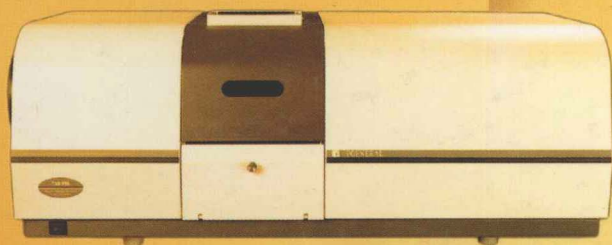
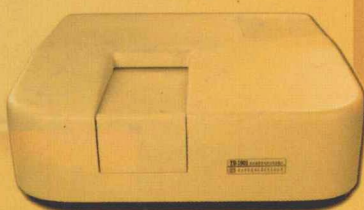


# 仪器学理论与实践

仪器学理论与光学类分析仪器整机及  
关键核心部件的设计、制造、测试、使用和维修

李昌厚 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 仪器学理论与实践

仪器学理论与光学类分析仪器整机及  
关键核心部件的设计、制造、测试、使用和维修

李昌厚 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书论述了仪器学理论的内涵及其重要性,推导了有关光学类分析仪器的实用的理论计算公式。作者在书中提出了光学类分析仪器设计的新理念,从仪器学理论和实际应用的角度出发,全面、详细论述了光学类分析仪器的设计、制造、测试等内容以及仪器的评价方法、最佳分析条件的选择方法等。同时也介绍了作者在设计方面的科研成果。书中所述的设计、测试和使用等内容都是作者的经验总结,都可实际操作。

本书通俗易懂,适用性强,特别注重实践,很少有枯燥的纯理论介绍和繁琐的公式推导。本书可供科研院所、大专院校以及工矿企业、农业、林业、牧业、渔业、环保、食品、制药等领域中,从事各类分析仪器设计、制造、测试、使用和维修的广大科技人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

仪器学理论与实践/李昌厚著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021786-8

I. 仪… II. 李… III. 光学仪器 IV. TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 060001 号

责任编辑:赵卫江/责任校对:柏连海

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008 年 5 月第一次印刷 印张:18 1/4

印数:1—3 000 字数:345 000

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换《双青》)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138017(BZ08)

版权所有,侵权必究

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

## 序言（一）

“工欲善其事，必先利其器”，这是千真万确的真理。我国仪器、光学领域的元老王大珩先生说“仪器是信息科学”、“仪器是信息的源头”，他还精辟地指出：“仪器仪表是科学研究的‘先行官’，仪器仪表是工业生产的‘倍增器’，军事上的‘战斗力’和社会生活中的‘物化法官’。”

特别在当前形势下，一方面我国的国民经济在高速发展，另一方面也存在能源短缺、环境恶化、食品安全以及产品质量等问题。这就要求用精确可靠的科学仪器进行监督检查，要求专业人员很好掌握和正确使用科学仪器，要求专业技术人员对科学仪器不仅应透彻了解其基本原理，还应对其构造、原件性质、标定方法，以及如何修复和保证精度等都有所了解。本书作者就是抱有“好用”和“用好”的目的而写的；“好用”就是根据仪器学理论，设计稳定可靠的、好用的仪器；“用好”就是从仪器学理论出发，正确选择仪器的最佳分析条件、有效地用好仪器，保证分析测试数据的可靠性。

李昌厚教授长期从事仪器科学研究，又专长于分析仪器的研发、应用和维修；在分析检测、仪器学理论方面有深厚的理论与实践根底。本书不但提出了光学类分析仪器设计的新理念，而且在理论与实践的结合上，就用仪器学理论指导分析仪器的设计、制造、测试、使用和维修各方面都做了详细的论述。

目前高等学校过分强调通才教育，专业课程很少，那些联系实际的课程更是大为削减，许多学校没有开设专用仪器课程，因此，我感到此书不仅对专业技术人员极为有用，而且对大学本科生和研究生也必将是一本很好的参考书。

我衷心期待此书能尽快出版，以飨读者求知之欲。本书将对我国科学仪器的发展做出重要贡献。

中国工程院院士  
国际光学委员会（ICO）副主席  
清华大学精密仪器系教授

金国藩

2007年11月7日

## 序言 (二)

目前, 各类分析仪器及其推广应用得到了前所未有的大发展, 发达国家和发展中国家都在竭尽全力研发新分析检测仪器和方法, 开发、推广各类分析仪器的新应用。这些发展已经成为新世纪的发展潮流和新世纪的标志。对中国这样高速发展的国家, 分析仪器事业的大发展是必不可少、不可迟缓的, 已经引起我国政府和各界的广泛重视。

