

物理学基础知识丛书

共振

李守中 编著

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书介绍了宏观和微观范围内形形色色的共振现象及其广泛应用。从力学中的强迫振动到电磁振动；从经典的力、声、电磁、引力波共振到各种量子共振，以及核物理、粒子物理中的共振。文中结合量子共振介绍了电磁波谱学。

本书内容丰富新颖、叙述深入浅出、插图生动，适于具有中等以上文化程度的中学生、大学生、科研干部及中学教师阅读。

物理学基础知识丛书

共 振

李守中 编著

责任编辑 姜淑华

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 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1987 年 6 月第一次印刷 印张：6 7/8

印数：0001—5,900 字数：152,000

统一书号：13031·3516

本社书号：4723·13-5

定价：1.30 元

代 序

1978年8月,中国物理学会在庐山召开年会,不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用,建议中国物理学会与科学出版社合作,编辑出版一套《物理学基础知识丛书》,有计划有系统地普及物理学的基础知识和介绍物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此,中国物理学会理事会进行了认真讨论,积极热情地支持了这一建议。于是,就在风景绮丽的庐山,在中国物理学会和科学出版社的共同主持下,正式成立了本丛书的编委会,讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划,正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律,物质的结构及其相互作用,它是许多科学技术的基础。从本世纪开始,物理学经历了极其深刻的革命,从宏观发展到微观,从低速发展到高速,由此诞生了量子物理学和相对论,并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来,物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就,不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用,使人类掌握了新的能源;半导体科学技术的发展,导致了计算技术和自动控制系统的革命;激光的出现焕发了经典光学的青春;凝聚态物理学的发展,使人们不断创造出许多性能大大提高的材料……。因此,向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展,乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的,就是试图在这方面贡献一份力量。

DAA11/61

• • •

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识,介绍物理学的最新发展,要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神,力求做到题材新颖。风格多样,勇于发表独创性、探索性的见解,以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动,深入浅出、引人入胜,以说透物理意义为主,尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中,我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励,还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、陆学善等同志的热情赞助和关怀。美国加州大学热斐尔学院院长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作,并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

本书序

众所周知,一个系统受到外界作用时,如果作用与系统的固有振动合拍,就会使之产生大幅度的振动,这叫做共振。儿童玩秋千是一种常见的共振现象。士兵列队整步通过桥梁,若步伐与桥梁振动合拍,甚至可能造成毁桥事故,这也是共振现象。

所谓合拍,就是频率相等或相近。共振就是利用合拍来有效积聚能量,使微弱的作用产生显著的效果。乐器利用合适的空腔可以加强音响,收音机和电视机可以利用调谐选择收听和收看所需要的节目,这些是声学 and 电磁学中熟知的共振事例。

波-粒子二象性的发现,表明波动的频率与其量子的能量成正比,合拍也意味着能量相符。因此,共振有其广得多的含意。原子-分子的共振荧光,微波频段的脉塞,光学频段的激光,原子核的共振反应,基本粒子中为数最多的成员——共振态或共振子——的产生……,这些都是形形色色的共振现象。

共振现象的研究不仅对于物理学的发展起了重要的作用,而且对于技术应用也有特殊的价值。值得注意的是,与共振有关的诺贝尔物理学奖金获奖项目就有好多,比如:马可尼关于无线电技术的发明,布洛赫和珀塞尔关于核磁共振的发明,卡斯特勒光泵技术的发明,穆斯堡尔效应的发现,巴索夫、普洛霍洛夫和汤斯发明的脉塞和激光,丁肇中和利希特发现的 J/ψ 粒子……。

可见,共振是一种十分普遍的自然现象,几乎在物理学的

各个分支中都可以观察到它,也用得着它。虽然,各种具体的共振现象看起来千差万别,细究之,却都由一种共同的规律性支配着。早在《物理学基础知识丛书》酝酿阶段,在1978年庐山召开的第一次丛书编委会会议上,我们就曾建议撰写一本以阐述共振为线索的书。这样一本书,把物理学各个分支中形形色色的共振现象串联起来,集中起来,用统一的观点,阐明其共同的规律性,并展示其广泛的应用前景。

编委会会议后,由赵凯华同志约请李守中同志撰写这本书,我们具体研究了写作方案。李守中同志长期从事物理教学,同时也从事波谱学特别是量子频标(这是共振现象最为丰富的学科之一)的研究,他对这些方面是熟悉的。相信这本书会对广大读者有所裨益。

