

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

时间科学基础

■ 漆贯荣 编著

Fundamentals of Time Science



高等教育出版社
Higher Education Press

TB939
2

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐



中国科学院研究生院教材

Textbooks of Graduate University of Chinese Academy of Sciences

时间科学基础

■ 漆贯荣 编著

Fundamentals of Time Science



高等教育出版社
Higher Education Press

内容提要

本书系统地介绍了现代时间测量的基本理论和方法。内容包括:天文学时间标准的历史沿革,原子时守时理论和尺度算法,高精度时间频率的测量比对,现代授时技术和原子频标等。全书着重阐述在相对论框架下时间测量的基本概念和计算方法。

本书可作为时频测量、航天、通信、导航、测地和天文学等领域相关专业的研究生的教材,也可供这些领域的工作人员和大学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

时间科学基础 / 漆贯荣编著. —北京:高等教育出版社,2006.4

ISBN 7-04-019159-8

I. 时... II. 漆... III. 时间测量—研究生—教材
IV. TB939

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 019248 号

策划编辑 王超 责任编辑 王文颖 封面设计 王凌波 责任绘图 朱静
版式设计 史新薇 责任校对 王效珍 责任印制 宋克学

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	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京印刷集团有限责任公司印刷二厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2006 年 4 月第 1 版
印 张	14.75	印 次	2006 年 4 月第 1 次印刷
字 数	260 000	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 19159-00

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 吴 向 张文芝 张增顺 李 佩

李伯聪 李家春 杨 乐 汪尔康 汪寿阳 徐至展

阎保平 黄 钧 黄荣辉 彭家贵 裴 钢 谭铁牛

物理学学科编审组

主 编：李家春

副主编：苏 刚

编 委：丁亦兵 马中骥 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。

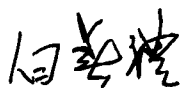
集成中国科学院的教学资源、科技资源和智力资源，中国科学院研究生院坚持教育与科研紧密结合的“两段式”培养模式，在突出科学教育和创新能力培养的同时，重视全面素质教育，倡导文理交融、理工结合，培养的研究生具有宽厚扎实的基础知识、敏锐的科学探索意识、活跃的思维和唯实、求真、协力、创新的良好素质。

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

作为一门学科,时间科学涵盖两个范畴:科学时间和哲学时间。前者涉及作为基本物理量的时间的定义和测量,以及自然科学其他学科发展揭示的时间的特性;后者则属于哲学和人文社会科学。本书述及的只是前者的前一部分内容。

本书是笔者在中国科学院国家授时中心研究生班授课时所编教材的基础上修订而成的。在拟订教材编写大纲时,国家授时中心学位委员会曾组织有关专家进行了讨论,吴守贤教授提出了宝贵建议。刘次沅教授审阅了部分初稿并提出修改意见。教材编写和教学实施得到了国家授时中心领导的大力支持,人事教育处李文成处长和张政同志做了精心的组织工作。笔者谨向以上诸君表示衷心感谢。

由于水平有限,书中缺点错误恐难避免,仰祈读者批评指正。

编 者

2005 年 2 月

全书主要符号表

符号	名 称	符号	名 称
a	地球赤道半径	h	普朗克常量
A_E	时钟地心矢径扫过的 面积在赤道上的投影	$\hbar$	约化普朗克常量
$A_\odot$	平太阳赤经	$h_i(t)$	i 钟的钟面读数
A_s	地球自转轴方位角	$h(t, x)$	相对论效应因子
AT	原子时	$\mathcal{H}$	哈密顿算子
B	磁感应强度	$\mathcal{H}_0$	无扰动哈密顿算子
B_i	指数滤波时间常数	$\mathcal{H}_1$	带扰动哈密顿算子
B_0	静态磁感应强度	I	核自旋量子数
B'	超高频磁感应强度	J	电子自旋量子数
∇B	磁感应强度的梯度	JD	儒略日
c	真空中光速	k	玻尔兹曼常数
C	电容	L	角动量量子数
D	地面两点间大圆距离	m	平太阳时
DUT ₁	世界时改正数	m_F	超精细相互作用量子数
e	电子电荷	$m_\odot$	真太阳时
E_p	原子 p 能级上的总能量	M_E	地球质量
ET	历书时	MJD	约化儒略日
$E\{y(t)\}$	函数 $y(t)$ 的数学期望	$\text{Mod}\sigma_y^2(\tau)$	改进型阿伦方差
f_h, f_l	截止频率的上限值, 下 限值	NTP	网络时间协议
f_u, f_d	上行频率, 下行频率	$P(t)$	时钟跃迁概率
g	地球重力加速度	Q	石英晶体谐振器品质因子
$g_{\alpha\beta}$	黎曼度规张量	Q_s, Q_{at}	原子谐振器品质因子
G	万有引力常量	r	径向坐标

