

# General Physics I Midterm Review Outline / 普物 I 期中复习提纲

Based on / 依据: [slides](#) 课件、[homework](#) 作业、[midterm](#) 历年期中卷。

Focus / 重点: mechanics, rotation, oscillation, waves / 力学、转动、振动、波动。

## 1 0. Exam Map / 考点地图

Module / 模块	Core ideas / 核心知识	Typical problems / 常见题型
Kinematics and vectors / 运动学与矢量	displacement, velocity, acceleration; components; projectile motion / 位移、速度、加速度、分量、抛体运动	Graph reading; integrate/differentiate motion functions / 图像读数、由函数求运动量
Newton's laws / 牛顿定律	free-body diagram, constraints, friction, drag / 受力图、约束、摩擦、阻力	Connected blocks, circular motion, inclined plane / 连接体、圆周运动、斜面
Work and energy / 功和能	work-energy theorem, conservative force, potential energy / 动能定理、保守力、势能	Variable force, spring, effective potential / 变力做功、弹簧、等效势
Momentum / 动量	impulse, conservation of momentum, center of mass / 冲量、动量守恒、质心	Collision, many-particle system, variable mass / 碰撞、多粒子、变质量
Gravitation and central force / 万有引力与中心力	inverse-square force, circular orbit, effective potential / 反平方力、圆轨道、等效势	Perturbed circular orbit / 受扰圆轨道
Rotation / 刚体转动	angular kinematics, torque, moment of inertia, rolling / 角运动学、力矩、转动惯量、滚动	Pulley, rolling cylinder, rod rotation / 滑轮、圆柱滚动、杆转动
Angular momentum and equilibrium / 角动量与平衡	torque-angular momentum relation, static equilibrium / 力矩与角动量、静力平衡	Hinged rod, ladder, beam / 铰接杆、梯子、梁
Oscillation / 振动	SHM, small oscillation, normal modes / 简谐运动、小振动、简正模	Coupled masses or pendulums / 耦合滑块或摆
Waves / 波动	wave equation, sinusoidal wave, standing wave, beats, Doppler-like observation / 波动方程、正弦波、驻波、拍、运动观察者	Rope/string waves, reflection, superposition / 绳波、反射、叠加

## 2 1. Kinematics and Vectors / 运动学与矢量

### 2.1 Knowledge Points / 知识点

- Displacement / 位移; distance / 路程不同于 displacement / 位移。

$$\Delta x = x_f - x_i$$

- Average velocity / 平均速度; average speed / 平均速率:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad \bar{s} = \frac{\text{total distance}}{\text{total time}}$$

- Instantaneous velocity and acceleration / 瞬时速度与加速度:

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

- Constant acceleration equations / 匀加速公式:

$$v = v_0 + at,$$

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

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

- Vector decomposition / 矢量分解; magnitude / 大小:

$$\mathbf{A} = A_x\hat{\mathbf{i}} + A_y\hat{\mathbf{j}} + A_z\hat{\mathbf{k}}, \quad |\mathbf{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

- Projectile motion / 抛体运动: horizontal and vertical motions are independent / 水平与竖直方向独立。

## 2.2 Problem Method / 解题方法

1. Choose axes / 选坐标轴: 让加速度或约束方向尽量落在坐标轴上。
2. Write component equations / 写分量方程:  $x$  and  $y$  directions separately / 分方向处理。
3. Use graph meaning / 用图像意义:  $v-t$  图面积是位移, 斜率是加速度;  $x-t$  图斜率是速度。
4. Check units / 检查单位: 最后必须补回 SI unit / 国际单位制单位。

## 2.3 Vocabulary / 生词

- displacement: 位移
- distance: 路程
- instantaneous: 瞬时的
- derivative: 导数
- component: 分量
- trajectory: 轨迹
- projectile: 抛体

