



江苏省金陵科技著作出版基金

汽车操纵动力学原理

QICHE CAOZONG DONGLIXUE YUANLI

郭孔辉 著

凤凰出版传媒集团
江苏科学技术出版社

汽车操纵动力学原理

QICHE CAOZONG DONGLIXUE YUANLI

郭孔辉 著

凤凰出版传媒集团
江苏科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

汽车操纵动力学原理 / 郭孔辉著. —南京: 江苏科学技术出版社, 2011. 2

ISBN 978-7-5345-6994-4

I. 汽… II. 郭… III. 汽车—操纵性—动力学 IV. U461.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 205458 号

汽车操纵动力学原理

著 者 郭孔辉
责任编辑 仲 敏
特邀编辑 杨昌明
责任校对 郝慧华
责任监制 曹叶平

出版发行 江苏科学技术出版社(南京市湖南路1号A楼, 邮编: 210009)
网 址 <http://www.pspress.cn>
集团地址 凤凰出版传媒集团(南京市湖南路1号A楼, 邮编: 210009)
集团网址 凤凰出版传媒网 <http://www.ppm.cn>
经 销 江苏省新华发行集团有限公司
照 排 南京紫藤制版印务中心
印 刷 江苏凤凰扬州鑫华印刷有限公司

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 27.25
字 数 550 000
版 次 2011年2月第1版
印 次 2011年2月第1次印刷

标准书号 ISBN 978-7-5345-6994-4
定 价 80.00 元

图书如有印装质量问题, 可随时向我社出版科调换。

致读者

社会主义的根本任务是发展生产力,而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代,科学技术的进步已成为经济发展、社会进步和国家富强的决定因素,也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步、推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策,进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科教兴省”的决定,江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、江苏省委宣传部、江苏省科学技术厅(原江苏省科学技术委员会)、江苏省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下,经江苏省人民政府批准,由江苏省科学技术厅、凤凰出版传媒集团(原江苏出版总社)和江苏科学技术出版社共同筹集,于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”,用于资助自然科学范围内符合条件的优秀科技著作的出版。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的持续动作,能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件,并通过出版工作这一平台,落实“科教兴省”战略,充分发挥科学技术作为第一生产力的作用,为建设更高水平的全面小康社会、为江苏的“两个率先”宏伟目标早日实现,促进科技出版事业的发展,促进经济社会的进步与繁荣作出贡献。建立出版基金是社会主义出版工作在改革发展中新的发展机制和新的模式,期待得到各方面的热情扶持,更希望通过多种途径不断扩大。我们也将实践中不断总结经验,使基金工作逐步完善,让更多优秀科技著作的出版能得到基金的支持和帮助。

这批获得江苏省金陵科技著作出版基金资助的科技著作,还得到了参加项目评审工作的专家、学者的大力支持。对他们的辛勤工作,在此一并表示衷心感谢!

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

增订版前言

本书第一版初稿完成于1980年10月,书名为《汽车操纵稳定性》。书的内容主要反映了在1972~1980年间作者及其研究组的研究工作,这一时期的大部分工作属于试验方法与评价方法的研究,在理论与仿真研究方面,主要限于等速汽车的线性操纵运动,并限于汽车系统的开环特性研究。虽然在稳态响应特性方面已做了一些非线性仿真研究,但由于只限于已有的轮胎侧偏特性模型(主要采用 Fiala——桥石模型,并在大的无量纲侧偏角下加以一定的合理化修正^[40])。未能开展轮胎特性的试验研究,且轮胎侧偏刚度参数是靠整车的稳态转向特性试验测得的(前轮侧偏刚度中包含了转向系弹性的影响)^[41],因而在非线性响应的研究方面受到较大的限制。

