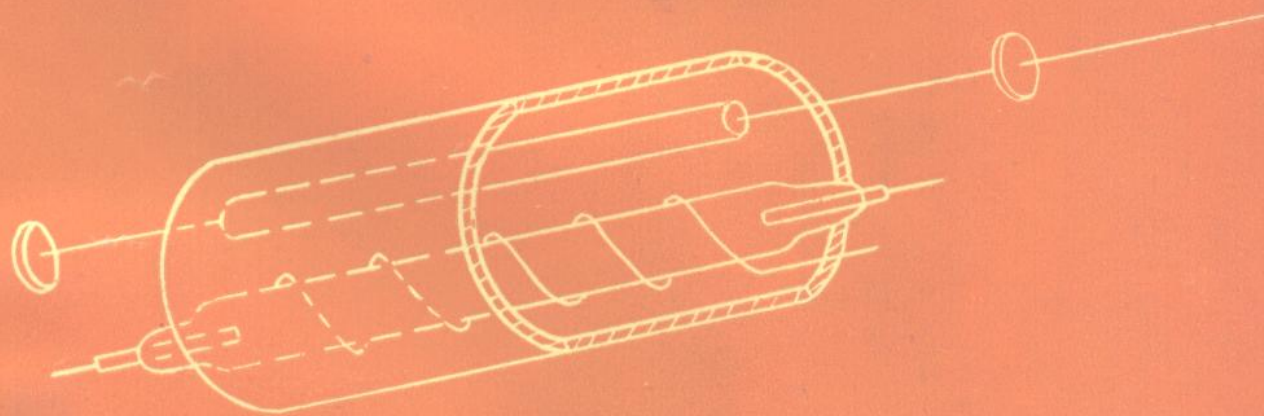


激光全息技术 及其工业应用

余拱信 编著



航空工业出版社

激光全息技术及其工业应用

余拱信 编著

航空工业出版社

1992

(京)新登字161号

内 容 简 介

本书在阐述必要的基础理论之后,对激光全息技术在工业方面的应用做了较广泛的介绍,反映了本学科的现代面貌。全书共九章,前两章是基本原理、激光器件及特性;第三章是激光切割、打孔、焊接、热处理、去重及微调等工业应用;第四章为全息干涉原理;第五、六章为全息干涉计量技术在无损检测及其它方面的应用;第七章是散斑干涉计量;第八章是云纹测量技术;第九章是实验技术。各章均附有习题。

本书力求理论与实践相结合,着重讲清物理概念,简化数学推导,深入浅出,通俗易懂,便于自学。

本书可作为高等院校机械专业及检测专业的教材,也可以供有关专业师生及科研、生产单位的工程技术人员参考。

DL11/3332
23

激光全息技术及其工业应用

余拱信 编著

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号)

—邮政编码:100029—

全国各地新华书店经售

南昌航空工业学院印刷厂印刷

1992年9月第1版

1992年9月第1次印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:15.25

印数:1—1170 字数:377千字

ISBN 7-80046-456-3/TN·016

定价:4.40元

031.966.2

序

30年来,激光器以惊人的速度发展着。由于各种类型的激光不断出现,也推动了机械工业和高技术工业领域中各项技术的发展。钻孔、焊接、热处理、超硬切削加工等设备在市场上已有商品,激光的出现也为全息技术提供了理想的光源,发展了各种类型的全息技术,其中全息干涉计量技术、白光全息技术为机械工业解决了许多难题。诸如全息光弹,全息三维应力分析,全息无损检测,非透明物体的光学检测等。激光散斑技术的出现又为上述各种检测提供了简便的手段,其应用领域也越来越广。

余拱信同志编的《激光全息技术及其工业应用》,系统地介绍了激光器的基本原理和特性,激光机械加工的机理,激光全息干涉计量技术、激光散斑技术、激光云纹法等工业中的应用,对工科机械类的本科生和研究生是一本很好的教材,对有关的工程技术人员是一本很好的参考书。特别应当提出的是书中关于全息干涉计量技术在无损检测和其他方面的工业应用部分,有许多是作者本人作出的贡献。

值此纪念激光器诞生30周年之际,本书得以出版,必将推动激光在机械工业中的应用,同时机械工业和高技术工业的发展,又对其激光器提出新的要求,并促进激光器的发展。这种良性循环作用将使我国的科学技术跻身国际先进行列。

北京理工大学博士生导师 于美文 教授

1990年9月9日

前 言

激光是 60 年代发展起来的新兴科学技术。它是继原子能、计算机、半导体出现后 20 世纪的又一重大科学发现。目前,在工业发达的美国、日本、西欧激光技术已形成一支独立的工业力量。可以预测,激光技术将与计算机、生物工程、海洋工程、新型材料等构成新技术革命的先导。

