

矢量网络分析仪硬件性能对测量结果的分析

郝绍杰 韩晓东

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

摘要: 不断改进的校准方法和校准件的性能极大地提高了矢量网络分析仪的测量精度,但随着矢量网络分析仪测量频率范围的进一步拓宽,矢量网络分析仪的硬件性能逐渐成为了影响测量精度的关键因素。本文以单端口矢量网络分析仪为例,分析了3个系统误差项对测量结果的影响。这3项系统误差都是由矢量网络分析仪硬件性能的不完善引起的,分别是由定向耦合器引起的方向性误差、激励信号源到测试端口的损耗及定向耦合器的耦合度引起的反射跟踪误差、激励信号源的阻抗不匹配引起的源匹配误差。通过分析理清了其对于测量结果的影响机理,该结论对于改进矢量网络分析仪的性能具有指导性意义。

关键词: 矢量网络分析仪;系统误差;定向耦合器;测量精度;测量稳定性

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Analysis of vector network analyzer hardware performance influence measurement result

Hao Shaojie Han Xiaodong

(The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: The measurement accuracy of vector network analyzer (VNA) is greatly improved through the continually improved calibration methods and the performance of calibration kits. However, with the frequency range of VNA increasing, the hardware performance is becoming the key factor affecting measurement accuracy gradually. In this paper, it analyzes the three system errors of single-port vector network analyzer affect the measurement results. These three system errors are made imperfect hardware performance of VNA. They are directional error caused by the directional coupler, the tracking error caused by insertion loss and the coupling of directional coupler, source mismatch error caused by mismatch of signal source. The author analyzed the impact of the mechanism on the measurement results. The conclusion is of guiding significance for improving the performance of VNA.

Keywords: vector network analyzer; system errors; directional coupler; measurement accuracy; measurement stability

1 引言

矢量网络分析仪是精度很高的网络S参数测量和分析仪器。矢量网络分析仪内部包含大量的宽带微波器部件,受材料、工艺等限制,这些宽带器件在频率覆盖范围和性能指标上无法兼顾。因此,矢量网络分析仪的原始特性都是有限的,有较大的系统误差,难以进行高精度的测量。现代矢量网络分析仪利用内部嵌入式计算机,通过矢量误差修正技术来修正系统误差,用基于软件的数学运算弥补硬件性能的不足,从而实现高精度的S参数测量和分析^[1-4]。

随着微波电子信息设备的飞速发展,对矢量网络分析

仪提出了更高的要求,体现在要具备更宽的频率范围和更高的测量准确度^[5-8],要满足这些要求,首先想到的方法是改善校准方法和提升校准件的性能指标,随着校准方法的不断改进和精密校准件性能的提升,矢量网络分析仪的射频硬件性能对测量准确度的影响凸显了出来,因此提高矢量网络分析仪的射频硬件性能愈发显得必要。主要分析了在进行单端口测量时矢量网络分析仪硬件性能的不稳定性对测量结果的影响机理。

2 理论

在矢量网络分析仪中,由于微波部件和宽带部件的不完善性引起的误差是系统误差,该误差可以通过校准予以

修正,如定向耦合器的方向性误差、信号源的失配误差、负载的失配误差、测试通道之间的跟踪误差以及通道之间的串扰误差等。在一个稳定的测量环境中这些误差是稳定的且可重复的,因而也是可表征的。除系统误差外,矢量网络分析仪还有随机误差,随机误差是不可重复的误差项,如电路特性随环境温度的漂移、外部电气干扰、测量系统的噪声、测试信号源的相位噪声、开关的重复性、测量或校准过程中连接端口的连接重复性等都属于随机误差^[5-6]。随机误差的种类多且不可重复,所以对矢量网络分析仪随机误差的分析就比较繁琐,为了简化分析,在此只考虑由于硬件的稳定性引起的随机误差对矢量网络分析仪测量结果的影响。

如图1所示为单端口网络的误差模型,图中主要包含3个系统误差项,分别是方向性误差 E_{DF} , 源匹配误差 E_{SF} 和反射跟踪误差 E_{RF} , 这3个误差项与未校准的硬件性能

