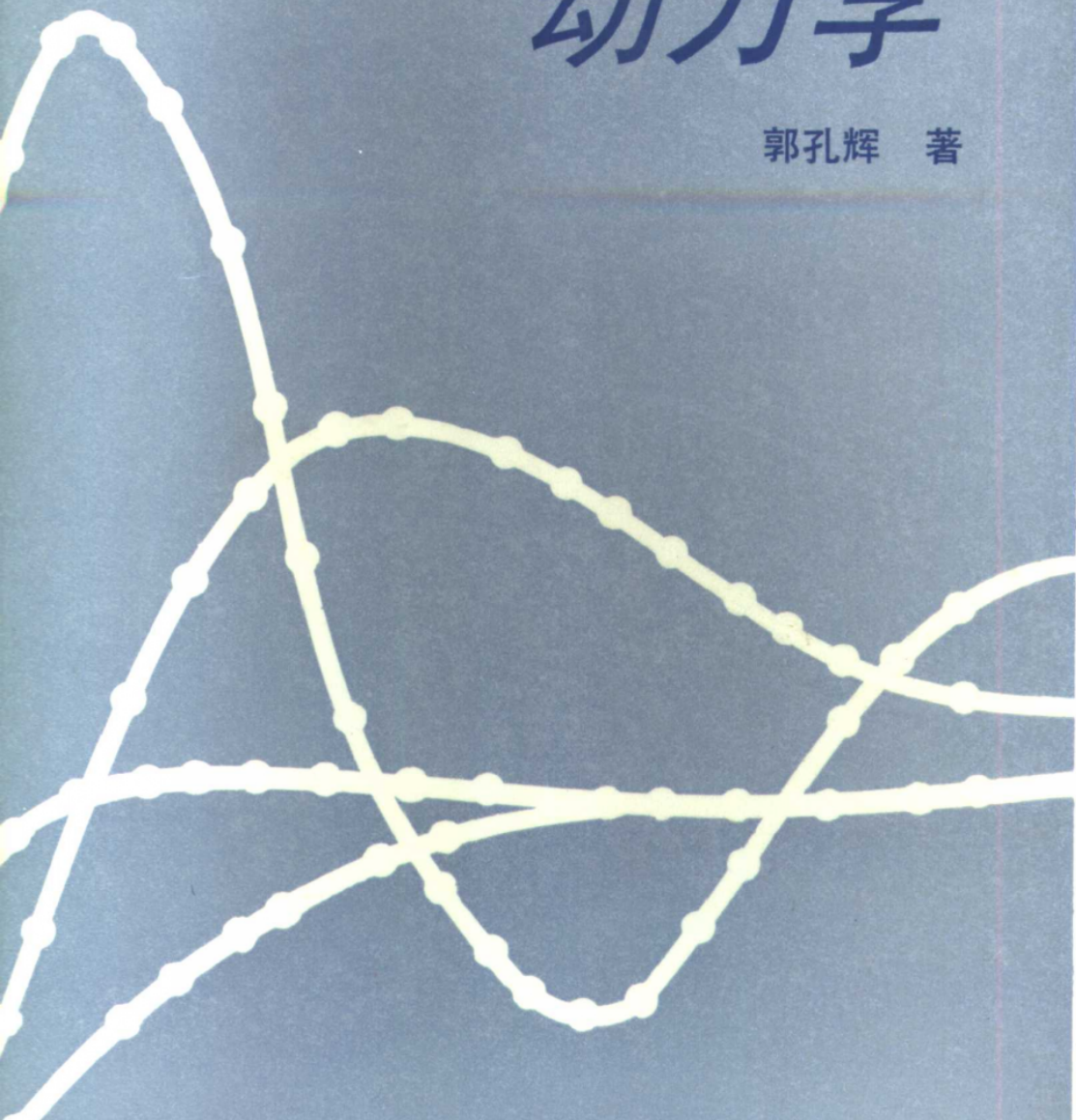


汽车操纵 动力学

郭孔辉 著



吉林科学技术出版社

汽车操纵动力学

郭孔辉 著

吉林科学技术出版社

汽车操纵动力学

郭孔辉 著

责任编辑：林先根 李 玫 史连友

封面设计：杨玉中

出版 吉林科学技术出版社 850×1168毫米32开本 21.75印张
发行 插页4 554 000字
1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷
印数：1—2 100册 定价：14.50元
印刷 长春新华印刷厂 ISBN 7-5384-0859-2/U·61

