

电子调速器控制器的电磁兼容分析与试验验证

曹 钰^{1,2}, 黄 都^{1,2}, 冯 旭^{1,2}, 周 琴^{1,2}

(1. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402160;
2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 重庆 402160)

摘 要: 基于辐射发射的形成机理, 以某型号电子调速器控制器为目标, 利用 EMSCAN 电磁干扰扫描系统对控制器进行近场辐射测试, 总结出一套切实可行的辐射发射分析与试验验证方法。在此基础上, 对该型号电子调速器控制器进行了整改设计, 并进行了试验验证。结果表明: 基于 EMSCAN 系统的分析及整改方法效果明显, 缩短了电子产品电磁兼容问题的整改设计周期, 并节约了测试成本。

关键词: 辐射发射; 电子调速器; 控制器; 电磁干扰扫描系统; 电磁兼容

中图分类号: TK972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)05-0008-05

EMC Analysis and Test Verification of Electronic Speed Governor Controller

Cao Yu^{1,2}, Huang Du^{1,2}, Feng Xu^{1,2}, Zhou Qin^{1,2}

(1. Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing 402160;
2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Chongqing 402160)

Abstract: Based on the formation mechanism of radiation emission, aiming at a certain type of electronic speed governor controller, the EMSCAN electromagnetic interference scanning system was used to test the near-field radiation of the controller, and a set of practical radiation emission analysis and test verification methods were summarized. On this basis, the rectification design of this type of electronic speed governor controller was carried out, and verified by test. The results show that the analysis and rectification method based on EMSCAN system has obvious effect, the rectification design cycle of electromagnetic compatibility (EMC) problems of electronic products is shortened, and the testing cost is saved.

Key words: radiation emission; electronic speed governor; controller; electromagnetic scanning system; electromagnetic compatibility

0 引言

调速器是柴油机的重要组成部分, 它能根据外界的负载变化自动调节柴油机的循环供油量, 实现对柴油机转速的稳定控制, 进而保证柴油机具有良好的工作性能。随着柴油机电控技术的飞速发展, 调速器也从最初的机械式调速器发展到目前的电子调速器。电子调速器借助先进的微电子技术和控制理论, 与传统机械式调速器相比, 具有调速精度

高、结构简单、维修方便以及适应扩展能力强等优点。但目前国内电子调速器技术发展水平相比国外还存在一定的差距, 主要体现在产品的性能和可靠性方面, 导致关键应用领域用电子调速器还依赖进口。因此, 开发高性能和高可靠性的电子调速器具有十分重要的现实意义。

电子调速器控制器是电子调速器的重要组成部分, 它通过控制电子调速器执行器部件拉动柴油机供油齿条, 实现对柴油机循环油量的自动控制, 保

证柴油机转速稳定。电子调速器控制器与周围电气、电子部件存在关联,且工作环境比较恶劣,为了保证电子调速器控制器的可靠性,要求其必须具有良好的电磁兼容性能。

按照电磁能量的传递方式,电磁兼容可分为传导和辐射两种形式,其中,辐射又分为辐射发射和辐射抗干扰;传导又分为传导发射和传导抗干扰。本文重点分析某型号电子调速器控制器的辐射发射性能并进行试验验证。辐射发射指的是电子产品内部存在的交变信号以电磁波的方式直接向周围空间发射电磁能量,并被周围其他电子产品接收,形成干扰。

1 研究现状

针对产品设计过程中出现的电磁兼容辐射发射问题,目前国内外采取的分析及解决方法主要有以下几种:

(1) 在产品设计阶段初期引入电磁兼容仿真设计流程,基于专业的电磁兼容仿真软件搭建与实际情况相匹配的电路模型,对产品的电磁兼容性能进行仿真计算和分析。

(2) 建立符合相关标准要求的电磁兼容电波暗室及辐射发射试验条件,对设计产品反复进行试验验证,在此基础上进行产品整改设计。

(3) 将产品试验验证及整改设计工作交由第三方检测机构进行,直至产品符合标准要求。

但由于电路电磁兼容仿真模型无法完全反映真实电路情况,模型搭建工作技术难度较高,电磁兼容电波暗室及相关试验设备建设成本昂贵,第三方检测机构测试和整改费用较高等原因,导致上述几种方法在实际应用中效果不佳。

