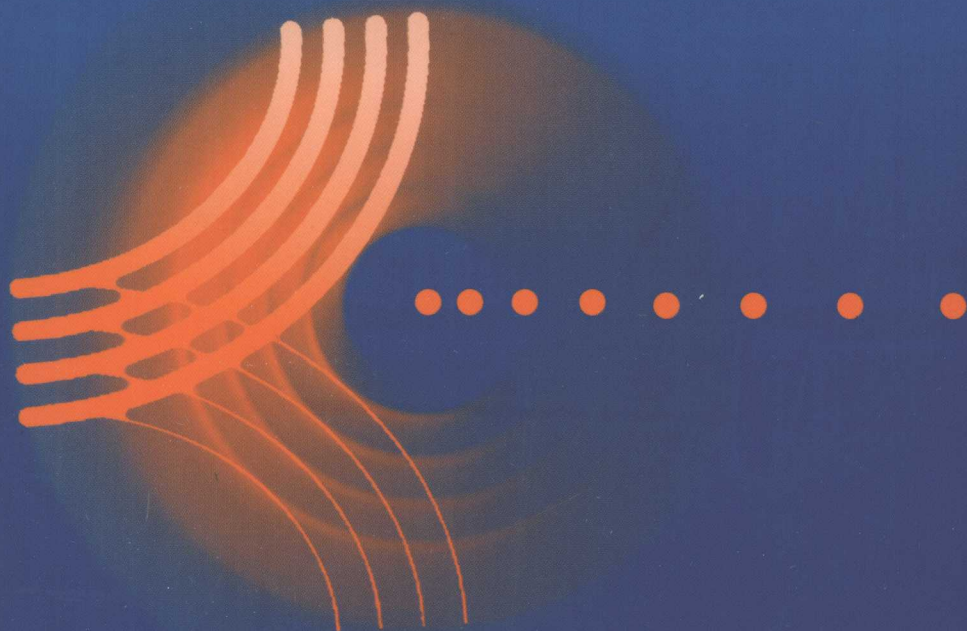


计量检测人员培训教材

# 时间频率计量

国家质量监督检验检疫总局计量司 组编

马凤鸣 主编



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

计量检测人员培训教材

第 11 分册

# 时间频率计量

国家质量监督检验检疫总局计量司 组编

马凤鸣 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

时间频率计量/马凤鸣编著; 国家质量监督检验检疫总局计量司组编. —北京: 中国计量出版社, 2008. 7

计量检测人员培训教材

ISBN 978-7-5026-2847-5

I. 时… II. ①马…②国… III. ①时间计量—技术培训—教材②频率计量—技术培训—教材 IV. TB939

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 078724 号

## 内 容 提 要

全书共分九章。主要内容包括: 秒的定义及时频计量单位, 铯、氢、铷三种原子频标及石英晶体频标的工作原理, 频标的所有计量性能指标的物理含义及定量的数学表征, 时间间隔及频率量值的测量方法, 时间与频率合成器的工作原理, 秒表、毫秒计等测量器具的工作原理及其检定, 协调世界时 UTC 的产生过程以及各地区使用的标准时间与 UTC 保持同步的方法, 时频计量结果的不确定度及特定的评定方法等。

本书可作为相关专业计量检测人员的培训教材, 也可供各大专院校计量专业师生以及计量工程技术人员参考使用。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787mm×1092mm 16 开本 印张 12.75 字数 289 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

\*

印数 1—1 500 定价 (平装): 32.00 元

# 总 序

计量是关于测量的科学，是实现单位统一、量值准确可靠的活动。通过计量获得的测量结果是人们认识自然、利用自然和改造自然的重要信息工具。实际上，计量已渗透到各行各业，成为支持经济社会有序运行和可持续发展的必要条件，也是推动科技创新、提高综合国力、实现国民经济又好又快发展的重要手段。

21世纪头20年是我国经济社会发展的重要战略机遇期。对计量工作而言，既有难得的发展机遇，也面临着巨大的挑战和考验。科学技术的迅猛发展，对作为技术创新基础的检测技术和计量保证能力产生了巨大的需求；经济结构的战略性调整和技术创新能力的明显增强，对现有的计量基标准和量值传递、量值溯源体系提出了一系列新的要求。目前，计量检测工作的内容和运作方式发生了较大的变化，计量仪器、测量手段、检测技术有了很大进步，出现了很多新型的、多参数的、多功能的测量设备和仪器；国家计量检定规程和国家计量技术规范有许多进行了修订；计量检测人员新老交替，国家对从事计量检定、校准、检验、测试等计量技术工作的专业技术人员已实行注册计量师制度。

