INTERNATIONAL PHYSICS OLYMPIAD

第一、二届物理奥林匹克国家集训队资料选编

(1986，1987)

（理论部分）

陈秉乾　严隽珏　陈熙谋　编

北京大学出版社

第一、二届物理奥林匹克国家集训队资料选编（1986，1987）

（理论部分）

陈秉乾 [illegible] 编

北京大学出版社

2P60/23

内 容 提 要

本书精选参加第17届、第18届国际中学生奥林匹克物理竞赛的中国队在集训、选拔期间采用的习题74个，包括力学、振动与波、热学与分子物理、电磁学、光学、近代物理等方面，都作了详尽的分析和解答。题目有难有易，一般说来，求解时需要大学普通物理的基础知识，但对波动光学和近代物理的要求低一些，解题的数学工具是初等数学，不采用微积分、复数、微分方程。

在每部分前，附有相应的内容提要和有关公式，这是解题的必要准备，也可供复习、总结之用。

本书可供对物理有兴趣和爱好的优秀中学生、社会自学青年、大学生复习提高之用，也可供大、中学物理教师参考。

第一、二届物理奥林匹克国家集训队
资料选编（1986，1987）（理论部分）
陈秉乾　严隽珏　陈熙谋　编
责任编辑：周月梅

北京大学出版社
（北京大学校内）
北京大学印刷厂排版　北京印刷三厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米　32开本　8.25印张　180千字
1988年7月第一版　1988年7月第一次印刷
印数：00001—30,500册
统一书号：ISBN 7—301—00546—6/O·110
定　价：2.20元

前　言

由中学生参加的国际奥林匹克物理竞赛(IPhO)始于1967年，是波兰倡议举办的，有东欧五国参加。此后绵延不断，逐渐扩大到西欧，美洲，亚洲等国，1987年的第18届参赛国已达25个。竞赛每年一届，在7月上旬，轮流在各参赛国举行。各国代表队由5名中学生和两名领队组成(还可以有一名观察员)。两名领队作为竞赛国际委员会的平等成员，参与队员资格审查，试题及评分标准审核，优胜者评定，以及其它重大事宜的讨论决定。工作语言是英语和俄语。

竞赛有理论和实验两门考试，各五小时。举办国提供试题、答案和评分标准，经竞赛国际委员会讨论通过后，由领队译成本国语言，学生用本国语言答卷，举办国阅卷评分，试卷的复印副本交各国领队审核。理论试题一般三、四题，共30分；实验试题一、二题，共20分。两门考试满分为50分。按照章程，竞赛是个人之间的竞赛，两试之和为总成绩，以最高得分者的成绩为100%，高于其90%者授一等奖(金奖)，78—89%者授二等奖(银奖)，65—77%者授三等奖(铜奖)，50—64%者给予荣誉表扬，此外还有最佳理论成绩奖，最佳实验成绩奖，新参加国最佳成绩奖等。尽管竞赛不设团体奖，但各国团体总分的名次特别引人瞩目。

1986年我国首次参加在英国伦敦的第17届，只选派了三名学生，分获银奖、铜奖和表扬奖各一，其中获银奖的林晨(北京)个人总分名列第9．1987年我国再次参加在民主德国耶纳的第18届，五名学生获银奖两枚，铜奖三枚，其中获银

奖的陈恂(湖北)和黎锦晖(山东)个人总分分别名列第 4 和第 11，并以175分的总分获团体第三名(第一名罗马尼亚，208分；第二名联邦德国，181分)。

我国参赛学生的选拔分两步。首先，选拔全国中学生物理竞赛的优胜者(约15名)组成国家集训队；在集训期间经多次考试再从中选拔 5 名组成中国队。我国两次参赛，既取得了突出的个人名次，又显示了雄厚的团体实力，引起参赛各国的震动和广泛关注。

IPhO 章程规定了竞赛大纲，其内容大大超出我国现行中学物理教学大纲的要求(特别是实验部分)，大致与我国大学物理系一年级所学的物理内容相当。例如第18届试题中涉及的绝热膨胀，磁聚焦，相移电路，波动的力电对比，测三棱镜和水的折射率等在我国都是典型的大学内容(数学要求较低，竞赛大纲规定不采用微积分、复数和微分方程解题)。因此，安排几个月的集中培训是至关重要的。