内 容 提 要

本书系统地介绍了汽车操纵性与稳定性的基本概念、评价理论、试验方法、轮胎的特性理论与实用模型以及汽车操纵运动的计算机仿真与性能预测，并讨论了各种设计参数对汽车操纵性能的影响。本书是作者一系列研究工作的总结，对从事汽车设计、试验、研究工作的工程技术人员有实际的重要参考价值。也可作为高等院校汽车专业的教学参考书。

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的研究，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特性试验研究工作^[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——汽车闭环操纵系统的仿真研究，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的仿真研究”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。

与第一版相比，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，也做了重要增改。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做了更改。

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。

在本稿的撰写过程中得到许多同事的帮助。本书的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。

作者

目 录

第一章 概述.....	(1)
一、问题的由来.....	(1)
二、汽车是一个反馈系统.....	(2)
三、汽车操纵动力学系统.....	(6)
四、操纵稳定性的定义.....	(7)
第二章 汽车操纵稳定性的评价.....	(8)
一、评价的基本概念.....	(8)
(一) 指令反应评价与扰动反应评价.....	(8)
(二) 力输入反应与角输入反应	(8)
(三) 不同“工作点”下的评价	(9)
(四) 线性区与非线性区	(9)
(五) 稳态评价与动态评价	(10)
(六) “开环评价”与“闭环评价”	(11)
二、常见的试验评价方法.....	(11)
(一) 阶跃试验	(12)
(二) 角脉冲试验	(14)
(三) 正弦角输入试验	(14)
(四) “回正性”试验	(15)
(五) “撒手稳定性”试验	(16)
(六) “蛇行”穿杆试验	(18)
(七) “移线”试验.....	(19)
(八) “8”字形行驶试验	(19)
(九) 稳态圆周试验.....	(20)
(十) 路扰反应试验.....	(23)

(十一) 风扰反应试验	(24)
三、各种试验评价之间的联系	(24)
(一) 阶跃输入反应与其它输入反应的关系	
——“杜阿密积分”的推广	(25)
(二) 脉冲输入反应与其它输入反应的关系	(26)
(三) 由斜阶跃反应推求等速输入反应与理想阶跃反应	(29)
(四) 起跃时间的推换	(30)
(五) 叠加推断的实例	(32)
(六) 开环特性与闭环特性的关系	(34)
四、频率特性分析方法	(34)
(一) 频率特性与任意输入反应	(34)
(二) 由脉冲试验求系统频率特性	(36)
(三) 提高分析精度问题	(38)
(四) 阶跃试验的频率特性分析	(42)
五、求系统近似传递函数的一种方法	(42)
六、动态反应误差分析	(48)
(一) 操纵误差的时域分析	(48)
(二) 操纵误差的频域分析	(56)
七、在较小的场地上提高试验评价车速的方法	(61)
八、高速不足转向性的测定方法	(65)
九、识别汽车方向控制特性的能量	
相平面表示方法	(69)
(一) 能量相平面	(69)
(二) 能量相平面上的车轮侧偏角	(71)
(三) 能量相平面上直角坐标与极坐标的意义	(72)
(四) 能量相平面的一般特征	(74)
(五) 相平面轨迹的一些特例	(80)
(六) 不同输入响应的能量相平面	(83)
(七) 结论	(87)

