

On-line Analytical Technology
Engineering Education

在线分析技术 工程教育

金义忠 □ 著



科学出版社

在线分析技术工程教育

金义忠 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

寻找信息工业的真正源头，最核心的还是提供适时物质分量信息的在线分析系统。在线分析系统有在线分析仪、样品处理系统和软件技术三大技术基础，在线分析系统要统摄和协调好这三大技术基础，必须得有在线分析系统应用型基础理论的引领和规范，这正好对应了本书的四辑内容：在线分析系统应用型理论的初创、在线分析仪的创新研制、样气处理系统的优化设计和在线分析系统的工程应用。

作者从事在线分析产品的研发和工程实践 45 年，在本书中针对具体产品和项目进行了综合性的探讨和实践研究，追求有效集成，还列举了不少成功和失败的应用案例，颇具先进性和实用价值。

本书适用于分析仪器行业研发工程师、服务工程师和工程用户的专业技术培训，涉及成分分析有关专业的本科生和研究生也可将其选作参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

在线分析技术工程教育/金义忠著. —北京: 科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050534-7

I. ①在… II. ①金… III. ①分析仪器-教育研究 IV. ①TH83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 268820 号

责任编辑: 孙露露 / 责任校对: 马英菊
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 19 3/4

字数: 453 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62135763-2010

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

金义忠高工 1966 年毕业于天津大学，在重庆川仪九厂（川分）一直从事样品处理系统、传感器、分析仪及成套系统的研制、生产及工程应用，长期担任该公司的主要技术负责人，获国务院颁发政府特殊津贴等荣誉。退休后，又为推动我国分析仪器企业的发展而积极奔波，先后担任了中国仪器仪表学会分析仪器分会在线分析仪器专业委员会委员，重庆科技学院电气与信息工程学院兼职教授、硕士研究生导师，继续在业界从事在线分析工程技术方面的工作。

在新的历史时期，针对国际工业 4.0 的发展趋势，我国制订了“中国制造 2025”发展战略。明确要求以信息化、智能化技术促进制造业转型升级，而制造业信息化过程中所需的过程控制离不开过程信息的准确获取，因此过程分析及仪器作为理化过程信息获取的主要装备和手段，必将得到大力发展。

为此，金义忠高工在其 74 岁高龄之际，毅然决心将其 40 多年在在线分析及仪器工程应用方面积累的经验、技术，结合其自身所形成的技术观念、观点形文成书，并率先为研究生开设在线分析技术工程课程。

读完该书后，发现该书与传统教科书相比较，有以下几个特点：

(1) 应用目标明确。该书主要是帮助学生或相关工程技术人员尽快建立起在线分析仪及其系统的工程化概念，并从样品处理、传感器、分析仪、分析系统及工程的多个技术层次逐一阐述，以期达到学以致用目的。

(2) 多维度、多层次描述了在线分析系统工程这一重要概念。

(3) 该书形式独特，一方面内容既涉及机械、电子、光学、分析化学等学科，也涉及系统学、管理学等学科，但紧紧围绕在线分析系统的核心问题，即样品处理的抗干扰、少维护以及在线分析系统工程应用的稳定性、可靠性和长寿命周期；另一方面该书分四辑，每辑内容不是以章节形式体现，而是以论文、

会议报告、研讨文稿的形式表现，更能准确体现在线分析技术工程的现状。

(4) 书中集中体现了金义忠高工多年积累的心得和体会，包括其开展科技创新的技术观和方法论，这些经验对于几乎无实践经验的研究生来说，是一笔难得的财富。

在线分析仪器及其在线分析系统在工程应用中所涉及的问题错综复杂，对于这类工程应用问题，既需要专家的专业知识，更需要专家丰富的实践经验，还需建立系统的观点和方法。本书在以上几个方面将有益于该领域的工程技术人员和学生。

希望该书为推动我国在线分析仪器事业助力，愿我国科学仪器事业蒸蒸日上。



中国仪器仪表学会名誉理事长

2016年6月

前 言

现代在线分析技术是现代分析测试技术的重要组成部分，在线分析仪和在线分析系统是现代科学仪器最核心的组成部分，因能提供物质成分量信息而成为信息工业的真正源头，是我国经济发展和科技创新的核心之一，早就成为被广泛关注的主题和重点。我国的分析仪器产业走过了 60 年的发展历程（1956~2016 年），有“开放创新”的宝贵历史经验，经过近 10 年的急速增长之后，必然有质量发展的迫切需要，而质量发展的第一要素是人才，特别要有庞大的创新型专业队伍，其中高级研发人才又是第一位的。探索在线分析工程技术的质量发展和高端研发人才的培养，是本书的核心内容。

