

汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

车辆稳定控制技术

VEHICLE STABILITY CONTROL TECHNOLOGIES



李永 宋健 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

车辆稳定控制技术

VEHICLE STABILITY CONTROL TECHNOLOGIES

李永 宋健 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书系统而全面地阐述了车辆稳定控制理论及其在车辆工程中的匹配及应用技术,是车辆控制工程领域的一部学术专著。全书共八章,分上、下两篇。上篇(前四章)完整论述了车辆稳定控制理论,包括建模与正交匹配;下篇(后四章)介绍了车辆稳定控制仿真技术、实验方法及工程应用等。本书以稳定控制技术为主线,重点围绕车辆安全问题,阐述控制理论在车辆动力学中的应用。本书以作者近年来在该领域的系列化研究成果为主要内容,是一部具有较为完整理论体系和实验验证的车辆控制方面的学术专著,可以为车辆控制技术及实验匹配提供理论和方法。

本书可以作为高等院校车辆、机械、机电、控制、交通、力学及宇航等专业的本科生和研究生的教材或教学参考书,也可作为相关工程技术人员参考书和工具书,同时适合于科研、设计及工艺人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

车辆稳定控制技术/李永,宋健著. —北京:机械工业出版社,
2012. 12

(汽车先进技术论坛丛书)

ISBN 978-7-111-40294-7

I. ①车… II. ①李…②宋… III. ①汽车—稳定控制
IV. ①U461. 6

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第262835号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:何士娟 责任编辑:何士娟

版式设计:霍永明 责任校对:陈立辉

封面设计:路恩中 责任印制:张楠

唐山丰电印务有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·14印张·272千字

0 001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40294-7

定价:68.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

目 录

前言

上篇 车辆稳定控制基础理论

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
一、稳定系统概念	1
二、控制方式分类	4
三、稳定控制原理	7
四、稳定控制算法	8
第二节 车辆稳定控制技术简史	12
一、历史状况	12
二、发展现状	15
第三节 车辆稳定控制基本方法	16
一、稳定控制算法	16
二、控制算法策略	18
三、核心控制算法	21
第四节 车辆稳定控制基础实验	22
一、路面控制实验	22
二、电子控制实验	24
三、匹配标定实验	26
第二章 稳控系统基本模型	31
第一节 硬件控制模型	31
一、结构设计模型	31
二、轮速输入模型	32
三、仿真平台模型	35
四、轮胎稳定模型	39
第二节 软件控制模型	40
第三节 液压控制模型	44
一、液压控制单元	44
二、液电混合模型	45
三、液压理论模型	47
四、流场控制模型	55
五、液压匹配模型	58

六、整车匹配模型	58
七、整体布置模型	59
八、质量控制模型	60
第三章 稳控系统基本方法	63
第一节 正交匹配方法	63
一、正交匹配实验	63
二、硬件匹配方法	64
三、软件匹配方法	65
四、实车匹配方法	66
第二节 压力控制方法	68
一、压力变化特性	68
二、压力估计算法	75
三、压力识别技术	84
第四章 稳定控制计算技术	92
第一节 轮速控制计算技术	92
一、计算原理	93
二、计算方法	93
三、干扰算法	94
四、滤波算法	96
第二节 车速控制计算技术	97
一、参考车速算法	97
二、综合车速算法	101
第三节 增减压自适应调整算法	106
一、算法原理	107
二、实时算法	108
三、特征值算法	109
四、补偿算法	110
五、转弯工况算法	111
第四节 变速器计算技术	117
下篇 车辆稳定控制基本技术	
第五章 稳定控制硬件流程技术	121
第一节 硬件建模与匹配技术	121
第二节 选型分析技术	130
第三节 开关流量技术	133
第四节 转向识别技术	136
第五节 轮速检测技术	140

第六节 牵引力控制系统计算技术	144
第六章 稳定控制软件标定技术	150
第一节 稳健性标定方法	150
一、标定参数确定	151
二、噪声因子影响	152
三、标定实验方法	153
第二节 标定工具技术	157
一、标定系统结构	157
二、标定软件结构	159
三、标定软件总体设计	160
第三节 整车匹配技术	161
一、标定匹配技术	161
二、整车匹配原理	162
三、整车匹配方法	164
四、综合实车匹配	165
第四节 仿真匹配技术	167
一、软件匹配流程	168
二、内部信息采集	169
三、仿真调试验证	170
第五节 道路匹配实验	172
一、典型工况实验	172
二、冬季实验技术	174
第七章 稳定控制系统工艺技术	180
第一节 电磁阀工艺技术	181
第二节 装配与检测技术工艺	184
第三节 实验工艺	185
第八章 新能源车辆电池材料稳定控制技术	189
第一节 质子交换膜燃料电池稳定控制技术	191
第二节 锂电池稳定控制技术	193
第三节 镍氢电池稳定控制技术	195
第四节 新能源电池组稳定控制技术	196
附录 A 车辆稳定性控制技术基本装置 (ABS/ASR//ESP) 的使用性能	199
附录 B 车辆稳定控制技术基础系统与基础性能	206
参考文献	212

