

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.12.003

基于石墨烯薄膜的静电扬声器理论建模与仿真分析*

程先哲 杨鹏 张勇 刘冠军 邱静
(国防科技大学 机电工程与自动化学院 长沙 410073)

摘要:针对基于石墨烯薄膜的新型静电扬声器设计缺乏理论指导的问题,对石墨烯静电扬声器进行了理论建模和仿真分析研究。在静电扬声器原理的基础上,采用质量-弹簧-阻尼系统建模分析了石墨烯薄膜在工作时的振动特性,研究了薄膜半径,厚度和应力对其振动特性的影响,利用COMSOL软件建立了石墨烯静电扬声器的有限元模型,对比分析了不同薄膜半径、厚度和应力对应的石墨烯静电扬声器的频率响应特性,验证了理论模型的准确性。结果表明,石墨烯薄膜半径越大,厚度越薄,应力越小,相应的石墨烯静电扬声器频率响应特性越好。

关键词: 静电扬声器;石墨烯;建模和仿真;有限元法

中图分类号: O321;TN912.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.2010

Theoretical modeling and simulation analysis of electrostatic loudspeaker based on graphene membrane

Cheng Xianzhe Yang Peng Zhang Yong Liu Guanjun Qiu Jing

(School of Mechatronic Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the problem that the lack of theoretical instruction lied in the design of the new type electrostatic loudspeaker based on graphene membrane, theoretical modeling and simulation analysis are conducted on electrostatic graphene loudspeaker. Based on the working principle of an electrostatic loudspeaker, the vibration characteristic of a graphene membrane is calculated with the mass-spring-damper system model. The influence of the size, thickness and stress of the membrane to the vibration characteristic is analyzed. A finite element model of the electrostatic graphene loudspeaker is built with COMSOL software. The comparison is made among loudspeakers with different size, thickness and stress in the simulation analysis, which verifies the accuracy of the theoretical model. The results show that the graphene membrane with larger radius, thinner thickness and smaller strain will contribute to better frequency response characteristic of the electrostatic graphene loudspeaker.

Keywords: electrostatic loudspeaker; graphene; modeling and simulation; finite element method

0 引言

扬声器是一种将电信号转换为声信号的换能器件,其经过了100多年的发展,目前已被广泛用于各种电子仪器设备^[1]。扬声器主要分为两种:电动式扬声器和静电式扬声器。相比较而言,静电扬声器具有更好的声输出特性,因为其振膜轻薄具有更好的动态性能,有利于减

小失真。静电扬声器具有宽而平坦的频率响应曲线,并且受其共振频率的影响较小,这是由于空气阻尼在其振膜振动过程中占据主导^[2]。然而,阻尼系数的主导作用随着静电扬声器振膜尺寸的减小而大大降低^[3]。因此,在音频器件小型化进程中,静电扬声器的发展受到了严重限制。如今在市场上,静电扬声器几乎已被电动扬声器所取代。

石墨烯材料的兴起给静电扬声器的发展带来了机

遇。在过去的 10 年中,石墨烯已被证实是迄今为止最强,最薄和最轻的材料之一^[4-6],是构建静电扬声器振膜的理想材料。石墨烯薄膜的厚度为纳米级,比传统的聚酯膜(厚度 2~20 μm)薄得多。此外,石墨烯具有极低的质量密度和极高的强度,这些优异的特性有利于使其振动过程中的空气阻尼占据主导。应用石墨烯作振膜可以大大提高静电扬声器的性能。

2013 年 Zhou 等人^[7]通过实验研制出了石墨烯静电扬声器,由静电驱动石墨烯薄膜振动发声,机械效率较高,测试结果表明该类型扬声器在整个可听声频率范围(20 Hz~20 kHz)具有比商用音频耳机更好的声学性能。这一研究成果给静电扬声器的发展带来了广阔的前景,但该扬声器结构优化设计尚缺乏对应的理论指导。近年来,许多研究人员开展了电声换能器件相关的理论建模和有限元仿真等方面的分析研究及设计测试工作^[8-11],但针对静电扬声器的设计理论工作少见研究成果,特别是基于石墨烯薄膜设计新型静电扬声器,相应的理论研究工作十分有必要。