陆 埏

1985年4月8日

目 录

第一章 一种随处可见的物理现象.....	1
一、从大桥上发生的惨祸说起	1
二、秋千、琴弦、收音机和日光灯 ——跨越物理学各个领域的共振	5
第二章 千里之行，始于足下 ——振动和共振的基本知识.....	10
一、钟摆里的学问——振动问题面面观	10
二、解剖麻雀——简谐振动	15
三、巧妙的能量转换机构——自由振动的实现	22
四、身不由己——强迫振动	24
五、秋千怎样才能荡得高？——共振条件.....	26
六、“原始”的推动者——自持振动	36
第三章 宏观范围内的共振.....	43
一、力学振动的内因——弹性	43
二、挑扁担的窍门和工程设计中的禁忌	44
三、力学共振的妙用——检测地震	47
四、声波	49
五、何处觅知音——人耳中精巧绝伦的共振系统	51
六、音乐中的共振	56
七、利用共振产生超声	57
八、耸人听闻的次声武器	61
九、怎样辨认电磁波	63
十、基本电磁振动系统—— LC 电路	65
十一、大自然的孪生儿——力电类比	73
十二、电磁波大家族	75

十三、引力波之谜——共振天线尚未成功	83
第四章 打开微观共振世界的大门	87
一、一个新天地	87
二、换一个角度观察共振	88
三、光谱线——原子对电磁波的共振	91
四、原子象嵌着葡萄干的蛋糕,还是象微型太阳系?	94
五、光谱线的启示——正整数在微观世界中出现	98
六、量子现象和普朗克常数 h ——微观世界的运动特征	102
七、量子共振条件——玻尔的重大贡献	105
八、氢光谱密码破译——量子共振理论初战告捷	110
第五章 量子共振和电磁波谱学	113
一、运动的多样性和谱线的多样性	113
二、宇宙之大、原子之微——谁向我们提供信息?	117
三、磁和光——塞曼效应	123
四、电子顺磁共振——灵敏、快速、精确的研究手段	128
五、用途广泛的核磁共振——从磁场测量到自旋成像	134
六、铁磁共振和回旋共振	140
第六章 核物理和粒子物理中的共振	145
一、谁是“宇宙的积木块”?	145
二、向更深的物质层次开炮——用粒子轰击产生的共振	151
三、微小原子核中的巨共振	157
四、新奇的穆斯堡尔效应——原子核的无反冲共振吸收	159
五、雪崩式的成果——广义相对论验证成功	165
六、第一个“共振态”的发现——粒子物理学出现新局面	167
七、共振方法发现粲夸克	171
第七章 双共振和新型的量子器件	172
一、能级上的“居民”和“居民”的搬迁——共振电磁 波变成了抽水泵	172
二、一加一不等于二	178
三、受激发射产生神奇的光波	181

四、原子钟——三十万年差一秒	184
五、怎样接收行星际飞船发来的微波信号 ——一种超低噪音的微波接收器	189
六、激光器、激光光谱学和共振	195
七、光泵磁强计——光磁双共振的巧妙利用	199
结束语	204

第一章 一种随处可见的物理现象

一、从大桥上发生的惨祸说起

据说,一百六十多年以前,不可一世的拿破仑率领法国军队入侵西班牙时,部队行军经过一座铁链悬桥.随着军官雄壮的口令,队伍踏着整齐的步伐逐渐接近对岸,正在这时,轰隆一声巨响,大桥塌毁了,士兵、军官纷纷坠水。



几十年后,圣彼得堡卡坦卡河上,一支部队过桥时,也发生了同样的惨剧。

从此,世界各国的军队过桥时,都不准齐步走,必须改用凌乱无序的碎步通过。

力学教科书告诉我们,这是一种共振现象。粗浅地说,就

是当外来力的振动节拍和物体本身固有的振动节拍相近时，外来力能使物体产生强烈的振动。

共振真有这样巨大的力量吗？人们在听到这类传说时，往往将信将疑——一百多年前的桥梁可能不很结实？是否士兵人数众多，超过了载重极限？再说行军步伐的节奏和桥梁的固有振动节拍之间又是什么关系呢？

确实，这个看似简单的问题里包含着不少学问，三言两语是无法使人信服的。事实上，它是共振问题中的一个典型例子，具有共振现象最本质的一些东西。这一点，待我们对共振的认识逐步深入之后，特别是待我们广泛接触到物理世界中形形色色的共振现象之后，回过头来就会看得非常清楚。

