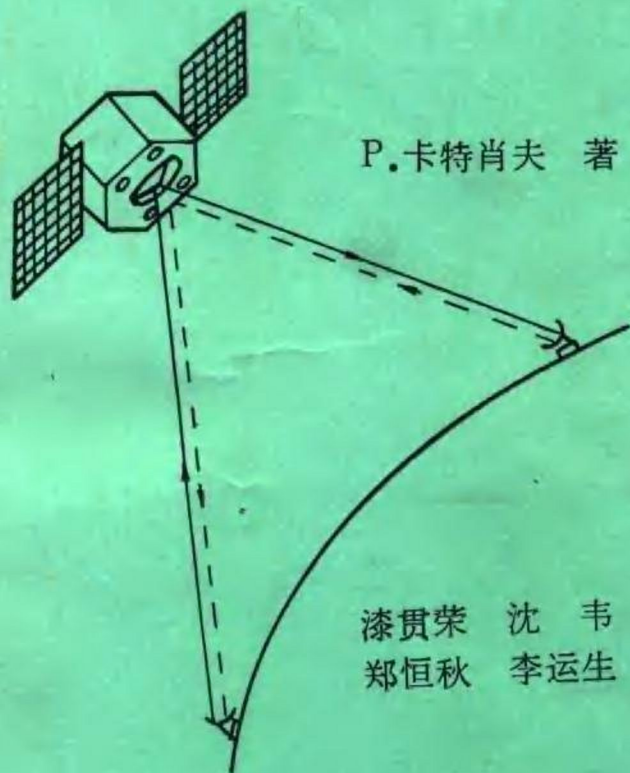


频率和时间



P.卡特肖夫 著

漆贯荣 沈 韦 译
郑恒秋 李运生

《时间频率公报》编辑部

内容简介

本书是一本系统的、现代的时间频率教科书。它着重介绍频率稳定度、稳定频率的产生、时间尺度的定义、建立和保持等基本概念以及各种测量技术。

本书内容丰富，文字简练，有一定的深度和广度，适合于时频工作者和其它学科中同时频测量有关的科技人员阅读、参考。

※

Frequency and Time
P. Kartaschoff
Academic Press 1978

※

频率和时间

P. 卡特肖夫 著

涂贯荣 沈 韦 译
郑恒秋 李运生

责任编辑 毛德驰

※

《时间频率公报》增刊

中国科学院陕西天文台出版
陕西省汉中地区印刷厂印刷
陕西天文台情报室发行
地址：陕西·临潼

※

1982年8月

译者前言

本世纪六十年代后期,时间计量领域中发生了一次重大变革:以量子微观运动特征为依据的原子时取代了人类长期袭用的以天体宏观运动规律为基础的天文时。这场变革不仅大大提高了时间测量精度,适应了现代科学技术发展的需要,同时也给计时学本身提出了许多新的理论和技术问题。本书从理论和实践的结合上深入地讨论了这些问题,是一本系统的、现代的时间频率教科书。

本书是剑桥大学A.H.库克教授主编的《物理学测量丛书》的首卷书,全书共八章。第一章简要说明频率和时间测量在科学技术领域中的重要意义以及它在近二十年来的发展概况。第二章讨论频率稳定度的基本概念和测量技术。第三章介绍各类原子钟的工作原理、误差来源和技术性能。第四章着重讨论原子时尺度的定义、建立和保持等基本理论,阐述了新旧守时方法之间的历史渊源。第五章到第七章详细介绍目前广泛采用和正在研究的时频测量的新方法、新技术和新设备。第八章分析了利用各种无线电信号进行时频比对时所能达到的精确度。

为了满足我国广大时频应用部门的需要,我们将该书译出,作为《时间频率公报》的增刊奉献读者。

本书第一、四章由漆贯荣翻译,第二、三章由沈韦翻译,第五、八章由郑恒秋翻译,第六、七章和符号表等由李运生翻译;全书由漆贯荣校阅定稿。在翻译过程中,译者对原书中的错误作了改正,补充了一些新数据,并加了译者注。由于我们水平有限,错误和疏漏之处敬希读者批评指正。

译者

1982年5月

作者序言

本书是为了向物理学家和工程师提供最近二十年来频率和时间测量技术发展概况而写的。从人类文明早期开始就为世人所知的天文时已被原子时代替，这场无声的革命将在本书中如实反映出来。它是量子物理学和电子学研究发展的合作产物，前者给出了基本的自然现象，后者提供了开创计量科学新纪元的技术手段。