2 辐射发射形成机理

电子产品正常工作时,电子线路中会产生从低频到高频的交变信号,这些交变信号会通过产品的外壳、PCB 走线、产品内部互连线以及外部接口线缆向周围空间发射电磁波,并对周围其他电子产品形成辐射骚扰。

2.1 共模和差模

信号(包括电压和电流)变化在线路中传输时主要有两种形态:差模和共模。一对导线上如果流过差模电流 I_D ,则两条线上的电流大小相等,方向相反;一对导线上如果流过共模电流 I_C ,则两条线上的电流大小相等,方向相同。一般有用信号都是差模电流,而无用信号都是共模电流。如图 1 所示。

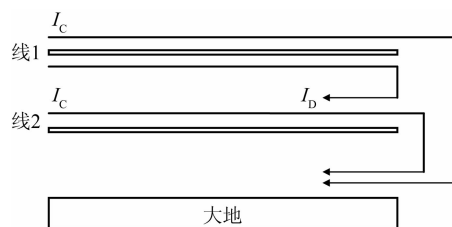


图 1 共模电流和差模电流示意图

由此可以看出:电子产品中共模电流总是流向参考地平面,而差模电流总是在产品内部的 PCB 线路中流动。另,共模电压是指引起共模电流的电压,差模电压是指引起差模电流的电压。

2.2 形成机理

辐射发射的形成机理是:电子产品工作时线路中变化的共模电流和差模电流通过等效天线向外发射电磁波,形成辐射骚扰。电子产品中等效天线主要有:信号环路和产品电缆或其他尺寸较长的导体。

假设:环路面积为 S 的环路中流动着电流强度为 I 、频率为 F 的信号,则在自由空间中,距离环路 D 处所产生的辐射强度^[1]为: $E = 1.3SIF^2/D$ 。造成此类辐射的电流信号通常为正常工作信号,是一种差模信号,如时钟信号及谐波。当电流强度和频率一定时,信号环路所产生的辐射强度就与环路面积直接相关。因此控制环路面积是控制此类辐射骚扰的关键。

假设:长度为 L 的产品电缆或其他尺寸较长的导体中流动着电流强度为 I 、频率为 F 的信号,则在距天线 D 处所产生的辐射强度^[1]为: $E = 0.63 ILF/D$ (当 $F \geq 30 \text{ MHz}$, $D \geq 1 \text{ m}$ 并且 $L < \lambda/2$ 时); $E = 60I/D$ (当 $L \geq \lambda/2$ 时)。造成此类辐射的电流信号通常为无用工作信号,是一种共模信号。当产品中等效天线长度大于天线中信号波长的 $1/2$ 时,天线产生的辐射强度只与天线上共模电流的大小有关。可见控制等效天线中流动的共模电流大小是控制此类辐射骚扰的关键。

随着目前多层 PCB 技术的广泛应用,正常工作信号的环路面积被控制得越来越小,由此所产生的辐射发射也越来越有限;电子产品的辐射发射问题更多地来自长尺寸导体形成的等效天线中变化的共模信号。

3 辐射发射问题分析

3.1 分析流程

对于电子产品来说,通常辐射骚扰主要来源于开关电源的开关频率及谐波骚扰、交流电机的运行噪声、直流电机的电刷噪声、电磁感应设备的电磁

骚扰、晶振及数字电路的电磁骚扰等。当产品内部存在上述干扰源时,辐射骚扰会将产品内外各种走线当成有效天线向外辐射电磁骚扰。产品外壳为非金属外壳时,产品内电路、各种互连走线及外部接口线缆都直接向外空间辐射电磁骚扰;产品外壳为金属外壳时,产品内部电路产生的辐射骚扰会通过金属外壳的孔洞缝隙向外辐射电磁骚扰,同时会通过产品外部滤波或屏蔽不良的接口线缆向外空间辐射电磁骚扰。

