第15卷第3期
2025年3月

中国无机分析化学
Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry

Vol. 15, No. 3
382～388

doi: 10. 20236/j. CJIAC. 2025. 03. 009

赵英飞,王小龙,李凯,等. 关于电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法在科学、技术、产品、应用方面的思考[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(3): 382-388.

ZHAO Yingfei, WANG Xiaolong, LI Kai, et al. Reflections on ICP-MS in Science, Technology, Engineering and Applications[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(3): 382-388.

关于电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法在科学、技术、产品、应用方面的思考

赵英飞　王小龙　李 凯　方 哲　王 雷　李宏伟　沈学静

(钢研纳克检测技术股份有限公司,北京 100094)

摘　要　电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法是一种高灵敏度的分析技术,广泛应用于地质、环境、生物、医药、半导体等领域的元素分析。ICP-MS仪器设备的研究、开发、制造和应用涉及电磁学、电学、化学、机械、材料、真空等多学科、多领域的科学和技术,对ICP-MS涉及的科学原理、技术系统,以及产品工程化和应用开发考虑的因素进行概述,最后说明产品开发应系统性地考虑科学、技术、产品和应用的相互关系,提出了ICP-MS技术创新思路和发展方向。

关键词　ICP-MS; 工程开发; 系统性开发

要点

1) 从科学原理、技术、产品和应用方面分析了ICP-MS的现状。

2) 对ICP-MS未来发展趋势进行了展望。

3) 国产ICP-MS系统性开发遇到的困难和发展前景。

中图分类号: O657. 63　TH843　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 2095-1035(2025)03-0382-07

电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)是一种高灵敏度的分析技术,主要用于测定超痕量元素含量和同位素比值分析。ICP-MS仪器主要由等离子体发生器、进样系统、接口系统、离子传输系统、四极杆质量分析器、真空系统和离子探测与控制系统组成。电感耦合等离子体质谱仪结合了等离子体技术和质谱技术,具有高灵敏度、高分辨率、高准确性和高通量的特点,广泛应用于地质[1]、环境[2]、生物[3]、医药[4]、半导体[5]等领域的元素含量分析。

约瑟夫·约翰·汤姆森于1897年发现电子,在1913年发明了第一台质谱仪,这台仪器使用磁场来分离不同质量的离子,并通过检测这些离子的偏转角来确定它们的质量。这台仪器的出现标志着质谱技术的诞生。1978, HOUK等[6]搭建了全球第一台可以从ICP中提取离子的ICP-MS, 1983—1987年, SCIEX和VG推出了商品化ICP-MS仪器。ICP-MS技术经过几十年的发展,已经成为元素含量分析领域不可或缺的检测工具。

ICP-MS仪器设备的研究、开发、制造和应用涉及电磁学、电学、化学、机械、材料、真空等多学科、多领域的科学和技术,在ICP-MS的研究过程中,涉及的知识在科学、技术、产品、应用不同的层次上各有规律,不能以科学研究的方法搞技术,也不能以技术的方法搞科研,也不能以搞技术的方法搞产品。

1　ICP-MS仪器领域的科学原理

科学是一个建立在可检验的解释和对客观事物的形式、组织等进行预测的有序的知识系统,是已系统化和公式化了的知识。科学发现是指人们对自然界客观存在的前所未知的物质、现象及其变化过程和客观规律的认识。这些规律是客观上已经存在的,例如万有引力、电场、磁场、电磁波等现象。

收稿日期: 2024-12-24　　**修回日期**: 2025-01-13

基金项目: 基础科研条件与重大科学仪器设备研发项目(2023YFF0721602)

作者简介: 赵英飞,男,高级工程师,主要从事分析仪器开发研究。E-mail: zhaoyingfei@ncschina. com

ICP-MS仪器领域涉及的主要科学原理包括等离子体、库伦定理、洛伦兹力、文丘里效应和次级电子发射原理等。在电路设计、机械设计中也包含一些基本的科学原理，但和质谱技术的关系不大，这些科学原理不再赘述。

