中图分类号：TP206^{+}.1　**doi**：10. 19708/j. ckjs. 2019. 02. 002



国家重大科学仪器设备开发重点专项总体专家组组长年夫顺 ▶

现代测量技术发展及面临的挑战

年夫顺

编者按：2018 年 11 月 7 日—8 日，由航空工业测控技术发展中心、中国航空学会测试技术分会、状态监测特种传感技术航空科技重点实验室主办，航空工业北京长城航空测控技术研究所、《测控技术》杂志社承办的第十五届中国航空测控技术年会在珠海隆重召开。国家重大科学仪器设备开发重点专项总体专家组组长、电子测试技术重点实验室主任年夫顺在会上做了《现代测量技术发展及面临的挑战》的精彩演讲。

摘要：分析了现代测量技术的市场潜力及发展机遇，提出了测量仪器发展面临的问题，从宽带测量与高速测量、稳态测量与瞬态测量、时域测量与频域测量、机内测试与机外测试、平台化与芯片化等方面分析了技术热点与发展趋势，从彻底解决仪器发展的体制与机制问题、加强仪器自主创新能力建设、聚焦仪器发展问题，顺应科学发展规律三个方面提出了意见建议。

关键词：测量；测量技术；测量仪器

1　发展现状与存在问题

1.1　市场潜力

仪器在国家科技创新、产业转型升级、国民经济建设和国防建设等方面都有着极其重要的地位。长期以来，我国测量仪器严重依赖进口，已成为我国自主创新能力提升、创新型国家建设和小康社会建设的制约因素。据不完全统计，我国科研经费投入大概有 25%用于购买仪器，科研固定资产投资大概 60%用于引进国外仪器。从海关统计数据上看，最近 5 年平均每年仪器进口费用约 800 亿元，这其中还不包括仪表和传感器等，具体数据如图 1 所示。

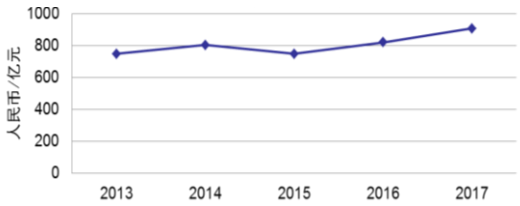


图 1　2013—2017 年 6 类仪器进口仪器总费用

1.2　发展机遇

“十二五”以来，我国测量仪器领域进入了黄金发展时期，国家科技部、自然基金委、装备发展部和国防科工局等有关主管机关都非常重视测量技术与科学仪器发展，并分别设置了测试技术科研计划，我国测量仪器迎来了前所未有的发展机遇。

（1）国家自然基金委“重大科研仪器研制专项”项目。该项目面向科学技术前沿和国家重大战略需求，以科学创新为目标导向，鼓励和培育具有原创性思想的探索性强的测量技术发展，着力支持原创性重大科研仪器设备研制，为科学研究提供更新颖的测量手段和工具，促进我国原始创新能力提升。通俗地说，重大科研仪器项目强调“探索性”、“创新性”和“原创性”，通过对自然基金委科研仪器项目资助情况统计分析，结果表明国家自然基金委科研仪器项目在国家有关测试技术科研计划中经费投入是最多的。

（2）国家科技部“重大科学仪器设备开发重点专项”项目。该专项始于“十二五”期间，也是建国以来第一次专门成立科学仪器专项。以科学仪器工程化研制为重点，注重仪器工程化开发、产业化策划和应用开发，提高仪器性能和质量可靠性水平，研制好用、耐用、能用、用户愿意用的好仪器。“十三五”期间，国家科学仪器专项重点资助了三个方面的科学仪器项

目，一是科学仪器关键核心部件，针对国产科学仪器空心化问题，打破受制于人的被动局面，实现关键核心部件自主可控；二是高端通用科学仪器，紧扣国家科技创新发展对科学仪器的重大需求，资助高端通用型科学仪器发展；三是专业重大科学仪器，围绕国家经济和产业发展、社会公益和民生改善、国家安全和公共安全的重大战略需求，重点资助专业重大科学仪器发展。

