

丁能根 编著



高等学校研究生教材

汽车主动控制系统中 参数估计的方法与应用



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

高等学校研究生教材

汽车主动控制系统中 参数估计的方法与应用

丁能根 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍用于智能汽车控制系统、底盘主动控制系统和汽车安全预警装置设计的状态和参数估计理论、方法及应用。在状态观测器和参数估计器的理论和方法方面,主要介绍卡尔曼滤波、最小二乘法、动态单纯形法、龙贝格观测器、多模型切换算法、滑模观测器以及用于车辆质心侧偏角估计的运动学方法、基于试验知识的车速与路面附着系数估计方法及集成算法。根据上述汽车控制系统与装置的算法设计需要和常用的传感器配置特点,研究了车速、汽车质心侧偏角、汽车横摆角速度、汽车质心高度、制动器轮缸压力、路面附着系数、道路横坡角、侧向风等关键状态参数的估计方法和应用。此外,还介绍了用于观测器或估计器设计的车辆、轮胎和车轮的动力学模型以及制动系统压力调节装置的压力模型。

本书可供智能汽车控制系统、底盘主动控制系统和汽车安全预警装置的设计及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车主动控制系统中参数估计的方法与应用 / 丁能根编著. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2013.9

ISBN 978-7-5124-1248-4

I. ①汽… II. ①丁… III. ①汽车—自动控制系统—参数估计—研究 IV. ①U463.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 208826 号

版权所有,侵权必究。

汽车主动控制系统中参数估计的方法与应用

丁能根 编著

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:9.75 字数:250 千字

2013 年 9 月第 1 版 2013 年 9 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1248-4 定价:24.00 元

前 言

由于技术上的限制或出于成本的考虑,车速、汽车质心侧偏角和路面附着系数等关键状态参数在汽车电子控制系统中一般并不直接测量,而是根据控制需要进行估计。基于量产汽车上常用传感器配置测得易获取变量,如轮速、汽车侧向加速度和汽车横摆角速度等,再进行状态参数估计就成为汽车电子控制技术中被国内外广泛研究的一个重要领域。车辆状态参数估计是智能化信息技术在汽车设计和开发中的应用,属于机械系统动力学、信息技术、自动控制、建模与仿真以及系统辨识等多学科交叉领域。

在智能汽车控制系统、底盘主动控制系统和汽车安全预警装置的研究与开发实践中,需要估计的状态和参数多种多样,状态观测与参数估计的方法也千差万别。近 20 年来,随着汽车底盘主动控制系统的快速发展,国内外学者和工程技术人员从理论与工程实践两方面对车速、汽车质心侧偏角、质心高度、车轮垂直载荷、路面附着系数和道路横坡等关键状态和参数的估计开展了深入研究,研究成果也大量发表在国内外期刊上,但尚未见到系统介绍此方面知识的专门书籍。

本书系统地介绍了用于智能汽车控制系统、底盘主动控制系统和汽车安全预警装置的状态和参数估计的理论与方法,并结合 ABS、TCS、ESC 以及大客车安全预警系统开发实践介绍了这些理论、方法及应用;还介绍了在汽车电子控制系统的状态和参数估计的研究中,动态单纯形算法和多模型切换算法的应用;另外,还介绍了参数估计的若干种集成算法,为提高参数估计精度和估计算法对汽车复杂工况的适应性提供了有效手段。

在具有自主知识产权的汽车电子控制系统产品开发和产业化过程中,国内的研发人员付出了艰辛的努力。但由于技术积累不足、研发投入少以及汽车电子控制系统自主品牌零部件的认同度不高等原因,我们还难以与国外同类产品抗衡。核心技术的自主研发是建设强大汽车工业的必由之路。希望本书能起到抛砖引玉的作用。如果能对国内汽车电子控制系统的设计提供些许帮助,作者将感到十分欣慰。

由于水平有限,本书谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。欢迎就本书问题与作者通过 E-mail 联系:dingng@buaa.edu.cn。

作 者

2013 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 模型、参数与状态估计	1
1.1.1 模 型	1
1.1.2 参数与状态估计	2
1.2 参数估计的目的和应用	3
1.2.1 参数估计的一般目的和应用	3
1.2.2 参数估计在汽车主动控制与安全预警装置设计中的应用	4
1.3 主要估计参数、方法与发展趋势	6
1.3.1 主要估计参数	6
1.3.2 参数估计的主要方法	7
1.3.3 对参数估计方法的评价	9
1.3.4 发展趋势	10
第 2 章 用于参数估计的车辆及其部件模型	11
2.1 用于参数估计的轮胎模型	11
2.1.1 轮胎的纵向滑动与侧偏	11
2.1.2 Dugoff 轮胎模型	14
2.1.3 线性轮胎模型	17
2.1.4 Burckhardt 轮胎纵向力模型	18
2.1.5 LuGre 轮胎纵向力模型	19
2.2 用于参数估计的车辆模型	21
2.2.1 单轨车辆模型	21
2.2.2 2-DOF 四轮车辆模型	23
2.2.3 车辆侧倾平面模型	24
2.3 车轮旋转运动模型	27
第 3 章 卡尔曼滤波	28
3.1 卡尔曼滤波概述	28
3.1.1 线性系统	28
3.1.2 卡尔曼滤波理论和算法	29
3.1.3 卡尔曼滤波的实际应用和扩展	30
3.2 卡尔曼滤波在汽车主动控制中的应用	30
3.2.1 车轮角加速度估计	31
3.2.2 卡尔曼滤波在车辆 ESC 系统数据处理中的应用	32
3.2.3 一阶卡尔曼滤波	35
第 4 章 最小二乘法	38
4.1 普通最小二乘法	38