辐射发射问题分析流程^[2]如图2所示。

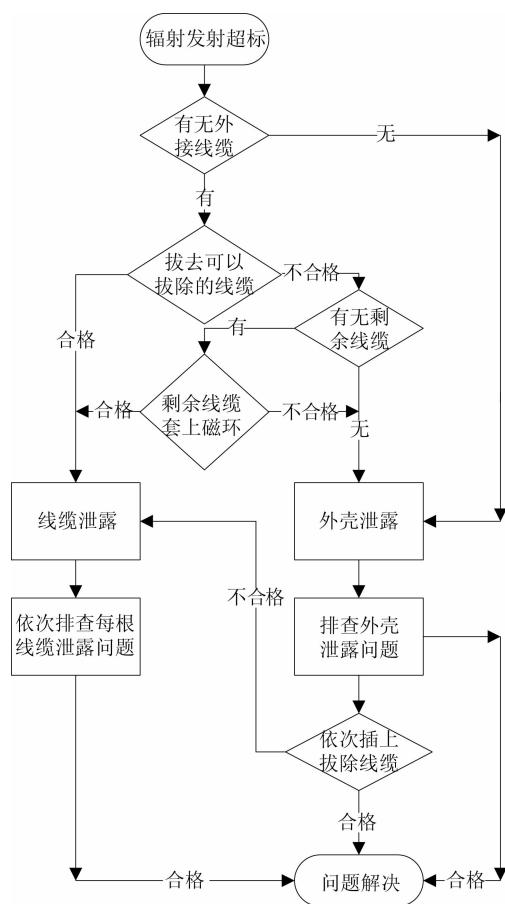


图2 辐射发射问题分析流程

(1) 产品正常工作时无外接线缆,产品辐射发射超标,应重点排查外壳泄露问题。

(2) 产品正常工作时有外接线缆,产品辐射发射超标,则先拔掉所有可以拔除的外接线缆,并测试产品辐射发射情况。若测试合格,则重点考虑线缆泄露问题,应将这些线缆依次插上,找出问题线缆并加以解决。

(3) 按照步骤(2)拔掉所有可以拔除的外接线缆后,若辐射发射测试仍不合格,且产品无其他连接线缆,则应重点排查外壳泄露问题。待外壳泄露问题解决后,插上之前已经拔除的外接线缆,若辐射发射测试合格,则问题解决。若测试仍然不合

格,则应找出问题线缆并加以解决。

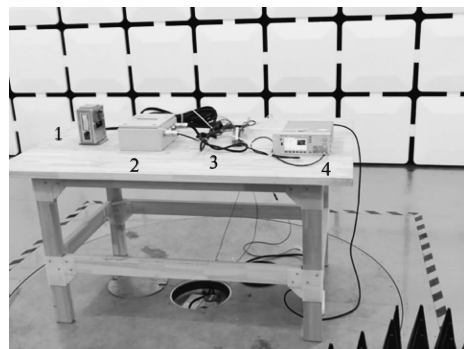
(4) 按照步骤(2)拔掉所有可以拔除的外接线缆后,若辐射发射测试不合格,且产品存在其他剩余连接线缆,则在所有剩余连接线缆上分别套上磁环,抑制线缆中变化的共模电流。加上磁环后若辐射发射测试合格,则重点考虑剩余连接线缆泄露。待剩余连接线缆问题解决后,将之前已拔除的外接线缆重新插上进行辐射发射测试,合格则问题解决,不合格则应找出问题线缆并加以解决。

(5) 按照步骤(4)在剩余连接线缆上分别套上磁环后进行辐射发射测试,若测试不合格,则重点排查产品外壳泄露问题并加以解决。待外壳泄露问题解决后,去掉剩余连接线缆上的磁环并进行辐射发射测试,若不合格,则对剩余连接线缆采取措施,测试合格后插上之前已拔除的外接线缆,再次进行辐射发射测试,合格则问题解决,不合格则应找出问题线缆并加以解决。