美国过程分析化学中心(CPAC)成功开展的科学家和工程师教育培养项目，把过程分析技术(PAT)工程教育作为它的主要目标之一，早在 2003 年就在大力推广，并取得极大成功。解决中国分析仪器产业的质量发展难题，美国 CPAC 的经验具有榜样的力量。

“过程”除工业生产的工艺过程之外，还包括生产、流通到消费的全过程，不但适用于流程工业、环保监测、科学试验，甚至还有航天、医疗和物流等领域。这就有了“广义过程”的概念。中国有“在线分析仪器专业委员会”（2007 年以前叫“过程分析仪器专业委员会”），广义过程就是中国目前提倡的在线或广义在线，可以和美国过程分析技术(PAT)交流对接的必然就是在线分析技术(OAT)，它完全适应中国分析仪器产业的技术生态环境，具有中国特色。

分析仪器行业虽然在设计、制造、安装、使用、维护以及信息融合与利用等方面，都积累了较为丰富的经验，但是面对环保超低排放引发的对产品性能和质量的更高要求，技术系统每个层级的每项要求都会出现特殊问题，原有产品技术就有了升级换代的迫切需要。冷静、客观地思索在线分析技术质量发展

的方向和目标，发现如下三条重要技术途径很需要探索研究：

- (1) 在线分析技术应用型（基础）理论的引导和规范。
- (2) 大力推广经过长期工程实践考验而总结出来的成熟技术。
- (3) 组织创新专业技术团队，研发能适应和满足新要求的先进产品技术。

本书正是对这三条质量发展路径进行的非常认真的探索和深入的技术思考。

高等院校的“卓越工程师教育培养计划”非常吸引人。开展 OAT 工程教育是培养卓越工程师不可或缺的重要目标，目的是培养分析仪器行业特别稀缺和特别需要的人才。本书也是为此所做的有益尝试和探索，内容共分四辑：

第一辑 在线分析系统应用型理论的初创

第二辑 在线分析仪的创新研制

第三辑 样气处理系统的优化设计

第四辑 在线分析系统的工程应用

在线分析技术是一门整体有机联系的工程技术，多学科的交叉性和技术系统的复杂性特别突出，研究的内容十分广泛，包括在线分析仪和检测器，样品处理系统和核心样气处理部件，在线分析系统及在线分析系统集成的工程应用技术，以及化学分析和化学计量学等，需要用系统学理论来审视、研究和统摄。任何专业技术的健康发展，特别是质量发展，都迫切需要基础理论的方向引领和设计规范，当然这种基础理论只能是应用型理论，而非学术型理论，但是，它仍然有“技术核源”般的重要意义，我十分看重这种综合的应用型理论研究。

在线分析仪是在线分析系统的核心技术，是其三大技术基础之一，其核心问题是工程应用中的长期稳定性，即“稳定性第一”，稳定性是分析仪检测器研发的技术制高点。完善的样品处理系统技术也是在线分析系统的关键技术，其核心问题是少维护甚至免维护，即“少维护第一”，能实现无堵塞连续取样的免维护取样探头系统，是样气处理系统研发的技术制高点之一。在一些特殊的行业和工程项目中，样品处理系统技术常是决定工程应用成败的关键，有非常大的技术难度和非常大的创新空间。在工程上连续可靠运行 4~6 个月以上都不需要维护，即可认为基本达到了近乎免维护的高水平。

在线分析系统已代替分析仪，成为通过招投标进入工程现场的主要产品业态，一跃成为在线分析技术的代表。在线分析系统开展工程应用的核心问题，

是能够长寿命周期地协调运行，石化行业提出了 15 年寿命周期的苛求，但这又是非常合理的。长寿命周期是在线分析系统可靠性的另一种表达。长寿命周期看似高不可攀，其实经过努力，也是现实可行的：我国大化肥行业，就普遍有 20 年以上长寿命周期的先进记录。水泥窑尾在线分析系统被视为在线分析系统的技术制高点之一，样气条件是 1350℃ 高温、2000g/m³ 粉尘，拉法基公司的工程经验表明，15 年的寿命周期也是可能实现的。本人 20 世纪末任重庆川仪九厂系统工程部部长时，曾向工程用户承诺“100%的投运成功率”，也是基本上兑现了的。

