

Quantum Mechanics

量子力学

(第四版)

张永德 著



科学出版社

量子力学

(第四版)

张永德 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书讲述非相对论量子力学,内容新颖,阐述清晰,分析深入,不回避问题;包括量子力学的物理基础、Schrödinger 方程、一维问题、中心场束缚态问题、量子力学的表象与表示、对称性分析和应用、电子自旋、定态微扰论、电磁作用分析和应用、势散射理论、含时问题与量子跃迁等.

本书适合作为物理类各专业本科生、研究生教材,并可供教师及研究人员教学科研参考.同时,书中针对不同学时给出了三种不同的选用方案.为便于教学和自学,书中习题配有题解出版(《量子力学习题精解(第二版)》,张鹏飞,吴强,柳盛典编著).

图书在版编目(CIP)数据

量子力学/张永德著. —4 版. —北京: 科学出版社, 2017.1
ISBN 978-7-03-050545-3

I. ①量… II. ①张… III. ①量子力学 IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 268853 号

责任编辑: 昌 盛 陈曰德 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 白 洋 / 封面设计: 迷底书装

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>

保定市中国画美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 3 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2008 年 8 月第 二 版 印张: 23 1/2

2015 年 8 月第 三 版 字数: 468 000

2017 年 1 月第 四 版 印数: 23851-25850

2017 年 1 月第十二次印刷

定价: 52.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

第四版前言

相对于第三版,这一版尽量增加了一些关于量子力学的基本物理观念、物理思想、物理禀性、物理逻辑、物理分析、结果涵义的阐述,随时指明了量子力学上层建筑(理论体系)与其实验基础(实验观测)之间的关联,也注意吸纳当代文献中适合在量子力学层次上讲述的结果.此外,还指出了一些常见的不很清晰、不够严谨的数学处理.另一方面,在不损及全书理论体系和不降低全书标准前提下,减轻了全书的分量.为此,删去了超精细结构叙述、减少了谐振子路径积分计算、删去了讲述谐振子路径积分的附录六、删去了 WKB 近似中关于转向点的分析、放弃了向经典过渡的全面分析等.这些内容可以在我的《高等量子力学》中找到更为详细深入的叙述.此外,还改画了几幅插图,改变了个别地方的标记符号,改正了发现的书中和习题中的一些印刷错误.作者真诚感谢张鹏飞教授在本书校阅上的许多帮助.他还不辞辛苦地为本书编配了题解,并已由科学出版社配套出版.希望这一切使本书更便于重点高校物理系师生的教学使用.

最后,作者虔诚地怀着感恩之心,铭记所有帮助过我的老师、好友、同行和学生.真挚的友谊、美好的感情是永恒的.让我们始终记住朱熹关于读书的诗:

半亩方塘一鉴开,天光云影共徘徊;

问渠那得清如许,为有源头活水来.

虽然学习量子力学是艰苦的,但也能是愉快的;是费思量的,也能是有趣的;是繁重的,也能是驰骋的.作者深盼读者的同意.

作 者

2016年10月24日

第三版前言

本书自 2002 年出版以来，现在是第三版。这次修订的基本想法是：在遵循原来体系，不降低原书标准的前提下，一、为便于初学者入门，删减了第一、二、五章中部分内容，其中有的则转移作为了附录；二、删去了电磁场真空态能量和 Casimir 效应的第 9.6 节。三、删去了讲述量子信息初步的整个第十二章；四、删去了推导量子统计分布的附录三，删去它们的理由是为了减轻总体分量，更大的理由是后继课程还会更深入地讲到它们；五、增加现在的附录三，讲解一个最简明的 von Neumann 测量模型；六、改进一些叙述，尽量说得更为清楚一点。特别是对那些时常有意回避或无意忽视的疑难问题，在课程范围之内尽量说一说。其中也包括一些数学问题，如从有限维矩阵代数运算向无限维算符运算过渡时，两者之间的差别等；七、顾及当代量子力学的新进展，吸收一点新的内容、观点和概念。作者认为，修改后本书标准并没有降低，但整体上看，起点有所降低，分量有所减少，叙述更集中一些，更清楚一些。再结合相应题解，现在版本会更便于老师讲授和学生学习，更适合重点大学物理专业的教学。