我们应该怎么做出“好用”的仪器、又如何“用好”仪器, 是我国多年来存在的、甚至愈来愈严重的问题。设计和制造界不了解应用界如何用仪器、有什么特别要求, 因而很难做出“好用”的仪器, 使用界也因不懂仪器学的基本知识而“用不好”仪器, 只懂仪器的人或只懂应用的人就是看到了问题也难以入手解决问题。曾经有仪器科技界的人试图编写仪器使用的指导书籍, 但不受应用人员的欢迎; 也有一些从事仪器应用的分析化学界的人写了几本仪器方面的书籍, 也因未深刻理解仪器学的内涵而显得“外行话”太多。

李昌厚教授几十年投身于仪器科技又长期从事分析仪器的研发与分析检测的应用。他在分析仪器方面具有深厚的理论与实践根底, 他写的《仪器学理论与实践》这本书, 不但提出了光学类分析仪器设计的新理念, 而且理论与实践相结合, 在用仪器学理论指导光学类分析仪器的设计、制造、测试、使用和维修等方面都做了详细的论述, 在解决“好用”和“用好”这对矛盾的问题上做出了贡献。作者在书中总结自己多年来研制和使用各种光学类分析仪器的经验和教训, 从仪器学理论的角度出发, 在理论和实践结合的基础上, 对光学类分析仪器的五大通用关键核心部件的设计、制造、测试、使用和维修等多个方面做了深入的讨论, 在如何做好和用好各种光学类分析仪器方面, 向读者提供了一系列经验和参考。该书既是作者的实践经验总结, 又是我国广大产业、应用科技工作者久已期待的理论与实践相结合的专著, 它将为我国光学类分析仪器的设计、制造和使用水平的提高, 为我国光学类分析仪器的设计制造和使用尽快赶超国际先进水平起到促进作用。

天津大学精密仪器与光电子工程学院

教授 博士生导师

范世福

2007年12月1日

## 前 言

科学仪器是一门很复杂的学科，分析仪器是科学仪器的最主要部分之一。任何科学仪器，特别是分析仪器都有它们特定的理论基础，这些理论都属于仪器学的范畴。

仪器学的基础理论除包含光学、机械学、电子学、计算机等相关学科的基础理论以外，还包括仪器的六大要素，即仪器的适用性、可靠性、智能性、经济性、美学性、工艺性。所以，从事各类分析仪器、特别是光学类分析仪器（如光谱仪器、液相色谱的光学类检测器、薄层扫描仪等）的设计、制造、测试、使用和维修的科技工作者，都应该掌握仪器学理论。只有掌握了仪器学理论，才能设计好仪器，才能设计出优质的仪器；只有掌握了仪器学理论，才能保证把仪器用到最佳状态，才能真正用好仪器。这是值得广大科技工作者高度重视的问题。

我们说设计制造仪器的目的，是为了满足使用者的使用要求。因此，设计制造出来的仪器就要求好用。“好用”的标准是：仪器稳定可靠。所谓稳定，是指仪器的漂移小、重复性好；所谓可靠，是指仪器的测试数据准确度高、故障率低、仪器制造厂的售后服务好等。如果一台光学类分析仪器，开机后一直不能稳定，基线始终在漂移，或者说重复性很差，则这台仪器肯定不好用。如果一台光学类分析仪器测试的数据不准确，则这种仪器肯定不可靠。如果一台光学类分析仪器，出现故障后迟迟得不到维修，这种仪器既不可靠也不好。

分析仪器工作者（分析仪器的设计、制造者）的任务非常明确，就是要保证做出的仪器好用。然而，普遍存在的现状是：仪器制造工作者不注意调查了解使用者如何使用仪器，不注意了解使用者对仪器的要求，甚至不了解自己做出的仪器的性能技术指标的物理意义，不了解这些性能技术指标对分析误差的影响。由于制造者不了解使用者的思路，不了解使用者对仪器的使用情况，所以，他们设计、制造出的仪器质量不高，不能满足使用要求。这是我国光学类分析仪器长期处在低水平状态的主要原因之一。

分析仪器使用者（仪器分析工作者）的任务是“用好”仪器，然而“用好”的学问是很深的。使用者要用好仪器，首先应该初步了解仪器学理论，应该初步了解所用仪器的结构、主要性能技术指标的物理意义，及其相互关系和对分析误差的影响，并掌握对这些主要性能技术指标的简单检测方法，应该经常检测所用仪器的主要性能技术指标，以保证仪器工作在最佳状态，保证测试数据的准确可靠。只有这样，才能用好仪器。但是，很多使用者不重视仪器学，所以不能将仪器用在最佳状态，或者说用不好仪器。这也是我国整体分析测试技术水平长期处