本书编写初衷主要是针对本专业工程师的研发培训，即便对于那些有长期技术工作经历和一定工程经验的高级工程师，在线分析技术的工程教育也是需要的。国外有“质量源于设计 (QbD)”的理念，在线分析系统的质量，特别是长寿命周期（即可靠性），必然也源于设计，也就是要把在线分析系统长寿命周期协调运行的核心问题，真正解决在专业化、针对性的设计阶段。

本人从 1972 年至今，一直从事在线分析仪及检测器，样气处理系统及核心样气处理部件，在线分析系统的研制、生产及工程应用工作。自 2012 年 11 月参加第五届中国在线分析仪器应用及发展国际论坛，正式开始了对在线分析系统应用型基础理论的探索性研究，本书正是这些技术经历和工程实践较为真实的记录。

谈及在线分析系统应用型基础理论的探索和初创，肯定还很“初级”和不成熟，更谈不上严谨和科学，之所以还要表达出来，不是我有高谈阔论的恶习，而是钱学森院士的科学技术理论，朱良漪老前辈的工程技术思想，苏联发明大师根里奇·阿奇舒勒的“发明问题解决理论 (TRIZ 萃智)”等，能够照亮我们攻坚克难的技术道路，引导我们对在线分析技术进行根本性的思考，启迪技术创新的智慧，增长技术研发的才干，充分发挥和拓展工程应用技术经验。所以，我愿意将自己学习后的心得、思索后的体会、实践后的经验，与工程师朋友们分享，或可成为本行业专业人士相关经验的有益补充和参考，希望本书能为辛勤劳动的实践者提供些有益的帮助，使之能以更广阔、更缜密的眼光去观察、分析老问题，为解决新问题开辟出新前景。

本书中文章成文时间最早的已有 30 年，有的文章内容有重复的情况，为保

持每篇的完整性，这一不足未予以订正或改写。个人的经历和经验毕竟十分有限，更不能有效破解所有的技术难题，诚愿听到更多批评、指正的意见，如有机会共同探讨本专业深层次的技术难题，更是我求之不得的荣幸，我很期待能有这样的机会。借此机会，向本书论文的合作者和本书引用参考文献的作者表达我真诚的敬意，衷心的感谢！

金义忠

2016年6月

目 录

第一辑 在线分析系统应用型理论的初创

在线分析技术（OAT）工程教育的意义	3
在线分析技术初论	6
在线分析气体工程技术导论	10
构建在线分析系统基础理论的探索研究	20
在线分析系统基础理论和整体优化设计的探索研究	30
在线分析系统工程应用协调运行的综合研究	38
在线分析系统可靠性的综合研究	48
样气处理系统技术应用及发展综论	55
论在线分析系统的高准确度应用	67
在线分析系统的广义抗干扰研究	74
在线分析系统规范的专业化设计	83
在线分析系统的创新设计	91

第二辑 在线分析仪的创新研制

在线分析仪的核心问题是长期稳定性	103
解决在线分析仪稳定性、可靠性难题的探索研究	105
在线分析仪的全性能试验	112
在线分析仪进入工程现场经历的考验	116
在线分析仪的高精度应用	120
再论在线分析仪的高精度应用	126
双调零低漂移敏感电阻电桥	133

热敏电桥传感器研制的技术突破研究	139
低漂移热敏电桥传感器的微观技术揭秘	144
在线红外气体分析仪的发展及工程应用研究	151

第三辑 样气处理系统的优化设计

样气处理系统的核心问题是少维护	169
样气处理系统应用的发明原理	171
样气处理系统设计应用的科学原理和科学效应	178
在线分析样气处理系统技术综述	184
组合式样气处理部件的整体优化设计	191
气体采样探头的研制及工程应用	198
气体采样探头工程应用的优化设计	204
自洁式超高效膜式过滤器的研制	210
免维护取样探头系统的核心技术集成	215
样气处理系统的国产化问题	223

第四辑 在线分析系统的工程应用

在线分析系统的核心问题是长寿命周期地协调运行	233
在线分析仪在氢氮比控制中高精度运行的问题	235
水泥窑窑尾在线分析系统工程应用实践研究	241
拉法基水泥优化控制在线分析系统四年运行的综合调研报告（之一）	249
拉法基水泥优化控制在线分析系统四年运行的综合调研报告（之二）	255
焦炉煤气在线氧分析系统现场调研报告	259
升级换代 CEMS 的研制及工程应用	265
在线分析系统工程应用故障的技术分析	271
CEMS 核心技术的实验研究	277
CEMS 性能优化的实验研究	283
原位处理法在线分析系统的研究与实践	291
在线分析技术在我国的应用及最新进展	300