量子力学诞生已过百年，但迄今关于它还存在着极大争议和种种曲解，有的时候几乎就是排斥和抗拒，更多的则是不理解和隔阂！人类接受经典物理学就从没有经历如此艰难波折的过程。有鉴于此，从经典牛顿力学过渡到量子力学的时候，人们确实有必要以“吾日三省吾身”的反省精神，对自己的思想认识多一点剖析和领悟，并看透人们经常面临的“三重雾霾”^①：经典物理学带来的先入为主的偏颇、人类现在和将来全部观测能力具有的“人择原理”的局限、人类制定的全部“可道”之“道”带给人们的迷惑。在自然面前，人们只能虚心谨慎地遵从科学的“理性精神”——“相信实验，相信逻辑，依照实验事实指引的方向，利用逻辑拐杖前行”，别无选择！

张永德

2015 年 1 月 1 日

^① 张永德，量子菜根谭（第Ⅲ版），北京：清华大学出版社，2016 年，第 30 讲。

第一版前言

到 19 世纪末，经典物理学的两大支柱——牛顿力学和电磁波理论（包括光学）取得了辉煌的成就。经典物理学巨大成就的灿烂光芒，眩惑了人们的眼睛。原本对立的粒子和波这两种概念，被普适化、绝对化了。与此同时，牛顿力学和波动力学的描述方法也被普适化和绝对化了。仿佛物理学所研究的全部对象必定非此即彼。与此相应，Laplace 决定论也被普适化和绝对化起来，成了因果论的惟一正确形式，用 Einstein 的话来说就是：“无论如何，我确信上帝是不玩掷骰子的。”

当然，这句话并非 Einstein 观点的论据，只能说表达了他的信念。但至少到目前为止，我们可以说，这是一种混入了主观推测的信念，现实物理世界并非如此。正如 Bohr 所说，人们能有什么“根据”去肯定“上帝”是“不玩掷骰子”的呢？就凭经典物理学和 Laplace 决定论的巨大成就吗？这显然是一种含有主观成分的外推、一种不可靠的根据。

因为，经典物理学（以及和它相伴的 Laplace 决定论）在取得辉煌成就的同时，也暴露出极大的局限性：牛顿力学（包括后来建立的相对论力学）只局限于研究物体在其外在时空中的力学运动，并没有涉及物体的物质结构、物质的内禀属性、物质种类的相互转化；而光学（包括后来的电磁波理论）只局限于研究光的传导，并没有涉及光的产生和吸收、光和物质相互作用的机制。经典物理学一旦超出原先范畴，进入这些新领域，就显得捉襟见肘、漏洞百出。就在经典物理学处于巅峰的 19 世纪末，也已经发现许多无法用经典物理学理解的现象。比如，Becquerel 发现的放射性现象、黑体辐射中的紫外灾难、光电效应等。虽然它们仅仅是当时经典物理学万里晴空中远在天边的几朵乌云，但预示着暴风雨即将来临。

话得说回来，人们经常习惯于根据已有的知识和经验去思考新问题、理解新现象。尤其当现有理论已经取得辉煌成就的情况下，更是如此。也正因为这样，这时的理论也常会转化成无形的“囚笼”，束缚或钝化人们的创造性思维。不幸的是，这种对思想的束缚或钝化作用经常是习惯性的、不自觉的，因而也就是不易挣脱的。所以，量子力学的初学者，在从经典物理学过渡到量子物理学的时候，必须善于剖析自己从宏观日常经验中积习起来的观念，善于从经典物理学这种先入为主的“囚笼”中挣脱出来，从下意识的“人择原理”的偏颇中解放出来。依照新的实验事实所指引的方向，利用逻辑思维前进。新的实验事实是医治我们物理思想僵化的特效药方；逻辑思维是扶助我们前进的惟一可靠工具。两者相结合，才是正确指引我们前进的

灯塔，才是肯定、修正或否定新旧物理理论的惟一裁判，才是肯定、修正或否定我们积习观念的惟一裁判。其中，实验检验又是最高和最后的裁判。

当今的量子理论已经发展成为庞大的理论群体。不夸张地说，量子理论是物理学家迄今为止所建立的最宏伟的物理理论。它博大精深、包罗万象，小至夸克和胶子的量子色动力学，大至宇宙的早期理论，无所不在，已经取得了前所未有的辉煌成就。

正如在经典物理学辉煌成就的面前，不应当目眩神夺一样，在量子理论辉煌成就的面前，也应保持清醒的头脑。目前的量子理论仍然不是人类追求的最终真理。从量子理论诞生时刻起，成功和困难就像人的躯体和影子那样，一直相伴相随：成功的躯体越长越高大、越雄伟，困难的阴影也愈来愈浓重、愈清晰。Dirac 在评论这些困难时说，人们期盼建立一个更基本的理论，而这将需要人们基本观念上的某种巨大的变革^①。