在低水平状态的主要原因之一。

光学类分析仪器的可靠性问题，应该是制造者和使用者共同关心的一个核心问题，更是仪器学理论的核心问题；也是我国光学类分析与国外先进仪器差距最大的地方。本书将紧密结合作者的实践，用较大篇幅全面、详细地讨论可靠性问题。特别是对可靠性的内涵，对运用仪器学理论作指导来提高光学类分析仪器的可靠性和使用水平，对从仪器学角度去解决使用中的一些关键技术问题等方面，将在本书进行重点讨论。

目前，较为普遍存在的一种现象是，使用仪器的人常常不熟悉仪器，尤其是不熟悉仪器的性能技术指标的物理意义以及这些性能技术指标相互之间的关系，特别是不熟悉这些仪器的性能技术指标对分析测试误差的影响。因此，往往不能把仪器用到最佳状态，或者说不能最大限度地发挥仪器的作用。从我国大量引进的各类昂贵的光学类分析仪器的使用情况来看，有很多仪器使用非常不合理，有的“大材小用”，有的“搁置不用”，有的“物非其用”。有的科技工作者把很高档的紫外可见分光光度计作为一般的紫外可见分光光度计或一般的可见分光光度计使用；有些原子吸收分光光度计的三种原子化器（火焰、石墨炉、氢化物发生器）齐全，但是最贵重的石墨炉原子化器却从未使用过。结果是外汇用了很多，实验室挤得满满的，但对研究和生产并无太大推动。

光学类分析仪器的数量大、覆盖面大、品种多，因此制造和使用中的问题比其他仪器更多、更严重。本书的目的就是为解决“好用”和“用好”这对矛盾尽一点微薄之力。虽然作者在光学类分析仪器研究和应用领域学识浅薄，但自感教训不少。因此，作者在本书中总结多年来研制和使用各种光学类分析仪器的经验教训，从仪器学理论的角度出发，就如何做好、用好、维修好各种光学类分析仪器的问题向读者提供一些参考资料。特别是从理论和实践的结合上，对光学类分析仪器的五大通用关键核心部件的设计、制造、测试、维修和使用等多个方面，做比较深入的讨论。书中所述的设计、测试、使用内容都可实际操作。通过本书，作者呼吁我国广大科技工作者为提高我国光学类分析仪器的设计、制造和使用水平，为我国光学类分析仪器的设计、制造和使用尽快赶超国际先进水平而共同努力奋斗。

本书共分6章。第1章主要介绍仪器学理论的内涵，讨论正确理解、运用仪器学理论的重要性。第2章综述了光吸收类分析仪器的有关基础理论，介绍了作者在光吸收类分析仪器理论研究方面的成果。第3章重点介绍如何用仪器学理论，指导光学类分析仪器的整机及五大通用关键核心部件的具体设计、制造和测试方法。特别对电光源系统（灯泡和电源）、光学系统（外光路、单色器和光度室）、光电系统（光电转换器及其电源）、电子学系统（各类放大器等）和计算机系统的设计、制造、测试方法等方面的一些关键问题，结合作者的实践进行了详细讨论，并举例说明了典型光学类分析仪器整机和部件的设计方法。第4章讨论

仪器的评价方法和设计、使用中的若干共性理论问题。重点是用仪器学理论作指导,科学地、客观地评价仪器的方法,并紧密结合作者的实践,讨论如何用仪器学理论来解释光学类分析仪器设计、使用中的 25 个最重要的技术(理论)问题。第 5 章介绍光学类分析仪器的整机性能技术指标及其测试方法,重点介绍运用仪器学理论,正确理解仪器的性能技术指标以及仪器整机性能技术指标的测试。同时,介绍了作者多年来在研制、使用有关光学类分析仪器过程中,探索出的一些最主要的测试方法及研究成果。第 6 章重点介绍了光学类分析仪器设计者、制作者、使用者、维修者,经常需要用到的标准物质的配制方法与特点、标准光源的特征谱线、基体改进剂、检测器性能等内容。在最后的附录中,列出了光学类分析仪器设计、制造、使用和维修中最常用的一些物理参数、元器件的特性和图表等。在第 6 章和附录中,作者根据自己的实践,对一些问题做了注释,可供所有从事光学类分析仪器设计、制造、使用、维修的科技工作者们参考。