1.3　发展现状

在国家有关科研计划的支持下，我国仪器技术研究与产品开发工作取得了重要进展，高端仪器自主创新能力得到了加强，仪器产业化工作取得了长足进步，攻克了一批关键部件和核心技术，拥有一批具有自主知识产权的高水平仪器成果，形成了以分析仪器、光学仪器、物理性能测量仪器、电子测量仪器、计量测量仪器等为代表的高端通用仪器产品体系，以及以环境监测仪器、气象监测仪器、地质勘探仪器、天文观测仪器、无损检测仪器等为特色的专业重大仪器产品体系，部分仪器领域达到或接近国际先进水平，并实现了规模化批量生产能力，在国防科技和国民经济建设方面得到了广泛应用。

1.4　存在问题

长期以来，国外仪器公司凭借技术和品牌优势，占据了我国大部分高端仪器市场，而我国测量仪器发展还存在着很多问题，这些问题可归纳为测试技术领域的“三座大山”，国产仪器只能在“三座大山”的压迫下在夹缝中间求生存。

一是市场压力巨大，据不完全统计，2016 年我国进口了 449.6 亿美元的仪器仪表，这个数字是非常惊人的，继石油、电子元器件之后，仪器仪表成第三大进口商品，大概 90%的我国仪器仪表市场被国外公司垄断，国产仪器仪表只占约 10%的市场份额。

二是国外仪器公司强势竞争，西方国家与国外大型仪器公司联合，操纵我国仪器市场，一方面高端仪器对我国实现严格禁运政策，同时大量中低端仪器全面占领中国市场。另一方面，当我国高端仪器千辛万苦地开发研制出来，西方国家及时解除禁运，并通过降价等形式迅速占领我国高端仪器市场，使我国高端仪器难觅立足之地。

三是整体实力和竞争力偏低，由于我国高端仪器产业基础相对薄弱，仪器设备研发水平、技术水平和产业水平与发达国家相比还有较大差距，从科研上来看，我们是跟跑为主，并跑很少，领跑更为稀少；从产业规模上看，我国大型仪器企业也比较少，缺少国际性知名品牌，整体竞争力偏弱；从仪器信誉度上看，国产仪器的整体信誉度偏低，有些用户一提起国产仪器，总是担心可靠性和质量问题，如何提高信誉度是仪器行业面临重大难题。

2　发展趋势与热点

信息技术快速发展，人类社会已进入了信息化时代，人类对信息的依赖程度越来越强，信息改变了人们的生活方式和思维方式。现在的信息化发展也给测量仪器技术带了千载难逢的发展机遇，同时也带来了极大的挑战。

2.1　宽带测量与高速测量

宽带测量用于模拟电路和微波电路，高速测量用于高速数字电路，本来分属两个不相干的领域，但随着现代模拟与数字电路的快速发展，两种测量方式已建立起必然的联系，使电路测量与分析更加困难。

一是信号完整性评估问题。随着电子信息系统工作频率越来越高，工作波长越来越短，电路集成度越来越高，电路板层数越来越多，新的电路形式不断涌现，微波多层电路板和三维封装的微系统对信号完整性测量提出了越来越高的要求。高集成度的微波多层电路内层信号传输和层间信号传输质量的测量与评价，需要更高的测量频率，更宽的测量带宽，更高的距离分辨率。信号传输路径当中可能有很多不连续点，传输线不连续点的存在，往往会造成多次反射，对信号传输造成极坏的影响。因此需要对这些不连续点进行诊断，传统的时域反射测量，可以获得沿传输线的特性阻抗分布，可以对不连续点进行定位，但分辨率需进一步提高，测量带宽需进一步提升。

二是宽频带测量问题。常用的同轴测量仪器工作频率分别到了 50 GHz 和 67 GHz，采用 2.4 mm 连接器和 1.85 mm 连接器，下一步将重点发展 1 mm 连接器测量仪器。1 mm 同轴传输线作为一种新型的宽频带传输线，越来越受到关注，它将成新的工业标准。1 mm 同轴传输线是指外导体内直径是 1 mm，工作频率可达 110 GHz，工作频率越高，频带越宽，横截面尺寸就会越小，加工难度越复杂，研制难度也就越大。

