

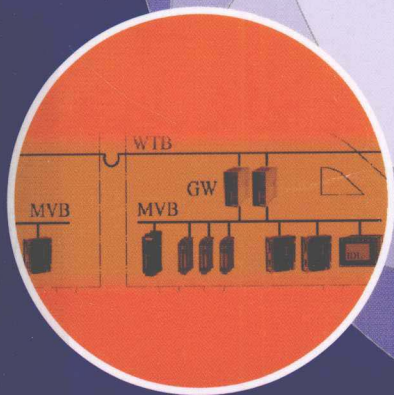
GAOSU LIECHE
WANGLUO YU KONGZHI JISHU

 高速铁路新技术系列教材 机车车辆

高速列车 网络与控制技术

(第二版)

倪文波 王雪梅 编著
李 芾 主审



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高速铁路新技术系列教材——机车车辆

高速列车网络与控制技术

(第二版)

倪文波 王雪梅 编著

李 芾 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书主要介绍应用于我国铁道机车车辆上的计算机通信网络技术及主动控制技术。全书分:计算机网络及通信技术原理与基础;应用于我国铁道机车车辆的 TCN 网络技术、LonWorks 网络技术、ARCNET 网络技术、WorldFIP 网络技术、CAN 总线技术;主动控制原理;主动控制应用实例等内容。

本书是高等学校铁道机车车辆专业教材,也可供铁路职业技术学院相关专业师生及从事铁道机车车辆专业的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速列车网络与控制技术/倪文波,王雪梅编著
—2版. —成都:西南交通大学出版社,2010.7
(高速铁路新技术系列教材. 机车车辆)
ISBN 978-7-5643-0730-1

I. ①高… II. ①倪… ②王… III. ①计算机网络—应用—高速列车—教材②计算机控制—应用—高速列车—教材 IV. ①U292.91—39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第127242号

高速铁路新技术系列教材——机车车辆

高速列车网络与控制技术

(第二版)

倪文波 王雪梅 编著

*

责任编辑 王 旻

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蓉军广告印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸:185 mm×260 mm 印张:22.25

字数:556千字 印数:3 001—5 000册

2008年5月第1版 2010年7月第2版 2010年7月第3次印刷

ISBN 978-7-5643-0730-1

定价:42.00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

第二版前言

本教材第一版发行以来已有两年有余，在这段时间内，我国高速客运专线及动车组又有了飞速发展。不仅开行了 350 km/h 的动车组，在武广线上完成了 384 km/h 的世界最长动车组的重联试验运行。同时开始研制 400 km/h 速度的新一代动车组。因此原教材部分内容显得有些陈旧，不能反映我国高速动车组网络系统的最新发展，需要更新再版。

再版教材主要增加了 350 km/h 速度的 CRH₃ 型动车组的网络系统实例，更新了主动控制技术中部分计算实例，并修正了原书当中的部分插图和文字，使其能更好地反映我国高速动车组网络系统及主动控制技术的发展趋势。

编者

2010年6月

吉 琳

2008年1月

第一版前言

本教材是根据高等学校铁道机车车辆专业“列车控制网络”课程教学大纲编写的。随着中国铁路跨越式发展,我国已经开行了200 km/h的高速动车组,中国铁路进入了高速时代。计算机技术在机车车辆上的应用日益增多,列车通信网络及主动控制成为了高速列车控制中不可或缺的关键技术。介绍列车通信网络及主动控制技术的教材,有利于学生较快掌握相关先进技术。应用于铁道机车车辆上的计算机通信网络种类较多,本着少而精、举一反三的原则,着重介绍了符合国际标准的TCN网络技术和LonWorks网络技术,并对ARCNET网络技术、WorldFIP网络技术、CAN总线技术也进行了阐述,以期达到启发性教学的目的。

本书在编写过程中,根据铁道机车车辆专业学生初次接触计算机网络及车辆主动控制的特点,从理论基础开始,以工程应用实例为对象展开论述。同时,还介绍了国外技术的发展动态。

本书内容主要包括计算机网络及通信技术原理与基础;应用于我国铁道机车车辆的TCN网络技术、LonWorks网络技术、ARCNET网络技术、WorldFIP网络技术、CAN总线技术,主动控制原理,主动控制应用实例等。

本书由西南交通大学倪文波、王雪梅主编,李芾主审。

在编写过程中,铁道部司机培训考试中心提供了大量新型高速动车组的资料,西南交通大学教务处提供了到日本考察高速铁路的机会,中国北车集团唐山机车车辆工厂孙邦成总工程师、中国南车集团浦镇车辆工厂袁伟也提供了相关资料,研究生于凤辉绘制了书中插图,在此表示深深的感谢!

