

高速列车 主动与半主动控制

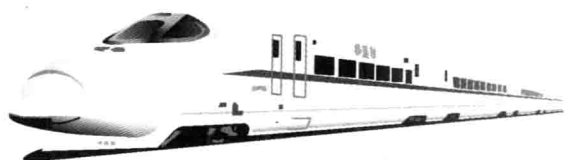
GAOSU
LIECHE

ZHUDONG YU BANZHUDONG KONGZHI

陈春俊◎著



西南交通大学出版社



高速列车 主动与半主动控制

GAOSU
LIECHE

ZHUDONG YU BANZHUDONG KONGZHI

陈春俊◎著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书系统而全面地阐述了高速列车主动、半主动控制系统的建模、理论、仿真、技术与试验方法。全书共分 11 章。第 1 章绪论主要介绍车辆主动与半主动控制的产生及其发展情况；第 2 章建立了高速列车横向半主动悬挂控制系统的数学模型；第 3 章介绍了一种轨道不平顺激励的频域采样模拟方法，包括平稳与非平稳轨道不平顺的模拟方法与实例；第 4 章介绍车辆横向振动的数值模拟方法及车体振动内部关系分析；第 5 章介绍了半主动悬挂广义反馈迭代学习控制思想及实现方法；第 6 章介绍半主动悬挂模糊控制算法及仿真；第 7 章为全主动悬挂性二次最优控制及仿真；第 8 章介绍了主动与半主动悬挂广义预测控制及仿真；第 9 章为全主动与半主动悬挂在滚动、振动试验台上的实车试验与结果分析；第 10 章介绍虚拟阻尼变结构半主动控制的思想及仿真；第 11 章为列车横向悬挂虚拟阻尼变结构半主动控制算法及仿真。

本书可供从事车辆动力学及控制、机械系统主动与半主动控制的科研、设计人员及工程技术人员阅读与参考，并可兼作高等院校相关专业的硕士、博士研究生教学用书。

图书在版编目 (C I P) 数据

高速列车主动与半主动控制 / 陈春俊著. — 成都:
西南交通大学出版社, 2015.3
ISBN 978-7-5643-3654-7

I. ①高… II. ①陈… III. ①高速列车—运行—控制系统 IV. ①U284.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 005794 号

高速列车主动与半主动控制

陈春俊 著

责任编辑 李晓辉

装帧设计 墨创文化

印张 15.5 字数 278 千

成品尺寸 170 mm × 230 mm

版本 2015 年 3 月第 1 版

印次 2015 年 3 月第 1 次

印刷 成都蓉军广告印务有限责任公司

书号: ISBN 978-7-5643-3654-7

出版 发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市金牛区交大路 146 号

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

定价: 45.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

随着既有线路列车的提速及高速动车组的快速发展，列车的轮轨耦合、流固耦合、机电耦合及弓网耦合相互作用加剧，由此会引发机车车辆或动车组的车体振动恶化，继而影响车辆的运行平稳性及乘坐舒适性。解决方案的一方面，提高线路的质量及加大对线路不平顺的维护与管理，优化列车设计速度与被动悬挂系统的结构与参数的匹配；另一方面，应将自动控制技术、传感器测试技术与计算机技术应用于车辆动力学及平稳性的主动、半主动控制。随着列车速度的提高，车辆主动、半主动悬挂控制已成为改善平稳性的有效措施。

