, 当制冷机组件和成像电路均稳定工作后, 成像图出现黑白条纹状, 严重影响了成像效果。但是断开制冷机供电系统, 制冷机停止工作, 成像图黑白条纹消失, 成像效果稳定。图 5(a)为制冷机和成像电路同时供电的成像图; 图 5(b)为仅有成像电路独自供电的成像图, 两图对比可以得出, 制冷机自身的电磁干扰对成像质量造成了影响。

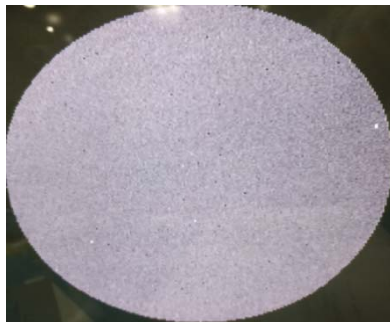
分析其原因: 首先, 制冷机组件外接线缆均进行屏蔽处理, 利用近场探头进行扫描时未发生明显电磁辐射。然后观察制冷机的屏蔽外壳结构, 如图 6 所示, 外壳缝隙明显, 且电机外壳经过阳极氧化处理, 其特点是绝缘、耐腐蚀, 磁钢片导电, 电机外壳与磁钢片通过盖板螺旋挤压组合在一起, 因此外壳不具有导电连续性。图 7 是扫描缝隙处产生的方波图, 频率为

10kHz, 该波形与电机脉冲宽度调制频率相一致, 极大可能是由于缝隙导致电磁外泄。



(a) 制冷机供电成像

(a) Refrigerating machine power supply imaging



(b) 制冷机不供电成像

(b) Non-power supply imaging of refrigerator

图5 红外整机成像图

Fig.5 Infrared complete machine imaging drawing

2.2 整改方案及实验验证

简要分析方波可能是由于缝隙的泄露产生的, 结合相关理论知识, 首先用导电布将电机外壳缝隙处严密包裹, 电机外壳阳极氧化不作处理, 电机外壳与磁钢片和机械制冷机不导通, 扫描测试电机外壳部分, 测试结果如图8所示, 方波消失。进行成像实验时, 黑白条纹显著较少, 但是仍遗留部分小黑点。此改进试验说明方波的产生是由于缝隙处的泄露, 但是改进缝隙处后仍有缺陷。



图6 电机外壳缝隙实拍 Fig.6 Motor housing gap beat

然后再次使用导电布将电机外壳部分全方位严密包裹, 此时电机外壳与机械制冷机导通, 屏蔽层有着良好的导电连续性。再次进行扫描测试和成像试验, 方波消失, 成像效果接近图5(b)所示, 此改进试