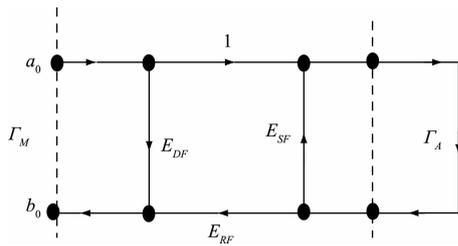


图1 单端口网络误差模型

直接对应。方向性误差主要由定向耦合器的性能决定,反射跟踪误差主要由参考通道和测试通道的相互跟踪性能决定,源匹配误差主要由激励源通路上的定向耦合器、步进衰减器、功分器和开关等微波部件的性能决定。

测量的反射系数 Γ_M 可以根据真实被测件的反射系数 Γ_A 和信号流程图中的误差项通过计算得出来。

$$\Gamma_M = E_{DF} + E_{RF} \frac{\Gamma_A}{1 - E_{SF}\Gamma_A} \quad (1)$$

矢量网络分析仪是通过采用矢量误差修正技术来获得这3个系统误差项的。矢量误差修正技术通过测量3个已知特性的器件(校准件),根据式(1)建立3个方程式,通过计算可分别得到这3个系统误差项,在此过程中,由定向耦合器决定的方向性误差通过校准完全可以得到修正,与定向耦合器的原始方向性的大小无关。

由式(1)可得到:

$$\Gamma_A = \frac{\Gamma_M - E_{DF}}{E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF} + E_{RF})} \quad (2)$$

为了得到被测件(DUT)的反射系数对3个误差项 E_{DF} 、 E_{SF} 、 E_{RF} 变化的敏感度表达式(在此假设计算得到的反射系数就等于被测件真实的反射系数),利用式(2)分别对3个误差项 E_{DF} 、 E_{SF} 、 E_{RF} 求偏微分,可得到:

$$d\Gamma_A = \frac{\partial \Gamma_A}{\partial E_{DF}} dE_{DF} + \frac{\partial \Gamma_A}{\partial E_{RF}} dE_{RF} + \frac{\partial \Gamma_A}{\partial E_{SF}} dE_{SF} \quad (3)$$

$$d\Gamma_A = \frac{(\Gamma_M - E_{DF})'(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF}) - (\Gamma_M - E_{DF}) \times (E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})'}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{DF} + \frac{(\Gamma_M - E_{DF})' \times (E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF}) - (\Gamma_M - E_{DF}) \times (E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})'}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{RF} + \frac{(\Gamma_M - E_{DF})' \times (E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF}) - (\Gamma_M - E_{DF}) \times (E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})'}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{SF} \quad (4)$$

$$d\Gamma_A = \frac{-(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF}) + (\Gamma_M - E_{DF}) \times E_{SF}}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} + \frac{-(\Gamma_M - E_{DF})}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{RF} + \frac{-(\Gamma_M - E_{DF}) \times (\Gamma_M - E_{DF})}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{SF} \quad (5)$$

$$d\Gamma_A = \frac{-E_{RF}}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{DF} + \frac{-(\Gamma_M - E_{DF})}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{RF} + \frac{-(\Gamma_M - E_{DF})^2}{(E_{SF}(\Gamma_M - E_{DF}) + E_{RF})^2} dE_{SF} \quad (6)$$