量子力学与其后继课程——高等量子力学、量子散射理论、量子电动力学、量子统计、量子场论、固体量子场论、量子信息论等逻辑相承、联系紧密、几乎浑然一体。因此，常常遇见“打通”与后继课程的界限，简单地引入一些后继课程内容的做法。但本书取材仅限于非相对论量子力学范畴，只限于阐述这一范畴的基本原理、基本内容和重要应用。书中也常有进一步的分析讨论，那只是“就地”深入，并不涉及繁难的数学运算和进一步的理论阐述，尽量不用后继课程的内容。即便个别处采用了，也很大程度地减少了其数学的繁难程度。特别是，本书不涉及相对论量子力学。尽管它的数学形式优美，有些结果也很有用。我认为，与其将这部分内容纳入量子力学，不如将它作为预备知识归入量子场论更为合适。这是由于，相对论量子力学前提假设中隐含着两个严重的逻辑矛盾——其中之一便是微观粒子力学理论与相对论性能量的矛盾。微观粒子力学理论的前提是粒子数守恒，而相对论性能量却使粒子之间的转化成为可能——导致粒子数不再守恒。由于前提中内在的逻辑不自洽性，相对论量子力学变成一个不稳定的、过渡性的理论。只有继续向前，彻底贯彻量子逻辑，为了与相对论性高能量相匹配而解除粒子数定域守恒的限制，考虑粒子真正的（不算以产生、湮灭算符表示状态改变的情况）产生、湮灭和转化，走向量子场论，才能克服由这一前提矛盾造成的一些根本性理论缺陷。舍去相对论量子力学有关内容之后，本书便维持了量子力学作为微观粒子的力学理论在逻辑上的自洽性。

作者自转入中国科学技术大学从教以来，一直从事近代量子理论方面的科研和教学工作，长期教授物理系本科生的量子力学以及理论物理专业研究生的一些后继量子理论课程，本书便是在这一教学和科研背景下，在所编写的量子力学讲义基础上，历经多次较大修改，最后定稿而成。

① P.A.M.Dirac, Methods in Theoretical Physics, included in “from a life of physics”, World Scientific, 1989.

写这本书时,从内容选择和阐述侧重上作者想尽力实现以下三点愿望:一、偏重物理思想的阐述和论证、物理内涵的挖掘和剖析,以求得对量子力学原理有较好的领悟.与此同时,数学推导则力求清楚简洁.前者比如,波粒二象性和量子力学一些基本特征之间的内在逻辑关联、对一维问题总结的四个定理、全同性原理内涵的剖析、核力的物理来源等.后者比如,么正变换和 Dirac 符号的详细推算、磁场下原子谱线分裂的统一处理、直流交流和磁 Josephson 效应的统一叙述、带自旋的 Born 近似等.二、尽量包容一些最新的进展.量子力学作为一门基础性的理论课程,老面貌的更新比较困难.本书根据近代文献和个人的体会,尽可能以深入浅出的方式去做这件事.比如,相干态及有关问题、非惯性系量子力学、AB 效应及相关问题、中子干涉量度学介绍、量子 Zeno 效应及其存在性证明、含时振子求解、量子物理基础等.三、叙述中注意做到封闭与开放相结合.在展示量子理论优美、力量和逻辑自洽性的同时,不回避问题,尽量随时指出问题的开放的一面,指出目前认识的边界所在,以便明了对该问题认识的局限性、处理方法的近似性,增进对量子理论内在困难的了解.这既有助于加深对现有内容的理解,又能活跃思想,尽量不使量子力学僵化成为新的教条,不成为束缚人们思维的新“囚笼”.比如,非相对论量子力学的局限性、无限深方阱问题的争论、Dirac 符号的局限性、Born 近似适用条件讨论、量子理论内在逻辑自洽性分析、封闭系统的局限性等.同时也指明部分有关文献,供使用者进一步参考.但限于传统教材内容以及本人能力和经验等诸多因素,真正做好这三点是困难的.书中在材料取舍、编排和叙述上的偏颇、不当,甚至错误都会存在,敬请指正.

