第一篇 力学

第一章 质点运动学 （运动的描述：物质--〉质点）

第二章 牛顿运动定律 （物质为何会运动：力和运动的关系）

第三章 动量与角动量 （力的时间效应）

第四章 功与能 （力的空间效应）

第五章 刚体的定轴转动（牛顿力学在刚体中的应用）

第六章 狭义相对论 （物体在高速下的运动）

第二章

牛顿运动定律

（Newton's Laws of Motion）

本章目录

2.1 牛顿运动定律

- **第一定律(Newton'sFirst law)**

任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态，除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。

——惯性定律(Inertia law)

A body at rest remains at rest and a body in motion continues to move at a constant velocity along a straight line, unless acted upon by an external force.

—— Galileo

Every body perseveres in its state of rest or of uniform motion in a right line unless it is compelled to change that state by forces impressed on it.

—— Newton
The book, Principia

惯性：物体本身保持运动状态不变的性质。

力：改变物体运动状态的原因。

惯性系：牛顿第一定律成立的参考系。

第一定律的意义：

1. 定性给出了“力”与“惯性”的概念
2. 定义了“惯性系”（inertial frame）

地面参考系:

地球自转加速度 $a \approx 3.4 \times 10^{-2}\ \mathrm{m/s}^2$（赤道）

地心参考系:

地球绕太阳公转加速度 $a \approx 6 \times 10^{-3}\ \mathrm{m/s}^2$

太阳参考系:

太阳绕银河系转加速度 $a \approx 1.8 \times 10^{-10}\ \mathrm{m/s}^2$

- **第二定律(Newton’s Second law)**

运动的变化与所加的动力成正比，并且发生在这力所沿的直线的方向上。

A force action on a body gives it an acceleration which is in the direction of the force and has a magnitude given by ma.

$$\boxed{\vec{F} = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{\mathrm{v}})}$$

$\vec{F}$：物体所受的合外力。

m：质量(mass)，它是物体惯性大小的量度，

也称惯性质量(inertial mass)。

若m = const.， 则有：

$$\boxed{\vec{F} = m\vec{a}}$$

$\vec{a}$：物体的加速度。

2.2 SI单位和量纲

国际单位制 (SI):

长度	质量	时间	热力学温度	电流	物质的量	发光强度
米	千克	秒	开	安培	摩尔	坎德尔
m	kg	s	K	A	mol	cd

国际单位制(SI)的力学基本量和单位：

物理量	单位	单位符号	单位的定义
时间	秒	s	^{138}Cs原子某特征频率光波周期的9 192 631 770 倍
长度	米	m	光在真空中在（1/299 792 458）s内所经过的距离
质量	千克	kg	保存在巴黎度量衡局的“kg标准原器”的质量

量纲

基本量以外的其他量和单位都可根据一定的关系式由基本量及其单位导出，分别称为**导出量**和**导出单位**。

导出量Q	物理量Q的量纲[Q]	导出单位
速度	$[v]=LT^{-1}$	m/s
加速度	$[a]=LT^{-2}$	m/s^2
力	$[F]=MLT^{-2}$	$kg \cdot m/s^2$ (N)
动量	$[p]=MLT^{-1}$	$kg \cdot m/s$

在SI中，基本力学量是长度、质量、时间，它们的量纲分别用 L、M、T 表示。

注意：只有量纲相同的项才能进行加减或用等式联接。

● 第三定律 (Newton's Third Law)

If one object exerts a force another, the other exerts the same force in opposite direction on the one.

$$\boxed{\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}}$$

作用力与反作用力

对牛顿定律的说明：

1. 牛顿定律只适用于惯性系；
2. 牛顿定律是对质点而言的，而一般物体可认为是质点的集合，故牛顿定律具有普遍意义。
3. 牛顿三定律是一个整体：

   第一定律说明了任何物体都有惯性；

   第二定律进一步说明了物体的惯性，物体的机械运动状态的改变及物体与其它物体相互作用三者的关系；

   第三定律说明了力出现的性质，即力是物体之间的相互作用，力是成对出现的，而且性质相同.