上篇 车辆稳定控制基础理论

第一章 绪 论

第一节 引 言

一、稳定系统概念

当某个控制系统加入典型输入信号后,分析其输出响应特性的动态性能和稳态性能,如果满足稳定过程对控制系统的性能要求,就称该系统为稳定系统。时域分析法是通过直接求解系统在典型输入信号作用下的时间响应,来分析控制系统的稳定和控制系统的动态性能及稳态性能。工程上常用单位阶跃响应的超调量、调节时间和稳态误差等性能指标评价系统的优劣。控制系统经过参数整定和调试,其动态特征往往近似于一阶或二阶系统,因此一阶、二阶系统的理论分析结果,是高阶系统分析的基础。一阶系统的动态特性应用一阶微分方程描述。一阶系统只有一个系统参数,即时间常数 T ,它反映了一阶系统的惯性大小或阻尼程度。一阶系统的性能由其时间常数 T 唯一决定,时间常数 T 也可由实验曲线求出。

系统的性能分析,在控制理论中有着重要的地位。二阶系统含有两个系统参数,即阻尼比 ξ 和无阻尼振荡频率 ω_n 。阻尼比 ξ 决定着二阶系统的响应模态。 $\xi=0$ 时,系统的响应为无阻尼响应; $\xi=1$ 时,系统的响应为临界阻尼响应; $\xi>1$ 时,系统的响应为过阻尼响应; $0<\xi<1$ 时,系统的响应为欠阻尼响应。欠阻尼工作状态下,合理选择阻尼比 ξ 的取值,可使系统具有令人满意的动态性能指标。动态性能指标有 t_r 、 t_p 、 t_s 等,可以从响应曲线上读取;另外它们与 ξ 、 ω_n 有相应的关系,只要已知 ξ 、 ω_n ,就能求出动态性能指标,如图 1-1 所示。

1. 动态性能指标

- ① 最大超调量 σ_p 。
- ② 上升时间 t_r 。
- ③ 峰值时间 t_p 。
- ④ 调整时间 t_s 。

2. 稳态性能指标

稳态误差 e_{ss} 输出响应的稳态值与希望的给定值之间的偏差, 是衡量系统准确性的重要指标。

1) 稳定分析。控制系统是否稳定, 是决定其能否正常工作的前提条件。不稳定系统在工程上多数无应用价值。稳定是指系统受到扰动偏离原来的平衡状态后, 去掉扰动, 系统仍能恢复到原工作状态的能力。应当特别注意, 系统的稳定

只取决于系统内部的系统及参数, 而与初始条件和外作用的大小及形式无关。线性系统稳定的充分必要条件: 系统的所有闭环特征根都具有负的实部, 或闭环特征根都分布在左半 s 平面。判别系统的稳定, 最直接的方法是求出系统的全部闭环特征根。但是求解高阶特征方程的根是非常困难的。工程上, 一般均采用间接方法判别系统的稳定。劳斯判据是常用的一种间接判别系统稳定的代数稳定判据, 可用来确定工作时, 系统参数的允许变化范围。系统闭环特征多项式各项同号且不缺项, 是系统稳定的必要条件。

2) 稳态误差。稳态误差是系统很重要的性能指标, 它标志着系统最终可能达到的控制精度。稳态误差定义为稳定系统误差信号的终值。稳态误差既和系统的参数有关, 也取决于外作用的形式及大小。稳态误差可应用拉氏变换的终值定理计算, 步骤如下:

- ① 判别系统的稳定。只有对稳定的系统计算其稳态误差才有意义。
- ② 根据误差的定义求出系统误差的传递函数。
- ③ 分别求出系统对给定和对扰动的误差函数。
- ④ 用拉氏变换的终值定理计算系统的稳态误差。