续表

符号	名 称	符号	名 称
R	电阻	v	速度,速率
ST	格林尼治平恒星时	v_r	径向速度
$S_y(f)$	随机变量 $y(t)$ 的谱密度	W_{mn}	原子受激辐射跃迁概率
t	坐标时,作为独立变量 的时间	$x(t)$	相位时
t_m	平太阳时角	$x^i (i=0,1,2,3)$	4 维时空坐标
$t_\odot$	真太阳时角	$x_{ij}(t)$	钟 i 和钟 j 的钟面时差
t_Y	春分点时角	$y(t)$	相对频率偏离
T	取样时间间隔	Z	引力红移
TA	原子时	α	恒星赤经
TAI	国际原子时	δ	恒星赤纬
TCB	质心坐标时	δt	微小时间间隔
TCG	地心坐标时	ε^r	萨格纳克效应修正量
TDB	质心力学时	λ	地理经度
TDT	地球力学时	φ	地理纬度
TEC	传播路径总电子含量	η	时差
TT	地球时	$\eta_{\mu\nu}$	闵可夫斯基度规张量
$\mathcal{T}$	伺服扰动时间常数	μ_B	玻尔磁子
U	引力势	σ	标准偏差
$\hat{U}_g$	大地水准面总等位势	σ^2	方差
$\Delta\hat{U}$	地面不同位置总等位 势差	$\sigma_y^2(\tau)$	阿伦方差
U_T	地球引力势	τ	原时
UT	世界时	$(\Delta t)_u$	时间 t 的引力势修正量
UTC	协调世界时	ω	角速度,地球自转角速度
$\nu(t)$	瞬时频率	ω_i	权重因子
ν_0	标称频率		

目 录

前言	(1)
全书主要符号表	(1)
第1章 概论	(1)
第2章 时间测量理论	(5)
2.1 引言	(5)
2.2 牛顿理论	(5)
2.3 狭义相对论	(6)
2.3.1 同时性概念	(6)
2.3.2 时间膨胀	(7)
2.3.3 洛伦兹变换	(10)
2.4 广义相对论	(11)
2.4.1 时空度规	(11)
2.4.2 引力红移	(13)
2.4.3 引力时延	(15)
2.4.4 后牛顿近似	(15)
第3章 天文学时间	(19)
3.1 日期、历法和时间	(19)
3.2 以地球自转为基础的时间测量	(21)
3.2.1 真太阳时	(21)
3.2.2 平太阳时	(21)
3.2.3 时差	(22)
3.2.4 恒星时	(23)

II 目 录

3.2.5	地方时与时区	(24)
3.2.6	世界时	(26)
3.3	以地球公转为基础的时间测量	(29)
3.3.1	地球自转的不均匀性	(29)
3.3.2	历书时秒定义	(31)
3.3.3	历书时和世界时的关系	(32)
3.4	脉冲星时间	(33)
3.4.1	观测事实	(33)
3.4.2	可能贡献	(34)
第4章 原子时		(36)
4.1	历史回顾	(36)
4.2	原子钟守时原理	(38)
4.3	原子时秒定义	(40)
4.4	原子时的起点	(41)
4.5	原子时与世界时的协调	(43)
第5章 时间尺度和算法		(50)
5.1	引言	(50)
5.2	广义相对论中的时间尺度	(51)
5.2.1	国际原子时	(51)
5.2.2	协调世界时	(52)
5.2.3	IAU 1991 年决议 A4	(53)
5.3	时间尺度的建立	(54)
5.3.1	预期质量	(54)
5.3.2	定时资料	(56)
5.3.3	时间尺度算法	(60)
5.3.4	时间尺度的准确度	(66)
5.3.5	某些独立时间尺度的稳定度	(66)
5.4	各类时间尺度的相互关系	(67)
5.4.1	新尺度的引进	(67)
5.4.2	各类时间尺度之间的相互关系	(68)
5.4.3	关于历元 J2000	(69)