三是太赫兹电磁波传输问题。太赫兹电磁波具有微波毫米波和光学不具备的优点，但同时它也具备微波毫米波和光学没有的缺点。对于光子学技术而言，太赫兹电磁波波长太长；对电子学技术而言，其波长又太短。太赫兹科研团队主要来自两个方面，一是微

波毫米波技术研究人员，从低频段往更高频段发展；二是光学技术研究人员，从可见光和红外波段向低频段发展。太赫兹技术发展首先要解决传输线问题，随着频率提高，太赫兹矩形波导尺寸越来越小，加工制作难度越来越大；其次是元器件问题，亟需室温工作的成套低成本太赫兹器件；再其次就是量值传递问题，太赫兹计量和量值传递标准还比较缺乏。

四是高速数字传输系统带宽问题。随着高速数字传输系统发展，数字传输速率已从 10 Gbit/s 提高到 100 Gbit/s 和 400 Gbit/s，数字电路工程师原来无需考虑数字信号传输带宽和阻抗匹配问题，而现在面临的最大挑战就是高速数字信号传输问题，数字传输速率进一步提高，保持信号波形特征就会越来越困难。按照五次谐波原理，常用的 USB、PCIe、AFDX 和 RapidIO 等高速数字总线的信号传输带宽已经到了微波甚至是毫米波频段。五次谐波原理，就是通过时钟频率的 1 次、3 次和 5 次谐波信号的叠加，能够较好地拟合数字信号的“0”和“1”，如图 2 所示，因此信号带宽=5×时钟频率=5×数字传输速率/2，一般情况下，用三次谐波就可以检测和识别数字信号的高低电平，而五次谐波拟合的数字信号高低电平更接近真实的“0”和“1”。

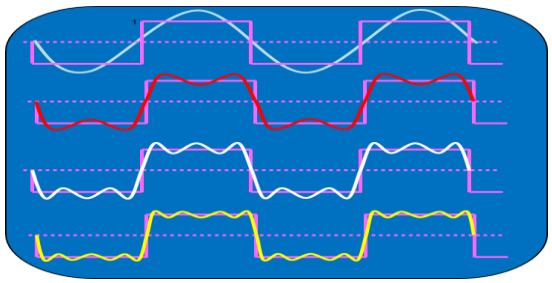


图 2　通过五次谐波来模拟“0”和“1”曲线

五是高速数字传输系统性能特性评价问题。模拟和微波电路工程师与数字电路工程师考虑问题的角度不一样，所用仪器也不一样。微波和模拟电路设计常用分布参数概念，常用测量参数是 S 参数，常用仪器是矢量网络分析仪；而数字电路设计常用集中参数概念，常用表征参数是眼图，常用仪器是数字储存示波器和误码率分析仪。随着高速数字传输速率不断提高，高速数字传输系统性能评价问题已凸显出来。必须打破传统的思维方式，利用信号完整性测试与分析方法在两者之间架起了“桥梁”。首先用矢量网络分析仪测量数字传输系统 S 参数，相当于获得频域传输函数，通过频域到时域变换，可以计算出数字传输系统非理想的时域冲激函数，然后用理想的数字信号与非理想的时域冲激函数卷积，可以计算出理想数字信号经过非理想的数字传输系统之后的输出数字信号，最后绘制数字电路工程师熟悉的眼图，就可以评价数字传输系统性能特性。在频域 S 参数和时域眼图之间建立了联系，如图 3 所示，拓展了矢量网络分析仪应用空间。

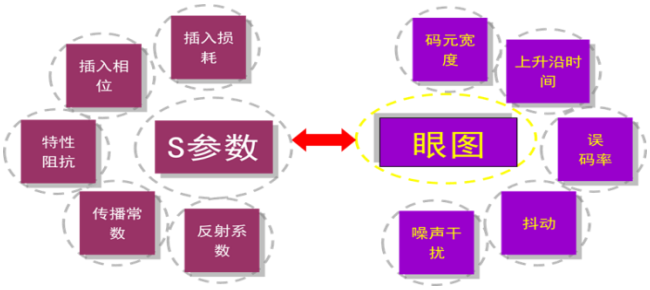


图 3　模拟和微波电路与数字电路表征参数

2.2　稳态测量与瞬态测量

传统的信号分析仪主要测量周期性稳态信号，主要测量信号频率与信号强度信息，但随着新体制电子装备不断发展，需要解决强干扰背景下时变信号、混叠信号、未知信号测量与分析问题。未来发展重点是实现从稳态周期信号测量到瞬态时变信号测量的提升，测量参数从功率、频率、频谱等参数到复杂电磁环境、调制样式、跳变模式、信息含量测量的跨越。

