

频率和时间

P. 卡塔肖夫 著

科学出版社

频 率 和 时 间

P. 卡塔肖夫 著

王铁男 王尧祖 王克廷 译

王义道 校

科 学 出 版 社

1987

内 容 简 介

本书介绍二十多年来原子钟技术的发展概况及其重要意义,重点阐述近代频率和时间的测量方法和技术。内容包括频率稳定度、标准频率的产生、时标、各种频率和时间测量技术等。本书内容丰富、文字简练,具有很大的实用价值。

本书可作为高等院校频率和时间测量课程的教科书,也可供与该专业有关的科技人员参考。

P. Kartaschoff

FREQUENCY AND TIME

Academic Press Inc.(London)Ltd., 1978

频 率 和 时 间

P. 卡塔肖夫 著

王铁男 王尧祖 王克廷 译

王义道 校

责任编辑 李义发

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1987 年 3 月第一次印刷 印张: 9

印数: 0001—8,200 字数: 198,000

统一书号: 13031·3474

本社书号: 4934·13—3

定 价: 2.15 元

译 者 的 话

时间和频率是度量一切物质运动的基本参量。时间和频率测量是当前一切物理量中测量精度最高的一种。正因为如此，长度单位与电压单位也用或将用与频率测量有关的技术来确定。此外，频率和时间测量又是导航技术的基础，在军事上有重要应用。因此，频率和时间测量技术的现代化，是科学技术现代化和国防现代化不可缺少的组成部分。

P. 卡塔肖夫著的《频率和时间》一书是《精密测量方法和标准丛书》(该书是 ACADEMIC PRESS INC (LONDON) LTD 出版)的第一卷，该书全面地总结了各种频率和时间的测量技术，阐明有关的基本概念，因而兼有大学教科书和科学技术综述的特点，能够使有关专业的院校师生、科研和工程技术人员全面了解现代频率和时间测量技术的基础，为此译成中文出版。

本书的翻译工作分工如下：第一、二、三章由王铁男翻译；第四、五、六章由王尧祖翻译；第七、八、九章由王克廷翻译。全书由北京大学无线电系王义道先生审校。译者对成都电讯工程学院张世箕先生在第二章翻译中所给予的支持和帮助，谨致谢意。由于译者水平有限，书中错误与不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

《精密测量方法和标准丛书》原序摘录

测量是当代生活的核心。

我们对物质世界的认识取决于测量；我们利用这种认识，通过工程建设改造世界的本领也取决于测量；我们用无线电和电视进行对话的能力同样取决于测量。在人类文明的初期，由于建筑和贸易的需要，发展了测量；至今提供测量系统和测量标准，使国内和国际贸易能够顺利进行，仍然是政府的重要职责。然而，商业性测量所要求的精度通常比我们时代的发展所要求的低得多。机电产品的大量生产取决于能否制造出如此高精度的零件：它们可以装配在一起而无需进一步调整；这就要求机器按必要的精度工作，还要求以测量来检验机器是否这样工作。测量也介入了工程设计。设计师依据对物质世界有用的认识（以实际测量为基础的图表和公式）进行设计，这些设计以图表或其它数学形式交给车间或施工人员。如果要制造出成品，那么，各种初始测量，设计师提出的技术要求，机械加工人员的操作，都必须参照同样的测量标准，以合理精度进行。

正是机械测量，在大量生产中起着最大作用；正是机械测量，首先达到百万分之一的高精度。这在很大程度上是两次世界大战期间大量生产军事装备需要准确测量的缘故。两次世界大战之间，发展了以光波波长来表达的干涉测量技术。多亏原子频标，使现代的时间和频率测量能有高得多的精度。大量现代的活动，例如通信系统的同步、频段分配、飞机和船舶的导航，都取决于它们。还有，大规模的化学工程依靠热力

学特性的精密测量，才能把工艺过程由小型实验室规模或试验工厂扩大到大型的化工联合企业，而且不会发生故障。最后，现代时间和距离的精密测量技术，大大地扩展了我们对周围世界的认识(尤其是地球物理学和天文学)。

仅仅在最近二、三十年内，除长度以外的其它物理量测到百万分之一的技术才取得成功。在此以前，几乎一切测量技术都是力学性的，参照的标准也是力学的。现在，许多测量技术依据量子物理学，测量标准也采用量子原理。一门新的量子计量学已经逐渐形成。它开始于 Michelson, Fabry 和其他人的工作，他们把光的波长定为长度标准，并使干涉计量学技术适合他们的要求。由于有了激光器，干涉计量学测量的应用范围大大地扩展了，标准的可重复性和便利性也有了很大改善。另一个与量子现象有关的量是频率。现在，一切时间、频率业务都依靠原子频标，几乎任何人用一台很简单的接收机就可以收到其频率经过精确测定过的无线电信号。从此，人们逐渐把其它的量与频率联系起来，例如通过光速把频率与长度联系起来。人们已作出巨大努力去测定有关的物理常数，研究各种技术，因而诸如电学的标准也可用频率测量的方法建立起来。