由于激光技术在工业方面的应用迅速发展,对机械类型专业的学生讲授有关激光加工和测量技术是十分必要的。

本书反映了国内外学者在这一学科领域的最新成就。其中也包括笔者多年来从事激光全息干涉研究的成果和教学实践体会。

本着开阔视野、更新知识的原则,遵照循序渐进的教学方法,本书在介绍了必要的基础理论和基本知识的前提下,例举了激光全息技术在各方面的应用实例。考虑到工科院校学生的学习特点,力求理论与实践相结合,着重讲清物理概念,简化数学推导,尽量做到深入浅出,通俗易懂,便于学生自学。

全书共九章,前两章介绍了激光产生的基本原理、激光器件及其特性。第三章系统地介绍了激光切割、打孔、焊接、热处理和去重平衡等技术应用。第四章为全息干涉计量术的基本原理。第五、六章介绍了全息干涉计量术在无损检测以及其它方面的各种工业应用实例。第七章为散斑干涉计量。第八章为云纹测量技术。第九章介绍了全息干涉实验设备和实验技术中一些带有共性的问题,供学生掌握这门学科的实验规律。

本书由航空航天工业部 625 所陈积懋教授审阅,北京理工大学于美文教授为本书的出版写了“序”,他们对书稿还提出了宝贵意见,特此致谢。

限于编著者水平,书中一定会有不少缺点和错误,恳请读者批评指教。

余懋信

1992 年 3 月 12 日于南昌

目 录

绪 论	(1)
第一章 激光产生的基本原理	(5)
§ 1—1 物质的原子结构、能级及光谱	(5)
§ 1—2 光和物质的相互作用	(10)
§ 1—3 光学谐振腔的共振与激光的形成	(19)
§ 1—4 光谱线宽度	(21)
§ 1—5 光学谐振腔	(26)
§ 1—6 激光振荡条件	(28)
§ 1—7 激光的模式	(32)
第一章 习题	(35)
第二章 激光器件与激光特性	(36)
§ 2—1 激光器的种类	(36)
§ 2—2 氦氖激光器	(40)
§ 2—3 二氧化碳激光器	(51)
§ 2—4 固体激光器	(55)
§ 2—5 激光的新颖特性	(64)
第二章 习题	(70)
第三章 激光机械加工技术	(71)
§ 3—1 激光机械加工机理	(71)
§ 3—2 激光切割	(76)
§ 3—3 激光打孔	(84)
§ 3—4 激光焊接	(96)
§ 3—5 激光热处理	(101)
§ 3—6 激光动平衡去重	(106)
§ 3—7 激光微调	(109)
第三章 习题	(111)
第四章 激光全息干涉计量技术	(112)
§ 4—1 概述	(112)
§ 4—2 全息照相的基本原理	(114)
§ 4—3 全息图的类型	(120)

§ 4—1 全息干涉计量技术的特点	(123)
§ 4—5 实时全息干涉计量术	(124)
§ 4—6 双曝光全息干涉计量术	(127)
§ 4—7 时间平均全息干涉计量术	(130)
§ 4—8 反射式全息干涉计量术	(133)
§ 4—9 脉冲全息干涉计量术	(136)
§ 4—10 夹层全息干涉计量术	(136)
第四章 习题	(137)
第五章 全息干涉计量技术的工业应用	(139)
§ 5—1 材料弹性模量的测量	(139)
§ 5—2 材料泊桑比的确定	(140)
§ 5—3 悬臂梁挠度的测量	(141)
§ 5—4 应力强度因子 K_I 的测量	(142)
§ 5—5 涡轮叶片的振型分析	(144)
§ 5—6 内孔精密测量	(145)
§ 5—7 表面光洁度测量	(146)
§ 5—8 发动机活塞热变形的测量	(147)
第五章 习题	(150)
第六章 全息干涉无损检测技术	(151)
§ 6—1 概述	(151)
§ 6—2 全息干涉无损检测原理	(152)
§ 6—3 全息干涉无损检测加载方法	(153)
§ 6—4 压力传感器膜片检测	(157)
§ 6—5 蜂窝夹层结构检测	(158)
§ 6—6 航空雷达罩胶结质量检测	(160)
§ 6—7 复合材料检测	(161)
§ 6—8 电铸结构件检测	(163)
§ 6—9 轮胎检测	(165)
§ 6—10 火箭固体燃料火药柱检测	(167)
§ 6—11 压力容器检测	(169)
§ 6—12 印刷电路板焊点检测	(170)
§ 6—13 应力腐蚀裂纹扩展的检测	(172)
第六章 习题	(174)
第七章 激光散斑干涉计量	(175)
§ 7—1 散斑现象及其发展概况	(175)
§ 7—2 散斑干涉原理	(176)

