

TIELU CHELIANG
DONGLIXUE JICHU

陈贵霖 编著

余建军 管有衡 章涵绪 审校

87.18
CGL

铁路车辆
动力学基础

人民铁道出版社

内 容 提 要

本书叙述了铁路车辆沿钢轨运行时所产生的各种力学因素和过程，诸如作用力、速度、加速度、位移、摩擦、磨耗、各种形式的振动和冲击过程。介绍了我国解放后在车辆动力学方面的工作。

本书可供铁路车辆运用、修理和设计部门的工程技术人员参考，也可供有关大学和中等专业学校学员阅读。

铁路车辆动力学基础

陈贵霖 编著

余建军
管有衡 审校
章涵绪

人民铁道出版社出版
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
人民铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：7.0625 字数：159 千
1978年11月第1版 1978年11月第1次印刷
统一书号：15043·5100 定价：0.67 元

前 言

正当我国社会主义革命和社会主义建设进入新的发展时期，以华主席为首的党中央作出了抓纲治国的战略决策，全面地正确地贯彻执行毛主席的无产阶级革命路线，发展了我国的大好形势。这为在本世纪内把我国建设成一个具有现代农业、现代工业、现代国防、现代科学技术的伟大的社会主义强国奠定了基础。

在“工业学大庆”的群众运动推动下，铁路和全国其他行业一样，兴旺发达，捷报频传。为了加速铁路技术现代化，普及铁路车辆的科学技术，我们撰写了这本理论书籍，以供从事铁路车辆运用、修理和设计的技术人员参考。

本书的目的在于介绍铁路车辆动力学方面的一般基础知识。车辆动力学是最近发展起来的应用力学的一个分支。它主要研究的对象是铁路车辆沿钢轨运行时所产生的各种力学因素和过程，诸如作用力、速度、加速度、位移、摩擦、磨损、各种振动和冲击过程。它主要的任务是建立车辆最有利的如下运行条件：

1. 保证车辆的安全稳定性，以提高线路通过能力，充分发挥铁路运输效率；
2. 保证车辆具有良好的运行平稳性，以减轻旅客的疲劳和减少货物与车辆构件的损坏；
3. 保证车辆的较小运行阻力，以充分利用动力能量和降低零部件的磨损。

当上述三项要求彼此间发生矛盾时，首先应该考虑的是安全稳定性。

本书脱稿后，铁道部科学研究院余建军、管有衡同志，西南交通大学章涵绪同志都仔细地校对了原稿，并且提出了许多宝贵的意见和供给了有价值的实验资料，帮助修改了不少地方，在这里谨向他们表示衷心感谢。

由于我们学习马克思主义、列宁主义和毛泽东思想不够，业务能力有限，书中肯定还会存在很多缺点和错误，衷心希望同志们给予批评和指正。

目 录

第一章 车辆运行时的滑动摩擦阻力和滚动摩擦

阻力..... 1

§ 1. 力和物体运动的关系..... 1

一、力和物体的移动..... 1

二、力矩和物体的转动..... 6

§ 2. 滑动摩擦阻力和滚动摩擦阻力..... 8

一、滑动摩擦阻力..... 9

二、滚动摩擦阻力..... 10

§ 3. 在车辆上减少滑动摩擦阻力和滚动摩擦阻力的措施..... 12

一、轮对与钢轨..... 12

二、滑动轴承及润滑..... 14

1. 滑动轴承..... 14

2. 润滑的原理..... 15

三、滚动轴承及润滑..... 21

§ 4. 结语..... 24

第二章 车辆的垂直振动..... 25

§ 5. 力和运动之间的关系进一步说明..... 25

一、力和物体的加速度..... 25

二、力矩和物体的角加速度..... 27

三、力的合成和力矩的合成..... 28

§ 6. 作用在车辆上的垂直振动力..... 34

一、线路不平坦所引起的垂直振动力..... 34

二、钢轨接缝引起的垂直谐振力和冲击力..... 38

三、轮对的结构缺陷引起的垂直谐振力和冲击	
力	41
四、垂直振动的危害	46
§ 7. 振动及其特性	51
一、概述	51
二、谐振及其特性	53
§ 8. 弹簧·有弹簧的车辆自振和强迫振动	56
一、车辆在弹簧上的自振	58
二、有弹簧车辆的强振	61
§ 9. 减振器·装有弹簧和减振器的车辆自振和	
强迫振动	65
一、减振器	65
二、装有减振器的车辆之自振	69
1. 具有粘滞阻尼的自振	69
2. 具有摩擦阻尼的自振	74
三、装有减振器的车辆之强迫振动	75
1. 具有粘滞阻尼的强迫振动	75
2. 具有摩擦阻尼的强迫振动	82
§ 10. 转向架·带转向架的车辆之强迫振动	87
§ 11. 车体的垂向弹性振动	98
一、车体的弹性自振	103
二、车体的弹性强迫振动	105
§ 12. 结语	109
第三章 车辆在弯道和道岔处运行的过程	112
§ 13. 再论力和运动的关系	112
§ 14. 车辆在弯道上运行的阻力	116
一、滑行阻力	116
二、曲线抵抗阻力	117