验说明制冷机组件屏蔽外壳不仅要解决缝隙泄露问题, 还需要保证屏蔽体的良好接地。

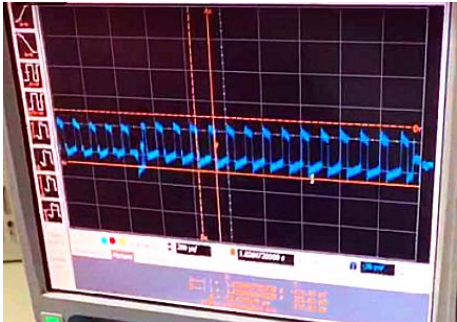


图7 原始缝隙扫描测试方波波形

Fig.7 Original gap scan test square wave form

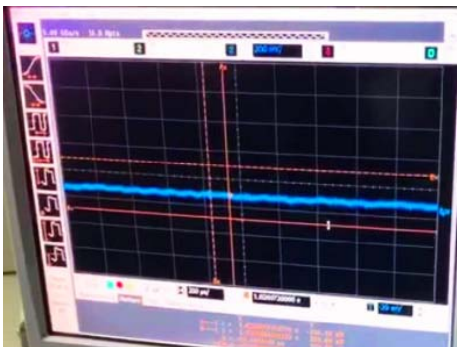


图8 缝隙处理后扫描测试图

Fig.8 Test chart for scanning after gap treatment

用导电布进行外部包裹只是试验验证手段, 不能直接应用在产品上, 因此还需从加工工艺上进行改进。首先制冷机组件电磁屏蔽主要基于静电屏蔽, 要确保屏蔽外壳良好的接地, 因此对于屏蔽体要进行去氧化或者氧化可导电处理; 然后需提高加工工艺技术, 尽可能减小缝隙尺寸, 同时还需在缝隙处添加缝隙屏蔽材料。常见的电磁干扰缝隙屏蔽材料包括: 导电橡胶、导电密封圈和导电布, 不同的屏蔽材料的使用方式和适用环境是不一样的。结合制冷机组件尺寸、环境、结构等要求, 本次试验选择 Electron 导电布作为缝隙的屏蔽材料。将裁定后的导电布置于缝隙处, 通过万用表测量出处理后屏蔽体外壳与机械制冷机外壳之间的阻值低于 0.1Ω , 则说明处理后电机屏蔽壳与机械制冷机外壳之间导通, 并与电路板上接地点相通, 确保电的连续性良好; 然后通过近场探头对添加导电布的缝隙处进行电磁扫描, 发现电磁干扰相对于环境底噪无明显变化^[8]。根据以上所述, 对制冷机组件电机外壳进行重新加工处理后分别进行扫描测试和成像试验, 试验结果分别如图8和图5(b)所示。对于此型号的制冷机而言, 电机外壳缝隙和接地的改进措施解决了制冷机的 EMC 问题。

3 制冷机组件电磁屏蔽其他工艺改进

制冷机组件缝隙改进和屏蔽体接地只是提高电磁屏蔽的两点措施,但是对于常态化制冷机组件,不仅存在缝隙,还有过孔、连接器和外接电缆,需要一一对这些因素提出改进建议。

3.1 过孔处理

常态化制冷机组件的电机屏蔽体上通常有3个过孔,含螺纹,其作用是通过螺钉对无刷直流电机进行定位和固定。但过孔的出现破坏了屏蔽体的导电连续性,会造成电磁泄露。过孔处的整改方法同缝隙是相似的,当制冷机组件中电机位置通过螺钉进行固定后,可在过孔与螺钉之间间隙处涂抹导电胶,加强两者之间的气密性,提高屏蔽体导电连续性。

3.2 连接器设计

在原有制冷机组件产品生产加工中,使用普通的九芯连接器。为了加强整体的电磁屏蔽的效能,可以用滤波连接器更换普通连接器。理由在于:

在功能上,滤波接头的每一个针脚都自带滤波电容,每一个接触偶均为一个完整的低通滤波器,能抑制高频信号的传输和辐射。选用带铝箔的连接器的时,除了要满足普通连接器需要满足的基本功能以外,滤波器的截止频率也是重要参考对象。若连接器各芯线上传输的信号频率不同,则必须以频率最高的信号为基准来确定截止频率,因为只要有一根信号线上有频率较高的共模电流,它就会耦合连接到同一个连接器上的其他导线上,造成辐射^[9]。根据电容最小插入损耗数值及对应的电容可知,在实际使用中可选择电容值为47 nF的滤波连接器。

在结构方面,滤波连接器与普通接头结构相同,安装方式一致,可以完全替代;

在成本方面,随着工艺的快速的发展,滤波连接器的成本也大幅降低,在生产成本预算可接受范围之内。

需要注意的是:滤波电容一般是磁介电容,磁材料应避免高温、高温变率、快速撞击。因此在滤波连接器管脚焊接的时候,不要让烙铁长时间在一个管脚上点着,不要有快速温度变化,在焊接固定中防范机壳的挤压,避免承受较大的拉压力。在工艺安装上,尽量选择金属封装的滤波器,确保接头外壳与屏蔽体共连,保持同一等势面,确保屏蔽整体的良好接地。

3.3 线缆屏蔽设计

越来越多的项目要求制冷机组件进行单体电磁兼容测试,需要连接二极管线缆来进行反馈电压交互。稳定工作状态中,二极管线缆上存在电压和电流,

因此线缆可直接作为天线进行电磁辐射。除此之外,驱动外置型制冷机组件也需要线缆将控制器与制冷机相连,线缆辐射是电磁辐射中重要组成部分。

通常情况下,使用柔性防波套对线缆进行电磁屏蔽,如图9(a)所示,柔性防波套具有优异的抗干扰性、柔软、耐腐蚀的特性,可在具有干扰源的环境中使信号传输不受影响并能提高可靠的服务。除此之外,本文提出对裸露线缆进行二次屏蔽的方案,在柔性防波套缠绕的基础上,再次使用电磁屏蔽胶带将外围的柔性防波套紧紧包裹,实现电磁辐射二次抑制,电磁屏蔽胶带如图9(b)所示。