§ 7—3 散斑干涉技术的应用	(179)
第七章 习题	(181)
第八章 云纹测量技术	(182)
§ 8—1 概述	(182)
§ 8—2 云纹应变测量的基本原理	(183)
§ 8—3 云纹映像法	(195)
§ 8—4 反射云纹法	(197)
§ 8—5 栅板制造	(199)
§ 8—6 云纹方法试验装置	(200)
第八章 习题	(202)
第九章 全息干涉实验装置技术	(203)
§ 9—1 全息干涉记录对光源的要求	(203)
§ 9—2 全息干涉工作台减振性能分析	(203)
§ 9—3 全息干涉测量系统光学元件的选择	(208)
§ 9—4 记录介质	(214)
§ 9—5 全息干涉记录实验技术	(225)
第九章 习题	(233)
参考文献	(234)

绪 论

一、激光开创新学科

1960年美国物理学家梅曼(T.H.Maiman)变革了汤斯的“微波激射”技术,用人造红宝石作试验,实现了可见光波长的“辐射受激发射产生的光放大”(Light amplification by stimulated emission of radiation),简称为“Laser”当时音译为“莱塞”后来由我国著名科学家钱学森将其正式定名为“激光”。

激光的出现,是继原子能、计算机、半导体之后,20世纪的又一重大发明。

激光与普通光源不同,它具有亮度高、方向性好和极其优异的单色性,因而具有广阔的应用前景。激光发明仅仅只有30多年的历史,由于它具有普通光源无可比拟的新颖特性,因而开拓了许多的学科领域,同时也开发了许多新的应用技术,为人类的物质文明和精神文明作出了重大贡献。

激光开拓的新学科领域有非线性光学、激光光谱、激光全息、激光生物、激光医学、激光物理、激光化学等。

传统的光学现象主要是光作用于物质产生光的反射、折射、散射和吸收等。而激光作用于物质产生的现象则非常多,如光倍频、光吸收、光转换、光混频、光发射、饱和吸收、受激散射等。这些现象是普通光学试验无法观察到的,有些还是意想不到的。非线性光学就是研究这些现象及其应用的学科。它不仅丰富了自然科学知识,而且也扩大了光学技术的应用范围。例如,利用非线性光学可以把不可见红外光转换成可见光。

激光光谱是从原有的光谱中脱颖而出,的新学科分支,在科学研究和生产实际中有着重要的应用价值。科学家感到不满意的是光谱分辨率一直停留在 10^6 水平上。使用激光之后,光谱分辨率一下子便提高到 10^{10} ,即提高了百万倍!分析灵敏度也相应地大大地得到提高,成为重要的痕量分析技术之一。

全息术是1948年由英籍匈牙利物理学家盖伯(Dennis.Gabor)发明的。由于当时缺乏理想的相干光源,使这一新技术的发展受到了很大的限制,几乎停滞、沉睡了10多年。1963年美国密执安大学的利思(E.N.Leth)和阿帕特尼克斯(J.Upatniekes)将激光引入全息术,产生了第一幅全息图,导致了这一技术的突破性进展。此后20多年以来,激光全息技术有了长足的发展。尤其是近几年以来电子技术的应用,使这一技术的应用开创了更为广阔的前景,形成了一个的学科领域——激光全息技术。

利用激光能够在细胞水平和分子水平上研究生命运动,并取得了一系列重大研究成果。如用激光微束实现了动物卵细胞融合和向细胞内注入外源基因;实现了对染色体切割、核仁组织定位;实现了诱发微核仁形成和基因定位等。这些新的研究内容构成了激光生物学。

60年代初,激光就开始用到临床医疗方面。经过20多年的研究发展,表明激光可以治疗眼科、皮肤科、内科、儿科、五官科、肿瘤科等各种疾病。而且对其中某些疾病的疗效还优

于普通医疗手段，操作也很简单。于是又出现了激光医学这一新领域。

研究激光与物质相互作用的物理效应便形成了激光物理学。研究激光与物质相互作用的化学效应便形成了激光化学。

二、激光开发新技术

激光也开发出许多新的应用技术，如激光工业加工、激光计量检测、激光光纤通信、激光打印、激光光盘、激光分离同位素、激光核聚变等。

激光问世以来，人们就利用激光束能量密度高等特性研究激光与材料之间的相互作用，其结果表明，将激光束照射到材料上，可使材料产生激活、软化、相变、熔化、蒸发以及光化学反应等。从而发展了激光切割，激光打孔，激光焊接，激光去重平衡，激光表面强化处理，激光微调等新的工业加工工艺技术。

光学测量是一门精密测量技术，引进激光光源之后，则又进一步把这门技术的测量精度提高到一个更高水平。激光测距可以精确地跟踪和测量人造地球卫星的距离和位置，其误差可以控制在厘米量级范围内。以激光全息照相为基础而形成的激光全息无损检测技术可以精确地检测产品内部缺陷。这种检测技术在航空航天部门得到推广并已应用于生产实际，形成了一门激光全息无损检测新技术。