本书查阅了很多文献,在此一并向有关作者表示衷心感谢。

在本书写作过程中,得到了天津大学范世福教授、广东省分析测试研究所何华锟教授、四川省疾病预防控制中心邹宗富教授、上海交通大学周林爱高级工程师、上海交通大学黄梅珍副教授等真诚无私的帮助。每次与这些专家讨论、交谈后,作者总有“听君一席话,胜读十年书”的感觉。在此,对上述专家们致以最真诚的谢意。

本书由我国分析仪器和仪器分析领域最富实践经验的专家们审定,他们是天津大学范世福教授、四川省疾病预防控制中心邹宗富教授、上海交通大学周林爱高级工程师、中国科学院上海生物工程研究中心孙吟秋高级工程师。他们都对本书提出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,本书中难免有纰漏和错误,热诚欢迎各位读者和有关专家批评指正。

李昌厚

2007 年 12 月于上海



# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 仪器学的内涵 .....	1
1.2 仪器学的重要性 .....	2
1.2.1 设计/制造者 .....	3
1.2.2 使用者 .....	5
1.2.3 维修者 .....	6
主要参考文献.....	7
<b>第 2 章 光吸收类分析仪器的基础理论</b> .....	8
2.1 比耳定律 .....	8
2.1.1 比耳定律及其数学表达式 .....	8
2.1.2 导致比耳定律偏离的主要因素 .....	9
2.1.3 比耳定律的局限性与可靠性 .....	11
2.2 原子吸收定量分析的理论依据.....	16
2.2.1 原子吸收系数的数学表达式 .....	16
2.2.2 原子吸收与原子浓度之间的关系 .....	16
2.3 原子吸收分光光度计仪器设计的理论依据.....	18
2.3.1 原子吸收光谱中的比耳定律及其数学表达式 .....	18
2.3.2 原子吸收分光光度计的基本原理 .....	18
2.4 分子吸收光谱仪器设计的理论依据.....	19
2.4.1 分子吸收光谱的形成及比耳定律的数学表达式 .....	19
2.4.2 紫外可见分光光度计的基本原理 .....	20
2.5 仪器学中的杂散光理论.....	21
2.5.1 杂散光的五种定义 .....	21
2.5.2 杂散光的理论推导 .....	21
2.5.3 杂散光的来源 .....	22
2.6 仪器学中的光谱带宽理论.....	23
2.6.1 光谱带宽的理论推导 .....	23
2.6.2 光谱带宽对吸收光谱分析测量误差的影响.....	24
2.7 仪器学中的光电发射光理论.....	24
2.7.1 外光电效应的光电转换器件 .....	24
2.7.2 外光电效应的特点 .....	25

2.7.3	内光电效应的光电转换器·····	25
2.8	仪器学中的仪用电子学理论·····	27
2.8.1	用于微弱光信号测试的双端输入直流差动线性放大器的理论和设计方法 ·····	28
2.8.2	用于微弱光信号测试的双端输入直流差动对数放大器的理论及测试方法 ·····	30
	主要参考文献·····	32
<b>第3章</b>	<b>仪器学理论与设计、制造和测试</b> ·····	<b>34</b>
3.1	通用关键核心部件的内涵和重要性·····	34
3.1.1	通用关键核心部件的内涵·····	34
3.1.2	通用关键核心部件的重要性·····	35
3.2	通用关键核心部件的设计、制造和测试·····	39
3.2.1	设计的重要性和主要内容·····	40
3.2.2	设计的基本方法·····	43
3.3	电光系统的设计·····	47
3.3.1	氙灯的选择及测试方法·····	47
3.3.2	钨灯(卤钨灯)的选择及测试方法·····	52
3.3.3	元素灯(空心阴极灯)的选择及测试方法·····	54
3.4	电源的设计与测试方法·····	62
3.4.1	氙灯恒流电源的设计方法·····	62
3.4.2	氙灯恒流电源的测试方法·····	65
3.4.3	氙灯开关电源的主要技术指标及其测试方法·····	67
3.4.4	钨灯(卤钨灯)电源的设计和测试方法·····	69
3.4.5	空心阴极灯电源的设计和测试方法·····	70
3.5	光学系统的设计·····	72
3.5.1	外光路的设计·····	72
3.5.2	单色器的设计·····	74
3.5.3	光度室的设计·····	80
3.6	光电系统的设计·····	82
3.6.1	光电倍增管的选择和测试方法·····	82
3.6.2	光电管的选择和测试方法·····	90
3.6.3	硅光电池的选择和测试方法·····	92
3.6.4	光电倍增管高压电源的设计和测试方法·····	94
3.7	电子学系统设计·····	97
3.7.1	前置电流放大器的设计·····	98
3.7.2	前置电压放大器的设计·····	99