这是一本关于非相对论量子力学的教材,也是一本参考书.它既可以用于综合性大学物理系和相近各系本科生的教学,也可以供有关专业的教师和研究生使用.本书在内容分量上略超过(一学期 76 学时)传统教材的 20%~25%.这样做基于两点考虑:其一,为教师备课和研究生辅导复习时拓宽思路之用;其二,为讲课教师提供适量多余的讲授和讨论的内容,视授课对象和教学方案作适当的选择,也为少数有余力的学生提供一点在量子力学层次上驰骋的场合.这些超过分量的章节均用“※”标记,按通常教学,略去不讲并不损及对量子力学的基本理解.与此相应,作者将全部内容分为三个部分,即:Ⅰ——基本内容;Ⅱ——进一步内容;Ⅲ——开放系统问题.无“※”号的Ⅰ为周学时 3 的内容;无“※”号的Ⅰ加上Ⅱ是周学时 4 的内容,加上Ⅲ以及大部分“※”号则是周学时 6 的内容.这些教案可视情况选用.习题的分量也有超过,可以选做其中一部分.应当指出,过去传统的前苏联教材习题多偏重于基础知识的巩固、基本功的训练和数学技巧的演练.这当然是必要的,但仅有这些是不够的.因此,从科学出版社出版的《物理学大题典》(由《美国物理试题与解答》扩充而来)的量子力学卷,选用了部分美国著名大学的研究生入学量子力学试题.这些试题往往偏新颖、偏应用、偏物理.作者认为,

将两方面适当结合起来会更全面一些。部分习题是作者依据内容自拟的。

最后, 作者感谢全国高校量子力学研究会的许多同行好友: 喀兴林、曾谨言、柯善哲、倪光炯、钱伯初等教授的多次切磋琢磨。裴寿镛教授还用本书初稿在北京师范大学试讲过。感谢潘建伟教授以及 Helmut Rauch 教授、Anton Zeilinger 教授, 从他们杰出工作中, 作者学习到不少新知识, 拓宽了思路, 有助于本书内容的改进。在本书出版过程中, 得到了柯善哲教授和科学出版社鄢德平、昌盛的热情支持。侯广、吴盛俊、周锦东、张涵打印文稿时付出了辛勤的劳动。吴盛俊、吴强、柳盛典及张鹏飞教授先后参与编辑和解答了书中习题(科学出版社同时出版)。张涵在文字表达上提出不少建设性的意见。张鹏飞教授改进绘制了书中部分插图。没有这些宝贵帮助, 这书面世是不可能的。作者在此向他们一并表示谢意。

张永德

2001 年 11 月 24 日

目 录

第四版前言

第三版前言

第一版前言

第一部分 基 本 内 容

第一章 量子力学的物理基础	1
§1.1 最初的实验基础	1
1. 第一组实验——光的粒子性实验	1
2. 第二组实验——粒子的波动性实验	5
§1.2 基本观念	9
1. 基本图像: de Broglie 关系与波粒二象性	9
2. de Broglie 波的初步分析	10
3. 基本特征: 概率幅描述、量子化现象、不确定性关系	11
§1.3 不确定性关系讨论	14
1. 能量和时间的不确定性关系	14
2. 关于不确定性关系概念的三点注意	15
3. 不确定性关系的初步应用	16
§1.4 理论体系公设	16
1. 第一公设——波函数公设	17
2. 第二公设——算符公设	18
3. 第三公设——测量公设(期望值公设)	20
4. 第四公设——微观体系动力学演化公设(Schrödinger 方程公设)	22
5. 量子力学的第五个公设——全同性原理公设	22
习题	23
第二章 算符公设与 Schrödinger 方程公设讨论	25
§2.1 算符公设讨论	25
1. 线性算符	25
2. Hermite 共轭算符	25

3. Hermite 算符本征值均为实数, 对应不同本征值的本征函数相互正交	26
4. 经典力学量与算符对应问题	27
5. 算符对易和同时测量问题	27
6. 动量算符的 Hermite 性问题	28
7. 对易子计算	28
§2.2 Schrödinger 方程公设讨论	30
1. Schrödinger 方程与“一次量子化”	30
2. 态叠加原理, 方程线性形式与“外场近似”	31
3. 概率流密度与概率定域守恒	32
4. 稳定势场 Schrödinger 方程的含时一般解	33
5. 势场界面和奇点处波函数的性质	34
6. 能量平均值下限问题	35
7. 能谱分界点问题	35
§2.3 力学量期望值运动方程与时间导数算符	36
1. 力学量期望值运动方程	36
2. 时间导数算符	36
§2.4 Hellmann-Feynman 定理和 Virial 定理	39
1. Hellmann-Feynman 定理	39
2. 束缚定态的 Virial 定理	40
习题	41
第三章 一维问题	45
§3.1 一维定态的一些特例	45
1. 一维方势阱问题, Landau 与 Pauli 的矛盾	45
2. 一维方势垒散射问题	53
3. 一维谐振子问题	57
4. 一维线性势问题	62
* 5. Kronig-Penney 势问题	66
* §3.2 一维定态的一般讨论	72
1. 本征函数族的完备性定理	72
2. 束缚态存在定理	73
3. 无简并定理	74
4. 零点定理	75
§3.3 一维 Gauss 波包自由演化	76
习题	78

