



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

# 量子场论

■ 周邦融 编著

## Quantum Field Theory



高等教育出版社  
Higher Education Press



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

# 量子场论

■ 周邦融 编著

## Quantum Field Theory



高等教育出版社  
Higher Education Press

## 内容简介

本书通过算符语言和正则量子化形式系统地阐述了量子场论的基本原理和方法,包括 Poincaré 不变的经典场论的一般论述,自由场和相互作用场的量子化,其中贯穿着连续和分立、时空与内部、整体和定域对称性的讨论。本书着重通过量子电动力学(QED)叙述了  $S$  矩阵和微扰论、Feynman 图技术及其物理应用,并通过时空维数正规化和 QED 单圈图重整化阐述了重整化的基本意义,包括 Ward 恒等式、跑动耦合常数以及辐射修正的物理效应,此外也论述了一个理论可重整化的一般判据以及近年来有关不可重整性与等效场论的新观点。

本书可作为物理学科研究生(及高年级本科生)量子场论的教材或参考书,也可供理论物理研究工作参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

量子场论/周邦融编著. —北京:高等教育出版社,  
2007.9

ISBN 978 - 7 - 04 - 022338 - 5

I. 量… II. 周… III. 量子场论 - 高等学校 -  
教材 IV. O413.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 124791 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010 - 58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京市大天乐印刷有限责任公司	畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787 × 1092 1/16	版 次	2007年9月第1版
印 张	17	印 次	2007年9月第1次印刷
字 数	300 000	定 价	28.30 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22338 - 00

## 中国科学院研究生院教材编审委员会

主任：白春礼

顾问：余翔林

副主任：马石庄（常务） 刘志鹏 韩兴国 苏刚

委员（以姓氏笔画为序）：

石耀霖 刘嘉麒 杨乐 李伯聪 李佩 李家春

吴向 汪尔康 汪寿阳 张文芝 张增顺 徐至展

黄荣辉 黄钧 阎保平 彭家贵 裴钢 谭铁牛

## 物理学科编审组

主编：李家春

副主编：苏刚

编委：丁亦兵 马中骐 邓祖淦 王鼎盛 叶甜春 李国华

张肇西 洪友士 赵刚 詹文山 詹明生

## 总序

---

在中国科学院研究生院和高等教育出版社的共同努力下，凝聚着中国科学院新老科学家、研究生导师们多年心血和汗水的中国科学院研究生院教材面世了。这套教材的出版，将对丰富我院研究生教育资源、提高研究生教育质量、培养更多高素质的科技人才起到积极的推动作用。

作为科技国家队，中国科学院肩负着面向国家战略需求，面向世界科学前沿，为国家作出基础性、战略性和前瞻性的重大科技创新贡献和培养高级科技人才的使命。中国科学院研究生教育是我国高等教育的重要组成部分，在新的历史时期，中国科学院研究生教育不仅要为我院知识创新工程提供人力资源保障，还担负着落实科教兴国战略和人才强国战略，为创新型国家建设培养一大批高素质人才的重要使命。

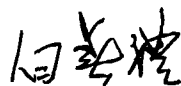
集成中国科学院的教学资源、科技资源和智力资源，中国科学院研究生院坚持教育与科研紧密结合的“两段式”培养模式，在突出科学教育和创新能力培养的同时，重视全面素质教育，倡导文理交融、理工结合，培养的研究生具有宽厚扎实的基础知识、敏锐的科学探索意识、活跃的思维和唯实、求真、协力、创新的良好素质。

研究生教材建设是研究生教育中重要的基础性工作。由一批活跃在科学前沿，同时又具有丰富教学经验的科学家编写的中国科

学院研究生院教材，适合在校研究生学习使用，也可作为高校教师和专业研究人员的参考书。这套研究生教材内容力求科学性、系统性、基础性和前沿性的统一，使学习者不仅能获得比较系统的科学基础知识，也能体会蕴于其中的科学精神、科学思想、科学方法，为进入科学研究的学术殿堂奠定良好的基础；优秀教材不但是体现教学内容和教学方法的知识载体、开展教学的基本条件和手段，也是深化教学改革、提高教育质量、促进科学教育与人文教育结合的重要保证。