4.1.1	直线拟合	38
4.1.2	最小二乘的矩阵方法	40
4.1.3	最小二乘估计的统计特性	41
4.2	基于最小二乘法的路面附着系数和制动器轮缸压力的估计	42
4.2.1	轮胎-路面摩擦估计的意义及其估计方法简介	42
4.2.2	ABS 制动器压力模型和车轮运动模型	44
4.2.3	轮胎纵向力模型	45
4.2.4	基于模型的轮速计算	46
4.2.5	路面摩擦与制动压力的估计和算例	48
4.3	递推最小二乘法及其应用	51
4.3.1	RLS 算法	51
4.3.2	轮胎广义制动刚度估计的 RLS 算法	52
4.3.3	路面附着系数和车辆重心侧偏角估计的 RLS 算法	54
第 5 章	动态单纯形法	60
5.1	实时优化概述	60
5.2	Nelder-Mead 单纯形法和动态单纯形法	61
5.2.1	Nelder-Mead 单纯形法	61
5.2.2	动态单纯形法的算法和步骤	63
5.2.3	DSA 参数选择	64
5.3	DSA 算法的应用	66
5.3.1	稳态道路横坡角	66
5.3.2	基于 DSA 的联合估计器	66
5.3.3	联合估计器的优化模型	67
5.3.4	仿真结果	68
第 6 章	基于局部线性化的广义龙贝格观测器	71
6.1	广义龙贝格观测器概述	71
6.2	用于重心侧偏角和路面附着估计的广义龙贝格观测器	72
6.2.1	局部线性化	72
6.2.2	可观性分析	74
6.2.3	反馈增益的确定	75
6.2.4	仿真验证	78
第 7 章	多模型切换算法	80
7.1	概 述	80
7.2	车辆重心高度估计的多模型算法	81
7.2.1	多模型切换算法及其切换指数	82
7.2.2	数值分析	83
7.3	基于多模型算法的侧向风估计器	85
7.3.1	估计器结构框图	85
7.3.2	用于侧向风估计的多模型切换算法	86
7.3.3	仿真结果	88

第 8 章 滑模状态观测器	90
8.1 滑模控制与滑模状态观测器	90
8.1.1 滑模控制算法	90
8.1.2 车轮加速度估计的滑模算法	91
8.1.3 车辆重心侧偏角估计的滑模算法	92
8.1.4 数值分析	94
8.2 二阶超螺旋滑模状态观测器	96
8.2.1 问题的由来	96
8.2.2 采用超螺旋(super-twisting)算法的二阶滑模观测器	97
8.2.3 汽车制动减速度超螺旋二阶滑模观测器算例	100
第 9 章 基于试验知识的参数估计方法	102
9.1 依据轮速和纵向加速度测量的车速估计	102
9.2 仅依据轮速的车速估计	106
9.2.1 ABS 参考车速估计的若干算法	106
9.2.2 非线性滤波方法	107
9.2.3 参考车速自适应算法	108
9.3 正常行驶工况下的路面附着系数估计	113
9.4 ABS 制动工况下的路面附着系数估计	115
9.4.1 路面附着识别的依据和思路	115
9.4.2 路面附着识别的方法和步骤	116
第 10 章 参数估计的集成算法	119
10.1 基于运动学方程和状态观测器的侧偏角估计集成算法	119
10.1.1 侧偏角估计的集成算法	119
10.1.2 与实验数据的比较	125
10.2 基于 DSA/多模型算法的侧偏角和路面附着集成估计器	128
10.2.1 估计器组成	129
10.2.2 DSA 算法设计	130
10.2.3 多模型算法和初始单纯形的生成	131
10.2.4 基于卡尔曼滤波的联合 DSA 算法	132
10.2.5 估计器验证	134
10.3 一种横摆角速度和侧偏角估计的集成算法	138
10.3.1 算法描述	138
10.3.2 路面附着系数估计	138
10.3.3 基于运动关系的横摆角速度估计	139
10.3.4 预估计的置信度计算	141
10.3.5 观测器	141
10.3.6 试验结果	142
参考文献	145

第1章 绪 论

1.1 模型、参数与状态估计

1.1.1 模 型

观察和测量是自然科学与工程技术中的普遍手段。根据观察,科学家对所研究问题的物理本质有了透彻的认识,并从这种认识出发通过反复推敲建立起一种理论;再设计一些新的实验并观察新的实验结果,要么证实该理论、确定做某种修改,要么完全否定它。在理论与实验的相互作用中,反映客观事实的结果起着决定性的作用。因此,在自然科学与工程技术领域中,实验与观察(测量)是最根本的。