# 3 2. Newton's Laws and Force Analysis / 牛顿定律与受力分析

## 3.1 Knowledge Points / 知识点

- Newton's first law / 牛顿第一定律: inertial frame / 惯性系中, net force / 合外力为零则  $a = 0$ 。
- Newton's second law / 牛顿第二定律: 必须是矢量方程。

$$\sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

- Newton's third law / 牛顿第三定律: action-reaction pair / 作用力与反作用力等大反向, 作用在不同物体上。
- Weight / 重力:  $mg$ ; normal force / 支持力: 垂直接触面; tension / 张力: 沿绳方向。
- Friction / 摩擦:

$$f_s \leq \mu_s N, \quad f_k = \mu_k N$$

- Circular motion / 圆周运动: radial acceleration / 向心加速度

$$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

- Drag / 阻力: low speed often  $R = bv$ ; high speed often  $R = cv^2$ 。

## 3.2 Problem Method / 解题方法

1. Draw a free-body diagram / 画受力图: 每个物体单独画。
2. Identify constraints / 找约束: 同一根不可伸长绳、无滑动滚动、同加速度或角加速度关系。
3. Project Newton's law / 投影牛顿第二定律: 沿斜面、垂直斜面、径向/切向。
4. Do not mix action-reaction / 不要把作用反作用力放进同一个物体的受力平衡中。

### 3.3 Vocabulary / 生词

- force: 力
- net force: 合力
- inertial frame: 惯性参考系
- free-body diagram: 受力图
- constraint: 约束
- tension: 张力
- normal force: 支持力
- friction: 摩擦力
- radial: 径向的
- tangential: 切向的

## 4 3. Work, Energy, and Effective Potential / 功、能量与等效势

### 4.1 Knowledge Points / 知识点

- Work / 功; constant force / 恒力做功:

$$W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}, \quad W = Fd\cos\theta$$

- Work-kinetic energy theorem / 动能定理:

$$W_{\text{net}} = \Delta K$$

- Conservative force / 保守力: work independent of path / 做功与路径无关。

$$F_x = -\frac{dU}{dx}$$

- Mechanical energy / 机械能: if only conservative forces act / 只有保守力时守恒。

$$E = K + U$$

- Spring potential and near-Earth gravitational potential / 弹簧势能与近地重力势能:

$$U_s = \frac{1}{2}kx^2, \quad U_g = mgy$$

- Effective potential / 等效势: 把角动量项写进势能, 如中心力问题

$$E = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{L^2}{2mr^2} + V(r),$$

$$U_{\text{eff}}(r) = \frac{L^2}{2mr^2} + V(r).$$

### 4.2 Problem Method / 解题方法

1. Decide whether energy conservation applies / 判断机械能是否守恒: 有非保守力做功时要加  $W_{\text{nc}}$ 。
2. For variable force / 变力: 优先积分  $W = \int Fdx$  或用势能差。
3. For circular central-force motion / 中心力圆轨道:
  - first impose equilibrium / 先用平衡条件  $dU_{\text{eff}}/dr = 0$ ;
  - then expand around equilibrium / 再在平衡点附近二阶展开;
  - small oscillation frequency / 小振动角频率:

$$\omega^2 = \frac{U_{\text{eff}}''(r_0)}{m}$$

### 4.3 Vocabulary / 生词

- work: 功

- kinetic energy: 动能
- potential energy: 势能
- conservative force: 保守力
- non-conservative force: 非保守力
- mechanical energy: 机械能
- effective potential: 等效势
- perturbation: 扰动
- approximation: 近似

## 5 4. Momentum, Center of Mass, and Collision / 动量、质心与碰撞

### 5.1 Knowledge Points / 知识点

- Momentum / 动量:  $p = mv$ ; impulse / 冲量:  $J = \int F dt = \Delta p$ 。
- Conservation of momentum / 动量守恒: external impulse zero / 外冲量为零。
- Center of mass / 质心:

$$\mathbf{R}_{\text{cm}} = \frac{\sum_i m_i \mathbf{r}_i}{\sum_i m_i}, \quad M \mathbf{a}_{\text{cm}} = \mathbf{F}_{\text{ext}}$$