编者

2008年1月

<h1>目 录</h1>	
第 1 章 绪 论	1
1.1 国内外铁道车辆主动控制与网络技术的发展	1
1.2 国内外铁道机车车辆主动控制发展概况	3
1.3 国内外列车通信网络技术发展概况	11
1.4 本书的主要内容	20
第 2 章 网络与通信基础	21
2.1 数据通信基础	21
2.2 网络互联参考模型	53
2.3 串行通信接口技术	66
2.4 高级数据链路控制规程 (HDLC)	79
第 3 章 列车通信网络	94
3.1 TCN 应用范围	94
3.2 TCN 总述	95
3.3 MVB 总线	96
3.4 WTB 总线	108
3.5 实时协议	125
3.6 TCN 协议与 OSI 的一致性比较	145
3.7 TCN 网络管理	147
3.8 TCN 在我国高速动车组上的应用	148
第 4 章 其他控制网络	190
4.1 LonWorks 网络控制技术及其应用	190
4.2 ARCNET 网络	221
4.3 WorldFIP 总线	243
4.4 CAN 总线	252
第 5 章 主动控制技术	274
5.1 主动控制的基本原理	274
5.2 主动控制和半主动控制	280
5.3 半主动减振器的基本原理	283

5.4	控制理论.....	288
5.5	半主动控制技术的应用实例：“蓝箭”动车的二系横向半主动悬挂系统	294
第 6 章 列车通信网络与主动控制技术应用实例：摆式列车倾摆控制系统		304
6.1	摆式列车的基本原理.....	304
6.2	摆式列车的倾摆控制系统结构与功能.....	305
6.3	摆式列车的相关技术.....	317
6.4	摆式列车倾摆作动系统设计实例	340
参考文献		346
11	.....
20	.....
31	.....
32	.....
66	.....
70	.....
94	.....
94	.....
97	.....
99	.....
108	.....
126	.....
143	.....
147	.....
148	.....
190	.....
190	.....
231	.....
243	.....
252	.....
274	.....
274	.....
280	.....
283	.....

第1章 绪论

高速、舒适是世界铁路发展的主要目标和方向。

1964年10月1日,世界上第一条高速铁路——日本东海道新干线(全长515.5 km)通车,最高运行速度达到210 km/h,从而拉开了世界高速铁路的序幕。利用高速铁路的主干作用和现代化技术,带动了铁路自身的技术进步,逐步使有“夕阳产业”之称的铁路运输转变成“朝阳产业”。其后,又有法国(1981年始)、德国(1991年始)、意大利(1992年始)、西班牙(1992年始)和英国、瑞典、韩国等国家取得了高速铁路的成功经验。此外,美国、俄罗斯、比利时、荷兰、中国以及中国台湾省等国家和地区也正在筹建或已建成高速铁路,高速铁路已成为推动国家和地区经济发展的强大动力。目前世界上高速列车的最高运行速度已达到350 km/h。2007年4月3日,法国阿尔斯通(ALSTOM)公司的V150高速动车组试验速度已达到574.8 km/h。2007年4月18日,我国铁路进行第六次大提速,开行了200 km/h的高速动车组,部分线路区段运行速度达到了250 km/h。2009年12月9日,在武广客运专线上达到了两车重联情况下的世界高速铁路最高394.2 km/h的运营速度。

1.1 国内外铁道车辆主动控制与网络技术的发展

列车速度的提高涉及诸多问题,需克服许多技术难点,其中之一是要求机车车辆在高速运行时满足平稳性的要求,使乘客感到舒适,与此同时还要保证行车安全。由于列车运行速度越高,列车的振动受长波、长轨道不平顺的影响就会越大;轨道不平顺波长越长,所拥有的激扰能量就越大,车辆的振动也因此而增大。所以要求高速机车车辆自身具有较高的改善振动性能的能力,特别是改善横向振动性能的能力。以系统动力学的观点,欲改善系统的性能,可以从两方面进行考虑:要么从系统的输入来考虑,要么改进系统本身结构。对铁道机车车辆来说,既需要通过提高线路标准,依靠保持高水准的轨道状况降低轨道不平顺来改善系统输入,又要通过改进系统本身结构使车辆适应各种不同的线路工况和不同的速度级别。目前,通过改善机车车辆悬挂系统以获得较好的振动性能已成为各国铁道机车车辆工作者争

先研究的热点。

机车车辆悬挂系统的结构和参数,一般是根据实际运用条件,包括车速、曲线半径、超高,以及线路不平顺等,综合考虑机车车辆各方面动力学性能,经过综合优化设计得出的。

悬挂参数的选择对机车车辆动力学性能的三个方面的(平稳性、稳定性和曲线通过性能)有不同的影响,常常发生冲突,互为矛盾。如一系悬挂参数的选择要兼顾横向稳定性和曲线通过性能这一对矛盾,二系悬挂参数的选择要考虑舒适性和横向位移的关系。

传统的机车车辆悬挂系统设计只能是一种折中方案而不可能使各个方面的性能都达到

最佳。

传统的机车车辆悬挂系统主要由弹性元件和阻尼元件组成。它们在工作时并不需要外界能源，只能耗散或暂时存储能量，因此也称为被动悬挂。被动悬挂的最大缺陷在于其悬挂系统特性仅与连接悬挂元件的局部相对运动有关，其悬挂特性在车辆运行过程中不能够调节，即悬挂系统的特性与外部激励无关，只能表现为非“软”即“硬”的特性，不具有适应复杂线路的能力，从而限制了机车车辆动力学性能的进一步改善。

随着机车车辆运行速度的进一步提高，运行平稳性、稳定性和曲线通过性能三者之间的矛盾将进一步加剧，被动悬挂的局限性也愈来愈明显，传统被动悬挂方式的潜力随着车速的不断提高也逐渐达到极限。

从 20 世纪 70 年代开始兴起的主动控制技术为进一步提高机车车辆动力学性能开辟了新的途径。从理论上说，合理的主动悬挂设计可以兼顾车辆动力学的平稳性、稳定性和曲线通过性能，使三方面性能都达到最优。

随着计算机技术、信息技术、机电和自动控制技术、现代加工技术及新材料、新工艺等一系列高新技术的蓬勃发展，使得列车高速运行时为保证其平稳性、舒适性与安全性而采用主动控制技术已成为可能。