基于石墨烯静电扬声器的研究现状,本文旨在通过理论建模和仿真分析提高石墨烯静电扬声器的发声性能。采用传统的质量-弹簧-阻尼振动模型进行分析,重点研究了石墨烯薄膜半径,厚度和应力对石墨烯静电扬声器频率响应特性的影响;运用 COMSOL 仿真软件建立了石墨烯薄膜振动发声的有限元模型(FEM),利用文献中的实验数据对模型准确性进行了检验,通过改变参数对比分析了不同薄膜半径,厚度和应力条件下石墨烯静电扬声器对应的高保真声输出上下限频率,验证了理论分析的结果。本文工作可对石墨烯静电扬声器的优化设计提供理论指导。

1 石墨烯薄膜谐振模型

静电扬声器主要包含 3 个基本组件:振膜、导电栅格极板和隔板(作为支撑框架)。石墨烯静电扬声器的工作原理如图 1 所示。对石墨烯薄膜施加直流偏置电源 V_{DC} ,两个硅电极分别连接到极性相反的交流输入音频信号 V_{in} 。忽略石墨烯薄膜振动过程中的微小位移(石墨烯薄膜振幅相比隔板厚度可忽略不计),由静电力公式可推导得到,相应施加在石墨烯薄膜上的驱动力计算如下(每单位面积)^[7]:

$$F = F_1 - F_2 = \frac{\varepsilon}{2d^2}(V_{DC} + V_{in})^2 - \frac{\varepsilon}{2d^2}(V_{DC} - V_{in})^2 = \frac{2\varepsilon V_{DC} V_{in}}{d^2} \quad (1)$$

式中: F_1 和 F_2 分别是两个极板对应的静电力, ε 和 d 分别是空气介电常数和电极与振膜间的距离。由此,可以

看出该驱动力与音频信号大小成正比,这也是静电扬声器失真小的一个重要原因。

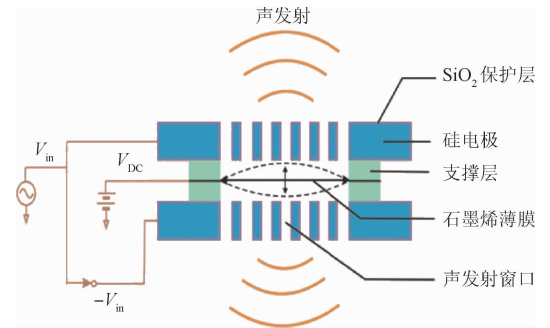


图 1 石墨烯静电扬声器工作原理^[7]

Fig. 1 Schematic diagram for electrostatic graphene loudspeaker^[7]

为了阐述薄膜的半径,厚度和应力对石墨烯静电扬声器的频率响应特性的影响,将薄膜振动过程等效为质量-弹簧-阻尼系统。对单位面积的薄膜进行力学分析,其动态关系可以描述如下:

$$m\ddot{x} + \zeta\dot{x} + kx = F \quad (2)$$

对于单位面积的参数值,空气阻尼系数 ζ 可被视为一个常数,而单位面积石墨烯的等效质量 m 和弹簧刚度 k 的值表示如下^[7]:

$$\begin{cases} m = \frac{\rho \cdot \pi r^2 \cdot t}{\pi r^2} = \rho t \\ k = \frac{4\pi\sigma t}{\pi r^2} = \frac{4\sigma t}{r^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ 为石墨烯材料的密度,而 t 、 r 和 σ 分别是悬浮圆形石墨烯薄膜对应的厚度,半径和应力。

在石墨烯静电扬声器系统中,输出声压级(SPL)大小与空气振动速度大小成正比^[7],因此,薄膜振动速度可直接反映 SPL 的大小,如式(4)所示。从质量-弹簧-阻尼模型可以得到振动速度表达式如式(5)所示。

$$SPL = c\rho |\dot{x}| \quad (4)$$

$$|\dot{x}| = \frac{|F|}{|\zeta - i\omega^{-1}k + i\omega m|} \quad (5)$$

从引言描述可知,空气阻尼系数 ζ 相比薄膜质量和刚度等系数应占主导因素,从而使频率响应曲线相对平坦而宽广。从式(5)中可以看出,高保真输出频率范围上下限与等效质量 m 和等效弹簧刚度 k 有关。具体地,为了保持空气阻尼的主导地位,等效弹簧刚度 k 和等效质量 m 的影响表现如下:

$$\omega_{\min}^{-1}k < \zeta, \omega_{\max}m < \zeta \quad (6)$$

由于空气阻尼系数 ζ 是一个常数,可知频率下限 ω_{\min} 是由等效弹簧刚度 k 确定的,而频率上限 ω_{\max} 由等效质量 m 确定。根据式(3),薄膜的半径、厚度和应力与频