要注意, 终值定理的使用条件为, 误差的相函数在右半 s 平面及虚轴上 (原点除外) 解析。系统稳定是满足终值定理使用条件的前提。如果误差函数在右半 s 平面及虚轴上不解析, 只能应用定义计算稳态误差。对三种典型函数 (阶跃、斜坡、抛物线) 及其组合外作用, 也可利用静态误差系数和系统的型数计算稳态误差。采用具有对给定或 (和) 对扰动补偿的复合控制方案, 理论上可以完全消除系统对给定或 (和) 扰动的误差, 实现输出对给定的准确复现。但工程上常根据输入信号的形式实现给定无稳态误差的近似补偿。

二阶系统的闭环传递函数:

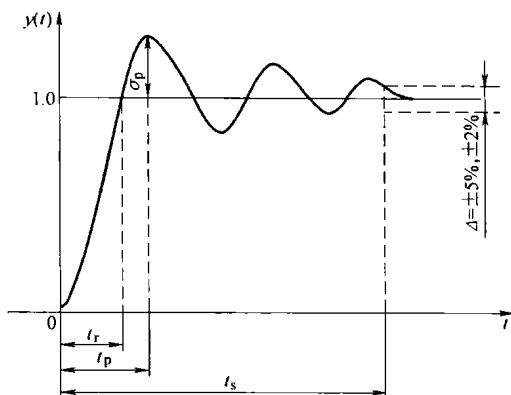


图 1-1 系统动态指标

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{Ts^2 + s + K} \quad (1-1)$$

式中 T ——受控对象的时间常数；

K ——受控对象的增益。

其典型系统图如图 1-2 所示。

式 (1-1) 可改写成标准形式：

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1-2)$$

式中 ω_n ——无阻尼自然振荡频率， $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T}}$ ；

$$\xi \text{——阻尼比，} \xi = \frac{1}{2\sqrt{TK}}。$$

二阶系统动态性能指标的计算 ($0 < \xi < 1$ 的欠阻尼情况)：

上升时间：

$$t_r = \frac{\pi - \theta}{\omega_d} \quad (1-3)$$

式中 $\theta = \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$ ， $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$ 。

峰值时间：

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (1-4)$$

超调量：

$$\sigma_p = e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} \times 100\% \quad (1-5)$$

调整时间：

$$t_s = \begin{cases} \frac{3}{\xi\omega_n} & (\Delta = \pm 5\%) \\ \frac{4}{\xi\omega_n} & (\Delta = \pm 2\%) \end{cases} \quad (1-6)$$

衰减指数 m 和衰减率 ψ ：

$$m = \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{\xi\omega_n}{\omega_d} \quad (1-7)$$

$$\psi = e^{\frac{-2\pi m}{\sqrt{1-\xi^2}}} = e^{-2\pi m} \quad (1-8)$$

高阶系统的动态响应，在工程中常采用主导极点的概念进行简化分析。闭环主导极点的基本概念：如果高阶系统中距离虚轴最近的一对共轭复数极点（或一个实极点）的实部绝对值仅为其他极点的 $1/5$ 或更小，则系统的响应主要由

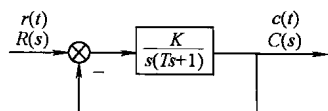


图 1-2 二阶系统传递函数

这一对复数极点确定,称之为闭环主导极点。找到了主导极点,高阶系统就可以近似作为二阶或一阶系统来分析。控制系统受扰动偏离了平衡状态,当扰动消除后系统能自动恢复到原来的平衡状态,或能稳定在一个新的平衡状态,则称系统是稳定的,反之,称系统是不稳定的。系统的稳定是属于系统本身的特性,它只与自身的系统与参数有关,而与初始条件、外界扰动的大小等无关。系统的稳定取决于系统的特征根(极点),而与系统零点无关。一个稳定的系统在给定输入或扰动输入的作用下,经历过渡过程进入稳态后的误差,即 $e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$ 。系统的稳态误差是对系统控制的准确性的度量,是系统的稳态性能指标。

二、控制方式分类

控制是工程高科技领域之一,控制应用于工程的发展经历了经验(凭经验传承判断)、分析、综合(系统优化设计)和控制四个阶段。控制系统的基本元素为传感器、处理器(也称控制器)和执行器。传感器感受外部激励及系统反应的变化信息,处理器接受这些信息并依据算法设计控制策略,执行器则产生所需的控制策略并作用到系统上,从而实现对系统的控制。