5.4.4 为什么要有这么多时间尺度	(69)
5.5 结论	(70)
第6章 授时技术	(72)
6.1 引言	(72)
6.2 短波无线电授时	(75)
6.3 长波无线电授时	(80)
6.4 电视授时	(85)
6.5 卫星授时	(88)
6.5.1 GPS 系统	(89)
6.5.2 GLONASS 系统	(92)
6.5.3 北斗一号	(92)
6.6 电话授时	(93)
6.7 网络授时	(94)
6.8 各种授时技术的精度比较	(96)
第7章 时间和频率的测量比对	(97)
7.1 引言	(97)
7.2 时间和频率的稳定度	(98)
7.2.1 定义	(98)
7.2.2 符号	(98)
7.2.3 时域测量	(99)
7.2.4 频域测量	(101)
7.2.5 时间和频率波动模型	(101)
7.2.6 频率稳定度的特征	(102)
7.2.7 时间稳定度的特征	(107)
7.2.8 稳定度测量中的交合评价	(107)
7.3 机械振荡器	(108)
7.4 石英晶体振荡器	(109)
7.5 准确度概念	(111)
7.6 时间和频率比对	(112)
7.6.1 概论	(112)
7.6.2 频率与原时的关系	(113)

IV 目 录

7.6.3	时间比对	(113)
7.6.4	频率比对	(130)
第8章 原子频标		(133)
8.1	原子频标的波谱学基础	(133)
8.1.1	原子特性的普遍性	(133)
8.1.2	碱性原子的频谱特性	(133)
8.1.3	选择标准	(138)
8.1.4	谱线宽度	(139)
8.2	原子与电磁场的相互作用	(140)
8.2.1	弱场中的观测	(140)
8.2.2	原子状态的制备和检测	(140)
8.2.3	多普勒效应	(142)
8.2.4	谐振腔	(145)
8.2.5	伺服电路	(145)
8.3	静态孤立原子的近似实现	(146)
8.3.1	外加磁场的影响	(146)
8.3.2	黑体辐射	(146)
8.3.3	速度效应	(146)
8.3.4	碰撞效应	(146)
8.3.5	调制增宽	(147)
8.3.6	边带效应	(147)
8.4	铯束频标	(147)
8.4.1	磁选态铯束频标	(148)
8.4.2	光抽运铯束频标	(164)
8.4.3	激光冷却铯原子频标	(168)
8.5	氢脉泽	(176)
8.5.1	氢脉泽的结构	(177)
8.5.2	振荡条件	(178)
8.5.3	主动型氢脉泽	(180)
8.5.4	被动型氢脉泽	(184)
8.5.5	氢脉泽的时频测量特性	(186)
8.5.6	制冷型氢脉泽	(188)
8.6	铷频标	(189)

8.6.1	基本结构	(189)
8.6.2	工作原理	(190)
8.6.3	时频特性	(190)
8.6.4	展望	(191)
8.7	汞离子频标	(191)
8.7.1	射频陷阱囚禁原理	(192)
8.7.2	囚禁离子的特性	(195)
8.7.3	汞离子频标描述	(196)
8.7.4	汞离子频标时频特性	(198)
8.7.5	展望	(199)
8.7.6	镱离子频标	(199)
8.8	其他原子频标	(199)
8.9	总结	(200)
第9章 时间和频率的应用		(201)
9.1	基础研究	(201)
9.1.1	计量学	(201)
9.1.2	物理学常数的测定	(202)
9.1.3	在原子物理学中的应用	(203)
9.1.4	在时-空结构和引力场研究中的应用	(204)
9.1.5	在海洋环境研究中的应用	(205)
9.2	导航定位	(207)
9.2.1	地面无线电导航定位系统	(207)
9.2.2	卫星导航定位系统	(208)
9.3	在航天和兵器试验中的应用	(211)
9.4	在通信中的应用	(212)
9.5	在电力系统中的应用	(212)
附录1 世界上主要时间实验室		(214)
附录2 与时间有关的国际科学组织		(216)
主要参考书目		(219)
索引		(220)

概 论

在现行国际单位制中,有 7 个基本单位.它们是:长度单位米(m)、质量单位千克(kg)、时间单位秒(s)、电流单位安或安培(A)、热力学温度单位开或开尔文(K)、物质的量单位摩或摩尔(mol)、发光强度单位坎或坎德拉(cd).在这 7 个基本单位中,时间单位的定义和测量是历史最悠久、情况最复杂、目前测量精度最高的一个基本单位.