1.1　等离子体

等离子体是由克鲁克斯在1879年发现的，1928年美国科学家欧文·朗缪尔和汤克斯首次将“等离子体”（Plasma）一词引入物理学，用来描述气体放电管里的物质形态。等离子态在宇宙中广泛存在，常被看作物质的第四态，太阳及其他恒星、脉冲星、许多星际物质、地球电离层、极光、电离气体等都是等离子体。

等离子体(Plasma)是一种电离的气体，具有高位能动能的气体团，等离子体的总带电量仍是中性，借由电场或磁场的高动能将外层的电子击出，电子已不再被束缚于原子核，而成为高位能高动能的自由电子。等离子体呈现出高度激发的不稳定态，其中包括离子、电子、原子。由于存在电离出来的自由电子和带电离子，等离子体具有很高的电导率，与电磁场存在极强的耦合作用。

ICP-MS采用等离子体的高温和电子密度特性，待测样品的气溶胶在高温等离子体中干燥、分解、解离、原子化、离子化，产生的离子进入质谱系统。

1.2　库伦定理

库仑定律是静止点电荷相互作用力的规律，真空中两个静止的点电荷之间的相互作用力同它们的电荷量的乘积成正比，与它们距离的二次方成反比，作用力的方向在它们的连线上，同名电荷相斥，异名电荷相吸。1785年法国科学家C，－A.de库伦由实验得出。

库存定理有效解释了元素离子间的歧视效应。

1.3　洛伦兹力

洛伦兹力是运动于电磁场的带电粒子所受的力，它与带电粒子的电荷量、电磁强度、带电粒子的速度、磁感应强度有关系。它是荷兰物理学家H·A·洛伦兹于1895年建立经典电子论时，作为基本假定而提出的。根据洛伦兹力定律，洛伦兹力可以用洛伦兹力方程表达，表达为：

$$F=q\left(E+v\times B\right)$$

式中：F是洛伦兹力，单位为N；q是带电粒子的电荷量，单位为C；E是电场强度，单位为N/C；v是带电粒子的速度，单位为m/s；B是磁感应强度，单位为T。

洛伦兹力公式和麦克斯韦方程组以及介质方程一起构成了经典电动力学的基础。在许多科学仪器和工业设备，例如β谱仪、质谱仪、粒子加速器、电子显微镜、磁镜装置、霍尔器件中，洛伦兹力都有广泛应用。

ICP-MS质量筛选器和各级离子传输透镜，均利用洛伦兹力对离子的传输进行筛选、加减速和聚焦。

1.4　文丘里效应

文丘里效应是指受限流动在通过缩小的过流断面时，流体出现流速增大的现象，其流速与过流断面成反比。这种现象被意大利物理学家文丘里发现。

ICP-MS利用文丘里效应制作的雾化器将待测溶液样品转为气溶胶。分析溶液进入雾化器，在雾化器毛细中心管出口处，因载气流速很快(约150～200 m/s)，而试液流速较慢，两者之间产生摩擦力，液流被拉细并被气流冲击破碎成雾滴。

1.5　次级电子发射现象

次级电子发射现象，通常指由于初级电子撞击固体，导致固体内发射电子的过程。1898年 Starke和1899年 Campbell 在研究固体与电子的相互作用时分别独立发现了次级电子发射现象。次级电子发射在各种真空电子器件中应用十分广泛，利用次级电子发射现象的电子倍增效应制作成光电倍增管，可将微弱的电信号逐级放大至数百万倍。

ICP-MS采用使用次级电子发射现象原理的电子倍增器作为离子检测器，将接收到的离子转为电流或脉冲信号。

2　ICP-MS仪器涉及的主要技术

技术是解决问题的方法及方法原理，是指人们利用现有事物形成新事物，或是改变现有事物功能、性能的方法，包含各种工艺操作方法与技能、工艺过程或作业程序、相应的生产工具和设备等。技术的发明是科学知识和经验知识的物化，使可供应用的理论和知识变成现实，科学解决理论问题，技术解决实际问题。

