

加速器物理学

第二版

S. Y. Lee



复旦大学出版社



数据加载失败，请稍后重试！

研究生前沿教材书系

Accelerator Physics

(2nd Edition)

加速器物理学

(第二版)

(英文影印版)

S.Y.Lee

(*Indiana University, USA*)

S. Y. Lee

美国印第安纳大学教授、美国物理学会集束物理学分会 (Division of Physics of Beams) 会员。长期从事加速器物理的教学和研究工作。研究工作包括集束冷却技术,集束的非线性动力学特征,同步辐射的自旋动力学,空间电荷对集束性能的影响,加速器设计原理,电子存储环的设计,集束不稳定的原因,自由电子激光器,集束的控制原理和技术,加速器的应用。多年来除了给本科生讲授加速器物理和辅导加速器实验之外,主要负责研究生的教学工作。

曾担任美国粒子加速器学院 (The United States Particle Accelerator School) 院长,美国物理学会集束分会经济委员会成员,物理学会提名委员会成员,粒子加速器理事会项目评估委员会成员。

出版著作有: *Accelerator Physics*、*Spin Dynamics and Snakes in Synchrotrons*, *Space Charge Dominated Beams and Applications of High Brightness Beams*, *Beam Measurement* 等。

内 容 简 介

这本教科书是作者根据自己在印第安纳大学给研究生讲授《加速器物理学》的上课笔记和给美国粒子加速器学院讲授的两门课的相关讲稿基础上写成的。自 1999 年第一版问世以来,被广泛用作教材。第二版除了对原书作必要的修改之外,增补了自由电子激光器(FEL)和束线-束线相互作用的第五章。

加速器物理学是一门高度综合的课程,涉及荷电粒子在特殊设计的电磁场中运动并形成特殊用途束线的物理原理和技术应用的各个领域。本书第一章介绍各种类型加速器的基本原理和发展历史;第二章讲述回旋加速器的横向运动及其物理处理方法;第三章介绍同步辐射加速器和线型加速器的原理和设计方法;第四章讲述同步辐射现象和低辐射电子存储环的设计原理。全书的最后部分,提出了开发第四代光源的前景。

全书在每节末尾都专门设计了练习题,为了使解题变得较为容易,作者有意把题目细分为很多小题。这些题目的解题思路和最终结果除了使读者深入了解基本原理之外,还可使读者直接进入相关的设计领域。

序 言

自 1999 年本书第一版出版以来,就一直被用作研究生水平的《加速器物理学》这门课的教材或教学参考书。来自同行和学生的质疑、批评和建议,使我受益匪浅。作为对有关建议的回应,在这次修订中,我采取了更易理解的表述方式并增加插图。

加速器物理学主要研究荷电粒子与电磁场的相互作用。加速器的应用几乎包括科学、技术、医学诊断、工业加工等等所有的领域。加速器科学家就是为了满足各种应用的特殊需求,发明出很多能够产生很优质束流的新颖的技术。

这本教科书是为已读过经典力学、电动力学、量子力学和统计力学等核心课程的研究生准备的。我将尽量减小数学的难度,把重点放在创新思想背后的基础物理上。这本教科书对学完了经典力学和电磁学的高年级大学生同样适用。对加速器物理的入门者来说,可从第二章的 2.1 节至 2.4 节入手,再读回旋运动和同步运动基础的 3.1 节至 3.2 节。接下去再读关于色差和集束不稳定性的 2.5 节、2.8 节和 3.7 节。读完这些小节的基础专题之后,再读第三章的 3.5 节、3.6 节、3.8 节所涉及的射频(RF)技术和线型加速器的基础物理。通常情况最基础的加速器物理课程到第四章电子存储环物理一节结束为止。

我采用了 Frenet-Serret 坐标系($\hat{x}, \hat{s}, \hat{z}$)来表示横向、纵向的径向出射方向,以及由右手规则形成的垂直方向的单位基矢: $\hat{z} = \hat{x} \times \hat{s}$ 。第二章各节中,除了(2.20)式讨论到 $\pm$ 号以外,我在推导回旋加速器的运动方程时,电荷都采用正号。如果你想求解加速器中电子的运动方程,那么 Hill 方程中有些项的正负号就要跟着变更。

