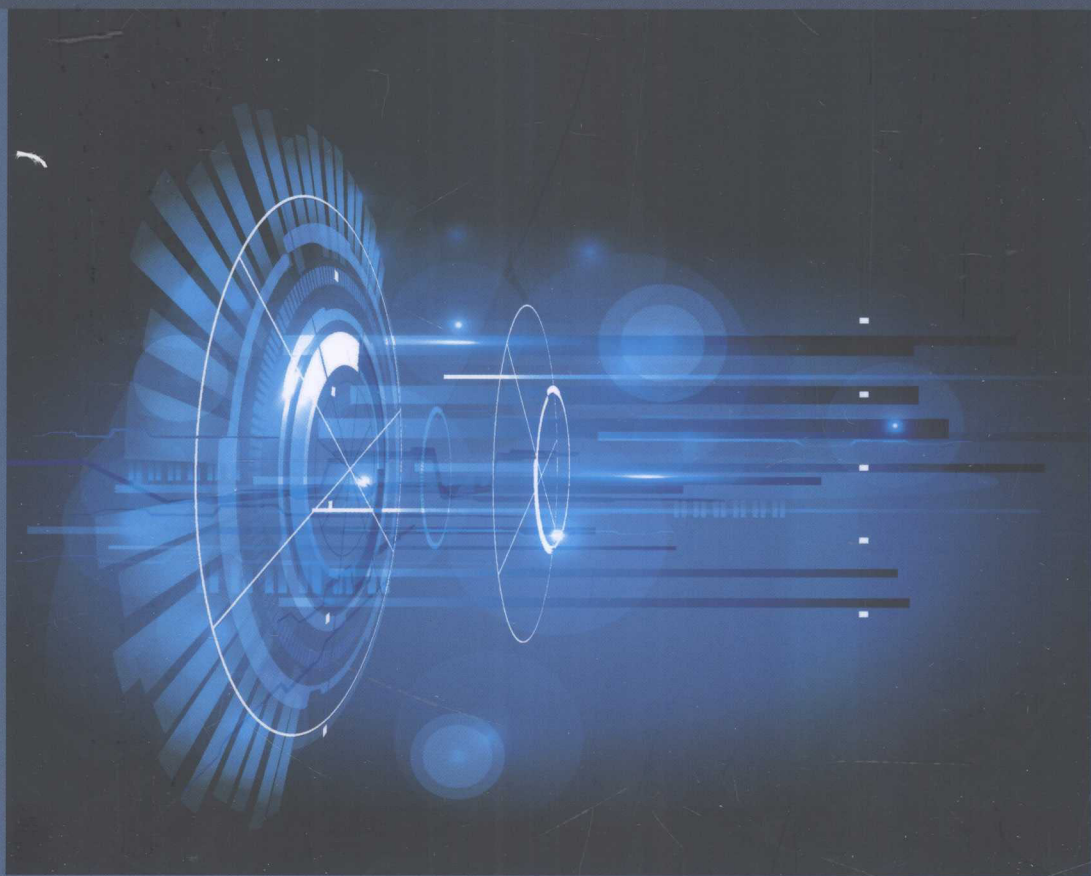


电磁直驱变速系统

李波 林树森 葛文庆 著



科学出版社

电磁直驱变速系统

李 波 林树森 葛文庆 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从基本理论入手,系统地阐述了电磁直驱变速系统的结构特点、驱动形式、工作原理、特性参数、性能仿真分析、样机与测试台架开发,以及新型 AMT 的可行性与优越性的试验研究。其主要内容包括:电磁执行器的设计与样机开发、电磁直驱换挡机构方案分析、电动二自由度式换挡机构性能仿真、直驱自增力 AMT 换挡系统、整机台架试验和关键技术趋势分析。

本书可供广大从事汽车底盘,尤其是传动系统相关领域工程技术人员和科研人员参考,也可作为高等院校车辆工程专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电磁直驱变速系统 / 李波, 林树森, 葛文庆著. —北京: 科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050784-6

