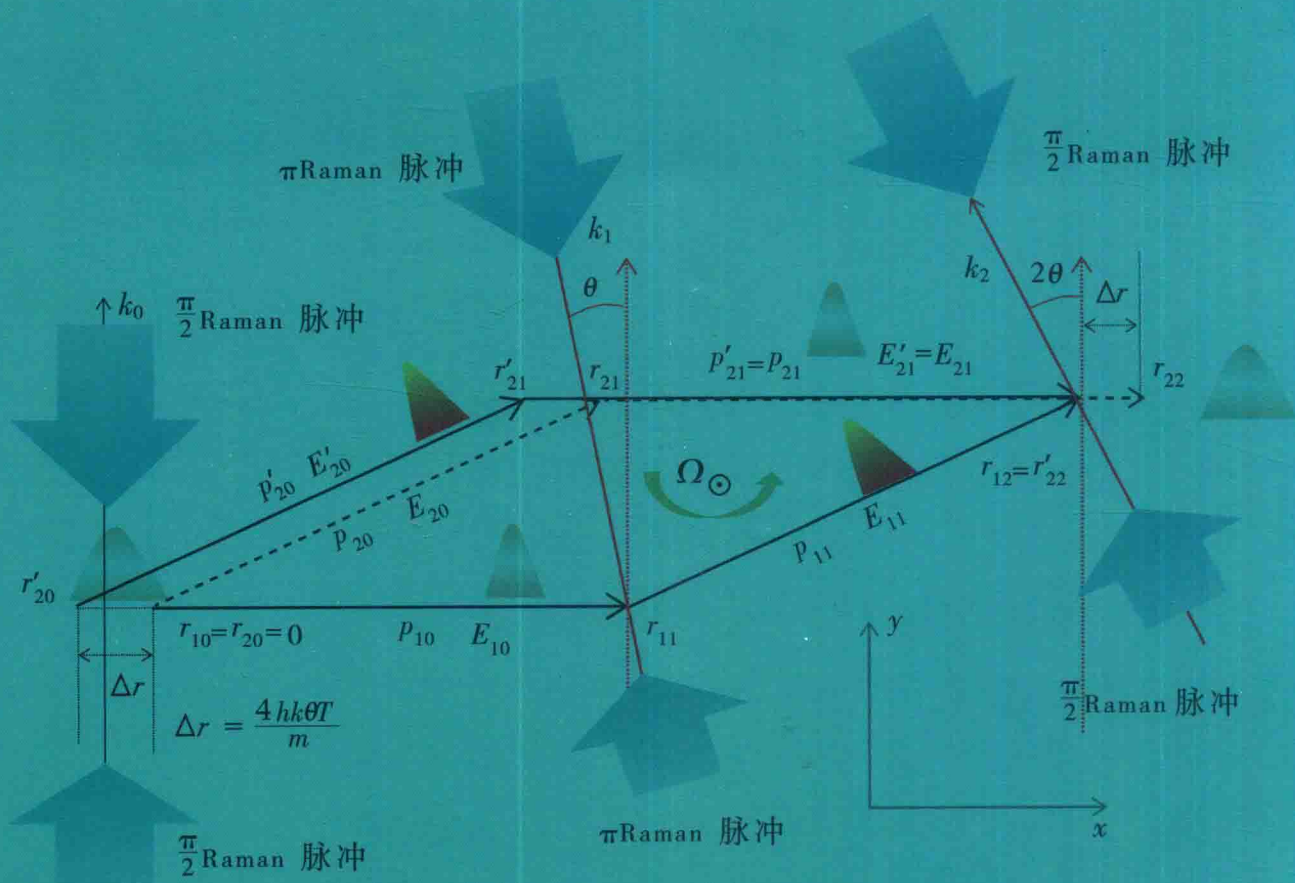




量子工程导论

Introduction to Quantum Engineering

王增斌 韩军海 张国万 编著



中国原子能出版社
China Atomic Energy Press

量子工程导论

Introduction to Quantum Engineering

王增斌 韩军海 张国万 编著



中国原子能出版社
China Atomic Energy Press

图书在版编目(CIP)数据

量子工程导论 / 王增斌, 韩军海, 张国万编著. -- 北京: 中国原子能出版社, 2017. 10
ISBN 978-7-5022-8637-8

I. ①量… II. ①王… ②韩… ③张… III. ①量子论
IV. ①O413

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 270720 号

量子工程导论

出 版 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 蒋焱兰 邮箱:ylj44@126.com QQ:419148731
特约编辑 刘玉晓 焦 浩
印 刷 河南承创印务有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 880mm × 1230mm 1/16
印 张 19
字 数 590 千字
版 次 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-8637-8
定 价 90.00 元