一是强电磁干扰环境信号测量问题。电磁信号受到环境的强干扰，信号失真非常严重，信号模样基本上面目全非。如何在强干扰情况下实现电磁信号高灵敏检测与识别是现代测量仪器一个难题。

二是瞬态时变信号捕获问题。为了避免干扰，雷达和通信设备往往采用时变信号模式，不仅载波频率捷变和功率捷变，而且调制信号波形也在变化，时变信号难以捕获与测量，迫使信号分析仪和测量接收机不断地增加实时测量带宽，提升时变信号的捕获能力，目前信号分析仪实时分析带宽已高达 2 GHz。

三是重叠信号测量与分离问题。各种电子设备辐射的电磁波构成了复杂的电磁环境，在电磁信号工作频率和出现的时间上往往都有重叠，如图 4 和图 5 所示。信号混在一起非常容易，但要把混合信号分离出来就比较困难，混合与分离往往是一个不可逆的过程。现代信号分析仪需要利用时域、频域、空域、调制域等信号分析手段，解决多域重叠信号分离问题。

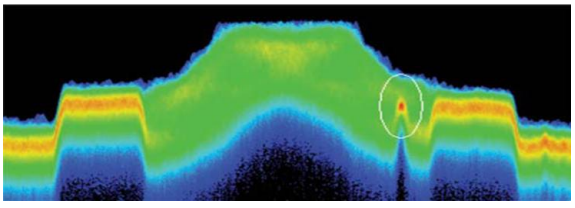


图 4　隐藏于 FM 信号的窄带干扰

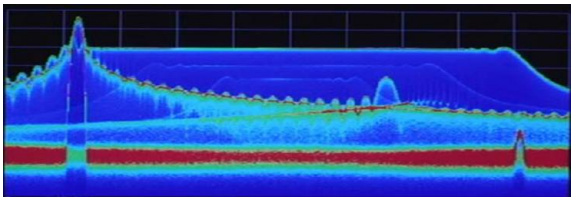


图 5　同频雷达信号叠加

四是未知调制信号识别与重建问题。电磁信号测量与分析将从已知确定信号向未知不确定信号方向发展，不仅要实现信号快速搜索，而且还要实现信号实时跟踪与识别，对未知信号进行精确测量，以获取电磁信号的特征参数，将来不仅要实现电磁信号承载信息准确获取，而且还要重构与复现未知电磁信号。

2.3　时域测量与频域测量

随着现代微电子技术不断发展，高速高精度 A/D 变换器和 D/A 变换器给测量仪器带来了根本性变革，支撑了微波测量仪器快速发展。

一是数字电路前移改变了仪器体系架构。随着高速高分辨率 A/D 和 D/A 变换器的不断发展，使仪器体系结构发生了重大变化，原来复杂的模拟中频电路被现在的简单数字中频所取代，原来中频滤波器被数字滤波器所取代，许多过去硬件实现的测量功能，现在用软件就可以实现了。如果将来 A/D 和 D/A 变换器的分辨率、采样率和带宽进一步提高，微波测量仪器前端电路大大简化，而性能特性将进一步提升，频域与时域测量仪器的界限越来越模糊。特别值得注意的是，未来仪器发展的关键器件仍然是高速高分辨率 A/D 和 D/A 变换器。