根据线型加速器和同步辐射加速器的行业规定,两者的射频相

相差 $\frac{\pi}{2}: \phi_{\text{线型}} = \phi_{\text{同步}} - (\pi/2)$ 。为了与第三章的同步运动保持一致,我用同步辐射行业规范的射频相来描述 3.3 节的线型加速器的同步加速器方程。

这次修订中,又增补了自由电子激光器(FEL)和束线-束线相互作用两个专题(第五章)。2000 年,成功地演示了自放大自发辐射(SASE)的 FEL 的实验,许多光源实验室相继在 SASE 和高增益谐振发生器(HGHG)的概念基础上,提出开展第四代光源的研究工作。同样,高亮度 B 因子的成功,指出束线-束线相互作用在基础加速器物理的研究中仍然十分重要。这些活跃的研究工作,说明在加速器物理的教科书中补充这两个导介性的专题是恰当的。

最后,设计了一些求解特殊问题的家庭作业,为了减少解题中的难度,题目又细分为很多步骤。题目的答案往往就在每道作业的最后一步中出现,计算结果可用于加速器系统的实际设计工作中。我将非常感谢读者能对这一修订版再次提出评论和批评。

S. Y. Lee

Bloomington, Indiana, U. S. A.

2004 年 11 月

第一版序言

高能加速器的发展开始于 1911 年,亦即 Rutherford 发现原子核的时候。从此之后,高压直流和射频加速器建立起来了,具有很高场质量的强场磁体也获得了,束线的横向和纵向的聚焦原理也发现了,高强度射频源也发明出来了,高真空技术有了长足发展,高强度(极化/非极向)的电子/离子源也得到了。此外,束线动力学和束线调控办法也发展得很快,如束线的注入、束线的集聚、束线的慢压缩和快压缩、束线的阻尼和束线的冷却、束线的不稳定反馈机制等都取得了重大的进展。加速器的发展,对粒子物理和核物理,对原子物理和分子物理,对凝聚态物理、生物物理、医学卫生、生物学和工业加工等诸多领域的大量突破性发现的影响是很明显的。

加速器物理和技术是一个逐步壮大的科学分支。随着技术的不断进步,集束物理学研究使加速器的性能不断提高。II 类超导材料的进步促使强场磁体的发展。对撞机概念的发明开启了单粒子束和多粒子束动力学的研究和发展的前程。现在加速器的发展已经相当完善了。1930 年代,高能的测量单位是 MeV,1950 年代是 GeV,1990 年代已是 TeV 的好多倍了。未来的几十年里,质心能量甚至会达到 $10 \sim 100\text{TeV}$ 。1950 年代,每个脉冲强度含 10^9 个粒子。现在,AGS 的强度已经达到 6×10^{13} 个质子/脉冲。我们正在探索每束强度达到 10^{14} 个质子的应用前景。20 世纪 70 年代,第一代同步辐射光源的同步辐射亮度大约是 10^{12} 个光子/ $[\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 0.1\% (\Delta\lambda/\lambda)]$ 。现在亮度已达 10^{21} 个光子,经过努力,许多自由电子激光器(FEL)的研究目标已瞄准亮度为 $10^{29} \sim 10^{34}$ 个光子。

这本教科书阐述的是基础加速器物理学,它是根据我在印第安纳大学给加速器物理研究生的讲课笔记和给美国粒子加速器学院

讲学的两门课的讲稿基础上写成的。这些素材,曾被用于 Indiana 大学加速器物理本科生从事毕业论文研究的预备性教材。本书共分四章,第一章讲述加速器发展的历史概况。第二章处理回旋加速器中的横向运动。第三章涉及同步运动,并对线型加速器作介绍。第四章讲述同步辐射现象和低辐射电子存储环的基本设计原理。由于本书是一本讲述基础加速器物理的教科书,诸如非线性集束动力学、集束的不稳定性等等专题,只是在第二、三章中简单地提了一下。

本书的注意力集中在推导相空间坐标的作用角变量,因为在理解集束不稳定现象和集束非线性动力学中,变换是基础,概念是根本。在同步加速器的设计中,弥散函数在粒子稳定性、集束性能和集束传送中的作用是十分重要的。第二章专门有很长的一节讨论弥散函数。这个函数在设计低辐射存储环串列中的作用同样是很重要的。

本书自始至终都采用 SI 单位制,我还使用工程上的习惯,用 $j = -i$ 来表示虚数。每节都安排一定的练习,让学生使用专门的技巧求解加速器物理的问题。通过将每道题分解为很多步的办法,使求解变得容易起来。