ICP-MS仪器涉及的主要子系统包括样品引入系统、ICP离子源系统、接口系统、离子透镜系统、四极杆质量分析器、真空系统、数据采集和控制系统、机壳框架、软件等几个部分，每个部分均包含了不同的技术内容，见图1。

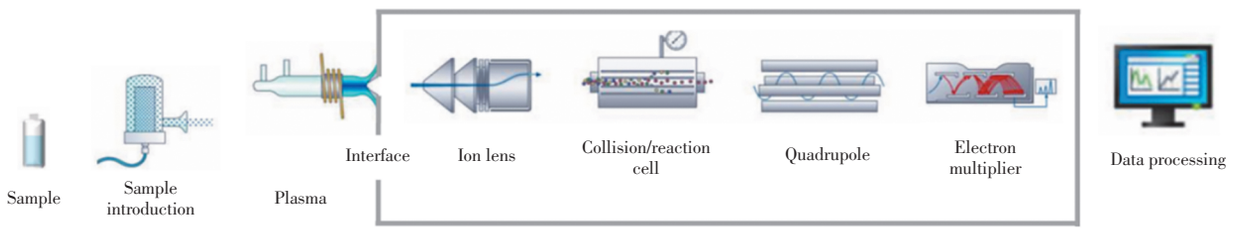

图1 质谱系统主要部件示意图

Figure 1 The main components of the ICP-MS.

2.1 样品引入系统

样品引入系统的作用是把待测样品溶液转换为气溶胶，并稳定地输送到等离子体中。样品引入系统通常包含：蠕动泵、雾化器、雾室、炬管以及载气和附加气(有机进样系统加氧或高盐进样系统在线稀释)的流量控制。

雾化器、雾室、炬管和蠕动泵泵管根据溶液类型(硝酸体系、盐酸体系、硫酸体系、氢氟酸体系或有机溶剂等)需用不同的材料来设计，以匹配基体类型。

蠕动泵通常包含电机、传动机构、泵头和电机驱动控制电路。蠕动泵的技术设计要素主要包括转速、扭矩、通道数量、滚轮数量、泵头外径、蠕动泵泵管装卡方式、装卡间距、蠕动泵泵管压紧方式、压紧力调节等。

炬管的技术设计要素通常包括材料(石英、陶瓷等)、尺寸(中心管内径、炬管外径、中管和外管的壁厚、长度等)和装配方式(一体式炬管、半可拆卸式炬管和全可拆卸式炬管的考虑)。

雾室的技术设计要素通常包括雾室样式(旋流雾室、双筒雾室等)、材料(玻璃、石英或有机材料)、尺寸、雾化器安装接口方式和与炬管的连接方式等。

2.2 ICP离子源系统

ICP离子源系统产生受控的射频功率信号，功率信号经炬管线圈耦合，在炬管中产生稳定的等离子体。进样系统产生的气溶胶进入等离子体中心通道，在高温等离子体中干燥、分解、解离、原子化、离子化。

ICP离子源通常包含功率产生电路、负载匹配电路、炬管线圈和供电电源等，电路控制系统控制ICP离子源按流程运行，并进行状态监控和异常保护。

ICP离子源的技术设计要素主要包括功率产生和控制方式(功率放大元件的选择，如MOS管、IGBT、电子管等；放大电路增益和放大级数设计；驱动电路设计；功率匹配电路设计；功率放大电路工作方式设计，如B类、C类、E类等；功率调节范围、功率调节精度、功率控制精度、功率稳定性等)、频率产生方式(它激式、自激式和变频式)、功率匹配方式(一体化直接匹配耦合、分体式匹配器耦合匹配、匹配状态监控和匹配调节方式等)、功率采样和功率控制设计、电源设计(根据功率产生使用的元件设计，设计要素参数包括电压、电流、电压调节方式)等。