出版社网址: <http://www.aep.com.cn> E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

序

科学理论的发展是人类科技进步的基石,经典物理学曾开创了人类认知客观世界的新纪元,继而发生的科技革命将人类社会带入了工业化时代。在研究经典理论无法解释一些物理现象的基础上,诞生了量子力学,使人们对自然世界有了更加深入和全面的认识。这是人类认知客观世界的又一次革命,也必将深远地影响科技的发展。

量子力学是一门主要描述微观世界物质的状态和运行规律的基础科学。不同于牛顿力学、麦克斯韦电动力学和爱因斯坦相对论,量子力学并不是由个别物理学家单独完成的,它建立在一系列划时代的卓越工作基础之上,在这些出色的工作背后闪烁着一连串光辉的名字,他们是普朗克、波尔、德布罗意、玻恩、薛定谔、海森堡、狄拉克、爱因斯坦等。伴随着量子力学这一伟大理论的创立,人们逐步揭开了微观世界神秘的面纱。量子力学也从艰深晦涩的理论研究走向了实践应用,促进了量子工程这一崭新技术的形成。

随着量子力学逐渐被用于技术革新,量子工程技术有望为人类带来诸多革命性技术成果:如量子通信系统,以光子的量子态作为编码对象,可以实现信息论条件下绝对安全的保密通信;单光子通信系统,以单光子探测能力为基础,可以解决高速安全星潜通信的难题;量子陀螺仪,其理论精度比经典技术下的陀螺仪精度提高5~10个数量级;量子磁力仪,其精度可达亚fT量级,可以有效地解决潜艇/掩体探测、地磁导航等难题;量子雷达,以雷达信号的量子特性为基础,可以实现不可欺骗的远距离测距成像能力;量子计算机,具有内禀的并行计算能力,能有效解决当前多种NP问题;冷原子钟,能够在运行了上千万年后,依然保持误差不超过1s。

量子工程技术在国防领域有着巨大的应用潜力,能够为导航、通信、传感、成像等技术领域提供革命性的技术能力,在海、陆、空、天等领域有着广泛应用。量子工程技术能够引领新一代国防科技变革,是军事装备发展的技术制高点,其战略意义已得到世界各国的普遍认可和高度重视。量子工程技术为我国国防科技发展到世界领先水平提供了难得的战略机遇,将量子工程技术应用到军事装备的研发过程中,将能够促进国防科技水平的跨越式发展,从而实现我国军事装备的升级换代。

编者针对当前科技发展的迫切需求,在国内外量子科技前沿研究领域的基础上,结合自主创

新的研究成果和自身的工程实践经验,编写了《量子工程导论》一书。全书系统地阐述了量子工程技术的理论基础和基本方法,并对有着广泛应用前景的几类量子器件与仪表进行了深入的分析,同时针对国防科技发展的若干迫切需求给出了几个典型应用系统的初步设计。

本书内容较为全面,涵盖了导航、通信、传感和成像等多个主要量子工程技术应用方向,从基础理论与方法、量子器件与仪表、量子系统及应用等三个方面给出了系统的阐述,并分别对量子陀螺仪、磁力仪等仪器仪表进行了深入的探讨和论述。各章节的内容互相照应,并与实际应用密切结合,对高校学生、工程应用研究人员以及科研管理人员都有一定的参考价值,尤其对于迫切期待应用量子工程技术来解决传统技术难题的工程技术人员具有启发意义。

希望本书的出版,能够有助于我国国防及其他领域的科技发展,对相关领域技术人才的培养起到促进作用。

王增斌

2017年10月23日

前言

量子力学相关理论的发展是人们对自然界认识的深化,其从诞生至今经历了无数实验的证明,已经成为人们认识和改造自然世界不可或缺的理论工具。量子工程技术以量子力学、原子物理学、量子光学等理论为基础,以光子、电子、原子等微观粒子的量子态作为信息载体,通过制备、处理与测量微观粒子的量子特性,实现传感、通信、成像、计算等技术能力。