3.7.3	一般常用主放大器的设计 .....	100
3.7.4	双端输入直流线性放大器的设计及测试方法 .....	100
3.7.5	双端输入直流差动对数放大器的设计及测试方法 .....	103
3.8	计算机系统设计 .....	108
3.9	光学类分析仪器的设计举例 .....	109
3.9.1	光电系统的设计 .....	109
3.9.2	电子学系统的设计 .....	111
3.9.3	光学系统的设计 .....	111
3.9.4	电光系统设计 .....	112
3.10	光学类分析仪器制造的有关问题 .....	112
3.10.1	制造的重要性 .....	112
3.10.2	制造与元器件测试 .....	113
3.10.3	制造与元部件测试 .....	113
	主要参考文献 .....	119
<b>第4章</b>	<b>仪器的评价方法和设计、使用中的共性理论问题</b> .....	<b>121</b>
4.1	分析仪器的评价方法 .....	121
4.1.1	适用性 .....	122
4.1.2	可靠性 .....	123
4.1.3	智能性(自动化) .....	124
4.1.4	经济性 .....	125
4.1.5	美学性 .....	126
4.1.6	工艺性 .....	126
4.2	设计、使用中的共性理论问题 .....	128
4.2.1	光度准确度与仪器学理论 .....	128
4.2.2	噪声和扫描速度与仪器学理论 .....	130
4.2.3	故障率与仪器学理论 .....	130
4.2.4	稳定性与仪器学理论 .....	131
4.2.5	可靠性与仪器学理论 .....	132
4.2.6	分析测试结果的判断和解释与仪器学理论 .....	134
4.2.7	基线平直度与仪器学理论 .....	135
4.2.8	原子吸收光谱分析中的测量限和检测限与仪器学理论 .....	136
4.2.9	光谱带宽与仪器学理论 .....	137
4.2.10	波长准确度与仪器学理论 .....	138
4.2.11	杂散光与仪器学理论 .....	138
4.2.12	分析测试数据比较和判断与仪器学理论 .....	139
4.2.13	药典要求与仪器学理论 .....	140

4.2.14	横向加热和纵向加热石墨炉特征量与仪器学理论	141
4.2.15	氘灯扣背景和塞曼扣背景与仪器	142
4.2.16	软件与硬件与仪器学理论	144
4.2.17	线性动态范围与仪器学理论	144
4.2.18	单光束、准双光束和双光束仪器与仪器学理论	145
4.2.19	石墨炉原子吸收分光光度计的加热方式与仪器学理论	151
4.2.20	原子吸收光谱分析中的线性回归相关系数和斜率与仪器学理论	163
4.2.21	高压液相色谱仪器的灵敏度与仪器学理论	163
4.2.22	高压液相色谱仪的最小检测浓度和最小检测量与仪器学理论	165
4.2.23	测量限和检测限与仪器学理论	165
4.2.24	高压液相色谱仪紫外检测器的量程与仪器学理论	165
4.2.25	专业名词术语与仪器学理论	166
4.3	紫外可见分光光度计的分析误差控制	166
4.4	测试数据可靠性的判断与分析	167
4.5	关键仪器条件的选择	169
	主要参考文献	171
<b>第5章</b>	<b>整机的主要性能技术指标及其测试方法</b>	<b>173</b>
5.1	紫外可见分光光度计的主要性能技术指标及其测试方法	173
5.1.1	光度准确度	173
5.1.2	光度重复性	188
5.1.3	杂散光	189
5.1.4	光度噪声	198
5.1.5	基线平直度	207
5.1.6	光谱带宽	210
5.1.7	稳定性	212
5.1.8	波长准确度和波长重复性	214
5.1.9	线性	218
5.1.10	线性动态范围	223
5.2	原子吸收分光光度计的主要技术指标及其测试方法	224
5.2.1	技术指标的分类	225
5.2.2	波长范围	225
5.2.3	波长准确度	226
5.2.4	波长重复性	227
5.2.5	光谱带宽	228
5.2.6	稳定性	230
5.2.7	光度重复性	231