“十年树木，百年树人”。我相信，经过若干年的努力，中国科学院研究生院一定能建设起多学科、多类型、多品种、多层次配套的研究生教材体系，为我国研究生教育百花园增添一枝新的奇葩，为我国高级科技人才的培养作出新的贡献。

中国科学院 常务副院长  
中国科学院研究生院 院长  
中国科学院 院士



二〇〇六年二月二十八日

# 前 言

---

量子场论是了解微观世界的最重要的理论工具之一，它不仅是高能物理(粒子物理)研究的必要手段，而且在其它物理学分支如统计物理、原子物理、核物理、凝聚态物理、天体物理和宇宙学中也得到越来越广泛的应用。量子场论的基本表述形式之一是算符语言和正则量子化，它不仅反映了传统量子力学到量子场论的发展历史，也是理解近代广泛使用的路径积分表示的基础。对于初步掌握量子力学和狭义相对论的读者来说，正则量子化方法是场论入门的捷径。本书的目的是为学习粒子物理学以及其它需要场论方法学科的研究生提供场的正则量子化方法的系统知识，也为他们进一步学习规范场论或凝聚态场论打下坚实的基础。

本书的内容包括 Poincaré 变换下不变的经典场论概述，自由场和相互作用场的正则量子化，其中贯穿着连续和分立、时空与内部、整体和定域对称性的讨论。本书着重通过量子电动力学(QED)讨论了  $S$  矩阵和微扰论、Feynman 图技术及其物理应用，并通过 QED 单圈图重整化阐述了重整化的基本概念和操作，Ward 恒等式、跑动耦合常数以及辐射修正的意义，最后论述了一个理论可重整化的一般判据以及近年来有关不可重整性与等效场论的新观点。

作为量子场论的入门教材，本书主要阐述正则量子化形式，未包括路径积分子量子化和非阿贝尔规范场的内容。限于篇幅，也未涉及对称性的自发破缺和超对称性等。

本书的编著主要参考了 20 世纪后期世界知名的量子场论著作，包括 60 年代的 Bjorken - Drell 和 Lurie, 80 年代的 Itzykson - Zuber 和李政道, 80—90 年代的 Ramond, 90 年代的 Weinberg 和 Peskin - Schroder 等人所写的书，但内容自成体系。由于主要目的在于阐述量子场论的基本原理，所以除了关系到场论发展的一些先驱性思想和结果之外，本书不求对原始文献的详细引用。更多的原始文献出处可以在作为主要参考文献的上述著作中找到。

考虑到今天的量子场论已经在传统的正则量子化的基础上有了很大的发展，所以在内容的选编上，在保持基本的经典性论述的基础上，也尽量加入了一些更现代的未

语、表述形式和内容。例如对于 Poincaré 不变经典场论的一般讨论以及对于具体场论的经典和正则量子化描述,都是以泛函作用量和拉氏函数为基本出发点的。对于现代场论的本质要素——对称性——的讨论则同样在作用量语言的基础上贯彻始终,其中包括通过定域规范不变性引入了电磁场作为  $U(1)$  规范场的概念;在 QED 重整化的论述中,采用了现代的圈图展开概念和维数正规化方法并讨论了最小减除和跑动耦合常数等。这些内容和表达形式也将使本书更容易与场论的路径积分量子化、非 Abel 规范场论和一般的重整化群理论接轨。

在适应理论的现代表述的同时,本书也努力使之容易被初学者所接受。例如,通过熟知的一维谐振子的正则量子化向场的过渡,阐明了量子场论本质上是量子力学向无穷大、连续自由度系统的推广。在叙述 Lorentz 变换和 Poincaré 变换时尽量少用群论的专门术语,而主要是使用大学生熟悉的线性变换和量子力学的语言。旋量场的概念不是从 Lorentz 群表示的角度而是先从 Dirac 方程的解导出其 Lorentz 变换形式,然后再作严格定义。这对于尚未学习连续群的读者来说,能够免受过多专门数学概念的困扰而更快地进入场论的实质内容。此外,目录中打 \* 号的内容是可选择的,跳过它们不会影响对本书主线内容的理解。