在第一版初稿完成之后的数年中,作者及其领导的研究组主要在以下三个方面取得了重要的进展(这些研究工作构成了本书修订扩充的基础)。

1. 1983年底,以作者为主设计的轮胎特性试验台投入使用,在此设备上做了大量的轮胎试验研究工作^[33]。在此基础上,提出一种适合于载荷与侧偏角大范围变化的轮胎侧偏特性半经验模型^{[34][41]}。在轮胎力学特性理论研究方面也取得进展,导出了适用于任意载荷分布,包括胎体弹性变形的轮胎侧偏及侧偏与纵滑联合工况下的理论模型及一种便于进行汽车转向、制动与驱动的动态仿真“统一模型”。这些研究结果至今还只作为作者的内部报告,尚未正式发表,本书第三章将予以发表。

2. 1981年以后,作者一直在进行驾驶员行为模型及驾驶员—汽车闭环系统的仿真研究,部分初期研究工作已经发表^{[57][58][59]},其余的主要研究结果将在本书的第十三章中发表。

3. 1986年长春汽车研究所开始了“汽车转弯制动稳定性仿真研究”课题。这一课题是由作者与刘蕴博工程师共同负责完成的,其主要研究结果在此初次发表,构成本书的第十二章。

与前一版相比,本版保留了原书的大部分内容,但篇幅大有增加,对某些章节,也作了重要增改。如第一章做了文字和框图的修改;第二章前八节做了量纲、术语和印刷错误的修改,还新增了九、十两节;第三章除了保留分量很小的前三节外,其余都是新增的内容,且绝大部分是未曾正式发表的研究结果;第四、五、六、八、九、十各章虽保留了原版的内容,但也做了一些名词、量纲与印刷错误的修改;第七章增加了第四节,其内容是作者在1983年写的一份内部报告;第十一章做了全面的修改,这是因为采用我们所提出的更精确的轮胎模型所致;第十二、十三两章是全新的内容,反映了我们最近的研究工作。

另外,一些有关的研究或试验结果,不便于纳入本书的正文,故作为附录A、B、C、D、E,放在本书的后面。对计量单位与名词术语,全书亦按现行的有关标准作了更改。

本书与其第一版一样,基本上是作者及其研究组长期研究工作的总结。考虑到内容和篇幅都有显著的变化,故改用现在的书名。

这本书的增订稿是在仓促的情况之下完成的,会有许多疏漏、错误与不足之处,希望得到同行与读者的批评指正。

在本书的撰写过程中得到许多同事的帮助,第十二章由作者的助手与合作者刘蕴博工程师执笔,并整理了附录 D 中所有的数据图表;作者的研究生邱志良、张晓冬和黄凯,为本书做了大量的整理、校对和重新计算工作;管欣博士研究生(他在闭环系统研究方面做了许多工作)和时大春助理工程师,为第十三章做大量的计算工作。在此一并表示衷心的感谢。

第三版前言

本书的撰写、增订、补充工作经历了一年 30 年的时间。

第一版的书名定为《汽车操纵稳定性》，于 1983 年出版，篇幅较少，共 319 页。第二版（增订版）于 1991 年出版，篇幅倍增，书名改为《汽车操纵动力学》，印刷数量有限（只 2500 册），常有想要的读者买不到书。

近些年，由于我国汽车工业的迅速发展，要求再版此书的呼声较高。在江苏科学技术出版社的积极推动下，终于计划在增订版的基础上稍作补充和修改再次印刷。由于前版至今历时长久，尽管拟新增内容不算多，但全书需重新制图排版，工作量浩大；加之作者已年高体衰，又事务繁杂，经常出差，实有力不从心之感。此新版的编校工作多亏我的学生卢荡、刘涛等的辛苦努力，方得以完成；作者在此谨向为此书出版做出重要贡献的江苏科学技术出版社和各位编校同事表示衷心感谢！

此书的一个显著特点是围绕我国汽车工业发展中出现的汽车操纵稳定性问题和研究成果而写的，其中主要内容都是作者及其团队成员研究工作的结晶。

我国的汽车工业始于 1953 年在前苏联援助下第一汽车制造厂建立。不久中苏关系破裂，新生共和国又面临列强的经济封锁，计划经济条件下的汽车工业在自主发展中遇到许多困难与问题。其中包括在自主开发各种汽车（特别是乘用车）中遇到许多操纵稳定性问题。红旗轿车的“高速发飘”，北京吉普车和上海轻型车的“侧滑甩尾”，许多商用汽车的“转向沉重”“摇头”“操纵路感不良”……这些问题迫使有关工程技术人员去研究解决。本书的内容主要就是围绕这些问题研究的总结。

