

 Springer

(德) Karl Popp 著
Werner Schiehlen

地面车辆动力学

Ground Vehicle Dynamics

吴光强 译



人民交通出版社
China Communications Press

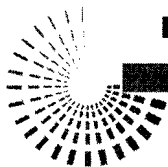
(德) Karl Popp 著
Werner Schiehlen

地面车辆动力学

与(德) Matthias Kröger 合作
Lars panning

吴光强 译

人民交通出版社



中文版前言

Zhongwenban Qianyan

《地面车辆动力学》中文版基于2010年Springer-Verlag柏林海德堡出版的英文版,由中国同济大学汽车学院吴光强教授翻译为中文。在英文版出版的几个月后,吴光强教授和Werner Schiehlen教授在日本京都举行的第五届亚洲多体动力学会议(The 5th Asian Conference on Multi-body Dynamics, ACMD2010)上会晤。期间,吴光强教授对《地面车辆动力学》很感兴趣,提议安排出版其中文版。之后,Springer-Verlag公司的Christoph Baumann与中国的合作出版社取得联系,并启动了中文版的出版工作。同时,借助本次翻译机会,对读者和译者发现的一些印刷错误进行了更正。

车辆动力学处理的是车辆系统的力学建模、数学描述及其分析问题。本书以方法论为基础,从统一的视角介绍地面车辆系统动力学的共性问题,包括路面车辆、轨道车辆和磁悬浮列车的动力学建模和分析方法。在车辆原型制造之前,可通过车辆系统数学模型的计算开展其运动的仿真和相关参数的优化。而开发周期不断缩短和车辆型号不断增加的发展趋势,要求设计工程师在设计阶段即对车辆系统进行综合性的计算,本书将介绍其中相关的理论基础。

本书基于模块化的思想,将整车分为多个具有标准接口的子系统。第一部分详细介绍了车辆、导向、悬架以及导轨系统的数学模型,组装完成整车-导轨系统的建模;第二部分从方法论的角度介绍了车辆操纵稳定性、行驶安全性和耐久性等性能指标,并总结了线性和非线性车辆系统的计算方法;第三部分将与车辆动力学问题相关的先进理论与方法用于

垂向、侧向和纵向运动的解耦,为车辆动力学的研究奠定基础;附录介绍了车辆机电一体化部件控制设计的多变量最优控制理论,并给出相关的结果。本书中分析的许多问题主要是对理论的简单应用,其求解能帮助读者更好地理解道路和轨道车辆的基础理论。

本书一方面可用于车辆工程专业学生的教学,不仅适用于应用力学和系统理论专业的学生,也可用于机械工程师和汽车工程师,使其对地面车辆系统的一般特性有较全面的认识;另一方面,本书为相关领域的工程技术人员介绍了目前工业界中广泛使用的应用软件的基础理论与方法。而且,系统方法论为基础的方法也适用于机械工程和机电一体化的分支学科。

作者与合作者感谢斯图加特大学 Peter Eberhard 领导的工程与计算力学研究所对本书一直以来的支持,感谢同济大学汽车学院盛云博士为本书所做的中文输入、图形、公式和表格调整等工作。最后,必须指出,与人民交通出版社的合作非常好。

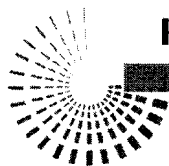
斯图加特

Werner Schiehlen

上 海

吴志明

2012 年 2 月



Preface

The Chinese edition of the book *Ground Vehicle Dynamics* is based on the English edition published in 2010 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg. The English text was translated to Chinese by Guangqiang Wu, Ph. D. , Professor at the Automotive School of Tongji University, China. A few months after the publication of the English edition Guangqiang Wu and Werner Schiehlen met at the 5th Asian Conference on Multibody Dynamics (ACMD 2010) in Kyoto, Japan. During this Conference Guangqiang Wu got interested in the new book and proposed to make arrangements for a Chinese edition. Then, Christoph Baumann from Springer-Verlag got in touch with Chinese co-operating publishers, and the project started. The occasion of the translation was also used for the correction of quite a number of printing errors found by the readers and the translator as well.

Vehicle dynamics deals with the mechanical modelling as well as the mathematical description and analysis of vehicle systems. The aim of this book is a methodologically based introduction to the dynamics of ground vehicle systems. The different kinds of vehicles like automobiles, rail cars or magnetically levitated vehicles are not considered one by one but the dynamically common problems of all these vehicle systems are treated from a uniform point of view. This is achieved by a system oriented approach. The evaluation of meaningful mathematical models allows simulations of motion and parameter studies well in advance of setting up a first prototype. The trend to

shorter periods for the development and to larger numbers of vehicle versions demands from the engineer comprehensive computations, the fundamentals of which are presented in this book.

