

汽车动力学

〔西德〕M. 米奇克 著



机械工业出版社

汽车动力学

〔西德〕 M. 米奇克 著

桑 杰 译

盛景方 朱 锴 余 群 张书元 校



机械工业出版社

本书原作者系西德布劳恩施威克工业大学汽车工程学院院长，长期从事汽车理论方面的研究和教学工作。本书是在他教学和研究工作的基础上，较全面而系统地总结了国际上这方面的工作而写成的，是一本较好的汽车工程基础理论著作，可供汽车工程科研、设计和教学人员参考。

全书由长春汽车研究所桑杰同志翻译，该所盛景方同志任技术校对，由吉林农业大学朱锴、华北农机化学院余群和张书元同志校订，朱锴同志和译者负责复核，朱锴同志负责编辑加工工作。

Dynamik der Kraftfahrzeuge

M. Mitschke

Springer-Verlag 1972

* * *

汽车动力学

〔西德〕 M. 米奇克 著

桑 杰 译

盛景方 朱 锴 余 群 张书元 校

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 $1/32$ ·印张 16 $5/8$ ·字数 438 千字

1980年 2 月北京第一版·1980年 2 月北京第一次印刷

印数 00,001—25,000·定价 1.85 元

*

统一书号：15033·4542

前 言

国内外有关汽车方面的科学著作，除少数参考手册外，大多是些在书刊上发表的文章。和其它技术领域相比，则理论书籍很少，而象本书所讨论的汽车行驶特性方面的书籍则更为缺乏。这种情况是令人惊异的，因为自从汽车发明后的几十年来，它的发展非常迅速，所以符合科学的专题性论文和综合性著作就显得极为重要。此外，大批量生产时总需要拿出足够数量的样车，在理论指导下进行试验使其日趋完善。当前，在生产百万辆汽车的情况下，缺乏理论怎么能行呢。

近年来理论研究增多了，我认为有四个原因。第一，自从大型和快速计算机出现以来，不仅有可能进行大量的计算，而且同时加强了人们对理论研究的信任。第二，电子测量技术的应用，使人们能够详细观察动态过程，从而理解动力学理论。第三，由于汽车不断得到改进和提高，大家都感到汽车工程中常用的测试仪器愈加难以解决问题。第四，必须合理地发展汽车技术，使能进行又快而又完善的设计计算，以便迅速解决问题。

本书将综述汽车行驶特性的理论问题。这些材料是我在工业活动之余，在卡尔卢斯鲁埃工业大学任讲师时的讲稿，主要是近五年在布劳恩施威克工业大学的讲稿。对这份两学期总共六小时的理论讲稿的重点进行了补充和完善。因此，不仅可以作为大学教科书，也可供从事汽车行驶特性理论工作者的参考。书中所收集的许多表格、图表和例子都可以应用。本书内容分为四部分。第一部分综述轮胎特性。第二部分叙述了理论上讨论已久的、在驱动和制动情况下的直线行驶问题。第三部分叙述了不平路面上的汽车振动。这种振动对乘客的舒适性、货物的安全性，以及对底盘行走部分的应力和轮胎与路面之间的垂直力都是很重要的。第

四部分讲操纵性、圆周行驶、行驶方向稳定性、侧风敏感度以及直线行驶的偏离。这一部分和振动部分虽说是汽车技术的新分支，但对舒适性和安全性起着重要作用。我们即或不谈行驶特性，但至少也要谈一谈首要的安全性问题以求避免事故。

我希望这本书能够起到推动作用，例如使汽车行驶特性的理论得到发展，或者使汽车参数的收集或使已收集到的汽车参数得以完备。有一些问题如转向轮闪动和转向摆动等问题在本书中未加讨论。我只引用了那些我认为对引出的论断较为重要的文献。