与观察和测量同等重要的是模型。事实上它们是很难分开的。模型是对现有系统或拟建立系统进行本质方面的表达,以可用的形式提供关于该系统的知识。凡不属于该“系统”的一切事物皆属于环境部分。凭借系统与其环境间所划定的界限,可以用输入/输出关系来表征系统与环境的相互作用。系统的具体结构取决于观测者的目的和观点。譬如,这个系统可以是一个车轮,也可以是一辆汽车,甚至可以由驾驶员、车辆和道路组成的“人-车-路”系统。

模型可以是概念的、物理的或数学的(也依次称为现象逻辑的、经验的和解析的),这要取决于:

- ① 对于特定目的来说最本质的东西是什么;
- ② 可供使用的建立模型的方法;
- ③ 可得到的知识的质和量。

在天体力学中可找到一个模型演变的例子。摆线运动的托勒密(Ptolemy)模型可作为完全适用于行星运动观测的概念模型。托勒密认为地球乃固定不动,月球、水星、金星、太阳、火星等分别以复杂的摆线轨迹环绕地球运行。哥白尼(Copernicus)模型把一些观测记载解释为地球(观测者)和被观测的行星两者运动合成的结果,可以作为物理模型。而开普勒(Kepler)行星运动三大定律则提供了一个数学模型,这个模型给出了数字预报的可能性。

在工程技术中,根据目的或用途不同,模型可以划分为:

- ① 研究——人们希望这种模型给出对有关知识或一些测量结果的某种解释;不必事先明确其近期用途,但应给出一个简明的阐述并为进一步研究提供线索。
- ② 设计——与设计准则(稳定性、误差判据、经济效益和固有可靠性等)相适应,模型中必须表示出所要使用的部件或子系统的有关知识。本质上设计是一个在回路中有设计者参与的反馈作用过程。
- ③ 控制——对系统的各种控制作用取决于有关该系统的知识,如考虑稳定性所需要的(可能)颇为不精确的数据,或为评估由于应用反馈而可能带来的改善所需要的数据(即负载和干扰的性质、对控制变量的约束等)。

在许多情况下,模型的建立是从把基本的物理定律(如牛顿(Newton)定律、麦克斯韦

(Maxwell)定律、基尔霍夫(Kirchhoff)定律、质量守恒、能/热平衡、冲量平衡、熵平衡等)应用于研究的过程(如一个汽车动力学过程或制动器热力学过程)时开始的。从这些定律中得到所研究的变量间的一些关系,例如常微分方程或偏微分方程/差分方程。模型的建立通常包含下列步骤:

- ① 根据物理的知识选择模型的结构;
- ② 使参数与能得到的数据相适配(估计);
- ③ 模型的检验与核实(诊断检查);
- ④ 按预定目的应用模型。

1.1.2 参数与状态估计

所谓参数,是指模型中一些与输入无关的量或独立变量,而状态是随时间变化的变量。在传统意义上的参数估计中,参数被看成是不变的。但在贝叶斯估计中认为参数是具有一定分布的随机变量。传统的动态系统辨识包括两类问题:基于直接和完整的状态空间测量的参数估计;对完全已知的非线性系统的状态估计(滤波)。

扎德(Zedah)将辨识定义为根据输入与输出来确定指定的一类系统中的一个系统,这个系统与所试验的系统相等价。等价性经常用一个判据即一个误差或成本函数来定义。这个判据是过程(即“所试验的系统”)输出 y 和模型(即“一类系统”中的元素)输出 y_M 的一个泛函,即 $E = E(y, y_M)$ 。如果两个模型的成本函数值相同,即 $E(y, y_{M_1}) = E(y, y_{M_2})$, 那么就可以说它们是等价的。

参数估计就是以测试的数据(观测)为输入,估计出参数值。使用“估计”这个词是由于在几乎所有现实的情况下,对所研究的观测总是混有随机干扰和误差的,因此,必须使用统计方法将干扰过滤掉以去除其影响,从测量中得到一个最好的结果。估计问题在概念上还可以这样解释:置过程与模型于同一输入信号的作用下,比较混有噪声的过程输出和模型输出,然后找出模型的一种调整方法,使模型在某种预定的意义上是最优的。

辨识通常带有对于过程毫无所知、白手起家的含义。但对于工程中的很多问题,通过对局部的了解或基于某些先验知识,可能对模型的结构是清楚的,这种情况下的辨识就简化为求一些参数的数值。因此,辨识问题也就简化为(过程)参数估计的问题了。

一些情况下对更详细的知识感兴趣,如关于过程状态的连续信息,则导致状态估计。所谓状态,是指时变量(如温度或压力)、物理常数(如质量或面积)或者一些状态的函数(如效率、特性参数)等。粗略地说,一个过程的状态就是一个变量(如向量),它与其他的过程输入一起决定其后的过程行为。因此,如果过程处于自由状态,即无输入信号,那么根据某一时刻的状态知识(加上过程结构和参数的知识)足以预报过程的未来行为。此外,若还存在关于参数的不确定性,则问题就是参数与状态的联合估计。由此可见,大多数情况下,状态估计必须在正常运行条件下进行。而解决参数估计的问题,既可以根据所研究的过程做(主动的)实验,也可以根据所研究的过程做(被动的)观测。