目前使用的时间尺度都建立在原子钟工作的基础上；天文学看来已经丧失了的时间定义方面的统治地位。但是，更好的、与地球自转速率无关的新时间尺度，以其容易获得等特点对天文学的让位给予了优厚的回报。几年以前还不能设想写一本关于守时的教科书而不涉及天文学，那时，书中至少也要有一篇关于天文学的引论。就这一点而言，本书没有遵循常规。这并不意味着那是无益的工作，而是没有必要进一步回顾历史，至少对目前来说那已是过去的一页了。

当作者应约为学术出版公司新编的《物理学测量丛书》撰写本书时，系统的、现代的时间频率教科书尚未问世；而随着该领域研究工作的迅速进展，特别是在六十年代的进展，目前已经有大量的新资料广泛出现在各种杂志、会议文集和或多或少为人们所知的报告中。

本书分八章。作为绪论的第一章是向读者说明频率和时间测量在许多科技领域中的重要意义。

限于篇幅，本书只侧重于精密频率和时间测量的基本理论与技术，这就给读者留下了丰富的思考余地。但是第八章仍然给出了大量的关于应用方面的附加资料。

第二章到第七章是本书的主体，其中包括频率稳定度、稳定

频率的产生、时间尺度的定义和建立等基本概念以及各种测量技术。

作者感到不可能把这个领域叙述得面面俱到。为使本书简明扼要只得舍弃了很多有趣的细节。本书的问世在很大程度上要归功于参考文献上提到的许许多多作者们的工作，本书作者谨向所有同行致以诚挚的感谢，并希望他们的有关工作都未被忽视。

美国国家标准局的David W. Allan审阅了第二章初稿；国际无线电咨询委员会特许复印了一些报告；瑞士邮电总局的Kurt Hilty帮助编辑了第五章；瑞士邮电总局研究和发展部主任Wiuyl Klein先生对本书一贯寄予关心；这套丛书的编辑A.H. Cook教授给予很多有益的建议和鼓励；另外，作者的夫人Sylvia P. Kartaschoff整理了手稿。作者谨向他们致以特别的谢意。

P.K.

1978年1月，于瑞士伯
尔尼和纳沙泰尔

符 号 表

a	归一化频移速率	2.2, 4.4
	辅助变量	3.3
A	检相器的电压系数 (v/rad.)	3.5
A(t)	幅度函数	3.4
A ₀	峰值幅度	3.4
B	噪声带宽 (Hz)	7.3
b	扰动幅度	3.3
C	电容 (F)	3.2
C _H	二极塞曼效应系数 (Hz/Oe ²)	3.3
C _n	第n级傅里叶系数	3.4
C _p (t)、C _q (t)	波函数	3.3
D	大圆距离	8.2
DUTI	世界时改正数	A8.2
D _x (t ₁ , t ₂)	随机变量x(t)的结构函数	2.2
e	欧拉数e = 2.71828.....	1
	电子电荷e = 1.602 × 10 ⁻¹⁹ 库仑	1
F	原子角动量量子数	3.3
	频畴分析中作为变量的频率, 即“傅里叶频率”	2.2
f _l 、f _h	截止频率的下限值和上限值	2.2
f _A /f _B	频率比	5.4
f	中频	7.2
f _L	本机振荡器频率	7.2
f _s	信号频率	7.2

F (s)	环路滤波器传递函数	3.5
F_d	偏转力	3.3
G	引力常数	1
g	地球的重力加速度	1
H	海拔高度	1
H_0	直流磁场 (Oe)	3.3
	(3.12) 式中为无扰动哈密顿量	3.3
h	普朗克常数 $h = 6.62 \times 10^{-34}$ 焦耳秒	1
$\hbar$	$h/2\pi$	3.3
h_n	振荡器噪声模型幂级数展开的系数	2.2
H (s)	锁相环路的输入/输出传递函数	3.5
$H_1(2\pi if)$	锁相环路传递函数	7.4
I	核自旋量子数	3.3
	电流 (A)	3.4
I_{av}	平均电流	3.4
I_p	峰值电流	3.4
i	虚数单位, $i = \sqrt{-1}$	3.3
J	电子自旋量子数	3.3
J, K, Q, $\bar{Q}$, D, R, S		
	双稳态集成线路的逻辑符号	3.4
K	压控振荡器的电压控制系数	3.5
K_n	谱密度与阿仑方差之间的转换常数	2.3
K_0	锁相环路增益	3.5
k	LORAN—C 波形系数	8.4
L	自感量 (H)	3.2
$\mathcal{L}(f)$	在 1Hz 带宽情况下, 噪声的小相位调制 造成的归一化单边带功率密度	2.5
M	分组数	2.2
	分频比	3.5