激光给通信技术带来了革命性的变化，光纤通信是激光出现之后，于70年代产生的新兴技术。它以飞跃般的速度不断向前推进，改善了通信质量，也大大提高了通信容量，越来越显示出它的优越性能和实用价值。光纤系统主要用于数字传输，在公用通信应用方面，先是用于市内电话线路，近来推广到长途线路和海底线路。在专用通信系统中，例如电力、电气铁道、广播电视、大企业内部，飞机船舶内部，光纤用于模拟电视传输和数字传输极为适宜。可以认为，光纤通信即将成为现代通信网的主要传输手段，光缆代替电缆已成定局。

利用激光作光源的高分辨率成像技术用于印刷和自动化办公设备，大大提高了印刷排版效率，并形成了新型印刷技术——激光排版打印技术。我国各大报社、出版社都已经采用了这种新技术。

利用激光写入和读出的光盘技术，是信息存储技术中的佼佼者，这门新技术也在迅速发展，可望即将形成新的产业。

激光分离同位素技术，可以提炼核电站的核燃料铀²³⁵，用这种新技术生产核燃料，可以大大地降低成本。预计到下一个世纪，激光分离法将代替目前各种生产方法，成为生产核燃料的主体。

核聚变是获得核能的另一途径。著称它将是最终解决人类能源问题的关键。激光点火是实现核聚变的两条技术路线之一，目前激光已经能够把核材料加热到几十万度的高温，再努一把力便可以实现点火。在今后的一段时间里，激光核聚变是世界上研究经费投资规模最大的项目之一，它的研究成功，将会给人类带来无法估量的财富。

三、激光工业加工技术发展概况

自激光器问世以来，激光工业加工技术经过20多年的研究、开发和应用实践，正在萌发

其特点,逐步解决了许多实际问题,获得了工业界的接受和认可,并正在与其它学科并肩发展,互相渗透,形成一门集光、机、电、计算机、材料、物理、化学于一体的综合性高新技术。

从光与物质相互作用的机理看,激光加工大体可分为激光热加工和光化学反应加工。激光热加工系指用高功率激光束对材料进行基于快速热效应的各种加工过程。如切割、打孔、焊接、去重、刻槽、标记、表面处理、熔敷与合金化等。光化学反应加工主要借高能密度光子引发或控制光化学反应进行的各种加工过程。如半导体工业中的光化学气相沉积、激光刻蚀、退火、掺杂和氧化等。在这种加工过程中,热效应处于次要地位,故有时也称作激光冷加工。

与传统机械加工方法相比,激光加工的特点是:

1. 可以加工任何材料,尤其合适加工高硬度、高脆性、高熔点材料。
2. 加工工具是激光束,无“刀具”磨损和切削过程,不影响加工材料的原有机械性能。
3. 能够通过透明介质或在真空环境里对零件进行特种加工。
4. 能量注入速率高,加工件热变形很小,不影响工件原有力学性能。
5. 激光束易于导向、聚焦,可以对难以接近的部位进行加工。也容易与数控系统配合,实现激光加工自动化。

激光加工技术包括三个方面:高功率激光器,多自由度加工设备和激光加工工艺。前两个方面结合为一体组成激光加工的“硬件”,而激光加工工艺则相当于“软件”。

激光加工对激光器的要求是高功率、长寿命、性能稳定和低成本运转。不同的应用目的对光束质量和波长有不同的要求。

激光加工设备在国外已经形成系列化产品。二座标、三座标、五座标多功能数控激光加工机已成批生产,有的还能进行焦点自动调整。在汽车、化工、机械、轻工等行业均采用了多种激光加工生产线,给激光加工产业带来了巨大的经济效益。

正在开发应用的第二代柔性激光加工系统是在CAD/CAM基础上实现的,它能在同一条生产线上进行多种作业。随着激光加工工艺系统化研究的发展,第三代激光加工系统——人工智能化激光加工系统也在研究之中,现已研制出三维视觉闭合回路自动焊接/切割激光加工机。激光机器人与规范化加工工艺相结合将成为第三代人工智能激光加工系统。

我国研制开发的激光加工机已有二座标、三座标、五座标等多种,可以说国外有的,我们基本上都有了,但在产品质量方面与国外相比,还存在较大的差距,需要进一步研究开发。据不完全统计,有CO₂激光数控切割机,CO₂激光焊接机,YAG激光拉丝摸打孔机,激光金项链焊接机,激光卷烟嘴打孔机,激光微调机,激光掩膜修整机等近200台套,已分布在全国各大工业城市,初步形成了一个激光加工示范网。

四、激光全息无损检测技术发展概况

激光工业应用的另一个方面是激光全息无损检测。这种新技术始于60年代中期,它是利用激光的相干性,以光的干涉原理为基础,采用全息照的方法,记录被检物体的干涉条纹图,分析这些干涉条纹图的畸变特征,即可发现被检物体的缺陷。