将 $\Gamma_m = E_{DF} + E_{RF} \frac{\Gamma_A}{1 - E_{SF}\Gamma_A}$ 代入式(6)中得到: $d\Gamma_A \approx \frac{-1}{E_{RF}} dE_{DF} + \frac{-\Gamma_A}{E_{RF}} dE_{RF} - \Gamma_A^2 dE_{SF}$ (9)

$$d\Gamma_A = \frac{-E_{RF}}{(\frac{E_{RF}}{1 - E_{SF}\Gamma_A})^2} dE_{DF} + \frac{-(\Gamma_M - E_{DF})}{(\frac{E_{RF}}{1 - E_{SF}\Gamma_A})^2} dE_{RF} + \frac{-(\Gamma_M - E_{DF})^2}{(\frac{E_{RF}}{1 - E_{SF}\Gamma_A})^2} dE_{SF} \quad (7)$$

$$d\Gamma_A = \frac{-(1 - E_{SF}\Gamma_A)^2}{E_{RF}} dE_{DF} + \frac{-\Gamma_A(1 - E_{SF}\Gamma_A)}{E_{RF}} dE_{RF} - \Gamma_A^2 dE_{SF} \quad (8)$$

忽略二次项后并化简得到:

从式(9)中可以清楚地看出方向性误差、反射跟踪误差和源失配误差的变化对误差修正后测量结果的影响。这3项误差的变化正是由矢量网络分析仪硬件的不稳定性造成的,如硬件电路性能随环境温度的变化漂移等。以定向耦合器为例,如果定向耦合器没有好的宽带性能指标,那么它的硬件性能是不稳定的^[9-11]。为了阐述该影响,观察如图2所示矢量图。假设由定向耦合器引起的系统的方向性误差减小,即定向耦合器具有较高的方向性指标,从图2中可以看出测量的反射系数 Γ_m 的不稳定性将降低。

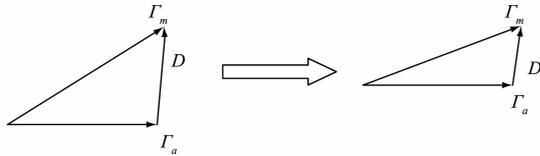


图2 方向性误差矢量

经分析可得出如下结论:

1) 系统误差项的稳定性(dE_{DF} 、 dE_{EF} 和 dE_{SF}) 与测量结果的稳定性成正比,这3项误差项的变化率越小,测量结果就越稳定。

2) 反射跟踪误差项 E_{RF} 值的大小对测量结果的稳定性也有影响, E_{RF} 越接近1,测量结果越稳定,理想情况下 E_{RF} 等于1,反射跟踪误差为0。在实际的矢量网络分析仪中,反射跟踪误差与激励信号源到测试端口间的损耗和定向器件的耦合度相关。

3) 测量结果的稳定性也是被测件反射系数的函数,会随着被测件反射系数 Γ_A 的变化而变化。不考虑其他误差的情况下,测量大反射系数的被测件比测量小反射系数的被测件更不稳定。

3 实验

为了验证上述理论,采用了一台双端口的矢量网络分析仪来进行试验,试验连接如图3所示。

微波矢量网络分析仪



图3 双端口矢量网络分析仪试验示意

试验中用到的测试仪器及测试附件有 AV3654A 微波脉冲矢量网络分析仪、AV31121 同轴校准件、3 dB 同轴衰减器和 0.5 m 长的稳相测试电缆。AV3654A 微波脉冲矢量网络分析仪的测量状态设置如下:

点频:20 GHz;

中频带宽:100 Hz;

平滑:开(2.49%)

3.1 系统误差的稳定性对测量结果的影响

为了观察系统误差的变化对实际测量结果的影响,在矢量网络分析仪的测试端口连接了一根低损耗的稳相测试电缆,连接该电缆后,测试端口的参考面被延伸到测试电缆的接头处,在测试电缆的端口依次连接开路器、负载

和短路器进行单端口校准,在试验中,模拟了在校准或者测量过程中硬件电路性能随环境温度变化的情况,这就会引起测试数据中幅度和相位的变化,幅度和相位数据的变化情况如图4和图5所示。