笔者在攻读博士学位期间，参与西南交通大学牵引动力国家重点实验室承担的铁道部科技发展项目（No.2000J027）——高速客车主动、半主动控制技术研究，并完成了高速列车半主动控制系统的建模、仿真及滚动振动试验台上的实车主动与半主动控制试验。之后笔者长期致力于高速列车在轨道不平顺及气动载荷作用下车体的振动及主动控制研究，并获得中央高校基本科研业务费科技创新项目（No.SWJTU12CX038）及国家自然科学基金项目（No.51475387）资助。笔者从工程应用角度出发，开展了广义反馈迭代学习控制、模糊控制等研究，并提出虚拟阻尼变结构的半主动控制。在长期的研究过程中，在查阅大量国内外相关文献时，感觉仍缺乏系统介绍轨道车辆主动与半主动控制的著作，而国内却有一些从事车辆动力学及主动控制的学者、硕士研究生和博士研究生们在查阅笔者的博士学位论文后，纷纷发来一些感谢信或请教相关疑问的邮件。这使作者萌生了将相关的研究成果归纳、总结出版的初衷。

借本书出版之机，作者谨向资助、支持和关心过相关研究工作的单位和个人致以诚挚的感谢！首先感谢我的博士生导师沈志云院士和高品贤教授长期以来对作者的关心、指导和帮助。其次感谢翟婉明教授、张卫华教授、林建辉教授和曾京教授对作者在完成主动控制研究过程中提出的宝贵意见与无私帮助。对在牵引动力国家重点实验室主动控制试验过程中，吴学杰教授、

王月明教授、张利明教授和戴焕云教授的大力帮助与合作表示衷心感谢。在初稿完成过程中，硕士研究生何洪阳、孙宇、何发胜、屈国庆对书稿的整理付出了辛勤的劳动，这里一并表示感谢。作者还要对本书引用的所有参考文献的作者表示感谢。感谢中央高校基本科研业务费科技创新基金（No.SWJTU12CX038）和国家自然科学基金项目（No.51475387）资助。

限于作者水平，书中疏误之处在所难免，恳请读者批评、指正。

作 者

2015 年 1 月于西南交通大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 列车主动悬挂控制的提出	1
1.1.1 列车载荷变化或轻量化对平稳性影响	1
1.1.2 长波长轨不平顺的影响	3
1.1.3 空气动力作用的影响	3
1.2 列车主动悬挂控制系统分类及其原理分析	4
1.2.1 全主动悬挂控制系统	5
1.2.2 半主动悬挂控制系统	7
1.3 高速列车横向半主动悬挂系统的必要性	9
1.4 主动悬挂控制状况及其控制策略	10
1.4.1 天棚阻尼控制	10
1.4.2 PID 控制	12
1.4.3 线性最优控制	12
1.4.4 鲁棒控制	13
1.4.5 自适应控制	14
1.4.6 模糊控制	15
1.4.7 神经网络悬挂控制	15
1.4.8 预见控制	15
1.4.9 预测控制	15
1.5 可调阻尼减振器的研究现状	17
1.6 本书的主要内容	18
参考文献	22
第 2 章 半主动悬挂测控系统数学模型	27
2.1 模型与控制	27

2.2	横向半主动悬挂测控系统组成	28
2.3	车辆横向半主动悬挂模型建立	29
2.3.1	传统横向半主动悬挂模型	29
2.3.2	车辆横向半主动悬挂控制系统模型建立	31
2.3.3	17 自由度横向振动模型建立	31
2.3.4	3 自由度横向半车模型建立	34
2.4	测控系统输入通道数学模型建立	36
2.4.1	应变式加速度传感器模型	37
2.4.2	电压放大器模型	38
2.4.3	低通滤波器设计及模型	38
2.5	测控系统输出通道数学模型建立	40
2.5.1	可调开度减振器系统的输出通道建模	40
2.5.2	磁流变液可控减振器系统的输出通道模型建立	46
	参考文献	50
第 3 章	轨道不平顺数值模拟	53
3.1	传统轨道不平顺的数值模拟	54
3.2	时域改进轨道不平顺模拟方法	55
3.2.1	基本原理	55
3.2.2	功率谱采样计算频谱	56
3.2.3	时域美国轨道谱模拟	57
3.2.4	时域德国轨道谱模拟	60
3.3	空域轨道不平顺模拟方法	61
3.3.1	基本原理	61
3.3.2	功率谱采样计算频谱	62
3.3.3	空域美国轨道谱的模拟	62
3.3.4	空域德国轨道谱的模拟	64
	参考文献	65
第 4 章	车体横向振动内部关系分析	67
4.1	车辆横向振动数值仿真	67
4.1.1	基于 SIMULINK 的动力学仿真	67