美国是最早将激光全息技术应用于无损检测领域的国家之一,在研究开发和工业应用方

面,一直处于世界领先地位。早在 70 年代中期就由 Robert.K.Erf 主编出版了专著,介绍激光全息技术用于复合材料、轮胎和航空航天产品零部件的检测。80 年代有了更大的发展和提高,采用大功率激光器之后,一次受检面积可达 2 平方米。G.M.Brown 用“真空加载法”对飞机轮胎网线与衬里的剥离,玻璃布破裂,帘子布脱粘,孔隙以及各类疏松等缺陷进行了激光全息检测,均取得了良好效果。对于各类轮胎检测来说,这是一种最好的检测方法,现已形成仪器进行批量生产。美国 IHI 公司生产的 HDK—160 型全息轮胎检测仪已是这类仪器的第五代产品。

国内学者在激光全息无损检测方面,也作出了重大贡献,达到了较高水平。早在 70 年代初,我国就开始了这方面的研究,但大部分研究课题都局限在航空航天工业部门,主要有 303 所、606 所、703 所、625 所、西工大、天津大学、132 厂、320 厂、112 厂等单位。他们对一些用常规方法难以检测的材料和零件用激光全息干涉法进行了检测研究。例如,对金属蜂窝夹层板,玻璃钢胶结雷达罩,钛硼纤维复合材料,碳纤维喇叭内壁镀金层,飞机轮胎,推进剂火药柱包覆层,橡胶密封油垫等进行了试验研究,并取得了良好效果,有的项目已用于生产实际。“金属蜂窝胶接结构件的激光全息无损检测”已审定为航空工业标准,于 1992 年正式实施。

五、课程简介

由于激光技术在工业方面的应用迅速发展,本着更新知识,开阔视野的原则,对机械类专业学生讲授有关激光加工和全息测量新技术是十分必要的。本课程主要包括:激光产生的基本原理;激光器件与激光特性;激光加工技术,其中包括激光切割、打孔、焊接、热处理和去重平衡等;激光全息干涉计量术的基本原理及其工业应用的各种实例;云纹散斑干涉计量技术及其应用;最后还介绍了激光全息干涉实验技术中一些带有共性的问题。

通过本课程的学习,力图使有关专业工作者达到以下目的。

1. 了解激光产生的基本原理、基本特性、主要设备以及在机械加工中的作用。并初步掌握激光加工技术的基础理论、加工工艺和物理化学效应的变化规律。
2. 掌握激光全息干涉计量术的基本原理,激光全息无损检测的主要方法,提高解决特殊材料构件无损检测的能力,为从事特殊无损检测研究打下一定的基础。
3. 本课程是一门理论与实践相结合较紧的课程,除理论学习外,还要掌握各种实验方法和具体应用实例。学生在学习过程中应重视实验技能和科学作风的培养。

第一章 激光产生的基本原理

1960年梅曼(Maiman)博士首先研制成功红宝石激光器,从此一种新颖的光源问世了。它以普通光源无可比拟的优越性,屹立于所有光源之巅!由于激光是一束亮度高,单色性好,方向性强的相干光,因而它的应用已遍及工、农业生产,科学教育,医药卫生,国防建设等各个领域。并引起某些学科领域的重大变革。使历来光学界想做而又做不到的实验得以实现,许多从未想到的光学现象也被发现。激光器发明迄今仅有30多年的历史,但它在各个学科领域得到迅速的广泛的应用。目前还推动着全息光学、非线性光学、傅里叶光学、激光光谱学等一些新兴学科的迅速发展。

激光为什么会具有这些优异特性呢?这与激光器发光的特殊过程是分不开的。限于篇幅,本章仅重点介绍激光产生的物理过程以及激光器产生激光的基本规律。

§ 1-1 物质的原子结构、能级及光谱

要知道激光器的发光原理,必须首先认识原子的结构,以及分子、原子、离子的发光过程。因为激光同其它光源发光一样,都是由分子、原子辐射出来的。如氦氖激光器的光是氦原子辐射出来的,钕玻璃激光器的光是钕离子辐射出来的,二氧化碳激光器的光是二氧化碳分子辐射出来的。总之,无论是气体、液体还是固体内部发出的光,在许多方面同从单个原子内部发出的光相类似。所以要了解激光产生的基本原理,必须首先介绍原子的发光机理。

一、原子的核型结构与核外电子的量子状态

卢瑟福假设认为任何原子都是由原子核和绕核运动的电子所组成。原子的质量几乎全部集中在原子核上,电子的质量 m_e 为 $0.91095 \times 10^{-30} \text{ Kg}$,它与核的质量相比,几乎可以忽略不计。原子中原子核质量最小的氢原子,其质量也是电子的1837倍。

原子是一个带电系统,原子核带正电,电子带负电,电子带电量一般用 e 表示, $e = 4.803 \times 10^{-10} \text{ CGSE}$ 。原子核带电量是电子带电量的整数倍,用 Ze 表示, Z 为整数,称为核电荷数或原子序数。若原子核带 Ze 个正电荷。则核外就有 Z 个电子绕核旋转。因此从整个原子来看,原子并不带电,呈现中性。