计算机技术的发展使其在机车车辆上的应用日益增多，如牵引、供电、制动系统，以及主动控制等都广泛应用了计算机技术，导致车载计算机设备的数量增加。如何将大量的信息安全、快速、可靠、准确地在整个列车上传输，以及如何实现整个列车所有车辆计算机设备之间的信息交换和共享，从而实现列车安全运行、远程故障诊断和维护成为机车车辆的另一个重要研究方向。

另外，列车控制的特点也促进了列车通信网络的发展。由于列车设备具有分散的特点，各个设备是分散在各个编组的机车车辆中，要使分布于列车中各车辆的设备协调工作，就必须借助于一个分布式的计算机控制系统，即列车通信网络来实现。例如，在动力分散的列车中，如何保证在牵引过程中各动车上的牵引电机协调工作或柴油机的重联控制，以及在列车制动时如何协调各车辆间的制动力分配；在摆式列车中如何让每节车辆在进入曲线时依次及时倾摆，等等。这些控制技术离开列车通信网络是难以实现的，故列车通信网络成为了列车中不可或缺的关键。

列车通信网络也是伴随着计算机技术在机车车辆上的应用而发展的。20 世纪 70 年代末至 80 年代初，车载微机的雏形分别在西门子（Siemens）公司和 BBC 公司出现，开始仅仅是用于传动装置的控制。随着微机技术和通信技术的发展，列车通信网络在初期的串行通信总线的基础上应运而生，并从原来不同公司的企业标准发展为国际标准，逐步形成了列车通信与控制系统的标准化、模块化的硬件系列以及全方位的开发、调试、维护、管理软件工具。

TCN 和 LonWorks 这两个网络标准因各自的优良特性而被相关国际组织确定为国际列车通信网络标准。

1999 年，IEC（International Electron Committee）把 TCN（Train Communication Network）作为标准（IEC 61375-1）。

1999 年，IEEE（Institute Electrical and Electronics Engineers）制定的列车通信标准 IEEE 1473—1999 包含了 TCN 和 LonWorks，即 1473-T（TCN）和 1473-L（LonWorks）。

除此之外，法国阿尔斯通（ALSTOM）公司将 WorldFIP 作为标准通信协议应用于其开发

的 AGATE 列车控制系统, 并成功应用于 TGV 高速列车。日本采用 ARCNET 网络技术应用于新干线高速列车的控制系统, 都取得了巨大的成功。目前, 我国很多自行开发的动车组都已采用了列车通信网络技术。

随着人们生活水平的不断提高, 旅客对乘坐舒适性以及对旅行中的娱乐和资讯的需求也更大。因此, 在世界高速铁路列车运行速度达到 300 km/h 之后, 发展列车主动控制与网络技术、提高旅客乘坐的软环境成为各个国家机车车辆发展的另一重要技术方向。

1.2 国内外铁道机车车辆主动控制发展概况

主动控制装置的雏形可追溯到 20 世纪 20 年代出现的采用电磁阀控制的缓冲器, 直到 1960 年前后才出现较复杂的振动主动控制系统, 其中以解决航空工程中出现的振动问题为主。较为成功的运用实例是飞机突风减缓。50 年代末期, 在大型柔性高速飞机研制过程中, 要求降低结构的动载荷, 而结构模态主动控制是一个有效的方法。1959 年为对 B-52 型飞机机身侧向弯曲模态进行主动控制, 综合了一个机身侧向阻尼系统, 用置于后机身作反馈用的加速度传感器的输出来操纵方向舵调整片, 达到控制机身 1.25 Hz 反对称模态振动的目的。接着在美国空军飞行动力实验室 (AFFDL) 的规划下, 进行了两项大规模的关于结构模态控制的研究, 一项是 1966 年开始的“载荷减轻与模态镇定”(LAM6), 另一项是 1967 年开始的“突风减缓与结构动力增稳系统”(GASDSAS)。前者通过飞行控制系统用常规的操纵面降低亚音速柔性大型飞机的突风载荷与控制机翼结构模态, 能降低机翼疲劳损伤率近 50%; 后者在 XB-70 型飞机上进行, 将结构模态的主动控制推广用于超音速飞机上。到 1971 年 9 月为止, B-52G、B-H 型飞机都装上了抑制低频结构模态振动的系统。

在航天工程领域, 由于大柔性结构(如空间站、大型天线、太阳能电池板、光学系统等)的出现, 其模态频率低且密集、阻尼小, 这类结构在太空运行时, 一旦受到外界干扰, 其大幅度的自由振动要延续很长的时间, 对其正常工作将造成不利影响, 甚至引起失效。有些柔性航天器属精密空间结构(如光学干涉仪等), 对其外形及对中性都有很高的要求。基于上述的特点与严格的要求, 传统的被动振动控制难以满足要求, 人们寄希望于新颖的振动主动控制技术。使其成为在振动主动控制研究领域中最活跃的一个方面, 研究的中心问题是提高结构的模态阻尼与减小对外扰的响应。

近年来, 利用材料压电、磁致伸缩、形状记忆等特性研制的新型元件和作动器的出现, 为振动主动控制的实现扫除了一大障碍。另外, 还出现了主动结构, 即将结构中受力元件与作动器合一, 使结构更加紧凑、重量减轻。

近 30 年来, 振动主动控制的研究已从航空、航天工程扩展至其他各工程领域, 吸引了越来越多的从事力学、控制、计算机及材料等科学的研究人员, 促进了这门交叉学科的发展。