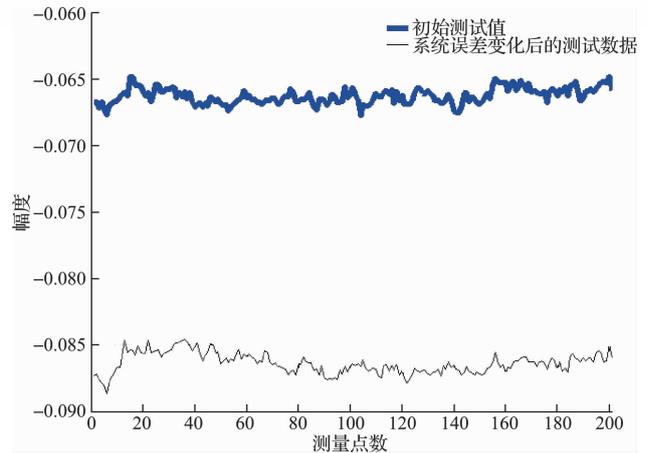


图4 幅度测试数据变化

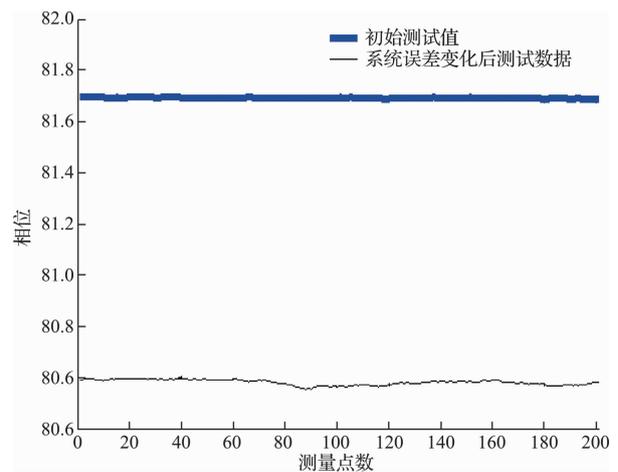


图5 相位测试数据变化

从图中可以看出,系统误差的稳定性会影响测量结果的稳定性,即引起幅度和相位测试数据的变化,本次测试中,引起的幅度测试数据的变化约为 0.02 dB,相位测试数据的变化约为 1.1° 。

实验中,在矢量网络分析仪的测试端口连接了一根低损耗的稳相测试电缆,连接该电缆后,端口的参考面被延伸到测试电缆的接头处,当校准完后,通过挪动测试电缆来模拟系统误差的变化,这会引起反射信号的相位改变,并且会影响这2个信号(反射信号和激励源通过定向耦合器泄露到测试通道中的信号)间的相位关系,会导致2个信号的幅度更加接近,因此2个信号叠加后的变化幅度将变得更大,因为2个信号间这种相位的改变是不能被预测和建模的,因此它将对校准的稳定性产生直接的影响,使得校准过程变成了一个不稳定的校准。这就是测试数据

产生变化的原因。

3.2 方向性误差的稳定性和反射跟踪误差对测量结果的影响

系统方向性误差的稳定性与系统初始的方向性有直接的关系。当矢量网络分析仪安装了指标差的定向耦合器或者在定向耦合器的信号输出端口引入了损耗,都会导致系统方向性的恶化。虽然恶化后的方向性误差也是可以通过校准修正掉的,但它却会使得方向性误差的稳定性变差,进而影响到测量结果。为了模拟恶化后的方向性误差的稳定性对实际测量结果的影响,在实验 A 的基础上,在低损耗的稳相测试电缆端口连接同轴衰减器,连接衰减器后:一方面可以模拟系统方向性误差变差的情况;另一方面也可模拟反射跟踪误差变大的情况。试验中,模拟了在校准或者测量过程中硬件电路性能随环境温度变化的情况,这就就会引起测试数据中幅度和相位的变化,测试的幅度和相位数据的变化情况如图 6 和图 7 所示。