加速器物理和技术,关系到很多学科领域,本书中对很多相关的学科都未作全面讨论:如线型加速器、感应式线型加速器、高亮度集束、集束不稳定性、非线性动力学、集束冷却物理学和技术、线型对撞机物理学、自由电子激光器、电子和离子源、散裂中子源、介子对撞机、高强度集束、真空技术、超导电性、磁体技术、仪器设备等等。不管怎么说,本书对基础加速器物理的理解为加速器物理和技术研究奠定了不可或缺的基础。

S. Y. Lee

Bloomington, Indiana, U. S. A.

1998 年 1 月

Contents

Preface	vii
Preface to the first edition	ix
1 Introduction	1
I Historical Developments	4
I.1 Natural Accelerators	5
I.2 Electrostatic Accelerators	6
I.3 Induction Accelerators	6
I.4 Radio-Frequency (RF) Accelerators	9
I.5 Colliders and Storage Rings	17
I.6 Synchrotron Radiation Storage Rings	18
II Layout and Components of Accelerators	19
II.1 Acceleration Cavities	19
II.2 Accelerator Magnets	20
II.3 Other Important Components	22
III Accelerator Applications	23
III.1 High Energy and Nuclear Physics	23
III.2 Solid-State and Condensed-Matter Physics	24
III.3 Other Applications	24
Exercise	24
2 Transverse Motion	35
I Hamiltonian for Particle Motion in Accelerators	36
I.1 Hamiltonian in Frenet-Serret Coordinate System	37
I.2 Magnetic Field in Frenet-Serret Coordinate System	39
I.3 Equation of Betatron Motion	41
I.4 Particle Motion in Dipole and Quadrupole Magnets	41
Exercise	42
II Linear Betatron Motion	47
II.1 Transfer Matrix and Stability of Betatron Motion	47
II.2 Courant–Snyder Parametrization	51
II.3 Floquet Transformation	52

II.4	Action-Angle Variable and Floquet Transformation	57
II.5	Courant–Snyder Invariant and Emittance	60
II.6	Stability of Betatron Motion: A FODO Cell Example	65
II.7	Symplectic Condition	66
II.8	Effect of Space-Charge Force on Betatron Motion	67
	Exercise	73
III	Effect of Linear Magnet Imperfections	85
III.1	Closed-Orbit Distortion due to Dipole Field Errors	85
III.2	Extended Matrix Method for the Closed Orbit	91
III.3	Application of Dipole Field Error	92
III.4	Quadrupole Field (Gradient) Errors	101
III.5	Basic Beam Observation of Transverse Motion	105
III.6	Application of quadrupole field error	108
III.7	Transverse Spectra	110
III.8	Beam Injection and Extraction	115
III.9	Mechanisms of emittance dilution and diffusion	117
	Exercise	121
IV	Off-Momentum Orbit	129
IV.1	Dispersion Function	129
IV.2	$\mathcal{H}$ -Function, Action, and Integral Representation	133
IV.3	Momentum Compaction Factor	136
IV.4	Dispersion Suppression and Dispersion Matching	139
IV.5	Achromat Transport Systems	141
IV.6	Transport Notation	143
IV.7	Experimental Measurements of Dispersion Function	145
IV.8	Transition Energy Manipulation	146
	A. γ_T jump schemes	146
	B. Flexible momentum compaction (FMC) lattices	149
	C. Other similar FMC modules	155
	D. FMC in double-bend (DB) lattices	156
IV.9	Minimum $\langle \mathcal{H} \rangle$ Modules	157
	Exercise	161
V	Chromatic Aberration	172
V.1	Chromaticity Measurement and Correction	173
V.2	Nonlinear Effects of Chromatic Sextupoles	178
V.3	Chromatic Aberration and Correction	178
V.4	Lattice Design Strategy	183
	Exercise	184
VI	Linear Coupling	186
VI.1	The Linear Coupling Hamiltonian	186
VI.2	Effects of an isolated Linear Coupling Resonance	189
VI.3	Experimental Measurement of Linear Coupling	193