在土木工程领域, 由于高层建筑与大跨度桥梁的出现, 为保证结构的完整性与其他要求(如建筑中人的舒适性等), 都要对由随机性外载(如风、地震等)引起的响应进行控制。近几年来研制的主动式有阻尼动力吸振器取得了很好的减振效果。

在机械工程领域, 采用主动控制技术消除机器人臂在终端位置处的振动。机器人自带作动器(如力矩马达)、传感器与控制计算机, 这些为主动控制的实现准备了现成的条件。随着

机器人臂从刚性向柔性发展,必然带来更为突出的、需解决的振动问题。抑制挠性转轴通过临界转速的振动主动控制研究,是当今转子动力学的研究热点之一。磁轴承及可控油膜轴承的出现,为这类控制的实现创造了有利的条件。超精细加工要求其装置有很好的抗外扰能力,近年来出现利用压电或磁致伸缩材料构成的作动器来实现六自由度主动隔振。

在交通运输工程领域,为改善乘坐品质,人们在车辆主动、半主动控制方面做了大量的理论与试验研究工作,目前已研制出用于车辆减振的主动悬挂系统和半主动悬挂系统。

从 20 世纪 70 年代开始,英国、美国、日本及德国等铁路发达国家对主动控制技术在机车车辆的推广运用方面进行了大量的理论和试验研究工作,已经取得了一些阶段性成果,并开始应用于实际。

在铁道机车车辆主动控制研究领域,人们的研究工作主要集中在以下几个方面:① 曲线上的平稳性研究——摆式列车的研究。② 直线上的平稳性研究——横向、垂向平稳性研究。③ 稳定性研究。④ 可控径向转向架研究。⑤ 可控独立轮对研究。

经过几十年的研究,在上述领域中,目前已经在①、②和④方面取得了成功应用,如摆式列车、高速动车组的横向性能主动控制、城轨车辆主动径向转向架方面,并取得了较好的经济效益。

1.2.1 摆式列车的国内外发展

摆式列车是主动控制技术在机车车辆上取得最大成功应用的典范。

机车车辆在通过曲线时产生离心力,其离心力的大小同质量和速度的平方成正比,与曲线半径的大小成反比。为了降低离心力,通常采用的办法是设置外轨超高。在有超高的曲线上,车体向曲线内侧倾斜,使得离心加速度被重力加速度的横向分量抵消一部分。

超高的大小是根据曲线半径和列车通过曲线的速度来确定的,考虑到列车运行的安全性,一般在客货混跑的线路上,超高是根据货车的平均速度来确定的,所以此超高的大小对于客车是远远不够的。为改变这种状况,可以在列车进入曲线时,使车体向曲线内侧除超高倾斜角外再附加一个倾摆角度。这实际上相当于增加外轨的有效超高,以提高抵消离心加速度的重力加速度的横向分量,从而提高列车通过曲线的速度。

车体向曲线内侧的倾摆角度越大,则曲线通过速度提高就越大。使车体倾摆的方法有两种:被动倾摆和主动倾摆。靠车辆在通过曲线时的离心力作用,使车体绕其摆心转动,不需要外加动力,这种倾摆的方式被称为被动倾摆;主动倾摆是通过附加作用力的方式使车体倾摆。被动倾摆的倾摆角比较小,其结构简单,不需要作动器、控制及信号采集系统。而主动倾摆的倾摆角大,提高速度的幅度大,但必须具备一套可靠的作动器、控制和信号采集系统。根据欧洲国家的运用经验,采用主动式摆式车体,可将未平衡离心加速度从 1.2 m/s^2 提高到 2.3 m/s^2 ,这样可使列车速度提高 30% 左右,旅行时间下降 25% 左右。摆式列车的基本原理及倾摆控制技术将在后面章节详细介绍。

早在 1928 年,德国人 Kruckenberg 就提出了摆式列车的原理并画出了设计图,但由于当时制造和控制技术的限制,其设计思想直到 1935 年才由瑞士 SIG 公司在 BLS 铁路上实现。其基本原理是将车体通过滚子支撑在转向架上的弧形枕梁上,当离心力作用于车体时能使其

在枕梁上摆动,从而产生一个附加倾摆角度,并采用 Jacob 径向转向架。但这个试验车并没有得到真正的运用,真正付诸实际运用的摆式车体设计思想是 1943 年西班牙 Talgo 公司开发的摆式系统。在经历了近 40 年的不断改造和试验后,Talgo 公司终于在 1980 年将按此开发的 Talgo Pendular 摆式系统正式投入批量生产。

法国是摆式列车的创始国之一,继 1940 年试验以后,法国于 1956 年研制成功了车体最大倾摆角为 18° 的电动摆式列车。在该车进行了 10 年的试验后,法国于 1970 年试制了 2 辆摆式客车,并进行了试验。因该车结构过于复杂而导致维修困难,于是法国铁路选择了通过改进曲线来提高车速的途径,开始发展高速铁路。直到 20 世纪 90 年代中期,法国才又开始研制摆式 TGV,并制造出样车。

英国的摆式列车研究可以追溯到 20 世纪 60 年代中期,并于 70 年代研制出了 APT-P 型摆式电动车组,1980 年 12 月开始进行试验。几经挫折之后,于 1981 年进行了试运营。在此间的一次以 210 km/h 速度运行中,由于倾摆机构出现故障,发生旅客在车内摔倒等事故。此外,其受电弓的中间位置保持机构也经常发生故障,以及其他一些原因,英国停止了 APT 摆式列车的研究。