4.1.2	基于 UM 的车辆动力学模型仿真实现	68
4.2	车体横向振动内部变量频谱分析	70
4.2.1	基于 SIMULINK 模型仿真分析	71
4.2.2	基于 UM 模型仿真分析	76
4.3	多目标矛盾关系研究	77
4.3.1	函数或序列间的矛盾度与一致度	78
4.3.2	矛盾指标问题	80
4.3.3	矛盾解的满意优化方法	81
4.3.4	矛盾分析方法在控制系统设计中的实例	81
4.4	车体横向振动内部变量矛盾分析	84
4.4.1	车体横向振动内部变量之间矛盾度分析	85
4.4.2	车体横向内部振动与合成横向振动的矛盾度分析	85
4.5	列车振动的评定	88
4.5.1	列车平稳性	88
4.5.2	乘坐舒适性	91
	参考文献	96
第 5 章	半主动悬挂迭代学习控制	98
5.1	传统反馈控制基本原理	98
5.2	迭代学习控制	99
5.2.1	迭代学习控制的发展状况	99
5.2.2	迭代学习控制的基本思想	100
5.3	广义反馈迭代学习控制	101
5.3.1	问题的提出	101
5.3.2	广义反馈迭代学习控制理论的基本思想	102
5.3.3	广义反馈迭代学习控制理论的算法实现	102
5.4	半主动悬挂广义反馈迭代学习控制仿真	104
	参考文献	109
第 6 章	半主动悬挂模糊控制	110
6.1	模糊控制理论	110
6.1.1	模糊控制的发展状况	110

6.1.2	模糊控制的特点	111
6.1.3	模糊控制的基本结构	111
6.2	半主动悬挂模糊 PID 控制	112
6.3	基于天棚阻尼的模糊控制	114
6.3.1	基于天棚阻尼的模糊控制原理	114
6.3.2	基于天棚阻尼的模糊控制仿真	116
6.4	车体摇头半主动模糊控制	118
6.4.1	车体摇头半主动模糊控制原理	118
6.4.2	半主动模糊控制仿真分析	124
	参考文献	126
第 7 章	全主动悬挂线性二次最优控制	127
7.1	线性二次型 (LQR) 最优控制原理	127
7.1.1	最优控制的数学模型	127
7.1.2	最优控制的求解	128
7.2	车辆横向状态空间模型的建立	131
7.3	全主动悬挂控制仿真分析	139
	参考文献	142
第 8 章	主动与半主动悬挂广义预测控制	143
8.1	预测控制理论的发展状况	143
8.2	预测控制的基本特征	144
8.2.1	预测模型	144
8.2.2	滚动优化	145
8.2.3	反馈校正	145
8.3	广义预测控制的基本原理	146
8.3.1	预测模型	146
8.3.2	滚动优化	148
8.3.3	在线辨识与校正	149
8.3.4	实现步骤	149
8.4	车辆主动、半主动悬挂广义预测控制仿真	151
8.4.1	全主动悬挂广义预测控制仿真分析	152