十、汽车侧偏角瞬变过程的间接测定法·····	(87)
第三章 滚动轮胎的静力学特性·····	(96)
一、作用在轮胎上的力和力矩·····	(96)
二、侧偏角与侧向力特性·····	(98)
三、侧偏角与回正力矩特性·····	(100)
四、轮胎侧偏特性的简化理论模型·····	(101)
(一) 不同载荷分布下侧偏特性的一般表达式 ·····	(102)
(二) 两种简单对称分布载荷下的侧偏特性 ·····	(108)
(三) 几种非对称分布载荷下的侧偏特性 ·····	(113)
(四) 小结 ·····	(122)
五、轮胎侧偏特性的半经验模型·····	(123)
(一) 侧向力半经验模型 ·····	(126)
(二) 回正力矩半经验模型 ·····	(131)
(三) 关于参数拟合方法 ·····	(137)
(四) 数据实例 ·····	(138)
六、侧倾侧偏与侧倾推力·····	(140)
七、纵向力对侧偏角影响的粗略概念	
——“摩擦圆”概念·····	(142)
八、轮胎的侧偏角对滚动阻力与驱动力的影响·····	(143)
九、轮胎侧偏特性的一般理论模型·····	(145)
(一) 小侧偏角下的侧向力与回正力矩 ·····	(146)
(二) 大侧偏角下的侧向力与回正力矩 ·····	(149)
(三) 胎体弹性对侧向力特性的影响·····	(155)
(四) 胎体弹性对回正力矩的影响 ·····	(158)
(五) 结论与应用 ·····	(161)
十、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”·····	(164)
(一) 简化理论模型与无滑移时的力与力矩 ·····	(165)
(二) 在存在滑移区的一般状态下的力与力矩 ·····	(169)

(三) 在试验简化中的应用及计算与试验的初步比较·····	(174)
(四) 在小侧偏条件下纵向力对侧偏刚度的影响·····	(178)
(五) 小结·····	(182)
第四章 悬架系的静力学特性·····	(183)
一、车身的侧倾与纵倾·····	(183)
二、车轮负荷的确定·····	(190)
三、独立悬架的举升效应和车轮侧倾·····	(194)
四、侧倾转向·····	(195)
五、悬架导向系的弹性——纵向力转向与侧向力 转向·····	(198)
第五章 转向系的静力学特性·····	(202)
一、转向系的弹性与侧向力转向·····	(202)
二、转向系的综合刚度·····	(204)
三、转向——悬架杆系干涉引起的附加转角·····	(206)
四、前轮定位参数——前轮的角反馈与力反馈·····	(207)
五、转向梯形·····	(219)
六、转向力与“路感”·····	(221)
七、转向系的间隙·····	(222)
第六章 空气力学特性·····	(224)
一、空气阻力·····	(225)
二、侧向力·····	(227)
三、升力·····	(228)
四、横摆力矩·····	(228)
五、侧倾力矩·····	(229)
六、纵倾力矩·····	(230)
第七章 简化模型的转向运动动力学分析·····	(232)
一、二自由度角输入运动·····	(232)
二、二自由度力输入运动·····	(245)
三、考虑转向系转动惯量的三自由度力输入运动·····	(251)

四、汽车的高速发飘及转向系刚度特性	
对高速方向控制的影响	(257)
(一) 在转向游隙内的方向飘摆	(258)
(二) 计入转向系刚度的角输入运动分析	(262)
(三) 结语	(270)
第八章 最小总方差设计	(271)
一、计算总方差的一般方法	(273)
二、二自由度角输入运动的总方差计算	(277)
三、最小总方差与稳定性因数的选择	(279)
四、其它设计参数对总方差的影响	(284)
五、力输入运动的总方差	(289)
六、小结	(292)
第九章 考虑侧倾自由度的转向盘角输入操纵运动	(295)
一、线性三自由度角输入操纵运动的数学模型	(295)
二、轮胎特性的线性化	(306)
三、“红旗” CA770 型汽车角输入反应的仿真	
与试验验证	(309)
四、各种结构参数对操纵稳定性的影响	(318)
五、侧向力反应的特征和动态侧滑问题	
的初步讨论	(332)
第十章 考虑侧倾自由度的转向盘力输入操纵运动	(336)
一、线性四自由度力输入运动的数学模型	(337)
二、“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	(346)
三、若干结构参数对力输入操纵运动的影响	(360)
四、四自由度力输入反应运动特征的仿真	(374)
第十一章 稳态转向特性仿真	(385)
一、稳态转向特性的意义	(385)
二、QYHS792A 稳态转向特性仿真数学模型	(388)