2.3 等离子体三维调节系统

等离子体三维调节系统控制等离子体与接口系统采样锥的相对位置，通常为与锥孔的X、Y、Z方向上的距离。

等离子体三维调节系统的技术设计要素主要包括传动机械机构、传动电机控制、移动位置调节范围、调节精度、重复定位精度、负载能力等。

2.4 接口系统

ICP在大气压下运行，而质量分析器和检测器需要高真空条件，因此ICP-MS需要一个接口将离子从ICP传输到质谱仪，同时保持真空系统中的低压条件。

接口的技术设计要素主要包括锥体组合结构(锥的个数、尺寸、相对位置等)、锥体材料(铜、镍、铂等)、锥体形状和中心孔尺寸、接口挡板阀(密封方式、开关方式、打开与关闭机构等)、接口冷却结构等。

2.5 离子透镜系统

离子通过接口锥后，离子透镜将它们聚焦成较窄的离子束，传输至碰撞反应池。透镜由几块金属板组成，金属板上施加了可调电压。施加正压的金属板排斥带正电荷的离子，而施加负压的板则吸引这些离子。使用施加不同电压的透镜板组合来引导和聚焦离子。除了聚焦离子从而尽可能提高传输效率和灵敏度外，离子透镜还可以将离子与提取自等离子体的中性粒子和光子分离。这些不带电粒子会导致背景信号升高，因此必须防止它们通过真空系统到达检测器。

离子透镜的技术设计要素主要包括离子偏转型式、电极形状及距离、电场分布、电极电压范围、离子通过率等。

2.6 碰撞反应池

离子通过离子透镜后，进入封闭的碰撞反应池。

碰撞反应池可以通过惰性气体（碰撞模式）或反应性气体（反应模式），能够解决常见的谱图干扰。碰撞反应池由离子导杆（通常为八极杆、六级杆或四极杆）组成，位于可以通过气体加压的封闭腔室中。较小的入口和出口孔可维持碰撞/反应池压力，同时允许离子进出碰撞/反应池。

碰撞反应池的技术设计要素主要包括离子导杆的直径、长度、数量和材料、进气形式、进气种类、屏蔽罩等。

2.7　四极杆质量筛选器

离子通过碰撞反应池后，进入四极杆质量筛选器。四极杆质量筛选器由两对极杆组成，相对的极杆为一对，不同杆对连接到不同的电源，对两对极杆施加一个异相RF电压（V）和一个正或负直流电压DC（V）（y轴杆上施加RF/+DC，x轴杆上施加RF/−DC），在极杆之间的空间中形成的电场决定了通过的离子质量数，该质量数的离子可以沿着四极杆轴稳定移动并通过质量过滤器。交变电场使高于或低于设定质量数的所有离子的运行轨迹不稳定，把任何其他质量数的离子剔除出离子束。

四极杆质量筛选器必须配合四极杆电源工作。

四极杆质量筛选器的技术设计要素主要包括筛选的质量数范围、杆直径、杆形状（圆形、双曲面等）、杆材料（钼、陶瓷镀金、不锈钢等）、杆长度以及圆柱度等。

四极杆电源的技术设计要素主要包括频率、电压范围、电压稳定性、电压重复性、电压响应时间、电压稳定时间、控制非线性、电源噪声、频率稳定性等。

2.8　数据采集和控制系统

大多数ICP-MS系统中使用的检测器是电子倍增器，从四极杆出来的离子会撞击电子倍增器的打拿极。撞击第一个打拿极的每个离子都会从打拿极表面释放一个或多个电子，然后这些电子撞击第二个打拿极，释放更多的电子撞击第三个打拿极，依此类推，到最后一个打拿极时，电子级联已经达到足够高的水平，可以被电路检测为电流或脉冲计数。一些电子倍增器具有模拟信号和数字信号两类输出信号，分别适用于检测高低浓度元素的强弱信号。