量子场论是一门技术性很强的理论学科。为了对初学者有所帮助,附录中详细给出了正文中比较复杂的数学推导。在各章节后都附有难度不等的习题(其中打 \* 号的是难度较大或更具选择性的题目),努力完成它们无疑能够加强对基本知识和数学技巧的掌握。

本书可以作为研究生量子场论课程的教材,对硕士生和博士生可以有不同的要求。经适当删节后,也可作为大学高年级量子场论的入门教材和参考书。本书也可供理论物理研究工作者参考。

本书多年来一直作为原中国科学技术大学研究生院(北京)和现中国科学院研究生院量子场论课程的教材。勤奋好学的研究生们在学习过程中所提出的一些有启发性的问题以及有益的建议,对于完善和改进本书起过很好的作用,作者对他们表示由衷的感谢。

周邦融  
2007年4月



# 标记和符号

## 1. 度规、坐标和动量

四维 Minkowski(闵氏)时空的度规张量

$$g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

时空坐标  $(t, \vec{x})$  表为逆变四矢量

$$x^\mu = (x^0, x^1, x^2, x^3) \equiv (x^0, \vec{x}) = (t, \vec{x})$$

协变四矢量  $x_\mu$  由改变空间分量的符号得到

$$x_\mu = (x_0, x_i) = (x^0, -x^i) = g_{\mu\nu} x^\nu = (t, -\vec{x}) \equiv \tilde{x}^\mu$$

除非特别声明,重复指标意味着求和. 要求和的两个相同指标必须是一个上标,一个下标;若二者同在上或同在下,则是错的. 内积为  $x^2 = x_\mu x^\mu = t^2 - \vec{x}^2$ .

对坐标的微商算符

$$\partial_\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x^\mu} = (\partial_0, \partial_i) = \left( \frac{\partial}{\partial t}, \nabla_i \right)$$

$$\partial^\mu \equiv \frac{\partial}{\partial x_\mu} = (\partial^0, \partial^i) = (\partial_0, -\partial_i) = \left( \frac{\partial}{\partial t}, -\nabla_i \right)$$

达朗贝尔算子

$$\square \equiv \partial_\mu \partial^\mu = \partial_0^2 - \nabla^2$$

四动量算符

$$p^\mu = i\partial^\mu = (i\partial^0, i\partial^i) = \left( i \frac{\partial}{\partial t}, -i \nabla_i \right) = (p^0, p^i) = (p^0, \vec{p})$$

$$p_\mu = g_{\mu\nu} p^\nu = (p^0, -\vec{p}) \equiv \tilde{p}^\mu$$

坐标和动量四矢量的标量积

$$x \cdot p \equiv x^\mu p_\mu = x^0 p^0 - x^i p^i = x^0 p^0 - \vec{x} \cdot \vec{p}$$

对任意四矢量  $V^\mu = (V^0, V^i) = (V^0, \vec{V})$  和  $W^\mu = (W^0, W^i) = (W^0, \vec{W})$ , 有

$$V_\mu = g_{\mu\nu} V^\nu, \quad W_\mu = g_{\mu\nu} W^\nu$$

标量积

$$V \cdot W \equiv V^\mu W_\mu = V^0 W^0 - V^i W^i = V^0 W^0 - \vec{V} \cdot \vec{W}$$

任何量上方加一点表示对时间求微商即  $\dot{a} \equiv \partial a / \partial t$ , 任何量加上标 \* 表示复共轭, 加上标 + 表示厄密共轭.

四维闵氏时空的坐标积分测度  $d^4x = dx^0 dx^1 dx^2 dx^3$ , 动量积分测度  $d^4p = dp^0 dp^1 dp^2 dp^3$ .

### 2. $\gamma$ 矩阵

矩阵  $\gamma^\mu = (\gamma^0, \gamma^i) = (\gamma^0, \vec{\gamma})$  满足反对易关系

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = \gamma^\mu \gamma^\nu + \gamma^\nu \gamma^\mu = 2g^{\mu\nu}$$

$$\gamma^{0+} = \gamma^0 \text{ (厄密)}, \quad \gamma^{i+} = -\gamma^i \text{ (反厄密)}$$