研究中首先遇到的重要问题，是汽车操纵稳定性的评价（特别是试验评价）问题。这是一个十分复杂而重要的问题，尽管这一问题在国际上也算是尚未彻底解决的难题，本书还是花了相当多的精力，力图在解决实际问题的同时，能对试验评价与理论评价方法做些深入的工作。本书的第二章共有 9 节讨论了汽车操纵稳定性的评价问题，并且还都只限于“开环评价”；而更精确的“闭环评价”，则有赖于驾驶员行为建模和人车闭环系统的研究。附录 A 是作者牵头组织制订的国家推荐标准（GB/T13047—1991），反映了我们对汽车操纵稳定性评价的认识和初步经验，它需要在积累更多经验的基础上加以不断补充与修订。

在操纵性评价领域，至今各著名汽车生产集团仍主要依靠评价师的主观评价。作者一直希望在客观评价方面能做一些努力，并曾利用汽车动态模拟国家重点实验室的驾驶模拟器做过一些客观评价与主观评价关系的研究，以期有朝一日能将客观评价指标直接应用于汽车操纵性的优化设计。参考文献[43]是这方面的一次有意思的尝试，虽只限于小侧向加速度操纵运动，其结果似是令人鼓舞的。

研究中遇到的第二个重要问题是轮胎特性理论与试验建模问题，因为汽车的运动行为几

乎都是地面与轮胎的作用力引起的,因此轮胎建模的精度及对各种复杂工况的适用性和未试工况的预测能力就成为操纵性仿真分析与优化设计的关键。本书的第三章主要是作者及其团队在 20 世纪 90 年代之前的研究成果。自从 1992 年本书的增订版问世之后,作者的团队在轮胎建模研究方面做了大量新的工作,限于篇幅和工作量的关系都未能收入第三版的内容之中。为弥补这一不足,将这部分工作的目录收在本书参考文献的最后,以便有兴趣的读者参考。

本书的第三个主要内容是汽车的有关系统和整车的建模与动力学仿真研究。由于当时计算机条件的限制,曾经在建模和编程上花费了很多的精力(第四~十二章)。如今由于计算机硬件与商业软件的发展,这部分工作变得方便了许多,但其中所描述的建模方法与概念,对读者还是有意义的。

本书的第四个主要内容是驾驶员行为建模与人—车闭环系统的动力学仿真与评价(第十三章)。因为汽车的操纵性能的好坏主要是由驾驶员来评价的,而汽车的性能又必须适应驾驶员的操纵规律,因此,必须对驾驶员行为的建模与人—车闭环系统动力学仿真与评价进行研究。这是关于汽车操纵性研究的新的重要领域,值得研究的问题很多,在增订版中的篇幅已经不少,本书第三版在原有内容的基础上又补充了一些近年来的新进展(第十八节)。当然,这些结果仍是初步的,希望今后通过大家的努力会有更成熟的成果。