§2.3 常见的几种力

1. 重力 (Weight)

由于地球吸引而使物体受到的力叫做重力。

根据牛顿第二运动定律有:

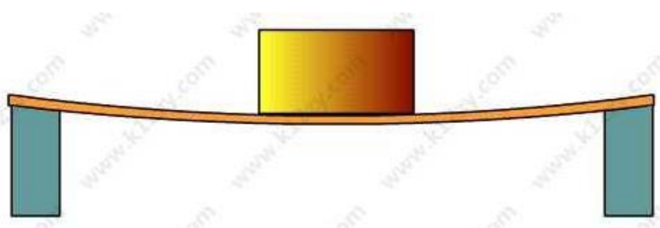
$$\vec{G} = m\vec{g}$$

注：1. 重力属于万有引力。

2. 在重力作用下，任何物体产生的加速度都是g。

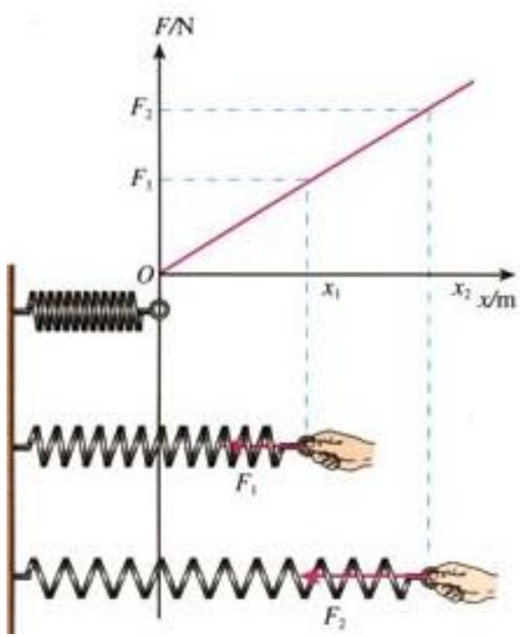
2. 弹性力(Elastic force)

发生形变的物体要恢复原状，从而对与它接触的物体产生力的作用，这种力叫弹性力。



压力/支持力

拉力/张力



弹力

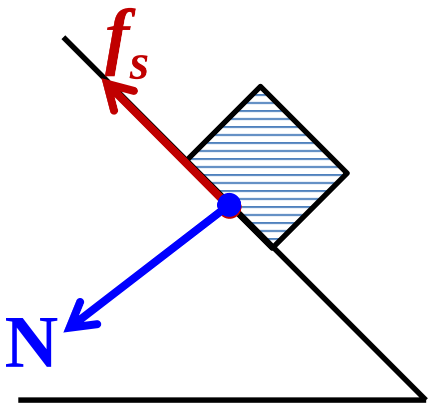
胡克定律：在弹性限度内，弹力和形变成正比。

$$f = -kx$$

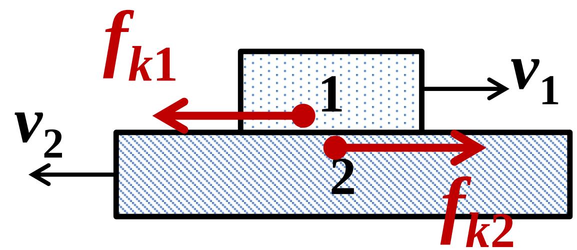
3. 摩擦力 (Frictional force)

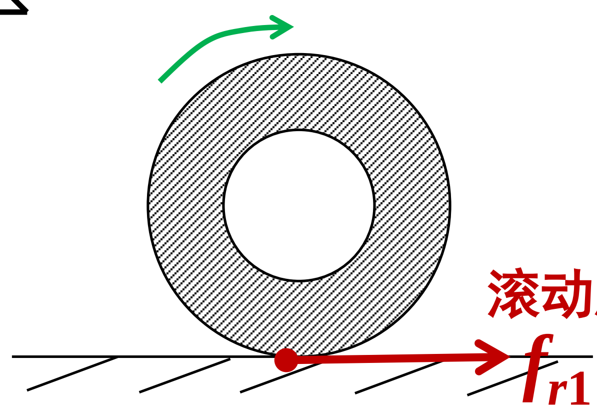
两个相互接触的物体沿着接触面相对运动时，或有相对运动趋势时，在接触面之间产生一对阻止相对运动的力。

静摩擦力 $f_{s\max}=\mu_s N$



滑动摩擦力 $f_k=\mu_k N$





4. 流体阻力(Fluid resistance)

（液体或气体）

流体阻力 $\begin{cases} f_d = k\upsilon & \text{(相对速率较小时)} \\ f_d = k\upsilon^2 & \text{(相对速率较大时)} \end{cases}$

§2.4 基本的自然力

1. 万有引力 (Gravitation)

任何物体与物体之间都存在着相互吸引的力，这种力称为万有引力。

$$F=\frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

引力常量$G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\ m^2/kg^2}$.