由于原子核和核外电子间存在着引力,因此它们不能构成静止平衡。如果电子不运动的话,它势必落到原子核上去。故只能假设电子围绕着原子核不断运动,才能构成一种动平衡。

以上就是卢瑟福的原子核式结构模型。它能成功地解释 α 粒子的散射现象,但是这个模型本身却很难用当时的电磁理论来解释,也不能用它来解释原子所发射的光谱是明线光谱。它也没有说明核外电子的分布情况和运动规律。1913年,丹麦物理学家玻尔在卢瑟福核式结构模型的基础上,把普朗克的原子理论推广到原子系统里来,成功地解释了氢原子光谱。

玻尔理论认为氢和类氢原子由质量 m_e 带有负电荷 e 的单个电子和质量为 M 、带有正电荷 $+Ze$ 的原子核所组成。电子围绕原子核以 r 为半径作圆周运动。如图 1-1 所示。 Z 为原子序数, 对氢原子则 $Z=1$ 。他假设库仑定律和牛顿运动定律在原子区域内仍旧适用, Ze 和 e 分别为氢原子核和电子所带的电量, 那么它们之间的静电力为

$$F = \frac{Ze \cdot e}{r^2} = \frac{e^2}{r^2} \quad (1-1)$$

根据牛顿运动定律, 还可以把这个静电力看成是使电子绕核旋转作圆周运动的向心力, 即

$$F = \frac{e^2}{r^2} = m_e \frac{V^2}{r} \quad (1-2)$$

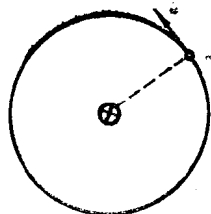


图 1-1

式中 r 为电子与原子核间的距离, 即电子绕核旋转的轨道半径, V 为电子绕核旋转的线速度。玻尔引用量子论, 认为电子绕核旋转的轨道并不是任意的, 它只能在核外一定的轨道上旋转, 这些可能轨道的周长和电子动量的乘积必须等于普朗克常数的整数倍。即

$$2\pi r \cdot m_e V = nh \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (1-3)$$

式中 h 是普朗克常数, 其数值等于 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$, n 是正整数, 在 (1-1)、(1-2)、(1-3) 式中消除 V 即可得出原子中核外电子运动轨道半径的公式:

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e \cdot e^2} \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (1-4)$$

并可得出电子的轨道速度为

$$V = \frac{2\pi e^2}{nh} \quad (1-5)$$

玻尔从理论上成功地算出了氢原子的大小, 并得出轨道之间的跃迁频率。这些理论计算值与已知的实验结果符合得很好。

索末菲在承认玻尔的氢原子理论的基础上, 对原子理论作了发展。他首先考虑电子绕核作椭圆轨道的可能性, 其次考虑轨道平面在空间取一定的方向的可能性, 这两点和玻尔理论一起构成了玻尔—索末菲理论。它在一定程度上反映了原子内部运动的客观规律。

根据玻尔—索末菲理论, 核外电子在原子核的向心力作用下, 分布在若干分立的壳层上作圆的或椭圆的轨道运动, 并且只能在一些特定的轨道上运动。这些特定的轨道及其形状大小和在空间的方位都不是任意的, 这种轨道称之为量子化轨道。量子化轨道是由量子数 n 、 l 、 m 来决定的。每一组 n 、 l 、 m 值就对应空间一个量子化轨道。电子在空间的运动轨道确定了, 电子的运动状态也就确定了。

电子除绕核进行轨道运动外, 本身还绕某一个轴旋转, 这种旋转称之为电子的自旋。电子自旋状态也是量子化的, 并用量子数 m_s 来描述。因此, 考虑电子的自旋运动, 则电子的运动状态需用 n 、 l 、 m 、 m_s 四个量子数来决定。

为此, 我们说明一下四个量子数是如何决定核外电子的运动状态。

1. 主量子数 n , $n = 1, 2, 3, \dots$ 决定电子作椭圆轨道运动的长半轴 a_n 。它可以由 (1-4) 式得出。

$$a_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e e^2} = a_1 n^2 \quad (1-6)$$

式中 $m_e = 9.108 \times 10^{-28} \text{g}$, 为电子的质量。

$e = 4.803 \times 10^{-10} \text{CGSE}$ 为电子的电量。

$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数。

$$a_1 = \frac{h^2}{4\pi m_e \cdot e^2} = 0.529 \times 10^{-8} \text{cm} \quad \text{称为第一玻尔轨道。}$$

主量子数 n 还大体决定电子作轨道运动所具有的能量。对于氢原子, 如果忽略相对论效应的影响和自旋轨道相互作用时, 根据玻尔理论可以算出电子在每一个玻尔轨道上的总能量。由经典理论可知, 这个总能量是电子势能与动能之和。电子势能为

$$E_p = -\frac{Ze^2}{r} = -\frac{e^2}{r} \quad (\text{对氢原子 } Z=1)$$

由 (1-2) 式得电子动能为

$$E_k = \frac{1}{2} m_e \cdot V^2 = \frac{e^2}{2r}$$

所以电子所具有的总能量为

$$E_n = E_p + E_k = -\frac{e^2}{2r}$$

再以 (1-4) 式代入上式得

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m_e \cdot e^4}{n^2 h^2} \quad (n=1, 2, 3 \cdots) \quad (1-7)$$