I. ①电… II. ①李… ②林… ③葛… III. ①装配(机械)-电磁执行器-自动变速装置-研究 IV. ①TH132.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 288084 号

责任编辑: 李淑丽 霍明亮 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 华路天然工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京东华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 11 月第一次印刷 印张: 9 1/4

字数: 184 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

电控机械式自动变速器(automated mechanical transmission, AMT)是在传统手动变速器的基础上改进而来,具有传动效率高、成本低、结构简单等优点。近年来,对全电式 AMT 的研究引起了越来越多国内外科研机构的关注,并开始尝试将直驱技术引入其中。

为进一步提高全电式 AMT 的换挡品质,本书提出一类基于直驱技术的 AMT 换挡系统,自主研发了集转动与直动于一体且运动时互不干涉的二自由度电磁执行器(two degree of freedom electromagnetic actuator, 2-DOF EMA)和具有自增力功能的增力式同步器,它们在提高了系统结构紧凑性和 AMT 换挡品质的同时,降低了选换挡过程中的能量损耗。本书运用理论分析、仿真计算和试验研究相结合的方法,对基于直驱技术的 AMT 换挡系统中的关键技术进行了深入研究,具体包括以下几方面内容。

(1)研发了一种基于电磁转换特性的二自由度电磁执行器。考虑到 AMT 选换挡执行机构的驱动要求和结构紧凑性,我们自主研发了集转动和直动于一体且运动时互不干涉的、具有高功率密度的二自由度电磁执行器,并在完成系统样机研制后,分别对其静、动态特性进行了仿真分析与台架测试。

(2)确定了新型 AMT 选换挡执行机构的结构方案。在规划研究全电式 AMT 总体结构方案的基础上,综合考虑自动变速技术对选换挡执行机构的基本要求和研究时提出的设计目标,确定 AMT 选换挡执行机构的设计思路,共设计了三种 AMT 选换挡执行机构方案,并最终选择对传统手动变速器内部结构改动较小的电动二自由度换挡机构(electric 2-DOF-type shifting mechanism, ETSM)作为研究的主要技术方案。

(3)建立了详尽的选换挡过程动力学模型,并对选换挡执行机构的性能进行仿真研究。在分析变速器换挡机理的基础上,分段研究了 AMT 的选换挡过程,论证了 AMT 选换挡执行机构实现选换挡时序重叠的可行性;完成了基于 MATLAB/Simulink 的选换挡执行机构性能仿真研究,且定量研究了主要设计与控制参数对 AMT 选换挡执行机构性能的影响。

(4)分析了换挡拨叉强度和刚度对驱动力加载规律的影响,探讨了最大瞬时驱动力的确定原则。我们建立了基于 ABAQUS 的换挡拨叉有限元分析模型,研究了换挡拨叉强度要求下,换挡驱动装置能加载到选换挡执行机构上的最大瞬时驱

动力,并根据换挡拨叉的刚度分析结果修正了换挡控制策略。

(5)研制了一种具有自增力和提高换挡系统鲁棒性功能的直驱自增力 AMT 换挡系统。针对直驱技术应用于 AMT 换挡系统所带来的问题,我们设计了一种具有自增力功能的增力式同步器,分别从力学和能量守恒的角度论证了增力式同步器的可行性与功能性,并对其原理性样件进行研制。直驱自增力 AMT 换挡系统使选换挡执行机构在输出较小驱动力时可获得较大的同步力,降低 2-DOF EMA 换挡能耗的同时,提高了 AMT 换挡系统抵御外部扰动的能力,为进一步缩小换挡驱动装置体积和降低换挡控制系统设计难度奠定了良好的技术基础。

