

汽车的运动和操纵

(日) 安部正人 著
陈辛波 译



机械工业出版社

U461

431392

A51

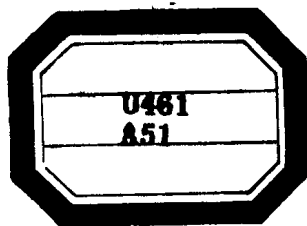
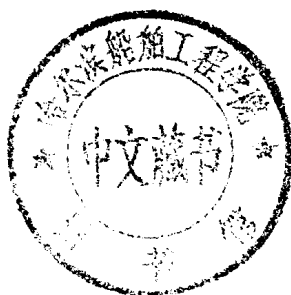
本书由上海发展汽车工业教育基金会资助出版

汽车的运动和操纵

(日) 安部正人 著

陈辛波 译

余卓平 审校



00431392

机械工业出版社

自動車の運動と制御

DN 58 60

平成4年7月10日	第1刷印刷	著者	安部正人
平成4年7月20日	第1刷発行	発行者	石川悌二
		印刷所	新日本印刷株式会社
		製本所	協栄製本株式会社
		発行所	株式会社山海堂

©Printed in Japan 1992 ISBN 4-381-10052-2

著作権合同登记号 图字: 01-98-1529

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车的运动和操纵 / (日) 安部正人著; 陈辛波译.

—北京: 机械工业出版社, 1998. 10

ISBN 7-111-06610-3

I. 汽… II. ①安…②陈… III. ①汽车-动力性②汽车-操纵性 IV. U461

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第20591号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑: 钱飒飒 版式设计: 张世琴 责任校对: 姚培新

封面设计: 海之帆 责任印制: 王国光

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年10月第1版第1次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·7.125印张·183千字

0 001—2 000 册

定价: 12.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

前言

汽车是与我们的生活密切相关的客观存在。它能够不受预先设置的轨道等的约束，而按驾驶者的意愿自由地在平面内进行“独立运动”。这种运动具有和飞机、船舶等的运动相通的某种共性：运动体都受到只有相对于外界运动才产生的力，并且正是利用了这种力，才使运动体有可能在驾驶者的意愿支配下，自由地在给定的空间或平面内运动。

在飞机的运动研究领域内，从很早起，人们就创立了系统化的飞行（运动）力学，以研究飞机的运动和操纵问题。在船舶的运动研究领域内，也已确立了船体运动力学的学科分支。在对车辆的运动研究领域内，也已有很多研究，特别是随着汽车的高速化，其运动性能的问题已成为重要的研究课题。

12年前，作者将以往人们研究汽车而得到的有关操纵性、稳定性的研究成果以及有关车辆运动性能的一般性知识进行了归纳、总结，由共立出版社（株）出版了《车辆的运动和操纵》一书。它并不仅仅是作为汽车工程学的一部分，而是将车辆看成与飞机、船舶同样作独立运动的运动体来展开的。

在车辆运动高性能化的发展趋势下，本书作为以车辆的运动性能为研究对象的技术人员的入门书，已拥有了很多的读者。但是，度过了12年的岁月，随着人们对车辆运动的高性能化的要求，本书的许多内容需要补充、完整。所以，作者决定大幅度地修正前书，重新将本书作为车辆运动的入门书，或者教科书出版。并以一般力学、机械力学、振动学、控制工程学等基本内容为基础，一般性地归纳、整理了车辆的运动和操纵问题。

本书包含了面向大学工科和高等专科学校的学生，或部分面向研究生讲授的汽车与车辆工程学的内容，但更广泛地，作者希

望它能够成为工程技术人员研究车辆运动及其操纵时所需的入门书。因此,本书在构成上是这样安排的:如果了解车辆自身基本运动的力学性质,可读第1章到第4章;如果想更详细地了解车辆自身的运动性质,则可继续读至第8章;如果主要是研究由驾驶员操纵的车辆运动,则可在读完第1章到第3章后,从第9章起读至第10章。