与  $\bar{\alpha}, \beta$  矩阵的关系是

$$\vec{\gamma} = \beta \bar{\alpha}, \quad \gamma^0 = \beta$$

$\gamma_5$  矩阵:

$$\gamma_5 = \gamma^5 \equiv i\gamma^0 \gamma^1 \gamma^2 \gamma^3 = -\frac{i}{4!} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \gamma^\mu \gamma^\nu \gamma^\rho \gamma^\sigma = \gamma_5^+$$

$$\gamma_5^2 = I, \quad \{\gamma_5, \gamma^\mu\} = 0$$

其中四阶全反对称张量

$$\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} = \begin{cases} +1 & \text{(当 } \mu\nu\rho\sigma \text{ 是 } 0123 \text{ 的偶置换)} \\ -1 & \text{(当 } \mu\nu\rho\sigma \text{ 是 } 0123 \text{ 的奇置换)} \\ 0 & \text{(其它情况)} \end{cases}$$

$$\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} = -\varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma}$$

Dirac 表象:

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix}, \quad \gamma^i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix}$$

其中

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{和} \quad \sigma^1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

分别为  $2 \times 2$  单位矩阵和泡利矩阵.

电荷共轭矩阵:

$$C = i\gamma^2 \gamma^0$$

满足

$$C\gamma_\mu^T C^{-1} = -\gamma_\mu, \quad C\gamma_5^T C^{-1} = \gamma_5, \quad C^{-1} = C^T = C^+ = -C$$

其中 T 表示矩阵的转置.

$\gamma^\mu$  与矢量  $a^\mu$  的标量积记为  $a = \gamma^\mu a_\mu$ , 例如  $\not{a} = \gamma^\mu a_\mu$ .

### 3. 符号

$I$	作用量
$\mathcal{L} \equiv \mathcal{L}(x)$	拉格朗日函数密度(拉氏密度)
$\Lambda^\mu_\nu$	Lorentz 变换矩阵元
$S(\Lambda)$	Dirac 旋量的 Lorentz 变换矩阵
$M_{\mu\nu}$	SO(3,1) 代数生成元
$P_\mu$	时空平移生成元
$W^\mu = -\frac{1}{2}\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma}M_{\nu\rho}P_\sigma$	Pauli-Lubanski 四矢量
$\varphi(x)$	标量场
$A^\mu(x)$	矢量场
$\psi(x)$	旋量场
$\psi_L(x)$	左手旋量场
$\psi_R(x)$	右手旋量场
tr	旋量空间中矩阵的迹
$F^{\mu\nu}(x) = \partial^\mu A^\nu(x) - \partial^\nu A^\mu(x)$	电磁场强张量
$\mathcal{D}_\mu = \partial_\mu + ieA_\mu$	协变微商
$\lambda$	规范参数
:	正规乘积
$TA(x_1)B(x_2)\dots$	编时乘积
$\overline{\varphi(x_1)}\varphi(x_2)$	场算符的收缩
$\Phi^{(+)}(x)$	场 $\Phi(x)$ 的正频部分
$\Phi^{(-)}(x)$	场 $\Phi(x)$ 的负频部分
$H$	哈密顿量
$\mathcal{H} \equiv \mathcal{H}(x)$	哈密顿函数密度(哈氏密度)
$G$	Fermi 常数
$\alpha = e^2/4\pi$	精细结构常数
$\mathcal{P}$	宇称算符
$\mathcal{C}$	电荷共轭算符
$\mathcal{T}$	时间反演算符
$\langle f S i\rangle$	S 矩阵元
$\Pi^{\mu\nu}(k)$	真空极化张量
$\Sigma(p)$	电子自能函数

$$\Lambda_\mu = \gamma_\mu + \Gamma_\mu$$

$\Gamma$

$\tau$

$d\sigma$

$\Omega(G)$

$\delta m$

$Z_3$

$Z_2$

$Z_1$

顶角函数

衰变几率

衰变寿命

微分截面

表观发散度

质量抵消项重整化常数

光子动能项重整化常数

电子动能项重整化常数

顶角重整化常数

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010)58581897/58581896/58581879