对外壳辐射泄露问题的判断和处理可借助近场磁场探头测量系统来分析,找出辐射骚扰泄露位置后采取相应的外壳屏蔽措施来解决。

3.2 辐射发射超标

以某型号电子调速器控制器为被测样品,按照辐射发射相关标准对其进行150 kHz~2 GHz频段内的辐射发射测试。测试设备及布置如图3所示。



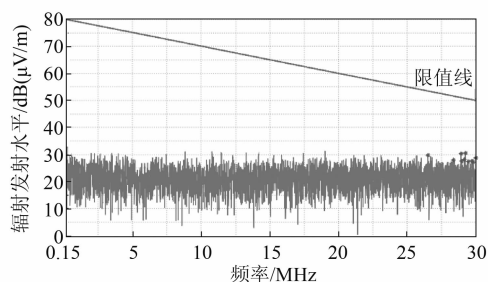
1-执行器; 2-控制器; 3-连接线缆; 4-信号发生器

图3 测试设备及布置示意图

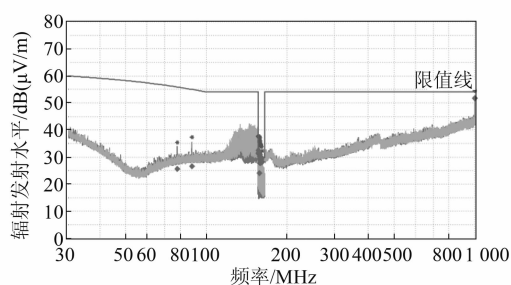
被测样品上电正常工作时(执行器有刷直流电机动作),在受试频段内的辐射发射水平如图4a)~图4c)所示;被测样品不驱动执行器时,在156~165 MHz频段内的辐射发射水平如图4d)中曲线1所示。图4d)中曲线2为垂直极化辐射发射水平;曲线3为水平极化辐射发射水平。

由测试结果可知:被测样品正常工作时,在受试频段156~165 MHz内的辐射发射水平超过标准规定限值30 dB($\mu\text{V}/\text{m}$);其他受试频段内

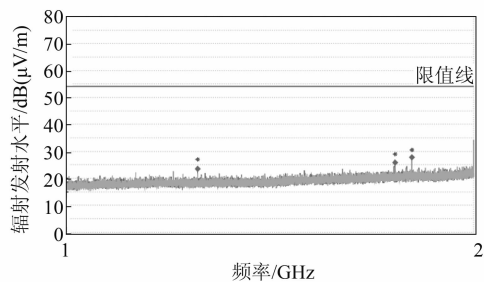
的辐射发射水平均满足标准要求。被测样品不驱动执行器时, 在频段 156 ~ 165 MHz 内的辐射发射水平相比被测样品正常工作时并没有明显的变化, 仍超出标准规定限值。可见, 引起被测样品辐射发射超标的因素不是执行器中工作的直流电机带来的电刷噪声。



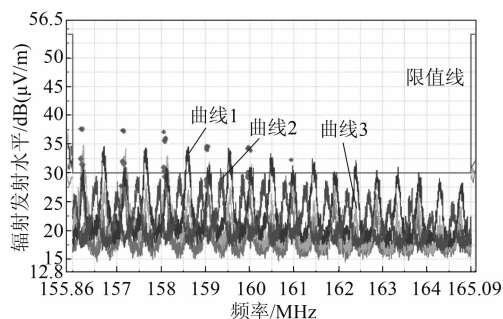
a) 被测样品正常工作时 150 kHz~30 MHz 频段内辐射发射水平



b) 被测样品正常工作时 30 MHz~1 GHz 频段内辐射发射水平



c) 被测样品正常工作时 1~2 GHz 频段内辐射发射水平



d) 被测样品不驱动执行器时 156~165 MHz 频段内辐射发射水平

图4 被测样品 150 kHz ~ 2 GHz 频段内辐射发射测试

3.3 EMSCAN 电磁干扰扫描系统

EMSCAN 电磁干扰扫描系统是采用电子扫描技术的电磁场近场扫描系统, 能获取被测设备的全部电磁信息。EMSCAN 系统由扫描器、虚拟控制器、频谱分析仪以及计算机上位机软件组成。其