为了加强计量专业技术人员的培训，提高计量专业技术人员素质，推动注册计量师制度的实施，我们组织有关专家编写了《计量检测人员培训教材》。这套教材涵盖了长度、热工、力学、电磁、电子学、时间频率、光学、电离辐射、声学、化学等十大计量，并介绍了计量管理和计量技术基础知识，内容丰富，知识新颖。我相信，《计量检测人员培训教材》的编撰和出版，对提高计量专业技术人员的素质，推动注册计量师制度的实施，必将起到积极的作用。

国家质量监督检验检疫总局副局长



2007年4月

## 《计量检测人员培训教材》编审委员会

主 任：宣 湘

副 主 任：刘新民 宋 伟 马纯良

委 员：（按姓氏笔画排序）

马凤鸣 马肃林 于 靖 王建平 王顺安

邓媛芳 刘国普 艾明泽 邵 力 陈 红

陆志方 陆祖良 张益群 周伦彬 钟新明

郭洪涛 黄 涛 程新选 蔡新泉 薛润秋

### 第 11 分册 《时间频率计量》

编 著：马凤鸣

# 计量检测人员培训教材

- 第 1 分册 《计量管理基础》
- 第 2 分册 《计量技术基础》
- 第 3 分册 《长度计量》
- 第 4 分册 《温度计量》
- 第 5 分册 《力学计量》
- 第 6 分册 《电磁计量》
- 第 7 分册 《无线电计量》
- 第 8 分册 《光学计量》
- 第 9 分册 《电离辐射计量》
- 第 10 分册 《声学计量》
- 第 11 分册 《时间频率计量》
- 第 12 分册 《化学计量》

# 前 言

时间频率领域的计量仪器有两大类：第一类是给出准确已知的频率和时间间隔，可简称发生器；第二类是用于测量未知的频率和时间间隔，可简称测量仪。无论是发生器还是测量仪，内部都备有一标准源，一般是石英晶体振荡器，个别的为铷原子振荡器。计量工作的首要任务就是检测这些标准源的特性指标，确保所给量值的准确可靠。

量值的统一过程是自上而下（称为传递）或自下而上（称为溯源），这就需要有一个最高的标准源，在我国称为基准。时间频率基准器就是时间基本单位秒的复现装置。本教材首先介绍的就是秒的定义及复现方法和目前达到的复现准确度。

现在广泛使用的不是时频基准，而是由基准逐级传递下去的频率标准：石英晶体频标和各种原子频标。这些频标的设计和制造都需要特定的专业知识和复杂的技术，对于计量人员不要求了解得太深入，故第二章只简单介绍各种频标的基本组成和工作原理。重点是第三章论述的频标的计量特性指标，一定要透彻地理解和掌握这些指标的物理意义和数学表征。

在量值传递系统表中，除各级计量标准外，还有相应的检定方法或校准方法，即需要一些测量装置。传递，是在频标之间，故使用最多的是高分辨力的频标比对器。第四章较全面地介绍了时间频率的测量方法和测量误差的来源，特别着重分析各种频标比对器的工作原理、测量分辨力及对频率稳定度的测量。

第五章的内容是频率合成器与时间合成器。随着电子学的进展，两种合成器给出的步进量愈来愈小，频率已到微赫，时间间隔已小于纳秒。涉及的技术较难，因此也只要求计量人员能简单地了解基本合成方法。第六章详细地介绍一些简单的时间间隔测量仪：秒表、电秒表、毫秒计及校表仪。这些仪表的检定不难但数量多，故论述得较全面并给出了一些检定方法。

时间计量，大部分检定人员接触到的是时间间隔：各种发生器和测量仪。关于时刻（俗称标准时间）仅限于少量的一级计量部门。但对于时频计

量工作者也应有所了解，第七章简单介绍了一些这方面的内容：国际上统一时间（UTC）的产生、各国家和地区所用标准时间的来源、全球定位系统（GPS）在时间同步上的应用以及标准时钟的计量特性。