**传 真：**(010)82086060

**E - mail：**dd@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

**邮 编：**100011

**购书请拨打电话：**(010)58581118

**策划编辑** 王 超

**责任编辑** 王文颖

**封面设计** 杨立新

**责任绘图** 吴文信

**版式设计** 马静如

**责任校对** 张 颖

**责任印制** 宋克学

# 目 录

标记和符号 .....	I
第 1 章 引言 .....	1
相对论单粒子波动方程. 负能解和负几率. 场方程解释和场量子化. 定域场.	
第 2 章 经典场 .....	6
2.1 作用量 .....	6
经典粒子力学的变分原理. 对称性与守恒定律.	
2.2 Lorentz 变换和 Poincaré 变换 .....	8
2.2.1 Lorentz 变换 .....	8
定义和分类. 生成元和 $SO(3,1)$ 代数. 转动和平动.	
2.2.2 Poincaré 变换 .....	13
平移生成元. Poincaré 代数. Pauli - Lubanski 四矢量. Poincaré 群的表示*.	
2.3 定域场的 Poincaré 变换性质 .....	17
标量场、矢量场和张量场. Dirac 旋量场. 旋量场双线性量. Weyl 和 Majorana 旋量.	
2.4 场作用量、最小作用原理和 Noether 定理 .....	25
Euler - Lagrange 方程. 守恒流与守恒荷.	
2.5 0 自旋场 .....	31
四动量和广义角动量. $O(N)$ 内部对称性*.	
2.6 自旋 1/2 的场 .....	34
2.6.1 作用量、运动方程和守恒量 .....	34
四动量和广义角动量. $U(1)$ 相位不变性.	

2.6.2	平面波解、投影算符 .....	35
	正能解和负能解. 正能和负能投影算符. 自旋算符.	
2.6.3	零质量粒子 .....	41
	手征对称性. 手征性与 helicity. 平面波解. 两分量旋量场*.	
2.7	Maxwell 场 .....	45
	规范变换. Lorentz 条件. 四动量和广义角动量.	
<b>第 3 章 场的正则量子化</b> .....		<b>50</b>
3.1	正则形式与粒子力学的量子化 .....	50
	一维谐振子的正则量子化. Hilbert 空间.	
3.2	场的正则量子化——一般表述 .....	54
	坐标空间分立化. 共轭动量和量子化. 量子化和 Poincaré 不变性	
3.3	Klein - Gordon 场的正则量子化 .....	59
3.3.1	实标量场的量子化与粒子解释 .....	59
	平面波展开. LT 不变的积分测度. 动量空间分立化与场量子化的 谐振子等价. 真空. 产生与消灭算符. Fock 空间. 对称态与 Bose - Einstein 统计.	
3.3.2	场的可测性与微观因果性 .....	66
	非等时对易子. 类空对易性与微观因果性条件.	
3.3.3	复标量场与正反粒子 .....	67
	U(1) 对称性. 守恒荷. 粒子与反粒子.	
3.3.4	编时乘积与 Feynman 传播子 .....	70
3.4	Maxwell 场的正则量子化 .....	72
3.4.1	不定度规 .....	73
	Gupta - Bleuler 量子化. 不定度规的 Fock 空间和物理的 Hilbert 空 间. 横光子.	
3.4.2	传播子 .....	80
	Feynman 规范传播子.	
3.5	Dirac 场的正则量子化 .....	81
3.5.1	反对易子 .....	81
	反对易性与真空的稳定性. 从 Poincaré 不变性导出反对易关系. 等 时反对易子.	
3.5.2	Fermions 的 Fock 空间 .....	84
	Fermion 数和自旋. 反对称态与 Fermi - Dirac 统计.	
3.5.3	自旋与统计间的关系、传播子 .....	89
	相对论定域场所包含的自旋 - 统计关系.	
3.6	分立对称性 .....	92