量子工程技术以量子为操作对象,其主要特性体现在量子态的相干叠加性、非局域性和不可克隆性等几个方面。量子的小尺度、微能量和量子干涉效应的敏感性为其提供了超越经典极限的传感能力;非局域性和不可克隆性保证了绝对安全的保密通信能力;量子态的相干叠加性则使量子计算机具有高速并行处理能力。量子技术因其独特的优势已被广泛应用于导航、通信、传感、成像等多个技术领域,用于解决依靠传统技术所无法突破的“经典极限瓶颈”问题,进而促进相关技术领域的跨越式发展。

本书是在紧密跟踪国内外前沿研究成果并结合编者多年的学习、研究工作经验的基础上,简明扼要地对量子工程技术相关的基础理论与方法以及工程应用中的重要问题进行阐述。

本书第一部分介绍了量子工程技术的基础理论与方法,包括量子力学、原子物理学、量子光学、量子信息学等四章内容。可供有一定物理基础的读者参考。

本书第二部分介绍了基于量子工程技术的几类量子器件与仪表,包括量子逻辑门、量子磁力仪、原子频标、量子纠缠源、冷原子源、量子陀螺仪与重力仪等六章内容。编者将国内外的前沿研究与自身工作经验相结合,向读者详细介绍了几类以量子工程技术为基础的器件与仪表。

本书第三部分针对当前量子工程技术的应用需求,介绍了目前量子工程技术在工程领域中的若干应用方向,在这一部分中读者可以看到诸如单光子激光通信系统、量子成像遥感系统、量子通信系统及网络等系统工程应用内容。

由于国内关于量子技术方面的书籍多以基础理论和前沿研究为主,因此,编者以面向应用需求、贴近工作实践为主要思路,编写本书,希望能够为量子工程技术的应用起到一定的促进作用。在撰写过程中,编者力求使本书容易理解,同时也兼顾理论与方法的严谨性,并针对书中讨论的具体问题,尽可能地从理论、方法、应用等三个方面,给出较为全面的解释,希望读者能够在本书

中找到解决问题的方法;并且在每章节的后面准备了若干习题,帮助读者巩固该章的内容。我们希望本书能够对高校学生、工程技术人员、科研管理人员了解、应用量子工程技术起到一定的参考作用。

本书在编写过程中,得到了中国航天科技集团公司量子工程研究中心、北京量子体系科技股份有限公司、钱学森空间技术实验室以及航天十三所等单位的支持。编者谨向以上单位专家和同事表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,加上编写时间仓促,书中的缺点与错误在所难免,望读者不吝批评指正。

编者

2017年6月

目 录

CONTENTS

第一部分 理论基础与基本方法

第一章 量子力学基础

第一节 绪 论	3
第二节 量子力学概念	5
第三节 量子力学的态描述	7
第四节 量子力学的力学量	10
第五节 力学方程	15
习 题	19
参考文献	20

第二章 原子物理学基础

第一节 早期原子物理简介	23
第二节 氢原子理论	32
第三节 碱金属原子	37
第四节 L-S 耦合机制	40
第五节 原子的超精细结构	43
习 题	45
参考文献	45

第三章 量子光学基础

第一节 辐射场的量子理论	46
第二节 电磁场的非经典态	48
第三节 量子态的准概率分布函数	51
第四节 原子与电磁场相互作用	54

第五节 多能级开放原子系统与光的相互作用 66

习 题 68

参考文献 68

第四章 量子信息学基础

第一节 绪 论 71

第二节 量子位 72

第三节 量子逻辑 74

第四节 量子算法简介 77

第五节 典型应用 83

习 题 85

参考文献 86

第二部分 量子器件与仪表

第五章 双位光量子逻辑门

第一节 绪 论 91

第二节 双量子位光量子逻辑门 93

第三节 基于 XPM 效应的双位量子门 95

第四节 铷原子介质中实现双位量子门方案 96

第五节 基于 XPM 的 C-Phase 门 105

第六节 小 结 110

习 题 110

参考文献 110

第六章 量子干涉磁力仪

第一节 绪 论 113

第二节 量子干涉磁力仪的理论基础 118

第三节 量子干涉磁力仪系统 122

第四节 测量精度及误差分析 124

第五节 小 结 125

习 题 126

参考文献 126

第七章 原子时间频率标准

第一节 绪 论 128

第二节 CPT 原子钟原理 133

第三节 CPT 原子钟系统组成 135

第四节 稳定性及误差分析	139
第五节 小 结	140
习 题	140
参考文献	140

第八章 量子纠缠光源

第一节 绪 论	142
第二节 纠缠的基本理论	143
第三节 分离变量的纠缠理论和实验	145
第四节 连续变量的纠缠理论和实验	149
第五节 纠缠态应用	156
第六节 小 结	162
习 题	163
参考文献	163