1986，1987年的集训任务由北京大学物理系普通物理教研室承担。本书编者是理论训练的教练，陈熙谋和陈秉乾分别担任1986年和1987年的主教练。集训分两阶段进行。第一阶段着重基础训练，以约50%的学时，讲完大学一年级的物理课程，同时选拔出国参赛的学生。学习是紧张的，要求是严格的。我们不单纯针对参赛的需要，而着眼于加强基本功、提高能力、扩大视野、增加适应性，培养严谨的科学作风和习惯，力图为发现和培养人才摸索一些特殊的经验。为此，在讲课中，既注意传统的严谨、准确和系统完整，又适当提供历史背景介绍近代发展，在着力阐明物理思想的同时，加强具体过程的分析，力图使课程生动活泼并有相当的弹性。本书各部分题目前所附的内容提要和有关公式，就是理论训

练的教学大纲。第二阶段除继续基础训练外，侧重针对性更强的解题训练。精选与国际竞赛难度、份量相当的题目，进行多次有准备的、由师生分别主持的讨论课。课上，我们强调定性的物理分析，即分析题意，分析涉及的现象和过程，分析在各种条件下可能的结果和变化或推断过程的原因，从而判定问题的性质，把握解题的关键，确定解题的步骤，避免盲目性和随意性，增强自觉性。实践表明，这种讨论对于深入理解，合理分析，准确判断，敏捷反应大有裨益。本书精选集训期间采用过的题目共74个，内容涉及竞赛大纲规定的各个方面(力学，振动与波，热学，电磁学，光学，近代物理)，题目有难有易，都作了详尽的分析和解答。我们坚决反对题海战术，但也强调适当解题的必要性，特别是对于某些从形式到内容都很有特色的难题，进行认真地分析讨论，弄懂弄透，并且注意条理分明的书写和严格的计算，是很有好处的。

国际国内的中学生物理竞赛与选拔活动，特别是中国队这两年取得的优秀成绩，极大地鼓舞和推动了广大青少年学习科技献身四化的热潮，成为发现人才的一个途径，同时也会对物理教学的改革提供有益的启发。我们相信，只要不断的积累经验，保持训练的连续性，就能够逐步形成有特色的高质量的培训方案，在国际竞赛中夺取更好的成绩，为国争光。

编　者

1988年4月于北京大学

目　录

第一章　力学·振动与波

（一）内容提要及有关公式……………………………………（1）

（二）题，分析，解答（共30题）……………………………（13）

第二章　热学与分子物理

（一）内容提要及有关公式……………………………………（126）

（二）题，分析，解答（共14题）……………………………（132）

第三章　电磁学

（一）内容提要及有关公式……………………………………（167）

（二）题，分析，解答（共18题）……………………………（174）

第四章　光学·近代物理

（一）内容提要及有关公式……………………………………（225）

（二）题，分析，解答（共12题）……………………………（228）

第一章　力学·振动与波

（一）内容提要及有关公式

一、质点运动学

运动学研究对象和研究方法；矢量及简单矢量运算。

质点；参照系；坐标系（直角坐标系）；时间。

位置矢量 $\boldsymbol{r}$；位移矢量 $\Delta\boldsymbol{r}$；瞬时速度 $\boldsymbol{v}$；瞬时加速度 $\boldsymbol{a}$。$\boldsymbol{r}$ 与参考点选择有关；$\Delta\boldsymbol{r},\boldsymbol{v},\boldsymbol{a}$ 与参照系选择有关，与参考点选择无关。有关表达式：

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k}.$$

$$\Delta\boldsymbol{r}=\Delta x\boldsymbol{i}+\Delta y\boldsymbol{j}+\Delta z\boldsymbol{k}.$$

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t};\qquad v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},\qquad v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t},\qquad v_z=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}.$$

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2};$$

$$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2},\qquad a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2},\qquad a_z=\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}.$$

角位移 $\theta(t)$（不是矢量）；角速度矢量 $\boldsymbol{\omega}(t)$；角加速度矢量 $\boldsymbol{\beta}(t)$。有关表达式：

$$\omega(t)=\frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t};\qquad \beta(t)=\frac{\mathrm{d}\omega(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\theta(t)}{\mathrm{d}t^2}.$$

匀加速直线运动的运动学公式：

$$v(t)=v_0+at,$$

$$x(t)=x_0+v_0t+\frac{1}{2}at^2,$$

$$v^2(t) = v_0^2 + 2a(x - x_0).$$

曲线运动的运动学公式：

①抛体运动：

方程： $y = v_0 t\sin\theta - \frac{1}{2}gt^2$,

轨迹： $y = x\mathrm{tg}\theta - \frac{g}{2v_0^2\cos^2\theta}x^2$.

②圆周运动：

加速度： $\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau} + \frac{v^2}{r}\boldsymbol{n}$.

