

汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

先进汽车缓速器 理论与试验

叶乐志 李德胜 王跃宗 刘本东 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术论坛丛书



北京工业大学“211工程”资助出版

北京市科委重大项目研究成果

国家自然科学基金研究成果

先进汽车缓速器 理论与试验

叶乐志 李德胜 王跃宗 刘本东 著



机械工业出版社

本书在系统总结汽车缓速器发展和研究现状的基础上,提出两种新型缓速器,并详细介绍其结构、工作原理及设计方法。首先介绍汽车液冷式永磁缓速器的结构与原理,建立其设计理论,对缓速器多耦合场进行分析及结构优化,并给出了一种永磁缓速器设计平台;然后介绍了无刷液冷式自励缓速器的结构与原理,分别介绍了发电系统、缓速系统的设计理论以及能量回收型缓速器的发展;还讨论了汽车缓速器控制技术并列举了永磁缓速器控制实例;最后介绍了汽车缓速器的试验方法和内容,并对液冷式永磁缓速器和自励缓速器进行了试验分析。

本书可作为高等院校机械工程和汽车工程学科的硕士生、博士生和教师的参考书,也可供从事汽车缓速器和涡流制动装置研究和开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进汽车缓速器理论与试验/叶乐志等著. —北京:机械工业出版社, 2012. 11

(汽车先进技术论坛丛书)

ISBN 978-7-111-40016-5

I. ①先… II. ①叶… III. ①汽车—车辆减速度器—研究
IV. ①U463. 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 239425 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:连景岩 责任编辑:连景岩 责任校对:张 征

封面设计:路恩中 责任印制:乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.5 印张 · 357 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-40016-5

定价: 58.00 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

序

“211工程”是我国自建国以来在教育领域实施的唯一的国家重点建设工程，即面向21世纪重点建设100所高水平大学，使其成为我国培养高层次人才，解决经济建设、社会发展和科技进步重大问题的基地，形成我国高等学校重点学科的整体优势，增强和完善国家科技创新体系，跟上并占领世界高层次人才培养和科技发展的制高点。

中国高等教育发展迅猛，尤其是1400所地方高校已经占全国高校总数的90%，成为我国高等教育实现大众化的重要力量，成为区域经济和社会发展服务的重要生力军。

在北京市委、市政府的高度重视和大力支持下，我校于1996年12月通过了“211工程”部门预审，成为国家“211工程”重点建设的百所大学中唯一一所北京市市属高校。我校紧紧抓住“211工程”建设和举办2008年奥运会的重要机遇，实现了两个历史性的转变：一是实现了从单科(工科)性大学向以工科为主，理、工、经、管、文、法、艺相结合的多科性大学的转变；二是实现了从教学型大学向教学研究型大学的转变。“211工程”建设对我校实现跨越式发展、增强服务北京的能力起到了重大的推动作用，学校在学科建设、人才培养、科学研究、服务北京等方面均取得了显著的成绩，综合实力和办学水平得到了大幅度的提升。

至2010年年底，我校的学科门类已经覆盖了8个：工学、理学、经济学、管理学、文学、法学、哲学和教育学。我校现拥有8个一级学科博士学位授权点、37个二级学科博士学位授权点和15个博士后科研流动站；拥有15个一级学科硕士学位授权点和81个二级学科硕士学位授权点；拥有6种类型硕士研究生专业学位的授权资格，在工程硕士培养领域拥有19个授权点；拥有3个国家重点学科、16个北京市重点学科和18个北京市重点建设学科。

目前，学校有专任教师1536人，全职两院院士5名，博士生导师220人，有正高级职称294人和副高级职称580人，专任教师中具有博士学位的比例达到54.6%；有教育部“长江学者”特聘教授4人，国家杰出青年基金获得者6人，入选中组部“千人计划”1人，北京市“海聚工程”3人，教育部新(跨)世纪优秀人才支持计划15人。

2010年学校的到校科研经费为6.2亿元。“十一五”期间，学校承担了国家科技重大专项28项、“973计划”项目16项，“863计划”项目74项、国家杰出青年基金项目2项、国家自然科学基金重点项目8项、科学仪器专项2项、重大国际合作项目1项、面上项目和青年基金项目347项、北京市自然科学基金项目180项，获国家级奖励14项。现有1个共建国家工程研究中心，7个部级或省部级共建科研基地，11个北京市重点实验室和3个行业重点实验室。