VI.4	Linear Coupling Correction with Skew Quadrupoles	196
VI.5	Linear Coupling Using Transfer Matrix Formalism	197
	Exercise	197
VII	Nonlinear Resonances	202
VII.1	Nonlinear Resonances Driven by Sextupoles	202
VII.2	Higher-Order Resonances	209
VII.3	Nonlinear Detuning from Sextupoles	211
VII.4	Betatron Tunes and Nonlinear Resonances	212
	Exercise	213
VIII	Collective Instabilities and Landau Damping	216
VIII.1	Impedance	216
VIII.2	Transverse Wave Modes	220
VIII.3	Effect of Wakefield on Transverse Wave	221
VIII.4	Frequency Spread and Landau Damping	225
	Exercise	228
IX	Synchro-Betatron Hamiltonian	232
	Exercise	237
3	Synchrotron Motion	239
I	Longitudinal Equation of Motion	240
I.1	The Synchrotron Hamiltonian	244
I.2	The Synchrotron Mapping Equation	245
I.3	Evolution of Synchrotron Phase-Space Ellipse	246
I.4	Some Practical Examples	247
I.5	Summary of Synchrotron Equations of Motion	248
	Exercise	249
II	Adiabatic Synchrotron Motion	251
II.1	Fixed Points	252
II.2	Bucket Area	253
II.3	Small-Amplitude Oscillations and Bunch Area	255
II.4	Small-Amplitude Synchrotron Motion at the UFP	258
II.5	Synchrotron Motion for Large-Amplitude Particles	259
II.6	Experimental Tracking of Synchrotron Motion	261
	Exercise	263
III	RF Phase and Voltage Modulations	268
III.1	Normalized Phase-Space Coordinates	268
III.2	RF Phase Modulation and Parametric Resonances	271
III.3	Measurements of Synchrotron Phase Modulation	277
III.4	Effects of Dipole Field Modulation	280
III.5	RF Voltage Modulation	288
III.6	Measurement of RF Voltage Modulation	295
	Exercise	297

- IV Nonadiabatic and Nonlinear Synchrotron Motion 301
 - IV.1 Linear Synchrotron Motion Near Transition Energy 302
 - IV.2 Nonlinear Synchrotron Motion at $\gamma \approx \gamma_T$ 305
 - IV.3 Beam Manipulation Near Transition Energy 308
 - IV.4 Synchrotron Motion with Nonlinear Phase Slip Factor 309
 - IV.5 The QI Dynamical Systems 312
 - Exercise 315
- V Beam Manipulation in Synchrotron Phase Space 317
 - V.1 RF Frequency Requirements 318
 - V.2 Capture and Acceleration of Proton and Ion Beams 320
 - V.3 Bunch Compression and Rotation 322
 - V.4 Debunching 326
 - V.5 Beam Stacking and Phase Displacement Acceleration 326
 - V.6 Double rf Systems 327
 - V.7 The Barrier RF Bucket 334
 - Exercise 340
- VI Fundamentals of RF Systems 343
 - VI.1 Pillbox Cavity 343
 - VI.2 Low Frequency Coaxial Cavities 345
 - VI.3 Beam Loading 353
 - VI.4 Beam Loading Compensation and Robinson Instability 356
 - Exercise 359
- VII Longitudinal Collective Instabilities 362
 - VII.1 Longitudinal Spectra 363
 - VII.2 Collective Microwave Instability in Coasting Beams 367
 - VII.3 Longitudinal Impedance 369
 - VII.4 Microwave Single Bunch Instability 373
 - Exercise 381
- VIII Introduction to Linear Accelerators 383
 - VIII.1 Historical Milestones 383
 - VIII.2 Fundamental Properties of Accelerating Structures 387
 - A. Transit time factor 387
 - B. Shunt impedance 388
 - C. The quality factor Q 388
 - VIII.3 Particle Acceleration by EM Waves 389
 - A. EM waves in a cylindrical wave guide 390
 - B. Phase velocity and group velocity 391
 - C. TM modes in a cylindrical pillbox cavity 392
 - D. Alvarez structure 395
 - E. Loaded wave guide chain and the space harmonics 396
 - F. Standing wave, traveling wave, and coupled cavity linacs 399
 - G. HOMs 401