匀变速圆周运动的运动学公式：

$$\omega(t) = \omega_0 + \beta t,$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\beta t^2,$$

$$\omega^2(t) = \omega_0^2 + 2\beta(\theta - \theta_0).$$

相对运动。质点在 s 系和 s' 系中的速度分别为 $v, \boldsymbol{v}'$，加速度分别为 $\boldsymbol{a}, \boldsymbol{a}'$，若 s' 系相对 s 系的速度为 $\boldsymbol{v}_0$，加速度为 $\boldsymbol{a}_0$，则

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_0 + \boldsymbol{v}', \quad \boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_0 + \boldsymbol{a}'.$$

二、牛顿定律

牛顿第一定律，力和惯性的概念，牛顿第二定律 $\sum\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$；牛顿第三定律；惯性系。

几种常见的力：

①万有引力：

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r_2},$$

其中F的方向沿m_1,m_2连线,相互吸引，$G=(6.672\pm0.004)\times10^{-11}\text{m}^3/\text{s}^2\cdot\text{kg}$。

②重力：

$$W=mg,$$

其中
$$g=G\frac{M_{地球}}{R^2_{地球}}=9.8\text{m}/\text{s}^2。$$

③弹性力：包括弹簧弹性力$F=-kx$；支持力和压力；张力。

④摩擦力：包括滑动摩擦力$f=\mu N$，μ为滑动摩擦系数；静摩擦力。

非惯性系；惯性力；惯性离心力；科里奥利力。在相对惯性系以$\boldsymbol{a}$作直线运动的系统中，惯性力$\boldsymbol{F}=-m\boldsymbol{a}$；在相对惯性系以$\boldsymbol{\omega}$转动的系统中，惯性离心力$F=mr\omega^2$。

力学的国际单位制；量纲。

应用牛顿定律解题的步骤；隔离法。

三、功和能

功的定义：

$$\text{d}A=\boldsymbol{F}\cdot\text{d}\boldsymbol{s}=F\cos\theta\text{d}s,\qquad A=\int\boldsymbol{F}\cdot\text{d}\boldsymbol{s}。$$

功是力作用的空间积累效果。

平均功率和瞬时功率

$$N=\frac{\text{d}A}{\text{d}t}=\boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{v}。$$

质点的动能$E_k=\frac{1}{2}mv^2$；质点的动能定理：

$$A=E_{k_2}-E_{k_1}=\frac{1}{2}mv_2^2-\frac{1}{2}mv_1^2。$$

物体系的势能

$$A_{内,保} = E_{p_1} - E_{p_2}.$$

重力势能 $E_p = mgh + C,$

引力势能 $E_p = -G\dfrac{Mm}{r} + C,$

弹性势能 $E_p = \dfrac{1}{2}kx^2 + C,$

式中C是待定常数，由选定的势能零点确定。

物体系的机械能 $E = E_p + E_k$；功能原理；机械能守恒定律：

$$A_{外} + A_{内,非保} = E_2 - E_1,$$

若 $A_{外} = 0$，$A_{内,非保} = 0$，则 $E_2 = E_1 =$ 常数，物体系机械能守恒。

四、动量和角动量

动量 $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$；冲量 $\boldsymbol{I} = \int \sum \boldsymbol{F} \mathrm{d}t$，为力作用的时间积累效果；牛顿第二定律可表为$\sum \boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a} = m\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}$； 质点动量定理：

$$\boldsymbol{I} = \int \sum \boldsymbol{F} \mathrm{d}t = \boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}_0;$$

质点组动量定理。

动量守恒定律：若$\sum \boldsymbol{F} = 0$（合外力为零），则 $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_0 =$ 常矢量，动量守恒。

碰撞。球的对心碰撞；恢复系数

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}}$$

（$e = 1$完全弹性碰撞，$e = 0$完全非弹性碰撞，$0 < e < 1$一般情

表1.1 质点动力学的有关规律

外界作用	运动状态	运动状态的变化	规律	守恒定律
作用力$\Sigma \boldsymbol{F}$	速度$\boldsymbol{v}$	加速度$\boldsymbol{a}$	牛顿第二定律$\Sigma \boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$	
功$A=\int \Sigma \boldsymbol{F}\cdot d\boldsymbol{s}$	动能$E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 势能E_p(物体系)	动能改变ΔE_k 机械能改变ΔE	动能定理$A=\Delta E_k$ 功能原理 $A_{外}+A_{内,非保}=\Delta E$	若$A_{外}=0$, $A_{内,非保}=0$, 则机械能E守恒
冲量$\boldsymbol{I}=\int \Sigma \boldsymbol{F}dt$	动量$\boldsymbol{p}=m\boldsymbol{v}$	动量改变$d\boldsymbol{p}$	动量定理 $\boldsymbol{I}=m\boldsymbol{v}_2-m\boldsymbol{v}_1$	若$\boldsymbol{I}=0$, 则动量$\boldsymbol{p}$守恒
力矩$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times \boldsymbol{F}$	角动量$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{r}\times m\boldsymbol{v}$	角动量改变$d\boldsymbol{L}$	角动量定理 $\boldsymbol{M}=\frac{d\boldsymbol{L}}{dt}$	若$\boldsymbol{M}=0$, 则角动量$\boldsymbol{L}$守恒