如果不是特别指明,后面将不再区分“参数估计”、“状态估计”或“参数与状态的联合估计”。为叙述方便,将这些估计统称为“参数估计”。

1.2 参数估计的目的和应用

1.2.1 参数估计的一般目的和应用

提到参数估计,自然会想到它在控制工程中的应用。但估计理论的应用领域非常广,如科学实验的阐释、信号处理、临床试验、民意测验、质量控制、通信、项目管理、软件工程、控制理论、网络入侵检测系统和轨道测定等。下面具体介绍参数估计在一些领域的应用。

1. 估计用于“诊断”

应当归入这一类的有过程传递特性的测量,如伯德(Bode)图的测量、脉冲响应的确定、传递函数零极点的确定、非线性效应的估计等。除了在电子和机电系统中的应用外,用于诊断目的的参数估计还应用在以下多个领域。

(1) 化学工程

例如催化剂的老化或中毒的确定、化学反应中比例系数的确定。文献[1]采用有限差分扩展卡尔曼(Kalman)算法估计甲苯催化加氢反应过程的状态和参数,在测量存在滞后和对对象模型存在不确定性的情况下实现实时估计。文献[2]提出基于蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟与动力学实验相结合的化学反应参数估计算法,用于丙烯氨氧化反应动力学参数的估计。

(2) 工业过程

例如热传导系数的确定。如果实验测得两个相接触物体内部一系列离散点的温度,要求得它们接触界面之间的热传导系数,就是一个典型的参数估计问题^[3]。

在发电厂,参数估计被用于诊断和优化。为了达到控制和优化的目的,对电厂参数及其内部系统的状态进行实时估计。

对于锅炉来说,煤烟堆积会造成传热效率下降,所以要估计表面效率因素、炉膛污垢因素以及除渣状况等。

对于水泥窑,根据挥发物(如硫、氯气等)含量的测定来估计一些未知参数。

对于燃气轮机压缩机,消耗的能量要占燃料的50%。压缩机污垢、涡轮腐蚀、涡轮污垢、异物损伤等都会造成流量、温度、压力、效率、功率、冷却等发生变化。当效率估计值低于正常值到一定程度时,就应当停机维护。

(3) 物理和机械测量

例如转子动力学领域中转子裂纹故障的早期诊断与预测。

(4) 核反应堆

例如反应系数的确定。

(5) 飞机和航天飞行器工程

例如飞行时飞机动力学的确定和航天器姿态控制。

(6) 生物和医学工程

对于线性系统,系统模型结构问题可归结为系统的阶数和时间延迟(又称潜伏期)。就生物系统而言,精确地确定系统响应时延,对于了解生物系统的调节规律和临床诊断具有实用价值。例如,人的瞳孔对光反射的潜伏期在某种意义上能反映出中枢神经通路中的某些传递特性。又如,在用脑诱发电位检查感官神经通路的疾病中,波峰潜伏期是一个主要的诊断指标。

文献[4]提出了一种估计具有未知延迟和系统参数的递推算法,给出了计算机上的验证结果和用于辨识瞳孔光反射系统潜伏期和模型参数的实例。

(7) 经济学

在研究人口增长规律时,提出的增长曲线中最著名的是 Logistic 曲线。比利时数学家 P. F. Verhulst 将其归纳提炼为如下模型:

$$y(t) = \frac{k}{1 + e^{a-rt}} \quad k > 0, a \in \mathbf{R}, r > 0$$

式中: k 为饱和水平; r 为增长速度因子。

Logistic 曲线既可用于描述生态领域动植物的生长发育或繁殖过程,也可用来描述经济领域新技术的扩散或耐用消费品的销售等经济现象。举例来说,可以根据已有数据估计模型中的参数 k 、 a 和 r , 建立彩色电视机平均每百户拥有量的增长模型,从而分析和预测其增长变化趋势。所得到的预测结果对彩电市场的生产和销售具有一定的指导意义。

2. 估计用于控制

如果希望根据过程参数的知识去调整其控制系统的参数,使其传递函数是最优的,这就是自寻优和自适应系统。这种系统的一个典型例子是飞行中的飞机。由于空气密度在接近地球表面和在 10 000 m 高空的差别很大,飞机的动力学特性亦显示出很大的不同。

根据过程参数估计而进行适应控制的另一个例子是汽车驾驶。由于天气的关系,有时道路很滑,路面附着系数的大小可以通过检测转向盘的小扰动进行估计,其结果可以用于汽车底盘的主动控制。

3. 模式识别

模式识别是指确定研究对象的参数和类型,譬如字符识别、人脸识别、信号分类(如心电图)和石油勘探数据分类等。与汽车工业相关的模式识别的例子有:采用风洞试验确定汽车空气动力学特性;确定轮胎、悬架系统或发动机的动态特性。

1.2.2 参数估计在汽车主动控制与安全预警装置设计中的应用

1. 汽车主动控制系统与参数估计

为保证汽车操纵安全,设计人员尽量做到使车辆在各种工况下都能对驾驶员转向输入具有一致的和可预见的响应。然而,轮胎侧向力的非线性特性却使得汽车操纵特性具有两种截然不同的表现。当轮胎侧偏特性处于远离附着极限的线性区域,汽车操纵性能亦为线性特性,即一定车速下横摆角速度与转向角成正比。与此相反,当汽车接近附着的物理极限时,轮胎侧向力不再与侧偏角成正比,甚至可能出现饱和。在临近侧向附着极限时,若继续增加转向输入,则轮胎侧偏角可能迅速增加并导致车辆侧偏角亦迅速增加,原因是侧向力没有随着转向角的增加而相应地增加。

