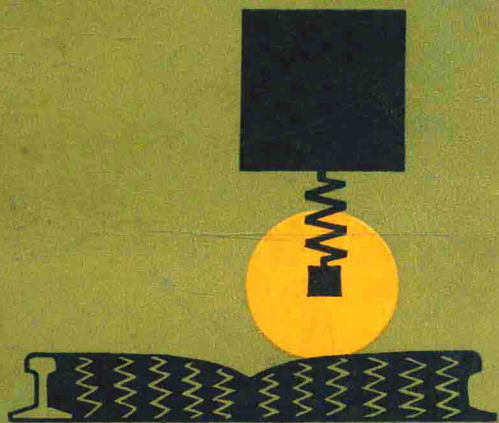


# 轨道力学

〔日〕佐藤裕 著

GUIDAO LIXUE



中国铁道出版社

# 轨道力学

〔日〕佐藤 裕 著

卢肇英 译

中国铁道出版社

1981年·北京

## 内 容 提 要

本书是研究轨道力学的基础理论书，据日本铁道现业社1972年版本译出。主要内容为：分析研究了铁路轨道承受列车动力所引起的轨道变形及导致轨道破坏的原因；研究分析了轨道结构与轨道破坏的关系；提出了在列车密度及速度日趋增长情况下，选择最优轨道结构的意义；介绍了轨道结构各部件的设计及新型轨道结构的设备类型；以及有关轨道力的测试方法等。

本书对从事轨道力学基础理论研究、大专院校教学具有参考价值。

本书译稿承北方交通大学陈岳源、铁道部科学研究院曾树谷两位同志审阅。

## 轨 道 力 学

〔日〕佐藤 裕著 卢肇英译

中国铁道出版社出版

责任编辑 陈 健

封面设计 赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$  印张：6.75 字数：144千

1981年5月第1版 1981年5月第1次印刷

印数：0001—2,000册 定价：0.70元

## 目 录

<b>第一章 绪 论</b> .....	1
第一节 轨道的特点 .....	1
第二节 轨道力学的目的 .....	3
<b>第二章 轨道的组成</b> .....	4
第一节 传统的轨道结构 .....	4
第二节 轨道结构的发展趋势 .....	5
<b>第三章 作用于轨道的力</b> .....	8
第一节 轮重 .....	8
第二节 横向水平力 .....	9
第三节 纵向力 .....	10
<b>第四章 轮重引起的轨道变形</b> .....	11
第一节 钢轨的下沉、应力及压力 .....	11
第二节 轨枕的下沉、应力及压力 .....	16
第三节 道床及路基的压力 .....	17
第四节 算例 .....	18
<b>第五章 横向水平力引起的轨道变形</b> .....	21
第一节 钢轨的位移、应力及压力 .....	21
第二节 钢轨的倾斜 .....	23
第三节 横向水平力引起的轨道破坏 .....	26
第四节 算例 .....	26
<b>第六章 运行列车引起的动态变形</b> .....	29
第一节 轨道的速度系数 .....	29
第二节 运行列车引起的钢轨挠曲 .....	30
第三节 车轮扁疤引起的冲击 .....	33
第四节 轨面不平顺引起的冲击 .....	40
第五节 钢轨接头部位的冲击 .....	41
<b>第七章 轨道下沉的发展</b> .....	45
第一节 实际养护作业情况 .....	45
第二节 道床的性能 .....	47
第三节 道床下沉发展过程的实验 .....	48

3.1	用道床重复荷载试验机进行实验	48
3.2	用道床振动试验机进行实验	51
第四节	道床下沉发展与振动	52
4.1	石质物体的摩擦与振动	52
4.2	道床下沉与振动及压力的关系	52
<b>第八章</b>	<b>轨道振动</b>	54
第一节	轨道破坏与振动	54
第二节	轨道振动的性质	55
第三节	轨道结构与振动	57
<b>第九章</b>	<b>最优轨道结构</b>	61
第一节	最优轨道的意义	61
第二节	轨道破坏系数的意义	62
2.1	荷载系数 $L$	62
2.2	构造系数 $M$	63
2.3	状态系数 $N$	63
第三节	荷载系数 $L$ 、构造系数 $M$ 的计算方法	64
第四节	既有线的最优轨道结构	66
4.1	维修定员	66
4.2	最优轨道结构	67
第五节	新干线的轨道结构	69
5.1	维修费	69
5.2	最优轨道结构	72
<b>第十章</b>	<b>轨道结构各部件的设计</b>	74
第一节	钢轨断面	74
第二节	钢轨应力	77
第三节	钢轨接头	83
3.1	钢轨接头的强度	83
3.2	钢轨接头各种结构型式	84
3.3	钢轨接头的加强	87
第四节	钢轨弹性扣件	88
4.1	弹性扣件的类型	88
4.2	弹性扣件的条件	91
4.3	弹性扣件的设计	92
4.4	弹性扣件的试验	94
第五节	轨枕	95