(6)构建了二自由度电磁执行器直接驱动的 AMT 换挡系统通用试验台架,验证了基于直驱技术的 AMT 换挡系统的可行性、功能性和通用性。在合适的换挡控制系统控制下,实现了 2-DOF EMA 作为 AMT 换挡系统驱动装置时的选换挡时序重叠功能,通过变换挡参数的试验研究确定了新型 AMT 换挡系统的可行性与通用性。对比试验台架改装前后两种 AMT 换挡系统的试验结果,验证了直驱自增力 AMT 换挡系统的可行性与功能性。实际测试结果表明,对于家用轿车的典型换挡参数($\Delta n=500\text{r/min}$, $J_s=0.03\text{kg}\cdot\text{m}^2$),当进挡过程的最大瞬时驱动力达到 1000N 时,2~3 挡的选换挡时间可控制在 200ms 以内,同步时间为 107ms,此时输入轴最大当量换挡冲击度为 179.5rad/s^3 ,单位面积滑摩功为 0.057J/mm^2 ,具有较小换挡冲击且满足同步器使用寿命要求的同时,较大程度地缩短了选换挡过程中的动力中断时间;研制的直驱自增力 AMT 换挡系统的力放大系数为 1.542,可将选换挡过程需要的最大瞬时驱动力降低 35%,为进一步缩小换挡驱动装置体积和降低换挡控制系统设计难度奠定了良好的基础。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 7 月

目 录

1 电磁直驱变速系统的由来	1
1.1 自动变速器的主要类型	2
1.2 AMT 的分类与发展现状	4
1.2.1 电控气动式 AMT	5
1.2.2 电控液动式 AMT	6
1.2.3 电控电动式 AMT	8
1.2.4 AMT 关键技术问题及发展趋势	10
1.3 直驱技术的研究现状	14
1.4 电磁直驱变速系统	16
2 电磁执行器	18
2.1 变速系统的换挡驱动要求	18
2.2 二自由度直接驱动装置方案研究	19
2.2.1 技术背景	19
2.2.2 方案设计	20
2.3 二自由度电磁执行器结构设计与系统建模	22
2.3.1 转动部分结构	22
2.3.2 直动部分结构	23
2.3.3 二自由度电磁执行器系统实现	25
2.3.4 二自由度电磁执行器系统建模	25
2.4 样机研制与特性分析	28
2.4.1 二自由度电磁执行器的样机研制	28
2.4.2 二自由度电磁执行器的特性分析	32
2.5 本章小结	36
3 电磁直驱换挡机构	38
3.1 基于直驱技术的 AMT 总体方案规划	38
3.2 选换挡执行机构的设计目标与思路	40
3.2.1 设计目标	40
3.2.2 设计思路	41
3.3 ETSM 方案	42

3.4	EFSM 方案	44
3.5	ESSM 方案	47
3.6	方案评估	48
3.7	本章小结	49
4	电动二自由度式换挡机构性能仿真	50
4.1	变速器选换挡机理分析	50
4.2	选换挡过程研究	52
4.2.1	退挡过程分段研究与建模	53
4.2.2	选挡过程分段研究与建模	54
4.2.3	进挡过程分段研究与建模	55
4.3	ETSM 性能仿真研究	63
4.3.1	系统建模	64
4.3.2	参数确定	65
4.3.3	结果与分析	66
4.4	驱动力加载规律研究	69
4.4.1	最大瞬时驱动力的确定原则	69
4.4.2	换挡拨叉有限元分析	70
4.4.3	基于换挡拨叉刚度分析结果的换挡控制策略修正	74
4.5	本章小结	76
5	直驱自增力 AMT 换挡系统研究	77
5.1	同步器研究的技术基础	77
5.2	增力式同步器设计	79
5.2.1	设计目标	79
5.2.2	动力传输方案研究	80
5.2.3	结构设计	81
5.3	增力式同步器工作原理与力学研究	83
5.3.1	增力式同步器工作原理	83
5.3.2	增力式同步器力学研究	85
5.4	直驱自增力换挡系统性能仿真研究与能耗分析	89
5.4.1	自增力功能仿真研究	89
5.4.2	换挡系统鲁棒性分析	90
5.4.3	增力式同步器性能研究	91
5.4.4	换挡同步阶段能耗分析	93
5.5	增力式同步器样件研制	96
5.5.1	结构参数设计与分析	96