8.4.2	不考虑时延时半主动控制仿真分析	153
8.4.3	考虑时延时半主动悬挂的广义预测控制仿真分析	154
8.5	带模型误差修正的广义预测控制算法	155
8.5.1	j 步超前输出	156
8.5.2	最优控制律计算	159
8.5.3	带模型误差修正的参数辨识	159
8.5.4	广义预测控制的实现步骤	161
8.6	带模型误差修正的广义预测控制仿真	163
8.6.1	全主动预测控制仿真	163
8.6.2	不考虑时延时半主动预测控制仿真	163
8.6.3	考虑时延时半主动预测控制仿真	164
8.7	振动速度为指标的广义预测控制仿真分析	166
8.7.1	全主动预测控制仿真	166
8.7.2	不考虑时延时半主动预测控制仿真	167
8.7.3	考虑时延时半主动预测控制仿真	168
	参考文献	170
第 9 章	横向全主动与半主动悬挂控制试验	171
9.1	试验系统的组成	171
9.1.1	滚动与振动试验台概述	171
9.1.2	测控系统构成	172
9.2	原车被动悬挂试验	177
9.3	卸下原车二系横向阻尼器的试验	178
9.4	全主动悬挂预测控制试验	179
9.4.1	试验系统硬件组成原理	179
9.4.2	试验系统软件设计	181
9.4.3	试验结果	181
9.5	全主动悬挂模糊控制试验	182
9.5.1	全主动悬挂控制系统的构成	182
9.5.2	机电作动器的模糊控制试验	183
9.5.3	气缸作动器的模糊控制试验	184
9.5.4	液压作动器模糊控制试验	184

9.6 半主动悬挂预测控制试验	185
9.6.1 调节流孔液压减振器预测控制试验	185
9.6.2 磁流变液减振器的预测控制试验	187
9.7 不同悬挂控制试验结果比较	190
参考文献	190
第 10 章 虚拟阻尼变结构半主动控制	192
10.1 半主动变结构问题的提出	192
10.2 虚拟阻尼器	193
10.3 虚拟阻尼器的实现	195
10.3.1 弹性阻尼的实现	196
10.3.2 惯性阻尼的实现	196
10.3.3 复合阻尼的实现	197
10.4 可调阻尼实现虚拟阻尼器的示功图	198
10.4.1 可控阻尼实现虚拟阻尼器的示功图	198
10.4.2 实际可控阻尼实现虚拟阻尼器的示功图分析	200
10.5 阻尼变结构减振系统性能仿真分析	202
10.5.1 阶跃力作用时的减振情况	202
10.5.2 脉冲激励力作用时系统的衰减响应情况	204
参考文献	205
第 11 章 列车虚拟阻尼变结构半主动控制	206
11.1 列车虚拟阻尼变结构控制原理	206
11.1.1 传统阻尼天棚控制算法	206
11.1.2 天棚控制算法在车辆平稳性中的不足	208
11.1.3 虚拟阻尼天棚控制算法	209
11.2 车辆局部模型的虚拟阻尼变结构控制	211
11.2.1 连续型虚拟阻尼变结构天棚控制	211
11.2.2 开关型虚拟阻尼变结构天棚控制	215
11.2.3 自寻优复合型天棚控制算法	216
11.3 整车模型的虚拟阻尼变结构控制	219
11.3.1 不考虑时延时的连续控制仿真	219

11.3.2	不考虑时延时的开关控制仿真	222
11.3.3	考虑时延的连续控制仿真	224
11.3.4	考虑时延的开关控制仿真	228
参考文献		231
附 录		232
附录 I	列车参数表	232
附录 II	AS-TG 加速度传感器尺寸及参数	234
附录 III	试验数据通道记录表	236

第1章 绪 论

1.1 列车主动悬挂控制的提出

行驶中的列车受到轨道不平顺的激励、空气动力的作用、牵引力和制动力的作用等，列车将做多自由度的随机振动^[1]，从而影响列车运行的稳定性（或安全性）和平稳性（或舒适性）。

