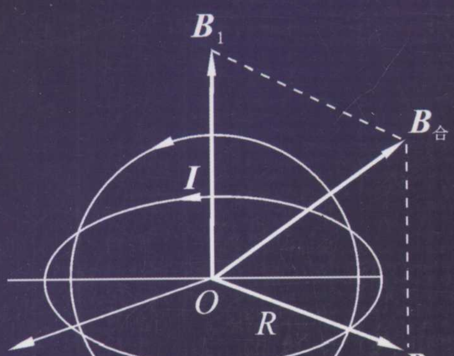
大学物理精品课程系列教材

吉首大学“十一五”规划教材

大学物理学习指导



唐世洪　主编

華中科技大學出版社

http://www.hustp.com

大学物理精品课程系列教材

吉首大学“十一五”规划教材

大学物理
学习指导

主　编　唐世洪

编　委　彭金璋　邬云雯　颜　琳

王小云　叶伏秋　杨　红

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学习指导/唐世洪　主编.—武汉:华中科技大学出版社,2008年11月
ISBN 978-7-5609-4882-9

Ⅰ.大…　Ⅱ.唐…　Ⅲ.物理学-高等学校-教学参考资料　Ⅳ.O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第149175号

大学物理学习指导　　　唐世洪　主编

责任编辑:朱建丽　　　封面设计:潘　群
责任校对:刘　竣　　　责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)
武昌喻家山　邮编:430074　电话:(027)87557437

录　排:武汉正风图文照排中心
印　刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:710mm×1000mm　1/16　印张:20.5　字数:420 000
版次:2008年11月第1版　印次:2008年11月第1次印刷　定价:35.00元
ISBN 978-7-5609-4882-9/O·467

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前　言

物理学是研究、阐述物质的组成、性质、运动规律和相互作用的学科。它所描述的基本概念、基本规律和研究方法，已被广泛应用到其他各类学科领域中，是自然科学中最基本、最重要的基础学科之一。

新时代大学生的培养对大学物理课程教学提出了新的要求，教师在传授物理理论知识的同时，应特别注重向学生传授有关物理学的研究方法和思维方式及物理学的应用，为培养社会需要的创新型人才打下坚实的基础。

物理学内容广泛，知识点难度有不同层次。因此，选择一本好的教材使学生在较短的时间内掌握必要的物理知识并尽可能多地了解物理学在当今社会前沿的一些应用，这是尤为重要的。

为适应"高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划"的需要，这套教材总结了作者30多年的大学物理教学和实践经验，并吸取了国内外众多优秀教材的优点。教材深入浅出地讲述了物理学基本概念、基本理论，也适时地介绍了物理学在其他学科和技术领域的应用。

全套教材分为《大学物理学》(上、下册)和《大学物理学习指导》，总共三册。

全套教材集吉首大学"基础物理学"优秀教学团队全体成员的共同智慧，由唐世洪教授执笔编写而成；参与本套教材编写工作的教师多年来一直从事大学物理教学，他们在物理教学方面积累的丰富的经验和许多独到的见解已经融入教材。