5.5.2 原理样件研制	97
5.6 本章小结	98
6 直驱式 AMT 换挡系统试验研究	99
6.1 试验台架设计与实现	99
6.1.1 预期实现的功能	99
6.1.2 方案与结构设计	100
6.1.3 建模分析与参数校核	103
6.1.4 台架研制与工作原理阐述	105
6.1.5 台架测试结果修正	107
6.2 控制器设计	109
6.3 选换挡过程控制技术	117
6.4 二自由度电磁执行器直接驱动的 AMT 换挡系统试验研究	119
6.4.1 选换挡时序重叠试验	119
6.4.2 变换挡参数选换挡过程试验	121
6.5 直驱自增力 AMT 换挡系统试验研究	122
6.6 本章小结	125
7 电磁直驱变速系统总结与研究趋势	126
7.1 主要工作与结论	126
7.2 本书的创新性	127
7.3 研究趋势	128
参考文献	130
附录 主要符号说明	135

1 电磁直驱变速系统的由来

随着社会经济的飞速发展和国民生活水平的不断提高,汽车已逐渐成为人们生产生活的必需品。进入 21 世纪以来,我国汽车产业高速发展,产业集中度不断提高,产品技术水平明显提升,但作为世界汽车的生产大国,产业结构不合理、技术水平不高、自主开发能力薄弱、消费政策不完善等问题依然突出,能源、环保、城市交通等因素对汽车产业的制约日益显现^[1]。截至 2015 年年底,我国城镇居民每百户拥有家用汽车 31 辆^[2],未来 10 年左右每百户汽车拥有量将达到或接近 60 辆^[3]。近年来汽车数量的飞速增长,能源问题和环境问题日益突出,各国政府陆续出台了越来越严格的燃油消耗和排放的控制法规^[4],节能环保已跃升为科技发展的主旋律。

汽车变速系统是影响车辆动力性能和舒适性能的关键部件之一,传统手动变速器(mechanical transmission, MT)虽然能够满足汽车行驶的动力性和经济性要求,但也存在驾驶员工作强度大、换挡平顺性差和不易掌握最佳换挡时机等问题^[5]。为了消除手动变速器的种种弊端,尽可能方便驾驶,降低驾驶员的工作强度,汽车工程师一直致力于动力传动系统自动化的研究^[6]。20 世纪 80 年代以来,电子技术和计算机技术的发展使汽车的一些性能指标达到了前所未有的高度^[7],促使汽车自动变速技术受到了国内外研究机构和学者的极大关注并取得了突破性的进展。

目前应用较多的自动变速系统包括液力式自动变速器(automatic transmisson, AT)、机械无级式自动变速器(continuously variable transmisson, CVT)、双离合式自动变速器(dual clutch transmisson, DCT)和电控机械式自动变速器(automated mechanical transmisson, AMT)四种^[8]。各国际知名汽车或变速器生产厂家均有自己的自动变速器产品^[9],且已得到不同程度的应用。

AMT 由传统手动变速器改装而来,继承了手动变速器传动效率高、成本低且易于实现等优点,适用于我国变速技术发展的基本国情,在高效节能已成为科技发展主要趋势的今天,AMT 将成为自动变速技术发展的主要方向。但在实际使用过程中 AMT 存在选换挡执行机构体积较大、换挡能耗较高和换挡品质较差等问题。随着社会经济的不断发展,高效节能的驱动系统研究是大势所趋,而应用直驱技术的驱动系统恰好具备高效节能的技术特点。早在 19 世纪末就已经出现了具有直驱特性的电机理论^[10],但直至 20 世纪中期才得到快速的发展,至 90 年代中