- Elastic collision / 弹性碰撞: momentum and kinetic energy both conserved / 动量和动能都守恒。
- Perfectly inelastic collision / 完全非弹性碰撞: objects stick together / 粘在一起, 动能不守恒。
- Variable mass idea / 变质量思想: 系统边界要选清楚; 可对“仍在运动的部分”写动量变化率。

### 5.2 Problem Method / 解题方法

1. Define the system / 选系统: 系统内力不影响总动量, 外力才影响。
2. Use momentum conservation only in allowed directions / 只在外冲量为零的方向用动量守恒。
3. Collision problems / 碰撞题: 先动量, 若弹性再加动能; 一维弹性可用相对速度反向。
4. Falling string type / 落绳题: 可用能量求速度, 再用动量流或质心运动求支持力。

### 5.3 Vocabulary / 生词

- momentum: 动量
- impulse: 冲量
- center of mass: 质心
- collision: 碰撞
- elastic: 弹性的
- inelastic: 非弹性的
- variable mass: 变质量
- external force: 外力

## 6 5. Gravitation and Central Force / 万有引力与中心力

### 6.1 Knowledge Points / 知识点

- Universal gravitation / 万有引力:  $F = GmM/r^2$ 。
- Gravitational potential energy / 引力势能:  $U = -GmM/r$ 。
- Circular orbit / 圆轨道:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r$$

- Escape speed / 逃逸速度:

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

- Kepler's third law / 开普勒第三定律:  $T^2 \propto r^3$  for circular orbit / 圆轨道下成立。
- For central force / 中心力: angular momentum  $L = mr^2\dot{\theta}$  is conserved / 角动量守恒。

## 6.2 Problem Method / 解题方法

1. In central-force problems / 中心力题, 先写守恒量:  $E$  and  $L$ 。
2. Replace angular motion / 消去角运动:  $\dot{\theta} = L/(mr^2)$ 。
3. Convert to one-dimensional radial motion / 化为一维径向运动:

$$E = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + U_{\text{eff}}(r)$$

4. For small radial perturbation / 径向小扰动: 对  $U_{\text{eff}}$  在  $r_0$  处二阶展开。

## 6.3 Vocabulary / 生词

- gravitation: 引力
- orbit: 轨道
- central force: 中心力
- radial coordinate: 径向坐标
- angular momentum: 角动量
- escape speed: 逃逸速度

# 7 6. Rotation and Rolling / 刚体转动与滚动

## 7.1 Knowledge Points / 知识点

- Angular displacement, velocity, acceleration / 角位移、角速度、角加速度:

$$\theta, \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

- Linear-angular relations / 线量与角量:

$$s = r\theta, \quad v = r\omega, \quad a_t = r\alpha, \quad a_r = r\omega^2$$

- Torque and moment of inertia / 力矩与转动惯量:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}, \quad \tau = rF\sin\theta, \quad I = \int r^2 dm$$

- Common moments of inertia / 常见转动惯量:

object / 物体	$I$
uniform disk/cylinder / 均匀圆盘或圆柱	$\frac{1}{2}MR^2$
rod about center / 杆绕中心	$\frac{1}{12}ML^2$
rod about end / 杆绕端点	$\frac{1}{3}ML^2$

- Rotational dynamics, kinetic energy, and rolling constraint / 转动定律、转动动能与滚动约束:

$$\sum \tau = I\alpha, \quad K_{\text{rot}} = \frac{1}{2}I\omega^2, \quad v_{\text{cm}} = R\omega, \quad a_{\text{cm}} = R\alpha$$

## 7.2 Problem Method / 解题方法

1. For pulley and rod / 滑轮和杆: 分别写平动方程、转动方程、绳约束。
2. For rolling down incline / 斜面滚动:
  - along incline / 沿斜面:  $Mg\sin\theta - f = Ma$ ;