第1章首先阐明了作为本书研究对象的车辆的运动究竟是怎样的运动。

第2章是轮胎力学。对本书要研究的车辆运动而言,作用于轮胎的侧向力起着最基本、最重要的作用。该章阐明了作用于轮胎上的力的产生机理及其性质。

第3章是车辆运动基础。本章考察了车辆相应于转向操纵将产生的运动,阐明了车辆自身的运动的基本性质,是研究所有作独立运动的车辆运动的基础。

第4章研究了车辆在外力作用下的运动,也是研究车辆运动的基础。

第5章讨论了车辆转向装置的性质对运动的影响。

第6章阐明了车身侧倾给车辆运动带来的影响。

第7章研究了驱动和制动所引起的车辆运动。

第8章讨论了前后轮转向下的车辆运动。

因此,第5~8章在第3、4章所述车辆运动基础知识的基础上,更进一步地阐明了车辆自身所具有的运动性质。

但是,能够作独立运动的车辆,只有在驾驶员的操纵下才能作有意义的运动。因此,第9章论述了具有如第3、4章所述性质的车辆,在驾驶员的操纵下将如何运动。

另外,还有一个很重要的问题就是由驾驶员操纵的车辆具有怎样的运动力学性质才容易操纵,所以,第10章讨论了有关车辆运动力学的基本性质与操纵容易性的关系。

因此,第9章和第10章研究了具有如第3、4章所述基本性质的车辆,在适当操纵下的运动及其相关的诸问题。

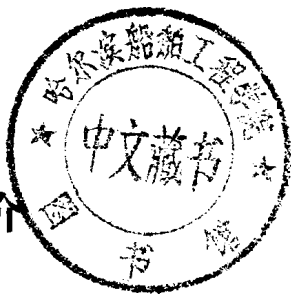
关于车辆的运动和操纵问题，已经有很多人进行了卓越的研究。在执笔本书时，承蒙被允许自由地引用了其中很多的研究成果。这些均在本文中注明了其出处，并将其文献目录附记于各章末。在此对这些研究者表示深切的谢意。

本书的出版得到了(株)山海堂的八木国夫氏的大力协助。特此厚谢。

最后，浅学的作者深恐本书存在失误和观点错误，文献引用过程中的误解，以及表达欠妥等不足之处。这些问题的责任理当由作者承担，但为了将来的修订，如蒙读者诸贤斧正，则有幸也。

安部正人

1992年5月



原著者简介

安部正人,1971年东京大学研究生院工学系研究科博士毕业,工学博士。从事车辆的运动、人一机系统、交通系统等研究。现为神奈川工科大学工学部机械系统工学科教授。

译者后记

本书略去了原著各章习题及部分例题,谨此说明。

在翻译过程中得到了同济大学汽车工程系有关教师的大力支持;在联系翻译出版许可权的过程中得到了原著作者安部正人教授、原著出版社日本山海堂株式会社石川悌二社长、松元龙治次长的理解和大力支持。在此一并表示衷心感谢。并感谢上海发展汽车工业教育基金会对本书出版的资助。

由于译者水平所限,文中如有误译或不当之处,敬请读者指正。

目 录

前言

第 1 章 车辆的运动及其操纵	1
1.1 车辆的定义	1
1.2 4 轮车的抽象模型	1
1.3 运动的操纵	3
参考文献	4
第 2 章 轮胎力学	5
2.1 绪言	5
2.2 产生侧向力的轮胎	5
2.2.1 车轮和侧向滑动	5
2.2.2 侧向滑动的轮胎的变形和侧向力	7
2.2.3 轮胎的对地外倾和侧向力	8
2.3 轮胎的侧偏特性	9
2.3.1 Fiala 理论	9
2.3.2 侧偏力	18
2.3.3 回正力矩	25
2.3.4 外倾侧向力	26
2.4 驱动、制动和轮胎的侧偏特性	29
2.4.1 力学模型	29
2.4.2 驱动、制动时的轮胎侧向力	30
2.4.3 回正力矩	36
2.5 轮胎的侧偏动特性	38
2.5.1 侧偏力的动特性	39
2.5.2 回正力矩的动特性	41
参考文献	42