第九章 冷原子源

第一节 绪 论	165
第二节 冷原子囚禁技术	166
第三节 原子冷却技术	172
第四节 冷原子探测技术	182
第五节 玻色-爱因斯坦凝聚	186
习 题	189
参考文献	189

第十章 干涉型量子陀螺仪与重力仪

第一节 绪 论	190
第二节 冷原子干涉型量子陀螺仪基本方法	193
第三节 冷原子干涉型量子陀螺仪实施方案	202
第四节 冷原子干涉型量子重力仪基本方法	211
习 题	220
参考文献	221

第三部分 量子系统与应用

第十一章 单光子通信系统

第一节 绪 论	225
第二节 单光子通信技术	225
第三节 单光子星潜激光通信系统	229

第四节 单光子深空激光通信系统 235

第五节 难点与展望 241

习 题 242

参考文献 242

第十二章 量子成像遥感系统

第一节 绪 论 244

第二节 量子成像系统 244

第三节 反欺骗量子雷达 252

第四节 单光子测距 256

参考文献 266

第十三章 量子通信系统及网络

第一节 绪 论 268

第二节 量子通信理论 271

第三节 光纤量子通信 279

第四节 星地量子通信 285

第五节 量子通信网络 286

第六节 量子通信的前景与展望 291

习 题 292

参考文献 292

第一部分

理论基础与基本方法

第一章

量子力学基础

第一节 绪 论

量子力学^[1-8]的建立已有 90 余载,是随着人类生产实践和科学实验深入到微观领域发展起来的。在量子力学建立初期,物理学的研究逐渐深入到原子领域,人们发现用经典理论已经无法诠释微观粒子的某些现象,量子力学的概念和理论就在解决这些问题的过程中逐渐建立起来。事实上,量子力学不仅是描述微观世界的基础理论,也是经典物理学的有效补充。

量子力学与爱因斯坦创立的相对论被认为是现代物理学的两大基石。目前发展起来的现代物理学分支,如原子物理^[9]、量子光学、固体物理、材料科学、介观物理和粒子物理学以及其他相关的边缘学科^[10-23]都是以量子力学为基础的。量子力学是在 20 世纪初由普朗克(Planck)、爱因斯坦(Einstein)、波尔(Bohr)、薛定谔(Schrödinger)、狄拉克(Dirac)、玻恩(Born)和海森堡(Heisenberg)等一大批物理学家共同创立的。

随着量子力学基本理论的不完善,人们对微观粒子的结构和运动规律的理解从思辨性讨论逐渐转向实证性研究,如 EPR 悖论、Bell 不等式^[24]、非定域性实验验证和 Schrödinger 猫态在介观尺度上的实现等,这些都非常有利于人们对量子力学基本概念和原理的理解。此外,人们还陆续发现了一些基于量子理论的宏观物理现象,如电子的超导、超流现象,约瑟夫森效应(Josephson effect),霍尔效应(Hall effect)和波色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein Condensation, BEC)等。在本章,我们将从量子力学的发展简史和基本假设出发,向读者简述量子力学的基本概念和原理。

量子力学的发展建立在对黑体辐射和光电效应等一系列现象的研究基础之上,本节将简要介绍与此相关的量子力学基本假设。

一、黑体辐射与普朗克的能量子假说

能够完全吸收照射到它上面的各种电磁辐射的物体称之为黑体。一个空腔可近似看作是一个黑

体,当空腔内部的辐射处于平衡时,腔壁单位面积所发射的辐射能量与它所吸收的辐射能量相等,此时由实验得出的辐射能量密度随波长的分布曲线只与空腔的绝对温度有关,而与其形状和组成物质无关,这种只与温度有关的热辐射称为黑体辐射。维恩(Wein)基于热力学原理得出黑体辐射的维恩公式,该公式在短波段与实验结果近似相符,但是在长波段有明显偏离。瑞利(Rayleigh)和金斯(Jeans)根据经典电动力学和统计物理学得到瑞利-金斯公式,该公式虽然在长波段与实验结果较符合,但在短波段不相符合,甚至出现能量发散,被戏称为“紫外灾难”。这使得经典物理学无法完全解释黑体辐射现象。