由于种种原因(包括作者的精力和水平),相信书中的错误仍会不少,衷心希望得到有关专家与读者的批评指正。

作者
2011 年元月

目 录

第一章 概 述	1
第一节 汽车操纵稳定性问题的提出	1
第二节 汽车是一个反馈系统	1
第三节 汽车操纵动力学系统	4
第四节 操纵稳定性的定义	4
第二章 汽车操纵稳定性评价	5
第一节 评价的基本概念	5
一、指令反应评价与扰动反应评价	5
二、力输入反应与角输入反应	5
三、不同“工作点”下的评价	5
四、线性区与非线性区	6
五、稳态评价与动态评价	6
六、“开环评价”与“闭环评价”	6
第二节 常见的试验评价方法	7
一、角阶跃试验	7
二、角脉冲试验	8
三、正弦角输入试验	9
四、“回正性”试验	9
五、“撒手稳定性”试验	10
六、“蛇行”穿杆试验	11
七、“移线”试验	12
八、“8”字形行驶试验	12
九、稳态圆周试验	13
十、路扰反应试验	14
十一、风扰反应试验	15
第三节 各种试验评价之间的联系	15
一、阶跃输入反应与其他输入反应的关系——“杜阿密积分”的推广	15
二、脉冲输入反应与其他输入反应的关系	16
三、由斜阶跃反应推求等速输入反应与理想阶跃反应	18
四、起跃时间的推换	19
五、叠加推断的实例	19

六、开环特性与闭环特性的关系	21
第四节 频率特性分析方法	21
一、频率特性与任意输入反应	21
二、由脉冲试验求系统频率特性	22
三、提高分析精度问题	23
四、阶跃试验的频率特性分析	26
第五节 求系统近似传递函数的一种方法	26
一、稳态增益 G_0 的求法	26
二、 T_2 与 T_1 的求法	27
三、 τ_1 的求法	28
第六节 动态反应误差分析	29
一、操纵误差的时域分析	30
二、操纵误差的频域分析	34
第七节 在较小的场地上提高试验评价车速的方法	37
第八节 高速不足转向性的测定方法	40
第九节 识别汽车方向控制特性的能量相平面表示方法	42
一、能量相平面	42
二、能量相平面上的车轮侧偏角	43
三、能量相平面上直角坐标与极坐标的意义	44
四、能量相平面的一般特征	44
五、相平面轨迹的一些特例	48
六、不同输入响应的能量相平面	49
七、小结	52
第十节 汽车侧偏角瞬变过程的间接测定法	52
一、按最小总方差优化数据方法	54
二、“非零终态”的一种处理方法	55
第三章 滚动轮胎的静力学特性	58
第一节 作用在轮胎上的力和力矩	58
第二节 侧偏角与侧向力特性	59
第三节 侧偏角与回正力矩特性	60
第四节 轮胎侧偏特性的简化理论模型	60
一、不同载荷分布下侧偏特性的一般表达式	61
二、两种简单对称分布载荷下的侧偏特性	64
三、几种非对称分布载荷下的侧偏特性	68
四、小结	73
第五节 轮胎侧偏特性的半经验模型	74
一、侧向力半经验模型	76
二、回正力矩半经验模型	80
三、关于参数拟合方法	83

第六节	侧倾侧偏与侧倾推力	84
第七节	纵向力对侧偏角影响的粗略概念——“摩擦圆”概念	85
第八节	轮胎侧偏角对滚动阻力与驱动力的影响	85
第九节	轮胎侧偏特性的一般理论模型	86
一、	小侧偏角下的侧向力与回正力矩	87
二、	大侧偏角下的侧向力与回正力矩	89
三、	胎体弹性对侧向力特性的影响	92
四、	胎体弹性对回正力矩的影响	93
五、	结论与应用	95
第十节	轮胎纵滑与侧滑联合工况下的简化理论模型与半经验模型 ——“统一模型”	97
一、	简化理论模型与无滑移时的力与力矩	97
二、	在存在滑移区的一般状态下的力与力矩	100
三、	在试验简化中的应用及计算与试验的初步比较	102
四、	在小侧偏条件下纵向力对侧偏刚度的影响	105
五、	小结	107
第四章	悬架系的静力学特性	108
第一节	车身的侧倾和纵倾	108
第二节	车轮负荷的确定	113
一、	在侧向力作用下车轮的负荷转移	113
二、	在纵向力作用下车轮的负荷转移	113
三、	计入空气作用力的各轮负荷的确定	114
第三节	独立悬架的举升效应和车轮侧倾	114
第四节	侧倾转向	115
第五节	悬架导向系的弹性——纵向力转向与侧向力转向	117
第五章	转向系的静力学特性	119
第一节	转向系的弹性与侧向力转向	119
第二节	转向系的综合刚度	120
第三节	转向——悬架杆系干涉引起的附加转角	121
第四节	前轮定位参数——前轮的角反馈与力反馈	122
一、	主销后倾角与前移量	122
二、	主销内倾角与内移量	123
三、	车轮外倾与前束	126
四、	汽车运动中车轮定位参数的变化	126
第五节	转向梯形	128
第六节	转向力与“路感”	129
第七节	转向系的间隙	130
第六章	空气力学特性	131
第一节	空气阻力	131