为了总结和交流北京工业大学“211工程”建设的科研成果，学校设立了“211工程”专项资金，用于资助出版系列学术专著。这些专著从一个侧面展现了我校教授、学者的学科方向、研究领域、学术成果和教学经验。

展望北京工业大学的未来，我们任重而道远。我坚信，只要我们珍惜“211工程”建设



的重要机遇，构建高层次学科体系，营造优美的大学校园环境，我校在建设国际知名、有特色、高水平大学的进程中就一定能够为国家（特别是为北京市）的经济建设和社会发展做出更大的贡献。

中国工程院院士
北京工业大学原校长

左铁镛

2012年6月

前 言

汽车缓速器是一种非摩擦性的辅助制动装置，在车辆制动之前能够消耗大部分行驶动能，因此可以有效提高车辆行驶的安全性和连续制动性，降低车辆的使用成本。20世纪中期许多欧洲国家已颁布相关的交通法规，将缓速器列为汽车的标准配置。近年来，随着国内相关法规的颁布，特别是2012年9月实施的新版国家标准《机动车运行安全技术条件》(GB 7258—2012)，必将对国内缓速器的进一步推广和使用起到重大的促进作用。目前，电涡流缓速器和液力缓速器是国内外应用最广泛的两种产品，永磁缓速器在日本应用较多，但这些缓速器在性价比方面难以满足国内重型货车的要求，致使国内重型货车的缓速器安装率非常低。因此，研究开发具有自主知识产权的高性价比缓速器，对于打破国外缓速器技术垄断、保障行车安全、提高国产汽车的自主创新能力具有重要意义。

自2006年起，北京工业大学机电技术研究所与北京汽车企业合作，持续开展了新型缓速器方面的研究和试验工作。该研究和试验工作得到了北京市科委产业化项目、北京工业大学“211工程”及相关企业的大力支持，在此表示诚挚的感谢。

本书以叶乐志博士的博士学位论文为基础，以液冷式永磁缓速器和自励缓速器为研究重点，较深入地研究了涡流制动理论和缓速器设计以及在汽车应用方面的相关问题，特别是详细地给出了新型缓速器设计和试验过程中的第一手数据。本书分为10章，第1章由北京工业大学李德胜教授编著，第2章、第3章、第4章、第5章、第6章、第7章、第10章由叶乐志博士编著，第8章由刘本东副教授编著，第9章由王跃宗副教授编著。

由于有巨大的市场需求，汽车缓速器得到了许多研究机构及企业的高度关注，其新的原理和技术也不断涌现。本书作为作者在汽车缓速器新原理和新技术方面的研究成果汇集的同时，还引用了许多其他学者的研究成果，在此深表感谢。在本书编写过程中，得到了北京工业大学机电技术研究所全体师生的支持，特别是焦兵锋、杜肖、付勇、王聪、张凯等同学的帮助，在此顺致谢意。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 汽车缓速器概述	1
1.1.1 汽车缓速器的发展背景	1
1.1.2 汽车缓速器的发展意义	4
1.2 汽车缓速器的研究现状	4
1.2.1 汽车缓速器的分类	4
1.2.2 永磁缓速器的发展现状	9
1.2.3 涡流制动理论的研究进展	11
1.2.4 多物理场耦合理论的研究进展	12
第 2 章 缓速器设计理论基础	13
2.1 缓速器设计的基础理论体系	13
2.1.1 基础理论体系的组成	13
2.1.2 缓速器中的物理场	14
2.2 电磁场理论	17
2.2.1 Maxwell 方程组	17
2.2.2 磁位及其偏微分方程	18
2.2.3 边界条件和边值问题——定解条件	19
2.2.4 磁场能量与电磁力	21
2.3 温度场理论	24
2.3.1 稳态导热基本定律	24
2.3.2 导热微分方程	24
2.3.3 温度场单值性条件	25
2.3.4 3D 稳态温度场边值问题	26
2.4 流场理论	26
2.4.1 流体流动问题的数值方法	26
2.4.2 流体流动问题数值计算的主要过程	28
2.5 磁路分析方法基础	30
2.5.1 磁路计算基础	30
2.5.2 永磁磁路的计算方法	34
2.6 小结	35
第 3 章 液冷式永磁缓速器的结构与工作原理	36
3.1 传统永磁缓速器	36
3.1.1 永磁缓速器的结构与工作原理	36