2、电磁力 (Electromagnetic force)

存在于静止电荷以及运动电荷之间的电性力和磁性力，统称为电磁力。

$$F=\frac{kq_1q_2}{r^2}$$

$k=9\times10^{9}\ \mathrm{N\ m^2/C^2}$

注意：在微观领域中，不带电的中性分子和原子之间也有电磁相互作用。

3. 强力(Strong nuclear force)

在微观领域中的一种短程力，存在于强子（质子、中子和介子）之间。

4. 弱力(weak nuclear force)

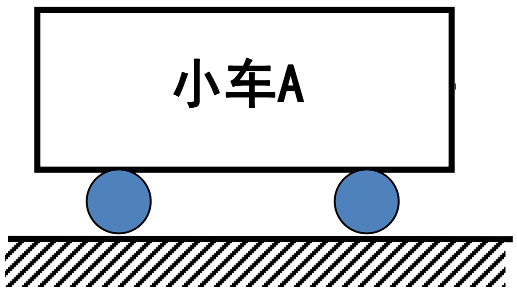
微观领域中的一种短程力，存在于强子和轻子（电子、中微子、μ子等）之间。

基本自然力的性质与特征

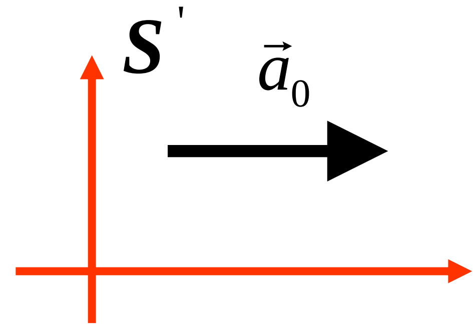
力的种类	万有引力	电磁力	弱力	强力
力程	∞长程力	∞长程力	$<10^{-17}$ m 短程力	$<10^{-15}$ m 短程力
强度(N)	10^{-34}	10^{2}	10^{-2}	10^{4}
相互作用物体	一切物体之间	一切带电粒子之间	多数粒子之间	强子之间
传递媒介	引力子 (尚未发现)	光子γ	中间玻色子$W^{\pm}$, Z^{0} (1983年发现)	胶子G (已被间接确认尚未被分离出来)
	大尺度范围内起决定作用 (天体)		主要发生在粒子衰变及俘获过程中	

§2.5 非惯性系和惯性力

例1：



地面S



1. 地面参考系S

小车的运动状态：静止 $\vec{a}=0$

根据牛顿第二定律 $\sum\vec{F}=0$

参考系S：牛顿定律成立

2. 加速运动的参考系S'

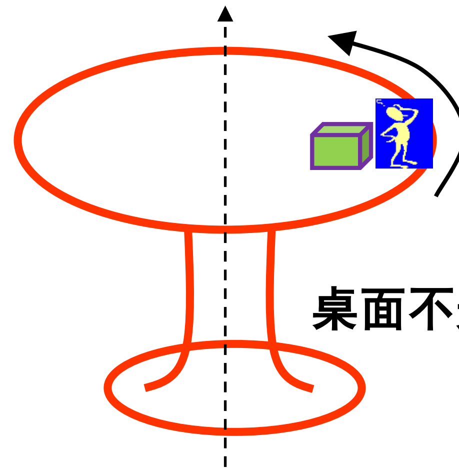
小车的运动状态：$\vec{a}=-\vec{a}_0$

小车的受力情况：$\sum\vec{F}=0\neq m\vec{a}$

参考系S'：牛顿定律不成立

牛顿定律仅适用于惯性系。

例2：



1. 地面参考系S　S：牛顿定律成立

$$a_n \neq 0 \qquad F = \mu mg$$

2. 站在圆盘上的观察者S’