第二节	侧向力	132
第三节	升力	133
第四节	横摆力矩	133
第五节	侧倾力矩	134
第六节	纵倾力矩	134
第七章	简化模型的转向运动动力学分析	135
第一节	二自由度角输入运动	135
一、	运动模型与坐标	135
二、	微分方程、传递函数与频率特性	136
三、	角输入运动特征	138
第二节	二自由度力输入运动	143
一、	微分方程、传递函数和频率特性	143
二、	力输入运动的特征	144
第三节	考虑转向系转动惯量的三自由度力输入运动	147
第四节	汽车高速发飘及转向系刚度特性对高速方向控制的影响	150
一、	在转向游隙内的方向飘摆	150
二、	计入转向系刚度的角输入运动分析	152
三、	小结	157
第八章	最小总方差设计	158
第一节	计算总方差的一般方法	158
第二节	二自由度角输入运动的总方差计算	160
第三节	最小总方差与稳定性因数的选择	161
第四节	其他设计参数对总方差的影响	165
一、	轮胎侧偏刚性	166
二、	轴距的影响	166
三、	质量分配系数 $\eta = \frac{a^2}{ab}$ 的影响	168
第五节	力输入运动的总方差	168
第六节	小结	170
第九章	考虑侧倾自由度的转向盘角输入操纵运动	172
第一节	线性三自由度角输入操纵运动的数学模型	172
一、	符号说明	172
二、	运动模型与坐标取法	173
三、	运动微分方程	175
四、	数字仿真内容	176
第二节	轮胎特性的线性化	179
一、	动态数字仿真与轮胎特性的线性化	179
二、	稳态数字仿真与轮胎特性的线性化	180
第三节	“红旗”CA770型汽车角输入反应的仿真与试验验证	181

第四节	各种结构参数对操纵稳定性的影响	187
一、	轮胎侧偏刚性	187
二、	不足转向值	187
三、	侧倾转向的影响	189
四、	重心前后位置的影响	191
五、	轴距的影响	192
六、	转动惯量 I_z 的影响	193
七、	侧倾阻力系数 $D=D_f+D_r$ 的影响	194
第五节	侧向力反应特征和动态侧滑问题的初步讨论	194
第十章	考虑侧倾自由度的转向盘力输入操纵运动	197
第一节	线性四自由度力输入运动的数学模型	197
一、	符号说明	197
二、	运动模型与坐标取法	198
三、	运动微分方程	198
四、	轮胎特性的线性化	200
五、	关于转向系的当量线性阻尼	201
六、	数字仿真内容	201
第二节	“红旗”CA770 汽车力阶跃输入反应的仿真与弯道撒手试验的比较	202
第三节	若干结构参数对力输入操纵运动的影响	210
一、	轮胎侧偏刚性和不足转向性的影响	211
二、	转向盘惯量的影响	213
三、	转向系传动比的影响	213
四、	主销后倾拖距和轮胎拖距的影响	213
五、	车身转动惯量的影响	215
六、	轴距的影响	216
七、	侧倾转向系数的影响	216
八、	侧倾角刚性的影响	218
九、	转向系阻力系数的影响	218
第四节	四自由度力输入反应运动特征的仿真	219
一、	转向系统阻尼的作用	220
二、	轮胎侧偏刚性的影响	221
三、	转向盘转动惯量和传动比的影响	221
四、	主销后倾拖距和轮胎拖距的影响	222
五、	车身转动惯量的影响	223
六、	轴距的影响	223
七、	侧倾转向系数的影响	224
八、	侧倾角刚性的影响	224
第十一章	稳态转向特性仿真	226
第一节	稳态转向特性的意义	226