究竟什么是共振现象？

它怎样把大桥震塌？

下面先给出一个定性的解释。

每种弹性物体，譬如一块跳板、一根弹簧，其中也包括一座桥梁……，都有它自己的振动特性，这主要是指它的振动节拍。例如，跳板被运动员蹬过以后会上下振动（图 1.1），而振动一次所用的时间是有规律的，这就是跳板振动的节拍，它完全由跳板的材料、形状所决定。一根系有重物的弹簧（图 1.2），物理上叫做弹簧振子。拉它一下也会振动起来。振动一次所用的时间也是有规律的，这是弹簧振子的振动节拍，它由弹簧钢丝的弹性和重物的质量所决定。可见，一个弹性物体受到外力作用后会发生振动，而振动的节拍则决定于物体本身的性质。

如果有一个外力连续地、有节奏地施加在弹性物体上——譬如运动员有节奏地在跳板上跳跃，或者人们以一定的节奏去拉（或推）弹簧——会出现什么现象呢？日常的经验告诉我们：当外力的节拍和物体自身固有的振动节拍“合拍”时，

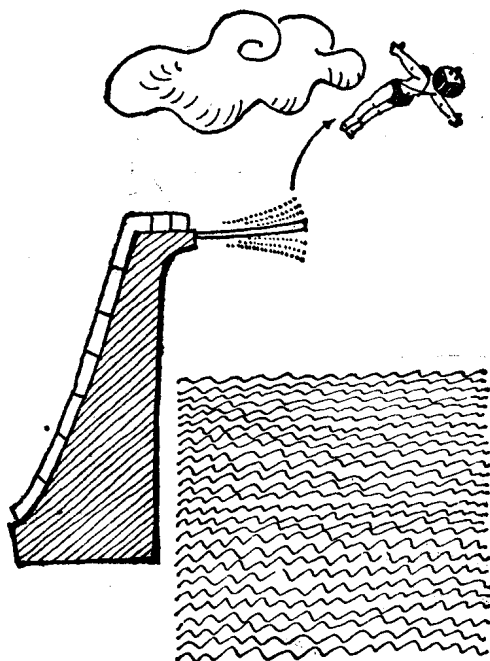


图 1.1 跳板

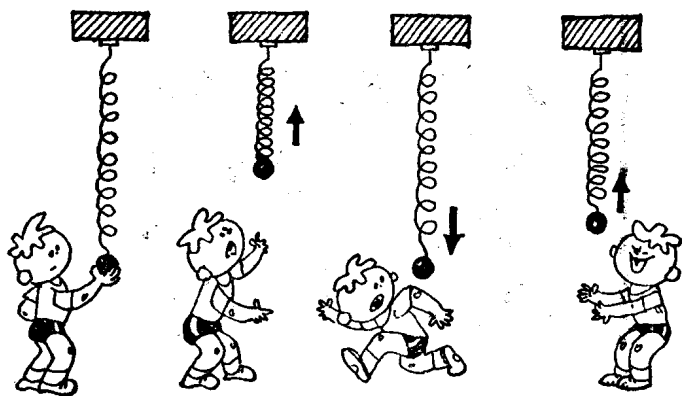
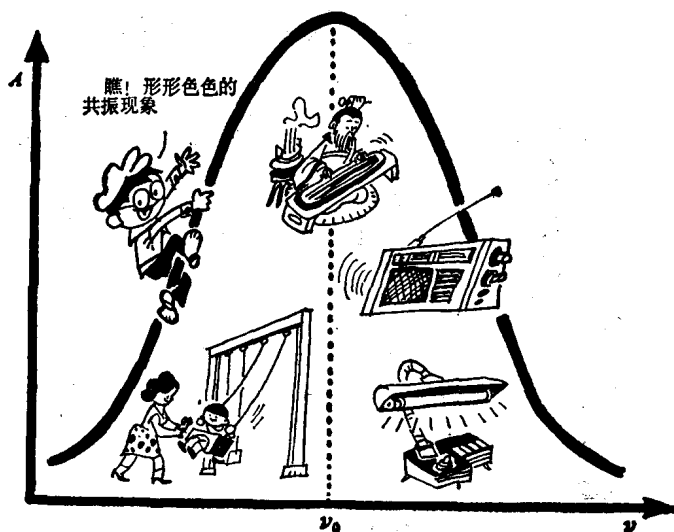