二是微波时域测量仪器取得重要进展。最近几年，美国是德科技、泰克、力科三个仪器公司利用先进的微电子技术，实现了时域测量仪器的重大突破，推出了超宽带的数字存储示波器和任意波形发生器。数字存储示波器采样速率高达 260 GS/s、带宽 110 GHz，实现了微波信号时域波形直接显示。任意波形发生器测量带宽已达 20 GHz，实现了各种复杂微波信号波形的直接编辑。宽带数字存储示波器和任意波形发生器已成为微波毫米波测量仪器新成员。原来人们只能测量电磁信号的功率、频率、频谱和调制参数，现在可以直接看波形了。但这并不意味着时域测量仪器将取代了频谱分析仪、信号分析仪、信号发生器等频域测量仪器。主要有两个理由，一是电磁信号的幅度、频率、频谱、谐波、分谐波、寄生响应等主要参数测量方法都是以频域测量仪器来定义的，频域测量仪器可以直接获得，测量起来比较方便；二是目前频域测量仪器的测量能力是时域测量仪器还无法比拟的，比如信号测量灵敏度，频谱分析仪要高出数字存储示波器 50~60 dB，而任意波发生器的相位噪声和谐波分谐波指标也与传统的信号发生器有很大差距。目前来看，时域微波测量仪器的加入，不是一种取代关系，而是相互补充关系，多了一种选择，多了一种测量手段，未来相当长一段时间，频域与时域测量仪器是一种相互补充的并存发展关系。

2.4　机内测试与机外测试

近 10 年来，电子信息产品性能特性和质量可靠性发生了根本性变化，其重要特征就是高可靠长寿命和更新换代速度快，这些变化对测量技术发展提出了严峻挑战。有人甚至认为未来高可靠性、高质量、自测试、自诊断和自修复技术发展，将颠覆测量仪器行业发展。

一是高可靠高质量电子产品对仪器依赖程度不是降低而是提高了。现代计算机、手机和家用电器等民用产品维修保障的测量需求确实在减少。但并不意味着这些高质量高可靠民用产品不需要测量仪器，相反在手机、计算机和家用电器等民用产品生产过程需要大量的测量仪器，就是因为生产过程进行了充分测试，才有可能保证电子产品的质量和可靠性。虽然维修和维护的测量仪器用得少了，但在科研与生产过程中对仪器的要求更高、需求更大。同时移动通信的基站和互联网等基础设施，以及现代电子装备的维修保障测试需求依然旺盛，而且也更加迫切。

二是嵌入式测试融入被测对象是未来一个重要发展方向。随着嵌入式测试与故障诊断技术的不断发展，使得测试与被测对象融为一体成为可能，嵌入式测试已成为电子产品在线测试与故障隔离的重要手段，也是日常维护和维修保障的主要依赖手段。嵌入式测试定期或连续地监测设备运行状态，通过实时监测可以发现设备异常现象，提供故障报警，并自动启动故障诊断程序进一步隔离故障，是提高设备测试性和维修性的重要技术途径。测试融入被测对象是未来一个必然的发展趋势，而且正超着自测试、自诊断、自修复的方向发展。嵌入式测试技术会不会成为现代测量仪器的颠覆性技术，值得重点关注。

2.5　平台化与芯片化

随着微电子技术和人工智能技术的不断发展，测量仪器体系结构也在不断地发生变化，标准化、模块

化、系列化发展方向上又多了芯片化和平台化两个重要特征，初步形成了 MC^3I（测量、计算机、控制、通信与人工智能）体系架构，预示着仪器未来发展方向。

一是智能化仪器体系已逐步形成。20 世纪 80 年代，测量与计算机第一次融合，形成了 MC 体系架构，使得测量精度和测量速度都提高了 100 倍。进入 20 世纪 90 年代，测量与计算机和控制技术进一步融合，形成了 MC^2 的体系架构，实现了自动控制与自动测量，使测试效率和测量水平大幅提升。进入 21 世纪，测量与计算机、控制和通信技术进一步融合，形成了 MC^3 的体系架构，使远程测量与远程故障诊断成为可能，实现了分布式网络化测量能力。最近几年，测量与计算机、控制、通信和人工智能技术进一步融合，形成了 MC^3I 体系架构，并朝着智能测试、智能化故障诊断、智能化故障预测方向发展。