5.1	混凝土轨枕的型式 .....	95
5.2	混凝土轨枕的设计荷载 .....	96
<b>第十一章</b>	<b>无缝线路 .....</b>	<b>98</b>
第一节	钢轨的温度伸缩与纵向力 .....	98
第二节	轨道的鼓曲 .....	104
第三节	钢轨接头的轨缝变化 .....	106
<b>第十二章</b>	<b>轨道的线型 .....</b>	<b>109</b>
第一节	曲线外轨超高 .....	109
1.1	目的 .....	109
1.2	超高的设定速度 .....	109
1.3	通过曲线的容许速度 .....	110
第二节	缓和曲线 .....	112
2.1	目的 .....	112
2.2	线型 .....	112
2.3	长度 .....	114
第三节	曲线轨距加宽 .....	115
3.1	目的 .....	115
3.2	条件 .....	116
第四节	竖曲线 .....	118
<b>第十三章</b>	<b>限制列车速度的基本因素 .....</b>	<b>119</b>
第一节	机车车辆的倾覆 .....	119
第二节	车轮脱轨 .....	120
第三节	轨道允许横向水平力 .....	122
第四节	车辆的乘车舒适度 .....	123
4.1	由振动所决定的乘车舒适度 .....	124
4.2	列车改变速度时的乘车舒适度 .....	125
第五节	轨道维修标准 .....	126
<b>第十四章</b>	<b>轨道测试方法 .....</b>	<b>29</b>
第一节	测试的灵敏度与精度 .....	29
第二节	轮重与横向水平力的测定 .....	30
2.1	车上测定轮重及横向水平力 .....	130
2.2	地面测试轮重与横向水平力 .....	135
第三节	用高速轨道检测车测定的方法 .....	137
<b>第十五章</b>	<b>新型轨道举例 .....</b>	<b>142</b>
第一节	新型轨道结构分类 .....	142

第二节	有碴轨道 .....	142
2.1	钢轨 .....	142
2.2	轨枕 .....	146
2.3	道床 .....	148
第三节	无碴轨道 .....	152
3.1	铺在土路基上 .....	152
3.2	在混凝土基础上 .....	160
3.3	钢基础的轨道结构 .....	169
第十六章	板式轨道 .....	172
第一节	板式轨道的必要性 .....	172
第二节	板式轨道的型式与结构 .....	173
第三节	板式轨道的基本尺寸及弹性 .....	178
第四节	板式轨道与结构物的变形 .....	181
附    表		
附表—1	$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 的数值 .....	190
附表—2	有关钢轨的各种数值 .....	198
附表—3	钢轨的各种应力值 .....	199
附表—4	标准轨枕的各种数值 .....	201
附表—5	轨道变形的整修标准 .....	201
附录—1	卡尔曼(カルマン)线图 .....	203
附录—2	$\eta, \eta', \mu, \mu'$ 之值 .....	205
附录—3	道床厚度与路基压力 .....	208
附录—4	钢轨的断面 .....	210
参考文献	.....	209