3.1.2	永磁缓速器的控制与安装	39
3.1.3	永磁缓速器的特点	40
3.1.4	永磁缓速器的使用效果	41
3.2	液冷式永磁缓速器的结构	42
3.3	液冷式永磁缓速器的工作原理、安装方式及使用效果	45
3.3.1	液冷式永磁缓速器的工作原理	45
3.3.2	液冷式永磁缓速器的安装方式	47
3.3.3	液冷式永磁缓速器的使用效果	51
3.4	液冷式永磁缓速器的整车匹配	51
3.4.1	电气特性匹配	52
3.4.2	散热性能匹配	53
3.4.3	制动性能匹配	56
3.5	小结	59
第4章	永磁缓速器数学模型	60
4.1	永磁缓速器的动力学模型	60
4.1.1	缓速器制动时的汽车动力学方程	60
4.1.2	缓速器对汽车制动效能的影响	61
4.1.3	缓速器对汽车制动力分配的影响	64
4.2	永磁缓速器电磁场的数学模型	65
4.2.1	模型假设	66
4.2.2	磁路计算	66
4.2.3	涡流磁动势	68
4.2.4	合成气隙磁场的计算	70
4.2.5	制动力矩的计算	72
4.3	永磁缓速器温度场的数学模型	72
4.3.1	模型假设	72
4.3.2	热传导的边界条件	73
4.3.3	传热系数的计算	74
4.3.4	传热系数的修正	75
4.4	永磁体高温失磁的数学模型	76
4.4.1	永磁体工作点的分析	76
4.4.2	数学模型	77
4.4.3	永磁体失磁数值的计算	78
4.4.4	失磁模型试验	78
4.5	小结	80
第5章	永磁缓速器多物理场耦合分析	81
5.1	多物理场耦合分析方法	81
5.1.1	多物理场耦合的形式与机理	81
5.1.2	多场耦合系统设计理论	82
5.1.3	永磁缓速器多物理场的关系	83



5.2	永磁缓速器的电-磁-热场耦合数值分析	84
5.2.1	仿真工具的使用	84
5.2.2	JMAG-Designer 简介	85
5.2.3	JMAG-Designer 分析过程	86
5.2.4	电磁场计算	90
5.2.5	涡流损耗和温度场计算	92
5.2.6	电磁场和温度场耦合计算	94
5.3	永磁缓速器的热-流场耦合数值分析	96
5.3.1	ANSYS-CFX 简介	96
5.3.2	使用 ANSYS-CFX 建模	96
5.3.3	ANSYS-CFX 仿真结果	100
5.3.4	热-流场耦合计算	102
5.4	电-磁-热-流场耦合分析	103
5.5	小结	105
第6章	永磁缓速器设计方法	107
6.1	静态设计方法	107
6.1.1	试验模型	107
6.1.2	静态吸力的计算	107
6.1.3	吸力与制动力矩的关系	108
6.1.4	验证模型	109
6.2	定子材料属性对制动性能的影响	111
6.2.1	计算模型	111
6.2.2	电导率的影响	111
6.2.3	磁导率的影响	112
6.2.4	定子材料的影响	112
6.2.5	定子表面镀覆层的影响	113
6.3	永磁缓速器关键参数的计算	115
6.3.1	缓速器最大制动功率的确定	115
6.3.2	气隙长度的选取	115
6.3.3	永久磁铁的设计	116
6.3.4	定子厚度	117
6.3.5	磁性材料的选取	117
6.3.6	磁屏蔽转子的材料及厚度	118
6.4	永磁缓速器设计实例	120
6.4.1	基本数据及技术要求	120
6.4.2	主要尺寸的确定	121
6.4.3	气隙磁场	122
6.4.4	试验分析	122
6.5	永磁缓速器优化设计方法	123
6.5.1	各种优化方法	123