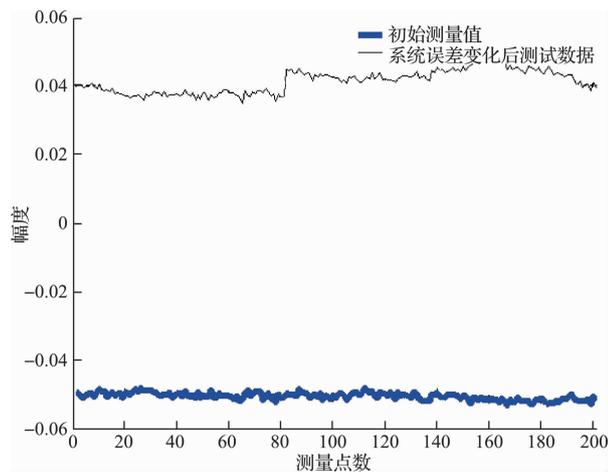


图 6 幅度测试数据变化

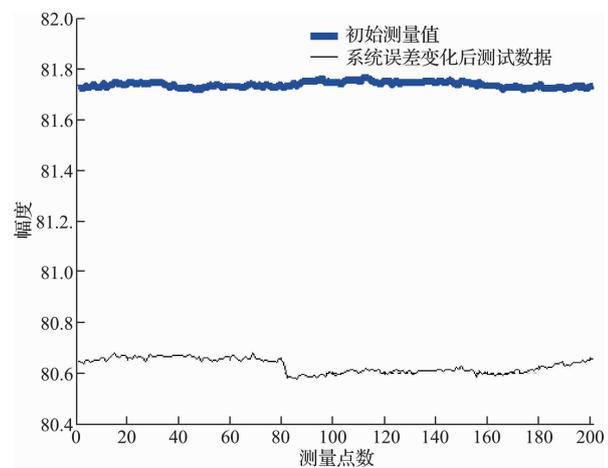


图 7 相位测试数据变化

从图中可以看出,当系统方向性误差变差后,方向性误差的稳定性会引起幅度测试数据和相位测试数据的变化。

实验中,由于在定向耦合器后引入了损耗,导致了系统方向性的进一步恶化,即系统的方向性误差变大。虽然恶化后的方向性也是可以通过校准修正掉的,但它却会影响测量的稳定性,如图 8 所示。所以对于矢量网络分析仪来说,虽然可以通过校准修正系统的方向性误差,但还是要求定向耦合器具有较高的初始方向性和被测件尽可能的接近方向性器件的端口。

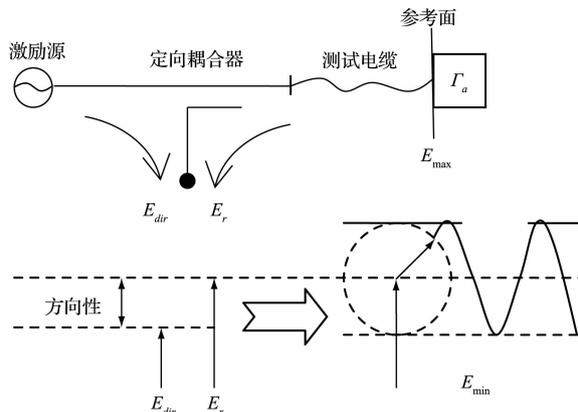


图 8 恶化的系统方向性导致系统校准不稳定示意

从图 6 和图 7 中可以看出,在测试电缆后连接 3 dB 衰减器后(模拟系统方向性变差的情况),测试电缆的移动同样会引起幅度测试数据和相位测试数据的变化,引起的幅度测试数据的变化约为 0.1 dB,相位测试数据的变化约为 1.1°。通过对比图 4 和图 5 中的测试数据的变化情况,会发现当系统方向性变差后,测试电缆移动会引起更大的测试数据的变化,使得测试误差增大,即降低矢量网络分析仪测量结果的稳定性。

通过上述理论分析和试验可得出,定向耦合器的方向性指标优劣会影响到实际测量结果的稳定性,方向性指标越好,矢量网络分析仪具有更稳定的测量结果。因此,改善定向耦合器的方向性指标可提高矢量网络分析仪测量结果的稳定性。

3.3 被测件反射系数与测量结果的关系

从式(9)中可以看出,测量结果的稳定性也是被测件反射系数 Γ_A 的函数。在实验中,通过测量一个带内具有低反射系数、带外具有高反射系数的带通滤波器,来验证测量结果的稳定性与反射系数的关系。实际的测试结果如图 9 所示。