由于编者水平有限，加之时间仓促，疏漏和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编　者

2008年9月

目　　录

第一篇　力　　学

第二篇　热　　学

第五篇 光 学

第六篇 量子物理学

第一篇 力学

第一章 质点的运动

一、本章要求

(1) 掌握描述质点运动状态的方法,建立运动学的基本概念:质点与质点系、参照系、位置矢量、位移、路程、速度、加速度等。

(2) 熟练掌握质点运动学的两类问题,即用求导法由已知的运动学方程求速度和加速度;用积分法由已知质点的运动速度和加速度求质点的运动学方程。

(3) 熟悉和掌握速度和加速度在几种常用坐标系(直角坐标系、自然坐标系、极坐标系等)中的表达形式,加深对速度与加速度的瞬时性、矢量性和独立性等基本特性的理解。

(4) 掌握圆周运动的角量表示及角量与线量之间的关系。

(5) 加深运动相对性的理解,掌握相对运动概念以及相应的速度合成和加速度合成公式。

二、基本内容

1. 质点

当描述一个物体的运动时,如果可以忽略这个物体的大小、内部结构等,则这个物体便可视为质点。一个物体能否看做质点,主要取决于所研究问题的性质。

2. 参照系

描述一个物体运动时作为参照的其他物体或物体系称为参照系。

3. 运动方程

表示质点位置随时间变化而变化,其运动方程为

$$\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$$

用直角坐标系表示为 $\boldsymbol{r}(t)=x(t)\boldsymbol{i}+y(t)\boldsymbol{j}+z(t)\boldsymbol{k}$

$$x=x(t),\quad y=y(t),\quad z=z(t)$$

用自然坐标系表示为 $\boldsymbol{s}=\boldsymbol{s}(t)$

4. 位移矢量

如图 1-1 所示,质点在 $t\sim(t+\Delta t)$内的位移为

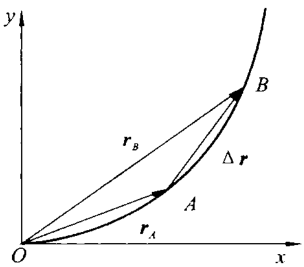


图 1-1

$$\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t+\Delta t)-\boldsymbol{r}(t)$$

5. 瞬时速度

速度是描述物体运动状态的物理量，表示位置随时间的变化率，即

$$\boldsymbol{v}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$$

$\boldsymbol{v}$ 在直角坐标系中的分量式为

$$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},\quad v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t},\quad v_z=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$$

6. 瞬时加速度

加速度是描述物体运动状态变化的物理量，表示速度随时间的变化率，即

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$$

$\boldsymbol{a}$ 在直角坐标系中的分量式为

$$a_x=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2},\quad a_y=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2},\quad a_z=\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2}$$

7. 速度和加速度在自然坐标系中的表示

速度在自然坐标系中的表达式为

$$\boldsymbol{v}=v\boldsymbol{\tau}=\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}$$

加速度在自然坐标系中的表达式为

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_\tau+\boldsymbol{a}_n=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}+\frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{n}$$

8. 圆周运动

(1) 实际上，圆周运动是在自然坐标系下 $\rho=R$ 时的加速运动，即

$$a_n=\frac{v^2}{R}$$

质点总的加速度为

$$|\boldsymbol{a}|=\sqrt{a_\tau^2+a_n^2}=\sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right)^2+\left(\frac{v^2}{R}\right)^2}$$

若 $a_\tau=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=0$，则 $a=a_n=\frac{v^2}{R}$，质点做匀速率圆周运动；若 $a_\tau=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\neq 0$，$|\boldsymbol{a}|=\sqrt{a_\tau^2+a_n^2}=\sqrt{\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right)^2+\left(\frac{v^2}{R}\right)^2}$，则质点做变速率圆周运动。

(2) 若 $\boldsymbol{a}$ 恒定，质点做匀加速运动，运动轨迹取决于初速度与加速度之间的夹角 θ。

当夹角 $\theta=0$ 或 $180°$时，质点做匀变速直线运动，由 $\rho\to\infty$，可以推出

$$\begin{cases} v_t - v_0 = at \\ x - x_0 = v_0 t + \dfrac{1}{2}at^2 \\ v_t^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \end{cases}$$

这便是大家在中学就非常熟悉的匀变速直线运动的表达式。

当 $a=-g$，且 $v_0=0$ 时，上式即可化为自由落体运动的表达式；当 $a=-g$，且与 v_0 的夹角为 $\frac{\pi}{2}$ 时，质点沿 v_0 方向做匀速运动，在竖直方向做自由落体运动，这便是大家熟知的平抛运动；当 $a=-g$，$v_0>0$ 且与 g 共线时，代入上式，即可得竖直向上的抛体运动表达式；当 a 与 v_0 的夹角在 0 到 π 之间时，质点做斜抛运动。此时质点在水平方向（取为 x 方向）做匀速运动，竖直方向（取为 y 方向）做匀变速直线运动，运动方程为

$$\begin{cases} x = v_0 \cos\theta\, t \\ y = v_0 \sin\theta t - \dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