三、轨距加宽和安全搭载量	119
§ 15. 在弯道和道岔处运行时的横向力及其与脱轨的关系	121
一、车辆在弯道和道岔处运行时的横向力的产生	121
二、横压力与脱轨的关系	126
三、车轮减载对脱轨的影响	132
四、轮缘形状和道岔构造对脱轨的影响	136
§ 16. 结语	140
第四章 车辆的横向动力性能	142
§ 17. 蠕动力和蛇行运动	142
一、蠕动力	142
二、轮对的蛇行运动	143
三、转向架的蛇行运动	148
§ 18. 车辆横向振动的类型·弹簧横向刚度和角刚度	151
§ 19. 滚摆振动	154
一、车体在单系弹簧上的自由滚摆振动	155
二、摇动台·车体在摇动台上的自由滚摆振动	157
三、横向减振器·车体的强迫滚摆振动	164
§ 20. 摇头振动	167
一、强迫摇头振动	169
二、摇头振动与横摆振动振幅的叠加	170
§ 21. 横向稳定性和横向平稳性	171
一、横向稳定性	171
二、横向平稳性	178
§ 22. 抑制蛇行运动的措施	185
§ 23. 结语	187

第五章 车辆的纵向作用力	189
§ 24. 引起车辆纵向作用力的原因	189
一、机车牵引力 • 车钩	189
二、制动力 • 制动机	193
三、调车碰撞力 • 缓冲器	199
§ 25. 车辆最大的纵向作用力	202
一、列车的起动	202
二、列车在非常制动和制动力分布不匀时的纵向作用力	207
三、车辆在调车中的刚性碰撞 • 车底架	209
§ 26. 纵向振动 • 摇枕挡板和支杆	217
§ 27. 结语	219

第一章 车辆运行时的滑动摩擦阻力和滚动摩擦阻力

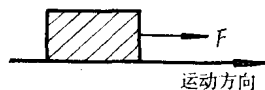
§ 1 力和物体运动的关系

一、力和物体的移动

在自然界中一个物体运动状态的改变，例如它由静止开始运动，或它由运动状态逐渐静止下来，或是改变运动的方向等等，都是由于另外的物体对它作用的结果。在力学中这种相互作用被称为力。物体间的相互作用可以是直接的，如机械力；相互作用也可以是间接的，如重力。相互作用可以是外部的，如两物体间的力；相互作用也可以是内部的，如物体这一部分对另一部分的作用。

研究铁路车辆的运动时，作用在车辆上的力常被分为动力和阻力。这些力又被分为机械牵引力、重力、弹性力、摩擦力等等。这些力除有大小外，还在某一方向上作用着，是有方向性的，因此说力是一种矢量。再者，力还有作用点。例如，车辆的重力是作用在轮轨接触点的地方。

为了在实际的工程讨论中简化和明显力的作用，常常采用力的图示方法。这种方法就是将一物体对另一物体的作用，用一个带有箭头的线段来表示。箭头所指的方向表示力的方向，线段的长度根据事先选定的比例尺表示力的大小，线段的起点或箭头的顶点表示力的作用点，如图1—1所示。



— 1 厘米 = 1 公斤

图 1—1 力的图示

至此，我们归纳如下两点。

(1) 力是物体对物体的相互作用；

(2) 力是有大小、方向和作用点的，力是个矢量，可以图示。

力的单位常用公斤。辅助单位有吨、克。1 吨 = 1000 公斤。1 克 = 0.001 公斤。

在力的作用下，物体的运动状态和形状都要改变。如果假定物体是刚性很大的物体，这样我们就可以不考虑它的形变，而专门研究它的运动状态的改变就行了。

科学地描述物体运动状态的物理量就是物体在空间某一点的瞬时速度。

什么是瞬时速度呢？物理学告诉我们，当物体在空间沿直线方向向前运动，例如在

t_1 时刻由 A 点开始运动，到 t_2 时刻抵达 B 点，如图 1—2 所示。在此过程中，物体移动的距离 ΔS 和相应的时间 Δt 之比，当 Δt 趋于零时的