近几年，“校准”在慢慢取代“检定”，校准结果的测量不确定度占了很重要的位置。鉴于时频量值使用的特点，编者关于时频校准结果不确定度的表示提出了个人看法，作为本书第八章的内容，此观点尚未在国内认定，希望能够引起广泛的讨论。

本教材是按检定人员考试大纲编写的，大纲要求分三个层次：掌握、熟悉和了解。但在内容上难于注明，望广大读者能提出增减的建议，以便进一步修订。

编者

2008年7月



# 目 录

<b>第一章</b>	<b>秒定义及时频计量单位</b> .....	( 1 )
第一节	平太阳秒 .....	( 1 )
第二节	历书秒 .....	( 3 )
第三节	原子秒 .....	( 3 )
第四节	原子秒的复现 .....	( 6 )
第五节	时间频率的计量单位 .....	( 10 )
<b>第二章</b>	<b>频率标准</b> .....	( 12 )
第一节	石英晶体频标 .....	( 12 )
第二节	原子频标 .....	( 17 )
<b>第三章</b>	<b>频标的计量性能</b> .....	( 27 )
第一节	噪声及对信号的调制 .....	( 28 )
第二节	频率稳定度的频域表征——相位噪声 .....	( 31 )
第三节	频率稳定度的时域表征——阿仑(Allan)方差 .....	( 35 )
第四节	频率漂移(老化) .....	( 46 )
第五节	频率准确度 .....	( 48 )
第六节	开机特性 .....	( 49 )
第七节	频率重现性 .....	( 50 )
第八节	频率的环境特性 .....	( 51 )
<b>第四章</b>	<b>测量技术</b> .....	( 52 )
第一节	一般计数器 .....	( 53 )
第二节	高分辨力计数器 .....	( 60 )
第三节	微波频率计数器 .....	( 69 )
第四节	频标比对器 .....	( 72 )
第五节	相位噪声测量 .....	( 86 )

<b>第五章 时间与频率合成器</b> .....	(91)
第一节 时间合成器 .....	(91)
第二节 频率合成器 .....	(96)
<b>第六章 秒表、电秒表、毫秒计和校表仪及其检定</b> .....	(106)
第一节 机械秒表 .....	(106)
第二节 电子秒表 .....	(108)
第三节 秒表的检定 .....	(109)
第四节 电秒表 .....	(112)
第五节 电秒表的检定 .....	(114)
第六节 数字式电秒表(415型) .....	(116)
第七节 毫秒计 .....	(120)
第八节 校表仪 .....	(124)
<b>第七章 标准时间与数字时钟</b> .....	(129)
第一节 标准时间 .....	(130)
第二节 数字时钟 .....	(146)
<b>第八章 时间频率校准时的不确定度</b> .....	(157)
第一节 频率标准校准时的不确定度 .....	(158)
第二节 频率合成器校准时的不确定度 .....	(167)
第三节 时间合成器校准时的不确定度 .....	(167)
<b>第九章 复习题</b> .....	(173)
<b>附录 JJF 1180—2007 时间频率计量名词术语及定义</b> .....	(181)

# 第一章

## 秒定义及时频计量单位

第一次科学地定义秒长是 1820 年从地球自转周期导出的平太阳秒，一直使用到 1960 年。随后是从地球公转周期导出的历书秒，仅仅使用到 1967 年就被原子秒取代了。每次定义的变迁，都是由于找到了更稳定的周期性运动。本节重点介绍原子秒。

### 第一节 平太阳秒

平太阳秒是以地球自转周期为基础导出的时间基本单位。其准确性取决于地球自转的稳定性。

以真太阳为参照物观测地球的转动得出的秒称为真太阳秒。

地球上的观测者所在点与地球自转轴所在的平面称为子午面。地球自转期间真太阳穿过子午面的时刻称为太阳对该观测者的中天。显然，地球每自转一周，中天将出现两次。观测者上方的中天称为上中天，下方(在地球的另一面)的中天称为下中天。