在非线性工作区域,汽车运动特征表现为至少一部分轮胎相对于路面产生明显的侧向运动。此时,车辆对驾驶员转向输入的响应变得迟钝,其操纵特性变得难以预料,易导致事故的发生。譬如在湿滑路面转弯过于猛烈时,很容易导致侧滑或侧翻等驾驶员难以控制的行驶状态。人们不断研制、改进各种主动安全装置并安装在汽车上,以便实时监控其动态稳定性,如大家熟知的防抱制动系统(ABS)和电子稳定控制系统(ESC)等。此外,牵引控制系统(TCS)、

自适应巡航控制(ACC)、主动悬架和发动机管理系统(EMS)等电子控制装置也都在汽车上得到广泛应用。总的来说,这些电子控制装置的目的就在于提高行车安全、改善乘坐舒适性、增加交通流量并减少环境污染。

许多电子控制装置依靠车辆及其工作环境的物理参数。其中,有些参数是不变的(或至少其变化可忽略);有些则与特定的行驶工况(如载荷)有关,可能是常量但大小未知(有时可以估计);还有一些参数,特别是轮胎-路面摩擦系统参数会发生剧烈和瞬间的变化。

在汽车整车及其部件系统的各种控制和监控报警装置中,通常都要用传感器测量一些物理量,如发动机转速、汽车横摆角速度、转向盘转角等。控制器依据这些测量信号,按照一定的控制逻辑向执行器发出指令,完成一定的控制任务。

汽车是大批量生产的产品,其成本是影响其市场竞争力的关键因素之一。因此,设计者总是希望用最少的传感器获得较多的状态信息,进而以最小的成本获得仍然足够满意的控制效果。如何根据已知信息推断控制逻辑所必需的未知信息就是参数估计的主要任务。例如,在大多数 ABS 中,控制逻辑需要用到车轮滑移率信息。而车轮滑移率是根据车速和轮速(轮速定义为车轮转动角速度与其有效滚动半径的乘积)计算的。虽然装有 ABS 的汽车上都会安装轮速传感器,但车速一般不会直接测量,而是根据轮速估计得到(车速的估计值也称为参考车速)。在各种车速测量装置中,较常用的是多普勒雷达和全球定位系统(GPS)装置,但它们都不太适合汽车主动控制系统。前者主要问题是成本较高,而后者在导致成本增加的同时还存在数据更新频率较低、部分路段处在 GPS 信号覆盖范围之外等问题。

2. 汽车主动控制系统中参数估计的目的与应用

(1) 状态变量估计与控制目标的确定

一些控制算法采用状态反馈,而另一些算法如逻辑门限值方法则将控制参数与设定的门限值相比以确定控制输入。如在改善车辆稳定性的控制装置中,汽车重心侧偏角是重要的反馈控制变量;而在 ABS 控制中,滑移率是控制参数之一,其值一般是根据参考车速和实测轮速计算得到的。由于技术或成本方面的原因,重心侧偏角和参考车速一般都通过估计得到。

控制算法还常常根据工况的不同进行调整。例如,ESC 系统需要对路面附着变化能够自适应。在湿滑路面上车辆侧偏角必须被控制得比干路面上更严格,或者说侧偏角的期望值要定得低一些。为了确定侧偏角控制目标,必须先估计路面附着系数。

(2) 调整控制策略和控制参数

极限条件下的车辆操纵特性受附着系数的影响很大,估计算法和控制算法也因此需要对路面变化能够自适应。例如,汽车避撞系统、自动道路保持系统及主动转向控制都要求对路面附着系数的变化能够自适应;而 ABS 在不同附着系数的路面上需要采用不同的控制逻辑和控制参数。这些情况下,路面附着系数的估计很关键。

(3) 故障诊断

即便一些状态可以通过传感器测量得到,也还存在一个故障诊断问题。当传感器发生故障时,它会发出错误的数据。这时,有可能依靠其他仍然正常工作的传感器信号来估计另一些状态,然后将估计出的状态值与对应的传感器测量值比较。当二者的不一致超出事先设定的范围时,就判定该传感器发生故障。这种故障诊断的方法也称为“软件冗余”,在汽车上得到广泛应用。用于这种目的的观察器有时还称为“虚拟传感器”,相应的它所做的工作就称为“软测量”。

(4) 信号滤波

按照文献[5]的定义,参数估计是指在已知系统模型结构时,用系统的输入和输出数据计算系统模型参数的过程。本书所涉及的参数和状态估计不仅仅是指系统模型参数,还包括其他很多内容。例如,对于传感器测量的含有随机噪声的信号,参数估计的目的可能仅仅是如何将信号中的噪声过滤掉。

(5) 为报警决策提供依据

在超车过程中,有时因误判车速和车距导致车辆碰撞。一种超车辅助装置可以帮助驾驶员避免此类事故。该装置在分析汽车驾驶过程动态模型及制动距离模型的基础上,基于最小安全报警距离估计超车的危险。