5.2.8	边缘能量	232
5.2.9	特征浓度	233
5.2.10	检出限	233
5.2.11	特征量	234
5.2.12	吸喷量 $F$ 和雾化率 $\epsilon$	235
5.2.13	精密度 (RSD)	235
5.3	高压液相色谱仪紫外分光检测器主要性能技术指标及其测试方法	236
5.3.1	波长范围	237
5.3.2	波长准确度	237
5.3.3	波长重复性	238
5.3.4	光谱带宽	239
5.3.5	杂散光	239
5.3.6	基线漂移	239
5.3.7	噪声	240
5.3.8	光度量程范围 (或灵敏度)	242
5.3.9	光度准确度	243
5.3.10	光度重复性	243
5.3.11	线性动态范围	244
5.3.12	几个有关问题的讨论	244
	主要参考文献	245
<b>第 6 章</b>	<b>仪器质量性能指标检测常用的标准物质</b>	<b>247</b>
6.1	紫外可见分光光度计常用的标准物质	247
6.2	原子吸收分光光度计常用的标准物质	256
6.3	高压液相色谱仪性能技术指标检测的标准溶液配制方法	259
	主要参考文献	260
<b>附录</b>		<b>261</b>
附录 1	紫外可见分光光度计常用的有关资料	261
附录 2	原子吸收分光光度计常用的有关资料	265
附录 3	原子吸收分光光度计计量检定规程 (JJG694—1990)	267
附录 4	原子吸收光谱分析的测量不确定性评定	272
	主要参考文献	277

# 第 1 章 概 论

## 1.1 仪器学的内涵

仪器学是一门涉及光学、机械学、电子学、计算机科学等多个领域的学科，因此，这些学科的有关理论都是仪器学理论的一部分。例如，光学理论包含了几何光学理论、光学设计理论、像差理论、物理光学中的量子光学理论、波动学与粒子学理论、干涉衍射理论、光栅理论、光电发射理论等；机械学理论包含机械设计、机械制造学、金相学、金属热处理学、材料科学、公差配合理论、机械加工工艺理论、焊接理论等；电子学理论包含电磁波理论、磁共振理论、晶体管电路基础理论、集成电路理论、模拟电路和数字电路理论、各类放大器理论、噪声理论、电子元器件失效的浴盆效应理论等；计算机科学包含计算机硬件、软件（程序设计）技术、网络技术；还有材料力学、理论力学也是仪器学经常会涉及的基础理论。这些都是科学仪器，特别是光学类分析仪器设计、制造的最基本的理论。这些学科的理论综合，再加上仪器学的适用性、可靠性、智能性、经济性、美学性、工艺性等六大要素，就是仪器学的全部理论。

仪器学是一门系统学科、综合学科，特别是光学类分析仪器（包括物理光学仪器、光谱仪器、光学计量仪器，以及各种带电光源的分析仪器等），不仅涉及多个学科，还涉及使用方面的问题，而且各有关学科之间有着特殊的相关性。从仪器学的理论来看，一台仪器是由许多部件组成的，各个部件就像一个传感器或变压器一样，它对输入信号（上一单元传给本传感器或变压器的信号）、输出信号（本传感器或变压器传给下一单元的信号）都有非常明确的要求，而这些要求又与各个传感器或变压器本身的特性、性能技术指标等密切相关。如果不清楚传感器或变压器本身的特性、性能技术指标，不清楚它对前面和后面部分的基本要求，不清楚前面和后面各部分的基本性能等，就不可能设计好各个部件，也不可能达到设计优质仪器的目的或要求。

仪器学是一门关联学科（或交叉学科），仪器的各个部分相互关联、相互影响、相互补充、相互制约。一台仪器的好与坏主要取决于仪器的整个系统，一台仪器的性能技术指标主要取决于整个仪器系统的每一个部分（元器件和部件）。但评价一台仪器的好坏，只能着眼于整个系统，不能只看某一个部分（元器件和部件）。例如，最基础、最常规、最普及、使用最多的各类光谱仪器，它们一般都由光学、机械、电子、计算机等各个部分组成，如果光学部分、机械部分的功能和性能都非常好，但电子学部分、计算机部分不好，整机也不可能好；如果电

子学部分和计算机部分都非常好，而光学、机械部分不好，整机也不可能好。只要哪一个部件出现问题（或故障），整机都不能正常运转。因此，仪器的各个部件前后关联，前面的部件对后面的部件有很大的影响，后面的部件也对前面的部件有明确的、具体的要求。整台仪器由各个部分组成一个不可分割的系统，整台仪器的各个部分密切相关，相互匹配。