M.米奇克

1971年 8 月 布劳恩施威克

目 录

引言	1
1 动力学问题概述	1
2 分解成局部问题	3
3 章节编排	5

第一部分 车轮和轮胎

I. 滚动、附着-滑动、驱动-制动	7
4 车轮运动方程	7
5 滚动阻力	8
6 滚动阻力系数	10
6.1 穿水阻力	14
7 轴承摩擦、起动阻力	15
8 驱动力矩和制动力矩 (匀速行驶)	17
9 附着和滑动	18
10 滑转率、动力半径、车轮中心至路面的距离	22
11 附着率和滑转率	26
12 印迹内的单位纵向力、局部滑动	31
13 μ 值的详细研究、滑水现象	35
14 加速行驶	39
II. 垂直载荷、弹性	41
15 车轮载荷	41
16 轮胎承载量、温度极限	42
17 轮胎印迹内的压力分布	45
18 弹性常数	48
19 轮胎阻尼	50
III. 侧向载荷、空间问题	51
20 侧向力、回正力矩、偏离角	51
21 对偏离特性的理解	54
21.1 偏离角特性的线性化	58

22	车轮载荷、行驶速度、道路湿度的影响·····	58
23	圆周力的影响、最大水平力·····	62
24	车轮外倾对偏离特性的影响·····	67
25	加速度的考虑、空间问题·····	68
26	轮胎的起动状态·····	74

第二部分 驱动和制动

27	运动方程·····	77
IV.	空气力和空气力矩·····	80
28	空气载荷的表述·····	81
29	气流流入速度和流入方向、空气密度·····	84
30	空气阻力系数·····	87
31	升力·····	93
32	侧向力系数·····	96
33	压力中心、尾翼·····	99
V.	行驶阻力·····	101
34	整车的车轮阻力·····	101
34.1	滚动阻力·····	102
34.2	前轮前束阻力·····	102
34.3	不平路面的阻力·····	103
34.4	曲线行驶阻力·····	106
34.5	单个车轮阻力的总结·····	106
35	空气阻力·····	107
36	上坡阻力·····	108
37	加速阻力·····	110
38	作用于驱动轮上的总阻力、牵引力和功率·····	114
39	列车阻力·····	119
VI.	原动机、发动机特性、变扭器·····	119
40	定功率原动机、附着力极限·····	119
41	原动机特性·····	122
41.1	蒸汽机·····	122
41.2	电力驱动·····	122

VI

41.3 内燃机	124
42 适用于汽车的原动机	125
43 内燃机	128
44 一般的特性变换器	131
45 转速变换器	132
46 变扭器	135
46.1 发动机和分级变速器的协作	136
46.2 发动机和无级变速器的协作	137
VI. 行驶功率	140
47 行驶状态图	140
47.1 简化的行驶状态图	142
47.2 精确叙述	143
48 平路上的最高速度	147
49 上坡能力	151
50 加速能力	158
50.1 速度、行程、时间	159
50.2 具有理想牵引力特性曲线的汽车	163
50.3 中间档位的速比	165
50.4 牵引力中断	168
51 燃料消耗量	170
VII. 行驶极限	176
52 垂直载荷的大小	176
53 前轴驱动或后轴驱动时的附着率	179
53.1 平路上的等速行驶	182
53.2 上坡行驶 (等速)	183
53.3 加速行驶 (平路上)	184
54 全轮驱动	186
54.1 平路上的等速行驶	187
54.2 上坡行驶 (等速)	188
K. 制动	190
55 制动系统的问题、转变为热能	190
55.1 减速制动的功和功率	191

55.2 惯性制动的功和功率	192
56 制动力矩、制动力、制动减速率	194
57 利用发动机作惯性制动	197
58 减速制动时的制动距离	199
58.1 制动过程	199
58.2 停车距离	200
58.3 相对于理想制动减速率的制动距离的延长	203
59 减速制动时的附着率、质量系数	206
59.1 制动减速率随行驶速度的变化	209
59.2 制动力分配的变化	211
59.3 制动力极限	213
60 理想的制动力分配	214
61 制动力分配的参数配置	217
62 载荷变化时的附着率	220
63 牵引汽车和挂车之间的制动减速率	224
64 锁抱车轮	226
64.1 在 $0 \leq s \leq s_c$ 范围内的解	229
64.2 在 $s_c \leq s \leq 1$ 范围内的解	230
64.3 锁抱过程的重要量值	231