# 第一章 绪 论

## 第一节 轨道的特点

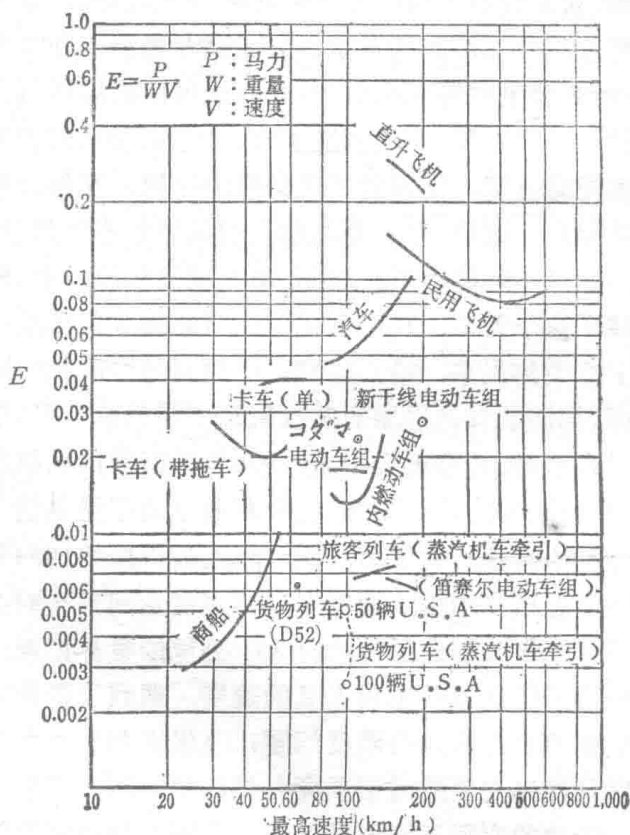
在各式各样的交通工具中，我们先来考虑一下铁道的特点。勿庸置言，各种交通工具的使命都在于迅速而又安全地运输人与物。如果我们从速度方面来环顾一下，那么，象征宇宙时代即将来临的就是人造卫星，它在离开地表 1,000 公里高空，以每秒 8 公里亦即每小时 28,000 公里的速度运行着。飞机由于装上了推进器，业已创造了每小时 755 公里的速度。如果想继续提高速度，则遇到了所谓音的障碍，在加速度方面变得困难起来。因此，有一个时期人们认为每小时超过 1,224 公里的速度是不可能的了。然而，喷气式飞机的出世，轻而易举地突破了 this 关口，现已创造了比音速快 3 倍多的记录。在陆地上行驶的汽车，最大速度也已达到每小时 635 公里。在铁路方面，德国装有推进器的蒸汽机车“齐伯林”号，于 1931 年创造了每小时 230 公里的记录。1939 年德国的内燃机车达到每小时 215 公里的速度；同年，意大利的电动车组创造了每小时 203 公里的速度。到了第二次世界大战以后的 1954 年，法国用铁路电力机车牵引 3 辆客车，其速度达到每小时 243 公里；接着第二年又创造了每小时 331 公里的世界记录。

人们为了提高各种运载工具的速度，遇到了种种障碍。人造卫星遇到了人的体力限度问题；飞机因与空气摩擦而机体发热以及起飞与着陆时需要庞大机场的问题。汽车在奔驰过程中，轮胎的变形还来不及恢复，立即又与地面接触，由于不断这样的循环而产生高热，以致轮胎破损。为创造记录



而特别制造的汽车，虽曾接近前述的记录，但人们认为150公里/小时左右是这种汽车的最大速度的限度。就铁路而言，如果与汽车的速度限度相比，那么当列车速度要接近于钢轨挠曲的波动速度时，就需要很大的功率才能突破这种障碍，然而，如果能够具有使列车达到每小时1,000~1,500公里的功率，那么还有创造新记录的可能性。

如果把各种交通工具的马力效率加以比较（如图—1所示），对应于相同的速度，这个值越大，越不好。如与铁道



图—1

机车车辆相比，汽车与路面的摩擦要大10倍，所以它需要消耗更多的功率。另外，从图中可以看出，在曲线倾斜度大的地方，汽车只要稍微提高速度，就需要很大的功率，这在经济上是极为不利的。我们还可以从图中看出，铁路是陆上交通工具中最经济的。因此，作为中距离高速度的交通运输工具，铁路将长久保持其优越的地位。

## 第二节 轨道力学的目的

轨道远不如其他结构物制造得完善，它是一种必须经常进行大规模的维修才能完成其使命的结构物。因此，如果不对轨道结构大力进行改革，就难以适应机车车辆发展的要求。由于列车引起的轨道破坏不断增多，目前主要是以加强养护修理来维持平衡。这里所说的轨道破坏，与其说理解为钢轨等部件的变形、破损，倒不如说是指因列车反复通过而产生的轨道状况不佳，而在轨道维修作业中，大部分也正是修复这个意义上的破坏。