VIII.4	Longitudinal Particle Dynamics in a Linac	402
VIII.5	Transverse Beam Dynamics in a Linac	407
	Exercise	410
4	Physics of Electron Storage Rings	417
I	Fields of a Moving Charged Particle	422
I.1	Non-relativistic Reduction	424
I.2	Radiation Field for Particles at Relativistic Velocities	424
I.3	Frequency and Angular Distribution	427
I.4	Quantum Fluctuation	433
	Exercise	435
II	Radiation Damping and Excitation	437
II.1	Damping of Synchrotron Motion	438
II.2	Damping of Betatron Motion	441
II.3	Damping Rate Adjustment	445
II.4	Radiation Excitation and Equilibrium Energy Spread	448
II.5	Radial Bunch Width and Distribution Function	453
II.6	Vertical Beam Width	455
II.7	Radiation Integrals	456
II.8	Beam Lifetime	456
	Exercise	462
III	Emittance in Electron Storage Rings	466
III.1	Emittance of Synchrotron Radiation Lattices	467
	A. FODO cell lattice	467
	B. Double-bend achromat (Chasman-Green lattice)	469
	C. Minimum $\langle \mathcal{H} \rangle$ -function lattice	473
	D. Minimizing emittance in a combined function DBA	475
	E. Three-bend achromat	476
III.2	Insertion Devices	478
III.3	Beam Physics of High Brightness Storage Rings	486
	Exercise	489
5	Special Topics in Beam Physics	497
I	Free Electron Laser (FEL)	498
I.1	Small Signal Regime	500
I.2	Interaction of the Radiation Field with the Beam	506
I.3	Experiments on High Gain FEL Generation	509
	Exercise	510
II	Beam-Beam Interaction	513
II.1	The beam-beam force	517
II.2	The Coherent Beam-Beam Effects	519
II.3	Nonlinear Beam-Beam Effects	521

II.4	Experimental Observations and Numerical Simulations	522
II.5	Beam-Beam Interaction in Linear Colliders	525
	Exercise	527
A Basics of Classical Mechanics		533
I	Hamiltonian Dynamics	533
I.1	Canonical Transformations	533
I.2	Fixed Points	534
I.3	Poisson Bracket	534
I.4	Liouville Theorem	535
I.5	Floquet Theorem	536
II	Stochastic Beam Dynamics	537
II.1	Central Limit Theorem	537
II.2	Langevin Equation of Motion	538
II.3	Stochastic Integration Methods	539
II.4	Fokker-Planck Equation	541
B Numerical Methods and Physical Constants		543
I	Fourier Transform	543
I.1	Nyquist Sampling Theorem	544
I.2	Discrete Fourier Transform	544
I.3	Digital Filtering	545
I.4	Some Simple Fourier Transforms	546
II	Model Independent Analysis	546
II.1	Model Independent Analysis	547
II.2	Independent Component Analysis	548
II.3	Accelerator Modeling	549
III	Cauchy Theorem and the Dispersion Relation	549
III.1	Cauchy Integral Formula	549
III.2	Dispersion Relation	550
IV	Useful Handy Formulas	551
IV.1	Generating functions for the Bessel functions	551
IV.2	The Hankel transform	551
IV.3	The complex error function	551
IV.4	A multipole expansion formula	552
IV.5	Cylindrical Coordinates	552
IV.6	Gauss' and Stokes' theorems	553
IV.7	Vector Operation	553
V	Maxwell's equations	553
V.1	Lorentz Transformation of EM fields	554
V.2	Cylindrical waveguides	554
V.3	Voltage Standing Wave Ratio	556

CONTENTS

xvii

VI

Physical Properties and Constants

557

Bibliography

561

Index

563

Symbols and Notations

571

Acknowledgments

I would like to thank students and colleagues, particularly D. Li, H. Huang, X. Kang, M. Ellison, K.M. Fung, M. Bai, A. Riabko, who helped me polish the lecture notes into a book form. I would like to thank S. Cousineau, C. Beltran, S. Breitzmann, W. Guo, X. Huang, V. Ranjbar, and Y. Zhang, who made many useful suggestions to this revised edition. I would like to thank Angela Bellavance for pointing out mis-prints during a USPAS program in 2001. During the course of this work, I have benefited greatly from the collaboration with Drs. David Caussyn, Y. Wang, D. Jeon, K.Y. Ng, Y. Yan and Prof. A. Chao. I owe special thanks to Margaret Dienes for editing the first edition of this book. I owe special thanks to Prof. Jau-Jiun Hsiao for making critical suggestions to the new chapter in this revised edition. The responsibility for all errors lies with me. Your comments and corrections will be highly appreciated.