图 1.2 弹簧振子

物体产生的振动最为强烈。

这里我们所用的“合拍”这个词，其实就是共振的一种通俗说法。具体地讲，当人们按照弹簧振子原有的振动节奏，一下一下地去推动它时，这种“合拍”的外力就能使弹簧越振越强。这是弹簧振子与（合拍的）外力之间的共振现象。大家也看到过，运动员在跳板上跳跃时，总要掌握节奏合适，才能使跳板的振动越来越强，把运动员弹到空中去完成种种优美的动作，这是跳板与合拍的外力之间的共振现象。

回到桥的问题上来，读者一定已经想到，每座桥梁都有它自己的振动节奏，而士兵队列有节奏的步伐是一个相当强的外力。如果这个外力的节奏和桥梁本身的振动节奏合上了拍——不幸的是，这个可能性是相当大的——持续不断地加在桥身上的脚步就会使桥身的振动越来越剧烈。一旦振动的幅度超过了桥梁设计时的安全极限，桥就支持不住了。“共振”一手导演了这场悲剧。



二、秋千、琴弦、收音机和日光灯 ——跨越物理学各个领域的共振

前面涉及的几个例子是机械运动范围内的共振现象，可是共振现象并不只限于机械运动。在声波运动、电磁运动以至原子、分子等微观粒子的运动中，处处都可以找到相应的共振现象。只是它们的表现形式五花八门，乍看起来容易使人摸不到头脑。

这种情况在自然界并不少见。自然界中常有一些表面上看去风马牛不相及的事物，经过仔细推敲后可以发现它们有内在的共同性。譬如蝙蝠觅食和雷达探空所用的工作原理是类似的，它们都利用了波被目标反射回来的信号来发现目标。只不过前者是用声带发出超声波，后者是用电子器件发出电磁波，这是大家熟知的。类似的事例还有不少，共振现象可说是其中一个突出的例子。

如果到物理学的博物馆里作一次漫游。我们就会发现共振现象在很多展品中都起着重要的作用。力学馆里的秋千；声学馆里的古琴；电学馆里的收音机和电子手表；光学馆里的日光灯以至原子物理馆里的原子钟。尽管它们的形状结构各不相同，但是它们的运转却无一不是基于共振现象。所谓“万变不离其宗”，从本质上讲，它们和跳板、弹簧一样，都是由某种有规律的周期性的外来作用加到一个振动系统上而形成。这个振动系统可以是力学的、声学的、电学的或光学的……等等。不论哪一种，当外来作用的节奏和系统本身原有的振动节奏“合拍”时，振动都会大大加强。因此，它们都可以纳入“共振”这个概念。而且，不久就会看到，在力、声、电、光……这些不同的运动形态中出现的共振现象在许多方面是非常相似

的。人们容易举一反三、触类旁通，并且能运用非常相似的数学方法进行分析。

这样的描述未免太抽象了，我们还是逐一作些分析吧！

秋千和共振的关系是容易想到的，秋千的摆动有固定的节奏。推秋千的外力是有节奏的。几乎每个人在童年时代都有玩秋千的经历。初学时，不得法，推秋千的节奏和秋千本身摆动的节奏往往不一致，秋千就振动不起来。逐渐掌握了要领以后，施力的节奏符合了秋千的节奏，秋千就会凌风而起，越荡越高了。

琴是一个声学振动系统。音乐爱好者知道，每根琴弦有自己的音调。音调是由琴弦振动的频率决定的。“频”这个字的原意是多次重复发生。频率就是每秒钟内往复振动的次数，频率越高，振动越快，音调也越高。频率是“节拍”这个词更科学的说法。关于琴弦的共振，我国古代历史上有不少故事，最早的文字记载可以上溯到公元前三、四世纪。在《庄子》中，就已经清楚地描述了两个瑟之间的共振现象：“为之调瑟，废（放置）于一堂，废于一室，鼓宫宫动，鼓角角动，音律同矣”。宫和角都是音调的名称，这是说两个瑟如果音调（音律）相同的话，那么拨响了这只瑟的“宫”弦，另一只瑟的“宫”弦就会受前者的影响而振动起来。宋朝的沈括在《梦溪笔谈》中谈到：“予友人家有一琵琶，置之虚室，以管色奏双调，琵琶弦辄有声应之。奏他调则不应，宝之以为异物，殊不知此乃常理。二十八调中但有声同者即应……”他还建议作一种用纸人演示琴弦共振的实验方法：“琴瑟弦皆有应声，宫弦则应少宫，商弦则应少商……欲知其应者，先调其弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦则纸人跃，他弦则不动……”。《梦溪笔谈》作于十一世纪，在西方，伽利略到十六世纪后才解释了共振现象，十七世纪时，牛津的诺布尔(William Noble)和皮戈特(Tomas Pigatt)