$$a = 0 \qquad F = \mu mg \neq 0$$

S’：牛顿定律不成立

注：

1. 相对于一个已知惯性系作加速运动的参考系，一定是非惯性系。
2. 如果已确认某参考系为惯性系，则相对于此参考系作匀速直线运动的任何其他参考系也一定是惯性系。

为何还要在非惯性系中研究问题呢？

有些问题在非惯性系中研究较为方便。

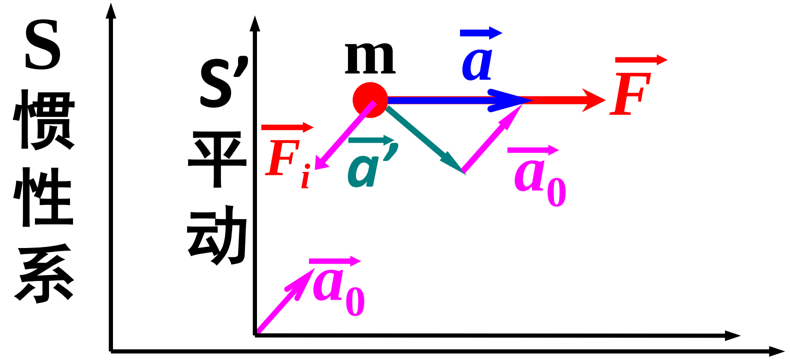
一. 平动非惯性系中的惯性力

在惯性性参考系S中：

物体的运动状态：加速度 $\vec{a}$

由运动的相对性知：$\vec{a}=\vec{a}'+\vec{a}_0$

物体的受力：$\vec{F}=m\vec{a}$



研究对象：质量为m的物体

$$\vec{F}=m\vec{a}=m\left(\vec{a}'+\vec{a}_0\right)$$

在加速度为$\vec{a}_0$的参考系S'中：

物体的运动状态：加速度 $\vec{a}'$

修改牛顿第二定律，使之于适用平动非惯性系：

$$\vec{F}-m\vec{a}_0=m\vec{a}'$$

$\vec{F}_i$ 惯性力

惯性力(inertial force)

$$\boxed{\vec{F}_i = -m\vec{a}_0}$$

非惯性系中的牛顿第二定律

$$\boxed{m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_i}$$

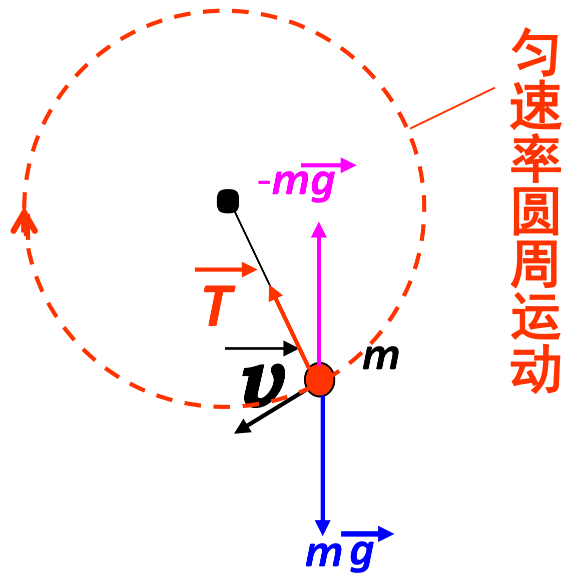
惯性力是参考系加速运动引起的附加力，本质上是物体惯性的体现。

它不是物体间的相互作用，没有反作用力，但有真实的效果。

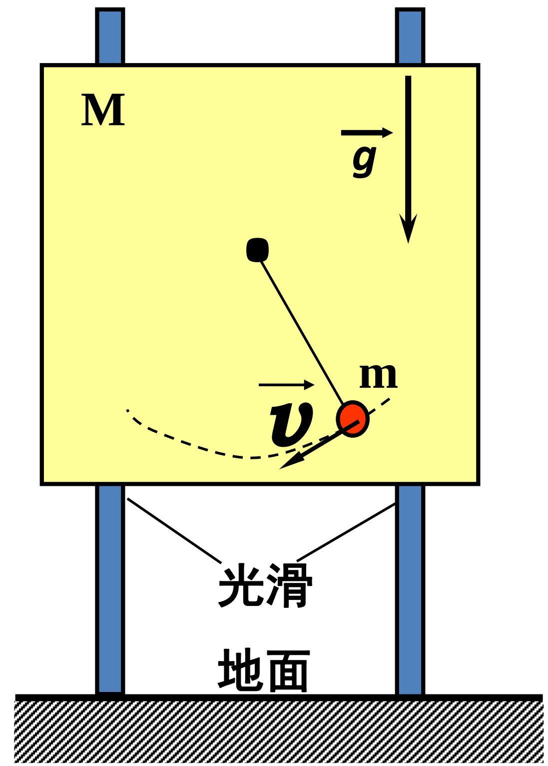
在非惯性系中讨论问题更方便.