时间是连续流逝的物理量,它的测量依靠物质的连续运动.在原理上,任一连续运动的物理过程或物理量,都可以表征成以时间 t 为自变量的函数: $F=f(t)$. 如果这个过程的变化是可测的,那么我们就可以以它为标准进行时间测量. $f(t)$ 的最简单的形式是线性函数.严格地说,在自然界中很难找到完全表现为线性函数形式的物理运动过程.一般情况下,这个函数可以写为

$$F = a + bt + \Phi(t) \quad (1.1)$$

式中 a, b 为常数, $\Phi(t)$ 为非线性部分.对于时间测量而言,要求 $\Phi(t)$ 尽量小,在一定精度范围内可以忽略;或者 $\Phi(t)$ 具有某种特定形式,可以在记录 F 的变化中加以扣除.

我们称(1.1)式为时间测量的原理方程.现在,让我们先忽略 $\Phi(t)$ 来考察它的意义.这时,(1.1)式可写为

$$F = a + bt \quad (1.2)$$

显然,当 $t=0$ 时, $F=a$. 常数 a 表征 F 的起始状态,指示了时间测量系统的起点,或者说它规定了时刻的起算点.按天文学术语,它规定了时间测量系统的历元^①(epoch). 常数 $b=dF/dt$, 它表示 F 在单位时间内的变化.当规定以 dt 作为某种时间单位时,即令 $dt=1$, 则 $dF=b$. 这表明只要精细地把 F 的变化记录下来,实际上就给出了时间间隔的单位.

人类在进行时间测量的过程中,按(1.1)式选择物理运动过程时,总是选取某种周期性运动过程.迄今为止,人类用以测量时间的周期运动过程大体可

^① 历元指测量的初始起点或参考时间.它来源于古希腊“επιτηρη”一词,意思是参考点.通常,历元也代表一个长时间间隔.

以分为三类.

(1) 转动体的自由旋转. 例如地球自转, 由此导出了恒星时系统和平太阳时系统. 后者演变为应用广泛的世界时系统.

(2) 开普勒运动, 即伴星体在引力作用下绕主星体轨道运动. 例如地球绕太阳的运动, 月球绕地球的运动, 等等. 由此导出了历书时系统.

(3) 谐波振荡. 绝大多数机械钟和电子钟所依据的振荡运动都属于此类, 包括原子在量子-机械系统中辐射或吸收电磁波的振荡运动.

第1类和第2类周期运动是天文学时间测量的基础. 第3类谐波振荡运动产生了一般意义上所说的各种时钟, 其中原子钟最为精确, 它使我们得到了原子时概念和原子时测量系统.

从上古人类为生存需要本能地观察某些自然现象, 到自觉地制造测量器具去测量时间, 经历了漫长的粗犷时代. 近代科学的兴起, 特别是某些自然科学理论的确立, 为精密时间测量开辟了广阔前景. 尽管人类在漫长时间长河中发明了各式各样巧夺天工的时间测量器具——时钟, 但直到今天, 人类测量时间的基本方法, 归纳起来只有两种.

1. 复制型时间测量方法

人类早期测量时间的方法是复制型时间测量方法. 中国古人有“日出而作, 日入而息”的传统, 古埃及人把尼罗河两次泛滥的间隔时间定为1年, 游牧民族的先民们以草木枯荣记岁. 即使是以太阳东升西落计日, 也不能说那个时代的人们已经学会观察天象并掌握其运动规律. 他们只是把太阳升落、河水泛滥、草木枯荣同视为具有不变周期的自然现象, 并“复制”这些周期“计时”, 籍以安排他们的起居和生存活动.