期，世界范围内已有多家公司制造出直驱电机传动装置，并率先在高速机床的进给机构中实现应用。我国对直驱电机的研究和应用开始于 20 世纪 70 年代，受磁性材料、控制技术、冷却方法等限制，大规模应用一直较为缓慢。现阶段直驱技术已被应用于数控加工、信息与自动化、精密测量等设备上^[10]，并渗入到了交通、军事、航天和医学等关键技术领域，电动汽车上已开始尝试使用轮毂电机直接驱动车轮，而数控机床和磁悬浮列车也是直驱技术带来的产物。

直驱技术从结构上取消了中间运动转换环节，降低结构复杂性的同时，提高了系统的传动效率和动态响应速度，进而为运动机构的高精度控制和低能耗运行奠定了较好的技术基础。本书介绍一类将直驱技术应用到自动变速技术中的电磁直驱自动变速系统，将应用具有直接驱动特性的电磁执行器作为电控机械式自动变速器 (AMT) 的驱动装置，配以合适的控制技术，更为高效地完成汽车变速器的选换挡操作，从而提高 AMT 的换挡品质。

1.1 自动变速器的主要类型

变速技术伴随工业技术的不断进步，经历了手动、半自动和自动变速三个阶段，目前汽车上应用较多的自动变速器包括 AT、CVT、DCT 和 AMT 四种，国际各知名汽车或变速器生产厂家均有自己的自动变速器产品^[11]，其中具有代表性的产品如表 1.1 所示。

表 1.1 知名自动变速器产品统计表

公司名称	自动变速器产品
ZF	Ecomat (AT)、AS Tronic (AMT)
Alfa Romeo	Selespeed (AMT)
Audi	Tiptronic (AT)、Multitronic (CVT)、DSG (DCT)
Benz	Sequentronic (AMT)、7G-Tronic (AT)、Speedshift (AT)
BMW	Steptronic (AT)、SMG (AMT)、M-DCT (DCT)
Citroen	Sensodrive (AMT)
Eaton	Autoshift (AMT)、Ultrashtift (AMT)
Ferrari	F1 (AMT)
Ford	Durashift5-tronic (AT)、Durashift-EST (AMT)
Graziano	Independent Shift Rail (AMT)
Isuzu	NAVI-5 (AMT)
Maserati	Duoselect (AMT)

续表

公司名称	自动变速器产品
Opel	Easytronic (AMT)、Ctiveselect (AT)
Renault	X-Tronic (CVT)、Quickshift (AMT)
Volkswagen	DSG (DCT)、Tiptronic (AT)

AT 的传动系统主要由液力变矩器和行星齿轮组成,液力变矩器依靠工作轮叶片和工作液体间的相互作用引起机械能与液体能间的转换,实现动力传递的目的^[12],具有无级连续变速和变矩的能力,对外部负载扰动有良好的自动调节和适应性能,提高了车辆的起步平稳性和乘坐舒适性,但其传动效率不高,增加了发动机的燃油消耗量,且结构复杂、造价高,制造与维修困难。

CVT 可以实现全程无级变速,在各种工况下都能保证最佳传动比,汽车上装配的无级变速器为金属带式 CVT,其关键部件是加工有 V 型槽的带轮和 V 型金属带,依靠带与带轮间的摩擦力传递动力,通过自动调节主动带轮和从动带轮的直径来改变速比,实现真正意义上的无级变速,可获得非常平滑的变速效果,具有较好的驾驶舒适性和加速性能。发动机经常工作在经济区,燃油经济性好,但由于依靠摩擦传递动力,摩擦转矩和传递功率有限,且零部件精度和造价较高,目前仅适用于发动机排量在 3L 以下的车辆,使用量占自动变速器的 1%左右^[13],不过 CVT 理论上性能优越,一直以来均被视为自动变速器的发展方向之一。