三、QYHS792A 程序的功能特点与应用范围	(411)
四、仿真效果	(413)
五、稳态转向特性的控制	(422)
(一) 轮胎的侧偏刚度——载荷特性对汽车	
稳态转向特性的影响	(422)
(二) 轴荷分配对转向特性的影响	(425)
(三) 轮胎载荷能力的选择对载货汽车	
满载转向特性的影响	(427)
(四) 转向系刚度、轮胎拖距与主销后倾	
对汽车具有适当不足转向度的重要性	(428)
(五) 悬架系运动学特征对不同载下载货汽车	
转向特性的影响	(429)
(六) 侧向载荷转移的控制及其对转向特性的影响	(431)
(七) 滑路上的转向特性	(441)
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	(446)
一、仿真计算程序的功能与特点	(446)
二、参数及变量符号的表示与说明	(447)
三、汽车力学模型及运动方程式	(456)
四、汽车运动学关系及有关参数计算	(463)
五、轮胎力及汽车外力的计算	(473)
六、汽车操纵的仿真形式和仿真结果的输出功能	(477)
七、转弯制动仿真计算及试验验证	(479)
八、仿真计算程序的应用及典型仿真实例	(484)
第十三章 驾驶员——汽车闭环操纵系统动力学	
仿真研究	(499)
一、驾驶员模型的理论基础与一个理想化系统的	
驾驶员模型	(500)
二、驾驶员的反应滞后对闭环响应的影响	(506)

三、汽车的动力学特性与驾驶员的动态校正·····	(509)
四、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·····	(514)
五、不同预瞄窗下的系统模型·····	(520)
六、双移线试验仿真与验证·····	(522)
七、不圆滑轨道的预瞄修正·····	(526)
八、宽道与单边约束道路下的预瞄修正·····	(527)
九、侧向加速度反馈校正策略·····	(531)
十、大角度路径下闭环操纵运动的仿真·····	(534)
十一、点斜预瞄策略——一种最优样条控制模型·····	(537)
十二、最优样条控制 (三阶预瞄) 的一般理论	
与“预测跟随器”理论的关系·····	(541)
十三、高阶预瞄模型的二阶化·····	(549)
十四、多自由度汽车 (控制对象)	
校正参数的确定·····	(553)
十五、非线性汽车 (控制对象) 校正参数的确定·····	(557)
十六、汽车开环特性的闭环评价问题·····	(561)
十七、不同模型仿真结果与试验结果的比较·····	(575)
附录 A 汽车操纵稳定性指标限值与评价方法	
(国标GB/T13047-91) ·····	(589)
附录 B 力矩中心·····	(602)
附录 C 汽车振动与载荷的统计分析及	
悬挂系统参数的选择·····	(624)
附录 D 轮胎侧偏特性试验结果之例·····	(651)
附录 E 板簧变形运动学分析及其应用·····	(662)
参考文献·····	(677)

第一章 概 述

一、问题的由来

汽车操纵稳定性的研究，是与汽车车速的不断提 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程度地出现了类似的问题。操纵稳定性不好的汽车，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的方向，使人感到飘浮。

(2) “贼”。有时汽车就象受惊的马，突然地忽东忽西，不听驾驶员操纵。

(3) “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，或转向过程完成的过慢。

(4) “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。

(5) “丧失路感”。正常汽车的转弯的程度，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作出正确的判断。

(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，驾驶员向左打方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。

二、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

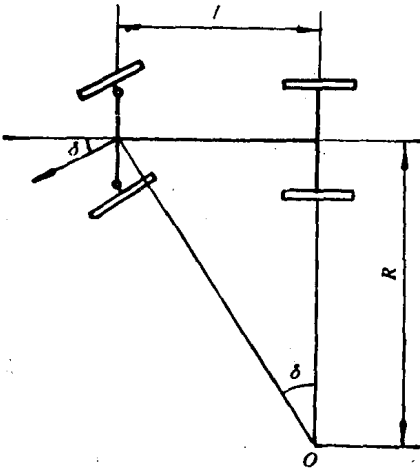


图 1-1

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

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

这种原理，至今仍是设计汽车转向系统的基本依据。但是，从这种原理得出汽车的转弯半径完全取决于前轮转角的结论。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生的。

1930年法国布劳海特 (Broulhiet) 发现了汽车轮胎侧偏现象,使人们的认识开始有了突破。所谓“侧偏”现象,就是指轮胎的前进方向并非永远沿着本身的旋转平面,而是与旋转平面成一角度,即所谓侧偏角。这种侧偏角 β 的大小与轮胎所受的侧向力有关。