The fundamental concept of this book is based on a modularization into vehicle subsystems with standardized interfaces. In the first vital part the models of vehicles, guidance and suspension systems as well as guideway systems are presented, they are mathematically described in detail and they are assembled to complete vehicle-guideway systems. The second methodologically oriented part is devoted to the performance criteria driving stability, driving safety and durability. Then, it follows a review on the computational methods for linear and nonlinear vehicle systems. The sophisticated theoretical methods related to the demanding problems in vehicle dynamics are applied in the third part to longitudinally, laterally and vertically decoupled motions providing the basics of vehicle dynamics. An appendix with some results from the theory of optimal multivariable control systems presents methods for the control design of mechatronic vehicle components. The many problems included in the book show mainly simple applications of the theory presented, and their solutions will support the reader in better understanding the theory and the fundamentals of railway and road vehicles.

The book is devoted on the one hand to students of applied mechanics and system theory as well as mechanical engineering and automotive engineering. The book will support lectures on vehicle systems and provide a view on the general behaviour of ground vehicles. On the other hand the book illustrates to engineers joining or working with a vehicle company, or one of their suppliers, advanced methods which are the basis of software tools widely used today in industry. Thus, the book may contribute to continuing education. Moreover, the systematic methodologically based approach is a good

example for many divisions of mechanical engineering and mechatronics.

The authors and contributors of the book acknowledge the support of the Institute of Engineering and Computational Mechanics at the University of Stuttgart headed by Peter Eberhard. We thank also Yun Sheng, Ph. D. , from the Automotive School at the Tongji University for typing Chinese text and adapting the figures, formulas, tables. Finally it has to be pointed out that the cooperation with China Communications Press was excellent.

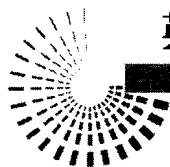
Stuttgart

Werner Schiehlen

Shanghai

Yun Sheng

February 2012



英文版前言

Yingwenban Qianyan

《地面车辆动力学》是1993年出版的德文版《车辆动力学》的英文修订版。在本书的筹备期间,第一作者汉诺威莱布尼兹大学的Karl Popp教授过早去世了。为传承他的精神,Karl Popp教授研究团队的两名成员,Matthias Kröger和Lars Panning继续参与本书的编辑工作。然而,修订时间却远超预算,在此期间,Matthias Kröger受聘至弗赖贝格工业大学机器设计和制造研究所任职。

车辆动力学处理的是车辆系统的力学建模、数学描述及其分析问题。本书以方法论为基础,从统一的视角介绍地面车辆系统动力学的共性问题,包括路面车辆、轨道车辆和磁悬浮列车的动力学建模和分析方法。在车辆原型制造之前,可通过车辆系统数学模型的计算开展其运动的仿真和相关参数的优化。而开发周期不断缩短和车辆型号不断增加的发展趋势,要求设计工程师在设计阶段即对车辆系统进行综合性的计算,本书将介绍其中相关的理论基础。

本书基于模块化的思想,将整车分为多个具有标准接口的子系统。第一部分详细介绍了车辆、导向、悬架以及导轨系统的数学模型,组装完成整车-导轨系统的建模;第二部分从方法论的角度介绍了车辆操纵稳定性、行驶安全性和耐久性等性能指标,并总结了线性和非线性车辆系统的计算方法;第三部分将与车辆动力学问题相关的先进理论与方法用于垂向、侧向和纵向运动的解耦,为车辆动力学的研究奠定基础;附录介绍了车辆机电一体化部件控制设计的多变量最优控制理论,并给出相关的

结果。本书中分析的许多问题主要是对理论的简单应用,其求解能帮助读者更好地理解道路和轨道车辆的基础理论。

本书一方面可用于车辆工程专业学生的教学,不仅适用于应用力学和系统理论专业的学生,也可用于机械工程师和汽车工程师,使其对地面车辆系统的一般特性有较全面的认识;另一方面,本书为相关领域的工程技术人员介绍了目前工业界中广泛使用的应用软件的基础理论与方法。而且,系统方法论为基础的方法也适用于机械工程和机电一体化的分支学科。

与已经多年没有重印的德文版相比,本书仅略作修订。全书增加了新的参考文献,第2章讨论了多体动力学的递归方法,第6章介绍了修订的ISO 2631 标准,第7章分析了MATLAB 中的标准时间积分程序,第10章讨论了平面半车模型,弥补了四分之一车辆模型和整车模型之间的空白。由于本书是英文版,所以附录中增加了一些德文关键词,以帮助德文读者认出他(她)感兴趣章节中的专业术语。