把其它物理量与频率联系起来的优点值得重视。首先是精度高。更重要的是，使这些标准容易为人们广泛接受。任何一个能接收标准频率广播的实验室，利用比较简单的低温仪器，就能建立起本地的电学标准，其精度比直到最近只能在大型标准化实验室中用一整套复杂的标准电池和电阻所能取得的更高。

A. H. 库克

1978 年 1 月于剑桥

序 言

本书阐述频率和时间的测量，目的是向物理学家和工程师提供近 20 年间发展起来的测量技术的基本知识。它的特点之一是将说明：由于原子时标取代了自人类文明开始以来就懂得的天文时，一场无声的革命就已经出现。这是量子物理学和电子学目标一致的研究成果：量子物理学揭示了基本的自然现象；电子学提供了开辟测量科学技术新阶段的技术手段。

由于当前使用的时标都以原子钟的工作为基础，天文学似乎已失去其确定时间定义的统治地位。然而，采用改善后与地球旋转速度变化无关的时标，表面上看起来是得不偿失的。几年前，编写一本守时的书，至少要有一篇天文学的引论，否则将是不可设想的。本书违反了这个惯例。这决不是由于缺乏兴趣，而是没有必要试图改写一章至少暂时已经结束的历史。

当作者应邀为学术出版社*的新编“物理测量丛书”撰写本书时，还没有本学科的最新综合性教科书，而本学科迅速发展时期（特别是 1960—1970 十年间）的新资料广泛地分布在大量的杂志、会议录和各种多少有点名气的报告中。

全书共分八章。第一章作为绪论，试图向读者说明频率和时间测量在许多科技领域中的重要作用。

作者必须把有限的篇幅主要用于阐明频率、时间精密测

* 此出版社是指伦敦学术出版社。——译者

量的基本原理和技术。因此，有许多问题留给读者自己去思考。尽管如此，第八章还是有大量与应用有关的附加资料。

第二章到第七章构成本书的主体，内容有频率稳定性、稳定频率的产生和调整、时标的定义和产生、各种测量技术等基本概念。

第八章评述无线电信号时间、频率比对法的广阔活动领域，同时说明时间-频率技术一些最重要的应用。

作者意识到不可能对这个题材作详尽无遗的论述。为了简明扼要，使本书篇幅适当缩小，必须把不少有意义的细节删去。本书基本上应归功于参考文献中引证的许多作者的工作。作者希望表达他对全部同事的真诚感谢，期望任何一件有关的工作未被疏忽。

作者对审阅了第二章初稿的美国国家标准局的 David W. Allan、允许我复印一些有关报告的国际无线电咨询委员会、协助编辑第五章的瑞士邮电管理局的 Kurt Hilty、不断地关心本书的瑞士邮电管理局研究发展部长 Willy Klein 先生和提出许多有益而鼓舞人心意见的本丛书编辑 A. H. 库克教授，以及最后对参与手稿整理工作的作者夫人 Sylvia P. 卡塔肖夫等，谨致谢意。

P. 卡塔肖夫

1978年1月

于瑞士：伯尔尼和纳沙泰尔

符 号 表

		引入和使用的章节
α	归一化频率漂移率	§2.2, §4.4
	辅助变量	§3.3
A	鉴相器电压系数 (V/rad)	§3.5
$A(t)$	振幅函数	§3.4
A_0	振幅的峰值	§3.4
B	噪声带宽 (Hz)	§7.3
b	微扰振幅	§3.3
C	电容 (F)	§3.2
C_H	二级 Zeeman 效应系数 (Hz/Oe ²)	§3.3
C_n	第 n 次谐波的傅里叶系数	§3.4
$C_p(t), C_q(t)$	波函数	§3.3
D	大圆距离	§8.2
DUT1	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	欧勒数 $e = 2.71828\dots$	第一章
	电子电荷 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ As	第一章
F	原子的角动量量子数	§3.3
f	频域分析中的频率变量, 即傅里叶频率	§2.2
f_1, f_h	下截频和上截频	§2.2
f_A/f_B	频率比	§5.4
f_i	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	第一章
g	地球重力加速度	第一章
H	海拔高度	第一章
H_0	直流磁场 (Oe)	§3.3
	式(3.12)中未微扰的哈密顿量	第一章
h	普朗克常数 $h = 6.62 \times 10^{-34}$ Js	第一章
$\hbar$	$h/2\pi$	§3.3
h_n	振荡器噪声模型幂级数表达式的 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
l	电子自旋量子数	§3.3
$J, K, Q, \bar{Q}, D, R, S$	双稳态触发器集成电路的逻辑符 号	§3.4
K	压控振荡器 (VCO) 的压控系数	§3.5
K_n	谱密度与阿仑方差间的换算常数	§2.3
K_0	锁相环增益	§3.5
k	罗兰-C 波形系数	§8.4
L	自感 (H)	§3.2
$\mathcal{L}(f)$	1Hz 带宽内, 相位噪声调制(小调 制系数) 归一化单边带 (SSB) 功率谱密度	§2.5
M	采样组数	§2.2
	分频比	§3.5