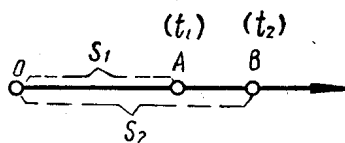


图 1—2 速度的概念

的极限值，它就是物体在 B 点的瞬时速度。简称速度 v ，即：

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \quad (1-1)$$

速度的单位有毫米/秒，厘米/秒，米/秒，公里/小时等。

进一步研究力和物体运动的关系，就能发现当力作用在物体上，使物体沿着力作用的方向移动一个距离，力就对物体做了功。如果令力的大小为 F ，物体受力后沿力的方向移动的距离为 S ，则功 A 为：

$$A = F \cdot S \quad (1-2)$$

必须指出：公式 (1—2) 仅当力 F 在物体通过 S 这段

路程时是不变的情况下，才可以用。

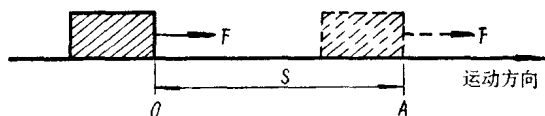


图 1—3 功的概念

如果，在 S 这段路程中力是以 n 种大小不同的力 F_i 作用在物体上时，那么功 A 必须等于各个元功 ΔA_i 的和（图 1—4），即：

$$A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \cdots + \Delta A_n = \sum_{i=1}^n \Delta A_i = \sum_{i=1}^n F_i \cdot \Delta S_i \quad (1-3)$$

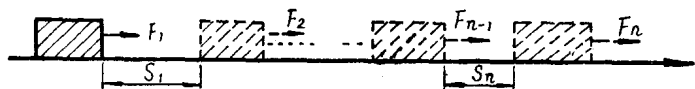


图 1—4 元功求和

如果，力 F 在 S 这段路程上的各点都不一样，也就是说假定力 F 是随 S 而连续变化的函数，即 $F(S)$ 。那么，总功 A 必须等于每个 ΔS_i 趋于 0 时的所有无限小的元功之和。假定，我们用 dS 代替趋于 0 的 ΔS ，则每一元功即为 $F(S) \cdot$

dS ，因而我们可用 $\int_0^S F(S) dS$ （它称为 $F(S)$ 的积分）表示

对所有连续变化的元功求和而得的总功 A ，以此来区别对所有分立的元功求和所求得的总功 A ，即上述公式（1—3）。

如果，我们把上面由对所有分立元功求总功转为对所有连续变化的无限小元功求总功的过程称之为取极限的过程，并以符号 Lim 来表示，则有：

$$A = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \sum_0^s F(S) \cdot \Delta S = \int_0^s F(S) dS \quad (1-4)$$

功的单位常用公斤-米。

外力对物体做功，有两种可能的情形会发生。一种是物体受力运动时有阻力，如果阻力小于外力，此时外力不仅克服阻力做功，而且还要改变物体的运动状态，如果阻力等于外力，那么外力除了克服阻力做功使物体的位置产生移动，不会改变物体的运动状态。另一种情形是外力作用于物体时没有阻力出现，这时物体的速度就要改变。

物理学告诉我们，质量为 m 的物体，当其速度 v 不等于零时，它就有一种运动的能量，即动能。动能常用 T 表示。实验证明：运动物体的动能等于它的质量和它的速度平方两者乘积的一半。即：

$$T = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-5)$$

根据能量不灭原理，当外力 F 作用于物体上时没有阻力出现，则外力在距离 S 上对物体所做的功，应等于物体在同一距离内其动能的变化量。即：

$$F \cdot S = T_2 - T_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (1-6)$$

式中 T_1, T_2 ——物体在距离 S 的起点和终点的动能；

v_1, v_2 ——物体在距离 S 的起点和终点时的速度。

反过来，如果原先具有一定动能的物体，当它对另一物体作功时，根据能量不灭原理，它所减少的动能正好等于它所做出的功。

特别要强调的是，并非一定要物体正在作功，我们才说它具有能。事实上，很多物体虽然它们现时并不作功，例如举高了的重锤，拉长和压缩后的弹簧等，但是它们却都具有

做功的本领，即当重锤下落时或弹簧恢复原来状态时，它们就能做功。物体的这种做功的本领，由于是我们对它作了功之后而使它的位置有了变化而具有的，所以称这种做功的本领为物体的位能。