m	变压器匝数比	3.4
m_F	超精细相互作用的量子数	3.3
n	谐波次数	3.4
	指数	
	整数	
N	每组内的取样数	2.2
	分频比	3.4
P	功率 (W)	3.3
P_0, P_n	基波和第 n 次谐波的功率	3.4
$P_{p,q}$	跃迁几率	3.3
Q	品质因数	3.2
r	径向坐标	1
	$r = T/\tau$ 为间隙时间比	2.2
R	电阻值 (欧姆)	3.4
$R_Y(\tau)$	随机变量 $y(t)$ 的自协方差	2.2
R_1, R_2	钟读数	8.7
s	拉普拉斯变换的复数频率变量	3.5
$S_Y(f)$	随机变量 $y(t)$ 的谱密度	2.2
	注: 其它变量的谱密度以同样方式定义, 如	
	$S_\phi, S_x, S_{u_0}, S_\omega$ 分别为 ϕ, x, u_0, ω 的谱密度	
$S_{\phi 12}$	测量两个振荡器的相位差时, 它们合成的相位噪声谱密度	7.3
t	作为独立变量或参数的时间	2.1
	相互作用时间	3.3
t_k	第 k 次取样的开始时间	2.2
t_s	同步延迟	4.4
T	周期性波形的周期	1
	两次取样间的时间间隔	2.2
T_r	相互作用时间	3.3

$T_{1,2}$	时间常数	3.5
TAI	国际原子时尺度	4.2
$T(t)$	作为参照时间函数的钟读数	4.4
T_i	钟脉冲周期	5.3
T_d	显示时间	5.3
T_r	传播时间	8.6
u, u_0 等	电压幅度, 直流值	2.1
$u(s)$	$u(t)$ 的拉普拉斯变换	
u	辅助变量, $u = \pi f \tau$	2.2
$u(t)$	瞬时信号电压	2.1
UT	世界时	4.2
UT _{0,1,2}	世界时的类别	4.2
UTC	协调世界时	4.2
U	引力势	1
U_T	地固参考系中总的相对论势	1
U_n	峰值噪声电压	5.3
U_{WA}	波形分析仪的输入电压	7.3
V	电压	1
v	速度, 速率	1
v_a	原子速度	1
$W_{p,s}, W_{1,2}$	量子化能级的能量	3.3
$x(t)$	相位时间 (秒)	2.1
$X(s)$	$x(t)$ 的拉普拉斯变换	3.5
$y(t)$	相对于标称频率的归一化频偏	2.1
$\overline{y_k}(t_k, \tau)$	在 t_k 时刻从 $y(t)$ 得到随机过程的 取样并在时间 τ 内平均	2.2
$y_r(t)$	$y(t)$ 的随机部分	2.2
$x_r(t)$	$x(t)$ 的随机部分	2.2
α	$S_Y(f)$ 幂级数展开式中的指数	2.2

β, β_A, β_B	纬度	8.2
γ	变容二极管电压系数	3.4
δ	表示小偏差的前缀符号	2.2
	大圆的圆心角	8.2
δ_v	绝对频偏	2.2
Δ_1, Δ_2	一次差和二次差	4.4
Δ_1, Δ_2	时间延迟	8.6
Δ_{12}, Δ_{21}	时间延迟	8.7
Δf	频谱分析仪的分辨带宽	2.4
$\Delta \phi$	相差	2.2, 3.5
Δx	相位时间差	2.2, 3.5
ΔU_1	触发电压范围	5.2
ε	任何小误差 (例如在谱估算时)	2.4
θ	纬度角的余角 $\theta = 90^\circ - \beta$	1
	辅助变量	3.2
$\lambda, \lambda_A, \lambda_B$	经度	8.2
μ	振荡器噪声模型两次取样阿仑方差项的指数	2.3
μ_{eff}	有效磁偶极矩	3.3
ν	频率 (Hz)	1
ν_m	实测频率	1
ν_0	作为定义的标称恒定频率	2.1
ν_b	拍频	5.6
ν_{T_0}	辅助振荡器频率	5.7
ν_u	频率的随时间可变部分	2.1
ν_1	实测频率	5.3
σ	标准偏差	2.2
σ^2	方差	2.2
$\langle \sigma^2_Y(N, T, \tau) \rangle$	广义的N次取样阿仑方差	2.2
$\sigma^2_Y(\tau) = \sigma_Y^2(2, \tau, \tau)$	两次取样的阿仑方差	2.2