若消去参变数 t，则得轨道为抛物线的运动，其方程为

$$y = x\tan\theta - \frac{1}{2}g\frac{x^2}{(v_0\cos\theta)^2}$$

由上式可以求得抛物体的水平射程和射高分别为

$$x = \frac{v_0^2\sin 2\theta}{g}, \quad h = \frac{v_0^2\sin^2\theta}{2g}$$

9. 角量与线量的关系

角位置　　$\theta=\theta(t)$

角位移　　$\Delta\theta=\theta(t+\Delta t)-\theta(t)$

角速度　　$\omega=\dfrac{d\theta}{dt}$

角加速度　　$\beta=\dfrac{d\omega}{dt}=\dfrac{d^2\theta}{dt^2}$

角量与线量之间的关系

$$v=r\omega, \quad a_\tau=ra, \quad a_n=r\omega^2$$

10. 相对运动

研究对象相对静止参照系的运动称为绝对运动，位置矢量用 $\boldsymbol{r}_{绝}$ 表示；运动参照系相对静止参照系的运动称为牵连运动，位置矢量用 $\boldsymbol{r}_{牵}$ 表示；研究对象相对运动参照系的运动称为相对运动，位置矢量用 $\boldsymbol{r}_{相}$ 表示。绝对运动、牵连运动、相对运动之间的关系为

$$\boldsymbol{r}_{绝}=\boldsymbol{r}_{相}+\boldsymbol{r}_{牵}$$

$$\Delta \boldsymbol{r}_{绝} = \Delta \boldsymbol{r}_{相} + \Delta \boldsymbol{r}_{牵}$$
$$\boldsymbol{v}_{绝} = \boldsymbol{v}_{相} + \boldsymbol{v}_{牵}$$
$$\boldsymbol{a}_{绝} = \boldsymbol{a}_{相} + \boldsymbol{a}_{牵}$$

三、例 题

（一）填空题

1. 一质点沿 x 轴运动，它的速度 v 和时间 t 的关系如图 1-2 所示，则在$0\sim t_1$时间间隔内，质点沿 x 轴________方向做________运动；在 $t_1\sim t_2$时间间隔内，质点沿 x 轴________向做________运动。

负；匀加速直线；负；匀减速直线。

由图 1-2 可知，v 为负，所以，质点沿 x 轴负向做匀加速直线运动，在$t_1\sim t_2$时间间隔内，质点从负的最大速度减小为零，做加速度为正、速度为负的匀减速直线运动。

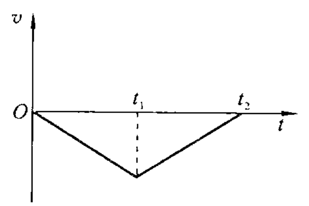


图 1-2

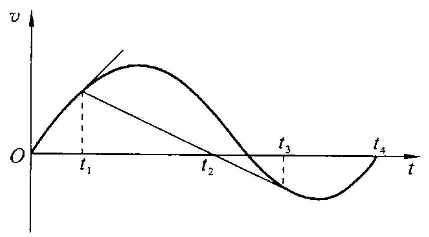


图 1-3

2. 质点沿 x 轴做直线运动，其速度 v 与时间 t 的关系如图 1-3 所示，则在 t_1时刻曲线的切线斜率表示________，t_1与 t_3之间曲线的割线斜率表示________，在 $0\sim t_4$时间间隔内，质点的位移可表示为________，质点所走的路程可表示为________。

该时刻质点的瞬时加速度；从 t_1到 t_3时间内的平均加速度；$\int_0^{t_4} v\mathrm{d}t$；$\int_0^{t_4} |v|\,\mathrm{d}t$ 。