举例：

讨论M自由下滑后，m对地面的运动情况。



M >> m



失重情况

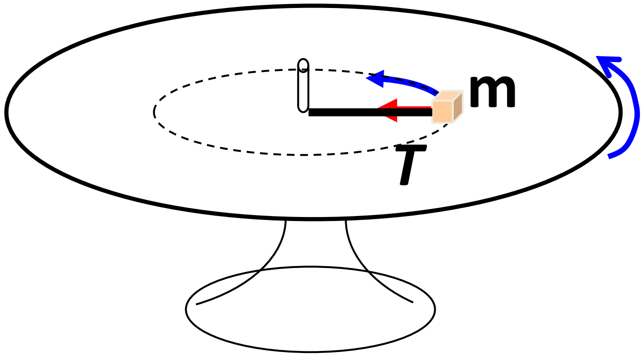
可分两步讨论：

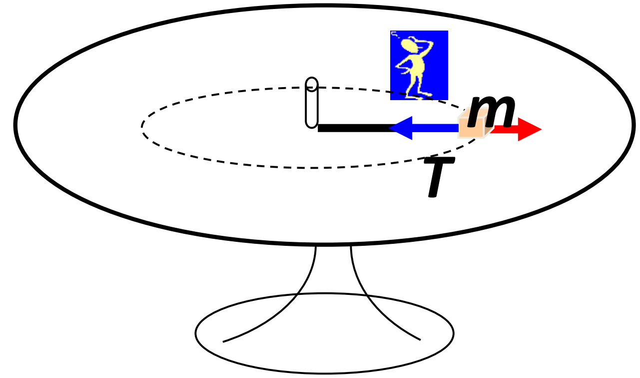
（1）在M参考系中，m作速率为v 的圆周运动。

（2）M对地作自由落体运动。

m对地面的运动，是以上两种运动的叠加。

惯性离心力





地面观察者：质点受绳子的拉力提供的向心力，所以作匀速圆周运动。

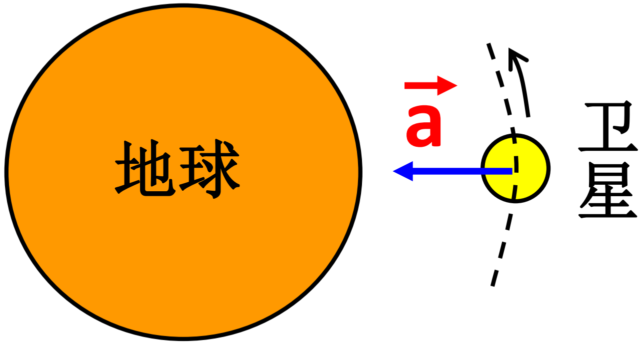
圆盘上观察者：质点受绳子的拉力，为什么静止?

在匀速转动的非惯性系中，

$$\vec{\mathrm{F}}+\vec{F}_i=-m\omega^2\vec{R}+\vec{F}_i=0$$

$$\vec{F}_i=m\omega^2\vec{R}$$

在匀速转动的非惯性系中，小球受到一个惯性离心力(inertial centrifugal force）的作用，大小与绳子的拉力相等，方向与之相反，所以小球处于静止的平衡状态。



绕地球自由飞行的飞船均可以视为**平动的非惯性系**（有地球引力引起的指向地心的加速度）

飞船中的物体所受的引力被惯性离心力完全抵消而出现失重。

在飞船中物体可以做到“不受力”。

失重问题

在太空中自由降落的升降机或绕地球自由飞行的飞船均可以视为平动的非惯性系（有地球引力引起的指向地心的加速度），其中物体所受的引力被惯性离心力完全抵消而出现失重。在那里物体可以真正做到“不受力”。所以在这样的非惯性系中，反而能够真正做到验证惯性定律。