实验指出，当把重量为 G 的物体由地面举升到离地面为 h 的高度，物体所获得的重力位能的大小，等于物体重量 G 和它距地面高度 h 的乘积，

即

$$U = G \cdot h \quad (1-7)$$

假定对一重量为 G 距地面高度为 h_1 的物体，作用一竖直向上的力 F ，把它匀速地竖直举升一段路程 S ，如图 1-5 所示。设物体举升后距地面的高度为 h_2 ，则有 $S = h_2 - h_1$ 。

如果略去空气阻力的影响，那么在 S 这段路程上力 F 对物体所作的功就是：

$$A = F \cdot S = G(h_2 - h_1) = Gh_2 - Gh_1 \quad (1-8)$$

式中 Gh_1 是物体原来的重力位能，而 Gh_2 是力 F 对它作了功以后的重力位能。由于 $h_2 > h_1$ ，所以物体的重力位能增加了。由此可见，物体所增加的重力位能，就等于外力对物体所作之功。反之，当一物体的位能减少时，它也能作出相应的功。

归纳上述可知：当外力对物体做功时，物体能量（动能或位能）就增加；反之，当物体克服外力做功时，它的能量（动能或位能）就减少。因此可以说：功是物体的能量变化

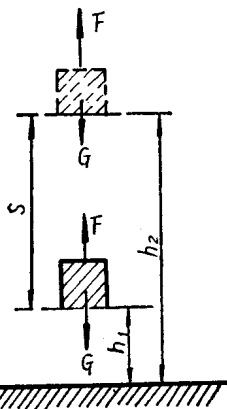


图 1-5 物体的位能

的量度，而能量又是物体做功的本领。

同样，实验指出，做功时总有两个物体同时起作用，一物体增加（或减少）的能量与另一物体减少（或增加）的能量相等。由此可见，做功的结果使能量发生了转移，即由一物体转移到另一物体，而转移的能量数值就等于所作的功的大小。

二、力矩和物体的转动

继续分析力和运动的关系，还会发现，当物体的形状不同时，就出现了新的特点。例如一个半径为 r 的圆柱形物体放置在地面上，当外力的作用点不同，如图 1—6 所示依次作用于 a 、 b 、 c 各点，则会有不同的效果产生。同一大小和方向的力 F ，当其作用于 c 点时最容易使圆柱体运动。认真研究，可以了解到在圆柱体的情况下，力使它改变运动状态，不仅与力的大小、方向有关，而且与力的作用点的延长线对圆柱体同地面接触点 B 的距离 h 远近有关。实验证明：力 F 同距离 h 的乘积越大，圆柱体越易改变运动状态。乘积 $F \cdot h$ 常用 M 表示，它在力学中称为力矩。点 B 称为瞬时转动中心。力 F 对转动中心的垂直距离 h 称为力臂。物体绕 B 点的运动称为转动。

为什么把 B 点称为瞬时转动中心呢？这是因为在此时此刻圆柱体是绕它转动的，而下一时刻由于圆柱体的转动，其同地面的接触点

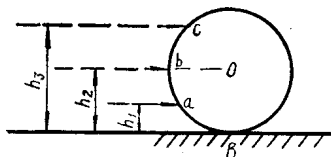


图 1—6 力矩

就由圆柱体上的另一点和地面上的另一点所代替。这就是说，圆柱体是绕着时刻都在改变的转动中心而在地面上转动的。

物体转动时,为了表明它的运动状态或转动特性,就需要引入一个新的物理量——角速度。所谓角速度,就是转动物体上任何垂直于转轴(图1—7)或瞬时转动中心轴—B轴(图1—8)的直线所转过的角度 φ (或 θ)和转过这角度所需时间的比。它通常用 ω 表示,即:

$$\omega = \frac{\varphi}{t} \text{ 或 } \omega = \frac{\theta}{t} \quad (1-9)$$

在测量角速度时,为了方便起见,角的单位不用度而用弧度(径)。 2π 弧度等于 360° ,一弧度等于 57.3° (图1—7)。

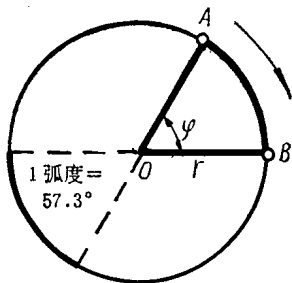


图1—7 弧度和线速度

$$1 \text{ 单位角速度} = \frac{1 \text{ 弧度}}{1 \text{ 秒}} = 1 \text{ 弧度/秒}。$$

当物体做匀速转动时,它转动一周所转过的角度 $\varphi = 2\pi$,相应的时间 $t = T$ 。 T 称为周期,即物体转动一周所需要的时间。代入公式1—9,角速度可写为:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1-10)$$