2. 角量子数 l , $l=0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 它由主量子数 n 所限制, 它决定电子作椭圆轨道运动的短半轴 b_n 。

$$b_n = a_n \cdot \frac{l+1}{n} = a_1 \cdot n(l+1) \quad (1-8)$$

由式 (1-6) 和 (1-8) 可知, 当 n 给定后, a_n 是一个恒量, 而 b_n 随 l 而变。即 l 决定电子椭圆轨道的形状。对一确定的 n 值, l 可取 $0, 1, 2, \dots, (n-1)$ 。即 l 可取 n 个不同值。其相对应的是 n 个不同形状的椭圆, 例如 $n=3$, 则 l 可取 $0, 1, 2$ 、三个数值, 其椭圆如图 1-2 所示。三种不同形状的椭圆, 分别用 $3s$ 、 $3p$ 、 $3d$ 等符号表示。

角量子数 l 还决定电子作轨道运动的动量矩。

$$P_l = \frac{h}{2\pi} \cdot l \quad (1-9)$$

3. 磁量子数 m , $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ 。它被角量子数 l 所限制。它决定着电子椭圆轨道在空间的方位, 通常以外磁场 $\vec{B}$ 的方向为基准。如图 1-3 所示。磁量子数 m 决定电子轨道动量矩 $\vec{P}_l$ 在磁场方向上的投影 P_m

$$P_m = m \frac{h}{2\pi} \quad (1-10)$$

于是电子轨道动量矩在空间的方向角 α (以外磁场 $\vec{B}$ 的方向为基础) 可由下式得出:

$$\cos \alpha = \frac{P_m}{P_l} = \frac{m}{l} \quad (1-11)$$

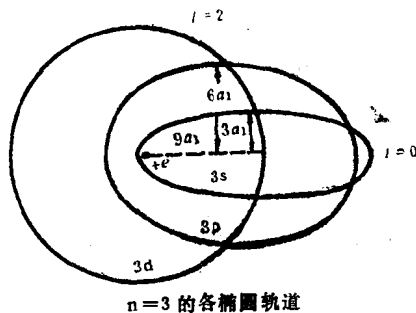


图 1-2

这样的方位共有 $(2l+1)$ 个, 如 $l=2$, 则 m 可取 $0, \pm 1, \pm 2$ 来决定电子椭圆轨道在空间五种不同方位。如图 1-4 所示。

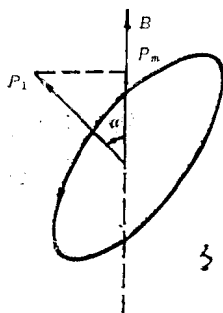


图 1-3

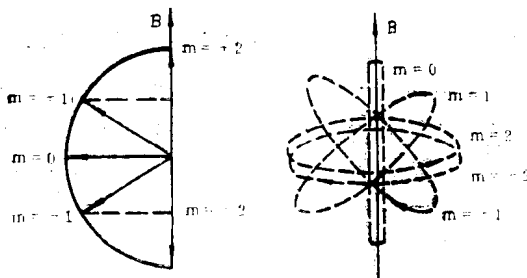


图 1-4

4. 自旋磁量子数 m_s , $m_s = \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ 。它表明电子自旋角动量 $\vec{P}_s$ 在空间只有两个彼此相反的可能方位。以外磁场 $\vec{B}$ 为基准, 也就是说只具有与磁场平行或反平行的两个方位。如图 1-5 所示。 m_s 决定自旋角动量在外磁场方向投影 P_{ms} 。

$$P_{ms} = m_s \frac{h}{2\pi} \quad (1-12)$$

综合上述, 对于某一电子的一个确定的运动状态, 其四个量子数各有确定值。反之, 当四个量子数已确定的某个电子, 则处于一确定的轨道状态上运动。若两个电子各自的量子数不同 (一个量子数不同或几个量子数不同或四个量子数不同), 则这两个电子的运动状态也不同。

二、单电子原子的能级与光谱

氢原子核外只有一个电子, 氢原子的状态就由这个电子的运动状态所决定。通常情况下, 这一电子总处在能量最低的 1S 轨道上运动。处于能量最低的 1S 态称为氢原子的基态。当受辐射能的照射或高能粒子的碰撞等外界因素激发时, 粒子 (即核外电子) 可能吸收一定的能量, 跃迁到某一能量较高的轨道。即上面所述的量子化轨道。我们把粒子处于能量较高的状态称为激发态。电子在某一轨道上运动, 相应具有一定的能量。因为电子的运动状态不能连续化, 相应的能量也只能取一些分立值。这种分立的内部能量值称为粒子的能级。