依据控制调整方式的不同,控制还可分为开环控制(仅由外界荷载变化调整,被动控制多为此种控制)、闭环控制(即反馈控制,依据系统当前反应值和估计值调整)、开闭环控制(能同时感受外界荷载和系统反应的变化理想地控制,但工程实现困难)。随着系统控制应用的逐步推广,各种新的控制技术不断出现,可供选择的控制装置也越来越多,控制理论研究也不断深入。综合多学科知识建立受控系统的方程,应用并发展新的理论。通过解析、数值和实验相互支持的方法,在计算机支持的虚拟或现实的环境下完成系统设计方案论证和具体的控制设计。根据不同外界荷载变化和系统响应信息,调节控制作用,使系统性能满足安全和功能的要求。控制在早期作为从牛顿、拉格朗日、哈密顿等人发展起来的一门基础学科,但随着科学与工程技术的迅速发展,控制学科中的各个分支学科在理论和方法上相互依赖、相互渗透和相互贯通,如今已发展成为一门重要的技术科学。

依据是否需要外界能源,控制可分为被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制四类。被动控制也称无源控制,它不需要外部输入能量,仅通过控制系统改变系统的动力特性达到减轻动力响应的目的;主动控制的过程依赖于外界激励和系统响应信息,并需要外部输入能量,提供控制策略;半主动控制利用系统响应或外界激励信息,但仅需要输入少量能量以改变控制系统形态,达到改变系统动力特性从而减轻响应的目的;混合控制指的是上述三类控制的混合应用,在系统上同时施加主动和被动控制,整体分析其响应,克服纯被动控制的应用局限,减小外部控制设备的功率、体积、能源和维护费用,增加系统的可靠性。

被动控制是一种无源控制方法,包括隔振、吸振和耗能三大控制形式,采用

隔离、转移、消耗能量的方法达到系统稳定目标。被动控制易于工程实现,受到普遍重视。车辆多采用隔振装置,如高阻尼橡胶系统、滞变-摩擦系统等。车辆隔振模型如图 1-3 所示。

车辆系统增加了基底隔振层后, n 个自由度的系统变为 $n+1$ 个自由度,如图 1-4 所示。其运动方程为

$$\begin{bmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_0 \\ \ddot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_0 + c_1 & C_1 \\ C_1^T & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_0 \\ \dot{Y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_0 + k_1 & K_1 \\ K_1 & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_0 \\ Y \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{y}_g(t) \quad (1-9)$$

式中, m_0 、 c_0 和 k_0 分别为基底隔振层的质量、粘滞阻尼系数和侧移刚度。 M 、 C 和 K 分别为车辆系统的质量、阻尼和刚度矩阵。由于系统和基底在阻尼项与刚度项上的耦合,使传给系统的加速度明显减小。从上式出发,可讨论隔振支座设计和车辆系统的隔振性能。

在系统上附加吸振器子系统,用以减小主系统的振动。吸振器是包括质量系和弹簧系的振动系统,以质量产生的惯性力作为控制力,通过弹簧作用于主系统,与粘滞阻尼器联合使用,并以阻尼器命名。吸振器原理可用两自由度的、底层横梁上受简谐荷载作用的剪切型框架系统的受迫振动来说明,如图 1-5 所示。系统稳态振动响应(振幅)为

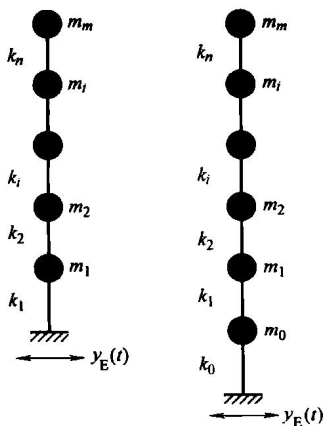


图 1-4 隔振计算简图

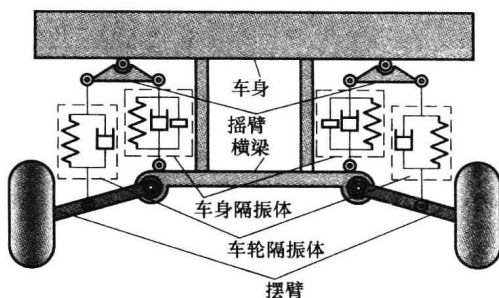


图 1-3 车辆隔振模型

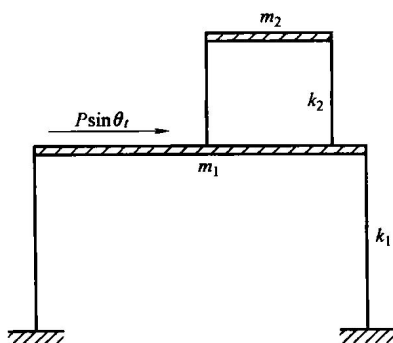


图 1-5 吸振器原理

$$Y_1 = \frac{(k_2 - \theta^2 m_2)P}{D_0}; Y_2 = \frac{k_2 P}{D_0} \quad (1-10)$$