第四章 中心场束缚态问题	82
§4.1 引言	82
§4.2 轨道角动量及其本征函数	84
§4.3 几个一般分析	87
1. m 量子数简并和离心势	87
2. 径向波函数在 $r \rightarrow 0$ 处自然边界条件	88
3. 粒子回转角动量及 Bohr 磁子	90
4. 讨论——中心场解转动对称性缺失与波函数真实物理含义	92
§4.4 球方势阱问题	92
1. 束缚态 ($E < V_0$) 问题	93
2. 无限深球方势阱	94
*3. 自由粒子球面波解	95
*4. 非束缚态问题	96
§4.5 Coulomb 场——氢原子问题	96
1. Schrödinger 方程及解	96
2. 讨论	100
§4.6 三维各向同性谐振子问题	103
1. Schrödinger 方程和解	103
2. 讨论	105
习题	106
第五章 量子力学的表象与表示	111
§5.1 幺正变换和反幺正变换	111
1. 幺正算符定义	111
2. 幺正算符的性质	112
3. 幺正变换	113
*4. 反幺正变换	115
§5.2 量子力学的 Dirac 符号表示	116
1. 波函数的标记和分类	116
2. Dirac 符号	117
3. Dirac 符号的一些应用	120
*4. Dirac 符号的局限性	121
§5.3 表象概念	122
1. 量子力学的表象概念	122
2. 几种常用表象	123

3. Dirac 符号下的表象变换	129
*§5.4 Wigner 定理	130
1. Wigner 定理	130
2. 讨论	131
*§5.5 量子力学的路径积分表示	131
1. 传播子与 Feynman 公设	131
2. 和 Schrödinger 方程的等价性	135
3. 传播子 $U(\mathbf{r}, t; \mathbf{r}_0, t_0)$ 再研究	137
4. 路径积分计算举例 (1) —— 自由粒子情况	138
5. 路径积分计算举例 (2) —— 谐振子情况	139
*§5.6 Fock 空间与相干态及相干态表象	141
1. 谐振子的 Fock 空间表示	141
2. 相干态	144
3. 相干态表象	147
习题	148
第六章 对称性分析和应用	153
§6.1 一般叙述	153
1. 对称性的含义	153
2. 量子力学中的对称性	153
3. 对称性与守恒律及守恒量	154
§6.2 时空对称性及其结论	155
1. 时间均匀和能量守恒定律	155
2. 空间均匀性和动量守恒定律	157
3. 空间各向同性和角动量守恒	159
4. 空间反射对称性和宇称守恒	161
*5. 时间反演对称性	163
*§6.3 内禀对称性	164
1. 同位旋空间旋转对称性和同位旋守恒	164
2. 全同粒子置换对称性与全同性原理	165
习题	172
第七章 自旋角动量	175
§7.1 电子自旋角动量	175
1. 电子自旋的实验基础和特点	175
2. 电子自旋态的表示	176