近年来，列车密度与列车速度日趋增加，轨道维修费在铁道经营中占了很大一部分；而且，运量与轨道结构失去了平衡，局部出现了所谓轨道维修作业赶不上轨道破坏的局面。

为适应上述状况，轨道力学以研究下列三个问题为目的。

(1) 分析轨道承受来自列车的外力，这些外力是怎样引起轨道变形的，以及研究轨道的破坏（即残余变形的积累）是怎样形成的。

(2) 研究轨道结构与轨道破坏的关系。就是说，为减少轨道破坏，应当怎样改进轨道结构。

(3) 研究适应运输条件的最优轨道结构。所谓最优轨道结构，是指新建或改建的投资加维修费之和为最小的轨道结构。据此，提出最优轨道的数量方面的研究方法。

## 第二章 轨道的组成

### 第一节 传统的轨道结构

一般的轨道是在路基上铺设砂砾或碎石等构成道床。在其上按一定间隔放置轨枕，再于轨枕上按一定的间距铺上两根钢轨并加以连接。一般是把道床及其以上部分总称为轨道。

轨道结构必须为在该区段上运行的列车，提供一条安全而平顺的走行线。因此，它应具有与列车的轮重、横向水平力、速度及运量相适应的强度；同时还要便于维修，经济适用。

轨道各组成部件的力学作用如下述：

(1) 钢轨：在为列车铺成安全而又平顺的走行线方面，钢轨是最重要的部件。钢轨依靠它的挠曲刚度把自车轮传来的荷载分布开，维持轨道的正常形态，并减少行车阻力。

(2) 钢轨扣件：扣件的作用在于把钢轨保持在轨枕上的规定位置上。在扣件上除作用有垂直压力外，还有横向压力及钢轨爬行力，因此扣件必须具有能够承受这些外力的强度。混凝土轨枕上的扣件要求具有一定的绝缘性能，还要求有适当的弹性，以防止轨枕破损，并进而缓和道床的振动。

(3) 轨枕：轨枕的作用是保持钢轨在规定的位臵上，同时把钢轨传来的压力分布给道床。所以轨枕要适于与钢轨形成牢固的连接，并富有弹性和耐久性。在不影响道床捣固的条件下，轨枕底面积尽可能大一些。轨枕的形式尺寸应保

证使轨枕在道床中横向移动时具有足够大的道床阻力。

(4) 道床：道床的功能在于把轨枕的压力分布给路基，保持轨枕在规定的位置上。道床要排水良好，以防翻浆冒泥和轨枕腐朽；还应便于进行轨道的维修作业。日本的道床一般都是一层，而欧美各国原则上是在道碴底下再铺辅助垫层。

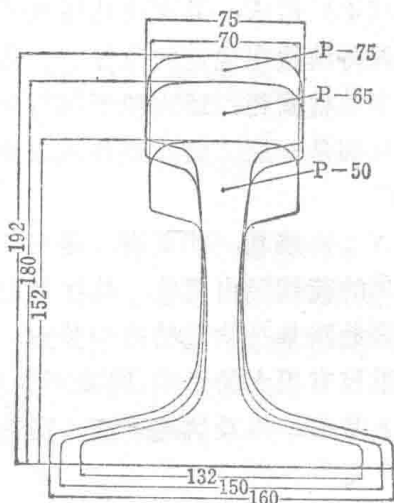
(5) 路基：狭义讲，路基不属于轨道的组成部分，然而列车的荷载经由钢轨、轨枕和道床，最后则全靠路基承受。因此路基是轨道结构的基础。路基状态是否良好，对轨道的维修有很大的影响。路基不良的地段会发生翻浆冒泥、道碴陷入基面，以及轨道下沉、振动过大等现象。在一些特殊区段会发生冻害。