式中, $D_0 = (k_1 + k_2 - \theta^2 m_1)(k_2 - \theta^2 m_2) - k_2^2$ 。可见, 当 $k_2/m_2 = \theta^2$ 时, 系统质量 m_1 的位移为零, 则吸振器质量 m_2 的位移幅值为 $Y_2 = -P/k_2$ 。若在系统上安装吸振器, 使其频率接近干扰力频率, 可消除或减小系统 m_1 的振动, 从而保证系统的安全。

质量为固体的有被动调谐质量阻尼器、摆式质量阻尼器等, 质量为液体的有调谐液体阻尼器、液压阻尼系统、质量泵等。质量泵利用液体振荡改变系统质量分布。质量系可以同时包括固体和液体, 如液压质量控制系统, 多安装于系统底层, 可以降低 50% ~ 70% 的振动, 增加 3 ~ 4 倍的阻尼。利用各种阻尼元件、吸能部件或摩擦支撑产生的阻尼力、塑性变形或摩擦力来衰减系统在外界干扰下的振动响应, 具有耗能能力强、低周疲劳性能好的特点。在系统上安装耗能装置后, 将使系统刚度、阻尼发生改变。

车辆耗能器主要有两类: 一类是与速度相关的粘弹型阻尼器; 另一类是与材料损失、能量耗散相关的摩擦耗能器。摩擦耗能器主要利用器件间的摩擦耗散能量。将摩擦耗能器安装在支撑上, 即成为摩擦耗能支撑。其典型装置如图 1-6 所示, 具有耗能能力强、效果稳定等特点。车辆典型摩擦耗能器如图 1-7 所示。

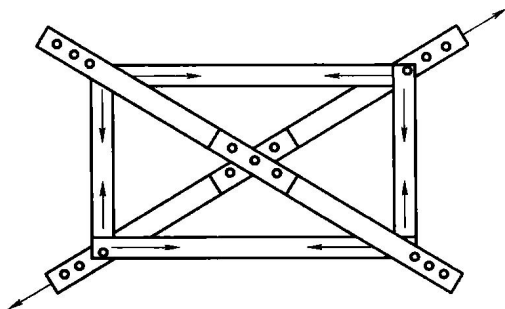


图 1-6 摩擦耗能支撑

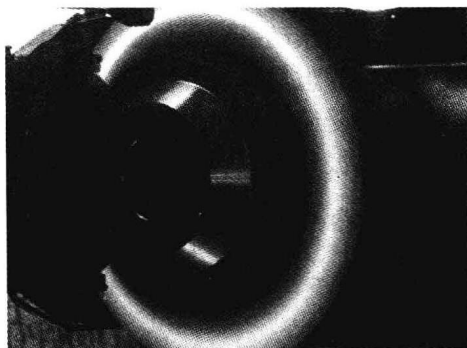


图 1-7 车辆典型摩擦耗能器

主动或半主动控制是主动的智能化控制, 它根据外界激励和系统响应预估所需的控制力, 从而输入能量驱使执行器施加控制力或调节控制器性能参数, 达到稳定控制效果。主动控制包括控制的目标函数、控制器设计和施加控制力的方法等。随着信息、控制技术的发展, 主动控制技术有了长足的进步, 一些控制方法和相应系统正日趋成熟, 并开始在机械和车辆领域得到了成功的应用。主动控制根据控制策略是否依赖系统响应或外界激励可分为闭环控制、开环控制和开闭环控制, 目前工程应用较多的是闭环控制。三类主动控制系统逻辑框图如图 1-8 所示。