第二节	QYHS792A 稳态转向特性仿真数学模型	228
一、	汽车转弯时的基本几何关系	234
二、	附加转向角	235
三、	轮胎侧偏角 $BT(i,j)$ 、有效侧偏角 $BTE(i,j)$ 与综合侧偏角 $DDT(i)$	237
四、	各轮的纵向力及其简化	237
五、	汽车稳态转弯时的力平衡	238
六、	车身侧倾角 XE	240
七、	各轮的垂直负荷	240
八、	轮胎特性表达式	242
九、	主销倾角回正效应与各轮总回正力矩 $SAT(i,j)$	243
十、	独立悬架车轮外倾 $CB(i,j)$ 与举升量 $DZ(i)$	243
第三节	QYHS792A 程序的功能特点与应用范围	244
第四节	仿真效果	246
一、	CA10C 汽车稳态转向特性的仿真与试验	247
二、	稳态转向时某些参数的变化	247
三、	上下坡转向特性的仿真	249
四、	前驱动时稳态转向特性的变化	249
五、	高摩擦差速器对稳态转向特性的影响	249
第五节	稳态转向特性的控制	250
一、	轮胎侧偏刚度——载荷特性对汽车稳态转向特性的影响	250
二、	轴荷分配对转向特性的影响	252
三、	轮胎载荷能力的选择对载货车满载转向特性的影响	252
四、	转向系刚度、轮胎拖距与主销后倾对保证汽车具有适当不足转向度的重要性	253
五、	悬架系运动学特征对不同载荷下载货汽车转向特性的影响	253
六、	侧向载荷转移的控制及其对转向特性的影响	255
七、	滑路上的转向特性	259
第十二章	在转向驱动与制动输入下汽车动态响应的仿真研究	262
第一节	仿真计算程序的功能与特点	262
第二节	参数及变量符号的表示与说明	263
一、	标记符号	263
二、	汽车运动基本状态变量	263
三、	输入变量	264
四、	主要中间计算参数	267
五、	主要中间变量	267
六、	物理常数	269
第三节	汽车力学模型及运动方程式	269
第四节	汽车运动学关系及有关参数计算	274
一、	汽车基本参数计算	274

二、空气六分力计算	274
三、汽车悬挂及转向系统运动学关系	275
四、轮胎有效侧偏角的计算	277
五、轮胎纵滑率、侧滑率及滑移速度的计算	278
六、通过悬挂作用于悬挂质量的外力计算	278
七、悬挂质量质心到侧倾轴垂直高度的计算	279
八、车轮垂直负荷的计算	279
第五节 轮胎力及汽车外力的计算	279
一、轮胎力学模型(第3章第10节)的应用	279
二、前轮绕主销总回正力矩的计算	280
三、前轮绕主销干摩擦力矩的计算	281
四、汽车外合力的计算	281
第六节 汽车操纵仿真形式和仿真结果的输出功能	282
第七节 转弯制动仿真计算及试验验证	283
一、试验方法	284
二、仿真计算方法	284
三、评价方法	284
四、仿真结果与试验结果的比较	284
第八节 仿真计算程序的应用及典型仿真实例	286
一、直线制动稳定性仿真计算	286
二、转弯制动稳定性仿真计算	287
三、转弯驱动仿真计算	292
四、稳态转向特性仿真计算	292
五、滑路上汽车发动机制动甩尾现象的仿真计算	292
第十三章 驾驶员—汽车闭环操纵系统动力学仿真研究	295
第一节 驾驶员模型的理论基础与一个理想化系统的驾驶员模型	295
第二节 驾驶员反应滞后对闭环响应的影响	299
第三节 汽车动力学特性与驾驶员的动态校正	301
第四节 最优曲率控制(二阶预瞄)的一般理论与预测——跟随器控制理论	304
第五节 不同预瞄窗下的系统模型	308
第六节 双移线试验仿真与验证	309
第七节 不圆滑轨道的预瞄修正	312
第八节 宽道与单边约束道路下的预瞄修正	313
第九节 侧向加速度反馈校正策略	315
第十节 大角度路径下闭环操纵运动的仿真	317
第十一节 点斜预瞄策略——一种最优样条控制模型	319
第十二节 最优样条控制(三阶预瞄)的一般理论与“预瞄—跟随器”理论的关系	322
第十三节 高阶预瞄模型的二阶化	326
第十四节 多自由度汽车(控制对象)校正参数的确定	329