从图中可以看出,测量结果的稳定性与被测件反射系数成正比,反射系数越大,测量结果的稳定性越差。

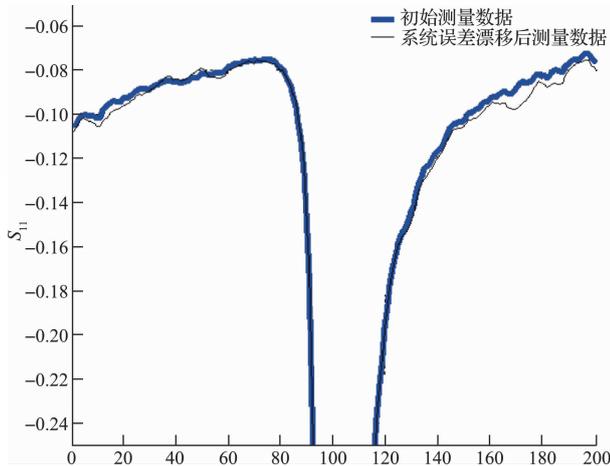


图9 幅度测试数据变化

4 结论

本文分析了矢量网络分析仪硬件性能的稳定性对测量结果的影响,并设计试验进行了验证,得出如下结论:

1)通过对比试验1和试验2中测试数据的变化情况,发现当系统方向性变差后,测试误差增大,即降低了矢量网络分析仪测量结果的稳定性。因此,定向耦合器的方向性指标优劣会影响到实际测量结果的稳定性,方向性指标越好,矢量网络分析仪具有更稳定的测量结果。

2)系统误差项的稳定性(dE_{DF} 、和 dE_{RF})和系统误差项的值 E_{RF} 都对测量结果的稳定性有影响,同样,测量结果的稳定性与被测件反射系数 Γ_A 成正比关系,会随着被测件反射系数 Γ_A 的变化而变化。

综上所述,矢量网络分析仪硬件性能的稳定性指标已影响到了最终测量结果的稳定性,随着测量频率的提高,硬件的性能指标和稳定性指标将成为决定测量结果准确度的重要因素,提高硬件的性能成为提升矢量网络分析仪性能的关键因素。例如定向耦合器、偏置网络、步进衰减器、开关等关键微波部件都需要具有稳定的性能指标。

参考文献

- [1] 郝绍杰,韩晓东. 校准件不完善导致的矢量网络分析仪剩余误差分析[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(6):54-56.
- [2] 胡小兰. S参数测量中的误差和修正[J]. 国外电子测量技术,2006,25(6):7-10.
- [3] 陈涛. 矢量网络分析仪校准误差分析[J]. 微波学报, 2010(8): 592-594.
- [4] 赵伟,赵永久,袁春花,等. 一种基于10项误差模型的二端口矢量网络分析仪校准方法[J]. 电子学报, 2011,39(10):2469-2471.
- [5] 徐知,郭海帆. 用于提高微波矢量网络分析仪测量性能的电路框架[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(8): 10-14.
- [6] 李立功. 现代电子测试技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [7] 江岩,吕朋尧. 基于矢量网络分析仪的材料反射率测试方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2013,32(8):19-22.
- [8] 李树彪,韩敬伟. 基于多任务的智能测量仪器嵌入式软件设计[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(增刊1):1-7.
- [9] RYTTING D K. Improved RF hardware and calibration methods for network analyzers[R]. Rogerpollard Org, 1991.
- [10] Understanding Directivity, Anritsu Application Note [OL]. <http://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/solutions/en-us/Understanding-directivity>.
- [11] LEWANDOWSKI A, WILLIAMS D. Characterization and modeling of random vector network analyzer measurement errors[C]. International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications, 2008:1-4.

作者简介

郝绍杰,1998年于电子科技大学获得学士学位,高级工程师。主要研究方向为宽带信号接收机。
E-mail:haoshaojie@tom.com