由 $a=\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$知，在 t_1时刻曲线的切线斜率就是该时刻质点的瞬时加速度，t_1与 t_3之间曲线的割线斜率为 $\bar{a}=\dfrac{v_{t_3}-v_{t_1}}{t_3-t_1}$，正好是 $t_1\sim t_3$时间间隔内的平均加速度；$\int_0^{t_4} v\mathrm{d}t$ 表示在 $\mathrm{d}t$ 时间内质点的位移，即 v 与 t 轴围成的所有窄条的面积的代数和（面积在 t 轴下方的为负），为 t 时间内的位移的矢量和，所以 $\int_0^{t_4} v\mathrm{d}t$ ，表示 $0\sim t_4$ 时间内质点的位移而各面积的绝对值的和，即 $\int_0^{t_4} |v|\,\mathrm{d}t$ 则表示了在 $0\sim t_4$时间间隔

内，质点走过的总路程。

3. 一质点做半径为 R 的圆周运动，在 $t=0$ 时经过点 P，此后其速率 v 按 $v=A+Bt$（A、B 为常量）变化，则质点沿圆周运动一周再经过点 P 时的切向加速度为________，法向加速度为________。

$a_\tau=B$；$a_n=\dfrac{A^2}{R}+4\pi B$。

由 $a_\tau=\dfrac{dv}{dt}$，得 $a_\tau=B$；

由 $v=\dfrac{ds}{dt}=\dfrac{ds}{dt}\dfrac{dv}{dv}=a_\tau\dfrac{ds}{dv}=B\dfrac{ds}{dv}$ 得

$$v\,dv=B\,ds$$

即
$$\int_A^v v\,dv=B\int_0^{2\pi R}ds=B2\pi R=\frac{v^2-A^2}{2},v^2=A^2+B4\pi R$$

所以 $a_n=\dfrac{v^2}{R}=\dfrac{A^2}{R}+4\pi B$。

（二）选择题

1. 一质点做抛物运动（忽略空气阻力），如图 1-4 所示，质点在运动过程中，以下哪种说法正确？（　　）

A. $\dfrac{dv}{dt}$不变

B. $\dfrac{d\boldsymbol{v}}{dt}$不变化

C. 法向加速度不变

D. 轨道在最高点曲率半径大

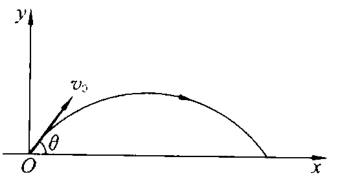


图 1-4

B。

$\dfrac{dv}{dt}$是质点加速度 g 在抛物线轨道上各点切线方向的分量大小，即切向加速度 a_τ 的大小（$a_\tau=g\sin\alpha$，α 为 g 与轨迹法线的夹角）。由于在轨道上不同点的 α 不同（例如，在起点 $\alpha=\theta$，θ 为发射角，在最高点 $\alpha=0$，下落时 α 逐渐变大），所以切向加速度随 α 变化而变化。这也可理解为质点在做抛物运动时其速度大小是非均匀变化的，所以$\dfrac{dv}{dt}$变化。但如果将$\dfrac{dv}{dt}$理解为质点运动的加速度 a，就会得出错误的结论。故 A 错。

质点做抛物运动时加速度$\dfrac{d\boldsymbol{v}}{dt}=\boldsymbol{g}$，即等于重力加速度，为一常矢量。故 B 正确。

法向加速度 a，是质点加速度在轨道上各点沿法向的分量（$a_n=g\cos\alpha$），由于 α 变化，所以法向加速度大小也是变化的。故 C 错误。

因为法向加速度 $a_n=\dfrac{v^2}{\rho}=g\cos\alpha$，故在轨道起点和终点($\alpha=\theta$)，$a_n$ 值最小，在最高点($\alpha=0$)，$a_n=g$ 其值最大。而在起点和终点，$v=v_0$ 值最大，在最高点，$v=v_0\cos\theta$ 值最小。由 $\rho=\dfrac{v^2}{a_n}$ 知，在起点和终点，曲率半径 ρ 一定最大，在最高点，ρ 最小。考虑在起点(或终点)的 ρ，有

$$|a_n|=\frac{v_0^2}{|\rho|}=g\cos\theta$$

故

$$|\rho|=\frac{v_0^2}{g\cos\theta}$$

故 D 错。

本选题的目的是深入理解质点曲线运动加速度的物理意义。

2. 质点 P 沿如图 1-5 所示曲线运动，轨迹由 A 至 B，$\boldsymbol{r}$ 为某时刻位矢，以下哪种说法正确？(　　)