1900年,普朗克提出了能量子的概念,即能量量子化。这对经典物理学认为能量连续性的理解造成了巨大的冲击。普朗克认为空腔内壁分子、原子的振动可以看作带电的简谐振子,这些简谐振子可以辐射和吸收能量,并与空腔内的辐射达到平衡。他假设频率为 ν 的简谐振子的能量值只能取 $\varepsilon = h\nu$ 的整数倍,即简谐振子的能量是量子化的,只能取 $\varepsilon, 2\varepsilon, 3\varepsilon, \dots, n\varepsilon$ 之间的一系列分立值。能量 $\varepsilon = h\nu$ 称为能量子, h 是普朗克常数,数值是 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,空腔内的辐射是由各种频率的能量子组成的。在这一假设基础上,运用经典的统计物理方法推出的普朗克黑体辐射公式,很好地解释了实验结果。

能量子概念的提出标志着量子力学的诞生,普朗克因此获得了1918年的诺贝尔物理学奖。

二、光电效应与爱因斯坦的光量子假说

普朗克的能量子假说提出后,爱因斯坦从中得到了重要启示,于1905年提出了“光量子”概念,并成功解释了光电效应。光电效应即光照射某些金属时,金属表面释放出电子的效应,放出的电子称为光电子。实验研究表明,只有当光的频率 $\nu > \nu_0$ 时才会发生光电效应,其中 ν_0 是截止频率,截止频率只与材料本身的性质有关,而与光强无关。而按照经典物理学的电磁理论,无论何种频率的光,只要其强度足够大,就能使电子获得足够的能量逃逸出金属表面,这与实验结果显然不符。

爱因斯坦假设,每一个光子的能量为 $\varepsilon = h\nu$,光子照射到金属表面,能量被电子吸收形成光电子,一部分用于克服内部束缚,一部分作为离开金属表面后的动能。可表示为:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W_0 \quad (1-1)$$

其中 W_0 是金属的“逸出功”,它决定了 ν_0 的大小。由此可见,当光频率 $\nu < \nu_0 = W_0/h$ 时,电子不可能从金属表面逃逸,因而没有光电子产生。这样,光电子的动能只与照射光的频率 ν 有关,而与光的强度无关,成功解释了光电效应。

三、波尔的旧量子理论与原子结构、原子光谱

经典理论在原子能级结构方面同样遇到了无法解释的问题。根据经典电动力学,电子围绕原子核的运动是一种变加速运动,将以辐射的方式不断向外辐射能量,因此电子运动轨道的曲率半径将会不断减小,电子最后会落回到原子核中去,电子加速所产生的辐射,其频率是连续分布的。这与实验观测到的原子光谱是分立谱线的结果相互矛盾。在此基础上,波尔对氢的原子结构理论提出了著名的三条假设。

①轨道假设:电子只能在一系列特定的轨道上运动,而且在这些特定的轨道上运动时,不向外辐射电磁波。这条假设解决了电子围绕原子核运动与经典电磁理论的矛盾。经典电磁理论认为只要电子做变速运动,就会向外辐射电磁波,从而导致轨道半径变小,最终落向原子核,导致原子的“崩溃”,这和日常生活中物质是相对稳定的结论相互矛盾。因此,一旦做出轨道假设,就解决了这个矛盾。

②角动量假设:这些特定的轨道必须满足这样的要求,即电子在这些轨道上的角动量必须是 $\hbar = h/2\pi$ 的整数倍。这个假设规定了哪些轨道是可以让电子在上面运动的,而哪些是不可以的。

③当电子在这些轨道之间跃迁时,会吸收(从低能级向高能级跃迁)或放出(从高能级向低能级跃迁)一定的能量,而这个能量的值就是这两个能级的能级差。

波尔的这三个假设和实验结果相符,很好地解释了氢原子光谱的分立现象。

第二节 量子力学概念

一、量子力学的建立和发展

波尔理论对微观粒子的描述还是基于经典力学,即将微观粒子看作经典力学中的质点,将经典力学的规律运用在微观粒子运动上。直到 1924 年德布罗意(L. de Broglie)提出了微观粒子的波粒二象性,量子力学逐渐开始建立。在量子力学中,一个物理体系的状态用波函数来描述,波函数的任意线性叠加仍然代表体系的一种可能状态。