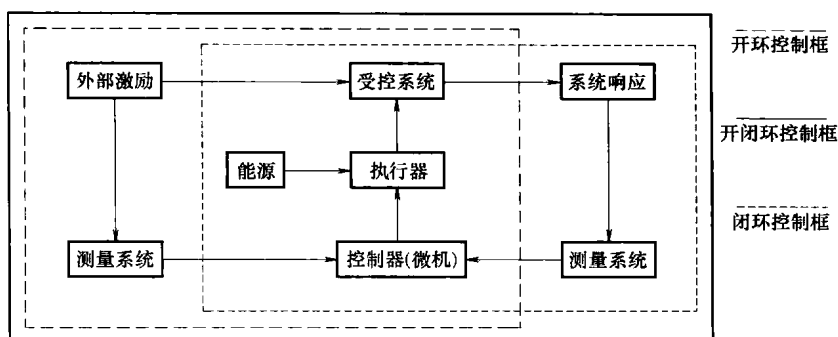


图 1-8 主动控制系统逻辑框图

三、稳定控制原理

随着对控制要求的提高,时滞控制和非线性控制正日益引起人们的关注。控制传感器测量、处理器计算、执行器驱动都需要一定的时间,导致控制力出现时间滞后现象。时滞不仅减弱系统性能,还会使控制系统的特性发生质的变化,由此引发系统运动稳定和分岔等一系列问题,尤其是在高模态控制的情况下。目前有三类时滞补偿的方法:理论型补偿、相空间补偿和时域补偿。前者将时滞系统描述为偏微分方程,在线计算量大,在时滞较小时,可以用 Taylor 级数截断简化计算或引入执行器的反馈迭代;次者通过反馈增益修正,对系统频率要求较严格;后者用运动补偿设计和动力补偿设计来预测响应,易受系统噪声干扰。三类方法各自的局限性都有待于完善。针对液压系统存在的时滞,利用时滞反馈对车辆摆动进行控制;采用时滞反馈控制非线性系统的混沌运动,也不失为一种积极的尝试。由于车辆系统稳定控制非线性,在行驶中表现出的非线性影响在被动控制中引入的非线性等,在实际系统中充满非线性问题,因此非线性控制方法的结果比线性控制方法更接近实际,也更加有效。近十几年才开始的对非线性系统控制的研究,主要是把优化控制法从线性系统推广到非线性系统。被动控制中非线性及整体的滞后都使控制复杂化。在控制反馈中使用速度和加速度反馈较传统的位移和速度反馈理想,因为加速度响应可从加速度传感器得到。另一种非线性控制方法是动态线性化,主要应用于摩擦型滑移隔离系统。使动态响应与某一特定的稳定线性系统模型吻合,以得到相应的控制力。把某一不确定系统分为互相耦合的子系统,主动反馈控制作用于其中之一。

车辆系统为连续体,有多个自由度,即使简化为离散系统,自由度也很可观。与自由度相比,能够从中获得反馈信息的测点却有限。如何依据有限的信息反馈去获知系统的全态响应,关系到控制的效果和造价。Kalman 滤波器在解决有限测点和预测控制的过滤技术中已得到广泛应用。优化输出反馈算法、模态缩

聚技术都有助于解决这一关键问题。观测器 - 补偿器法利用有限的系统响应测量, 通过观测器重建整个状态空间, 补偿器则对输出修正反馈、形成控制力并保证系统的稳定。直接输出反馈法, 是将测量的输出直接乘以与时间无关的反馈增益, 得到控制力。该法经过优化, 使在线计算变得简便易行。随着材料、控制、微电子和计算机技术的迅速发展, 特别是新型传感器和执行器研究取得突破性进展, 产生了智能系统这一崭新的现代系统概念。智能系统被定义为主动稳控系统。车辆智能制动稳定系统结构如图 1-9 所示, 它将传感、执行、控制逻辑电路、电子集成芯片、信号处理器、信息处理和人工智能环节以及数据传递总线、电源等与主系统高度融合在一起, 具有感知、智能逻辑判断与响应内外环境变化的能力, 实现系统自检测、自诊断、自校正、自适应、自修复和学习等功能。智能稳定系统从提出就受到工业界的高度重视, 目前, 该系统主要集中在传感器、控制器、执行器建模及控制等方面。

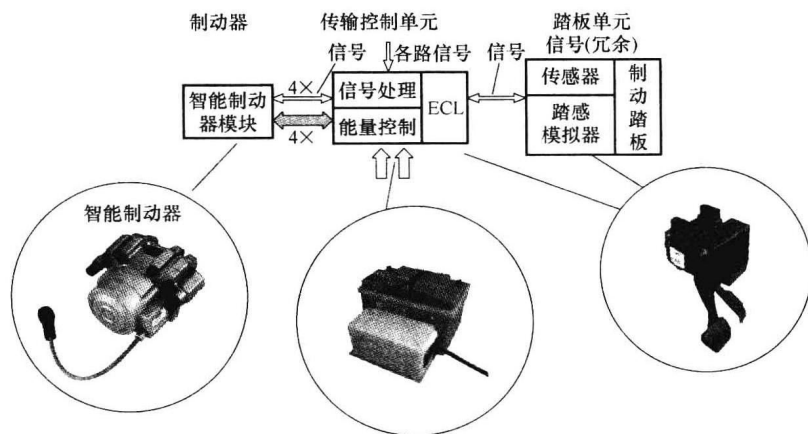


图 1-9 车辆智能制动稳定系统结构

智能稳定系统的重要内容是实现系统的主动控制, 它主要通过局部控制和全局控制方法来实现抑制。局部控制是利用自身配置的执行器 - 传感器, 直接实现反馈控制, 消耗残余能量, 缩短系统自由响应的衰减时间。全局控制目的在于抑制响应, 保证系统的全局稳定和提高鲁棒性。发展自适应控制、模糊控制、神经网络控制等控制技术, 优化系统稳定性, 已崭露出广阔的应用前景。