6.5.2	试验设计法	123
6.5.3	Rosenbrock 方法	125
6.5.4	永磁缓速器的优化设计	125
6.6	永磁缓速器 CAD 平台开发	128
6.6.1	永磁缓速器 CAD 平台体系的结构	128
6.6.2	永磁缓速器 CAD 开发组件的集成	128
6.6.3	永磁缓速器 CAD 开发平台的实现	131
6.7	小结	132
第 7 章	液冷式自励缓速器	134
7.1	自励缓速器简介	134
7.2	传统自励缓速器的结构与原理	135
7.2.1	经典风冷式自励缓速器	135
7.2.2	组合式自励缓速器	136
7.2.3	双转子盘式自励缓速器	137
7.2.4	带液冷系统的自励缓速器	138
7.3	液冷式自励缓速器的结构与工作原理	138
7.4	液冷式自励缓速器发电机设计	141
7.4.1	发电机的主要结构尺寸	141
7.4.2	发电机的瞬态场仿真	143
7.4.3	发电机的空载特性和负载特性	147
7.5	液冷式自励缓速器的制动特性	148
7.5.1	磁路计算	148
7.5.2	制动力矩的有限元分析	150
7.5.3	试验验证	152
7.5.4	参数化分析	153
7.6	小结	155
第 8 章	能量回收型缓速器	156
8.1	能量回收型缓速器的发展背景及分类	156
8.1.1	能量回收型缓速器的发展背景	156
8.1.2	能量回收型缓速器的分类	157
8.2	液压储能式能量回收型缓速器	159
8.2.1	液压储能式能量回收型缓速器的研究现状	160
8.2.2	液压储能式能量回收型缓速器的分类	161
8.3	飞轮储能式能量回收型缓速器	164
8.3.1	飞轮储能式能量回收型缓速器的相关研究背景	164
8.3.2	飞轮储能式能量回收型缓速器的研究最新进展	166
8.3.3	飞轮储能式能量回收型缓速器的优缺点	169
8.4	电储能式能量回收型缓速器	170
8.4.1	ISG 方案	170
8.4.2	ISG 电机的布置	171



8.4.3	ISG 电机类型的选取	173
8.4.4	ISG 的控制系统	174
8.4.5	电储能式能量回收型缓速器的应用案例	175
8.5	小结	177
第9章	缓速器控制技术	178
9.1	汽车电子控制技术概述	178
9.2	缓速器控制技术	180
9.2.1	缓速器控制系统的组成	181
9.2.2	档位分级机构	182
9.2.3	传感器	182
9.2.4	缓速器驱动组件	183
9.2.5	电源管理系统	183
9.2.6	自诊断系统	184
9.2.7	总线控制技术	185
9.2.8	处理器	186
9.3	缓速器的电路测试标准	192
9.4	永磁缓速器控制系统设计举例	194
9.4.1	控制系统的功能	194
9.4.2	控制系统外部引脚的定义	197
9.5	小结	199
第10章	汽车缓速器试验	200
10.1	缓速器试验方法	200
10.2	缓速器制动性能要求	201
10.3	缓速器试验系统	202
10.3.1	台架试验系统的构成	202
10.3.2	底盘测功机试验系统的构成	205
10.3.3	车载道路试验系统的构成	206
10.4	永磁缓速器试验结果及分析	208
10.4.1	台架试验内容及数据分析	208
10.4.2	底盘测功机试验结果及分析	209
10.4.3	车载道路试验结果及分析	212
10.5	永磁缓速器性能评价指标	212
10.6	自励缓速器试验内容及数据分析	214
10.6.1	发电机性能试验	214
10.6.2	缓速器制动性能试验	215
10.6.3	缓速器制动力矩热衰退试验	217
10.6.4	缓速器恒功率制动试验	217
10.7	小结	217
	参考文献	219

第1章 绪 论

1.1 汽车缓速器概述

1.1.1 汽车缓速器的发展背景

从20世纪90年代开始,中国进入了公路建设快速发展的时期,截至2011年底,全国公路总里程达400万km。而高速公路从零起步,经过二十多年的建设,截至2011年底,全国高速公路通车总里程已达8.5万km,位居世界第二位,而且仍在快速建设中。《国家高速公路网规划》指出,到2020年,中国高速公路总里程将达到10万km,接近高速公路建设世界第一的美国规模。我国是个多山国家,山区面积(包括山地、丘陵和比较崎岖的高原)约占70%,形成了多山的地形特色,因而山区道路占相当大的比例。我国山区道路等级不高,以三、四级低等级公路为主,道路崎岖复杂、山高路陡、坡长弯多,如图1-1所示。例如陕西秦岭山脉大岭北坡210国道,其坡长为33km,以5%~6%的坡度为主,最大纵坡度达8%~9%。我国闽赣、云贵、川陕地区比以上条件更为苛刻的道路不乏其例。