意大利是研究主动摆式列车的发源地,同时也是研制和开发最为成功的国家。因为意大利是一个山区国家,山地和丘陵占全国面积的 80% ,铁路曲线较多,为提高曲线区段的列车速度,1957 年 Fiat 公司开始研究并制造出模拟试验样机。1975 年,该公司制造了两辆编组的实用性样车 ETR-401 电动车组,即第一代 Pendolino。它采用加速度传感器和陀螺仪来检测进入曲线的状态,并发出车体倾摆指令,利用液压作动器使车体倾摆。随后,Fiat 公司又开发了第二代和第三代 Pendolino 摆式列车,并出口到其他国家或转让其技术。

早在 20 世纪 60 年代,德国 Wegmann 公司开发的被动摆式系统就在一辆内燃动车组上进行了试验,但其效果不尽如人意。70 年代中期,又在其他动车组上进行试验,其性能虽有所改善,但仍未达到预想的结果。80 年代末,为适应提速的需要,德国联邦铁路(DB)对具有主动倾摆的意大利 ETR401 列车和被动倾摆的西班牙 Talgo 列车进行了线路试验,并订购了 6 列 Talgo 摆式列车和 20 列采用意大利 Fiat 倾摆技术的 VT610 摆式内燃动车组。

此举激发了德国机车车辆制造业对开发和研制摆式列车的热情。AEG 公司首先在 1995 年研制出世界上第一列采用机电式倾摆系统的摆式内燃动车组 VT611,随后德国 Talbot 公司首次在上世界上采用了在抗侧滚扭杆上安装作动器的倾摆技术,并于 1996 年在 VT614 内燃动车组上进行了成功试验。1998 年,Talbot 公司得到了向挪威铁路(NSB)提供 13 列摆式动车组的订单。西门子(Siemens)公司也不甘落后,利用其下属的奥地利 SGP 公司在 80 年代末就开始致力于摆式列车的研究工作,同意大利 Fiat 公司合作研制摆式列车,并先后开发出 ICT-ET 摆式电动车组和 ICT-VT(VT605)摆式内燃动车组,并于 1999 年开始给德国铁路提供 43 列 ICT-ET。该车采用了新型的 SF600 转向架,运用机电倾摆技术并装有横向气动半主动悬挂装置。另外,ADtranz 公司也提供了采用机电作动器的 20 列 ICT-VT。

瑞士也是摆式列车的创始国之一,但一直没有达到实用的程度。20 世纪 70 年代末,SIG 公司又开始研制摆式列车,并于 80 年代研制出试验样车。但在之后的线路试验中,由于倾摆装置发生故障而停止继续试验,直到 90 年代,试验和研制工作才又重新展开。1997 年,SIG 公司和 Schindler 公司同瑞士联邦铁路(SBB)达成 2000 年开始提供 27 列 ICN2000 摆式电动车组的协议。

1969年,瑞典进行了摆式列车的首次试验,其目的是在既有线路或稍加改造的既有线路上提高列车的运行速度。1973年,瑞典铁路(SJ)和ASEA公司制订了联合开发X15摆式列车的计划,1975年研制出了第一列样车并进行了8年的试验,1986年该车开始批量生产并改名为X2000。

与欧洲国家相比,北美国家在研究摆式列车方面要落后得多。加拿大Bombardier公司在20世纪70年代研制出摆式列车试验样车,经试验后小批量投入生产,并于1981年投入运营。但该车的使用效果并不理想,因而未能推广应用。1996年3月,美国Amtrak公司宣布购买18列由加拿大Bombardier和ALSTOM公司联合设计和制造的“美洲飞人”(American Fly)摆式列车,用于波士顿经纽约到首都华盛顿的东北走廊铁路,全程734 km。1999年交付使用和运行,最高速度为240 km/h。采用美国飞人号后,纽约到波士顿之间的旅行时间从原来的4.5 h缩短为3 h,纽约至华盛顿的旅行时间由3 h缩短为2.5 h。

亚洲国家中日本是第一个研制和开发摆式列车以及世界上第一个建造和运行高速铁路的国家。日本首先开发的实用性摆式列车是381电动车组,并于1973年投入运行。该列车运用德国Wegmann的被动倾摆原理,车体置于转向架的滚子上,车辆通过曲线时,车体通过离心力作用产生倾摆。日本也是世界上第一个在窄轨铁路(1067 mm)上采用摆式列车的国家。此后,日本研制和成功开发了其他形式的摆式列车并投入运行。

意大利Pendolino、西班牙Talgo和瑞典X2000摆式列车在20世纪80年代的成功经验以及在既有线路提速的愿望,引起了欧美许多国家对摆式列车的极大兴趣。进入90年代,摆式列车的技术日趋成熟,各国开始看好摆式列车的广阔前景,纷纷以各种不同的方式来发展和运用摆式列车。

我国在1998年,广深铁路公司租用瑞典Adtranz公司的X2000摆式列车在广州—香港间以“新时速”号动车组进行运行,取得了很好的效果,因此在1999年将所租赁的摆式列车购买下来,开创了我国摆式列车应用的新局面。同年,铁道部组织路内机车车辆工厂、高校和研究所开展摆式列车的研制工作,采用动力集中方式,大连机车车辆工厂制造出了一台动力车,唐山机车车辆工厂制造了采用迫导向转向架的一辆拖车,浦镇车辆工厂制造了采用自导向转向架的一辆拖车,由于种种原因,都没有进行线路试验。2002年,唐山机车车辆工厂为三茂铁路公司生产了我国第一列商业运营的动力分散内燃动车组,编组为三动两拖,设计速度160 km/h,已在铁道科学院环形试验线进行了线路试验。