第三部分 汽车振动

65 汽车的等效振动系统	233
X. 单质量系统	237
66 固有振动、稳定性	237
67 激振	242
68 简化的装有弹簧的车辆	245
69 车轮系统	259
XI. 振动激励、评价标准、无规则振动	259
70 路面不平度的激励	259
71 车轮和轮胎的激励	265
72 振动舒适性	271
73 载荷、行驶安全性	274

74	无规则振动的计算	277
75	路面不平度的谱密度	281
XII.	车身和车轮的振动 (弹簧和减震器联接的双质量系统) ...	285
76	运动方程、固有频率	286
77	激振, 汽车和简化弹簧悬挂的车辆的对比如	287
78	汽车-道路-行驶速度	290
79	车身弹性常数 c_2 的影响	297
80	车身阻尼常数 k_2 的影响	302
81	车轮质量 m_1 的影响	304
82	轮胎数据的影响	306
83	车身质量 m_2 (载荷变化) 的影响	308
84	汽车数据对载荷的配合	310
XIII.	座位弹簧、车轮悬挂、非线性特性	313
85	座位弹簧	313
86	车轮悬挂的影响	318
86.1	轮胎变形的影响	324
86.2	加速度耦合的影响	327
87	刚性轴的摆动	329
88	非线性弹簧特性和减震器特性及其线性化	332
88.1	非线性的弹簧特性	336
88.2	非线性的减震器特性	338
88.3	摩擦阻尼	339
XIV.	双轴汽车	342
89	运动方程、放大因数、 $m_k = 0$	342
90	行驶速度的影响	347
91	座位的位置	349
92	汽车尺寸 (轴距) 的影响	351
93	前、后局部系统的各种协调	353
94	运动方程、 $m_k \neq 0$	357
95	耦合质量和轴距的影响	358
96	纵摆固有频率, 前、后悬挂的耦合	364

第四部分 操纵性和线路保持性

97 向心加速度	367
97.1 向心加速度和曲率半径的值	368
98 平面图上的瞬时中心	370
XV. 圆周行驶 (简单分析)	371
99 圆周半径、车轮转向角、偏离角	372
100 忽略偏离角情况下的车轮转向	376
101 宽度的要求	378
102 圆周行驶时的力	380
102.1 方程的简化	382
103 侧滑极限 (简化论述)	384
104 过度转向和不足转向、车轮转向角	385
105 轮胎尺寸或轮胎构造的影响	390
106 附着力的影响	392
107 轮胎气压的影响	393
108 车轮外倾的影响	394
109 不同的车轮转向角	396
110 轮轴的固有转向特性	397
111 曲线行驶阻力	400
112 圆周行驶时的行驶极限	402
112.1 由附着力、偏离角的改变而决定的行驶极限	402
112.2 由驱动功率决定的行驶极限	405
XVI. 圆周行驶 (深入分析)	406
113 车轮载荷变化、重心高度和轮距的影响	406
114 轮轴上车轮载荷的不同变化、侧翻极限	411
115 瞬时中心、瞬时轴线	412
116 车轮垂直载荷和汽车倾斜度的计算 (以刚性轴为例)	414
117 各种不同的车轮悬挂	416
118 不同的弹簧硬度、稳定器	420
XVII. 方向盘上的行程和力矩	421
119 前轮运动学的定义	422

X

120	方向盘上的力矩	423
121	转向前轮上的运动和载荷	428
121.1	车轮和转向节销的运动	428
121.2	车轮和转向节销的载荷	431
122	作用在两个转向节销上的力矩之和	434
123	低速曲线行驶时的转向力矩	436
124	静态转向力矩	440
125	快速曲线行驶时的转向力矩	442
126	直线行驶时的扰动力矩	448
127	转向节销的倾斜度变化	450
128	方向盘相对转角 β^* , 过度转向和不足转向	452
129	方向盘力矩	455
XVIII.	动态过程, 线路保持性	457
130	引言	457
131	简化的汽车模型的设想	460
132	运动方程的建立	462
132.1	车身的重心定理	463
132.2	车身的角动量定理	466
132.3	车轮垂直载荷的确定	468
132.4	轮胎负荷	470
132.5	方向盘转角和车轮转向角的关系	472
132.6	空气负荷	472
132.7	运动方程的综合	474
133	圆周行驶	476
133.1	轮胎、转向系统和车轮悬挂的弹性	478
133.2	空气力矩的影响	481
133.3	重心高度和车身倾斜度的影响	481
133.4	无因次表示法	484
134	齐次方程的解、稳定性条件	485
135	汽车的转向状态	489
136	汽车的侧风工况	505
137	驾驶员-汽车-侧风	512
	参考文献	516