- torque about CM / 绕质心:  $fR = I\alpha$ ;
- no slip / 无滑动:  $a = R\alpha$ 。

3. If the surface becomes frictionless / 若进入光滑面: friction is zero, torque about CM is zero, so  $\omega$  stays constant; check whether  $v_{cm} = R\omega$  still holds / 无摩擦无力矩, 角速度不变, 检查滚动条件是否仍成立。
4. Use energy when constraints do no work / 约束力不做功时优先用能量。

### 7.3 Vocabulary / 生词

- rigid body: 刚体
- angular velocity: 角速度
- angular acceleration: 角加速度
- torque: 力矩
- moment of inertia: 转动惯量
- rolling without slipping: 无滑动滚动
- pulley: 滑轮
- cylinder: 圆柱
- incline: 斜面

## 8 7. Angular Momentum and Static Equilibrium / 角动量与静力平衡

### 8.1 Knowledge Points / 知识点

- Angular momentum / 角动量; fixed-axis rigid body / 定轴刚体:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}, \quad L = I\omega$$

- Torque-angular momentum relation / 力矩与角动量:  $\sum \tau = dL/dt$ 。
- Conservation of angular momentum / 角动量守恒: if external torque is zero / 外力矩为零。
- Static equilibrium / 静力平衡:
  - Translational equilibrium / 平动平衡:  $\sum F = 0$
  - Rotational equilibrium / 转动平衡:  $\sum \tau = 0$
- Center of gravity / 重心: uniform gravitational field / 匀强重力场中与质心重合。

### 8.2 Problem Method / 解题方法

1. Choose torque origin smartly / 巧选力矩参考点: 让未知力的力臂为零。
2. Write  $\sum F_x = 0$ ,  $\sum F_y = 0$ ,  $\sum \tau = 0$  / 三类方程配合。
3. For just-about-to-slip or lift / 临界滑动或刚要抬起: 对应支持力或静摩擦取临界值。
4. Check sign convention / 检查正负方向: 顺时针和逆时针力矩不要混。

### 8.3 Vocabulary / 生词

- angular momentum: 角动量
- equilibrium: 平衡
- static equilibrium: 静力平衡
- translational: 平动的
- rotational: 转动的
- center of gravity: 重心
- pivot: 转轴、支点
- moment arm: 力臂

## 9 8. Simple Harmonic Motion and Coupled Oscillators / 简谐运动与耦合振动

### 9.1 Knowledge Points / 知识点

- Stable equilibrium / 稳定平衡:

$$\frac{dU}{dx} = 0, \quad \frac{d^2U}{dx^2} > 0$$

- Near stable equilibrium / 稳定点附近:

$$U(x) \approx U(x_0) + \frac{1}{2}k_{\text{eff}}(x - x_0)^2, \\ k_{\text{eff}} = U''(x_0).$$

- Simple harmonic motion / 简谐运动:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0, \\ x(t) = A \cos(\omega t + \phi), \\ T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad f = \frac{1}{T}.$$

- Energy of SHM / 简谐振动能量:

$$E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2$$

- Simple pendulum small angle / 单摆小角近似:

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0, \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

- Coupled oscillator / 耦合振子: normal modes / 简正模通常用  $x_1 + x_2$ ,  $x_1 - x_2$  或矩阵特征值求。

### 9.2 Problem Method / 解题方法

1. Linearize / 线性化: small angle means  $\sin\theta \approx \theta$ ,  $\cos\theta \approx 1$ 。
2. Write equations of motion / 写运动方程: 保留一阶小量, 忽略二阶及更高阶。
3. Find normal coordinates / 找简正坐标: 常见对称系统用
  - in-phase mode / 同相模:  $\theta_1 + \theta_2$
  - out-of-phase mode / 反相模:  $\theta_1 - \theta_2$
4. Use initial conditions / 用初始条件: 把一般解中的 amplitude / 振幅 和 phase / 相位 解出来。
5. For coupled pendulums with spring / 弹簧耦合双摆: 弹簧伸长通常约为  $L(\theta_2 - \theta_1)$ 。