1.2.2 机车车辆主动控制的国内外发展

机车车辆领域采用主动控制技术控制其平稳性的研究始于20世纪70年代,对此领域研究较多的国家是英国、美国和日本。英国和美国最早开展这方面的研究,日本则是从20世纪80年代才开始进行主动控制技术的研究,进入90年代,研究内容更加深入。

1. 英国

20世纪70年代初,英国铁路协会研究发展部开始致力于主动控制在铁路机车车辆上的可行性研究,并做了大量的理论性研究工作,对垂向和横向主动控制进行了一系列的试验研究,其研究工作非常有价值的一部分是对配置不同作动器的车辆悬挂性能进行了评价。

- ① 液压伺服横向系统。
- ② 可控空气弹簧垂向系统。
- ③ 电磁垂向系统。
- ④ 电磁横向系统。

表 1.1 是英国铁路主动控制作动器配置的一个总结,他们的研究工作是针对实车上安装主动悬挂系统进行的。

表 1.1 不同主动悬挂方式的结构比较

载荷支承	控制力	优点	缺点
空气弹簧 (带伺服阀)		容易加装, 比较简单, 可实现倾摆控制	空气消耗量大, 需要大容量伺服阀
空气弹簧	气动伺服装置	可以加装, 可以实现倾摆控制	空气消耗量大, 只能在低频区使用
液压悬挂装置 (伺服阀)		可实现宽频带控制, 容易实现倾摆控制	动力源容量大, 价格高, 维护费用大
空气弹簧	液压伺服装置	可实现宽频带控制, 容易实现倾摆控制	价格高, 维护费用大
	电磁铁悬挂装置	可实现宽频带控制, 简单且坚固	动力消耗大, 位移和力受限制, 不能用于倾摆控制
空气弹簧	电磁铁	可实现宽频带控制, 简单且坚固	位移和力受限制, 不能用于倾摆控制

2. 美国

1969 年, 美国 Westinghouse 公司首先研究了主动悬挂的可行性, 该公司参照美国 DOT 高速试验车, 从理论和试验两方面研究评估了采用电液伺服作动器主动悬挂装置的可行性。1970 年, G. N. Sarma 在其博士论文中考虑 7 个自由度主动悬挂计算模型 (车体摇头、横移、侧滚及每台转向架的横移和摇头), 研究目的是提高横向稳定性, 在二系横向布置 2 个作动器, 如图 1.1 所示。Sarma 借助前后转向架的横移量作为测量值, 进行了计算机仿真分析。

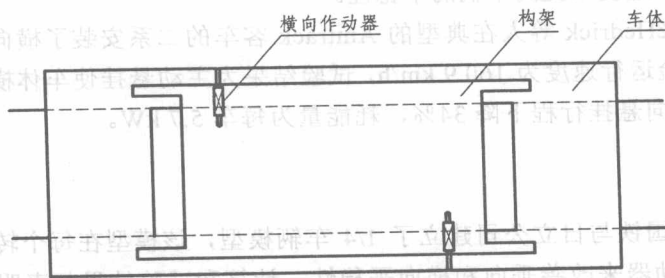


图 1.1 二系横向作动器布置图

Sinha 的计算模型是在每台转向架上布置两个横向作动器, 以及一个抗摇头的扭转作动器。研究表明, 简单地用转向架与车体的相对横移量以及转向架的横向速度作为测量值, 则车辆的稳定性和曲线通过能力可以解耦, 通过产生与转向架横向速度成一定关系的作用力使稳定性得到很好的控制, 而曲线通过能力则通过扭转作动器产生与车体和转向架之间相对横移量成一定关系的力得到改善。

Celnicker 考虑 15 个自由度的车辆模型, 受的激励力为横向不平顺和纵向不平顺, 该模型作动器的布置方式与 Sinha 一样, 但观测值为车体与转向架的横向及摇头的相对与绝对位移、

速度和加速度。研究内容包括在现有运行速度下提高横向乘坐品质和在提高车速的情况下衰减运动模态保持车辆稳定性。研究计算结果表明,对横向主动悬挂有两种控制结构,一种是平稳性控制器,在远低于临界速度运行时,用车体横向加速度和横向力作动器能有效改进横向平稳性,这种形式的主动悬挂控制器消耗的能量较小,在运行速度为 160 km/h,美国 6 级线路条件下,该控制器使横向加速度均方根值下降 3 倍,使悬挂行程均方根值降低 17%,能量消耗为每车 7 kW,作动器频宽为 3 Hz;另一种是模态控制器,在高速运行时,用扭转作动器及转向架横向速度和摇头角速度来衰减运动模态,这种形式的主动悬挂控制器需消耗较多的能源且需要高频宽作动器,在运行速度为 296 km/h 时,线路条件同上,该控制器使加速度均方值从 $0.2 \text{ g}^2/\text{Hz}$ 降到 $0.05 \text{ g}^2/\text{Hz}$,能源消耗为每车 60 kW,作动器频宽为 7 Hz,如图 1.2 所示。