除数据采集外，ICP-MS还需包含一套控制系统来控制设备执行操作、反馈设备状态和对设备工作异常进行判断和保护。

数据采集和控制系统的技术设计要素主要包括信号调理电路、模拟采集电路、脉冲采集电路、通信电路、各种控制信号输出电路、仪器状态监控和显示电路、电控系统拓扑结构等。

2.9　真空系统

质谱技术要求离子具有较长的平均自由程，以便离子在通过仪器的途径中与另外的离子、分子或原子碰撞的几率最低，由此精确控制离子的运动轨迹，保证离子束有良好的聚焦，得到应有的分辨率和灵敏度。在一个系统中，离子的平均自由程与该系统的真空度有关。

ICP-MS的真空系统通过几个分立的真空腔使真空度逐渐达到要求。第一级真空室即接口处，大量被提取的气体在此处被排出，此级压力一般为200 Pa。在装有离子透镜的第二级真空室，压力约为10^{-1}～10^{-2} Pa。第三级为质量分析器和检测器系统，需要真空压力约为10^{-4}～10^{-5} Pa。第一级采用一个机械泵实现，第二、三两级真空室采用涡轮分子泵实现。

真空系统的技术设计要素主要包括真空度、真空腔体材料、腔体壁厚、各接口密封形式、各馈入件形式、机械泵抽速、真空泵抽速、真空规数量类型、真空规位置等。

2.10　软件

对于测量的每一个质量数，检测器记录的计数由控制仪器的计算机上的数据分析软件处理。对于常规的定量分析，软件通过将样品的实测计数与已知浓度参比溶液的计数进行比较，从而计算未知样品中每种元素的浓度。

软件系统的设计要素包括软件架构设计、界面布局设计、通讯设计、操作流程设计、数据处理和算法设计、数据库设计、报表设计、权限设计等。

3　ICP-MS产品及系统性开发思考

3.1　产品

产品是指被人们使用和消费，并能满足人们某种需求的任何东西。产品是工程开发的结果，工程开发是运用有关的科学知识和技术方法，通过有组织的活动将某些现有实体转化为具有预期使用价值的人造产品的过程。工程开发的目的是制造出产品，所以绝大多数的产品开发可以看成工程开发。

产品开发必须以市场为导向，要有明确的时间、成本和质量目标。产品开发必须以客户为中心，从客户的需求出发，逐步将客户需求转化为技术需求，然后选择相应的技术来满足，如果没有现成的技术，应当转向技术成熟度更低的技术开发。

产品开发团队需要考虑方方面面的问题，包括但不限于性能、质量、成本、良率、美观、安全、知识产权、环保、运输、安装、回收、可靠性、耐用性、易用

性、可操作性、可维护性、可制造性等。在众多的约束条件下，开发出产品，有的约束条件还具有“一票否决”权。

产品工程开发解决的是一些核心性能之外的问题，例如，在解决了离子源的核心性能之外的散热问题、电磁干扰问题、电路板布局问题、水冷布局问题、振动问题、安装问题、维修问题等。如果某些影响关键性能的问题还没有解决，就应该开展成熟度更低的技术开发或“预研”工作，而不是产品工程开发。

产品工程开发往往会伴随着多种技术的应用，而不同的技术又源自不同的科学原理，在ICP-MS产品的开发中，就涉及到样品引入系统、ICP离子源系统、接口系统、离子透镜系统、四极杆质量筛选器、真空系统、数据采集和控制系统、机壳框架、软件等技术系统的应用。

ICP-MS产品在工程开发过程中，上述关键技术在应用到产品时，部件和整机工程开发时除了基本功能、性能和成本方面的考虑，还需要考虑一些可靠性、可制造性、可维护性、可装配性、可测试性等非功能方面的要求，部分因素如表1所示。