中国古代发明的水钟, 特别是宋代苏颂设计制造的水运仪象台以及后来意大利天文学家伽利略(G. Galileo)提出的摆的等时性原理, 使复制型时间测量方法发生了革命性变化: 真正的人造周期代替了自然现象周期. 它为提高时间测量精度提供了宽广的活动舞台. 于是出现了各种精巧的机械钟, 进而出现了晶体振荡器, 以及当今最高水平的分子和原子振荡器——分子钟和原子钟.

复制型时间测量的理论基础是周期不变性和可复制性原理. 严格地说, 前者是不成立的. 不仅自然界中没有严格不变的周期运动现象, 就是人造周期运动也会因各种原因引入误差. 至于可复制性, 在一定精度范围内可以实现, 但它必然受复制对象、复制方法和复制工艺的制约, 而带有或多或少的复制“制作”误差. 因此, 复制型模式的关键问题是尽力保持周期——时间单位的稳定性和复制精度, 这就是现代原子钟追求频率稳定性和复现性的理论原因.

2. 动力学时间测量方法

动力学时间测量方法的理论基础是经典力学和天体力学. 它所依据的是

人们对特定天体(例如地球)运动规律的认识和掌握,由此得到所谓天文时间标准.应该说,同复制模式测量相比,这是一个进步.因为它观测的对象是客观的、唯一的天体运动,有利于建立全球统一的时间测量系统.但是,20世纪50年代,人们发明了原子钟,随之出现了世界范围的原子时系统.时间测量又回归于复制型模式.

由天文学时间向原子时转变是科学进步的成果.因为就时间测量本身而言,天文时间的精度远不能与原子时精度相比较.出现这种情况的关键在于,动力学测量依据的是以轨道力学为基础的星历表,观测对象是地球自转运动(或月球绕地球的运动).历表误差,地球自转不规则性,以及观测中地球大气等诸多因素的影响,使得天文时间标准的精度很难有大幅度的提高,在20世纪的前60年中,即到60年代末,天文测时精度只有几倍的提高,仅仅达到 10^{-9} 量级,难以满足现代科学技术,特别是航天科学技术发展的需要.

当然,随着轨道力学理论的完善和观测技术的进步,时间测量会不会有可能再回归到天文标准上来,这是许多学者都在关心的问题.人们把希望寄托在对于毫秒脉冲星的观测上.

时间标准具有可复制性.无论是天文学时间标准,还是物理学时间标准,它们所定义的量值都是一个纸面上的理想值.不同的实验室可以做出接近于理想值的标准装置,复制这个理想值,保持时间测量标准.在天文学时间标准的情况下,人们通过联合观测,测定地球运动状况,保持天文学时间标准.在物理学时间标准的情况下,人们在实验室研制能产生所定义的原子的能级跃迁电磁辐射的装置,复制出原子时间标准.在这两种情况下,都有一个复制精度问题,即复制值相对于理想值的偏离问题.研究发生偏离的原因,改善偏离的程度,是时间测量追求的重要目标.事实上,复制精度从概念上说,就是复现时间单位定义值的装置保持时间标准的准确度.目前,激光冷却铯喷泉原子钟的准确度可以达到 1.4×10^{-15} ,将来或许有可能达到 $10^{-16} \sim 10^{-17}$,这是其他物理量所难以达到的.

时间测量的范围十分宽广:从人们所能想像的最小时间间隔——普朗克(Planck)时间 10^{-43} s,到基本粒子中某些质子的寿命 10^{28} a(年).从理论上说,时间测量范围应该在 10^{-43} s $\sim$ 10^{28} a的广阔区间.目前我们能比较精确测量的只是这个区间中的一小部分,即从与原子跃迁相联系的 10^{-15} s到地球年龄 10^{16} s.而本教材中重点描述的时间测量,更是这一小部分中的一小部分,即秒以下到 10^{-15} s的时间间隔的测量,这一部分正是现代科学中应用广泛的区域.

时间标准的量值可以通过电磁波发射进行传递,不需要像其他标准量值那样的逐级传递,而且具有可溯源性(traceable).时间服务部门建立并保持高精度时间标准,通过无线电信号把标准量值传递出去,为广大用户所利用.时