一般说来, 只要运动状态不同, 相应的能量也略有差别。但在某些情况下, 如果略去相对论效应与自旋轨道相互作用影响的情况下, 由 (1-7) 式可以看出, 氢原子的能量仅由主量子数 n 来确定。而主量子数 n 相同的运动状态不止一个, 而是很多个, 如 $n=3$ 时, 共有 18 个不同的运动状态。不同的运动状态具有同一能量值的情况, 称为“能级的简并” (或叫“能级的退化”)。同一能级所包含的运动状态的数目, 叫做“能级的简并度” (或叫“能级的退化度”), 例如 $n=3$ 的能级简并度为 18。可以证明, 氢原子第 n 个能级的简并度为 $2n^2$ 。

由 (1-7) 式可以算出氢原子各能级的能量, 并可以用能级图形象地表示出来。图 1-6 给出

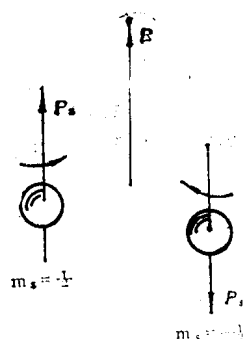


图 1-5

了氢原子的能级图，在普通物理学中我们已经见过。

由于外界激发，核外电子可能跃迁到能量较高的状态。但是，处于高能状态的电子是不稳定的，它能自发地跃迁到能量较低的状态，并同时放出一个频率为 ν 的光子。这个光子的能量 ε 由下式决定：

$$\varepsilon = h\nu = E_n - E_k \quad (1-13)$$

式中 E_n 为高能级状态能量， E_k 为低能级状态能量。

原子在不同能级状态之间跃迁发射不同频率的光子而组成光谱。将(1-7)式代入(1-13)式，并用波数 $\tilde{\nu}$ ($\tilde{\nu} = \frac{\nu}{C}$) 表示，可得氢原子光谱如下：

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-14)$$

式中 $R = \frac{2\pi^2 e^4 m_e}{ch^3}$ 为黎得堡常数。

原子从较高的不同能级跃迁到较低的同一能级发射的光谱线为同一谱线。因此由(1-14)式可以算出：

当 $k=1, n=2, 3, 4, \dots$ 时称为赖曼系。

$k=2, n=3, 4, 5, \dots$ 时称为巴尔末系。

$k=3, n=4, 5, 6, \dots$ 时称为帕邢系。

$k=4, n=5, 6, 7, \dots$ 时称为布喇开系。

$k=5, n=6, 7, 8, \dots$ 时称为普芳得系。

氢原子光谱如图 1-6 所示。

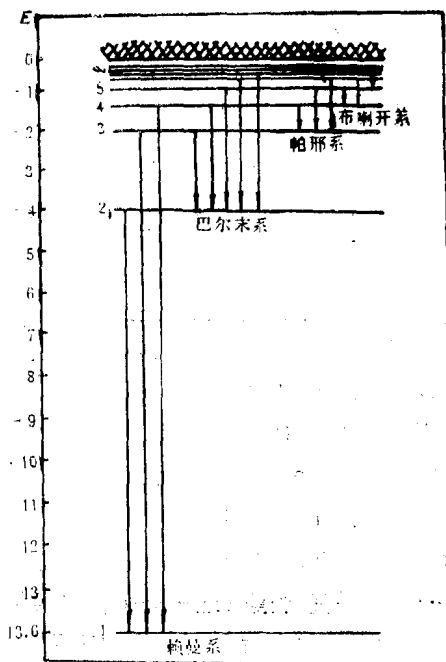


图 1-6

三、多电子原子核外电子的状态分布

除氢原子及类氢原子外，大多数原子核外都有多个电子。多电子原子的状态不再决定于单个电子的运动状态，而决定于核外所有电子的运动状态。

氢原子核外只有一个电子，通常情况下，这个电子总是处在能量最低的 $1s$ 状态的轨道上。而核外有多个电子的原子，在通常情况下，这些电子是挤在最低能级 $1s$ 态呢？还是分布在各个不同能级状态呢？它们在各个不同能级状态分布又遵从何种规律呢？下面就这些问题进行简要叙述。

根据原子物理理论，原子的核外电子状态分布遵循如下两个原则。

1. 不相容原理：即原子中不能有两个或者更多的电子处于四个量子数完全相同的运动状态中。也就是说，每一个量子状态只能容纳一个电子。

2. 最低能量原理：在通常情况下，电子总是力图处于能量较低的运动状态。

多电子原子的核外电子遵循这两条原则在核外按壳层进行分布，在主量子数相同的各轨道上运动的电子称为同一主壳层电子。如按 $n=1, 2, 3, 4, \dots$ 分成各主壳层，分别用 K、L、M、N、……表示。对同一主壳层，又按角量子数 l 分成几个支壳层，如 $n=3$ 时， l 可