率响应特性之间的关系就显现出来了。因此,石墨烯静电扬声器的低频特性由薄膜的半径、厚度和应力决定,其中,薄膜的半径是一个主要影响因素。对于高频特性,很大程度上是由薄膜的厚度决定的。

为了优化石墨烯静电扬声器的声输出特性,频率响应曲线应相对平坦而宽广以得到更大的带宽,这意味着一个更小的 ω_{\min} 和一个更大的 ω_{\max} 。通过理论建模分析可知,对应的薄膜振动系统应具有较小的 k 和 m 。所以,采用的石墨烯薄膜半径越大,厚度越薄和应力越小,其对应的频率特性曲线越平坦,带宽越大,输出特性越好。

2 有限元仿真分析

为了证明薄膜半径,厚度和应力对频率响应特性的作用效果,采用有限元软件 Comsol Multiphysics 建立了仿真模型进行分析。该软件具有振动声学的接口,这使得仿真扬声器模型非常方便。基于石墨烯静电扬声器的工作原理,静电驱动模块可替换为一个简谐力,因此在有限元模型中可以省略静电驱动模块。在简谐驱动力的作用下,石墨烯薄膜将上下振动从而在空气中产生声音。因此,该模型可被简化为一个声壳耦合问题,其中包含3个物理接口:压力声学、壳单元和结构边界。有限元仿真模型的示意图如图2所示。

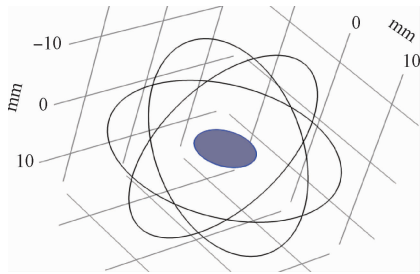


图2 有限元仿真模型示意图

Fig.2 Schematic diagram for FEM simulation model

在有限元仿真模型中,石墨烯薄膜被简化为一个边界固定的圆形外壳,可以通过改变薄膜半径、厚度和应力的参数设置以定义石墨烯薄膜的机械性能。对薄膜施加了一个面载荷作为静电驱动力,在频域中该驱动力即转变为特定频率的简谐力。将薄膜周围的一个球形域定义为空气,与石墨烯薄膜耦合关联起来,因此石墨烯振动特性可以传播到空气中引起发声。球形域的边界设置有球面波辐射特性,故整个声场可以视为没有界限。由于 COMSOL 材料库中缺乏石墨烯材料,对其定义了如下3个参数:密度($2\ 200\ \text{kg/m}^3$),杨氏模量(1 TPa)和泊松比(0.16)。这3个参数的值参考了文献[12-14]。给定一个特定的简谐力,石墨烯薄膜将开始振动,推动空气产生声音向外辐射。因而,球形空气域将被声场覆盖。扬声

器仿真模型的频率响应特性,可以从输出的声压级中反映出来。

对所建的有限元模型进行了验证,其与文献[15]的理论计算结果一致。在文献[15]中,通过振动实验测得石墨烯薄膜的谐振频率为 3.175 kHz,使用在第2节里的等效模型理论计算可推断出薄膜应力为 1.85 MPa。本文通过对有限元模型的仿真,计算相同结构参数和应力值条件下石墨烯薄膜的共振频率(表1),计算出的谐振频率是 3.187 kHz,与文献[15]所测量的结果非常接近。因此,可验证得到该有限元仿真模型与等效振动理论模型相一致。

表1 仿真模型与理论计算的对比

Table 1 Comparison of simulation model and theoretical calculation

方法	半径/mm	厚度/mm	应力/MPa	共振频率/kHz
理论	3.5	20	1.85	3.175
仿真			1.85	3.187

注:理论和仿真的计算结果分别为加粗的部分

通过仿真计算,可得到石墨烯静电扬声器有限元模型的声压级分布,如图3所示(模型尺寸参数与表1参数相同,应力为 1 kPa,空气球域半径为 15 mm)。石墨烯薄膜被施加一个在频域的面载荷(1.23 Pa,该值是通过文献[7]中静电力相关参数计算得到)。从 1 Hz ~ 1 MHz 进行扫频,可以得到一系列声压级分布图。计算石墨烯薄膜上方某点(距离设为 10 mm)在频域的 SPL 值,可得到对应的频率响应曲线,如图4所示。由该频率响应曲线,可以得到高保真频率范围的上下边界(ω_{\min} 和 ω_{\max})。在图4中,可以很清楚地看到该扬声器在中间频率范围内具有良好的性能。将 75 dB 作为标准来判断高保真频率范围(± 3 dB 作为通用的判定标准),可得到下限和上限频率分别为 8 Hz 和 18 kHz。