§2.5 牛顿运动定律的应用

动力学问题：

- 已知力，求物体的运动状态
- 已知物体的运动状态，求力

适用范围：

1. 牛顿力学只适用于在惯性系内，解决低速运动问题；

   何谓高速？ ---- 速度与光速可比， 相对论

2. 牛顿力学只适用于宏观问题 。

   何谓微观?分子、原子、电子、原子核等，量子力学

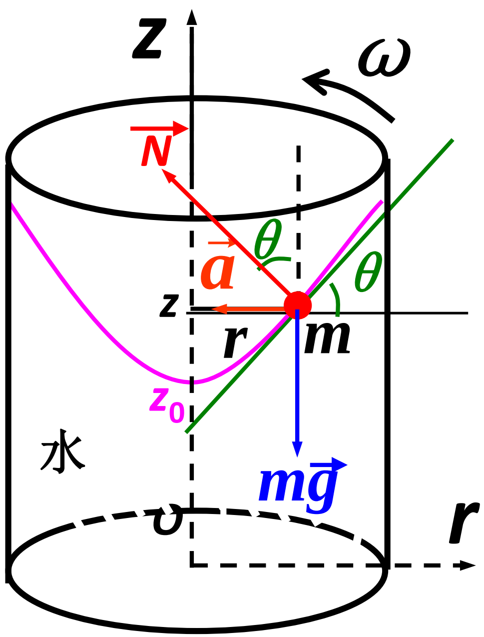
解题步骤：

1. 选研究对象；
2. 看运动情况；
3. 查受力；
4. 选择坐标系；
5. 列运动方程；
6. 解方程；
7. 必要时进行讨论。

应用举例

已知： 桶绕z 轴转动，ω= const.，水对桶是静止的。

求： 水面形状（z - r关系）



解： 1. **选对象：**

任选表面上一小块水为**隔离体**m；

2. **看运动：** m作匀速率圆周运动：

$$\vec{a} = -\omega^2 \vec{r}$$

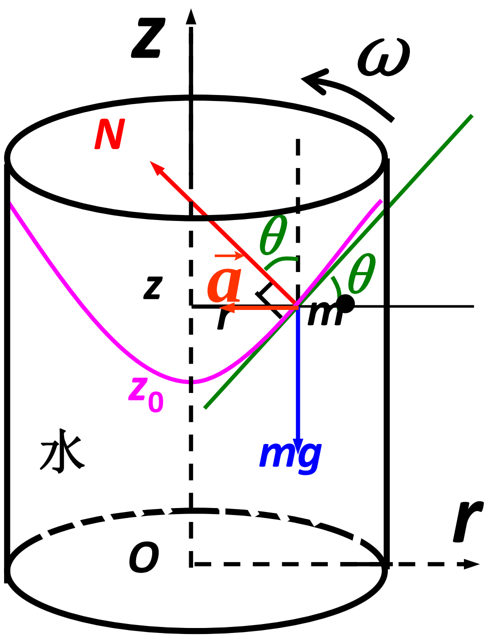
3. **查受力：**

受重力：$m\vec{g}$

及其余水的压力：$\vec{N}$

$\vec{N} \perp$ 水面（非粘滞流体间只能承受相互的压力）

4. 列方程：



$$\vec{N}+m\vec{g}=m\vec{a}=-m\omega^2\vec{r}$$

z向：$N\cos\theta-mg=0$ (1)

r向：$-N\sin\theta=-m\omega^2 r$ (2)

由导数关系：$\mathbf{tg}\,\theta=\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}r}$ (3)

由式(1)(2)(3)得：$\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}r}=\dfrac{\omega^2}{g}r$

分离变量：$\mathrm{d}z=\dfrac{\omega^2}{g}r\,\mathrm{d}r$

等号双方积分：$\int_{z_0}^{z}\mathrm{d}z=\int_0^r\dfrac{\omega^2}{g}r\,\mathrm{d}r$

解得：

$$z=\frac{\omega^2}{2g}r^2+z_0$$ （旋转抛物面）

若不旋转时水深为h，桶半径为R ，因旋转前后水的体积不变，有：

$$\int_0^R z\cdot 2\pi\ r\,\mathrm{d}r=\pi R^2h$$

$$\int_0^R(\frac{\omega^2}{2g}r^2+z_0)2\pi r\,\mathrm{d}r=\pi R^2h$$

解得：

$$z_0=h-\frac{\omega^2R^2}{4g}$$

5. 验结果：

$$z=\frac{\omega^2}{2g}r^2+z_0=\frac{\omega^2}{2g}r^2-\frac{\omega^2}{4g}R^2+h$$

验证：

- 量纲的分析： $[\omega]=1/T^2$， $[r]=m$， $[g]=m/T^2$，

$$[\frac{\omega^2}{2g}r^2]=[\frac{\omega^2}{4g}R^2]=\frac{(1/T^2)\cdot m^2}{m/T^2}=m=[h]=[z]$$ 正确。

- 过渡到特殊情形：

$\omega=0$，有 $z=z_0=h$ 正确

- 看变化趋势：

r 一定时，$\omega\uparrow\rightarrow(z-z_0)\uparrow$ 合理

作业：

2.2

2.4