如果提出这样一个问题:上述转动的物体它一秒钟转几周呢?这个问题可以用术语“频率”多大来代替。频率用 ν 表示,即单位时间所转动的周数。容易判明频率 ν 和周期 T 具有互为倒数的关系。因此,公式(1—10)的角速度变为:

$$\omega = 2\pi\nu \quad (1-11)$$

从图1—7可看出A点的速度 $v = 2\pi r \cdot \nu$,所以线速度 v 与角速度 ω 可用下式表示:

$$v = \omega \cdot r \quad (1-12)$$

为了在实际工程讨论中简明力矩的作用起见，也常采用力矩的图示法，即：用一段带箭头的圆弧线表示力矩，它的大小直接标在圆弧线上，它的方向即箭头所示的方向（图1—8）。

若有一个力矩 M 作用在可转动的物体上，并保持一段时间使物体绕转轴或瞬时转动中心转过一个角度 θ （或 φ ），而后撤去力矩。此时，我们能够发现，转动物体却也有了自己转动或做功的本

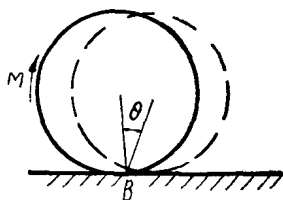


图1—8 力矩的功

领。这个本领称为转动物体的动能。实验证明，这个动能与作用的力矩 M 和转角 θ 的乘积 $M \cdot \theta$ 成正比。 $M \cdot \theta$ 在力学中称为力矩的功。即：

$$A_M = M \cdot \theta \quad (1-13)$$

显然，外力矩对转动物体作的功 A_M 越大，物体获得的能量就越多。至此，可以归纳如下几点：

- (1) 力矩等于力和力臂的乘积，它可使转动物体改变运动状态；
- (2) 力矩的功等于力矩 M 和转角 θ 的乘积；
- (3) 力矩对转动物体作的功越大，转动物体的能量就改变得越多。

§ 2. 滑动摩擦阻力和滚动摩擦阻力

现在，如果有意识地规定，凡使物体的运动速度向增加方面变化的作用力称为动力，而把凡使物体的运动速度向减小方面变化的作用力称为阻力。那么，我们就有条件开始讨论在一个物体上同时作用着动力和阻力这两种力的一些实际问题，譬如说像滑动摩擦阻力问题、滚动摩擦阻力问题等等。

一、滑动摩擦阻力

两个做相对运动的物体，如果在两接触面中任何一个面的一部分被另一个面连续地接触，我们就称这个过程为滑动。例如，轴与轴瓦的相对运动。

当一个物体在动力的作用下，或是在其自身的动能作用下，而在另一物体的表面上做相对滑动时，另一物体的表面总要使该物体受到一个阻碍其滑动的阻力。这个阻力被称为滑动摩擦阻力或滑动摩擦力。这种摩擦阻力或摩擦力产生的主要原因之一是，摩擦表面的不可避免的平滑。图 1—9 表示两个接触物体表面的放大情形，其中有一些凸部和凹部相互啮合在一起。当一个物体在另一个物体的表面上滑动时，摩擦表面的凹凸部分就会互相碰撞和挤压，甚至于产生磨削的过程。因此，产生了滑动摩擦阻力或滑动摩擦力。此外，两物体接触面的材质和接触面间清洁程度等还能产生附加的阻力。如果把这些阻力综合在一起，用一个所谓的滑动摩擦系数

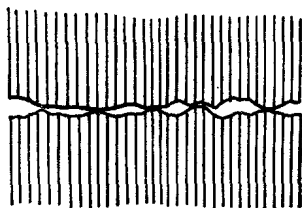


图 1—9 接触面放大

μ 来反映的话，那么 μ 越大，滑动摩擦阻力也越大。

实验证明：滑动摩擦阻力或摩擦力的大小还与两接触面间的正压力成正比。在两接触面呈水平位置时，正压力通常以上部物体的重量来表示。重量 G 越大，滑动摩擦阻力或摩擦力也越大。显然， G 越大，两接触表面压得越紧密，凹凸部分的啮合就越深，滑动就越困难。如果以 f 表示滑动摩擦阻力， G 表示上部物体的重量即正压力， μ 表示摩擦系数，则有：