图1-1 具有长陡坡的山区道路
a) 山区坡道 b) 八达岭高速

随着汽车工业的技术进步,汽车发动机功率逐年增加,汽车的行驶速度大幅度提高。同时随着一些商用汽车的大型化发展,汽车的最大总质量也有不同程度的增加,从而增大了车辆行驶的惯性。制动器给车辆安全行驶提供保证,其不仅影响到整车性能的优劣,而且直接关系到驾乘人员的生命和财产安全。制动器是利用张开的制动蹄压紧并摩擦车轮上的轮毂,从而达到车轮减速或制动的目的。如果制动器长时间摩擦,会产生很大的热量,在短时间内难以有效地散发,使得制动蹄和制动鼓的温度升高,从而导致制动器的摩擦系数降低、制动



性能下降,甚至会导致其制动能力完全消失,造成严重的后果。因此这种制动方式不能完全满足频繁停车的市内公共汽车以及在高速公路和山区行驶的重型汽车。大吨位车辆导致的交通事故不断发生,对汽车制动装置提出了更加苛刻的要求。

高速、超载、长时间下坡以及频繁制动同样在威胁着道路运输中重型商用汽车的行车安全。作为解决制动器过热的权宜之计,许多驾驶人向制动器喷水或在高速公路停车场的专用制动冷却液中冷却制动器。如图 1-2 所示,在货车上另外加装一个水箱,各制动轮毂外面安装喷头,将水引到制动轮毂上,可使制动鼓的温度保持在有效的制动范围内,保证货车连续下坡时的制动安全性。但当喷液冷却不均匀时,制动轮毂会由于局部应力过大而破裂,使制动鼓损坏,造成经济损失;而且冬季当汽车在山路上行驶时,水流到路面上冷却后直接影响到汽车的行驶安全性;另外,这种方法需要有充足的水源,在缺水地区无法使用。



图 1-2 装载冷却制动鼓水箱的重型货车

在这种情况下,就要求汽车企业生产出更适合高速公路和城市内运行的汽车制动产品,以满足重型汽车的高动力性、高舒适性的性能要求,而且尤其要具有极高的安全性。于是汽车辅助制动系统(装置)之一的缓速器在国内逐步得到应用。缓速器能在车辆制动之前消耗大部分行驶动能,增强行车制动装置的制动效能,稳定其制动工况,有效提高车辆行驶的安全性能。采用辅助制动系统(装置),可保证车辆能长时间地在安全速度范围内行驶,而行车制动装置无需工作,并一直保持优良的制动性能,从而保证了车辆行驶的安全性。同时,安装有辅助制动系统的车辆,可延长其传动系统、制动系统和轮胎的使用寿命,能减少燃油消耗量,可有效降低车辆的使用成本,也可以降低制动带来的环境噪声。需要提出的是,缓速器只是一种车辆辅助减速装置,而不是一种停车装置,不能用它来替代主制动系统制动。从图 1-3 可看出,使用辅助制动装置后车辆的制动距离明显缩短。