### 9.3 Vocabulary / 生词

- oscillation: 振动
- simple harmonic motion: 简谐运动
- amplitude: 振幅
- phase: 相位
- angular frequency: 角频率
- period: 周期
- frequency: 频率
- stable equilibrium: 稳定平衡
- normal mode: 简正模
- coupled oscillator: 耦合振子
- small-angle approximation: 小角近似

## 10 9. Wave Motion / 波动

### 10.1 Knowledge Points / 知识点

- Wave equation / 波动方程:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

- General traveling waves / 行波通解:

$$y = f(x - vt) \quad (\text{right-moving}), \quad y = f(x + vt) \quad (\text{left-moving})$$

- Sinusoidal wave / 正弦波:

$$y = A \cos(kx - \omega t + \phi)$$

- Relation / 关系:

$$v = \frac{\omega}{k} = \lambda f, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \omega = 2\pi f$$

- String wave speed / 弦波速度:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

- Superposition / 叠加原理: linear medium / 线性介质中位移代数相加。
- Standing wave / 驻波: opposite directions, same frequency and amplitude / 反向等频等振幅波叠加。
- Beats / 拍: close frequencies / 频率接近时,  $f_{\text{beat}} = |f_1 - f_2|$ 。
- Energy density / 能量密度: small-amplitude string wave has kinetic energy density

$$u_K = \frac{1}{2} \mu \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)^2$$

- Reflection at fixed end / 固定端反射: boundary condition / 边界条件  $y(x_0, t) = 0$ , 反射波相位要满足端点位移恒为零。
- Moving observer / 运动观察者: replace coordinates / 坐标替换, 如 observer moving at  $v_0$ :  $x = x' + v_0 t$ 。

### 10.2 Problem Method / 解题方法

1. Determine direction / 判断传播方向:  $kx - \omega t$  向  $+x$ ,  $kx + \omega t$  向  $-x$ 。
2. Verify wave equation / 验证波动方程: 分别求二阶时间导数和空间导数, 得到  $\omega^2 = v^2 k^2$ 。
3. Reflection problem / 反射题: 写入射波 + 反射波, 再代固定端或自由端边界条件。
4. Superposition problem / 叠加题: 使用三角恒等式把和化积, 判断是否 standing wave / 驻波。
5. Moving observer problem / 运动观察者题: 先做 Galilean transformation / 伽利略变换, 再读出新频率。

### 10.3 Vocabulary / 生词

- wave: 波
- transverse wave: 横波
- longitudinal wave: 纵波
- wave equation: 波动方程
- sinusoidal wave: 正弦波
- wavelength: 波长
- wave number: 波数
- superposition: 叠加
- interference: 干涉
- standing wave: 驻波
- beat: 拍

- boundary condition: 边界条件
- reflection: 反射
- linear mass density: 线密度

## 11 10. High-Frequency Problem Templates / 高频题型模板

### 11.1 A. Perturbed Circular Motion / 受扰圆周运动

1. Conserved quantities / 守恒量: central force gives angular momentum conservation / 中心力使角动量守恒; 若冲击是瞬时径向, 角动量通常仍不变, 但机械能可能改变。

2. Energy form / 能量式:

$$E = \frac{1}{2}m\dot{r}^2 + \frac{L^2}{2mr^2} + V(r)$$

3. Circular orbit condition / 圆轨道条件:

$$\left. \frac{dU_{\text{eff}}}{dr} \right|_{r_0} = 0$$

4. Small oscillation / 小振动:

$$\omega_r^2 = \frac{U''_{\text{eff}}(r_0)}{m}$$

5. Compare with orbital frequency / 和轨道角频率比较: 用  $\omega_{\text{orb}} = L/(mr_0^2)$ 。

### 11.2 B. Rolling Cylinder on Incline / 圆柱斜面滚动

1. Top rough half / 上半段有摩擦: use rolling constraint / 用滚动约束。

2. Friction direction / 摩擦方向: 提供转动所需力矩, 通常沿斜面向上。

3. Energy at halfway / 到中点能量:

$$\frac{Mgh}{2} = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2, \quad I = \frac{1}{2}MR^2, \quad v = R\omega$$