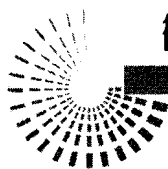
作者和合作者感谢斯图加特大学 Peter Eberhard 领导的工程与计算力学研究所对本书一直以来的支持,感谢汉诺威莱布尼兹大学的合作者和斯图加特大学的学生为本书所做的公式、表格和文字编辑以及图形绘制工作,感谢工程与计算力学研究所的成员帮助校对稿件,特别是来自西班牙塞维利亚大学的博士后 Daniel García Vallejo,他在研究所期间对本书最后的编辑工作做了很多贡献。最后,必须指出,与 Springer-Verlag 公司 Petra Jantzen, Dieter Merkle 和 Christoph Baumann 的合作非常好。

弗赖贝格 Matthias Kröger

汉诺威 Lars Panning

斯图加特 Werner Schiehlen

2009 年 10 月



德文版前言

Dewenban Qianyan

通过前一段时间我们尊敬的老师, K. Magnus 教授的努力,《车辆动力学》面世了。本书是作者在慕尼黑工业大学、汉诺威大学和斯图加特大学超过 10 年车辆动力学授课经验的总结,还囊括了作者在乌迪内斯国际机械学中心“高速车辆动力学”授课过程中积累的丰富素材。

车辆动力学是指对车辆系统的力学建模、数学描述和分析。本书以方法论为基础,从统一的视角介绍地面车辆系统动力学的共性问题,包括路面车辆、轨道车辆和磁悬浮列车的动力学建模和分析方法。在车辆原型制造之前,可通过车辆系统数学模型的计算开展其运动的仿真和相关参数的优化。而开发周期不断缩短和车辆型号不断增加的发展趋势,要求设计工程师在设计阶段即对车辆系统进行综合性的计算,本书将介绍其中相关的理论基础。

本书基于模块化的思想,将整车分为多个具有标准接口的子系统。第一部分详细介绍了车辆、导向、悬架以及导轨系统的数学模型,组装成整车-导轨系统的模型;第二部分从方法论的角度介绍了车辆操纵稳定性、行驶安全性和耐久性等性能指标,并总结了线性和非线性车辆系统的计算方法;第三部分将与车辆动力学问题相关的先进理论与方法用于垂向、侧向和纵向运动的解耦,为车辆动力学的研究奠定基础;附录介绍了车辆机电一体化部件控制设计的多变量最优控制理论。

本书不仅适用于机械、系统理论和车辆工程专业的大专院校师生,也可供机械工程师和汽车工程师学习与参考,使其对地面车辆动力学的

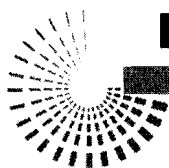
基础理论有较全面的认识。

作者在此感谢 R. Austermann 和 P. Eberhard 对本书的仔细审校,以及 W. Pietsch 先生为本书图片绘制所做的工作。此外,感谢书稿撰写过程中所有提供帮助的单位和个人,最后,感谢出版社的 B. G. Teubner 的耐心,和他的合作非常愉快。

汉诺威 K. Popp

斯图加特 W. Schiehlen

1992 年夏天



目 录

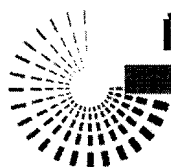
MULU

第1章 系统定义和建模	1
第2章 车辆模型	9
2.1 多体系统元件	9
2.2 运动学	10
2.2.1 车辆运动学参考坐标系	10
2.2.2 惯性坐标系中的刚体运动学	11
2.2.3 移动参考坐标系中的刚体运动学	22
2.2.4 多体系统运动学	26
2.3 动力学	36
2.3.1 惯性特性	36
2.3.2 Newton-Euler 方程	39
2.3.3 d'Alembert 和 Jourdain 原理	47
2.3.4 能量考虑及 Lagrange 方程	49
2.4 多体系统的运动方程	53
2.5 多体系统程式	58
2.5.1 非递归法	59
2.5.2 递归程式	62
第3章 支撑与导向系统模型	79
3.1 被动弹簧与阻尼系统模型	79
3.2 力作动器模型	89
3.2.1 磁作动器模型	89
3.2.2 力作动器的通用线性模型	94
3.3 被动元件与主动元件的比较	95
3.4 车轮和导轨之间的接触力	95
3.4.1 刚性和可变形车轮的滚动	96