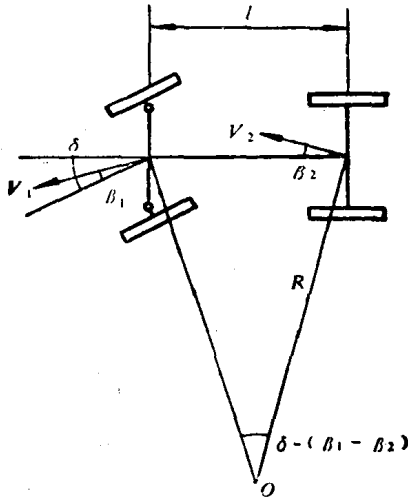


图 1-2

在侧偏角不大时,可有如下近似关系:

$$R = \frac{l}{\text{tg}[\delta - (\beta_1 - \beta_2)]} = \frac{l}{\delta - (\beta_1 - \beta_2)} \quad (1-2)$$

式中 β_1 ——前轮侧偏角;
 β_2 ——后轮侧偏角。

如果把前轮转角看成汽车系统的输入,并认为转弯半径 R 是系统的输出,在轮胎没有侧偏现象的情况下,可以把汽车看成图 1-3 那样的“开环”系统。这就是式 (1-1) 所表达的内容。

在有侧偏现象的情况下,原来 δ 的作用被 $\delta - (\beta_1 - \beta_2)$ 所代替,而 $\beta_1 - \beta_2$ 是向心加速度 $a_r = \frac{V^2}{R}$ 的函数,其方框图如图 1-4 所示。如果用一个比较环节由 δ 与 $(\beta_1 - \beta_2)$ 来产生“有效输入” $\delta - (\beta_1 - \beta_2)$,并以图 1-3 系统作为“主路”,以图 1-4 系统作为

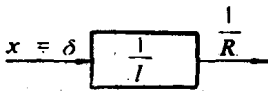


图 1-3

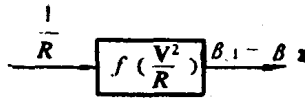


图 1-4

“反馈回路”，那么就可以形成一个如图 1-5 所示的“闭环”系统。这个“闭环系统”就是式 (1-2) 所表示的内容。因此，包含

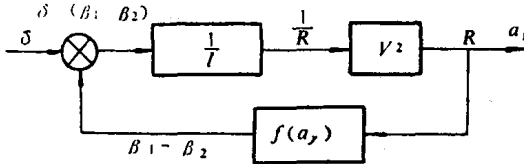


图 1-5

“侧偏现象”的汽车转向运动系统，实质上是一个以无侧偏转向为基本系统并加入一个侧偏角反馈回路的闭环系统，在 $\frac{d(\beta_1 - \beta_2)}{da_r}$

> 0 时， a_r 增加使有效输入 $x = \delta - (\beta_1 - \beta_2)$ 减小，这是“负反馈”。汽车术语中称这种负反馈特性为“不足转向”。具有“不足转向”（负反馈）特性的汽车，如果前轮转角 δ 一定，则在极低速时，向心加速度与轮胎的侧向力均接近于零，因而 $\beta_1 = \beta_2 \approx 0$ ，

$R = \frac{l}{\text{tg} \delta}$ 。当车速 V 逐渐增高 (δ 不变) 时，向心加速度 a_r

$= \frac{V^2}{R}$ 和轮胎所受的侧向力随之增大，从而使 $\beta_1 - \beta_2$ 增大，而有效的“前轮转角” $\delta - (\beta_1 - \beta_2)$ 减小，因此抑制了转弯程度。这样，“不足转向”汽车，在 δ 不变时， $\beta_1 - \beta_2$ 将随车速（因而也是向心加速度）的增大而增大，转弯半径 R 也将随车速的增大而增大。

在 $\frac{d(\beta_1 - \beta_2)}{da_r} < 0$ 时，有效输入 $x = \delta - (\beta_1 - \beta_2) > \delta$ ，这是“正反馈”。汽车术语中称这种特性为“过度转向”。具有“过度转向”（正反馈）特性的汽车，如果前轮转角一定，则有效输入