4. Bottom smooth half / 下半段光滑: no torque about CM / 对质心无力矩,  $\omega$  不变; gravity changes translational kinetic energy / 重力只增加平动动能。

5. Check no-slip / 检查无滑动: 若  $v \neq R\omega$ , 则不再无滑动滚动。

### 11.3 C. Coupled Oscillators / 耦合振动

1. Write linear equations / 写线性方程。

2. Try normal modes / 尝试简正模:  $x_1 = x_2$  and  $x_1 = -x_2$  for symmetric cases / 对称系统先试同相、反相。

3. Get eigenfrequencies / 求本征频率。

4. Superpose modes / 叠加简正模。

5. Use initial conditions / 套初始条件确定振幅和相位。

### 11.4 D. Rope or String Wave / 绳波题

1. Use a small element / 取小段  $dx$ 。

2. Vertical force from tension / 张力竖直分量差:

$$\mu dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \left[ \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x+dx} - \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_x \right]$$

3. Obtain wave equation / 得到波动方程:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

4. If tension changes with position / 若张力随位置变:  $T = T(x)$ , 不能直接用正弦波作为一般解。

## 12 11. Quick Checklist Before Exam / 考前检查清单

- Can I draw a correct free-body diagram? / 我能否画出正确受力图?

- Can I choose the system and conserved quantity? / 我能否选系统并判断守恒量?
- Can I distinguish force, torque, work, impulse? / 我能否区分力、力矩、功、冲量?
- Can I switch between linear and angular variables? / 我能否在线量和角量之间转换?
- Can I linearize small oscillations? / 我能否做小振动线性化?
- Can I derive the wave equation from a small string element? / 我能否由绳元推出波动方程?
- Can I use boundary conditions for reflected waves? / 我能否用边界条件处理反射波?

## 13 12. Last-Day Formula Sheet / 考前公式速记

### Kinematics and Newton's law / 运动学与牛顿定律

$$v = \frac{dx}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}, \quad \sum \mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

### Work, energy, and momentum / 功、能量与动量

$$\begin{aligned} W &= \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}, & W_{\text{net}} &= \Delta K, \\ E &= K + U, & F_x &= -\frac{dU}{dx}, \\ \mathbf{p} &= m\mathbf{v}, & \mathbf{J} &= \Delta \mathbf{p}. \end{aligned}$$

### Center of mass and gravitation / 质心与引力

$$\mathbf{R}_{\text{cm}} = \frac{\sum_i m_i \mathbf{r}_i}{\sum_i m_i}, \quad F_g = \frac{GmM}{r^2}, \quad U_g = -\frac{GmM}{r}$$

### Rotation and rolling / 转动与滚动

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{r} \times \mathbf{F}, & \sum \tau &= I\alpha, \\ I_{\text{disk}} &= \frac{1}{2}MR^2, & I_{\text{rod, end}} &= \frac{1}{3}ML^2, \\ K_{\text{rot}} &= \frac{1}{2}I\omega^2, & L &= I\omega, \\ v_{\text{cm}} &= R\omega, & a_{\text{cm}} &= R\alpha. \end{aligned}$$

### Oscillation and waves / 振动与波

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \omega^2 x &= 0, & x(t) &= A\cos(\omega t + \phi), \\ \omega_{\text{pendulum}} &= \sqrt{\frac{g}{L}}, & \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} &= v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \\ v_{\text{string}} &= \sqrt{\frac{T}{\mu}}, & y(x, t) &= A\cos(kx - \omega t + \phi). \end{aligned}$$