$\sigma^2_H(N, \tau)$	哈达马方差	2.4
τ	平均时间, 取样时间, 观测时间	2.2
ϕ	经度	1
	相位角 (角度或弧度)	2.1
	接触势 (V)	3.4
$\phi(s)$	$\phi(t)$ 的拉普拉斯变换	3.5
ω	角速度	1
ω	角频率 (弧度/秒)	
$\omega_{p,q}$	与能级 $W_{p,q}$ 相对应的角频率	3.3

目 录

译者前言	(i)
作者序言	(iii)
符号表	(vii)
第一章 绪论	(1)
第二章 频率稳定度的测量	(13)
2.1 引言	(13)
2.2 稳定度的测量	(15)
2.3 振荡器的噪声模型	(24)
2.4 用时畴数据进行频谱估算	(29)
2.5 相位噪声和信号频谱的近似关系	(34)
第三章 标准频率发生器和钟	(36)
3.1 引言	(36)
3.2 石英晶体振荡器	(36)
3.3 原子频率标准	(42)
3.4 倍频和分频	(63)
3.5 频率综合	(80)
第四章 时间尺度	(91)
4.1 引言	(91)
4.2 钟和时间尺度	(91)
4.3 国际协调	(98)
4.4 时间尺度的产生	(100)
4.5 时码	(119)
附录4.1 钟和频率发生器读数的标注方法	(126)
第五章 用计数器测量频率和周期	(128)
5.1 引言	(128)
5.2 直接测频	(128)

5.3 周期测量	(135)
5.4 频率比的测量	(139)
5.5 时间间隔测量	(139)
5.6 提高测频的分辨率	(143)
5.7 微波频率测量	(146)
第六章 相位—时间测量	(149)
第七章 频畴测量技术	(154)
7.1 引言	(154)
7.2 直接的谱分析	(154)
7.3 用锁相环测量低电平相位噪声	(157)
7.4 锁相环路用于时畴测量	(164)
第八章 无线电信号的比对方法	(167)
8.1 引言	(167)
8.2 短波时号	(169)
8.3 长波连续波系统	(174)
8.4 罗兰—C系统	(178)
8.5 甚低频系统	(189)
8.6 电视定时法	(193)
8.7 卫星系统	(198)
8.8 其它时间比对系统	(204)
附录8.1 CCIR关于波段的规定	(206)
附录8.2 标准频率和时号发播	(207)
参考文献	(236)
其它参考资料及其简介	(254)

第一章 绪论

频率和时间测量对于所有科学和工程技术的实验工作来说是非常重要的，其重要性可以由下述事实得到说明：在描述自然现象的绝大多数方程中，时间是一个基本参量。

时间同长度、质量或温度这些可以测量的物理量相比，主要区别在于它的力学性质。与后者不同，时间不可能保持恒定不变。就是说，它永流不息，决无终止。

一个钟可以停掉，从而在它的时间尺度上指示出一点或瞬间，即停掉的那个时刻。但是时间将继续流逝。如果被停掉的恰巧是我们手边唯一的一个钟的话，那么我们便将失去由这个钟所提供的时间尺度。倘若重新起动这个钟，则它将必然要滞后一段时间。但究竟滞后多少，这只能靠在它停掉期间一直保持运转的其它钟的帮助才能确定。

在这里，我们已经含蓄地使用了时间这个词的两种含义，即在一个具有确定原点的时间坐标轴上某一点的时刻（或历元，见第四章）；以及钟被停掉的时间间隔。在日常生活中，时间的这种双重含义即使不经过测量也可以用下面两句话来加以说明：

1. “是喝茶的时候了。”——指的是时刻。
2. “我们有过一段快乐的时间。”——指的是时间间隔。

频率是与时间密切相关的一个量，通常称其为时间的“倒数”。这种说法虽然并不十分确切，但却反映了频率的含义来自于对周期事件（即在一定时间间隔内重复出现的事件）的测量这个事实。例如在测量一个摆的摆动时，如果它每摆动一次的时间间隔不变，那么我们便称该间隔为摆动的周期 T 。这时，摆动的频率 ν 实际上就是周期 T 的倒数，

$$\nu = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad (1.1)$$

频率的单位是赫兹 (Hz)。1 赫兹为每秒一个周期或一周。“每秒周”这一名称虽在几年前就已经不用，但在目前的某些教科书中还仍有出现。

频率和时间的显著特征是其基本定义的高度准确和测量的高度精密。它们的准确度和测量的精确度在过去二十多年中提高很快，远远超过了所有其它物理量。

在以米制为基础的国际计量单位制中，秒是基本单位，赫兹为导出单位。传统上，秒定义以天文概念和天文观测为基础。在 1956 年以前，秒被定义为一个平太阳日的 $1/86400$ 。二十世纪三十年代以后，由于石英钟的普遍应用，以及天文仪器和观测方法的改进，地球自转的不规则性逐渐为人们所认识。在这种情况下，继续听任基本测量单位——秒的定义随时间而变化就显得很不相宜。因此，国际上在 1956 年采用了一个新的秒定义。它以历书时为基础。1 历书时秒等于回归年长度的 $1/31556925.9747$ 。