m	变压器匝数比	§3.4
m_p	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	在每组内的采样次数	§2.2
	分频比	§3.4
P	功率 (W)	§3.3
P_0, P_n	基波和第 n 次谐波功率	§3.4
$P_{p,q}$	跃迁几率	§3.3
Q	品质因素	§3.2
r	径向坐标	第一章
	$r = T/\tau$, 空时比	§2.2
R	电阻(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	拉普拉斯变换中的复数频率变量	§3.5
$S_y(f)$	随机变量 $y(t)$ 的谱密度	§2.2
	注意: 其它变量的谱密度按同样	
	方式定义: $S_\phi, S_x, S_{U_0}, S_\omega$ 是 $\phi,$	
	x, U_0, ω 等的谱密度	§2.2; §7.3
S_{ϕ_1, ϕ_2}	测量两个振荡器的相位差时, 它们	
	的合成相位噪声谱密度	§7.3
t	用作独立变量或参量的时间	§2.1
	相互作用时间	§3.3
t_k	第 k 次采样的开始时间	§2.2
t_s	同步延迟	§4.4
T	周期性波形的周期	第一章
	两次采样之间的时间间隔	§2.2
T_i	相互作用时间	§3.3
$T_{1, \tau}$	时间常数	§3.5

TAI	国际原子时标	§4.2
$T(t)$	作为参考时间函数的钟读数	§4.4
T_i	钟脉冲周期	§5.3
T_d	显示时间	§5.3
T_s	传播时间	§8.6
$U, U_0, \text{等等}$	电压振幅, 直流值	§2.1
$U(s)$	$u(t)$ 的拉普拉斯变换	
u	辅助变量 $u = \pi/\tau$	§2.2
$u(t)$	瞬时信号电压	§2.1
UT	世界时	§4.2
UT 0, 1, 2	各类世界时	§4.2
UTC	协调世界时	§4.2
U	引力势	第一章
U_T	地心坐标系中的总相对论势	第一章
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	第一章
$W_{p,q}; W_{1,2}$	量子能级的能量	§3.3
$x(t)$	相位-时间 (s)	§2.1
$X(s)$	$x(t)$ 的拉普拉斯变换	§3.5
$y(t)$	相对于标称值的归一化频偏	§2.1
$\bar{y}_k(t_k, \tau)$	在时间 t_k 时, 随机过程 $y(t)$ 在时间间隔 τ 内的采样平均	§2.2
$y_r(t)$	$y(t)$ 的随机过程部分	§2.2
$x_r(t)$	$x(t)$ 的随机过程部分	§2.2
α	$S_y(f)$ 的幂级数表达式的指数	§2.2
β, β_A, β_B	纬度	§8.2
γ	变容二极管电压系数	§3.4
δ	冠于小偏离量前的符号	§2.2

	大圆的圆心角	§8.2
$\delta\nu$	绝对频偏	§2.2
$\Delta_1, \dots, \Delta_2, \dots$	一阶和二阶有限差	§4.4
Δ_1, Δ_2	时间延迟	§8.6
Δ_{12}, Δ_1	时间延迟	§8.7
Δf	谱密度分析中的分辨率带宽	§2.4
$\Delta\phi$	相位角差	§2.2; §3.5
$\Delta\tau$	相位-时间差	§2.2; §3.5
ΔU_i	触发器电压窗口	§5.2
δ	任一小误差,例如在谱密度估计中	§2.4
θ	纬度角的余角, $\theta = 90^\circ - \beta$	第一章
	辅助变量	§3.2
$\lambda, \lambda_A, \lambda_B$	经度	§8.2
μ	两次采样阿仑方差的振荡器噪声 模型的各项的指数	§2.3
μ_{eff}	有效磁偶极矩	§3.3
ν	频率 (Hz)	第一章
ν_m	被测频率	第一章
ν_0	标称频率, 定义为恒量	§2.1
ν_b	拍频	§5.6
ν_{T0}	转移振荡器频率	§5.7
ν_p	随时间变化的频率	§2.1
ν_i	被测频率	§5.3
σ	标准偏差	§2.2
σ^2	方差	§2.2
$\langle \sigma_i^2(N, T, \tau) \rangle$	N 次采样阿仑方差的一般式	§2.2
$\sigma_i^2(\tau) = \sigma_i^2(2, \tau, \tau)$	两次采样的阿仑方差	§2.2
$\sigma_H^2(N, \tau)$	阿达马方差	§2.4
τ	平均时间, 采样时间, 观测期	§2.2
ϕ	经度	第一章
	相位角(度或弧度)	§2.1