第一辑



在线分析系统应用型
理论的初创

在线分析技术（OAT）工程教育的意义

1 本书的核心主题

本书分四辑，共有 42 篇论文和工程技术报告。能有机会同广大读者，特别是本行业有丰富工程经验的先行者、实践者多维度地深入研讨在线分析技术，笔者深感荣幸。

本书研讨的核心主题，是倡导开展在线分析技术（OAT）的工程教育，并涉及工程应用型基础理论的探索研究，为推动在线分析技术的质量发展，为培养卓越工程师做出实际的努力。

2 在线分析仪“OA”名称的确定

现在的在线分析仪在 20 世纪 80 年代前称为工业分析仪器或流程分析仪器，直至 90 年代初才改称为过程分析仪（process analyzer）。1997 年 10 月，首届过程分析仪器应用及发展国际论坛召开，过程分析仪器专业委员会成立。

由于处于工程应用主流地位的石油化工行业，特别是大化肥，一直都称其为“在线分析仪表”，加之新兴的环保行业，强烈呼吁采用“在线分析仪器”的名称，在 2007 年 11 月的第二届在线分析仪器应用及发展国际论坛上，经过严肃讨论，确定改称“在线分析仪器”，朱良漪老前辈亲自为“在线分析仪器专业委员会”授牌，从此确定了“在线分析仪器”（on-line analyzer）的专用名称。

3 中国特色的在线分析技术“OAT”

北京化工大学的袁洪福教授对“过程”提出了全新的诠释，“过程”不仅包括生产工艺过程，还包括生产、流通到消费的全过程。这就是“广义过程”的概念。事实上，在线分析的技术概念，在中国早已适用于流程工业、环保监控、科学研究，甚至航天（如航天员训练）、医疗和物流等领域，所以“广义过程”完全可以顺理转换为“广义在线”。可以理解为：“过程”和“在线”是可以直接相通的，进而过程分析技术“PAT”和在线分析技术“OAT”也可以直接相通和对接了。

美国有“国际过程分析和控制论坛”，其主题之一是“过程分析系统”。美国最负盛名的过程分析化学中心（CPAC）有 PAT 综合研究团队，PAT 即“过程分析技术”。中国的在线分析技术“OAT”（on-line analytical technology），完全符合和适应中国分析仪器产业的技术生态系统，具有中国特色。

4 开展 OAT 工程教育的必要性

1) 分析仪器产业经过相当长时间的急速增长之后,必然有“质量发展”的迫切需要,中国仪器仪表学会的《现代过程分析技术及学科发展研究报告》,正是这种迫切需要的有力证明。在线分析技术的学科发展,必将促成分析仪器发展的一大阶跃。

2) 质量发展的第一要素是创新人才,要有庞大的创新工程师队伍,特别需要卓越工程师和专家研究团队。

3) 美国 CPAC 开展的科学家和工程师教育培养项目,把 PAT 工程教育作为主要目标之一,为本领域输送了大批既懂理论知识,又懂工程技术和应用实施的专业人才。美国早在 2003 年就在大力推广 PAT,并取得了极大成功。

4) 中国正在启动“以智能制造为主导的革命性生产方法”,有技术创新才会有产业创新,有产业创新最终才会有产业革命。当前倡导对相关领域的科学家和工程师开展 OAT 工程教育,恰逢其时,的确十分必要。

5 OAS 工程应用的核心技术问题

在线分析系统 OAS (on-line analysis system) 成功地开展工程应用,最重要的核心技术问题不只是可靠性和稳定性,经过深入思考,笔者将其表达为稳定性、协调性、可靠性和安全性等四个重点。

其中的“可靠性”最不易说清楚,无故障连续工作时间 (MTBF) 用于 OAS 在具体实验上有很大困难。为此,我提出一个“广义可靠性”的技术概念,其技术实质可表达为 OAS 的“失准、失灵、失效、失败”。“失准”是指 OAS 的物质成分信息严重失准,远不能满足工程应用需要;“失灵”是指 OAS 的工程运行中断,提供不出物质质量信息,需要立即维修;“失效”是指 OAS 经过检修(大修)仍不能达到正常工程运行状态;“失败”是指 OAS 完全报废或需要代替更换,工程应用彻底失败。

6 由成熟工程师进化为卓越工程师

(1) 成熟工程师定义

成熟工程师是笔者在 2011 年 3 月提出的概念,定义为:采用国际视野的先进技术,通过多目标的整体优化设计,研制出可以长时期重复大批量生产的成熟产品技术的工程师。成熟的产品技术是发展产业技术的强大基础和必需的前提。