表1 工程开发中的因素

Table 1 Factors in engineering development

Number	Parts	Factors in engineering development
1	Sample introduction system	Torch: Placement direction(horizontal, vertical), mounting type, mounting location tips; Peristaltic pumps: Pump head orientation, direction of pump tubing clamping, mounting type; Chamber: Mounting type; The sample introduction system follows the movement of the three-position moving platform; The interface style of the gas; Tolerance of torch size; Detachable torche′s torch base structure, materials, seals, etc.
2	ICP ion source system	Cooling, electromagnetic shielding, volume, weight, mounting type.
3	Interface system	The installation method of the cone, the heat dissipation of the interface, the type of the baffle valve, the way to replace the cone, and the protection of the baffle valve.
4	Ion lens system	Materials, dimensional tolerances, installation accuracy.
5	Collision/Reaction cell	Material, air inlet position, sealing, installation fixing method, installation repeatability, installation accuracy.
6	Quadrupole mass filter	Quadrupole material, shape, length, assembly method, cleaning and maintenance method, anti-vibration, installation and positioning method; Electromagnetic shielding, signal interface, installation and replacement methods, circuit heat dissipation, constant temperature and reliability of key circuits of quadrupole power.
7	Acquisition and control systems	The selection of component packaging, the selection of various interfaces, the selection of cables, the processing technology of circuit boards, EMC design, grounding system design, heat dissipation design, seismic design, and anti-corrosion design.
8	Vacuum system	Pump installation method, cavity material, material and type of feeder, sealing method, processing requirements of sealing interface, sealing interface fixing method, pump topology, vacuum system protection, shockproof, electromagnetic shielding, etc.
9	Software	Functionality, reliability, ease of use, efficiency, maintainability, portability, etc.
10	The mechanical structure	Structural form, panel material and installation method, form of each interface, installation method of interface and components, frame material, weight reduction design, seismic design, anti-corrosion design, easy handling design, maintainability design, heat dissipation design, ventilation design, etc.

3.2 产品系统性开发的思考

科学、技术、产品和应用的关系是紧密相连，互相依存的。科学家发现的科学原理可以用于产生多种不同的技术，技术反过来又推动科学的发展。近几十年来，在科学上的重大发现更是借助仪器设备来实现的，这些设备中包含多种技术的综合应用。有时候一种技术的实现也往往依赖多种科学原理。某一种技术会衍生出非常多的产品，产品开发中又会用到很多技术。产品往往是多学科、多技术的综合运用，产品开发成功后，会衍生出很多的应用，应用也离不开多种产品的支持。

一般情况下，科学研究、技术开发、产品开发和应用开发的主体工作不同，往往是由不同团队承担，不同的团队所擅长的技能是不一样的，不同的开发工作的关注点是不同的，例如一个好的科学家未必就是一个好的工程师，一个好的应用工程师未必就是一个好的系统架构师，反之亦然。绝大多数企业往往只从事技术开发、产品工程开发、应用开发方面的工作。技术开发根据产品技术发展趋势进行规划，除了当前产品较急迫需求的技术，还根据未来一年、三年、五年、甚至十年以后的产品发展趋势进行技术布局，而不是仅仅着眼于当前产品中存在的问题。技术开发往往周期比较长，需要提前开发和布局才能满足产品快速迭代的节奏。产品开发往往基于业务发展以及市场不断提高的需求，例如产品性能的提高、成本的降低、效率的提升等。应用开发针对客户的通用需求和特殊需求，除

调整和优化仪器参数外，还推动产品的技术和功能进一步发展，以满足新的需求。

在企业中，技术开发、产品开发和应用开发都非常重要，不可偏废。一些成熟的企业，开发团队70%的资源用于当前产品的开发和改进，20%的资源关注未来1～3 a的产品开发和技术开发，10%的资源用于未来更长时间的技术布局和产品布局，逐年进行开发内容的调整和优化，兼顾技术、产品和应用开发工作，持续推出有竞争力的产品。当前国内分析仪器企业还处于发展阶段，在研发人员和研发资金投入不足的情况下，要抓住各个阶段开发的主要特征，在不同阶段关注不同的开发内容和指标，加强开发人员的能力培养和企业知识体系的建设，突破关键技术创新和产品创新。