	接触电位 (V)	§3.4
$\phi(t)$	$\phi(t)$ 的拉普拉斯变换	§3.5
ω	角速度	第一章
ω	角频率 (rad/s)	
$\omega_{p,q}$	与能级 $w_{p,q}$ 对应的角频率	
		§3.3

目 录

符号表.....	ix
第一章 绪论.....	1
第二章 频率稳定度测量.....	14
§ 2.1 频率稳定度简介.....	14
§ 2.2 统计测量.....	16
§ 2.3 振荡器噪声模型.....	26
§ 2.4 利用时域数据进行谱密度估计.....	31
§ 2.5 相位噪声与信号频谱的近似关系.....	36
第三章 标准频率发生器和钟.....	39
§ 3.1 引言.....	39
§ 3.2 石英晶体振荡器.....	39
§ 3.3 原子频率标准.....	46
§ 3.4 倍频和分频.....	70
§ 3.5 频率综合.....	91
第四章 时标.....	103
§ 4.1 引言.....	103
§ 4.2 钟和时标.....	103
§ 4.3 国际协调.....	110
§ 4.4 时标的产生.....	113
§ 4.5 时码.....	131
附录 4.1	141
第五章 用计数器测量频率和周期.....	143
§ 5.1 引言.....	143
§ 5.2 用时控门电路计数法直接测频.....	143
§ 5.3 周期测量.....	152

§ 5.4	频率比测量	156
§ 5.5	时间间隔测量	157
§ 5.6	提高频率测量的分辨率	161
§ 5.7	微波频率的测量	164
第六章	相位-时间的测量	168
第七章	频域测量技术	174
§ 7.1	引言	174
§ 7.2	直接频谱分析	174
§ 7.3	用锁相环测量低电平相位噪声	178
§ 7.4	用锁相环进行时域测量	186
第八章	无线电信号的比对方法	189
§ 8.1	引言	189
§ 8.2	高频标准频率和时间信号	192
§ 8.3	低频连续波系统	197
§ 8.4	罗兰-C	203
§ 8.5	甚低频系统	215
§ 8.6	电视定时方法	218
§ 8.7	卫星系统	225
§ 8.8	其它时间比对系统	232
附录		234
第九章	其它参考资料和注意事项	262
参考文献		265

第一章 绪 论

在科学和工程的所有实验工作中，频率和时间的测量是十分重要的。时间出现在描述自然现象的大多数方程里，这一事实明显地证明了它的重要性。

与长度、质量、温度这样一些可测量相比，时间具有它的动态特性。时间与前面这些量不同，它不能保持恒定，就是说，时间在流逝，不可能停住。

钟可以被停住，这时，它就在自己的时标上显示出一个钟点或时刻，即钟被停止的时刻。然而，时间在继续流逝，如果停住的钟正巧是我们手头仅有的一台，这时我们就会永远地失去时标。如果我们让钟重新走起来，它就走晚了。晚了多少呢？只有借助我们做简单实验时仍在走着的另一台钟才能找到答案。

这里，我们已含蓄地使用了时间的两种含义，即在具有确定起点的时间坐标轴上的时刻（或日期，见第四章），以及钟停走期间所经历过的时间间隔。甚至不进行测量，也可以用通俗的语言表达时间的这种双重含义，即

(a) 现在是喝茶的时间——时刻；

(b) 我们度过了一段美好的时间——时间间隔。

频率是一个与时间密切相关的量，人们往往很随便地把它视为时间的“倒数”。这不完全正确，频率的概念是从观测周期性事件得来的。所谓周期性事件，是指按有规则的间隔（时间间隔）重复出现的事件，例如摆的振动。如果这个间隔是恒定的，它就称为周期 T ，这样，振荡频率 ν 确实就是周