引 言

本书论述汽车所受力的相互作用及汽车的运动。用工程力学上的语言来说,就是主要研讨汽车动力学,若用汽车技术上的语言来说,则本书是论述汽车行驶特性的。

下面首先对问题的全貌作一概述。

1 动力学问题概述

一辆四轮汽车经过简化可看成是由一个车身和四个车轮这五个质量构成的,它们通过转向机构、弹簧和减震器有机地联系在一起。因为每一个简化为刚体的物体具有六个自由度(三个平移自由度和三个旋转自由度),所以整个汽车就有 $5 \cdot 6 = 30$ 个自由度。为了描述汽车的运动,就需要有相当多的运动微分方程。这些微分方程当然不是彼此无关的,通过上述弹性的、减震的或转向的联系,其中大部分是彼此关联的,并且通过作用于分布质量上的加速度关系联系在一起(见角动量定理)。

如果把传动系(发动机、变速器、万向节、传动轴、驱动轴)、转向系(方向盘、转向机以及具有横拉杆的转向部分)、驾驶室、乘客、载重汽车上的货物等更多的运动可能性以及假设为刚体的内部运动都考虑在内,那末就很容易得出更多的自由度和微分方程。

这样多的彼此相关联的微分方程给全面描述汽车的行驶特性带来了困难。为了能掌握问题的特点和本质,我们宁愿退一步作某些省略而讨论一些专题。下面就如此进行。

驾驶员控制着汽车的速度和行驶方向,当由于某些不可避免的干扰而使汽车偏离原定行驶方向时,驾驶员要加以纠正。此外驾驶员应使汽车的行驶与街道或公路上的其它交通工具或行人所

容许其运动的空间相适应。

驾驶员的上述动作反过来作用到汽车上，结果就有图 1.1 所示的“人体”、“驾驶员（主动者）”和“加速、制动、转向”的闭合回路，这是一个调节系统的框图。

驾驶员或者全体乘客被动地接受汽车震动和噪音的作用。在这种场合下除了驾驶员改变车速或停车外，就无法主动有效地进行调整。正如图 1.1 所示，对于“汽车乘客(被动者)”和“感觉、反应”这两个方块来说就没有形成闭合回路。