DCT 采用预先结合相应挡位的方式进行预换挡,通过协调控制将要挂入挡位传动路线上的离合器结合和当前挡位传动路线上的离合器分离,实现在不同挡位间的无动力中断切换,此时需要两个离合器传递的扭矩出现部分重叠,若重叠过少,选换挡过程仍会产生动力中断,若重合过多,则会产生“双锁死”现象,对控制精度提出了较高的要求。其成本与 AT 相当但不具备 AT 的缓冲作用,较 AMT 有大幅提升但可靠性却低于 AMT^[14],不过 DCT 的先进设计理念仍可作为自动变速器发展的方向之一。近期,大众公司正在积极研发 10 速 DCT,预计在竭尽全力解决现有技术问题的基础上,使 DCT 系统更加节能,其实际使用效果值得期待。

AMT 兼具了 AT 和手动变速器的优点,具有 AT 能够实现自动变速的功能,又保留了 MT 齿轮传动效率高、生产制造成本低、结构简单易实现等优点,是符合我国当前国情的变速器产品。AMT 是在传统常规 MT 的基础上,应用先进电子技术和现代控制理论,以电子控制单元为核心,根据预设的换挡规律、离合器接合分离控制规律、发动机电子节气门控制规律,通过气动、电液或全电式执行器实现离合器的控制、升降挡和发动机节转矩转速的调节,从而实现车辆的正常行

驶。AMT 可以通过加装换挡执行器和控制系统实现对现有 MT 的改造,生产继承性好,改造成本低,容易在微型轿车上实现,而其缺点主要包括动力中断换挡、换挡过程会产生明显冲击和平顺性不足等,相关技术瓶颈的突破是 AMT 推广应用的前提。

1.2 AMT 的分类与发展现状

电控机械式自动变速器出现于 20 世纪 60~70 年代,70 年代中后期初步上市,经历了半自动 AMT、全自动 AMT、智能化 AMT 等阶段^[15],第一台装车的 AMT 是 20 世纪 80 年代 Ferrari 开发的 F355,并将其起名为 F1^[16]。之后宝马(BMW)公司也对 AMT 进行了深入的研究;20 世纪 80 年代,日本五十铃公司研制成功 NAVI-5 型全自动机械式自动变速器,装于飞鸟(ASKA)轿车后投入市场使用并取得了较好的效果^[17]。20 世纪 90 年代,AMT 技术的日益成熟,使车辆在复杂多变条件下的换挡品质和起步性能进一步提高,应用 AMT 技术的重型汽车越来越受到好评^[18,19],且符合当代科技追求功能完善与价格低廉的产品发展趋势,随着技术方案和控制技术的不断完善,AMT 的推广率和装车率逐年稳步上升,并已得到了用户的广泛认可^[20]。

电控机械式自动变速器在手动变速器和干式离合器的基础上利用先进的电子技术实现自动换挡,具有传动效率高、成本低、结构简单的优点,其主要由传统手动变速器、电子控制系统、节气门执行机构、离合器执行机构和选换挡执行机构等部分组成^[21],各组成部分之间的工作关系如图 1.1 所示。

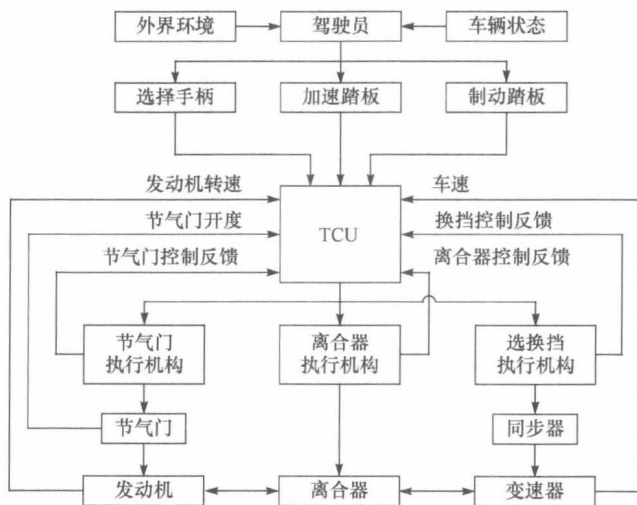


图 1.1 AMT 系统工作原理

AMT 经历了电控气动式和电控液动式的发展阶段,但由于其体积较大和固有迟滞性等问题的存在,近年来体积小且传动效率高的电控电动式 AMT 逐渐成为了机械式自动变速器的研究重点。为进一步提高 AMT 的换挡品质和换挡机构的可控性、减小换挡驱动装置的体积,国外相关研究机构已尝试将直驱技术引入到了电控电动式 AMT 技术中,并已取得了较好的试验结果。