列车悬挂系统是轮对与构架、构架与车体之间一切传递力的装置的总称，它由弹性元件和阻尼元件组成^[2]。悬挂系统对于稳定性和平稳性的影响常常是相互矛盾的，若单从提高某方面的性能来进行悬挂系统的设计容易造成顾此失彼。传统列车悬挂系统的设计方案往往是综合线路质量、列车设计速度、载荷、强度等多方面的因素及多目标约束下折中优化的结果，因此不可能使列车各方面的性能都达到最佳运行状态。这种传统方法设计出的悬挂系统的参数在列车行驶过程中保持不变，悬挂系统也不需要外界提供能源，只是利用弹性元件的物理特性暂时将振动的动能储存起来，并在动能和势能的转化过程中，通过阻尼元件逐渐消耗振动能量，这种悬挂方式即为被动悬挂。如图 1-1 所示为车辆 1/4 垂向悬挂系统的物理模型。

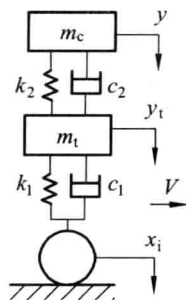


图 1-1 被动悬挂系统

当列车运行载荷、速度、线路等偏离被动悬挂系统设计条件时，列车的运行平稳性和舒适性将偏离优化指标而恶化，影响旅客乘坐舒适度。下面对被动悬挂车辆向轻量化、高速化发展造成车辆运行平稳性的影响进行简要的分析。

1.1.1 列车载荷变化或轻量化对平稳性影响

列车在运行过程中受轨道垂向不平顺位移信号 $x_i(t)$ 的激励，车辆构架与

车体将产生垂向的随机振动位移信号 $a_5 = k_1 k_2 y_t(t)$ 与。由如图 1-1 绘出被动悬挂系统的原理方框图如图 1-2 所示，车辆系统从轨道不平顺激励到车体振动的传递函数模型为

$$G(s) = \frac{Y_c(s)}{X_i(s)} = \frac{c_1 c_2 s^2 + (k_1 c_2 + k_2 c_1)s + k_1 k_2}{a_1 s^4 + a_2 s^3 + a_3 s^2 + a_4 s + a_5} \quad (1-1)$$

式中， $a_1 = m_i m_c$ ， $a_2 = m_i c_2 + m_c c_1 + m_c c_2$ ， $a_3 = k_1 m_c + k_2 m_c + k_2 m_i + c_1 c_2$ ， $a_4 = k_2 c_1 + k_2 c_1$ ， $a_5 = k_1 k_2$ 。

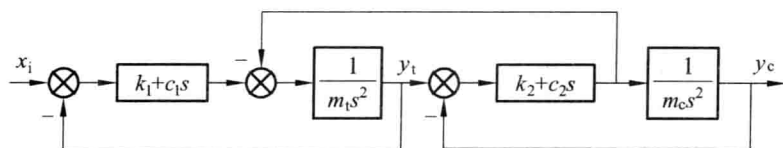


图 1-2 被动悬挂系统方框图

由图 1-2 可知，被动悬挂系统的二系阻尼与一系悬挂之间存在反馈耦合振动，二系阻尼器只能局部抑制车体的振动。根据附录 I 中准高速列车的悬挂系统参数，绘出式 (1-1) 在不同载荷 m_c 下，被动悬挂系统的频率特性 Bode 图如图 1-3 所示。由图可知：不同负载下被动悬挂系统的 Bode 图将不同，载荷加重有利于提高平稳性。但从轨道使用磨损和动力能耗成本角度则希望列车向轻量化发展。目前，国内外动车组的车体大多采用铝合金材料使车体向轻量化发展。而对于转向架，特别是对于高速或重载转向架，从强度和耐久性方面考虑，要轻量化则比较难，导致车体重量在整车中的相对比率呈下降趋势，也就是说，车体轻量化导致平稳性恶化。