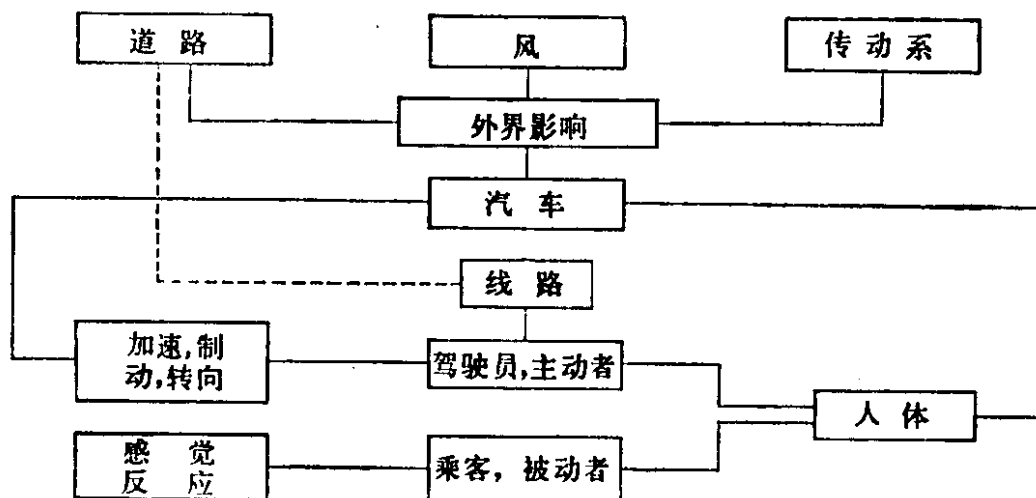


图1.1 汽车、人体和外界影响的相互作用图

由于汽车有很多个自由度，从而使其方程式的处理复杂化，也使描述人体的感觉和反应变得困难。这就是为什么在动力学问题的理论研究上只取得一部分成就，而没有取得重大进展的原因。例如对于汽车行驶方向保持性问题来说，显而易见，由于缺少描述人体特征的简化数学方程，而只能得出与实际情况不大符合的关系。

根据图 1.1，汽车首先受到道路方面的“外界影响”的作用。道路路面的平直度、转弯、相交渡线和上、下坡度等因素都对行驶方式产生影响，因此也包括在“线路”这一方块图中。轮胎和路面之间的摩擦系数对于在地面上行驶的汽车来说影响很大。此外我们还要研究道路不平度，它通过装有弹簧装置的汽车对乘客起作用，使汽车和路面都承受额外的应力，并降低行驶的安全性。

汽车的传动系部分也是振动和噪声的激发源，因此在图 1.1 中也将其列为外部影响因素。最后风也是属于外部影响，特别是侧风能迫使汽车偏离其行驶方向甚至达到危险的境地。

2 分解成局部问题

由第 1 节中得知，“汽车-驾驶员”以及“乘客-外界影响”的组合系统处理起来相当困难，也是不易做到一目了然的。因此最好分成范围一般是较小的局部问题来研究。下面就将在坐标系上定位的整体问题分成若干局部问题。

图 2.1 所示为可用来描述汽车运动的固定坐标系 x_0, y_0, z_0 ， x_A, y_A 和 z_A 是固定在物体上（在这里专门固定在车身上）的坐标系，假定重心 SP_A 为坐标原点。本书中还将采用“自然”坐标系、“纽线”坐标系等其它坐标系。图 2.1 中的两个坐标系对于分解成局部问题来说暂时还是够用的。

在直线行驶时 x_0 和 x_A 通常指向同一方向。如果运动被限制在这一对坐标方向上，就可以作为“直线行驶”

这一局部问题来研究，它要讨论的内容有行驶阻力、行驶功率、制动过程和加速过程。与 x_0, x_A 垂直的 y_0, y_A 方向上的运动会引起行驶方向的偏离，这种运动主要属于“线路保持性”这一局部问题的研究范围。

表 2.1 中列出了每个局部问题所涉及的运动方向或运动方式。表中对其中一些运动方式冠以汽车技术的专用名称（如把 y_0

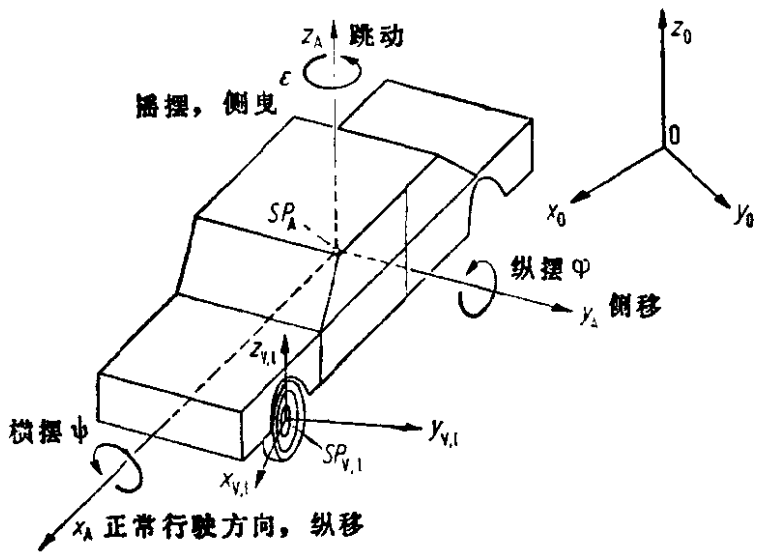


图2.1 描述汽车运动用的坐标系
和车身各种运动方式的名称

或 y_A 方向的运动称为“侧移”), 而在另一栏中还标明了这种运动方式和该局部问题究竟和那些其它的运动密切有关。在线路保持性问题上, 侧移是与围绕垂直轴的旋转运动 ε 密切联系的, 而 y_0 对时间的二次导数 $\ddot{y}_0$ (它近似地等于向心加速度) 使车身横摆 ψ 度倾角。