为对侧滑或侧翻进行预警,首先测量必要的状态参数并估计路面附着系数和车辆重心侧偏角。然后根据测量的转向轮转角、横摆角速度和估计出的重心侧偏角进一步确定前、后轮的侧偏角以及瞬时转弯半径。最后根据侧向附着极限和侧翻极限,估计出极限行驶车速,并将当前实际车速与估计出的极限行驶车速比较,必要时向驾驶员提供预警。

1.3 主要估计参数、方法与发展趋势

1.3.1 主要估计参数

汽车动力学控制和车辆动态预警中需要估计的参数和状态很多,且与传感器配置等关系密切,这里不可能一一列出。以下仅就经常需要估计的一些主要参数进行介绍。

1. 轮胎-路面附着系数

轮胎-路面附着系数简称为路面附着系数或路面摩擦。就改善车辆稳定性的控制装置所配置的典型传感器而言,只要车辆工作在线性范围内,确定路面附着系数是不可能的^[6]。在该范围内,轮胎侧向力和纵向力主要取决于其弹性特性而与路面特性无关。转向工况下,车辆对给定转向输入的响应也几乎与路面附着系数无关。因此,根据所测车辆在线性范围内的整车转向响应来确定路面特性是不可能的。同样的情况也发生在车辆加速或制动工况,即一般认为,在较小的车轮滑动条件下无法确定路面附着特性。

但也有研究者认为,在线性范围内可以根据轮胎纵滑特性(即轮胎纵向力与纵向滑动率的关系特性)来估计路面摩擦^[7-9]。基于纵滑特性的路面摩擦估计方法的核心思想是:在车辆加/减速度小于 $0.2g$ ^[7]、滑动率很少超过 5% 的通常行驶工况下,根据采集得到的较小滑动率和摩擦力数据来预测最大摩擦力。这些工况下,轮胎-路面的最大摩擦是根据从动轮纵滑特性曲线上摩擦力和滑动率都较小处的斜率估计的。如果将纵滑特性曲线在零点处的斜率称为纵滑刚度,则按照公认的轮胎理论,纵滑刚度主要由胎体刚度而不是路面条件所决定^[7]。因此,轮胎纵滑刚度对轮胎形式、充气压力、轮胎磨损(可能还包括车辆结构形式)等很敏感^[9]。

几乎所有与车辆稳定性有关的底盘主动控制系统和车辆报警装置都要求估计路面摩擦(如果不能直接测量的话),如 ABS、TCS、ESC 和 ACC 等。

2. 车速

虽然汽车上一般都装有车速表,但它只在驱动轮的滑动率较小时才是准确的。所以,汽车

上现成的车速表在大多数情况下无法用于底盘主动控制系统。虽然可以采用多普勒雷达、差分 GPS 等方法直接测量车速,但基于成本的考虑,汽车上一般并不安装车速传感器。因此,车速一般是根据轮速估计得到的。

很多参数的计算都依赖参考车速,如滑动率、期望横摆角速度、期望侧偏角等。一些底盘主动控制系统在不同车速下采用不同的控制逻辑或参数。

3. 重心侧偏角

国内外学者对重心侧偏角估计进行了广泛研究。侧偏角是 ESC 中的关键变量。典型 ESC 系统的控制目标是:在将侧偏角维持在合理限度内的同时,使横摆角速度跟随其期望值。侧偏角是否在“合理”限度内,与路面附着系数有关。在低附着路面,车辆重心侧偏角必须控制得比高附着路面更严格些(即更小些)。

侧偏角的直接测量需要一套复杂的测试装置,如光学传感器或双天线 GPS 装置。因直接测量存在成本、精度和可靠性等方面的问题,目前乃至近期在量产车辆上使用这些传感器的可能性不大。

4. 横摆角速度

与侧偏角一样,横摆角速度也是 ESC 中的关键变量。虽然大多数系统的传感器配置方案中包含了测量横摆角速度的传感器,但对于两轮驱动车辆来说仍然有可能采用估计而不是直接测量得到该变量值。这样减少了传感器的数量,降低了 ESC 的成本。对于已经安装了横摆角速度传感器的车辆来说,该参数的估计可以为传感器故障诊断提供依据。

5. 制动压力

对于基于制动压力调节的底盘主动控制系统如 ABS、TCS 和 ESC 等,制动压力信息有助于提高控制逻辑性能和故障诊断功能。更有一些控制算法直接将制动压力作为控制参数。虽然有些 ESC 系统测量制动管路的压力,但对于不直接测量该参数的控制系统其估计是有益的。以 ABS 为例,如果能估计制动压力的大小,则可以判断路面的附着情况。而路面附着的信息对 ABS 来说是非常重要的。

6. 道路横坡

道路横坡对弯道上行驶的车辆的稳定性和极限行驶能力有重要的影响。侧向加速度是侧向运动控制经常测量的一个参数,但该测量值受到道路横坡的影响。由于道路横坡的测量困难,该参数的估计对于修正侧向加速度测量值、确定车辆的侧向安全极限车速很重要。道路横坡估计是车辆侧向安全预警和侧向稳定/侧翻控制中的重要研究内容。