第十五节	非线性汽车(控制对象)校正参数的确定	332
第十六节	汽车开环特性的闭环评价问题	333
一、	$\frac{\ddot{y}}{\ddot{y}^*}(j\omega)$ 频域评价	334
二、	闭环系统跟随性的频域评价	336
三、	闭环系统综合频域评价	338
四、	非线性汽车的闭环综合评价	340
五、	闭环时域评价	340
第十七节	不同模型仿真结果与试验结果的比较	341
一、	微分校正的单点位置预瞄最优曲率模型	341
二、	试验结果	346
三、	MacAdam 最优预瞄控制模型	346
四、	加速度反馈的单点预瞄最优曲率模型	347
第十八节	预瞄优化人工神经网络驾驶员模型	349
第十九节	考虑车速变化影响的驾驶员模型	354
第二十节	任意路径下的驾驶员模型	356
附录 A	汽车操纵稳定性指标限值与评价方法(GB/T13047—1991)	360
附录 B	力矩中心	369
附录 C	汽车振动与载荷的统计分析及悬架系统参数的选择	381
附录 D	轮胎侧偏特性试验结果之例	397
附录 E	板簧变形运动学分析及其应用	408
参考文献		417

第一章 概述

第一节 汽车操纵稳定性问题的提出

汽车操纵稳定性的研究,是与车速的不断提高分不开的。早期的低速汽车,还谈不上操纵稳定性问题。最早提出操纵稳定性问题,是在具有较高车速的赛车上。后来,随着车速的不断提高,在轿车、大客车和载货汽车上也都不同程度地出现了类似问题。操纵稳定性不良的汽车,通常有如下的表现:

(1)“飘”。有时驾驶员并未发出转向指令,而汽车自己却不断改变行驶方向,使人感到飘浮。

(2)“贼”。有时汽车就像受惊的马,突然地忽东忽西,不听驾驶员操纵。

(3)“晃”。驾驶员给出稳定的转向指令,但汽车却左右摇摆,行驶方向难于稳定。这样的汽车在受到路面不平或突然阵风的扰动时,也会出现这种摇摆。

(4)“反应迟钝”。驾驶员转向指令虽已发出相当时间,但汽车还没有转向反应,或转向过程完成得过慢。

(5)“丧失路感”。正常汽车的转弯程度,会通过转向盘在驾驶员手上产生相应的感觉。有些操纵性能不好的汽车,特别是在车速较高时或转向较剧烈时会丧失这种感觉。这会增加驾驶员操纵困难或影响驾驶员做出正确的判断。

(6)“失去控制”。某些汽车在车速超过一个临界值之后或向心加速度超过一定值之后,驾驶员已经完全不能控制其行驶方向,驾驶员向左打转向盘而汽车却可能产生向右的转向。

上面只是列举了几种基本现象,都是属于感性认识,还不是科学的描述,也不是所有操纵稳定性不好的汽车都同时具有以上表现。

第二节 汽车是一个反馈系统

最初,人们设计汽车的转向系统所依据的原理如图 1-1 所示。

按照这种原理,汽车的转弯半径 R 与前轮转角 δ 及轴距 l 之间存在以下关系:

$$R = \frac{l}{\tan \delta} \quad (1-1)$$

式(1-1)说明:汽车的转弯半径 R 只与前轮转角 δ 有关,而与车速无关。然而,这种情况却无法解释高速行驶时汽车转弯半径与前轮转角(或转向盘转角)间的不一致的情况是怎样产