真太阳连续两次上(下)中天的间隔称为一个真太阳日。由此得

$$\text{真太阳秒} = \frac{\text{真太阳日}}{86\,400}$$

如果地球除自转外，再无其他运动，则一个真太阳日就等于地球自转的周期。但实际上，地球在自转的同时还绕太阳公转，这样在第一次上中天开始地球自转一周后，第二次上中天尚未到来，地球还需继续转一个角度才到达第二次上中天。由此造成下列结果

$$\text{真太阳日} = \text{地球自转周期} + \Delta T(\theta)$$

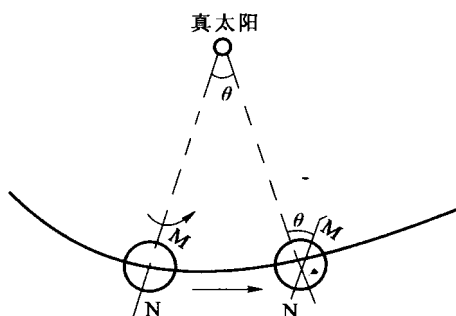


图 1-1 真太阳日与地球自转周期的关系

其中  $\theta$  即为多转的角度，近似等于地球在公转轨道上在地球自转周期内相对太阳扫过的圆心角， $\Delta T(\theta)$  为转过此圆心角所用的时间。如图 1-1 所示。

地球公转的轨道是一椭圆，故其公转的角速度是不断变化的，这就造成每一真太阳日内的  $\Delta T(\theta)$  值均不一样，在近日点处最大，远日点最小，两者之差约 51 秒。由此得出的真太阳秒也就不够均匀，即不够稳定。

1820 年，法国科学院决定用一年内真太阳秒的平均值作为时间基本单位，称为平太阳秒，即

$$\begin{aligned} \text{平太阳日} &= \text{一年内所有真太阳日的平均值} \\ &= \text{地球自转周期} + \Delta \bar{T}(\theta) \end{aligned}$$

$\Delta \bar{T}(\theta)$  为  $\Delta T(\theta)$  在一年内的平均值

$$\text{平太阳秒} = \frac{\text{平太阳日}}{86\,400}$$

这是历史上第一次给秒进行科学定义。

显然，平太阳秒比真太阳秒稳定，且取决于地球自转周期的稳定性。但这样定义的秒在复现上比较困难。一是需观测一年，二是观测误差较大，因为真太阳对观测者是一大的发亮的圆面，很难对准圆心。到 1886 年国际天文学会对平太阳秒的定义进行修正，其量值与上述的定义值完全一样，但易于复现。其含意如下。

假定空间还存在另一个太阳，地球自转的同时，在一个圆形轨道上绕其公转，公转轨道的平面与地球赤道平面重合，公转的角速度等于绕真太阳公转时一年内角速度的平均值。这一假想的太阳称为平太阳。于是

$$\text{平太阳日} = \text{平太阳连续两次上(下)中天的时间间隔}$$

$$\text{平太阳秒} = \frac{\text{平太阳日}}{86\,400}$$

这一定义的变更是在天体力学发展的基础上进行的。在天文学上可以准确计算出恒星和平太阳的关系，而恒星相对地球观测者来说是一个很远的亮点，故能准确的观测出恒星日，由此又可以准确地计算出平太阳日，而且只要观测一天就可得到足够的准确度。

平太阳秒的具体复现最初用机械的天文钟，后用石英钟得到。连续两次天文观测后对钟进行校准，由钟给出的秒长即为平太阳秒。显然，这样实际给出的秒的稳定性与所用时钟的稳定性有关。

到了 20 世纪中期，高稳定的石英钟出现了，发现地球自转周期的稳定性只有  $10^{-8}$  量级，即一个平太阳日的长短有毫秒级的变化。为了寻找更稳定的时间计量单位，到 1960 年出现了秒定义的第一次变迁——历书秒。

## 第二节 历书秒

历书秒是由地球公转周期导出的时间基本单位，排除了地球自转不稳的影响，因而比平太阳秒稳定。

地球公转一周的时间为一年。年的更确切定义是平太阳连续两次经过春分点的时间间隔，称为一个回归年。回归年的长度相当于 365 个平太阳日又 5 小时 48 分 45.974 7 秒。换算成平太阳秒后为

$$1 \text{ 回归年} = 31\,556\,925.974\,7 \text{ 平太阳秒}$$

这个关系对所有的回归年都成立。如前所述，由于地球自转不稳，每一回归年内的平太阳秒都不一样，因而各回归年的长度也就随之存在差异。历书秒是利用 1900 年的回归年定义的。即：