第 3 章 车辆运动基础	44
3.1 绪言	44
3.2 车辆的运动方程式	44
3.2.1 在车辆固定坐标系中的运动方程式	45
3.2.2 在地面固定坐标系中的运动方程式	52
3.3 车辆的等速圆周运动	56
3.3.1 等速圆周运动的描述	56
3.3.2 等速圆周运动和转向特性	61
3.3.3 等速圆周运动和轮胎特性的非线性	71
3.4 车辆运动的动态特性	77
3.4.1 车辆对转向操纵的瞬态响应	77
3.4.2 转向操纵响应的传递函数	86
3.4.3 车辆相应于周期性转向操纵的响应	91
3.4.4 轮胎特性非线性的影响	93
参考文献	98
第 4 章 外部干扰引起的车辆运动	99
4.1 绪言	99
4.2 作用于质心的侧向力引起的运动	99
4.2.1 阶跃状侧向力引起的运动	99
4.2.2 脉冲状侧向力引起的运动	108
4.2.3 外部干扰引起的运动和转向特性	110
4.3 侧风引起的车辆运动	113
4.3.1 由侧风引起的力	113
4.3.2 受到一定风速的侧风时的运动	114
4.3.3 受到瞬时性急风时的运动	116
4.4 本章小结	118
参考文献	119
第 5 章 转向系统和车辆的运动	120
5.1 绪言	120
5.2 转向系统的力学模型和运动方程式	120

5.3 转向系统特性对车辆运动的影响	122
5.3.1 固定方向盘角时, 转向系统特性	
对车辆运动的影响	122
5.3.2 不固定方向盘转角时, 转向系统特性	
对车辆运动的影响	125
5.3.3 手和腕的作用	127
参考文献	130
第6章 车身的侧倾和车辆运动	131
6.1 绪言	131
6.2 侧倾的几何学	131
6.2.1 侧倾中心和侧倾轴	131
6.2.2 侧倾刚度和载荷转移	134
6.2.3 外倾变化和侧倾转向	136
6.3 车身侧倾和车辆的转向特性	138
6.3.1 载荷转移的影响	138
6.3.2 外倾变化的影响	140
6.3.3 侧倾转向的影响	141
6.3.4 悬架装置的侧向刚性及其影响	143
6.4 计及侧倾的车辆运动方程式	145
6.4.1 坐标系和力学模型	145
6.4.2 惯性力	146
6.4.3 外力	150
6.4.4 运动方程式	152
6.5 车身侧倾对车辆运动的影响	155
参考文献	159
第7章 驱动及制动时的车辆运动	160
7.1 绪言	160
7.2 考虑纵向运动的运动方程式	160
7.3 车辆的准等速圆周运动	161
7.3.1 圆周运动的描述和稳定性要素的推广	161

7.3.2 驱动和制动对圆周运动的影响	166
7.4 车辆的转向瞬态响应	168
7.4.1 运动方程式	168
7.4.2 转向瞬态响应	170
参考文献	173
第8章 前后轮转向和车辆运动	174
8.1 绪言	174
8.2 附加后轮转向和车辆运动	174
8.2.1 比例于前轮转角的后轮转向	174
8.2.2 比例于前轮转向力的后轮转向	177
8.2.3 比例于横摆角速度的后轮转向	179
8.3 侧滑零化的后轮转向控制	181
8.3.1 由前轮转角控制的后轮转向方式	182
8.3.2 比例于前轮+比例于横摆角速度 控制的后轮转向方式	183
8.4 前后轮转向主动控制	184
参考文献	188
第9章 驾驶员操纵的车辆运动	189
9.1 绪言	189
9.2 人的操纵动作	189
9.3 驾驶员操纵的车辆运动	191
9.3.1 驾驶员模型	191
9.3.2 沿路线的车辆运动	192
9.3.3 运动稳定性	195
9.4 驾驶员对车辆特性的适应	199
9.5 改进的驾驶员模型	203
参考文献	204
第10章 容易操纵的车辆	206
10.1 绪言	206
10.2 车辆的操纵容易性	206