3.4.2 刚体滑移的定义	101
3.4.3 弹性车轮在弹性轨道上的接触力	103
3.4.4 刚性路面上弹性轮胎的接触力	123
第4章 导轨模型	143
4.1 弹性轨道模型	143
4.1.1 周期性柱支梁模型	144
4.1.2 弯曲振动时梁结构的模态分析	147
4.1.3 连续支撑梁模型	158
4.2 刚性导轨的扰动模型	161
4.2.1 随机过程的数学描述	163
4.2.2 不平度轮廓模型	172
4.2.3 车辆激励过程模型	173
第5章 车辆-导轨系统模型	177
5.1 子系统的状态方程	177
5.2 整车系统的状态方程	179
第6章 评价指标	185
6.1 行驶稳定性	185
6.2 乘坐舒适性	187
6.2.1 确定性激励	187
6.2.2 随机激励	189
6.2.3 人体感知的整形滤波器	190
6.2.4 人体承受全身振动的修订标准	191
6.3 行驶安全性	192
6.4 零部件耐久性	194
第7章 计算方法	197
7.1 数值仿真	197
7.1.1 车辆垂向运动仿真	198
7.2 线性系统	202
7.2.1 稳定性	202
7.2.2 频率响应分析	203
7.2.3 随机振动	205
7.3 非线性系统	208
7.3.1 谐波线性化	208

7.3.2 统计线性化	211
7.3.3 线性化系统研究	212
7.4 最优化问题	213
第8章 纵向运动	215
8.1 弹性车轮	215
8.2 整车	218
8.3 空气阻力和力矩	220
8.4 驱动和制动力矩	221
8.5 动力性	224
第9章 侧向运动	227
9.1 路面车辆的操纵性	227
9.1.1 弹性车轮	228
9.1.2 车辆模型	228
9.1.3 稳态回转	231
9.1.4 行驶稳定性	232
9.1.5 实验研究	233
9.2 轨道车辆的行驶稳定性	234
9.2.1 轨道车辆轮对的运动方程	234
9.2.2 自由轮对的稳定性	235
第10章 垂向运动	239
10.1 车辆悬架的基本原理	239
10.2 双轴车辆的随机振动	246
10.3 复杂车辆模型	249
10.4 磁悬浮列车	253
附录 多变量系统的最优控制	255
A.1 数学模型	255
A.2 控制任务的制定和结构问题	255
A.3 控制器的结构和特性	256
A.4 控制器设计	257
A.4.1 通过极点配置法设计控制器	258
A.4.2 基于二次型积分准则的最优控制器	258
A.4.3 极点和加权矩阵的选择	259
A.5 观测器的结构和特性	260

A.6 观测器设计	261
A.6.1 极点配置观测器设计	262
A.6.2 基于二次型积分准则的最优观测器	262
A.7 (最优)受控多变量系统的结构	263
关键字	265
中文—英文	265
英文—中文	268
参考文献	271



问题及其求解目录

Wenti Jiqi Qiujie Mulu

问题 2.1	汽车的纵向运动	13
问题 2.2	轨道车辆轮对的旋转矩阵	18
问题 2.3	刚体角速度	20
问题 2.4	轨道车辆轮对角速度	21
问题 2.5	转弯时的相对运动	23
问题 2.6	圆柱体的滚动	28
问题 2.7	轨道车辆轮对的蛇行运动	30
问题 2.8	轨道车辆轮对的惯量张量	37
问题 2.9	轨道车辆轮对的运动方程	41
问题 2.10	磁悬浮 (maglev) 列车上的惯性力	46
问题 2.11	Lagrange 运动方程在差速器上的应用	51
问题 2.12	汽车的垂直和俯仰振动的运动方程	56
问题 2.13	牵引挂车的运动方程	65
问题 2.14	Neweul 软件在 10 自由度车辆模型中的应用	72
问题 3.1	钢板弹簧的数学模型	86
问题 3.2	圆锥形车轮的滑移	104
问题 3.3	车轮-铁轨接触的接触面积和接触力	110
问题 3.4	考虑近似饱和的接触力	115
问题 3.5	轨道车辆轮对的接触力和线性运动方程	118
问题 3.6	道路车辆的接触力分析	136
问题 3.7	牵引挂车的接触力及其线性运动方程	141
问题 4.1	双跨梁模态分析	154
问题 4.2	白噪声和有色噪声	168
问题 5.1	主动控制汽车垂向运动的状态方程	181
问题 6.1	二阶系统的稳定性	186

问题 7.1	轨道车辆轮对蛇行运动的稳定性	203
问题 7.2	不平衡激励引起的车轮振动	204
问题 7.3	单个车轮的随机振动	207
问题 7.4	自激振动的谐波线性化	209
问题 7.5	受迫振动的谐波线性化问题	210
问题 8.1	车辆车轮的控制过程	216
问题 8.2	汽车的加速度	222
问题 9.1	路面车辆的行驶稳定性	233
问题 9.2	轨道车辆轮对的稳定性	237