历书秒为 1900 年 1 月 0 日 12 点开始的一个回归年的  $31\,556\,925.974\,7$  分之一。

实际上，历书秒就是 1900 年的平太阳秒。即把那一年的平太阳秒值作为新的时间基本单位定义下来，因此这是一个固定值，其本身不会有任何变化。实用的历书秒的准确度是来源于复现上。

历书秒仅仅是一个纸面上的定义值。只是在 1900 年出现过，但那一年的回归年与太阳、月亮及其他星体相对地球运动的周期存在着严格的数学关系，这种关系并未随着 1900 年的过去而消失。故可通过这些星体主要是月亮运动情况的测量推算出历书秒。所推算出的秒长准确度，即与定义值的偏差，取决于测量和推算时的误差。要进行三年的观测，所复现的历书秒的准确度才能达到  $10^{-9}$  量级。

关于历书秒的定义及复现是一个复杂的天体力学问题。又由于三年的观测才能得到  $10^{-9}$  的准确度，故不做详细介绍，历书秒仅仅使用了 7 年，到 1967 年就让位给原子秒了。

## 第三节 原子秒

原子秒是由原子振荡周期，即原子跃迁时发射或吸收电磁波的周期导出的时间基本单位。这种振荡周期的稳定性有多高，目前理论上还无法证明。但复现的结果与定义值的偏差却能做到很小，到 1995 年已达到了  $10^{-15}$  量级。

原子秒是 1967 年第 13 届国际计量大会决定采用的，其定义为：

“秒是铯-133 原子在其基态两个超精细能级间跃迁时辐射的  $9\,192\,631\,770$  个周期所持续的时间。”如图 1-2 所示， $E_1$ 、 $E_2$  为两超精细能级， $\tau_0$  为跃迁时的辐射周期。

对于此定义要着重理解；为什么选用基态的超精细能级，为什么选铯-133（铯的同位素），又为什么选取这样一个难记的整数。

### 一、理论关系

在原子内部，电子绕着原子核旋转具有动能，电子与原子核之间的静电作用又具有静电势能，电子与电子之间也具有静电势能……这些能量的总合称为原子的总内能量，简称原子

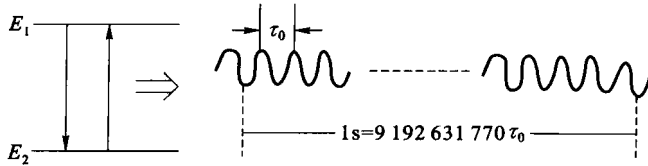


图 1-2 原子秒

的能量。原子能量的数值决定于原子中各电子的运动状态。每种运动状态对应着一定的总能量。

量子理论认为：原子中电子的运动状态不能是任意的，每种原子只能有若干个特定的运动状态，由此，每种原子的能量只能取若干个特定的值。这些可能的能量值称为能级，其分布如图 1-3 所示。

某种原子的能级是指这种原子可能具有的能量。对于一个原子而言，在某一时刻只能处在其中某一种运动状态，或者说只能处在某一个能级上。最低的能级，即原子具有最小能量时的运动状态称为基态，其他能级称为激发态。在同一温度下，大量原子在各个能级上原子数的分布如图 1-4 所示。

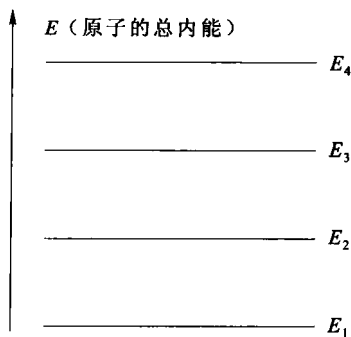


图 1-3 原子的能级

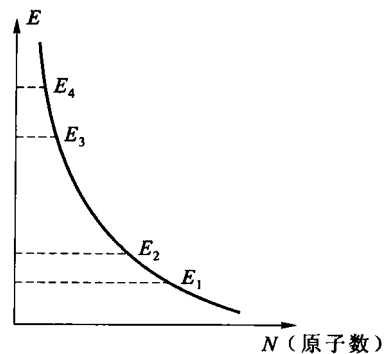


图 1-4 原子在能级上的分布

由图 1-4 可看出，绝大多数原子都处于基态上，激发态愈高，原子数愈少。原子在一定的外界条件刺激下，可以从一个能级跳到另一个能级，即从一种运动状态改变到另一种运动状态。这种过程称为原子的跃迁。如果外界刺激是电磁波(光也属于电磁波)时，则发生的跃迁称为辐射跃迁。原子秒的定义以及各种原子频标所用的都是辐射跃迁。