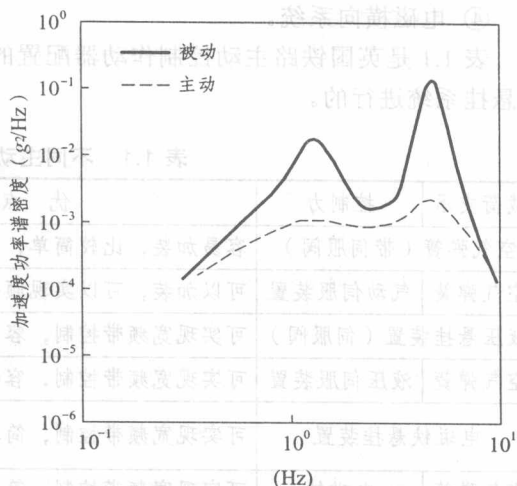


图 1.2 车速 296 km/h 时主动悬挂与被动悬挂计算结果的比较

1974 年,美国加州大学戴维斯分校机械工程系 (University of California, Davis, Calif) D.E.Karnopp 教授等人提出了半主动悬挂,即利用可控的阻尼器,根据预定的阻尼控制规律,实时调节阻尼力。他们还利用电液式主动减振器在 Lord 公司做了半主动振动试验,结果证明可以降低共振峰值。Margolis 等提出了 on-off 半主动控制策略,其特点是当悬挂质量和非悬挂质量同向运动,且非悬挂质量的速度较大时,减振器将不产生阻尼力或产生较小的力,在其他情况下产生较大的阻尼力,其主要思想是通过降低悬挂质量的加速度和速度来提高车辆的平稳性。

1985 年,Cho&Hedrick 等人在典型的 Amtrack 客车的二系安装了横向主动悬挂系统,进行了实车测试。试验运行速度为 160.9 km/h,试验结果为主动悬挂使车体横向加速度均方根值下降 46%,二系横向悬挂行程下降 34%,耗能量为每车 5.7 kW。

3. 日本

1981 年,日本国铁与日立公司建立了 1/4 车辆模型,该模型在每个转向架上用两个垂直和一个横向气动作动器来改善垂向和横向平稳性,计算和试验结果都表明,低频段振动幅值降低了 50%;1987 年,又进行了实车测试,在每个转向架上布置两个横向气动作动器,横向加速度计布置在作动器正上方的车体地板上(见图 1.3),测试速度为 120 km/h,试验结果为每个作动器最大出力 12.2 kN,在小于 3 Hz 范围内的振动幅值下降 50%。

1994 年,谷藤克也等建立了三自由度车辆模型(车体的横移、侧滚及摇头),两个液压式作动器布置在二系的横向,电磁激振器作用于构架,采用 LQ 和 LQG 控制方法。试验结果表明,振动在 5 Hz 以下控制效果较好,共振点的加速度 PSD 从 $10 (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ 下降至 $0.1 (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$ 。

东京大学的藤冈健彦等建立了半车简化三自由度模型(车体的横移、侧滚及构架横移),如图 1.4 所示。采用 LQR 与 LQG 控制方法,进行了大量的试验对比研究,考察车体质量、采

样周期，以及不同状态反馈测量值对控制效果的影响。结论为考虑转向架的横向加速度测量值以及车体与转向架之间的相对位移测量值，对控制效果有明显的改善。当车体质量比控制器设计值小时，控制性能和稳定性都将恶化，采样周期为 2 ms 时达到最大隔振效果。

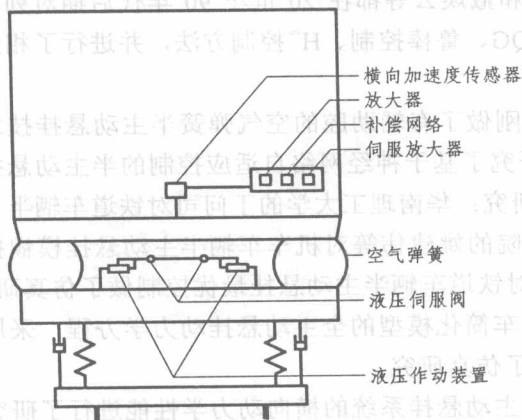


图 1.3 三自由度车辆主动控制模型

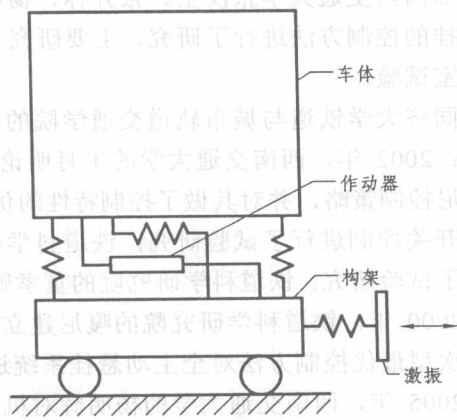


图 1.4 三自由度半车体试验模型

川崎重工的西义和等建立了三自由度半车体试验模型（包括车体横移、侧滚及转向架的横移），控制作动器为气动式。试验结果为，在共振点 0.55 Hz 控制效果较好，在 0.3~6 Hz 范围内减振效果也较明显，用频率 0.6 Hz 振幅 15 mm 的正弦波加载，车体横向加速度从 0.53 g 降至 0.09 g，侧滚加速度也降低近 3/4。

近年来，随着 H^∞ 控制理论的出现，日本的铁路科技人员对 H^∞ 控制方法产生浓厚的兴趣，相关的研究论文也不断发表，采用最新控制理论进行机车车辆主动悬挂的研究正在积极探索之中。