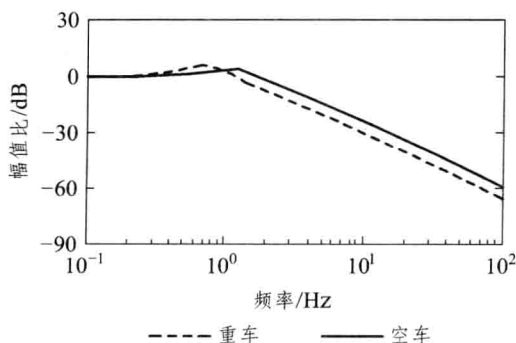


图 1-3 空/重载时，系统频率特性

1.1.2 长波长轨不平顺的影响

列车的二系横向固有振荡频率是由车体质量和二系弹簧刚度在设计制造时确定的,通常为 1 Hz 左右。图 1-3 中在低频固有频率处输出振动幅值达到轨道不平顺输入的 1.5 倍左右,该低频振荡频率并不受列车提速变化而变化。然而,对实际测出的轨道不平顺功率谱密度(PSD)分析可知,波长越长,轨道所拥有的不平顺能量就越大。如图 1-4 所示在不同速度下德国高速轨道方向不平顺谱的数值模拟功率谱密度曲线,可见不同速度下,同一频率处的不平顺幅值是不一样的,即运行速度越高,列车受长波不平顺的影响就会越大。低频振动的轨道不平顺的波长与速度成正比^[3-6],这意味着列车提速对轨道的不平顺要求更高,否则振动剧烈、平稳性变差。要维持高精度的长波长轨道不平顺,维修成本非常高^[7]。

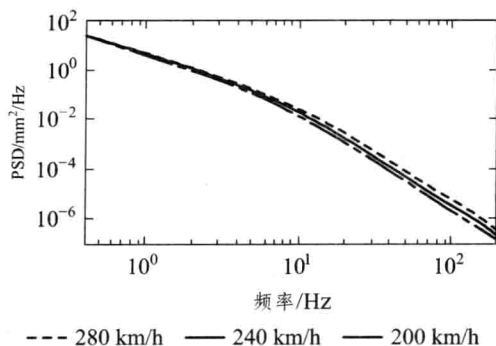


图 1-4 方向不平顺谱与速度关系

1.1.3 空气动力作用的影响

空气动力对高速列车振动的影响主要表现在明线会车、隧道通过及隧道会车时,会车压力波及隧道压力波直接作用于车体,而加剧车体的振动。这种振动是由会车和隧道内车体周围空气湍流造成压力差引起的,这一现象在有受电弓的车厢和尾车上更为明显^[3]。由于激振源是空气动力,而且是直接作用于车体,要抑制振动需要很大阻尼力,阻尼力增加又会对轨道不平顺的激励加剧。因此,在隧道外有较好的悬挂装置在隧道内却较差,且车速越高,这种影响就愈大。要选择对这两种情况都有效的阻尼力,用这种传统的被动悬挂是无法实现的。



上述分析表明,被动悬挂的列车在理想设计条件下运行时,列车的动力学性能在一定程度上能满足。但是,其本身的结构决定了被动悬挂系统的列车有下列固有的特点:

(1) 车体及转向架振动中,低频振动固有频率与总的静挠度有关,即一系和二系总静挠度平方反比关系,容易产生较大的静挠度^[2]。

(2) 悬挂力是由悬挂元件两端相对运动位移和力的大小而被动产生的,只能抑制局部的运动状态,不能在全局运动范围内快速抑制振动。

(3) 列车的运行工况发生变化时,如在不同轨道不平顺等级的线路上行驶;在同一线路下以不同速度行驶;不同载荷下行驶等由于悬挂参数的不变性,其列车运行平稳性将偏离设计指标而使平稳性变差。

(4) 列车的轻型化、高速化都将对平稳性产生不利的影响。

从自动控制理论的观点来看,被动悬挂系统是开环控制系统。开环控制系统具有结构简单、成本低且不存在由于反馈带来的稳定性问题等优点,即开环控制系统严格运行于设计条件时,系统性能指标能够确保。然而,一旦系统在运行过程中的结构参数发生变化、运行工况发生变化时,系统自身不具有纠错能力,因此性能立即变差。