当原子从低能级跃迁到高能级时，要从外界吸收一部分能量，反之就放出一部分能量。但跃迁是有条件的，只有当外界激励信号的频率满足下列条件时，跃迁才能发生

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-1)$$

式中： $h$ ——普朗克常数；

$\nu$ ——激励信号的频率；

$E_1, E_2$ ——跃迁的两个能级值。

换句话说，当原子跃迁时，无论是从外界电磁波吸收能量，还是以电磁波形式放出能量，这些电磁波的频率必须满足上式关系。从式中看出， $h$  为常数。理论证明原子的能级是非常稳定的，因而所对应的电磁波的频率，或者其倒数——周期也是非常稳定的，由此引发人们可利用这种振荡的周期建立时间基本单位。

## 二、实际要求

理论上,任何一种元素的原子在任何两个能级间跃迁时,所放出或吸收的电磁波的频率都遵循式(1-1),即都是非常稳定的,都可用于定义原子秒。但在复现上会受到现有技术条件及科学水平的限制。从实际复现角度应考虑:

(1) 所选的元素其原子的能级应尽可能简单。式(1-1)中的  $E_1$ 、 $E_2$  是计算得到的,原子能级愈简单,计算的准确度愈高。

(2) 所选的发生跃迁的两个能级之差应尽可能小。差值愈小,对应频率愈低,技术上愈容易实现。

(3) 所选用的跃迁能级上的原子应尽可能多,以便得到较强的跃迁信号。

从第(1)点要求看,氢元素的原子结构最简单,只有一个电子。其次是碱金属元素,即锂钠钾铷铯等,也只有一个价电子。这些元素的原子的能级都易于准确计算。但在实际研究中发现铯原子跃迁时,各种因素的影响较小,且可准确测定其影响量,故最后决定用铯原子跃迁时辐射的周期定义秒。铯-133 是天然存在的易得到的很纯的同位素。

考虑第(2)点的要求,当原子在基态和激发态之间或在两个激发态之间跃迁时,所对应的频率都非常高,都在光频范围,从技术上难于准确控制。只有在两个超精细能级间跃迁时,对应的频率才落在技术上已很成熟的无线电微波范围内。此外,从第(3)点要求,在正常情况下,大量的原子都处在基态上。故在原子秒的定义时选用了基态上的两个超精细能级。

前边分析的原子的能级只是粗略的一级近似,只考虑了电子与原子核间的静电势能(电子的动能与此相比其值很小)。实际上电子在绕核转动时相当一闭环电流,因而会产生磁场,此外电子除绕核公转外,本身还在自转(自旋),自转的方向又有两种,这种自转也会产生磁场。公转磁场与自转磁场之间发生相互作用,使电子在静电势能上又叠加上了一部分磁能。这样原来一级近似的能级就会分成两条新的能级,称为原子的精细能级,由于磁能很小,故精细能级之差比原来的能级差要小 3 个数量级。

再进一步深入研究,发现正电荷在原子核内的分布不能看作为一个点,故产生的电场不能简单的用点电荷电场处理,与电子相互作用的静电势能也发生了变化。此外,原子核本身也在自旋,也会产生磁场,这个磁场与电子运动的磁场相互作用的结果,使磁能也发生了变化。考虑了这两种作用后,原子的精细能级又会分成超精细能级,后者能级差又比前者能级差小 3 个数量级。如图 1-5 所示。