才作了类似于纸人的“纸游码”实验。

琴弦间的共振是因为，音调相同的弦所激起的声波频率也是相同的。一个弦振动激起的声波作用到另一根弦上时，所起的作用相当于一个合拍的周期性外力，所以使后者产生共振。声学中的共振常称为共鸣。共鸣这个词很形象，它已经在更广泛的意义上习用于文学作品和日常生活之中了。我们常说“感情上共鸣”、“思想上共鸣”，这里“共鸣”一词是用来比喻人类的高级神经活动受到外来影响时，由于内在因素的“合拍”而产生的强烈同感。仔细回味前面所讲的共振定义，我们会感到这种比喻是颇为贴切的。

收音机更离不开共振现象。这里是指收音机中的选频电路利用共振原理来选择电台。每个电台发出的电磁振动有它自己的“节拍”，即电台使用的频率。例如中央台使用的频率为920千周，每秒振动 (920×1000) 次。北京台使用的频率为828千周，每秒振动 (828×1000) 次。这些电台发出的电磁振动通过看不见的电磁波传播到收音机天线。事实上，这些频率各不相同的电磁波是同时到达天线的。如果不加以选择，就会同时听到好几个电台的节目，互相干扰无法听清。这时，就需要“共振”起作用了。收音机的天线后面，紧连着一个“共振电路”，它由一个固定的电感器和一个可变的电容器组成（图1.3）。共振电路是电学中的振动系统，它有自己的固有振动“节拍”，叫做固有频率，频率值由电容值和电感值的大小决定。调节可变电容器，可以改变电振动的固有频率。若某个电台发来的电磁振动的频率正好与共振电路的固有频率一致，这个电台的信号就会在电路中产生共振，使它的信号强度远远超过其他电台。于是听众达到了选择电台的目的。每个电台使用的频率是固定的，所以听众必须改变收音机共振电路的固有频率去适应电台。这个步骤靠收音机的“调谐”旋钮

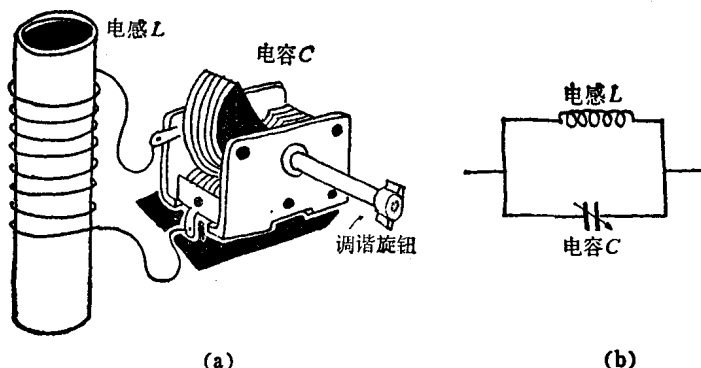


图 1.3 由电感和电容组成的共振电路
(a) 实物图 (b) 电路图

来完成。

电学里应用共振原理的仪器是不胜枚举的。除了收音机外，我们还可以再看一看电子手表。电子手表中也有一个共振电路。不过，这个电路的固有振动频率是不能调节的。相反，在制作工艺上，还要设法使这个频率高度稳定，尽量不受温度、震动等各种环境因素的影响。这样，利用它的共振作用，就可产生频率极为稳定的电磁振动。它代替了老式钟表中用来产生振动的摆锤或摆轮，再经过一套装置，联接到指针或数字显示器，就显示出精确的时间。

在光学中，可以挑选日光灯来作为应用共振现象的最常见例子。灯管中含有水银蒸气，通电后，水银蒸汽会产生紫外线，紫外线是人眼看不见的，要使它照明，必须找到一种物质，能够有效地把紫外线变成可见光。灯管壁上的荧光粉正是这样的物质。荧光粉的分子对某些紫外线会产生强烈的共振吸收，并把它转化为人眼可以看到的可见光。这种原子和分子的共振涉及分子原子的微观结构，比起力学、声学，电学中那些宏观的共振器件要复杂多了，激光、原子钟这些近代科学