此外, 从表 2.1 中可见, 量值 z_0 、 φ 和 ψ 专门用来描述振动。表中所列用于描述车身运动的量值同样可用以描述车轮运动。为了区别起见, 可标以不同的脚标, 例如在图 2.1 上, 对左前轮来说采用了原点为 $SP_{v,1}$ 的座标系统 $x_{v,1}$, $y_{v,1}$, $z_{v,1}$ 。在图 2.2 和表 2.1 上还示出了一些表示车轮和轮轴特征的运动和名称。

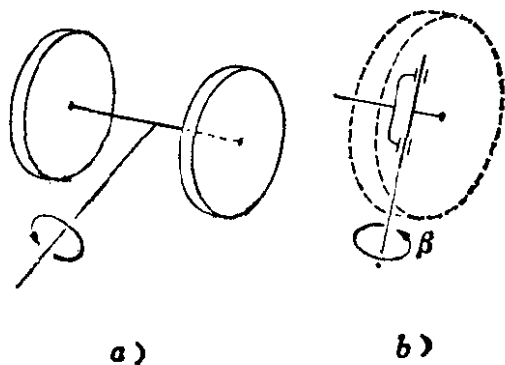


图2.2 轴和车轮的特殊运动

a) 刚性轴摆动 b) 转向轮绕转向节销的闪动

表2.1 局部问题对汽车运动座标的关系

运 动		密切有关 的项目	局 部 问 题
量 值	名 称		
车身:			
x_0 或 x_A			简单的直线行驶、行驶阻力、行驶功率、制动过程和加速过程
	纵 移	φ	汽车各部件的相互悬挂关系
y_0 或 y_A	侧 移	ε 、 (ψ)	行驶方向的偏离、“线路保持性”
			横向振动
z_0	上升、下降	φ 、 ψ	跳动振动
ψ	横 摆 (或称侧摇)		横摆振动
		y_0	曲线行驶时汽车车身的倾斜
φ	纵 摆 (或称点头)	z_0	纵摆振动
			x 方向上加速和制动时的前倾和后仰

(续)

运 动		密切有关 的项目	局 部 问 题
量 值	名 称		
ε	摇 摆 (或称偏摆)	γ 、 (ψ)	转离行驶方向、“线路保持性”
	侧 曳 (或称侧滑)		和摇摆一样，只是一个或几个轮胎在路面上滑曳(即滑动)
轴或车轮：			
β	转向运动		曲线行驶、直线行驶的调整、转向弹性
	转向轮闪动		转向轮的振动
φ			滑转、锁抱

3 章节编排

按照上述分解成局部问题的情况，本书将分为四大部分。

第一部分“车轮和轮胎”讨论了表明陆用汽车特征而且实际上没有统一样板的结构部件。由于这个分总成的重要性，所以本书中用很多篇幅对其进行研究。其它三个部分中研究整车，并且从汽车技术的角度出发分成若干大家都熟悉的专题。

第二部分“驱动和制动”主要讲述 x_0 方向的前进运动。我们将介绍驱动总成所必须克服的行驶阻力，在此基础上来评价汽车的加速度、行驶速度、油耗等。还要研究反驱动和负加速问题——即制动和减速问题。

第三部分为“汽车振动”。讨论时采用了一个不十分平坦的路面。汽车驶过这种路面时引起振动，尤其是激起跳动和纵摆。我们将对作为衡量行驶舒适性和可靠性标准的量值进行评价，并讨论弹簧、减震器、非悬挂质量等各种振动数据的影响。

第四部分为“操纵性和线路保持性”。在此不再讨论直线行驶，而是研究曲线行驶。首先研究曲线行驶的特殊情况——圆周行驶，它可以很容易地用数学手段来描述。然后再考虑一般情