中, 扫描器由 1 218 个 H 场探头组成, 按阵列排放, 各探头分布在面积为 7.6 mm × 7.6 mm 的矩形栅格内, 探头方向按人字型排列; 虚拟控制器用来实现扫描器中探头的自动切换, 并控制频谱分析仪进行滤波和扫频, 为了提高频谱扫描数据的精度和分辨率, 控制器内置了高速数模转换卡, 将频谱分析仪输出的 Video 信号转换为数字信号, 每秒可获得多达三万个数据; 上位机软件则通过以太网将计算机与控制器连接起来, EMSCAN 的所有控制和数据处理, 全部由上位机软件实现。

EMSCAN 的测试原理是通过阵列式分布的 H 场探头探测放置在扫描器上的被测物的电流变化, 进而获得因高频电流变化而引起的电磁场变化信息; 通过上位机软件对电磁场信息的分析处理, 可获取被测物上 RF 电流的频谱图以及指定频点的 RF 电流空间分布图。

3.4 超标原因分析

本文利用 EMSCAN 电磁干扰扫描系统对被测样品在超标频段内进行近场辐射扫描测试, 检测通过探头的高频电流 (包括共模电流和差模电流) 变化引起的电磁场变化信息; 通过分析被测样品的近场辐射发射水平来指导整改设计。

按照前文所述分析流程:

(1) 被测样品正常工作时, 有外接线缆, 分别为电源供电线和执行器驱动线。由于电源供电线和执行器驱动线不能拔除, 因此考虑分别在电源供电线和执行器驱动线上加上磁环。

(2) 若在电源供电线和执行器驱动线上加上磁环后, 辐射发射测试满足要求, 则针对电源供电线和执行器驱动线进行屏蔽整改。

(3) 若在电源供电线和执行器驱动线上加上磁环后, 辐射发射测试仍不满足要求, 则考虑辐射发射超标来自被测样品外壳泄露, 应针对外壳进行屏蔽整改。待外壳整改完成后, 去掉电源供电线和执行器驱动线上的磁环, 再进行辐射发射测试, 若仍不满足要求, 则针对电源供电线和执行器驱动线进行屏蔽整改。

从被测样品的远场辐射测试结果可知: 辐射超标频段主要集中在 156 ~ 165 MHz, 且辐射超标骚扰信号与执行器中工作的直流电机无关。为了明确被测样品辐射发射超标问题所在, 分别对被测样品线束引出端口、控制盒表面孔洞、缝隙处, 在频段 156 ~ 165 MHz 内进行频谱/空间扫描测试。测试布置及测试结果如图 5、图 6 所示。