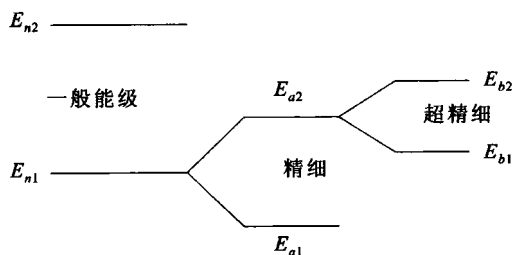


图 1-5 原子能级的分裂

## 三、秒定义的连续性

原子秒以其高度的稳定性取代了天文秒。但不能完全摆脱天文秒,对于一个物理量进行重新定义时,必须考虑量值的延续性。否则已经建立的或习惯的一些关系就会打乱。在测定

绝原子跃迁频率时，只能用当时使用的历书秒，测定结果是 $(9\ 192\ 631\ 770 \pm 20)\text{Hz}$ 。这个数值含意是每次测量的值都不同，其变化是在 $\pm 20\text{Hz}$ 以内。如果历书秒是绝对稳定的，则这种变化会看作是原子跃迁频率的不稳定。实际上后者是非常稳定的，这种测量结果的变化是在 $\pm 20\text{Hz}$ 范围内，正是历书秒不稳造成的。如果取原子跃迁辐射的 $919\ 263\ 170$ 个周期作为新的秒，则与原来的历书秒的差异只是在历书秒的不稳定部分。这就满足了定义值的延续性要求。

## 第四节 原子秒的复现

原子基态的超精细能级间的跃迁主要是受激跃迁，即需要在外界信号的激励下，低能级的原子会吸收一部分能量跳到高能级，高能级的原子会放出一部分能量跳到低能级。跃迁的原子数  $I$  与激励信号的频率  $\nu$  有关，如图 1-6 所示。

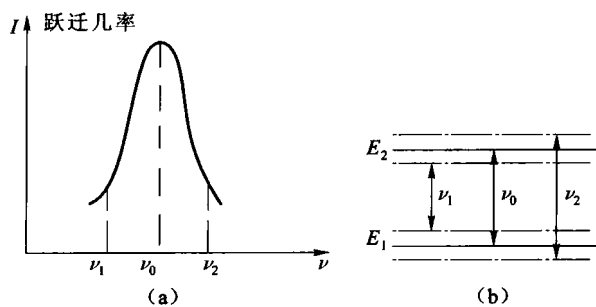


图 1-6 跃迁曲线

从前边的理论关系式(1-1)可以得出：如果两个能级  $E_1$  和  $E_2$  的值是惟一的确定值，则跃迁曲线应是一条直线。实际上，无论哪条能级都不是惟一的一个确定值，在能级图上并不是绝对的一条直线，而是有一定的宽度，如图 1-6(b) 所示，这种加宽的原因一是能级固有的，另一个是实现跃迁时各种外界因素的影响。而式(1-1)的关系是完全不变的，于是就产生

了图中所示的跃迁曲线，不同的能级差对应不同的跃迁频率。

原子跃迁曲线类似于普通振荡电路的谐振曲线，故发生原子跃迁的部分可简称为原子谐振器。由于是受激跃迁，秒定义的复现装置由两大部分组成，一种是原子谐振器，另一种是激励信号发生器。在跃迁曲线上只是中心频率是准确已知的，即  $\nu_0 = 9\ 192\ 631\ 770\text{Hz}$ ，必须加上控制部分调节激励信号的频率，使跃迁始终发生在中心频率对应的能级上。

原子秒定义的复现是通过复现原子跃迁频率得到的，故这种复现装置通常称为时间频率基准器，简称为铯原子钟。目前时频基准器有两种：一种是经典的，原子谐振器水平放置；另一种是新型的，原子谐振器垂直放置。

### 一、经典的秒定义复现器——磁选态铯原子钟

其基本构成如图 1-7 所示。

图中大方框部分为原子谐振器，置于高度真空的圆筒内，水平放置。

铯炉内装有粉末状铯元素，在高温下变成气体喷出通过选态磁铁，欲发生跃迁的两种能态( $E_1$  和  $E_2$ )上的原子在强磁场力的作用下向不同方向偏转，假设只有  $E_2$  态上的原子能穿过谐振腔，在微波激励信号的作用下发生跃迁，变成  $E_1$  态。通过同样的磁铁，称为检测磁铁，受到磁场力的作用向另一方向偏转，在偏转的路径上放一离化丝，在已跃迁的原子的冲击下产生离化电流，经过质谱计和电子倍增器放大形成足够强的电流，称为跃迁信号。