3.6.1	宇称.....	92
	量子场的 $\mathcal{P}$ 变换. 内禀宇称, $\mathcal{P}$ 不变性. 算符 $\mathcal{P}$ 的构造*.	
3.6.2	电荷共轭.....	98
	正反粒子变换. 量子场的 $\mathcal{C}$ 变换. $\mathcal{C}$ 不变性. 算符 $\mathcal{C}$ 的构造*.	
3.6.3	时间反演.....	101
	量子场的 $\mathcal{T}$ 变换. $\mathcal{T}$ 不变性和反么正算符.	
<b>第4章</b>	<b>相互作用量子场</b> .....	<b>105</b>
4.1	定域对称性与U(1)规范场.....	105
	协变微商与U(1)规范不变性. 电磁场本质为U(1)规范场.	
4.2	电磁作用.....	107
	自旋1/2场的最小电磁耦合. 相互作用场的正规乘积.	
4.3	非电磁作用.....	112
4.3.1	$\pi$ -N唯象强作用.....	112
	$\pi^0$ -N Yukawa 耦合. 同位旋SU(2)不变耦合*. 电荷守恒与重子数守恒*.	
4.3.2	低能唯象弱作用.....	117
	纯轻子弱作用. 半轻子弱作用*. 无轻子弱作用*.	
4.4	分立对称性和PCT定理.....	120
4.4.1	相互作用场的 $\mathcal{P}, \mathcal{C}, \mathcal{T}$ 变换.....	120
	旋量场最小电磁耦合. 算符 $\mathcal{P}, \mathcal{C}, \mathcal{T}$ 的构造*.	
4.4.2	PCT定理.....	122
	相互作用的Klein-Gordon场、Maxwell场和Dirac场的 $\mathcal{I} = \mathcal{PCT}$ 变换. 旋量场双线性量的 $\mathcal{I}$ 变换. 作用量和等时对易/反对易子的 $\mathcal{I}$ 不变性.	
<b>第5章</b>	<b>S矩阵和微扰论</b> .....	<b>127</b>
5.1	相互作用图像、U矩阵和S矩阵.....	127
	态与算符的运动方程.U矩阵与态的时间演化. 么正性.S矩阵的存在性与粒子的物理质量.	
5.2	微扰展开.....	132
	S矩阵的微扰展开级数. 物理的单粒子态.QED.	
5.3	Wick定理.....	136
	算符的收缩.Wick定理的数学归纳法证明.	
5.4	Feynman图——QED.....	141
5.4.1	QED S矩阵的正规乘积分解.....	141
	至二级的非零收缩项.	



5.4.2	$S$ 矩阵元 .....	143
	一级正规乘积, 四动量守恒与质壳条件的不相容, 二级正规乘积.	
5.4.3	物理过程的二级 $S$ 矩阵元举例 .....	146
	$e^- - e^+$ 散射, 光子自能跃迁.	
5.4.4	QED Feynman 规则 .....	148
	拓扑权因子, 树图和圈图.	
5.4.5	电子和光子的自能跃迁 .....	153
	电子质量重整化, 正规化与减除, 电磁流守恒保证光子的自能跃迁 矩阵元为零.	
5.4.6	真空-真空跃迁 .....	156
	真空图的可忽略性, 不连接图.	
5.4.7	电子与外电磁场的相互作用 .....	158
	作用顶角, 外加真空图, 真空极化效应与电磁流守恒.	
5.5	含标量粒子的 Feynman 规则 .....	160
5.5.1	实标量场 $\lambda\phi^4$ 耦合 .....	160
	非平凡的拓扑权因子.	
5.5.2	$\pi - N$ Yukawa 耦合 .....	163
	$\pi^0 - N$ 顶角, $\pi^- - N$ 顶角和介子内线*.	
5.6	截面与寿命 .....	165
	$S$ 矩阵元和跃迁几率, 粒子相空间中的态计数, 极化与不极化的截 面与寿命公式.	
5.7	应用举例 .....	170
5.7.1	一些有用的公式 .....	170
	$\gamma$ 矩阵的求迹和有关运算.	
5.7.2	Compton 散射截面 .....	172
	$S$ 矩阵元, 微分截面, 振幅计算, 自旋求和, 总截面.	
5.7.3	$\mu$ 衰变寿命 .....	178
	$S$ 矩阵元, 振幅计算, 中微子和电子动量积分, 衰变寿命.	
第 6 章	重整化 .....	182
6.1	圈图展开 .....	183
	等同于按 $\hbar$ 幂次的展开, 连接的 Green 函数.	
6.2	QED 单圈图重整化——维数正规化方法 .....	184
6.2.1	真空极化 .....	185
	真空极化张量, 维数正规化操作, 电磁流守恒与光子质量恒为零, 减 除与重整化的电荷, 重整化的裸参数观点.	
6.2.2	电子传播子 .....	196