1993 年，JR 东日本公司在 STAR21 型试验车上进行了二系横向主动悬挂的样机研制，并在 425 km/h 速度下进行了性能试验；2000 年，JR 东日本公司和德国铁路公司共同开发了 ICE2 型车辆的二系横向主动悬挂系统，在线路试验中取得良好效果；2002 年 12 月 1 日，日本新干线新型 E2-1000 系列“疾风”号成为世界上第一个装车使用主动悬挂系统的高速列车。图 1.5 为日本对于采用主动控制技术的高速列车的实测效果图。

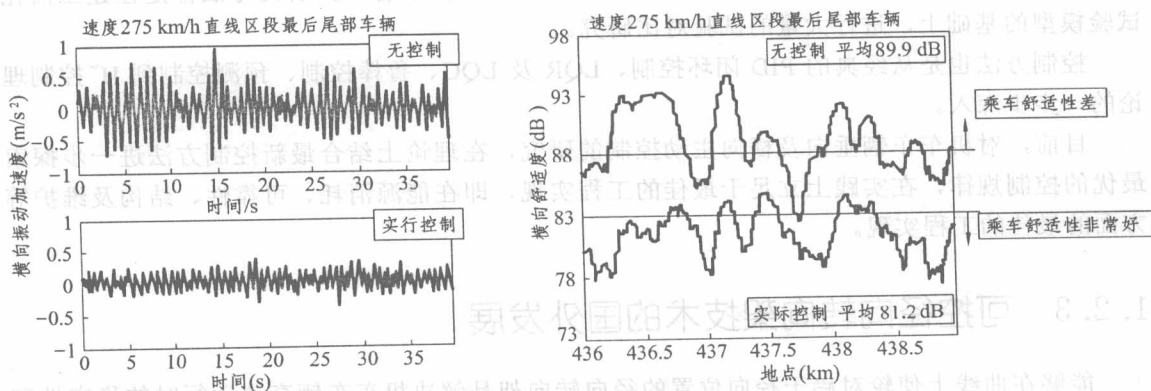


图 1.5 主动控制实测效果图

4. 中 国

国内机车车辆主动悬挂技术的研究落后于国外,在1995年铁道部提出列车提速计划、广深线引入(瑞典)X2000摆式列车后,国内关于铁道车辆的主动振动控制研究才进入新的阶段。如西南交通大学张汉全、张开林、杨明利和戴焕云等都在20世纪90年代后期对列车主动悬挂的控制方法进行了研究,主要研究了LQG、鲁棒控制、 H^∞ 控制方法,并进行了相应的实验室试验。

同济大学铁道与城市轨道交通学院的陆正刚做了有辅助腔的空气弹簧半主动悬挂技术的研究;2002年,西南交通大学的王月明论文研究了基于神经网络自适应控制的半主动悬挂连续阻尼控制策略,并对其做了控制特性的仿真研究;华南理工大学的丁问司对铁道车辆半主动悬挂开关控制进行了试验研究;铁道科学研究院的姚建伟等对机车车辆半主动悬挂模糊控制进行了试验研究;铁道科学研究院的董孝卿等对铁道车辆半主动悬挂最优控制做了仿真研究。

2000年,铁道科学研究院的嘎尼建立了机车简化模型的全主动悬挂动力学方程,采用线性二次型最优控制方法对全主动悬挂系统进行了仿真研究。

2005年,西南交通大学的杨明辉对机车半主动悬挂系统的横向动力学性能进行了研究,对半主动悬挂系统的时滞特性对系统性能的影响进行了仿真;2003年,浙江大学的杨礼康对基于磁流变技术的车辆半主动悬挂系统进行了理论与试验研究,针对磁流变减振器,应用S型滞环模型,对基于状态判断归一法、加速度法和参考模型法的 H^∞ 控制策略进行了试验验证和对比分析,结果表明状态归一法应用于车辆半主动悬挂系统效果佳,能耗低;2003年,中南大学的饶大可以经过简化的具有两系悬挂的二轴车为研究对象,建立了一个11自由度的整车(单车)车辆主动悬挂数学模型,建立了以高速开关阀流量为控制量的1/2主动悬挂预见控制数学模型,并进行了实验室试验分析。

2005年,同济大学铁道与城市轨道交通学院的陆正刚,采用ADAMS与MATLAB的联合仿真技术,对采用半主动控制策略的整车性能进行了仿真研究,在车辆二系悬挂采用了磁流变阻尼器,研究结果显示所采用的最优控制策略可较好抑制车体第一阶弯曲模态的结构振动。

2006年,铁道科学研究院的杨建伟对采用磁流变阻尼器的高速车辆横向振动半主动控制系统进行了研究,提出了一种阻尼A控制方法,并在实验室进行了1/4车辆模型的试验研究。

2007年,西南交通大学的刘增华对空气弹簧的垂向主动控制进行了研究。

从国内外对机车车辆垂向及横向主动控制的研究过程来看,其研究方法都是在建立简化试验模型的基础上,进行大量的试验对比研究。

控制方法也是从经典的PID闭环控制、LQR及LQG、鲁棒控制、预测控制到 H^∞ 控制理论的一步步深入。

目前,对机车车辆垂向及横向主动控制的研究,在理论上结合最新控制方法进一步探索最优的控制规律,在实践上立足于最佳的工程实现,即在能源消耗、可靠性、结构及维护等方面的最佳的工程实现。

1.2.3 可控径向转向架技术的国外发展

能够在曲线上使轮对趋于于径向位置的径向转向架是解决机车车辆高速运行时的稳定性和曲线通过性能之间矛盾的有效措施之一。