3. 自旋算符与 Pauli 矩阵	177
4. 例算	179
5. $\frac{1}{2}$ 自旋态的极化矢量与投影算符	181
6. 空间转动的对应关系 $SU_2(\theta\mathbf{n}) \leftrightarrow R_3(\theta\mathbf{n})$	183
§7.2 两个 $\frac{\hbar}{2}$ 自旋角动量耦合	183
1. 自旋单态和自旋三重态	183
2. 两套基矢——耦合基和无耦合基	184
3. 例算	184
4. 自旋交换算符和例算	186
§7.3 自旋角动量与轨道角动量耦合	188
1. $S-L$ 的合成	188
2. 角动量的升降算符	189
3. $S-L$ 耦合表象基矢与无耦合表象基矢的相互展开	190
4. 自旋-轨道耦合与碱金属原子光谱双线结构	193
习题	195
第八章 定态微扰论	199
§8.1 非简并态微扰论	199
1. 基本方程组	199
2. 一阶微扰论	200
3. 二阶微扰论	202
4. 例算: 光谱精细结构、van der Waals 力、核力 Yukawa 势*	204
§8.2 简并态微扰论	211
1. 简并态微扰论要旨	211
2. 简并态微扰论	211
3. 例算: 不对称量子陀螺、电场 Stark 效应、外磁场中自旋谐振子	213
§8.3 变分方法	217
1. 变分极值定理	218
2. 用变分法求解氢原子基态能量	219
*§8.4 WKB 近似方法	221
1. WKB 近似方法的形式展开	221
2. 适用条件	223
3. 例算	224
习题	226

第二部分 进一步内容

第九章 电磁作用分析和重要应用	231
§9.1 电磁场中 Schrödinger 方程	231
1. 最小电磁耦合原理及电磁场中 Schrödinger 方程	231
2. 方程的一些考察	232
§9.2 Coulomb 场束缚电子在均匀磁场中运动	234
1. 均匀磁场中类氢原子基本方程考察	234
2. 基本方程求解	236
3. 能级劈裂效应统一分析——正常 Zeeman 效应、反常 Zeeman 效应和 Paschen-Back 效应	238
*§9.3 均匀磁场中粒子束运动	242
1. 自由中子极化矢量在均匀磁场中进动	242
2. 旋量叠加与旋量干涉, 中子干涉量度学 (neutron interferometry)	242
3. 均匀磁场中电子束运动——Landau 能级	246
§9.4 Aharonov-Bohm (AB) 效应	246
1. 磁 AB 效应	247
2. 向电磁 AB 效应推广	248
3. 几点讨论	249
*§9.5 超导现象的量子理论基础	251
1. 超导体中的流密度与 London 方程	251
2. Meissner 效应	251
3. 磁通量量子化 (及磁荷)	252
4. 超导 Josephson 结的 AB 效应	253
习题	256
第十章 势散射理论	261
§10.1 一般描述	261
1. 散射 (碰撞) 实验的意义及分类	261
2. 基本描述方法——微分散射截面	262
3. 入射波、散射波和散射振幅	262
§10.2 分波方法——分波与相移	264
1. 分波法的基本公式	264
2. 分波法的一些讨论	266
*3. 光学定理	267

§10.3 Green 函数方法与 Born 近似	268
1. Green 函数方法与势散射基本积分方程	268
2. 一阶 Born 近似	270
*3. Born 近似适用条件分析	271
4. 例算	272
§10.4 全同粒子散射	274
1. 全同性原理在散射问题上的应用	274
2. 例算	275
*§10.5 考虑自旋的散射	277
1. 散射分道概念	277
2. 分道散射振幅计算——考虑自旋的 Born 近似	277
3. 自旋散射的分道干涉与自旋权重平均	278
4. 例算	280
习题	285

第三部分 开放体系问题

第十一章 含时问题与量子跃迁	289
§11.1 含时 Schrödinger 方程求解一般讨论	289
1. 时间相关问题一般分析	289
2. 相互作用图像	291
3. 含时体系初始衰变率的一个普遍结论	292
*4. 衰变体系长期衰变规律的一个分析	293
*5. 量子 Zeno 效应, 存在性的理论论证	294
*6. 受迫振子计算	296
§11.2 时间相关微扰论与量子跃迁	298
1. 含时扰动及量子跃迁	298
2. 量子跃迁系数基本方程组及其一阶近似	299
§11.3 几种常见含时微扰的一阶近似计算	300
1. 常微扰	300
2. 周期微扰	301
§11.4 不撤除的微扰情况	302
1. 不撤除微扰	302
2. 特例之一——突发微扰	303
3. 特例之二——绝热微扰	304

4. 突发微扰和绝热微扰的一个比较	306
§11.5 光场与物质的相互作用	306
1. 概论	306
2. 受激原子的量子跃迁	307
3. 电偶极辐射	309
4. 自发辐射	311
*5. 受激氢原子的光电效应	313
习题	315
附录一 广义不确定性关系推导与分析	319
附录二 从杨氏双缝到 which way 及 qubit	323
附录三 量子测量的 von Neumann 模型	333
附录四 Dirac δ 函数	335
附录五 非惯性系量子力学	343
附录六 时间反演算符	346
名词索引	354