四、稳定控制算法

稳定控制技术以控制算法为主线, 近 30 年来提出的典型算法有经典、瞬时、极点配置、界限状态、预测、自适应、非线性、随机和模糊控制等。主动控制技术引人注目的进展是集传感器、控制器、执行器与系统为一体, 以稳定控制和降

噪为目标的智能系统的出现。当前热点是基于压电传感器和执行器的智能系统，控制策略为自适应控制、神经网络控制、非线性控制和混合控制等控制理论的新成果。基于逆传递函数的神经网络的控制方法能够从训练中建立复杂的非线性关系，并将其存储在连接权中；若用模糊规则改善神经控制器，并用来预测未来的反应，则减少了需要测量的量，改善了控制效果。

主动控制效果虽优于被动控制，但需要外界输入能量，装置复杂、造价高、可靠性不高，还需要经常维护，加上系统和算法繁难，对于车辆系统的应用存在困难。例如，达到底盘主动控制所需推力的制动器价格贵、能耗大，因此多采用半主动控制，其结构和传递函数模型，如图 1-10 所示。通过局部主动调节系统动力特性实现控制，能耗低，效果明显。

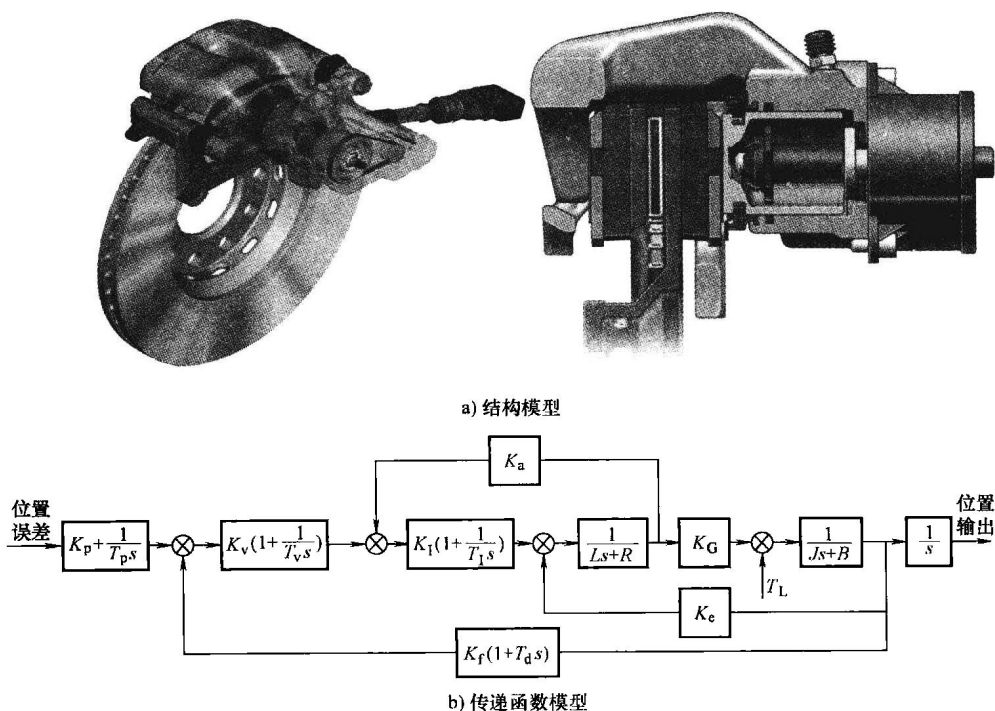


图 1-10 半主动控制制动器模型

图 1-10 所示中阻力矩 T_L 和负载转动惯量 J_2 分别由式 (1-11)、式 (1-12) 计算：

$$T_L = (FL/2\pi\eta) + T_f \quad (1-11)$$

$$J_2 = W(L/2\pi)^2 \times 10^{-2} \quad (1-12)$$

式中 F ——制动力 (N)；

η ——制动系统效率;