10.3 车辆运动力学性质和操纵容易性	208
10.3.1 转向特性和操纵容易性	208
10.3.2 动特性和操纵容易性	210
10.3.3 响应时间及增益常数和操纵容易性	214
参考文献	216
原著者简介	218
译者后记	218

第 1 章 车辆的运动及其操纵

1.1 车辆的定义

在地面上行驶的车辆，从其运动形态来看，可分为以下的两大类：一类为被完全约束在预先设置于地面的轨道上行驶的车辆，其代表是铁道车辆；另一类为不受轨道约束，通过对车轮的操纵，自由地在地面上行驶的车辆，也就是本书的研究对象。

飞机可在大气中不受其它约束而自由地飞行。同样，船舶也可通过操纵机构的操纵自由地在水面上航行。可见，在飞机、船舶以及可通过操纵而自由地在地面上行驶的车辆之间具有共性：都不受预先给定的轨道约束，都能按驾驶者的意愿自由地在空间或平面内运动。

从运动力学的观点来看，可以说这三者的运动体都受到由于自身的运动才产生的力，并利用这种力来实现所期望的运动，在本质上具有共性。具体地说，飞机依靠机翼和大气的相对运动产生升力，船舶依靠船体和水的相对运动产生浮力，车辆则依靠车辆和地面的相对运动而产生作用于车轮上的侧向力。它们分别自由运动，发挥各自的机能。

因此，从上述三者的运动和操纵关系到运动体本质机能的实现，对飞机和船舶而言，这方面的研究已分别产生了系统化的飞行（运动）力学和船体运动力学。

本书将研究车辆（vehicle）的运动和操纵问题。

1.2 4轮车的抽象模型

首先考察典型车辆的运动力学模型。一般最为熟知的车辆有小轿车、大型货车、大客车等，其它还有如建设用车辆、产业用

车辆等特殊车辆。若以这些车辆的基本运动为研究对象,则可将车辆一般性地抽象为如图1.1所示的4轮车。它由视作刚体的车身和前后各有2个安装于该车身上的可操纵的车轮组成。通过对这个车辆模型的研究,可得到很多关于车辆运动的基本知识。

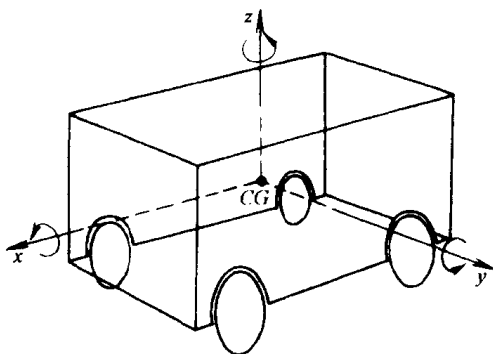


图1.1 车辆的运动力学模型

在图1.1的车辆力学模型中,设车轮不具有质量,车辆的质量集中于视为刚体的车身。

并取车辆的质心为原点,车辆的纵向为 x 轴,侧向为 y 轴,上下方向为 z 轴,建立固定于车辆的坐标系。

以此坐标系为基准,车辆运动的自由度可按三维空间内的刚体运动分类为以下的6个:

- 1) z 向的平动: 上下运动 (up and down motion)
- 2) y 向的平动: 侧向运动 (lateral motion)
- 3) x 向的平动: 纵向运动 (longitudinal motion)
- 4) 绕 x 轴的转动: 侧倾运动 (rolling motion)
- 5) 绕 y 轴的转动: 俯仰运动 (pitching motion)
- 6) 绕 z 轴的转动: 横摆运动 (yawing motion)

进一步详细观察上述六种运动,可将其分类为如下的两大类:

一类为1)、3)、5)的运动,它们和转向操纵没有直接关系。具体地说, z 向的平动1)是由于路面不平整等产生的上下方向的运动。它关系到行驶中车辆的乘坐舒适性。 x 向的平动3)为纵向的直线运动,包括由于加大油门或刹车所产生的车辆驱动或制动等。绕 y 轴的转动5)为由于路面的上下不平整及伴随着3)的运动而产生的运动。它也关系到车辆的乘坐舒适性。