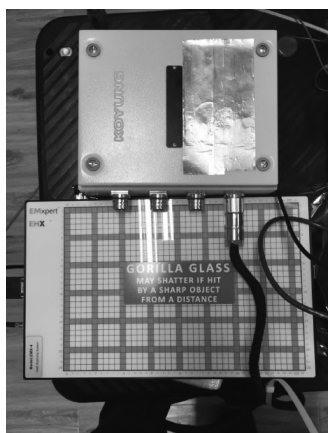


图5 被测样品 EMSCAN 电磁骚扰扫描测试布置

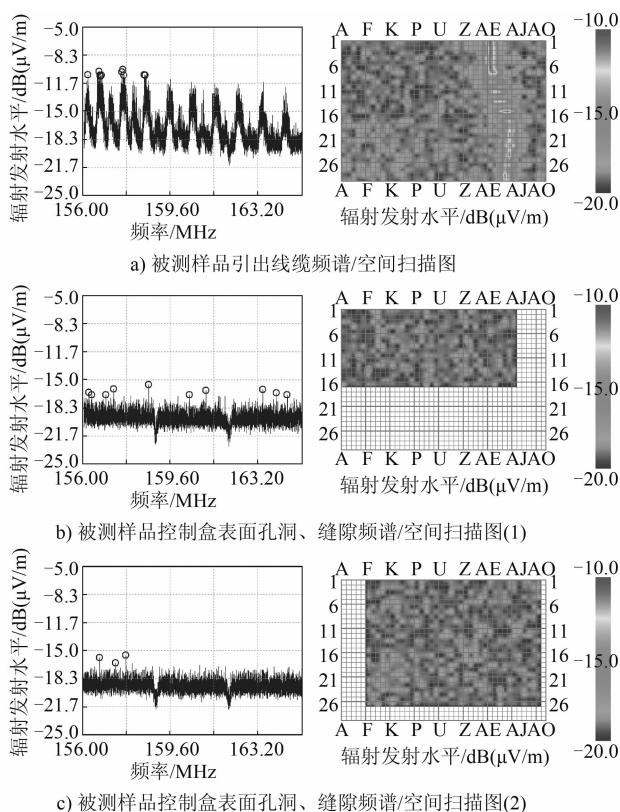


图6 被测样品 EMSCAN 测试结果

从图6中可以看出：被测样品在156~165 MHz频段内引发的辐射骚扰主要是从控制盒引出线缆发射出来的，空间分布图中辐射骚扰的路径与实际布置图中的线缆位置高度吻合。因此可以确定被测样品在远场辐射发射测试中，156~165 MHz频段辐射超标主要由外接线缆辐射发射造成。

进一步分析：当前控制盒引出线束为供电电源线以及负载驱动线，未做屏蔽处理。线缆本身并没有传输高频信号，但因为线缆直接与内部电路连接，因此控制盒内部的电磁骚扰可能通过传导、近场感应或空间辐射的方式进入连接线缆中，并通过未做屏蔽处理的线缆对外辐射骚扰。