L ——位移量 (m);

T_f ——电动机摩擦转矩 ($N \cdot m$);

J_2 ——制动惯量 ($N \cdot m \cdot s^2$);

W ——电动机质量 (kg)。

所需数据参数见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 电动机和负载参数表

电枢电路参数				转动惯量		粘性阻尼		阻力矩
L	R	K_e	K_G	J_1	J_2	B_1	B_2	T_L
0.008	0.5	0.39	0.67	0.005	0.009	1.5×10^4	1.7×10^4	0.23

表中 L ——电枢电路电感 (H);

R ——电枢电路电阻 (Ω);

K_e ——电枢反电势系数 ($V \cdot s/\text{rad}$);

K_G ——力矩系数 ($N \cdot m/A$);

J_1 ——电动机转子转动惯量 ($N \cdot m \cdot s^2$);

J_2 ——负载转动惯量 ($N \cdot m \cdot s^2$);

B_1 ——电动机转子粘性阻尼系数 ($N \cdot m \cdot s/\text{rad}$);

B_2 ——负载的粘性阻尼系数 ($N \cdot m \cdot s/\text{rad}$);

T_L ——阻力矩 ($N \cdot m$)。

表 1-2 电流环、速度环和位置环参数表

电流环				速度环			位置环	
K_a	K_I	T_I	K_f	T_d	K_v	T_v	K_p	T_p
0.25	20	0.0003	0.02	0.03	2	0.002	0.12	0.6

表中 K_a ——电流环负反馈系数 (V/A);

K_I ——电流调节器比例放大系数;

T_I ——电流调节器时间常数 (s);

K_f ——速度环负反馈系数 ($V \cdot s/\text{rad}$);

T_d ——速度微分负反馈时间常数 (s);

K_v ——速度调节器比例放大系数;

T_v ——速度调节器时间常数 (s);

K_p ——位置调节器比例放大系数;

T_p ——位置调节器时间常数 (s)。

由图 1-10 可知, 在电流环中存在反电动势的交叉反馈作用, 它代表速度环

输出量对电流环的影响。在分析电流环时,要考虑它的影响自然是比较困难的。但由于实际系统中的电磁时间常数远小于机电时间常数,因而电动机中电枢电流的调节过程往往比速度的变化过程快得多,也就是说,比反电动势 U_e 的变化快得多,反电动势对电流来说只是一个变化缓慢的扰动作用。在电流调节器的调节过程中可以近似地认为 U_e 基本不变,即 $\Delta U_e \approx 0$ 。这样,简化电流环时,可以不考虑反电动势变化的动态作用,而将电动势反馈作用断开。图 1-10 所示的电流环和速度环动态性能指标见表 1-3。

表 1-3 电流环和速度环动态性能指标

电流环			速度环		
超调量 σ (%)	峰值时间/s	调节时间/s	超调量 σ (%)	峰值时间/s	调节时间/s
6	0.002	0.003	23	0.003	0.009

由表 1-3 可知,电流环阶跃时域响应曲线略有超调,速度环阶跃时域响应曲线超调量稍大,但系统曲线迅速上升,峰值时间都非常短,电流和速度都立即下降至恒定值,这样的阶跃响应是很理想的。为方便分析比较,选择库仑粘性摩擦的形式作为摩擦模型,确定决策变量及约束条件建立优化模型,即确定目标函数的类型及数学描述形式。为获取满意的过渡过程的动态特性,采用误差绝对值时间积分性能指标作为参数选择的最小目标函数。为了防止控制量过大,在目标函数中加入控制输入的平方项。选用下式作为参数选取的最优指标:

$$J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t)) dt \quad (1-13)$$

式中 $e(t)$ ——系统误差;

w_1 ——系统误差绝对值权值;

w_2 ——输入平方项的权值;

$u(t)$ ——系统输入指令。

为了避免超调,采用了惩罚功能,即一旦产生超调,将超调量作为最优指标的一项,此时最优指标为

$$\text{if } e(t) < 0 \quad J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 u^2(t) + w_3 |e(t)|) dt \quad (1-14)$$

式中 w_3 ——系统超调量的权值,且 w_3 远大于 w_1 。

确定表示可行解的染色体编码解码方法,即确定出个体的基因型及搜索空间等。采用实数编码方式。这种方式使个体的每个基因值用某一范围内的一个实数来表示,个体的编码长度等于其决策变量的个数。确定个体适应度的量化评价方法,即确定出由目标函数值 J 到个体适应度 $F(X_i)$ 的转换规则,在参数辨识中,适应度函数选择为