## 第二节 轨道结构的发展趋势

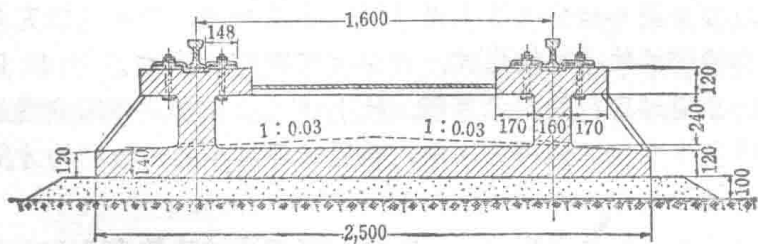
从国内外情况来看，如果以后面将要叙述的一次投资费加维修费最小做为条件来设计最优轨道结构，则不可能完全抛弃传统的轨道结构形式，否则就难以得到答案。所以认为，在通过现行的技术革新，使上述一次投资费和维修费的组成发生变化的各种方法中，轨道破坏越小的轨道结构才能满足最优条件。这些方法包括下述四个方面：

(1) 钢轨重型化——苏联已在年通过吨数为 6,000 万吨的区间铺了 P 65 钢轨。预计在不久的将来，这些区间的年通过吨数可达 9,000 万吨，为此，准备使用 P 75 钢轨。图—2 为上述两种重型钢轨的断面与以前标准轨 P 50 钢轨断面的比较。美国早已广泛使用 64 公斤钢轨，但 75 公斤钢轨是目前世界上最大的断面。在推广无缝线路时，使用这种重型钢轨，尽管还存在着钢轨纵向力大及其他种种问题，但钢轨重型化仍然是一种发展方向。

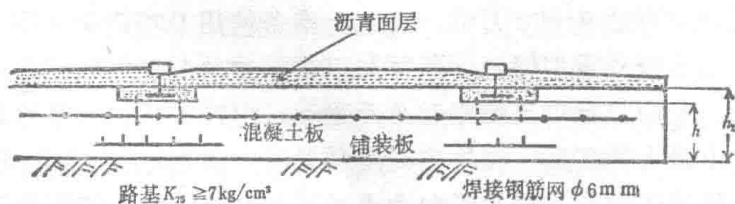
(2) 整体道床——在维修困难的长大隧道内早已使用了整体道床。在一般轨道上也早就进行过这种试验，然而并没有得到推广。近年来，苏联正大力试铺图—3所示的轨道结构。在组合式轨道方面，各国使用整体道床的实例很多。图—4所示的整体道床是日本最近定下来的标准结构。但是在一般轨道上由于路基变形的原因，使铺设整体道床还存在不少问题。



图—2 苏联重型钢轨



图—3 整体道床轨道

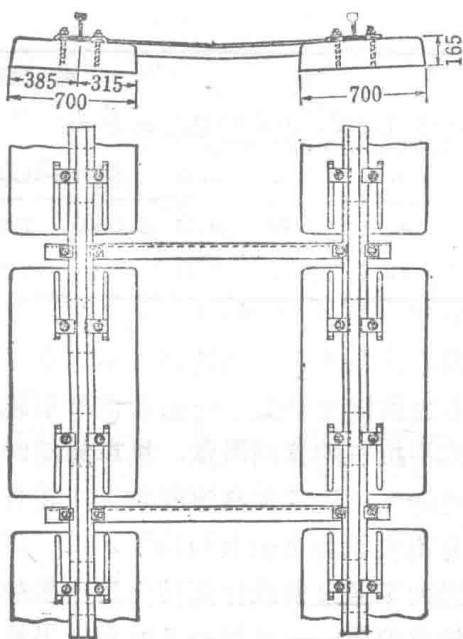


图—4 组合式轨道混凝土整体道床

(3) 纵向轨枕——一些国家为了加强轨道而将轨枕大型化，如法国铺了如图 5 所示的纵向轨枕等。此外，苏联试铺了几种更加大型的轨枕。日本也试铺了几种类型的轨枕，但因铺设与维修方面的问题，没有得到推广。

(4) 沥青道床——从路基变形对道床的影响考虑，沥青道床比整体道床有利。因此，我国及德国、瑞士等都进行了试铺，至于其效果如何，有待今后检验。

除上述已经实施过的方法之外，是否还有其它新的方法？轨道结构几时能做到极少破坏？或者说这一愿望要到哪一天才能实现？这些都不清楚。因此，本书不抱这种奢望，而仅就目前的轨道结构加以论述。