开环系统的特点决定了列车被动悬挂系统不可避免地存在上述缺点,即被动悬挂列车不能从根本上提高车辆的性能。针对被动悬挂系统的缺陷,国外学者在 20 世纪 70 年代将自动控制理论应用到随机振动过程中,构成实时闭环振动主动控制,即主动悬挂控制技术。

1.2 列车主动悬挂控制系统分类及其原理分析

列车主动悬挂控制是自动控制理论在列车随机振动(或平稳性)控制上的应用,相对于无反馈的被动悬挂系统而得名。列车主动悬挂控制是指列车在运行过程中,通过振动传感器实时地检测车体和根据是否需要是否检测构架振动大小,将检测出的振动值按一定的评价指标或控制算法计算出相应的控制量,将控制量通过驱动放大作用于执行元件或执行机构改变列车悬挂系统特性,即实时调节悬挂系统的“软硬”特性以适应列车不同线路和不同运行状况,最大限度的抑制车体振动,从而提高列车运行平稳性^[8-11]。

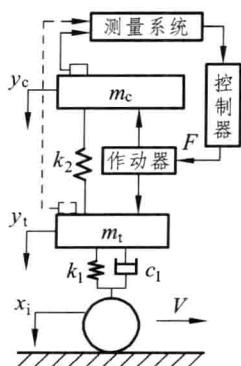
主动悬挂按其控制过程中系统是否需要外界提供大量能量将主动悬挂控制分为全主动悬挂控制和半主动悬挂控制。全主动悬挂控制工作过程中,

作动器需要系统提供大的能量来抑制系统的振动，通常又称有源主动悬挂控制或主动控制；半主动悬挂控制在工作过程中，执行器即为系统可调阻尼器，无需系统提供大量能量来抑制振动，而是仅仅需要较小的能源来改变系统的阻尼，通过半主动悬挂控制又称为无源主动悬挂控制或半主动悬挂控制^[12-14]。

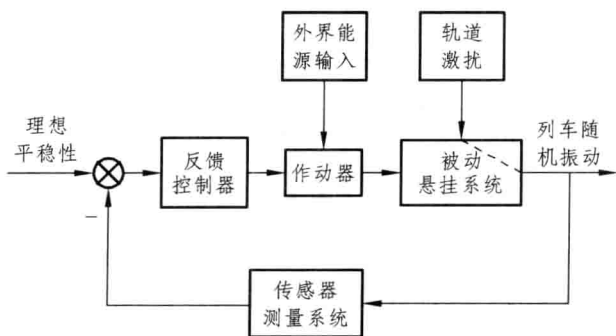
本书在无特别说明时，主动悬挂控制是指全主动悬挂控制和半主动悬挂控制的总称；全主动控制是指采用机电作动器、液缸作动器或气压缸作动器代替列车二系横向阻尼器的主动悬挂控制；半主动悬挂是指采用液压可调阻尼器或磁流变液的可调阻尼器作为列车二系悬挂的主动控制。

1.2.1 全主动悬挂控制系统

典型的全主动悬挂由外界能源输入系统，作动器（液压作动器、气动作动器、机电作动器等）、传感器测量系统及反馈放大系统组成，其结构如图 1-5（a）所示，图 1-5（b）为全主动悬挂控制系统原理方框图。传感器实时检测列车的振动，通过一定的控制算法，控制作动器产生阻碍车体振动的力，从而提高运行平稳性。图 1-6 为全主动悬挂系统结构方框图，图中 $G_c(s)$ 为控制器传递函数， $G_v(s)$ 为驱动机构和作动器传递函数， $H(s)$ 为传感器及信号处理传递函数。为从频率特性分析全主动控制系统控制性能，设控制算法采用比例控制，且令 $G_c(s)G_v(s)H(s) = K_p$ ，则全主动悬挂控制的传递函数为



（a）全主动悬挂示意图



（b）全主动悬挂控制原理方框图

图 1-5 全主动悬挂控制系统