7. 侧倾角

在防侧倾控制系统中,侧倾角是直接控制参数。与道路横坡类似,侧倾角对于修正侧向加速度测量值、确定车辆的侧向安全极限车速同样很重要。

1.3.2 参数估计的主要方法

1794 年,德国数学家高斯(Gauss)首先提出参数估计的方法,他用最小二乘法计算天体运行的轨道。20 世纪 60 年代,随着电子计算机的普及,参数估计有了飞速的发展。参数估计有多种方法,如最小二乘法、极大似然法、极大验后法、最小风险法和极小化极大熵法等。在一定

条件下,后三种方法都与极大似然法相同。最基本的方法是最小二乘法和极大似然法。

上述方法主要用于离线估计。实际上,汽车主动控制系统(常为嵌入式控制系统)要求的是在线或实时估计,估计出的状态和参数用于实时控制。为此,人们提出了各种各样的实时估计算法,主要包括:

- 卡尔曼(R. E. Kalman)滤波及其扩展算法;
- 递推最小二乘法(Recursive Least Squares,简称 RLS);
- 龙贝格(Luenberger)观测器;
- 滑模观测器;
- 动态单纯形法;
- 多模型切换算法。

下面简单介绍这几种方法及其应用。

1. 卡尔曼滤波及其扩展算法

卡尔曼滤波是控制领域广泛运用的一种信号滤波方法。在测量得到的传感器信号中,不可避免地混有干扰信号(或称噪声),有时测量信号还会发生畸变。在信号被用于控制或状态估计(观测器)之前,多数情况下要进行某种形式的滤波。当然,低通滤波是一种可选的滤波方法,因为干扰信号的频率通常都比较高。但卡尔曼滤波在理论上吸引人的地方在于,在所有可能的滤波器当中,卡尔曼滤波能够做到使估计误差的方差最小。

除了可以用于信号的滤波,卡尔曼滤波还可以用于状态估计。如果不便于直接测量系统的状态值,但可以测量系统的输出,那么可以根据系统的状态方程和输出方程采用卡尔曼滤波来估计状态的值。在汽车主动控制系统中,这一类状态估计问题采用卡尔曼滤波的实例很多。

卡尔曼滤波只适用于线性系统,而实际系统总是非线性的。如果系统的非线性比较强,则卡尔曼滤波不再适用。但是,通过将非线性系统的局部线性化,在工作点附近区域仍然可以采用卡尔曼滤波。只不过对于一个动态变化的非线性系统,卡尔曼滤波方程中的系数需要根据工作点的变化而实时调整。这时,该估计方法称为扩展卡尔曼滤波(EKF)。

2. 递推最小二乘法(RLS)

最小二乘法是指以误差的平方和最小为准则,根据观测数据估计模型中未知参数的一种参数估计基本方法。它的基本思路是选择估计量使模型(包括静态或动态的、线性或非线性的)输出与实测输出之差的平方和达到最小。这种求误差平方和的方式可以避免正负误差相抵,而且便于数学处理(例如用误差的绝对值就不便于处理)。线性最小二乘法是应用最广泛的参数估计方法,在理论研究和工程应用中都具有重要的作用,同时它又是许多其他更复杂方法的基础。线性最小二乘法是最小二乘法最简单的一种情况,即模型对所考察的参数是线性的。

能够满足实时应用的最小二乘法实际上是 RLS。该算法是一种流行的实用算法,被广泛用于信号处理、通信和控制等领域。与卡尔曼滤波方法类似,RLS 算法在应用于非线性系统的状态估计时,也需要先线性化。RLS 算法和卡尔曼滤波及其扩展算法在状态估计方面的研究和应用都很广泛。

3. 龙贝格观测器

龙贝格观测器是一种应用广泛的状态观测器。该观测器将测量值的误差信息反馈给状态方程,以使状态变量估计值尽快逼近真实值。该观测器对线性系统和非线性系统都适用。

4. 滑模观测器

卡尔曼滤波与 RLS 以及它们的扩展算法(又称广义算法)都需要建立线性状态方程,且迭代求解过程的矩阵运算导致计算量较大。它们在应用于非线性系统时,如果因工作点的变动要求实时线性化,则进一步增加了计算量。与龙贝格观测器类似,滑动模态(简称“滑模”)观测器并不一定要求建立一个线性状态方程,且同时适用于线性和非线性系统。与龙贝格观测器相比,滑模观测器的鲁棒性较好。滑模观测器的另一个优点是滑动面和控制律的设计具有灵活性,可根据估计模型的具体特点进行设计。当然,抖振现象是滑模控制器和观测器的固有缺点,需要根据具体情况加以解决。

5. 动态单纯形法

估计出的参数值是否与其真实值接近,可以用模型的输出与其测量值之差来检验。模型输出与其测量值的差(指绝对值或平方)越小,表明参数估计得越准确。因此,如果将待估计的参数看成优化设计变量,以模型输出与其测量值之差的绝对值或平方最小为优化目标,则可构造一个优化模型(当然还要考虑必要的约束条件)。由于汽车运动过程中参数和状态值是不断变化的,所以该优化模型属于动态优化模型。相应地,应采用实时优化方法求解该模型,实现状态和参数的动态估计。由于动态单纯形法的算法简单,每步迭代目标函数值的计算次数少(最少仅为 1 次),因此是一种较好的实时估计算法。