按照定义，历书时秒长无疑是均匀的；但实际测定它却很困难。要使测定历书时秒长的或然误差达到 10^{-9} 量级，需要几年的天文观测。

在此期间，为了定义一个均匀的、容易得到的时间单位，物理学家们在原子和分子光谱学领域里开始了一个具有重大意义的新进程。他们利用二次大战前和大战期间 (1939~1945) 微波电子学发展所取得的成就，发现在厘米波段中有许多原子和分子谱线，它们的特殊谐振（或量子跃迁）可以用作稳定的频率标准，从而导致了一种新型设备——“原子钟”的诞生⁽¹⁾。第一台这样的设备是以氨分子在 23.87GHz （千兆赫兹）上的一条吸收谱线为基础的。当时它的准确度只有 1×10^{-7} 左右，因而未能成功地取代传统方法。但是，利用其它方法，特别是利用铯原子束谐振器（见第三章）继续试验，使得实验室频率标准的准确度迅速

提高。在过去的二十多年中，这种提高的速度差不多是每五年一个数量级：

1955	10^{-9}
1960	10^{-10}
1965	10^{-11}
1970	10^{-12}
1975	10^{-13}
1980	10^{-14} *

频率准确度的迅速提高引起了如何选择新的秒定义的一系列讨论。这种新的秒定义将不再依赖于天体力学，而以量子力学为基础。

有关讨论在1967年取得了基本一致的意见。同年10月，第十三届国际计量大会正式通过了新的秒定义。该定义在目前仍然有效，它的法文叙述为：

“La seconde est la durée de 9192631770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de Césium 133.” **

值得注意的是，在新定义中，被测量的量不是时间而是频率。在旧定义中，秒是以一个长周期的分数形式给出的，现在则由大量快速振荡周期的累加给出。正如第四章中详细讨论的那样，秒定义的这种转变对于钟的运转来说有着非常重要的实际意义。

在传统方法中，钟被用作守时（守时的法文名称为 garde-temps）。也就是说，时间由恒星的位置给出，而钟只是 在各次观测之间被用来帮助保持时间。时、分、秒由等分平太阳日或回归年这样一些长周期的时间间隔来获得。

• 译者所加。

• • 中文译文见3.3节—译者注。

但是，根据新定义，较长的时间间隔则由时间测量基本单位——秒的连续累加来得到。只要不改变钟的内部结构，即由振荡器、计数器和显示器等组成的钟的基本系统不变，那么这个钟就可以成为时间尺度发生器。

显然，在定义和测量时间的新旧方法之间必须保持连续性。这样，对于产生稳定周期振荡的实际振荡器来说，必然存在下列问题：严格的周期性意味着每个相邻振荡周期都是它们前一振荡周期的精确复现，因此人们可以在任意时刻开始计数。这样一来，在时间坐标轴上就会没有固定的原点。

解决这个问题的办法，是使各个钟都相对于一个约定的共同起点保持同步。国际上选定这个起点为1958年1月1日0时0分0秒。事实上，只有少数原始实验室标准才需要具有最大可能的频率准确度，即尽可能使它的频率符合定义值；其它用户则可以把他们的钟的振荡频率调整到原始标准上来。因此对用户的钟所要求的重要指标便是它们的频率稳定度。因为振荡器频率稳定度越高，由它产生的时间尺度的均匀性就越好。

因此，在第二章中我们将根据统计学测量方法来讨论频率稳定度的各种概念，特别是波动特性。由于涉及的是相对于理想值的微小偏离，所以不管在什么地方我们都尽量采用标准化的量，其符号和含义与美国国家标准局以及IEEE频率稳定度技术小组所用的保持一致。在富利叶频畴和时畴中采用的统计学测量方法，分别为谱密度和阿伦方差。我们还将以标称频率波动的谱密度幂级数形式给出振荡器噪声模型。这种模型可以描述差不多所有目前已知的振荡器的波动特性。虽然在数学上并非十分困难，但正如在引用的某些参考文献中可以看到的那样，该方法中还存在一些常常引起争论的问题。由于存在着某些困难，例如不能只用固定程式去描述各个具体的振荡器的噪声模型，所以振荡器噪声的理论模拟场至今还没有完全建立起来。本书还将讨论目前仍在研究的钟时预测问题。我们将在第四章中给出有关这一问