科学的研发体系可以帮助企业多、快、好、省地推出优秀的产品。目前有许多成熟的研发体系，像IPD(集成产品开发)、NPI(新产品导入)、Stage Gate(门径管理)、PACE(产品周期优化)等，企业根据自身情况选择一种或多种搭建企业内部的研发体系。除了顶层的体系设计，在产品开发过程中还有不同的研发方法论，例如DFSS(六西格玛设计)、DoE(实验设计)、TRIZ(发明问题解决理论)、CECA(因果链分析)、FMEA(潜在失效模式及后果分析)、FRACAS(故障报告、分析和纠正措施)等，研发方法论可以在某些方面给研发人员提供一定的引导，大大地提高研发的效率和质量。

ICP-MS产品的大多数技术均被专利保护，技术创新就尤为重要。ICP-MS技术创新的方向在如何提升离子传输效率、降低多原子离子干扰、提升基体耐受能力、提升质量筛选能力、软件的自动化智能化能力等方面，TRIZ理论为这些技术创新提供了系统的理论和方法工具。

随着科学研究的深入，质谱分析的样品越来越复杂，需要更高的分析灵敏度、分辨率和准确性，通过不断提高质谱仪器的分析性能，实现更复杂的样品分析，开发更高分辨率、更高精度、更快速和更便携的质谱仪器，同时改进质谱技术，开发新的分析方法和应用，开发更智能、更高效、更自动化的数据分析和处理方法，提高数据的质量和可靠性。由于质谱分析涉及化学、电学、电磁学、材料学等多学科交叉，只有充分理解和掌握基本科学原理，通过创新方法解决关键技术问题，才能使质谱仪器产品的发展更加适应用户需求。

4　应用

应用通常指根据不同客户、不同的应用场景，产品在通用功能基础上可以精准地满足客户差异化的需求。应用开发往往意味着技术已经解决、工程化基本成熟，往往只是比较简单的参数调整、流程的优化，底层的技术并没有多大的差别，相对于技术开发和产品开发，挑战没那么大。

ICP-MS仪器广泛应用于地质、环境、生物、医药、半导体等领域的元素分析，运用典型、常规或法规ICP-MS标准方法，通常包含常见的应用(样品类型如环境、食品或制药)或一些特殊应用(形态分析、纳米颗粒、激光剥蚀等)。ICP-MS仪器还有一些应用场景需要联用技术，比如将HPLC与ICP-MS连接起来做一些形态分析，将LA与ICP-MS连接起来使用做一些原位分析等。

ICP-MS仪器应用开发的关键因素包括：样品制备、标准曲线准备、仪器条件优化、质量控制和数据处理等方面。

样品制备应该考虑到样品的物理和化学性质，以及分析目的，样品制备过程中应注意避免污染和样品损失。 标准曲线应该覆盖分析范围内的所有浓度，并且应该包括至少五个浓度点。标准曲线应该在每次分析前重新制备。ICP-MS应用开发需要优化仪器条件，包括离子源温度、气体流量、离子透镜电压等。优化仪器条件可以提高分析的准确性和灵敏度。ICP-MS应用开发需要进行质量控制，包括空白、加标回收率、精密度和准确度等。质量控制可以评估方法的可靠性和准确性。ICP-MS应用开发需要进行数据处理，包括数据校正、结果计算和数据报告等。数据处理应该遵循国际标准和规范，以确保结果的准确性和可靠性。