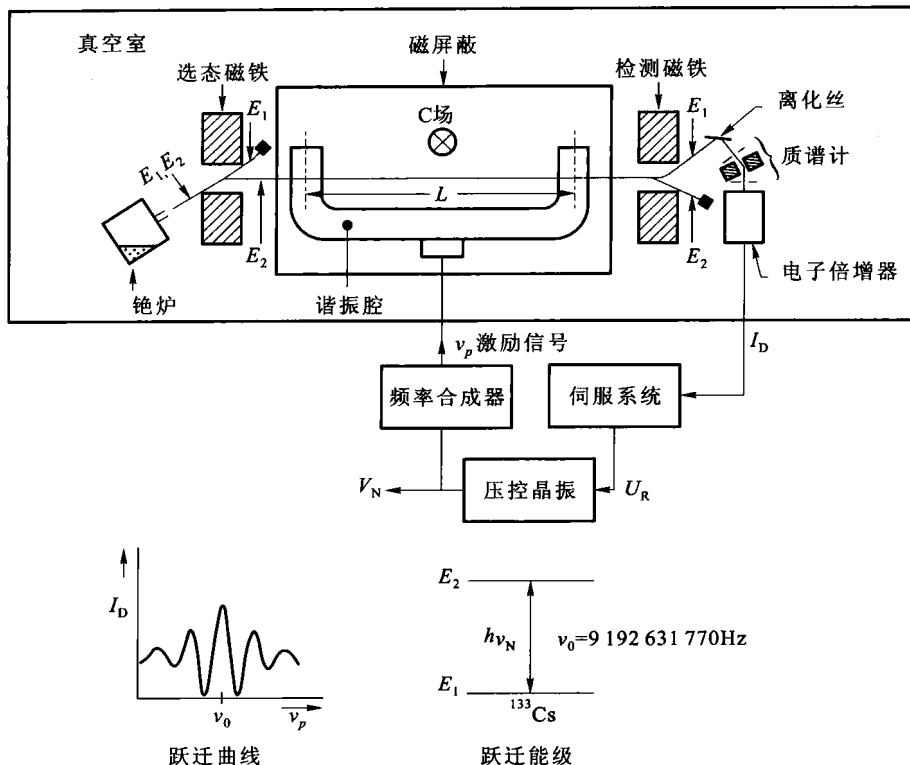


图 1-7 磁选态铯原子钟

激励信号是由压控晶振的频率，一般为 5MHz，综合得到。激励信号的频率(晶振的频率)发生变化时，跃迁信号的强度也随之变化，如图 1-7 中的跃迁曲线，只有当激励信号频率  $\nu_p$  等于所选跃迁能级对应的跃迁频率即  $\nu_0$  时，跃迁信号最大，此时晶振频率为准确的 5MHz。伺服系统的作用就是控制晶振的频率，使跃迁信号最大。

由跃迁曲线上看，当激励信号的频率偏离中心频率时，无论是增加还是减小，都使跃迁信号减小，而伺服系统必须给出方向相反的控制信号。解决办法是在激励信号上加一低频率调制信号，较详细的原理如图 1-8 所示。

当激励信号频率等于跃迁曲线上的中心频率时，在跃迁信号上只检测到调

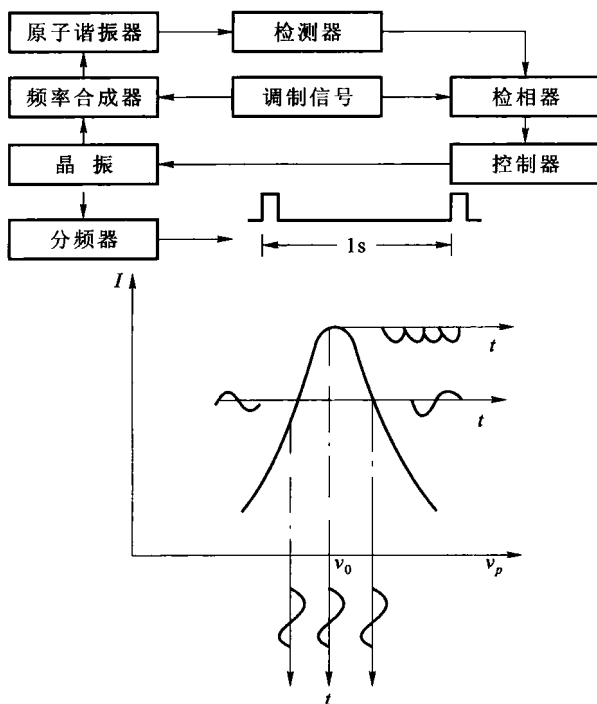


图 1-8 铯原子钟内的伺服系统