4 辐射发射问题整改

基于对被测样品辐射发射超标问题的原因分析，整改设计如下：

(1) 对外接线缆进行屏蔽处理，将屏蔽铜网套至外接线缆表面，屏蔽铜网与产品对外接口处360°环形接触；

(2) 将磁环套在电源供电线缆以及负载驱动线缆上，以抑制线缆上的共模干扰电流；

(3) 用导电锡箔胶纸对控制盒表面连接缝隙处做密封处理，以提升产品外壳屏蔽性能。

整改设计后，再次进行EMSCAN近场辐射扫描测试，测试结果如图7所示。

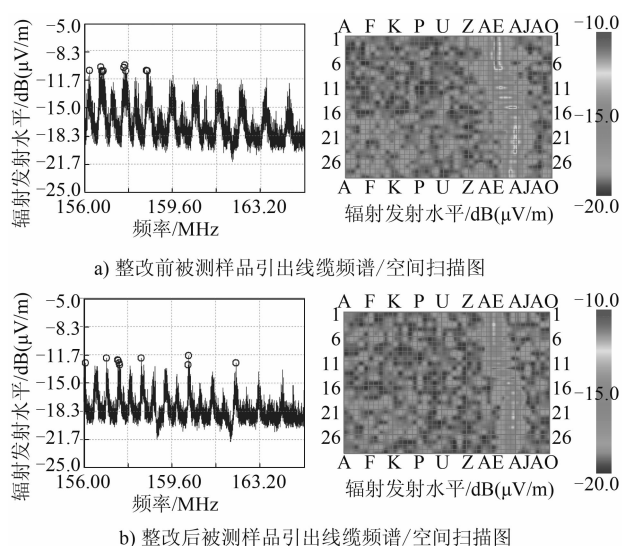


图7 整改前、后被测样品 EMSCAN 测试结果对比

对比整改前后的测试结果可以看出：整改效果显著，156~165 MHz频段内的辐射干扰水平明显下降。

为了验证EMSCAN近场扫描测试结果，将整改后的被测样品送第三方检测中心进行远场辐射发射测试，测试结果如图8所示。

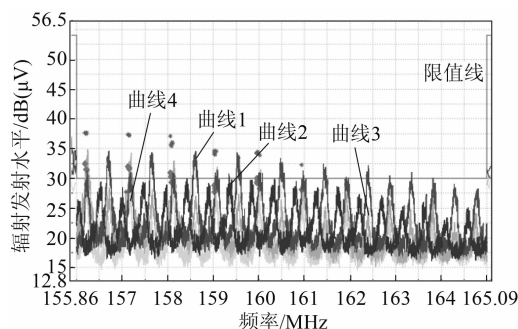


图8 整改前后被测样品远场辐射发射测试水平

(下转第49页)

缸盖等关键零部件的表面清洁度,检测配合尺寸并严格按照使用手册准确安装。

(2) 及时清理和更换各类滤清器、滤芯,减少杂质进入柴油机的可能;定期检查润滑情况,保证柴油机满足润滑要求,并进行启动前的预润滑。

(3) 加强冷却系统的维护保养,确保柴油机不会出现过热现象;同时合理设置各项性能参数(喷油正时、配气正时等),使柴油机高效燃烧并稳定运行。

(4) 正确掌握柴油机冷启动方法,避免运行工况突变,严禁柴油机长期怠速或超负荷运转。

参考文献

- [1] 陈晓飞,仲蕾,庞铭,等. 喷油冷却活塞传热过程的流固耦合分析[J]. 内燃机工程, 2016, 7 (5): 176-183.
- [2] 胡蕾. 活塞喷油强制振荡冷却的仿真分析[D]. 武

汉:华中科技大学, 2016.

- [3] 李全帅,扈钰涛,许志强,等. 某大功率柴油机气缸套拉缸故障分析[J]. 柴油机, 2017, 39 (1): 54-56.
- [4] 孙中庆. 柴油机气缸拉缸的检修[J]. 维修工艺, 2003 (7): 108-109.
- [5] 郭宜斌. 基于活塞环组润滑失效的船用柴油机拉缸故障机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [6] 刘晓日. 基于流固耦合传热的内燃机润滑摩擦特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [7] 余永华,杨建国,孙洪杰,等. 新型中速柴油机气缸套温度场有限元分析与试验研究[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37 (3): 95-98.
- [8] 张桂昌. 基于热-机耦合的柴油机活塞系统敲击噪声与润滑研究及优化设计[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [9] 张双印,殷建祥. 浅析发动机气缸套拉缸的原因及预防[J]. 内燃机与配件, 2016 (1): 28-30.

(上接第12页)

图8中:曲线1为整改前执行器不驱动时被测样品的远场辐射发射水平;曲线2和曲线3分别为整改前执行器驱动时被测样品的垂直极化和水平极化辐射发射水平;曲线4为整改后执行器驱动时被测样品的远场辐射发射水平。可以看出:整改后的被测样品远场辐射发射水平已低于限值,满足要求。

从上述试验测试结果可以得出:EMSCAN电磁干扰扫描系统反映的被测物近场辐射发射水平虽然不能量化等同于远场辐射发射数据,但对于产品辐射发射性能的设计与整改具有较好的参考意义。

5 总结

本文介绍了电子产品辐射发射的形成机理,其本质是电子产品工作时线路中变化的共模电流和差模电流通过等效天线向外发射电磁骚扰。基于EM-

SCAN近场辐射扫描系统提出了一套切实可行的辐射发射分析整改方法,并结合某型号电子调速器控制器出现的辐射发射超标问题进行了验证,得到如下结论:

(1) 利用EMSCAN近场辐射扫描系统获得的被测产品近场辐射测试数据可以较准确地反映被测产品远场辐射发射水平的变化趋势,并指导整改;

(2) 基于EMSCAN近场辐射扫描系统的电子产品辐射发射分析及整改方法可以缩短电子产品电磁兼容问题的整改周期,并可节约整改测试成本。

参考文献

- [1] 郑军奇. EMC电磁兼容设计与测试案例分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [2] 朱文立. 电磁兼容设计与整改对策及案例分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.