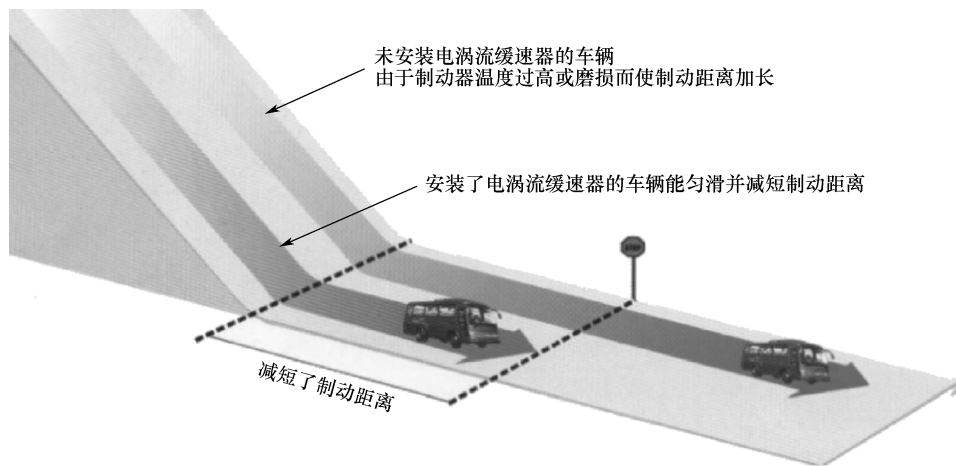


图 1-3 辅助制动装置的制动效果



国内外的缓速器制造厂商及权威机构对装备缓速器的车辆进行了综合性能优势比较：使用缓速器后，车辆的换挡次数可减少36%，行车制动器的工作次数减少70%~80%，并起到节油的效果；制动器摩擦片的使用寿命提高10~50倍；减少80%的制动粉尘排放量和制动噪声；免除制动鼓高温淋水后开裂及轮胎高温爆胎的危险；显著减少车辆的维修及用车费用。据国内行业专家统计：某车辆行驶20万km可节省相关费用8133元，行驶30万km可节省10000多元；在城市中使用的车辆可延长其制动系统的使用寿命4倍以上，用于长途行驶的车辆可延长其使用寿命10倍以上；安装缓速器的车辆1~2年可回收投资同时还能大大地减少交通事故引发的相关损失(经济损失)。

目前国内缓速器的应用主要集中在客车的前装和售后市场，旅游车、长途客车以及公交车市场较为集中，车长为10m以上的长途客车、旅游车的缓速器安装率为60%~70%，而公交车(城市客车)的缓速器安装率仅为20%~30%，大型客车总体的缓速器安装率为40%~50%。重型货车的缓速器安装率仅为1%左右，而国内适配量为大、中型客车4~5倍的重型货车尚未有必须安装缓速器的相关政策法规。目前上海已经对公交车辆安装缓速器有明确的地方规定，北京由于奥运的因素在公交车辆上也有此要求。由此看来，国家及地方的相关政策、法规亟待突破。

目前，世界上许多国家的交通法规已将辅助制动装置列为车辆的必备配置。1954年法国公共工程部规定，对于行驶在山区和事故多发地区的载重超过8t的货车必须安装辅助制动装置；1972年法国要求载重大于或等于11t的运输危险品的车辆必须装备辅助制动装置。其他国家，如德国和摩纳哥也通过立法要求客车必须装备辅助制动装置。德国交通法规中规定：总质量在5.5t以上的客车和9t以上的货车，必须装有辅助制动装置；法规中还规定：在坡度为6%~7%、坡长为6km的坡道上，不使用摩擦制动器，缓速器能保证车辆以30km/h的速度正常行驶至坡底。瑞士交通法规中规定：超过3.5t的牵引车以及总质量在8t以上的货车必须安装辅助制动装置；法规中还对车辆上的辅助制动装置的性能作了详细规定：在车速从50km/h降到30km/h的过程中，辅助制动装置必须使车辆的平均减速度至少达到 0.5m/s^2 。欧盟制定的ECE-R13法案规定：M3类客车(包括驾驶人座位在内的座位数超过9个，且最大设计总质量超过5t的客车)、O4类挂车(最大设计总质量超过10t的挂车)、N3类货车(最大设计总质量超过12t的货车)以及特种(危险品)运输车辆必须安装辅助制动装置。

与国外相比，国内汽车缓速器行业的起步较晚。20世纪90年代末，法国泰乐玛(Telma)公司把电涡流缓速器销售到了中国，国内才对汽车缓速器有了认识，并相继制定并颁布了有关车辆装配缓速器的标准和法规。2002年6月，我国交通部颁布了交通行业标准JT/T 325—2002《营运客车类型划分及等级评定》，规定中型客车中高2级以及大型客车中高1级、高2级和高3级客车都必须配装缓速器。2002年10月，我国建设部公布执行CJ/T 162—2002《城市客车分等级技术要求与配置》，规定超2级、超1级、高级的市区和城郊城市客车必须配装缓速器。2006年11月，我国建设部出台了行业产品标准CJ/T 230—2006《城市客车缓速器制动性能要求与试验方法》，明确了汽车缓速器在城市客车领域的使用范围，确定了针对城市客车使用汽车缓速器的技术性能指标。这些法规的制定和颁布，进一步凸显了我国车辆配装缓速器的必要性。2008年5月，全国汽车标准化技术委员公布实施的QC/T 789—2007《汽车电涡流缓速器总成性能要求及台架试验方法》规范了缓速器产品的质量要