6. 多模型切换算法

多模型切换算法最初用于改善控制系统的瞬态响应特性,后被用来进行簧载质量重心高度、制动压力和路面摩擦等参数和状态的估计。其基本思想是,在多组模型参数中找出输出与测量值(或其函数)偏差最小的一组参数,并以该组模型参数为估计值。这种算法的稳定性好,计算量与模型数目有关。如果模型数目较少,则估计精度较差;如果模型数目很多,则导致计算量很大。

1.3.3 对参数估计方法的评价

既然是“估计”,估计结果与被估计参数的真实值总是有差异的。从应用角度来看,估计方法的好坏不仅仅是一个估计精度的问题。这可以通过对基于车辆模型的参数估计方法的评价来说明。任何车辆模型都只是实际车辆的近似。近似程度越高,则估计结果也越准确。由于受到车载控制器的成本等因素限制,车辆参考模型又不能太复杂,所以对汽车设计人员来说,难处在于既要获得满意的估计结果,又只能用相对简单的模型。另外,实际中还有很多不确定的因素会影响估计的准确性,如道路坡度、轮胎充气压力、装载情况、路面不平度和侧向风等的不确定性。所以还要求估计算法具有足够的鲁棒性。这确实是一项具有挑战性的工作。

通常,可以通过以下几个方面来评价估计算法或观察器的效果:

① 收敛性及其收敛速度。观察值能否收敛于其真实值;如果收敛,收敛速度怎样。收敛速度快,意味着瞬态过程中状态估计值能够快速跟随状态真实值的变化。

② 估计误差。可以采用不同的指标来计算和评价误差。如果只关心平均效果,则可以用一段时间内的误差均方根值作为指标;如果对最大误差更感兴趣,则可以采用一些典型工况下估计误差绝对值的最大值作为评价指标。

③ 鲁棒性。对噪声和不确定性因素的抗干扰能力。

④ 计算量。观察器的计算量应适合在车载微处理器上实施。对于汽车主动控制系统,这

一点是非常重要的。

1.3.4 发展趋势

与汽车有关的实时参数估计内容很丰富,采用的估计方法也不一而足。不能一概而论地说哪种方法更好,更不存在一种一统天下的估计方法。每一种估计方法都有自己的适用范围,而选择什么样的方法与控制系统的设计要求、成本和传感器配置等密切相关。下面就本研究领域的发展趋势提出几点看法。

1. 参数估计与控制系统的一体化设计

实际上,实时参数估计一般不会孤立存在。这里所要讨论的参数估计主要用于智能汽车控制系统、底盘主动控制系统和汽车安全预警装置。参数估计与控制系统互相依赖:参数估计的结果用于控制系统;同时,控制系统向参数估计器提供必要的数据输入和控制状态信息。充分利用控制输出信息,例如制动压力是在增加、保持不变还是在减少,可以有效地提高估计精度。

当采用一体化设计时,可以减少实时运算过程中对内存的占用,还减少了计算量。一些实用的汽车电子控制系统,如 ABS 和 ESC,其对轮速、侧偏角和路面附着的估计都是融入控制系统中的。

2. 基于模型的参数估计方法应用增多

如车辆模型、轮胎/车轮模型等,提供了可靠的参数之间的内在关系。模型越精确,基于动力学模型的参数估计精度就越高,但同时模型复杂程度也增加,从而给在线实时估算带来困难。因此,在设计基于模型的参数估计算法时将更多地考虑如何在模型精度与实时计算效率之间寻求更好的折中方案。

3. 信息融合与利用

以 ABS 中参考车速的估计为例,从简单轮速算法逐渐发展到近年来以多传感器的信息融合为基础,越来越注重对车辆横向、纵向运动状态信息的利用。从原来的只适应单一工况逐渐向适应多种工况方向发展,估计值的精度和估计算法的鲁棒性都有了一定程度的提高。

4. 路面附着识别实时性研究与直接测量

在驱动、制动和转弯等行驶工况下,车辆在不同附着系数的路面上将有不同的响应。依据车辆响应识别路面附着系数及其变化,需要用到车辆动力学模型。基于动力学模型的路面附着系数辨识方法,模型的复杂程度高给在线实时估算带来了困难。因而实时性高的基于车辆响应特性的路面识别算法将有待于深入研究,这也是以后路面附着系数估计算法发展的趋势所在。

一般认为如果车辆没有进入非线性区,路面附着系数是不能估计的。而对于 ACC 来说,控制系统的介入不一定要等到车辆进入非线性区才开始。因此,一些研究人员开始研制轮胎-路面附着系数实时测试系统。由德国达姆施塔特工业大学、宝马汽车公司、轮胎制造商大陆公司和西门子的 Epcos 子公司等联合组成的研究小组正从事这方面的工作^[10]。所研制的智能轮胎的核心技术是安装于轮胎花纹橡胶中的表面轮廓轮胎传感器,简称 SAW (Surface Area Wave)。SAW 轮胎传感器的核心部件是一个能够随橡胶变形的微形平板压电晶体,通过感应轮胎外轮廓的形状变化来识别轮胎的纵向力、侧向力、车轮载荷、轮胎气压、轮胎印迹的大小和位置、轮胎-路面附着系数等。随着将来传感器成本的降低,有可能应用于量产汽车上。虽然这将终结附着系数的估计,但将为最终实现汽车主动安全装置的精确控制创造必要的条件,并进一步提高汽车的安全性。