仪器的各个部分（元器件和部件）对整机性能的影响可以相互补充。例如，如果光学系统有缺陷，限制了整机性能技术指标的提高，有时可以通过提高电子系统的性能或提高计算机系统的性能来弥补；即通过提高电子系统或计算机系统的优化设计和制造（调试）来弥补光学系统的不足，以此来提高整机的性能。特别是光学类分析仪器更是如此。例如，光谱仪器的稳定性是一个关键性能技术指标之一，它既与光学系统有关，又与电子系统有关，还与机械系统的材料性能（热膨胀系数、磨损等）等有关。如果一台仪器不稳定，可以首先从电光系统的电源上寻找问题，提高电源的稳定性可能使整机的稳定性得到改善。同时，又可以在电子学系统（包括电源、放大器等）上找问题，因为提高电子学的稳定性，也可提高整机的稳定性。还可以从改善机械系统的材料的热稳定性方面，来提高整机的稳定性。但这三者又可以相互补充，可以采取“光学不行电学补、电学不行光学补”或“光机不行电学补、电学不行光机补”的办法。又如：仪器整机在一定的噪声下，若光学信号太弱，则信噪比很小，仪器的灵敏度就很低。要提高仪器的灵敏度可以有多种方法，许多科技工作者往往采取提高光源的发光强度（即提高光源的光通量或光功率）的方法来提高仪器的信号强度，以达到提高仪器灵敏度的目的。但是，现代光学类分析仪器的设计理念，一般是通过降低电子学部分的噪声来提高仪器的信噪比，达到提高灵敏度的目的。因为靠光源来提高信号强度，会增大灯光源的电流，会产生发热，造成仪器不稳定，噪声会增大，信噪比不能提高。所以，可以根据仪器各个部分的特点、作用、相互关联的关系，采取很多相关联的措施，达到同一个目的。例如，如果光谱仪器由于机械磨损或温度的变化，使得波长准确度变差，我们可以通过计算机软件，采用非线性拟合的方法，来提高波长准确度。

综上所述，仪器学的内涵是非常丰富的。

## 1.2 仪器学的重要性

仪器学理论是所有分析仪器，特别是各种光学类分析仪器的理论基础，是各类分析仪器设计的理论根据，是设计、制造分析仪器必须遵守的准则。每一台光学类分析仪器，基本上都涉及光、机、电、计算机。即使是很简单的天平、PH计，也都是如此。所以，光学类分析仪器（如各类光谱仪器、液相色谱的光学类检测器等）是集光学、机械、电子学、计算机为一体的、技术密集的高科技产

品，这四个方面都会对分析仪器的可靠性产生极大的影响。一台分析仪器的性能技术指标是否可靠，将直接影响使用者使用该仪器获得的分析测试数据的误差是否过大。而分析仪器的性能技术指标是否可靠，又取决于设计者是否按照仪器学理论对部件和整机进行最佳的设计和调试。

若要设计、制造出优质的光吸收仪器（如紫外可见分光光度计、红外分光光度计、原子吸收分光光度计等），就必须根据仪器学理论解决以下问题：被设计仪器要求的是什么波长范围的光（X射线、紫外光、可见光、近红外光、红外光、远红外光等）？仪器所需要波长的光是由什么机理产生的（一般的电光源、荧光发射、激光、拉曼散射、化学发光等）？这些光强度是否稳定？它在仪器中传递的物理过程是什么？由于光的“缺陷”，对被分析的物质含量所产生的误差有多大？如何减小这些误差？如何提高分析测试数据的准确度？如果不认真研究这些仪器学的理论问题，就无法了解分析仪器可靠性的真正内涵，就不可能设计、制造出优质的光谱分析仪器，也不可能用好光谱分析仪器。

仪器学是仪器设计的理论基础，国外的先进管理理念认为“仪器的可靠性80%是设计出来的”。所以，分析仪器行业的科技工作者要特别重视仪器的设计。仪器设计的含义是多方面的、是很深远的。例如，从设计本身来讲，有光、机、电的部件设计，有主机（整机）总体设计；从制造角度来讲，有加工工艺设计、调试工艺设计；从使用角度来讲，有使用工艺（操作简易、使用方便、计算机界面友好等）问题；从维修角度来讲，有维修工艺（维修是否方便）问题等。

### 1.2.1 设计/制造者

目前国内一些仪器设计/制造者往往不注重工艺问题，所以在设计、研制样机时，质量很好。但批量生产时，因为工艺问题使仪器的质量开始下降；或者使用者在操作仪器时，使用不方便，维修不方便。作者认为，一个优秀的分析仪器设计者，必须首先懂得仪器学理论，并且在仪器学理论的指导下开展实践。在设计过程中，从一开始就要高度重视各类工艺的设计。特别是光谱、色谱仪器这类高科技产品的设计/制造者，更要高度重视这些问题。