5　结语

ICP-MS结合了等离子体技术和质谱技术，具有高灵敏度、高分辨率、高准确性和高通量的特点，广泛应用于多个领域的元素含量分析。ICP-MS仪器设备的研究、开发、制造和应用涉及多学科、多领域的科学和技术，结构复杂、技术难度较大，本文概述了ICP-MS涉及的基本科学原理，对主要的子系统和相应的技术设计要素进行了说明，列出了产品工程化时应考虑的产品可靠性、可制造性、可维护性、可装配性、可测试性等因素和应用开发考虑的关键因素，同时阐述说明了科学、技术、产品和应用的紧密相连、互相依存的关系，以及产品系统性开发思路，提出了ICP-MS技术创新方法和发展方向。

参考文献

[1] 黎卫亮，王鹏，程秀花，等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定闪长岩中的高场强元素[J]. 中国无机分析化学，2024，14(10)：1425-1430.
LI Weiliang，WANG Peng，CHENG Xiuhua，et al. Determination of high field strength elements in diorite by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry，2024，14(10)：1425-1430.

[2] 叶敏强，张君，任妍冰，等. ICP-MS/MS直接测定海水中12种痕量金属元素[J]. 环境监控与预警，2023，15(1)：56-60.
YE Minqiang，ZHANG Jun，REN Yanbing，et al. Direct determination of 12 trace metal elements in seawater by ICP-MS/MS[J]. Environmental Monitoring and Forewarning，2023，15(1)：56-60.

[3] 魏星，宋扬，魏榆珈，等. 惯性力辅助微流控芯片-ICPMS研究单细胞对纳米Al_2O_3的摄取[J]. 中国科学：化学，2022，52(9)：1730-173.
WEI Xing，SONG Yang，WEI Yujia，et al. Inertial force-assisted microfluidic chip-ICPMS for the study of nano-Al_2O_3 uptake by single cells[J]. Scientia Sinica(Chimica)，2022，52(9)：1730-173.

[4] 李艺，胡淑君，林嗣翔，等. 电感耦合等离子体质谱法测定明胶空心胶囊中元素杂质残留量[J]. 中国药业，2024，33(21)：53-57.
LI Yi，HU Shujun，LIN Sixiang，et al. Determination of residual elemental impurities in vacant gelatin capsules by ICP-MS[J]. China Pharmaceuticals，2024，33(21)：53-57.

[5] 黄丹宇. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定光刻胶中痕量元素[J]. 化工技术与开发，2024，53(10)：46-49.
HUANG Danyu. Determination of trace elements in photoresist by inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS)[J]. Technology & Development of Chemical Industry，2024，53(10)：46-49.

[6] HOUK R S，FASSEL V A，FLESCH G D，et al. Inductively coupled argon plasma as an ion source for mass spectrometric determination of trace elements[J]. Analytical Chemistry，1980，52(14)：2283-2289.

Reflections on ICP-MS in Science，Technology，Engineering and Applications

ZHAO Yingfei，WANG Xiaolong，LI Kai，FANG Zhe，WANG Lei，LI Hongwei，SHEN Xuejing

(*NCS Testing Technology Co.，Ltd.，Beijing 100094，China*)

Abstract Inductively coupled plasma mass spectrometry is a highly sensitive analytical technology，which is widely used in elemental analysis in geology，environment，biology，medicine，semiconductors and other fields. The research，development，manufacturing and application of ICP-MS instruments and equipment involve multidisciplinary and multi-field science and technology，such as electromagnetism，electricity，chemistry，machinery，materials，vacuum，etc. The scientific principles，technical systems，and factors considered for product engineering and application development involved in ICP-MS were introduced. The results showed that product development should systematically consider the interrelationship between science，technology，products and applications. This research puts forward the ideas and development directions of ICP-MS technology innovation.

Keywords ICP-MS；engineering development；systematic development

HIGHLIGHTS

1) The situation of ICP-MS from the aspects of scientific principle，technology，product and application was discussed.
2) The development trend of ICP-MS was forecast.
3) The difficulties and development prospects encountered in the systematic development of ICP-MS were summarized.