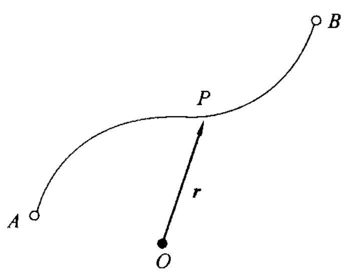


图 1-5

A. $\left|\int_A^B \mathrm{d}\boldsymbol{r}\right|$ 代表总位移

B. $\int_A^B |\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$ 代表总位移的大小

C. $\int_A^B \mathrm{d}r$ 代表位置矢大小的增量

C。

$\mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 代表元位移，$\int_A^B \mathrm{d}\boldsymbol{r}$ 是质点从 A 到 B 过程中各元位移之和，即该过程中的总位移，所以 $\left|\int_A^B \mathrm{d}\boldsymbol{r}\right|$ 为总位移的模，即总位移的大小。故 A 错。

$|\mathrm{d}\boldsymbol{r}|=|\mathrm{d}s|$ 表示与元位移相应的路程，$\int_A^B |\mathrm{d}\boldsymbol{r}|$ 是质点从 A 到 B 沿曲线 $\overset{\frown}{APB}$ 所经历的总路程。故 B 错。

r 为矢径 $\boldsymbol{r}$ 的模，即 $r=|\boldsymbol{r}|$，$\mathrm{d}r$ 是微小位移时矢径大小的变化(或增量)，即

$$\mathrm{d}r=r(t+\mathrm{d}t)-r(t)$$

则 $\int_A^B \mathrm{d}r$ 是质点从 A 到 B 时矢径大小的增量，即 $\int_A^B \mathrm{d}r=r_B-r_A$。故 C 正确。

本选题的目的是正确区分位移矢量模的积分与位移矢量积分的模以及位移矢量模的增量与位移矢量的增量。

(三) 计算题

1. 一升降机以加速度 $a=1.22\ \mathrm{m/s^2}$ 上升。当上升速度 $v_0=2.44\ \mathrm{m/s}$ 时，有

一螺帽自升降机顶板上松落，升降机顶板与底板间距离 $h=2.74$ m。试求：

(1) 螺帽从顶板落到底板所需时间 t；

(2) 螺帽相对于地面下降的距离 d。

解　(1) 选螺帽为研究对象，升降机为运动参照系，地面为静止参照系，则由题意知，螺帽相对运动参照系的位移为 h，初始速度为 0，则位移与时间的关系式为

$$h=\frac{1}{2}a_{相}t^2 \tag{1}$$

而相对运动加速度之间的变换关系式为

$$\boldsymbol{a}_{绝}=\boldsymbol{a}_{相}+\boldsymbol{a}_{牵}$$

由于 $\boldsymbol{a}_{绝}=g$，且方向向下，$\boldsymbol{a}_{牵}=a$ 方向向上，两者都在一条直线上，故可以用代数量替代矢量运算，所以选向下为正，则有

$$\boldsymbol{a}_{相}=g-(-a)=g+a \tag{2}$$

将式(2)代入式(1)可得

$$t=\sqrt{\frac{2h}{a_{相}}}=\sqrt{\frac{2h}{a+g}}=\sqrt{\frac{2\times2.74}{1.22+9.80}}\ \text{s}=0.705\ \text{s}$$