(2) OAT 工程教育的意义

开展 OAT 工程教育,一方面可以推进 OAT 的质量发展,因为 OAT 照样遵从“质量源于设计(QbD)”的技术逻辑,要将质量难题真正解决在设计阶段;另一方面可以培养和造就高端专业技术人才,使成熟工程师队伍中的一部分佼佼者,快速发展和进化成为卓越工

程师。

我一直主张“以应用型基础理论为导向的工程经验主义”，这当然包括专业基础理论的引导和规范，对于成熟工程师通过 OAT 工程教育向卓越工程师的进化，我始终抱乐观的态度。当然，对于成熟工程师来说，也迫切需要自我发展、自我更新和自我进化。

7 应该重视应用型理论的探索研究

任何专业技术的发展，都必须以理论创新为导向，理论对于专业技术，有“技术核源”般的重要意义。由于在线分析技术多学科交叉性和技术系统的复杂性特别突出，如果不采用系统学的理论，就不可能有对宏观技术的整体认识。

在线分析技术的健康发展，特别是质量发展，更迫切需要基础理论的引导和规范。笔者于 2008 年撰写了“在线气体分析工程技术导论”，在 2012 年第五届在线分析仪器应用及发展国际论坛上，以“构建在线分析系统基础理论的探索研究”的报告，首次提出“在线分析系统基础理论初创”的命题，其唯一目的就是推动分析仪器行业和在线分析技术的技术进步。

在线分析系统基础理论的初创，本质上应该属于在线分析技术应用型理论探索研究的性质，可能会给制造业和工程界的工程师们以创新启发，积累创新思维能力，增强克服保守、僵化的自觉，有兴趣和责任心采用成熟的先进技术，从多个技术维度去提高在线分析技术的成熟度，为在线分析技术的发展和追求工程应用的成功，充分发挥无限的创造力。这种应用型的基础理论对于本行业主流专著的编写、重大科技项目立项、综合性复杂技术难题的破解等方面，已经发挥了无可替代的重要作用。

在线分析系统是多层级的开放、复杂的技术系统，它也在不断地协调进化之中，有自己新的发展进程。美国的过程分析化学中心（CPAC）主导一个国际性项目：在线分析系统的“采样/传感技术的创新”，即 NeSSI（new sapling/sensor initiative）。虽然 NeSSI 的推广应用尚待时日，但是它极可能成为传统在线分析系统升级换代的技术发展方向之一。

分析仪器行业应当充分发扬“开放、创新”的历史经验，强化创新驱动，务实力行，有效集成，追赶国际先进水平才会富有成效。这也是笔者从《现代过程分析技术及学科发展研究报告》中获得的启示和教益。

在线分析技术初论

金义忠

摘要 本文是对在线分析技术的宏观概括和简洁表达。本文用于在线分析工程技术专业研究生专业技术教育的第一课，帮助他们初步了解如何构建在线分析技术整体性的技术体系框架，真正开始进入学习和研究专业技术的新阶段。

关键词 在线分析技术 在线分析系统 在线分析仪 样气处理系统 工程应用 检测准确度

1 在线分析技术的技术体系

(1) 在线分析系统的三大技术基础

1) 技术基础之一：分析仪是核心技术。

① 在线分析仪：气体分析仪、水质分析仪、固体分析仪。

② 气体分析仪：在线分析仪、实验室分析仪（或科学仪器）、便携式分析仪。

③ 气体分析仪的心脏：检测器（核心是传感器）。

2) 技术基础之二：样气处理系统是关键技术。

① 样品处理系统：样气处理系统、水样品处理系统、固体样品及处理。

② 样气处理系统最突出的代表：取样探头系统。

③ 样气处理系统的核心功能部件：取样探头、冷凝器、过滤器、抽气泵、电磁阀等。

④ 样气处理的核心功能：过滤除尘、冷凝脱湿（含除水）、安全防爆，以及环境适应性等。

3) 技术基础之三：软件技术是高端在线分析系统的标志之一。

软件技术：分析仪高端智能化技术，样品处理系统的自动控制，检测信号的信息处理、传输和应用，信息融合及大数据技术。

(2) 产品形态

1) 样品处理部件、样品处理组件，样品处理系统。

2) 在线分析仪，分析仪检测器的销售少见，常以备件形式进入工程用户。

3) 在线分析系统。

4) 在线分析系统集成（即分析小屋集成）。这是技术发展潮流之一，是在线分析系统的设计、制造和工程应用的重点所在。

(3) 在线分析系统的工程应用技术

试读工程应用技术包括工程应用的全过程，也包括技术培训和后期技术服务、工程项目的