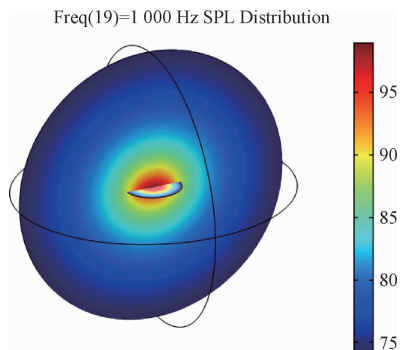


图3 声压级分布计算结果

Fig.3 Schematic diagram of SPL distribution calculation result

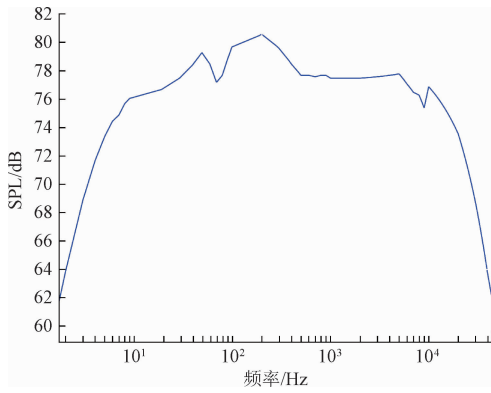


图 4 仿真模型的频率响应特性

Fig. 4 Frequency response characteristic of the simulation model

在图 4 中,高保真频率区域曲线并不是很光滑,这是振动薄膜的谐波分量所导致的,计算误差也会有一定的影响。考虑到差异情况在一个相当宽的频率范围上是可接受的(8 Hz ~ 18 kHz 平均声压级大约为 78 dB,差异在 ±3 dB 以内),因此可以认为该石墨烯静电扬声器仿真模型具有极优的声音输出性能。通过改变石墨烯薄膜的结构参数,如半径、厚度和应力值等,可以对其输出性能进行对比研究。

基于石墨烯静电扬声器的有限元仿真模型,分析了薄膜半径,厚度和应力对输出频率响应特性的影响。通过改变这 3 个参数值,得到了一系列的仿真结果。从声压级频率响应曲线可得到频率特性曲线的上下边界,可用这两个参数来衡量扬声器的输出性能。

1) 半径的影响

为了分析半径大小对输出频率响应特性的影响,将石墨烯薄膜的厚度和应力值大小固定,设定石墨烯薄膜的半径为表 2 中的一系列值,从对应得到的频率响应曲线的上下频率边界值,可以看出改变薄膜半径对输出特性的影响规律。半径越大,低频特性越好。

表 2 不同半径值的对比情况

Table 2 Comparison of different radius values

半径/mm	2	3	4	5
ω_{min}/Hz	95	43	24	16
ω_{max}/kHz	4.81	4.76	4.74	4.74

注:厚度和应力大小分别为 100 nm 和 1 kPa

2) 厚度的影响

通过改变厚度的值进行了一系列仿真,从表 3 可以明显地看出厚度的影响规律,其对 ω_{min} 和 ω_{max} 的大小均有影响。厚度越薄,对应的声音输出具有更大的带宽,相应的声音性能更好,这也正是石墨烯薄膜作为静电扬声器振膜的优势所在。

表 3 不同厚度值的对比情况

Table 3 Comparison of different thickness values

厚度/nm	30	50	70	100
ω_{min}/Hz	5	8	11	16
ω_{max}/kHz	15.73	9.44	6.75	4.73

注:半径和应力大小分别为 5 mm 和 1 kPa

3) 应力的影响

对于薄膜应力的影响,仿真结果如表 4 所示。可以看出,更小的应力值可以拓宽输出的低频性能,而对高频性能几乎没有影响,其影响规律与理论推导的结果相一致。

表 4 不同应力值的对比情况

Table 4 Comparison of different strain values

应力/kPa	0.3	0.5	0.7	1
ω_{min}/Hz	5	8	11	16
ω_{max}/kHz	4.72	4.73	4.73	4.73

注:半径和厚度大小分别为 5 mm 和 100 nm

有限元仿真计算的结果表明,采用半径大,厚度薄和应力小的石墨烯薄膜,对应的石墨烯静电扬声器的输出频率响应特性更好。仿真计算结果与理论分析结果一致。

然而,对于制备和转移石墨烯薄膜,半径大和厚度薄之间存在矛盾,相应的石墨烯薄膜容易破损。因此,还应考虑石墨烯薄膜可靠性的因素,需进一步开展实验,探索研究可以转移得到的半径大厚度薄石墨烯薄膜的极限值。此外,在石墨烯转移完成之后,薄膜的应力值就固定了,用目前的手段难以调节石墨烯薄膜的张紧程度。进一步还应该探索新的调节和控制工艺以改变薄膜应力。对于优化石墨烯静电扬声器还需开展进一步的实验研究。