图—5 纵向轨枕轨道

### 第三章 作用于轨道的力

车轮作用给轨道的力可以分为3种：垂直于钢轨面的垂直压力即轮重，钢轨面内与钢轨方向成直角的横向力即横向水平力，以及沿钢轨方向的力即纵向力。

#### 第一节 轮 重

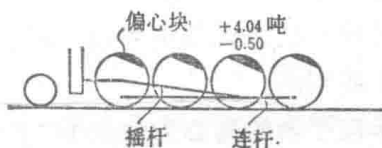
(1) 静止时的轮重——偏离设计值最大有达20%的情况。例如从D521~142中选出16辆来测定轮重的结果，其平均值如下表：

	轮 重 (t)						
	L	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	T <sub>r</sub>	
设 计	3.56	7.85	8.32	8.28	8.20	6.35	
实 测	左	4.13	7.97	9.13	7.91	7.63	6.15
	右	3.44	7.90	9.44	8.10	7.71	6.29

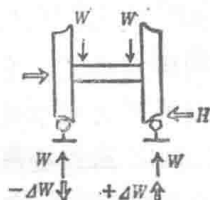
(2) 蒸汽机车走行时动轮摇杆推力的垂直分力，或未被平衡的离心力的垂直分力——前者在机车起动时较大，如图一6的D52型机车的算例所示，机车起动时该垂直分力达到静止轮重的50%；后者在高速时较大，在日本国铁将这一垂直分力定为不大于静止轮重的15%。

(3) 当列车通过曲线伴随转向所产生的横向水平力而必然发生的轮重偏载——如图一7所示，当没有横向水平力作用时，左右轮重均为 $W$ 。如果有一横向水平力 $H$ 作用于右车轮时，那么，由转向架传来的反力就作用于左车轮的轮心，

因此轮轴承受一个转矩。为了与这个转矩平衡，右轨的轮重就要增加，左轨的轮重就要减少。在这种情况下所产生的轮重偏载可达静轮重的50%。



图一6 D52型机车的算例



图一7

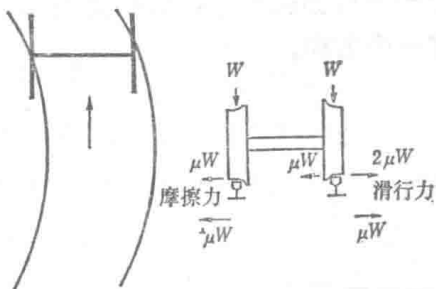
(4) 由于通过曲线时产生的未被平衡的离心力而产生的轮重偏载——随机车车辆的重心高的不同，其值可达静轮重的15%。

(5) 机车车辆摇摆惯性力的垂直分力——可达静轮重的20%。

(6) 由于钢轨面或者车轮踏面的不平顺而产生的机车车辆簧下部分的惯性力。

## 第二节 横向水平力

(1) 具有两个以上固定轴的机车车辆通过曲线时，转向架上各轴车轮因滑行而产生的摩擦力的横向水平分力，以及与此相平衡的钢轨给予车轮的反力——如图一8所示，轮对经由曲线转向时，将沿着曲线的切线方向前进，但外轨一



图一8

侧的车轮轮缘紧紧控制轮对，使它沿着外轨走行。在这种情



况下，两个车轮经常是向曲线内侧一方滑动，所以两车轮对钢轨产生如图所示的摩擦力  $\mu W$ 。这时在外侧轮缘与钢轨之间产生滑力  $-2\mu W$ ，从而在外轨形成  $-\mu W$  的力，在内轨形成  $\mu W$  的力，它们成为把轨矩向外挤宽的横向压力。两个以上的固定轴时，它的车轮滑行状态虽然更复杂，但所产生的横向水平力在本质上与上述相同。

(2) 通过曲线时的未被平衡的离心力的横向水平分力。

(3) 机车车辆摇摆时，特别是蛇行运动所产生的惯性力的横向分力。

这些横向水平力的总和，一般不大于轮重的50%，但最大时也可达80%。

### 第三节 纵 向 力

(1) 钢轨温度变化引起的纵向力——虽然它不是由机车车辆产生的，但在纵向力中它是特别大的。

(2) 在坡道区段机车车辆重量的纵向分力。

(3) 动车加减速或制动时所产生的纵向力。

(4) 通过曲线时车轮因滑行而产生的摩擦力的纵向分力——根据机车车辆的平衡关系，这些纵向分力不是全部朝着一个方向。