与此相对, 2)、6) 则基本上是由于对行驶中的车辆进行转向操纵才产生的运动。其中, y 向的平动 2) 为由于转向操纵而产生的车辆侧向运动, 绕 z 轴的转动 6) 为车辆方向因转向操纵而发生变化的运动。而绕 x 轴的转动 4) 则是伴随着 2) 和 6) 的运动而产生的运动。这种运动也会因路面不平整而产生。

如前所述, 本书要研究的车辆是可通过转向操纵而在地面上沿任意方向自由运动的车辆。因此, 特别要研究由转向操纵引起的 2)、4)、6) 的运动。

1.3 运动的操纵

一般的车辆, 其运动由车上的驾驶员所控制。由于驾驶员的转向操纵, 车辆按其固有的运动力学特性作侧向运动、绕铅直轴的横摆运动以及与此相伴的侧倾运动。此时, 驾驶员不断地用眼观察要前进的目标路线, 即道路的情况, 或者在前方设定自己应行驶的目标路线。并要观察自己的车辆现在相对其目标路线正处于什么位置、正作什么运动、将来会怎样。根据这些信息, 驾驶员进行适当的转向操纵。这样, 车辆就沿着给定的或者由驾驶员自己设定的目标路线运动^[2] 用图1、2框图表示了这样的车辆运动和操纵的关系。

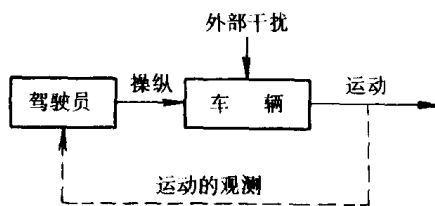


图1.2 车辆的运动及其操纵

因此, 通过操纵能自由地在平面内运动的车辆也只有通过人或者其它方法的适当操纵才能作有意义的运动。

我们感兴趣的是: 首先, 作为研究对象的车辆, 其自身独自具有怎样的运动力学性质? 这可通过观察在一定的特别转向操纵下的车辆运动来弄清楚。其次, 具有这样运动力学性质的车辆, 在通过驾驶员或其它方法的操纵时, 将作怎样的运动? 还有, 对驾驶员来说, 车辆应具有怎样的运动力学性质才容易操纵呢?

参 考 文 献

- 1) 平尾, 近藤, 亘理, 山本: 理論自動車工学, 自動車工学講座4, 山海堂, 1967 (11, 2章, 2.1)
- 2) 井口: 人間-機械系-人による機械の制御一, 情報科学講座 B. 9. 2, 共立出版, 1970 (1章, 1.6)

第2章 轮胎力学

2.1 绪言

第1章已阐述了本书所要讨论的所谓车辆运动。它是不受预先设置于地面上的轨道等的直接约束，在水平面内按驾驶员的意愿自由独立地进行的运动，而车辆只有在相对于地面运动时才产生使这种运动成为可能的力。

车辆和地面的接触点是车轮。如果车轮在垂直于其回转面的方向上存在速度分量，则将受到垂直于行驶方向的力。即，由于车辆和地面的相对运动而使车轮受到来自地面的力，这种力就是产生上述车辆运动的力。这正好相当于在飞机运动中垂直作用于机翼行进方向的升力和航行中垂直作用于船体行进方向的升力（相对于船体为侧向力）。

这样，车辆的车轮不仅起着支持车身并转动，以及在纵向产生相对于地面的驱动力或制动力等力的作用，而且也使车辆所具有的本质机能，即独立自由的运动成为可能。

为了便于讨论车辆的运动和操纵问题，有必要介绍有关作用于车轮上的、使车辆运动的力的知识。

为此，本章主要阐明由于车轮和地面的相对运动而产生的力的产生机理及其性质。

2.2 产生侧向力的轮胎

2.2.1 车轮和侧向滑动

一般，车辆作直线行驶时，其车轮的朝向和车轮的行驶方向是一致的。即，车轮的行驶方向位于车轮的旋转面内。但是，车辆产生侧向运动和横摆运动时，车轮相对于地面的行驶方向就不