1. 德布罗意波

德布罗意在普朗克、爱因斯坦的光量子理论以及波尔的原子结构模型的启发下,提出了微观粒子也具有波动性的假设。德布罗意通过公式(1-2)与(1-3),将粒子和波(称之为“物质波”)联系起来,粒子的能量 E 和动量 p 与波的频率 ν 和波长 λ 之间的关系:

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (1-2)$$

$$p = \frac{h}{\lambda}n = \hbar k \quad (1-3)$$

自由粒子的动能为 E ,粒子的静止质量 μ ,粒子的速度远远小于光速,则 $E = \frac{p^2}{2\mu}$,代入上面公式可得德布罗意波长为:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2\mu E}} \quad (1-4)$$

在 1927 年,戴维逊(Davisson)和革末(Germer)的电子衍射实验证明了德布罗意的波动性假设的正确性。

2. 波动方程的建立

德布罗意的物质波理论提出后,奥地利物理学家薛定谔在一次会议中引用这个概念,但受到了其他物理学家的质疑:“如果是波,那波动方程是什么?”。之后经过一段时间的思考,薛定谔于1926年提出了波动方程,成功解释了氢原子能级和光谱分立等现象,同时也能够合理解释各种微观物理现象,引起了物理学界的震动。在波动方程提出前几个月,海森堡已经提出了矩阵力学,但当时的物理学家对于矩阵运算比较陌生,而更容易接受薛定谔的波动力学方程。后来薛定谔证明了矩阵力学与波动力学的等价性,波动力学方程和矩阵力学方程被后人称之为量子力学的两种表述方式。随后狄拉克提出了一种变换形式,建立了狄拉克方程。量子力学到此基本建立起来。

波动方程提出后,对于波函数的物理含义引起了诸多争议。薛定谔认为一个粒子即是一个物质波包,波函数本身是一个可观测量。而以玻恩为代表的另一派提出了概率波的概念,认为波函数是对微观粒子状态的描述,波函数在空间中某一点的强度(振幅绝对值的平方)和在该点找到粒子的概率成正比。后来一系列的实验都证明了概率波解释的正确性,因此概率波获得了人们的广泛认可。

量子力学与经典力学的差别主要表现在对粒子的状态和力学量的描述及其变化规律上。在量子力学中,粒子的状态用波函数描述,它是坐标和时间的函数。当微观粒子处于某一状态时,它的力学量(如坐标、动量、角动量、能量等)一般不具有确定的数值,而具有一系列可能值,每个可能值以一定的概率出现。

量子力学和狭义相对论的结合产生了相对论量子力学。之后狄拉克、海森堡和泡利(Pauli)等人在此基础上进一步发展了量子电动力学,到20世纪30年代以后,结合经典场论又逐渐形成了描述多粒子系统的量子场论,它们一同构成了描述微观粒子量子现象的理论基础。迄今,量子力学已经发展较为成熟,并已广泛应用到基础研究和工程应用中。

二、量子力学基本假设

人们总结了薛定谔、海森堡、玻恩及狄拉克等人在量子力学方面的突出贡献,并归纳为五个基本假设。下面我们简要介绍量子力学的五个基本假设:

量子力学第一基本假设——波函数假设:量子系统的状态可以用希尔伯特(Hilbert)空间(见本章第四节第三点中希尔伯特空间)中的一个归一化波函数 $\psi(r,t)$ 来表示,波函数包含系统的全部信息。仅相差一个复因子的两个波函数描述的是同一个状态。波函数与其复共轭的积 $\psi(r,t)^* \psi(r,t)$ 表示粒子在 t 时刻、空间 r 处出现的概率密度。

量子力学第二基本假设——态叠加原理:若 $|\psi_1\rangle, |\psi_2\rangle, \dots, |\psi_n\rangle$ 为某一体系的可能态,那么由它们的线性组合所得的 $|\psi\rangle = c_1 |\psi_1\rangle + c_2 |\psi_2\rangle + \dots + c_n |\psi_n\rangle$ 也是该体系的一个可能态,其中 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 为复常数。

量子力学第三基本假设——力学量的算符假设:量子系统的所有可观测量在希尔伯特空间中对应一组线性厄米算符。力学量的测量值对应相应算符的期望值。

量子力学第四基本假设——薛定谔方程假设:量子系统所处的态 $\psi(r,t)$ 随时间演化的动力学方程遵循 Schrödinger 方程: