图解动力学

田俊民 编

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

图解动力学

田俊民　编

机械工业出版社

本书结合趣味十足的图画和浅显的文字，以科普读物的形式，详细介绍了运动学和动力学的各项内容，包括点的运动、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动、动力学基本方程、动量定理、动量矩定理、动能定理、动静法、碰撞、机械振动基础。全书图文并茂，内容通俗易懂，可轻松掌握，随查随用。

本书可供企业的相关工程师和技术工人使用，也可作为学生学习运动学和动力学的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

图解动力学/田俊民编. —北京：机械工业出版社，2013.11
ISBN 978-7-111-44973-7

Ⅰ.①图… Ⅱ.①田… Ⅲ.①动力学-普及读物 Ⅳ.①0313-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第288695号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：孔 劲 责任编辑：孔 劲
版式设计：霍永明 责任校对：赵 蕊
封面设计：路恩中 责任印制：张 楠

北京玥实印刷有限公司印刷
2014年1月第1版第1次印刷
260mm×184mm · 15.25印张 · 571千字
0001—2000册
标准书号：ISBN 978-7-111-44973-7
定价：39.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
策划编辑：（010）88379772

电话服务
社服务中心：（010）88361066
销售一部：（010）68326294
销售二部：（010）88379649
读者购书热线：（010）88379203

网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952

前言

古代希腊哲学家曾经说过:“整个自然界，从最小的东西到最大的东西，从沙粒到太阳，从原生生物到人，都处于永久的消灭和产生中，处于不间断的流动中，处于无休止的运动和变化中。”恩格斯也曾说过:“运动是物质的固有属性。世界上除了物质的运动和运动着的物质之外，便什么都不存在。”

人们发现，人被从树上落下的果实砸到会感到疼痛，石块会击伤奔跑的动物，狂风会将大树连根拔起，流动的河水会把落入水中的大树冲走。透过这些现象,人们逐渐意识到物体之间的运动和相互作用。到了17世纪，伟大的科学界牛顿总结出了牛顿三大运动定律，从而形成了“古典力学”的完整体系。

作为工程技术人员，“力学”这门课程是必须掌握的，否则，无法设计出合理的结构和机器。现在，我国的经济建设正发生着着日新月异的变化，我们不仅制造出了火箭和卫星，还制造出了时速高达三百千米的高速列车。所有这些科学技术的进步都离不开力学知识。没有科学的理论知识，便不能有科学的实践。在生产实践中，人们遇到的力学问题，不像是书中所举的例题那样单纯和典型，而是错综复杂的，这就需要我们必须融会贯通地掌握所学的力学知识。只有这样，才能做到善于分析问题的实质，建立合理的力学模型。

本书《图解动力学》包括“运动学”和“动力学”两篇。运动学研究物体运动的几何性质而不涉及力的作用;动力学研究物体的运动与物体上所受力的关系。其知识深度建立在中等专业技术学校的水平上。全书图文并茂，内容通俗易懂，可供企业的相关工程师和技术工人使用，也可作为学生学习运动学和动力学的参考书。

本书在编写过程中，难免有疏漏和不足，敬请广大读者批评指正。

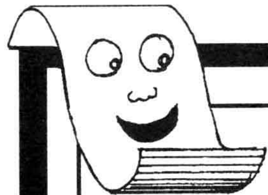
编　者

目　录

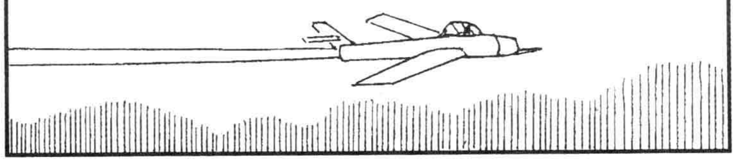
目　录

第一篇 运 动 学

运动学



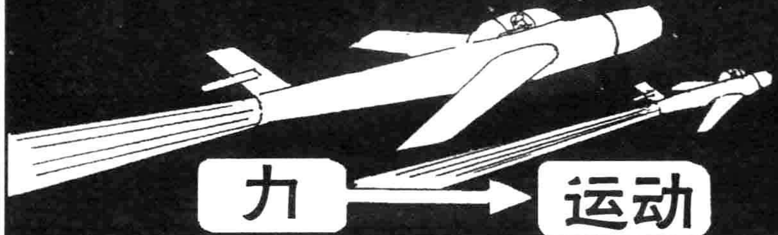
研究物体运动的几何性质，即物体在空间的位置随时间变化的规律，物体的**运动轨迹**、**速度**和**加速度**等，而不考虑影响物体运动的物理因素（如力和质量等）。



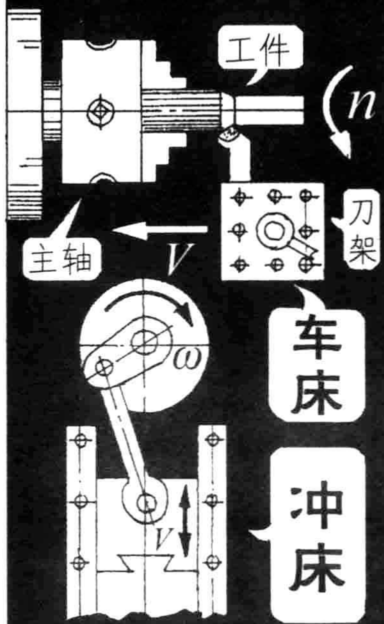
运动学

学习运动学的目的

为学习动力学打下基础，只有掌握了物体运动的几何性质，才能进一步研究物体运动与作用在物体上的力之间的关系。



运动学在工程技术中也有独立应用的意义，设计一台机器，就是要求它实现某种运动，以满足生产或工艺上的需要。

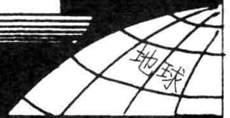


运动的传递与转换

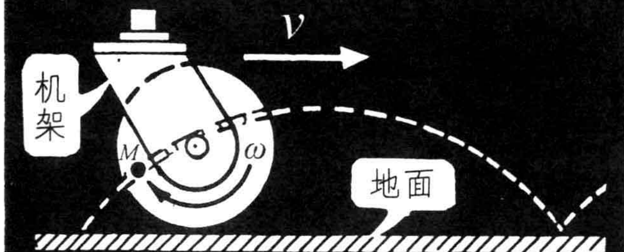
车床为了加工零件，主轴要带动工件旋转，刀架要带动车刀送进，同时，主轴的转速和刀具的进给速度都要在一定范围内变化。如，曲柄压力机为了冲压工件，要将电动机的旋转运动变为冲头的往复直线运动等。这些运动的传递与转换，都需要掌握运动分析的基本方法和计算。掌握描述运动规律的方法，计算点的轨迹速度。

运动学

运动的参考系



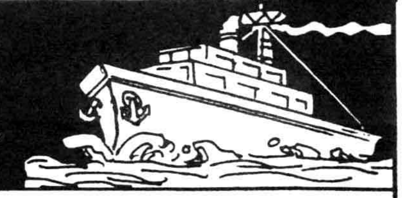
工程问题中最常用的参考系是与地球（地面、机构）固连的坐标系，简称为定参考系或静参考系。



例如，观察一个在地面上作纯滚动的车轮上的点 M 的运动，如果以车架作参考系，看到点 M 是绕轮轴作圆周运动；如果以车轮为参考系，看到点 M 是静止的；如果以地面为参考系，则看到点 M 是作复杂的曲线运动。

这就是运动的相对性！

几个概念

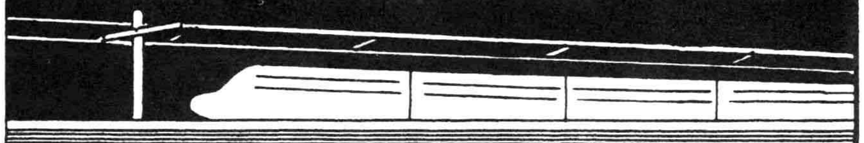


瞬时：指物体在运动过程中的某一时刻，它对应于运动的瞬时状态。

时间间隔：是指两个瞬时相隔的一段时间。

质点（点或动点）：当物体的几何尺寸和形状，对研究的问题不起主要作用且对所研究的结论影响不大时，可将这个物体简化为一个质点。如火箭、炮弹可简化为质点。

刚体：如果它的体积与其运动范围相比较，并不是一个可以忽略的微量，那么就需将它作为一个刚体。刚体可看作无数个相互距离保持不变的质点的组合，研究刚体的运动，也必须以点的运动为基础。



点的运动

点的运动规律

点在空间的位置随时间的变化关系称为点的运动规律。

轨迹

点在空间运动时经过的路线称为点的轨迹。

按轨迹的形状来分

- 直线运动
- 曲线运动

点的运动的基本问题是：

根据已知的运动条件建立描述点的运动规律的方法。

确定任一瞬时点在所选择的参考系内的位置。

求出点的运动轨迹。

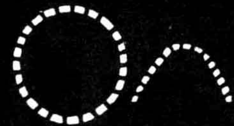
计算在任一瞬时点的速度和加速度。

点的运动学研究动点相对某参考系的几何位置随时间变动的规律！

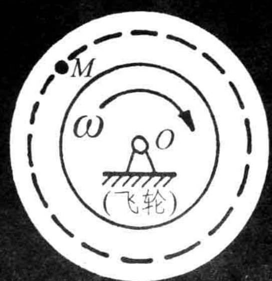
点的运动——确定点的位置的方法，运动方程

研究点的运动，首先必须确定每一瞬时它在空间的位置。确定点的位置的方法有多种，在计算中常用的有自然法和直角坐标法等。

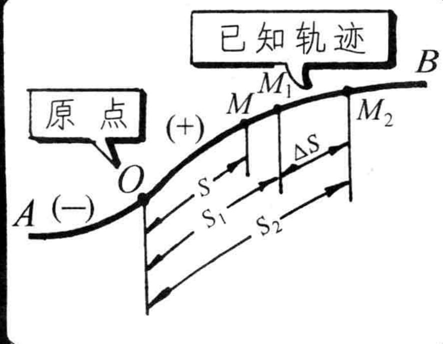
一．自然法



当点的运动轨迹为已知时，可用自然法确定其位置，自然法是以点的轨迹作为坐标轴来确定动点的位置的方法。作法如右：



转动的飞轮上的点的轨迹都是圆周。



设定点 M 沿已知轨迹 AB 运动，则在轨迹上任选一点 O 作为计算弧长的原点，在原点的两侧定出正负方向，如左图所示，这样每一个弧长的代数值就对应确定轨迹上的一个点。因此，动点 M 在轨迹上的位置可用弧长 $\overset{\frown}{OM}$ 来确定，$\overset{\frown}{OM}$ 称为动点在轨迹上的弧坐标，用 s 表示。当动点运动时，其弧坐标 s 随时间而变化，由于点是连续地从一点运动到另一点，且在任一瞬时，动点在空间只占一个位置，所以，弧坐标 s 是时间 t 的单值连续函数，即

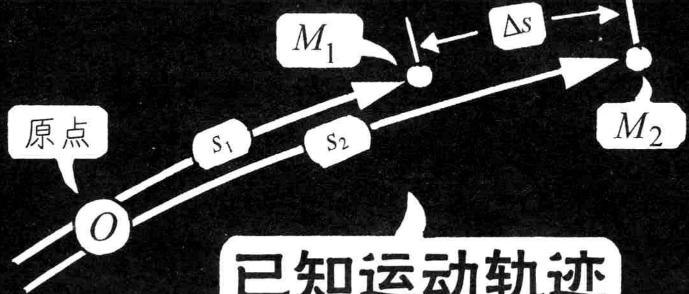
$$s=f(t) \cdots (1)$$

点沿已知轨迹的运动方程

若已知点的运动轨迹和弧坐标 s 随时间 t 变化的关系，则动点任一瞬时在空间的位置便可完全确定。

点的运动——确定点的位置的方法，运动方程

弧坐标与路程的区别



已知运动轨迹

弧坐标

弧坐标是动点沿轨迹离原点的距离，是表示动点某瞬时的位置的代数值，其值与原点位置有关。

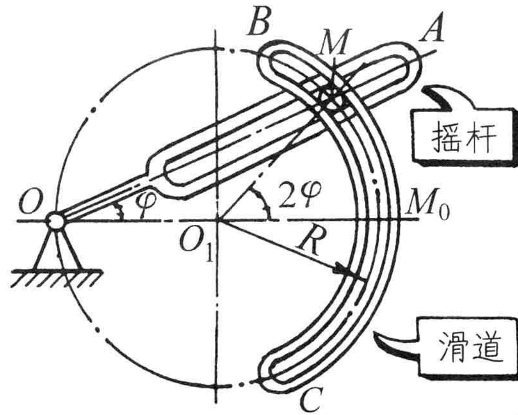
路程

路程则是动点在某一时间间隔Δt内沿轨迹所走过的弧长，即动点的弧坐标增量的绝对值，它与原点的位置无关。

如在某瞬时t_1，动点在轨迹上的弧坐标为s_1，在$t_1+\Delta t_1$瞬时，动点的弧坐标为s_2，如上图，则在Δt时间内动点所走过的路程为：$\overset{\frown}{M_1M_2}=|s_2-s_1|=|\Delta s|$。

若在Δt时间内弧坐标的变化有增有减，则应分段计算，将往返部分的路程相加，即为所求的路程。

例一



摇杆滑道机构中的滑块M同时在固定的圆弧槽BC中和在摇杆OA的滑道中滑动，如上图所示。BC弧的半径为R，摇杆OA绕O点转动的规律为$\varphi=10t$，用自然法求滑块M的运动方程。已知运动开始时，摇杆在水平位置。

解

从图看出，滑块M的轨迹是以O_1为圆心、O_1M为半径的圆弧。选M_0为弧坐标的原点，则动点M在任一时刻的弧坐标为

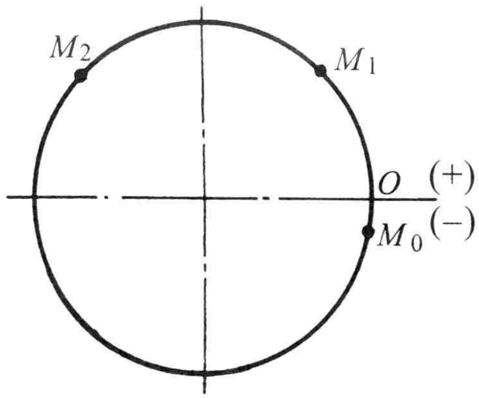
$$s=\overset{\frown}{M_0M}=R\cdot\angle MO_1M_0$$

而 $\qquad \angle MO_1M=2\varphi=20t$

所以 $\qquad s=20Rt$

点的运动——确定点的位置的方法，运动方程

例二



点 M 沿半径 $r=5\text{cm}$ 的圆周运动，如上图，其运动方程为 $s=t^2+4t-1$，式中弧坐标 s 的单位为 cm，时间 t 的单位为 s，试求当 t=0、1、2 时，动点的位置，以及时间间隔 $(0\sim1)$、$(1\sim2)$ s 内动点走过的路程。

解

在轨迹上选 O 点作为弧坐标的原点，并定出弧坐标的正负号，如上图所示，将 t=0、1、2 分别代入运动方程，便可确定各瞬时动点的位置。

$s_0=0+0-1=-1\text{cm}$；$s_1=1+4-1=4\text{cm}$；$s_2=2^2+4\times2-1=11\text{cm}$

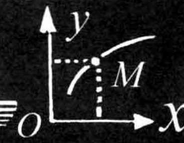
此即各瞬时动点的位置（即弧坐标）。

在 $(0\sim1)$、$(1\sim2)$ s 内动点走过的路程为

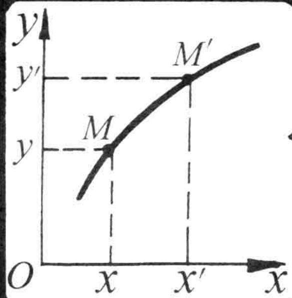
$$s_{0-1}=s_1-s_0=4-(-1)=5\text{cm}$$

$$s_{1-2}=s_2-s_1=11-4=7\text{cm}$$

二、直角坐标法



若点作平面曲线运动，为了确定动点 M 在瞬时 t 的位置，可在固定参考体上建立一直角坐标系 oxy，则动点相对于这一参考系的位置，可用它的坐标 x，y 来确定。



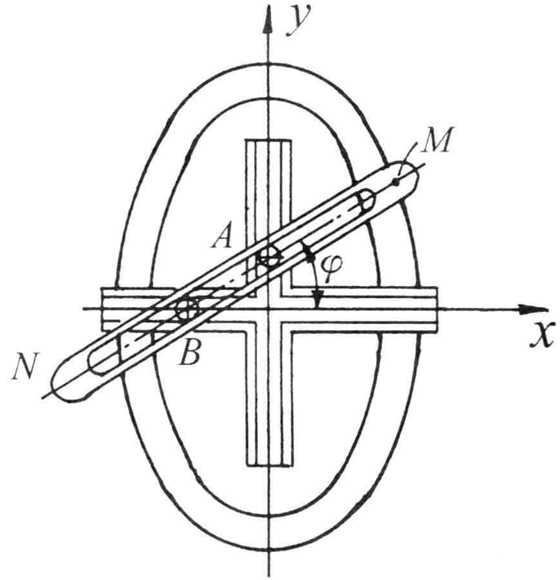
如左图，在 $t+\Delta t$ 瞬时，动点位于 M'，其位置又可用它相应的坐标 x'、y' 来确定，这种确定动点位置的方法称为直角坐标法。当点运动时，这些坐标是随着时间而变化的，是时间 t 的单值连续函数。即

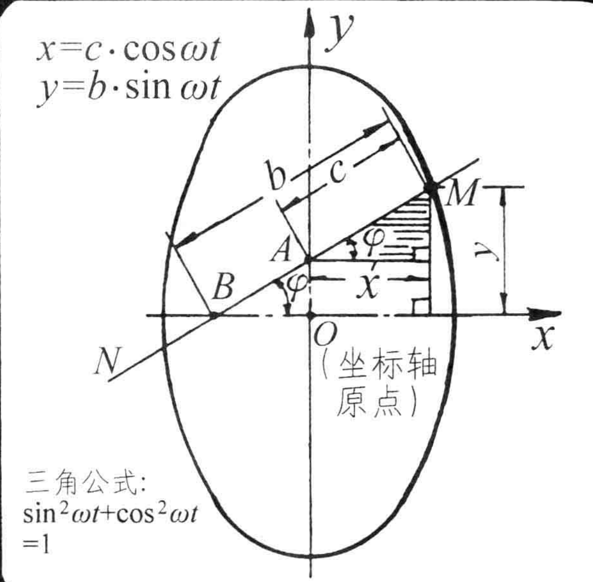
$$\left.\begin{aligned} x&=f_1(t)\\ y&=f_2(t)\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

若已知函数 $f_1(t)$、$f_2(t)$，则任一瞬时动点的位置便可完全确定，方程组（2）称为以直角坐标表示的点的运动方程。从方程组（2）消去时间，可得到用直角坐标表示的点的轨迹方程，方程组（2）就是以 t 为参数的轨迹参数方程。

点的运动——确定点的位置的方法，运动方程

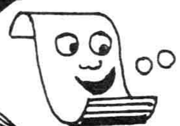
例三





椭圆规如图所示，滑块 A、B 可固定在杆 MN 的适当位置，滑块 B 可在水平槽内滑动，滑块 A 可在铅直槽内滑动。已知 $\overline{MA}=c$，$\overline{MB}=b$，杆 MN 的转动规律为 $\varphi=\omega t$，其中 ω 为常量。

求杆端点 M 的运动方程及轨迹。



采用直角坐标法解题

解

取水平槽为 x 轴，铅垂槽为 y 轴，列出点 M 的运动方程，任一瞬时点 M 的坐标为

$$x=\overline{MA}\cos\varphi=c\cdot\cos\omega t$$

$$y=\overline{MB}\sin\varphi=b\cdot\sin\omega t$$

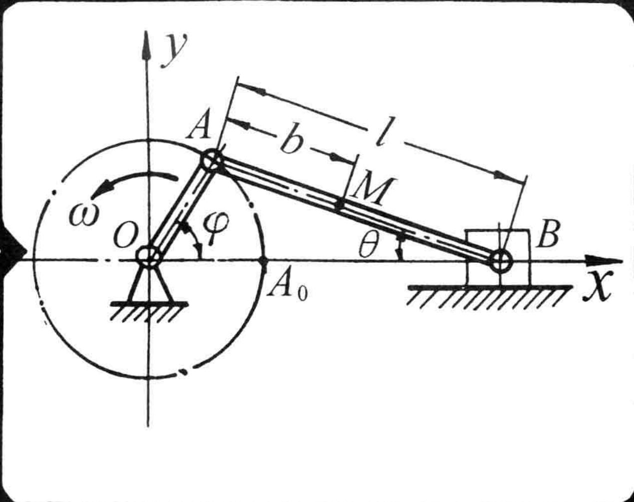
即 $\dfrac{x}{c}=\cos\omega t,\dfrac{y}{b}=\sin\omega t$

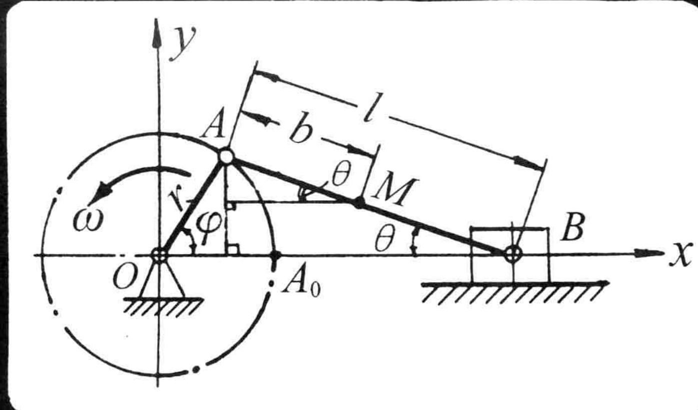
两式平方相加得 $\dfrac{x^2}{c^2}+\dfrac{y^2}{b^2}=1$

即点 M 的轨迹为一椭圆，调节滑块 A、B 在 MN 杆上的位置，可得不同参数 c、b 的椭圆。

点的运动——确定点的位置的方法，运动方程

例四





曲柄连杆机构由曲柄连杆及滑块组成，如上图所示，当曲柄 OA 绕 O 轴转动时，通过连杆 AB 带动滑块 B 作直线往复运动。已知曲柄 OA 长为 γ，以均匀角速度 ω 绕 O 轴转动，即 $\varphi=\omega t$，连杆 AB 长为 l。

试求滑块 B 及连杆上距 A 点长度为 b 的一点 M 的运动方程。

解

(1) 先求滑块 B 的运动方程。

滑块作往复直线运动，取滑块 B 的轨迹为 x 轴，O 为坐标原点，设开始时 A 点在 A_0 位置，在任一瞬时滑块 B 的坐标为

$$x=r\cos\varphi+l\cos\theta \quad (3)$$

由于 $r\cdot\sin\varphi=l\cos\theta$

又因 $$\cos\theta=\sqrt{1-\sin^2\theta}=\sqrt{1-\left(\frac{r}{l}\right)^2\sin^2\varphi} \quad (4)$$

将式 (4) 及 $\varphi=\omega t$ 代入式 (3)，并令 $\lambda=\frac{r}{l}$，得

$$x=r\cos\omega t+l\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\omega t}$$

此即为滑块 B 的运动方程。

(2) 求点 M 的运动方程。

在任一时刻 t，点 M 的坐标为

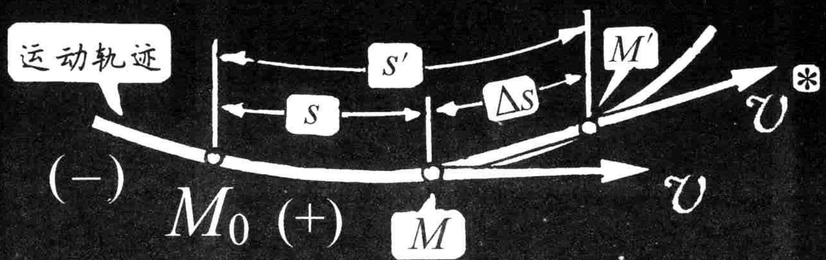
$$x=r\cos\omega t+b\cos\theta$$
$$=r\cos\omega t+b\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\omega t}$$
$$y=r\sin\varphi-b\sin\theta=r\sin\omega t-\frac{br}{l}\sin\omega t$$
$$=r\left(1-\frac{b}{l}\right)\sin\omega t$$

点的运动——用自然法表示点的速度、加速度

若已知点的运动轨迹和沿此轨迹的运动方程，可用自然法求点的速度和加速度。

速度 —— v

点作曲线运动时，不仅运动的快慢有变化，而且运动的方向也不断地变化。点的速度是矢量，是描述点的运动快慢和方向的物理量。



设点沿已知轨迹运动，在瞬时 t，动点位于 M，弧坐标为 s，经 Δt 时间，动点位于 M'，弧坐标为 s'，在 Δt 时间内，点由 M 运动到 M'，其弧坐标的增量为 Δs，动点的相应位移为 $\overline{MM'}$，如左下图所示。位移是矢量，它含大小和方向两种意义，它的大小说明动点在 Δt 时间内运动的直线距离，它的方向说明动点在 Δt 时间内运动的大致方向。若 Δt 取得很小，则动点在 Δt 时间内所经过的路程 Δs 和它的运动方向，就可近似地用位移 $\overline{MM'}$ 来表示，所以，位移 $\overline{MM'}$ 与相应的时间间隔 Δt 的比值，即为动点在 Δt 时间内的平均速度，以 v^* 表示

$$v^* = \frac{\overline{MM'}}{\Delta t}$$

v^* 的方向即为 $\overline{MM'}$ 的方向。

当 Δt 趋近于零时，平均速度 v^* 的极限值就是动点在瞬时 t 的速度，以 v 表示，即

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overline{MM'}}{\Delta t}$$

因为，当 $\Delta t \to 0$ 时，$\overline{MM'} \approx \Delta s$，因此，速度的大小为

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\overline{MM'}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \quad \text{---------------} \quad (5)$$