3 结 论

基于石墨烯静电扬声器的工作原理,本文通过理论建模和仿真分析研究了石墨烯薄膜半径,厚度和应力对其频率响应特性的影响。理论和仿真结果一致表明,具有更大半径,更小厚度和应力的石墨烯薄膜,将有助于改善石墨烯静电扬声器的频率响应特性。本文的研究结果可用于改进优化石墨烯静电扬声器的输出频率响应特性。

参考文献

[1] BORWICK J. Loudspeaker and Headphone Handbook [M]. Bocaaton: CRC Press, 2012.
 [2] WALKER I P J. Wide Ranje electrostatic [C]. Wireless

- World, 1955.
- [3] TEMKIN S, TEMKIN S. Elements of Acoustics [M]. New York: Wiley, 1981.
- [4] LEE C, WEI X, KYSTAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene [J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [5] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The rise of graphene [J]. Nature Materials, 2007, 6 (3): 183-191.
- [6] QIN Z, TAN L, CHEN Y, et al. Human-like sensing and reflexes of graphene-based films [J]. Advanced Science, 2016, 3(12): 1600130.
- [7] ZHOU Q, ZETTL A. Electrostatic graphene loudspeaker [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(22): 223109.
- [8] 陈诚, 刘丁, 张宏儒, 等. 等效电路分析法在声波探雷谐振模型研究中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 874-879.
- CHEN CH, LIU D, ZHANG H R, et al. Application of equivalent circuit analysis method in investigation of acoustic resonance mines detection model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 874-879.
- [9] 钦峰, 谢国利. 电磁超声换能器金属缺陷探测有限元仿真研究 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 39-43.
- QIN F, XIE G L. FE simulation study on detecting steel defects using EMAT [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7): 39-43.
- [10] 张慧, 赵晓楠, 张雯, 等. 空气耦合式电容微超声换能器的设计与分析 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2218-2225.
- ZHANG H, ZHAO X N, ZHANG W, et al. Design and analysis of air-coupled capacitive micromachined ultrasonic transducers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2218-2225.
- [11] 邵晖. 音频测试, 更快更准 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1): 17-20.
- SHAO H. Audio frequency test, faster and more accurate [J]. Journal of Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(1): 17-20.
- [12] KOENIG S P, BODDETI N G, DUNN M L, et al. Ultrastrong adhesion of graphene membranes [J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(9): 543-546.
- [13] LEE J H, LOYA P E, LOU J, et al. Materials science. Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration [J]. Science, 2014, 346(6213): 1092-1096.

- [14] SMITH A D, NIKLAUS F, PAUSSA A, et al. Electromechanical piezoresistive sensing in suspended graphene membranes [J]. Nano Letters, 2013, 13(7): 3237-3242.
- [15] ZHOU Q, ZHENG J, ONISHI S, et al. Graphene electrostatic microphone and ultrasonic radio [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(29): 8942-8946.

作者简介



程先哲, 2015年于国防科技大学获得学士学位, 现为国防科技大学硕士研究生, 主要研究方向为石墨烯力学性质、石墨烯声学响应与感知。

E-mail: 553654513@qq.com

Cheng Xianzhe received B. Sc. from National University of Defense Technology in 2015. Now he is a M. Sc. candidate in National University of Defense Technology. His main research interest includes graphene mechanical property, graphene acoustic characteristic and sound perception.



杨鹏, 2001年于西安通信学院获得学士学位, 分别在2003、2008年于国防科技大学获得硕士学位和博士学位, 现为国防科技大学讲师, 主要研究方向为石墨烯力学性质、石墨烯声学响应与感知。

E-mail: yp7894@163.com

Yang Peng received B. Sc. from Xi'an Academy of Telecommunications in 2001, M. Sc. and Ph. D. both from National University of Defense Technology in 2003 and 2008, respectively. Now he is a lecturer in National University of Defense Technology. His main research interests include graphene mechanical property, graphene acoustic characteristic and sound perception.