况）。二维碰撞。

质点的角动量 $\boldsymbol{L}=\boldsymbol{r}\times m\boldsymbol{v}$（$L=rmv\sin\theta$，$\boldsymbol{L}$ 的方向，$\boldsymbol{L}$ 与参考点选择有关）；力矩 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{F}$；角动量定理 $\boldsymbol{M}=\mathrm{d}\boldsymbol{L}/\mathrm{d}t$；角动量守恒定律：若 $\boldsymbol{M}=0$，则 $\mathrm{d}\boldsymbol{L}/\mathrm{d}t=0$，$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{L}_0=$ 常矢量，角动量守恒。

上述质点动力学的有关规律归纳列于表1.1。

五、刚体力学

刚体；平动；转动；转轴。

质心

$$\boldsymbol{r}_C=\frac{\sum_i \Delta m_i \boldsymbol{r}_i}{\sum_i \Delta m_i}=\frac{\int \boldsymbol{r}\,\mathrm{d}m}{\int \mathrm{d}m},$$

$$x_C=\frac{\sum_i \Delta m_i x_i}{\sum_i \Delta m_i}=\frac{\int x\,\mathrm{d}m}{\int \mathrm{d}m},$$

$$y_C=\frac{\sum_i \Delta m_i y_i}{\sum_i \Delta m_i}=\frac{\int y\,\mathrm{d}m}{\int \mathrm{d}m},$$

$$z_C=\frac{\sum_i \Delta m_i z_i}{\sum_i \Delta m_i}=\frac{\int z\,\mathrm{d}m}{\int \mathrm{d}m}.$$

质心运动定理

作用力对转轴的力矩 $\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{F}$；转动惯量 $J=\int r^2\mathrm{d}m=\int r^2\rho\mathrm{d}V$；平行轴定理：$J=J_C+md^2$；转动定理：$M=J\beta$。

几种常见的质量均匀分布，形状对称的刚体的转动惯量列于表1.2。

表 1.2

刚　　体	轴的位置	转动惯量
细　　棒（质量 m，长 l）	通过中心与棒垂直	$\frac{1}{12}ml^2$
	通过棒一端与棒垂直	$\frac{1}{3}ml^2$
薄壁中空圆筒（质量 m，半径 R）	通过中心轴	mR^2
中实圆柱体（质量 m，半径 R）	通过中心轴	$\frac{1}{2}mR^2$
中空圆柱体（质量 m，外半径 R，内半径 r）	通过中心轴	$\frac{1}{2}m(R^2+r^2)$
球　　体（质量 m，半径 R）	通过直径	$\frac{2}{5}mR^2$

刚体的转动动能 $E_k=\frac{1}{2}J\omega^2$；刚体的重力势能 $E_p=mgz_C$；力矩的功 $dA=Md\theta$；刚体绕定轴转动的动能定理 $A=\frac{1}{2}J\omega^2-\frac{1}{2}J\omega_0^2$。

刚体对固定轴的角动量 $\boldsymbol{L}=J\boldsymbol{\omega}$；角动量定理 $\boldsymbol{M}=d\boldsymbol{L}/dt$；角动量守恒定律：若 $\boldsymbol{M}=0$，则 $\boldsymbol{L}=J\boldsymbol{\omega}=$常矢量，角动量守恒。