光学类分析仪器的设计/制造人员要重视仪器学理论，认真学习仪器学理论，避免盲目设计光学类分析仪器。尤其是紫外可见分光光度计、原子吸收分光光度计、液相色谱光学类检测器（紫外检测器、荧光检测器、示差折光检测等）的设计人员，要从仪器学的角度了解自己设计对象的许多理论问题。例如，了解各个元部件或整机有哪些最关键的性能技术指标，这些主要的性能技术指标的物理意义是什么，各个性能技术指标之间有什么相互关系，这些性能技术指标如何影响仪器整机的质量，这些性能技术指标如何影响使用者的分析测试数据的误差，一台仪器整机的关键性能技术指标如何测试等。要清楚自己设计的仪器各个部件的主要性能技术指标，并对部件的性能技术指标进行严格的测试，这样才能设计、



制造出高质量的光学类分析仪器。有些设计/制造者不了解上述与仪器学理论有关的关键问题，所以他们在整机调试时，一旦碰到问题，特别是仪器不稳定时，就手忙脚乱，不知道从哪里找问题。作者认为这是影响我国光学类分析仪器整体水平提高的最主要原因之一。

由于不注重仪器学的理论问题，有些仪器制造公司给出的性能技术指标不符合其物理意义，严重影响了使用者的测试结果。例如，国外某公司制造的紫外可见分光光度计，给出的仪器波长范围是 190~900nm，基线平直度 (B.F) 为  $\pm 0.001A$ ，而实际上该仪器只能在 200~800nm 左右才能保证 B.F 达到  $\pm 0.001A$ 。这就意味着如果使用者要用该仪器做硅 (Si, 峰值波长为 810nm) 的测试，就不能达到要求 (误差很大)。紫外可见分光光度计的 B.F 定义，是指该紫外可见分光光度计在整个波长范围内每个波长上的噪声。根据定义，B.F 应该覆盖仪器的波长范围，而该仪器的波长范围是 190~900nm，B.F 就应该在 190~900nm 内都能达到  $\pm 0.001A$ 。该公司对该紫外可见分光光度计 B.F 的这种表示方法，既偏离了 B.F 的物理意义，又会误导使用者。特别值得注意的是，还有的公司把 B.F 和噪声 (Noise, 以下简称 N) 混为一谈。例如，国外某公司在综合样本中 (包含多种紫外可见分光光度计)，给出了“甲紫外可见分光光度计的基线漂移为  $\pm 0.002A$  (200~950nm)，乙紫外可见分光光度计的基线漂移为 N/A”。显然，这里甲紫外可见分光光度计的“基线漂移”指的是 B.F，而这些仪器的波长范围都为 190~1100nm，因此，对波长范围为 190~1100nm 的仪器，只给出 200~950nm 的 B.F 是不符合 B.F 定义的。尤其是对乙紫外可见分光光度计给出“基线漂移为 N/A”更是不对的。因为根据仪器学理论的基线漂移的物理意义，紫外可见分光光度计的基线漂移应该是指：仪器在预热两小时后，连续测试一小时，在这一小时中吸光度漂移的最大值与最小值之差，量纲为 A/h。另外，该公司同时给出了“乙紫外可见分光光度计的基线稳定性为 0.001A/h，甲紫外可见分光光度计的基线稳定性为 0.0003A/h (500nm 处)”，但均未给出 B.F。很显然，该公司把 B.F、N 和基线漂移混为一谈了，这是不了解 B.F、N 和基线稳定性的物理意义及其区别的结果，也是不理解仪器学理论的结果。

作者经过调查研究，发现目前在紫外可见分光光度计的最主要的性能技术指标 B.F 的表示方法上，很容易出现错误，应该引起有关科技工作者的高度重视。

有些波长范围为 190~900nm 的紫外可见分光光度计仪器在产品样本上称“仪器外加固体检测器，波长可达到 1100nm”。这是不了解光学传感器理论、光电发射理论和固体检测器的物理性能的表现。因为一般的固体检测器用在红外波段，例如，美国 Varian 公司的 Cary6000 紫外可见近红外分光光度计，波长范围为 190~3200nm，它的红外波段用的是 InGaAs 固体检测器。而波长范围为 190~900nm 的紫外可见分光光度计，根本不需要用固体检测器，而用一般光电