张勇, 2004年于武汉大学获得学士学位, 分别在2006、2012年于国防科技大学获得硕士学位和博士学位, 现为国防科技大学讲师, 主要研究方向为测试性设计、可测试性分析、故障诊断与预测及基于石墨烯材料传感技术的仿生鱼侧线感知。

E-mail: 95363020@qq.com

Zhang Yong received B. Sc. from Wuhan University in 2004, M. Sc. and Ph. D. both from National University of Defense Technology in 2006 and 2012, respectively. Now he is a lecturer in National University of Defense Technology. His main research interests include design of testability, testability demonstration, fault diagnosis and prognostics, and bionic fish lateral line perception based on graphene.



刘冠军, 分别在 1994、1996 和 2000 年于国防科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为国防科技大学研究员, 主要研究方向为测试性设计、可测试性分析、故障诊断与预测及基于石墨烯材料传感技术的仿生鱼侧线感知。

E-mail: gjliu342@qq.com

Liu Guanjun received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all from National University of Defense Technology in 1994, 1996 and 2000, respectively. Now he is a professor in National University of Defense Technology. His main research interests include design of testability, testability demonstration, fault diagnosis and prognostics, and bionic fish lateral line perception based on graphene.



邱静 (通信作者), 1985 年于北京航空航天大学获得学士学位, 分别在 1988、1998 年于国防科技大学获得硕士学位和博士学位, 现为国防科技大学教授, 主要研究方向为测试性设计、可测试性分析、故障诊断与预测等。

E-mail: qiuqing16@sina.com

Qiu Jing (Corresponding author) received B. Sc. from Beihang University in 1985, M. Sc. and Ph. D. both from National University of Defense Technology in 1988 and 1998, respectively. Now he is a professor in National University of Defense Technology. His main research interests include design of testability, testability demonstration, fault diagnosis and prognostics.

是德科技在 2017 年中国移动全球合作伙伴大会上 成功展示移动物联网模组自动化测试解决方案

模组测试解决方案可帮助客户更快完成产品的性能验证

是德科技 (NYSE:KEYS) 在 2017 年中国移动全球合作伙伴大会上, 基于 Keysight T3500S 自动化测试系统, 成功展示了移动物联网模组测试解决方案。是德科技与中国移动研究院在物联网测试研究方面开展深入合作, 研发了针对移动物联网模组功耗、射频、定位等关键功能及性能的自动化测试平台 T3500S, 帮助物联网厂商快速验证产品指标并完善关键性能。

物联网模组的通信功能和性能直接影响终端产品的质量, 是保障移动物联网产品质量的核心, 在物联网“芯片-模组-终端”的三段式测试认证体系中占有重要位置。T3500S 移动物联网模组测试解决方案能够高效快速地完成模组产品功能与性能验证, 将从整体上带动移动物联网产品质量提升, 推动移动物联网产业健康快速发展。在此次中国移动全球合作伙伴大会上, T3500S 移动物联网模组自动化测试解决方案, 吸引了产业上下游的关注, 对产业具有重要的影响力。

是德科技大中华区市场总监郑纪峰表示:“物联网是未来发展的重要方向, 而移动物联网是其中最重要的技术方案之一。我们非常高兴能在 2017 年中国移动全球合作伙伴大会上, 与产业上下游的客户进行深入交流, 并

成功展示是德科技的移动物联网模组自动化测试系统 T3500S。是德科技愿意与更多的产业客户进行合作, 通过完善的物联网测试解决方案, 帮助客户有效把控产品质量并加速产品推向市场, 提升市场竞争力。”

更多信息

关于 Keysight T3500S 物联网模组自动化测试系统的更多信息, 请访问 www.keysight.com/find/contactus 与是德科技取得联系, 了解 Keysight T3500S 系统的价格和交付信息。

关于是德科技

是德科技是一家领先的技术公司, 致力于帮助工程、企业和服务提供商客户优化网络, 进而将其电子产品以更低的成本、更快地推向市场。从设计仿真到原型验证、再到生产测试以及网络和云环境的优化, 是德科技提供了全方位电子信号测试与分析解决方案。我们的客户遍及全球通信、航空航天与国防、汽车、能源、半导体和通用电子终端市场。2017 年 4 月, 是德科技完成对 Ixia 的收购。Ixia 公司在网络测试、可见性和安全解决方案领域具有十分雄厚的实力。更多信息, 请访问 www.keysight.com。