需要注意的是:电磁屏蔽的质量并不是影响EMI衰减的唯一的因素,屏蔽终端的特性也起着很重要的作用。所以除了特殊的说明,电缆屏蔽的两端必须与设备箱或座底相连,对于无金属连接器的屏蔽线缆,必须尽可能直接地在电缆入口处建立屏蔽层与机壳的连接,实际的制冷机组件线缆屏蔽如图9(c)所示,在屏蔽处理的同时还要兼顾美观性。

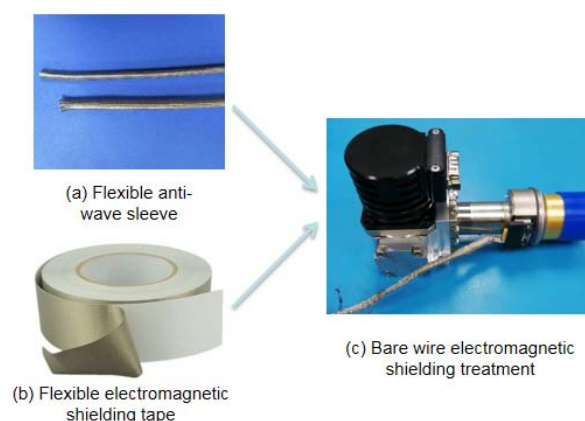


图9 线缆屏蔽处理

Fig.9 Cable shielding processing

3.4 电磁兼容试验验证

综合上述电磁屏蔽建议,对本单位所有在制旋转式斯特林制冷机经过电磁屏蔽工艺改进后,进行电磁兼容RE102测试:与改进前测试结果对比,改进后的电磁屏蔽效能都有明显的提升,绝大部分制冷机组件则一次性通过电磁兼容RE102测试,这表明上述电磁屏蔽改进措施是很有价值的。

4 总结

对制冷机组件缝隙和过孔进行密封处理,保持屏蔽体的良好接地,增强屏蔽体的连续性;对裸露线缆进行屏蔽包裹,使用滤波接头,能提升抑制电磁波的能力,提高电磁屏蔽效能。本次整改设计的结果已经推广至科研项目和实际生产中,对抑制制冷机组件电

磁辐射起到了肯定作用。

参考文献:

- [1] 朱啸宇. 防电磁辐射针织面料的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2013.
- ZHU Xiaoyu. Study on the anti-electromagnetic radiation knitted fabric[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2013.
- [2] 张忠连. 超短波通信系统射频前端电磁防护技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- ZHANG Zhonglian. Research on electromagnetic Protection Technology of RF Front-end in ultrashort Wave Communication system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2009.
- [3] 孙冉. PCB 电路与结构的 EMC 协同仿真技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- SUN Ran. Research on EMC Cooperative Simulation of PCB Circuits and structures[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2014.
- [4] 王立, 张凯, 田海涛. 电子设备结构设计中的电磁屏蔽技术[J]. 中国水运, 2011, 11(2): 111-113.
- WANG Li, ZHANG Kai, TIAN Haitao. Electromagnetic shielding in the structural design of electronic equipment[J]. *China's water transport*, 2011, 11(2): 111-113.
- [5] 程岚. 复合结构电磁屏蔽织物的设计及其性能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- CHENG Lan. The design and performance of the composite structure electromagnetic shielding fabric[D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [6] 田小平, 刘和平, 刘锋, 等. 短波接收机的电磁兼容结构设计[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(5): 398-402.
- TIAN Xiaoping, LIU Heping, LIU Feng, et al. Electromagnetic compatibility structure design of short-wave receiver[J]. *Journal of Measurement and Control of Aircraft*, 2013, 32(5): 398-402.
- [7] 赵婷. 电子控制设备电磁屏蔽仿真研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
- ZHAO Ting. Electromagnetic shielding Simulation of Electronic Control equipment[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.
- [8] 刘晓玮, 江婷婷, 李浩, 等. 某红外热像仪电磁兼容的诊断及设计改进[J]. 电子测试, 2014(S1): 8-9.
- LIU Xiaowei, JIANG Tingting, LI Hao, et al. The diagnosis and design improvement of electromagnetic compatibility of an infrared thermal imager[J]. *Electronic Test*, 2014(S1): 8-9.
- [9] 徐超. 汽车电子的电磁兼容性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- XU Chao. Electromagnetic compatibility of Automotive Electronics[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012.