二是可重构仪器平台已逐渐成熟。随着合成仪器技术不断发展，可重构仪器平台已逐步成熟，并走向实际应用。未来仪器发展，平台化发展趋势非常明显，可重构的硬件平台和软件平台，将大幅提高硬件资源的利用效率，呈现硬件资源最小化、软件资源最大化发展趋势。一代硬件平台可搭载多代或多种软件，可有效地提高硬件资源利用率，充分发挥软件作用，仪器开发成本将从硬件开发成本为主体，向软件开发成本为主体的方向发展。一代硬件平台支撑多代软件，可有效地延长硬件资源的生命周期，测试软件的地位越来越重要。

三是仪器芯片化和集成化趋势非常明显。随着数字、模拟和微波集成电路的不断发展，数字、模拟和微波集成电路与嵌入式计算机使仪器测量能力不断增强。仪器芯片化发展和集成度的提高，不仅降低了仪器的体积和重量，更重要的是提升了仪器的测试能力和技术水平。仪器芯片化发展，使仪器开发成本大幅上升，而仪器生产成本却大幅下降，生产量越大，仪器成本效益就越明显。

3 发展目标与意见建议

我国是一个世界大国，不能没有自己的仪器工业，必须形成自己的测量仪器工业体系，要培养“国内卓越、世界一流”的尖端科学仪器企业，打造集基础研究、关键技术攻关、产品开发研制、批量生产、市场销售和客户服务一条龙的现代仪器集团，并培养若干有特色的“隐形冠军”企业。但是现在面临的形势还非常严峻，还有许多深层次问题需要解决，打造世界知名仪器企业，不是用钱可以堆起来的，需要转变观念，解决体制机制问题。为此提出以下几个建议。

一是彻底解决仪器发展的体制与机制问题。我国仪器相关科研项目主要集中于高等院校和研究机构，而企业做主角的科研项目还比较少。不少科研机构虽然实现了企业化转制，但发展模式还是科研管理模式，而非企业化运行模式，市场运作能力普遍比较弱，不适合日益恶化的市场竞争环境。因此必须转变观念，转变思想，建立和完善适合仪器规模化发展的体制与机制，着力培养世界有影响力的尖端科学仪器企业。

二是加强仪器自主创新能力建设。我国很多仪器企业缺少人才、缺少核心技术，要实现从现在的跟跑，到并跑都已经很困难，要实现领跑困难更大。因此非常有必要构建“产、学、研、用”联合的合作模式，建立良性的仪器生态环境，再加上国家大量的经费投入，重点提升仪器自主创新能力，培养世界一流人才梯队，实现仪器自主可控，相信通过测量仪器人的艰苦努力，我国一定能实现超越，领跑世界仪器发展。

三是聚焦仪器发展问题，顺应科学发展规律。现代测量仪器发展也面临着“摩尔定理”制约，仪器测量功能越来越多、越来越全，正朝着小型化、模块化、多功能、组合化方向发展。如果按照传统设计理念，仪器体积和面板已经容纳不下如此多的功能。因此，必须适应时代需求，发展虚拟仪器、合成仪器、数字化仪器、软件定义仪器和认知仪器等新体制仪器。为此，建议加强仪器标准体系建设和标准化工作，走型谱化发展之路，共享硬件和软件资源，提高仪器科研效费比；加强测量仪器工程化研制工作，不断提高仪器质量可靠性和技术成熟度，打造好用、耐用、用户愿意用的好仪器。

□

作者简介

年夫顺，国家重大科学仪器设备开发重点专项总体专家组组长，电子测试技术重点实验室主任，长期从事电子测量仪器科研开发与管理工作。主持微波毫米波与太赫兹电路设计制造技术研究，形成了以宽频带为特色的微波毫米波与太赫兹有源和无源部件产品体系，微波毫米波与太赫兹测量仪器的关键部件全部实现国产化。主持微波毫米波与太赫兹矢量网络分析仪研制，形成了标准化和系列化产品，并实现了规模化批量生产。以矢量网络分析仪为核心仪器，构建了电磁材料、天线与雷达散射截面测量系统，解决了片上天线、低旁瓣天线、大型相控阵天线、MIMO 天线、隐身材料及隐身目标等测量评估难题，拓展了矢量网络分析仪的应用空间。