(2) 同理由 $\boldsymbol{r}_{绝}=\boldsymbol{r}_{相}+\boldsymbol{r}_{牵}$ 和(1)中的正负号规定，得

$$r_{绝}=d=h-r_{牵}=h-(v_0t+\frac{1}{2}at^2)=[2.72-(2.44\times0.705+\frac{1}{2}\times1.22\times0.705^2)]\ \text{m}=0.712\ \text{m}$$

2. 雷达与火箭发射台的距离为 l，观测沿竖直方向向上发射的火箭，如图 1-6 所示，得到 θ 随时间变化的规律为 $\theta=kt$（k 为常数）。试写出火箭的运动方程，并求出当 $\theta=\frac{\pi}{6}$时，火箭的速度和加速度。

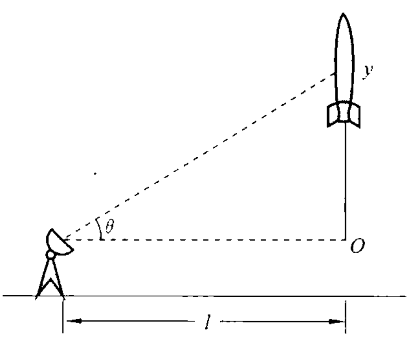


图 1-6

解　建立如图 1-6 所示的坐标系，则

$$y=l\tan\theta=l\tan kt$$

$$v=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\frac{lk}{\cos^2 kt}$$

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=2lk^2\tan kt\cdot\sec^2 kt$$

当 $\theta=\frac{\pi}{6}$时，$v=\frac{4}{3}lk$，$a=\frac{8\sqrt{3}}{9}lk^2$。

因此火箭匀加速上升。

3. 如图 1-7 所示，一张致密光盘(CD)音轨区域的内、外半径分别为 $R_1=2.2\ \mathrm{cm}$，$R_2=5.6\ \mathrm{cm}$，径向音轨密度 $n=650$ 条/mm。在 CD 唱机内，光盘每转一圈，激光头沿径向向外移动一条音轨，激光束相对光盘是以 $v=1.3\ \mathrm{m/s}$ 的恒定线速度运动的。试求：

(1) 该光盘的全部放音时间是多少?

(2) 激光束到达离盘心 $r=5.0\ \mathrm{cm}$ 处时，光盘转动的角速度和角加速度各是多少?

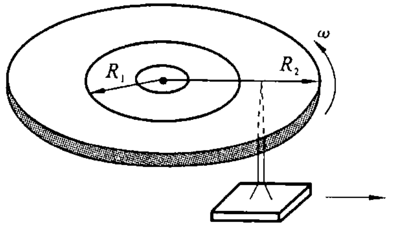


图 1-7

解 (1)设激光束在光盘音轨上的投射点相对于光盘中心的位矢为 $\boldsymbol{r}$，则在半径为 r，宽度为 $\mathrm{d}r$ 的环带区域内音轨的长度为

$$l=2\pi rn\mathrm{d}r$$

激光束扫过这部分音轨所需的时间为

$$\mathrm{d}t=\frac{2\pi rn\mathrm{d}r}{v}$$

故该光盘的全部放音时间为

$$t=\int_{t_1}^{t_2}\mathrm{d}t=\frac{2\pi n}{v}\int_{R_1}^{R_2}r\mathrm{d}r=\frac{\pi n}{v}(R_2^2-R_1^2)$$

$$=\frac{\pi\times 650\times 10^3\times(0.056^2-0.022^2)}{1.3}\ \mathrm{s}=4.16\times 10^3\ \mathrm{s}$$

(2) 离盘心 $r=5.0\ \mathrm{cm}$ 处时光盘转动的角速度为

$$\omega=\frac{v}{r}=\frac{1.3}{0.05}\ \mathrm{rad/s}=26\ \mathrm{rad/s}$$

可知

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\frac{v}{2\pi rn}$$

角加速度为

$$\beta=\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{v}{r}\right)=-\frac{v}{r^2}\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=-\frac{v^2}{2\pi r^3 n}$$