求。2012年9月实施的国家标准 GB 7258—2012《机动车运行安全技术条件》提出了辅助制动装置的新标准：车长大于9m的客车、总质量大于12t的货车以及所有危险货物的运输车，应装备缓速器或其他辅助制动装置，且辅助制动装置的性能要求应符合相关规定。新标准一旦正式执行，必将对缓速器的进一步推广和使用起到重大的促进作用。

1.1.2 汽车缓速器的发展意义

为了解决连续制动导致的车辆制动性能衰减和制动系统磨损问题，必须研发装有辅助制动装置的车型，以提高汽车的安全性。特别是在山区路况和长坡运输等条件下，装有辅助制动装置的车型有明显的优势，该市场对辅助制动装置一直有强烈的需求。作为辅助制动装置的一种，缓速器的使用可以提高汽车的连续制动性能和行车安全性，并可降低车辆的使用成本，进而提高国产重型汽车产品的竞争力，因此研究和发发展汽车缓速器具有重要意义。

从2003年开始，广阔的市场前景和丰厚的利润促使国内众多汽车零部件厂商纷纷进入汽车缓速器行业。到目前为止，我国有20多家企业从事汽车电涡流缓速器的研发和生产，国内电涡流缓速器的主要市场被法国泰乐玛和深圳特尔佳占据，这两家企业的电涡流缓速器产品在市场上影响力相对较大，其他企业组成的第二方阵占据了一部分市场份额，另有数十家企业的产品都仅处于研发试验状态或小批量试装状态。

我国国内液力缓速器市场一直被德国福伊特(VOITH)等跨国公司垄断，目前这些公司生产的液力缓速器在国内高档客车市场的占有率已高达70%。国内深圳特尔佳和陕西法士特已开始研发液力缓速器，并有相关产品。这种状况说明我国在缓速器方面缺乏创新性的研究，缓速器的总体研究水平上落后于国际水平，缺乏该领域的高水平科技人才。如果我国不在汽车缓速器领域加大研发力度，紧跟国际科技研究步伐，那么势必会导致国内仅有的一些生产缓速器的企业退出国际和国内市场。

从国外缓速器的发展历程来看，新型的高科技缓速器产品必然替代电涡流缓速器；从国内重型货车用缓速器市场看，适合中国国情性价比的缓速器还没有出现。因此，开发和研制具有自主知识产权且性能优良的缓速器，对打破国外缓速器的垄断地位和增强国产汽车的技术发展具有重大意义。

1.2 汽车缓速器的研究现状

1.2.1 汽车缓速器的分类

缓速器作为一种汽车辅助制动装置，按其工作原理的不同主要分为以下6种：发动机缓速器、排气制动缓速器、电涡流缓速器、液力缓速器、自励缓速器和永磁缓速器。

(1) 发动机缓速器 对行驶中的汽车发动机停止供给燃料，并将变速器挂入某一前进档，使汽车得以通过驱动轮和传动系带动发动机曲轴继续旋转。这样，本来是汽车动力源的发动机就变成消耗汽车动能从而对汽车起缓速作用的空气压缩机。在这种情况下，汽车对发动机输入的动能大部分耗损在发动机内的进气、压缩、排气过程中，从而产生阻碍曲轴旋转的力矩即为制动力矩，将通过传动系放大后传给驱动轮。



发动机缓速器的优点是该缓速器能与发动机集成一体，从而使其体积小、质量轻；可提供大小不同的制动力矩；基本上不需要消耗能量。该缓速器的缺点是只适用于部分柴油机，且对发动机的改动较大，使发动机的结构复杂，故具有很大的局限性。

(2) 排气制动缓速器 在发动机排气管中安装排气制动阀(图1-4)，制动时排气制动阀关闭，把发动机作为空气压缩机来工作。在排气行程中，排气歧管中的空气受到压缩，发动机获得负功，从而产生制动力。发动机排气制动方式还能防止发动机过冷，以减少其磨损。但是当这种制动方式应用于汽油机时，必须在化油器和进气歧管之间装设一空气旁通管路，并在旁通管路内设置阀门，以使这一阀门和排气管阀门联动。