刚体的平面平行运动可分解为质心的平动（遵从质心定理）和绕通过质心的轴的转动（遵从转动定理）；刚体的纯滚动；瞬时轴；纯滚动时的摩擦力。

回转仪；进动。

质点直线运动和刚体定轴转动的比较见表1.3。

表 1.3

质点直线运动	刚体定轴转动
位 移 Δs 速 度 $v=\frac{ds}{dt}$ 加速度 $a=\frac{dv}{dt}$	角位移 $\Delta\theta$ 角速度 $\omega=\frac{d\theta}{dt}$ 角加速度 $\beta=\frac{d\omega}{dt}$
力 F 质量 m 牛顿第二定律 $F=ma$	力矩 M 转动惯量 J 转动定律 $M=J\beta$
力的功 $dA=Fds$ 动 能 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 动能定理： $A=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_0^2$	力矩的功 $dA=Md\theta$ 动 能 $E_k=\frac{1}{2}J\omega^2$ 动能定理： $A=\frac{1}{2}J\omega^2-\frac{1}{2}J\omega_0^2$
动量 $p=mv$ 动量定理：$Fdt=dp$ 动量守恒定律： 若外力冲量为零，则 $mv=$常量	角动量 $L=J\omega$ 角动量定理：$Mdt=dL$ 角动量守恒定律： 若外力矩为零，则 $J\omega=$常量

六、振动

振动；简谐振动的定义与特点；简谐振动的位移，速度，加速度。有关表达式：

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0,$$

$$x=A\cos(\omega t+\varphi),$$

$$v=-A\omega\sin(\omega t+\varphi)=\omega A\cos\left(\omega t+\varphi+\frac{\pi}{2}\right),$$

$$a=-A\omega^2\cos(\omega t+\varphi)=\omega^2A\cos(\omega t+\varphi+\pi).$$

简谐振动的振幅A；周期T；频率ν；圆频率ω；相位$\omega t+\varphi$；初相位φ。有关表达式：

$$T=\frac{1}{\nu}=\frac{2\pi}{\omega} \quad 或 \quad \omega=2\pi\nu=\frac{2\pi}{T},$$

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}},$$

$$\mathrm{tg}\varphi=-\frac{v_0}{\omega x_0},$$

其中x_0, v_0分别是初始位移和初始速度。

简谐振动的势能E_p；动能E_k；总能量E。有关表达式：

$$E_k=\frac{1}{2}m\omega^2A^2\sin^2(\omega t+\varphi),$$

$$E_p=\frac{1}{2}m\omega^2A^2\cos^2(\omega t+\varphi),$$

$$E=E_p+E_k=\frac{1}{2}m\omega^2A^2.$$

几种常见的简谐振动见表1.4。

表 1.4

	弹簧振子	单摆	复摆
作用力f或力矩M	$f=-kx$	$f=-mg\sin\theta$ 当θ很小时， $f=-mg\theta$	$M=-mgl\sin\theta$ 当θ很小时， $M=-mgl\theta$
运动方程	$\frac{d^2x}{dt^2}+\frac{k}{m}x=0$	$\frac{d^2\theta}{dt^2}+\frac{g}{l}\theta=0$	$\frac{d^2\theta}{dt^2}+\frac{mgl}{J}\theta=0$
圆频率ω	$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$	$\omega=\sqrt{\frac{g}{l}}$	$\omega=\sqrt{\frac{mgl}{J}}$ ①

① 复摆$\omega=\sqrt{mgl/J}$中的l是刚体质心到转轴的垂直距离。

简谐振动的几何描述；参考圆；旋转矢量。

两个同方向同频率简谐振动的合成：

若 $x_1 = A_1\cos(\omega t + \varphi_1)$，$x_2 = A_2\cos(\omega t + \varphi_2)$，则

$$x = x_1 + x_2 = A\cos(\omega t + \varphi),$$

其中

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1),$$

$$\varphi = \mathrm{tg}^{-1}\frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin\varphi_2}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos\varphi_2};$$

多个同方向同频率简谐振动的合成；旋转矢量的图解法。

两个同方向不同频率的简谐振动的合成：

若 $x_1 = A\cos(\omega_1 t + \varphi)$，$x_2 = A\cos(\omega_2 t + \varphi)$，则

$$x = x_1 + x_2 = 2A\cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right)\cos\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}t + \varphi\right);$$

拍，拍频：$\nu = |\nu_2 - \nu_1| = \left|\frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi}\right|$。

表 1.5

	阻尼振动	受迫振动
动力学方程	$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\gamma}{m}\frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x = 0$	$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\gamma}{m}\frac{dx}{dt} + \frac{k}{m}x = \frac{H}{m}\cos\omega' t$
运动学方程	$x = A_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi)$ 其中 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$，$2\beta = \frac{\gamma}{m}$	$x = A_0 e^{-\beta t}\cos(\omega t + \varphi) + A\cos(\omega' t + \varphi')$ 其中 $A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega'^2)^2 + 4\beta^2\omega'^2}}$ $\mathrm{tg}\varphi' = -\frac{2\beta\omega'}{\omega_0^2 - \omega'^2}$ $\beta = \frac{\gamma}{2m}$，$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$，$h = \frac{H}{m}$