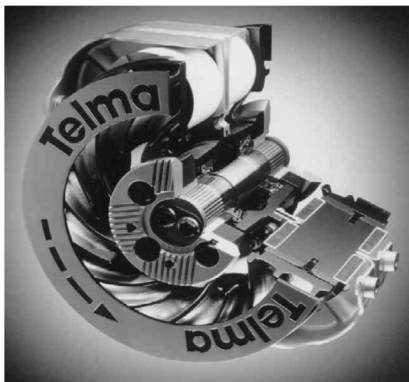
图 1-4 排气制动阀

排气制动缓速器在结构上较其他形式的缓速器简单，制动效能良好，目前许多使用柴油机的车型都安装了这种缓速器。

(3) 电涡流缓速器 电涡流缓速器是目前使用最为广泛的一种汽车辅助制动装置。它通过在传动系统中间设置转动的圆盘和固定的电磁线圈，利用电磁线圈产生磁场从而在转子盘中产生反向力矩使车辆缓速，通常有转盘式和转鼓式结构两种。电涡流缓速器是目前使用最广的辅助制动装置。图1-5所示为国内外厂家生产的电涡流缓速器产品。



a)



b)

图 1-5 国内外厂家生产的电涡流缓速器产品

a) 国产转鼓式电涡流缓速器 b) 法国泰乐玛转盘式电涡流缓速器

(4) 液力缓速器 液力缓速器的主体结构由含有多个叶片的动轮和定轮组成，动轮与传动系统的旋转部件相连，定轮与传动系统的固定部件相连，工作时液力缓速器的动轮由传动系统带动，动轮叶片给予液力缓速器内部的工作液以动能和压力，工作液流入定轮后，冲击定轮叶片，工作液的冲击和摩擦损失变为工作液的热能，使工作液的温度不断升高，工作液产生的热量将通过循环流动而被散热器带走。在动轮与工作液的相互作用中，工作液施加反作用力于动轮，产生制动力矩，如图1-6所示。

液力缓速器通常与变速器一体化设计，依靠缓速器内部流动的工作液使转子叶轮产生制动力矩，使汽车缓速。

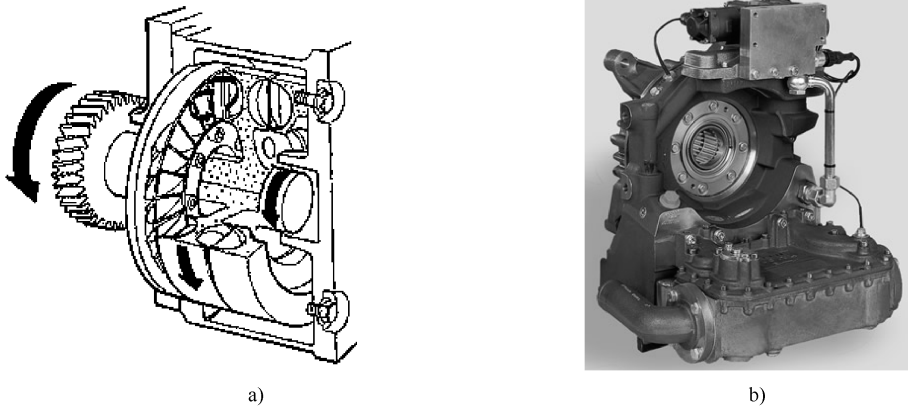


图 1-6 液力缓速器

a) 原理图 b) 实物照片

(5) 自励缓速器 自励式缓速器是一种无需外接电源并具有发电功能的汽车辅助制动装置，如图 1-7 所示。这种缓速器克服了普通电涡流缓速器制动带来的附加能耗及其对汽车蓄电池和其他电气设备的冲击。目前国外生产自励缓速器的厂家主要是日本泽腾电机株式会社，国内尚无厂家生产。



图 1-7 自励式缓速器

a) 原理图 b) 实物照片

(6) 永磁缓速器 鉴于电涡流缓速器存在的缺点，日本在 20 世纪 80 年代末，率先开始了永磁缓速器的研究和开发。20 世纪 90 年代初，日本首次研制成功了一种使用钕铁硼永磁体，不需外接电源，结构简单紧凑、重量轻、易安装的具有革命性的缓速器。随后几年，日本学者和企业围绕“轻质、紧凑”的特点又研制了一系列新型永磁缓速器，其主要结构可归纳为三种：磁铁轴向滑动式、磁铁保持架周向转动式和磁铁周向转动式。

1990 年，日本五十铃汽车公司与日本住友金属工业株式会社携手合作，成功开发了世界上第一台紧凑型永磁缓速器(图 1-8)，并于次年正式投放到日本市场。日本五十铃汽车公