1.2.1 电控气动式 AMT

电控气动式 AMT 通过气缸压缩气体来实现选换挡过程驱动,适用于装有充足气源的重型商用车辆^[22,23]。目前国内研究气动式 AMT 较多的科研单位有北京理工大学、吉林大学、一汽研发中心和东风汽车公司等,其中北京理工大学对气动式 AMT 做了较为深入的研究,包括选换挡执行机构设计优化、离合器执行机构及其控制技术和车辆复杂工况起步控制策略等^[24-26]。

气动式 AMT 的结构原理如图 1.2 所示,主要由三部分组成:主箱、高低挡切换副箱(R 副箱)和插入式副箱(S 副箱),主箱有 4 个挡位,组合 S 副箱后可实现 6 个挡位,再配合 R 副箱中的 H 挡和 L 挡,可实现 12 个挡位的换挡。结构原理图中 4 个气缸的选换挡动作可以通过控制各自电磁阀组中电磁阀的进排气来完成,从而使气动 AMT 的选换挡控制表现为各组电磁阀的逻辑控制。气动式 AMT 中气体体积是可压缩的,选换挡过程平顺,提高了车辆的乘坐舒适性^[27];应用在有气源或其他储能装置的重型车辆上时,减轻了驾驶员的劳动强度并提高了整车的燃油经济性^[28]。但由于气缸压缩气体驱动选换挡执行机构时具有一定的迟滞性,使选换挡过程动力中断时间较长,气动式 AMT 在没有气源且对换挡品质要求较高的微、轻型车辆上应用较少。

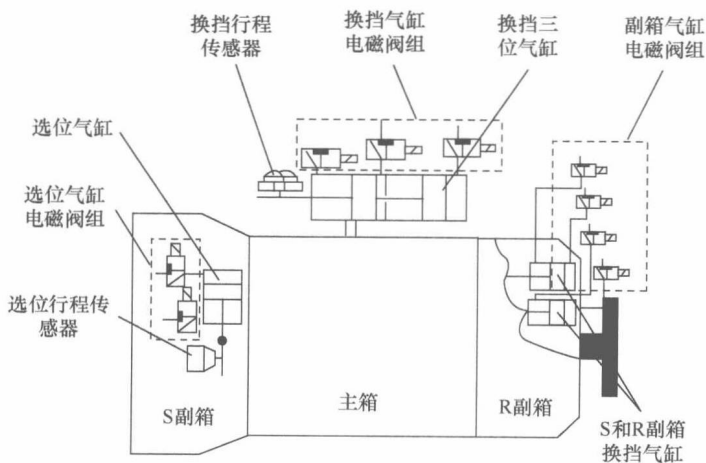


图 1.2 气动式 AMT 结构原理

1.2.2 电控液动式 AMT

电控液动式 AMT 系统根据接收到的电控单元指令控制电磁阀,通过液压缸驱动执行机构完成离合器的分离、接合和变速器选换挡等运动,具有能容量大、操作简单和易于实现安全保护等优点^[29,30]。国内研究液动式 AMT 的科研单位包括吉林大学、重庆大学、北京理工大学、西北工业大学和一汽研发中心等,主要进行了选换挡执行机构设计、优化和选换挡过程精确控制等研究,且已取得了较为突出的成果^[31-33];国外具有代表性的电控液动式 AMT 主要包括以下三种^[34]。

(1)ZF 公司研发的 ASTronic 家族中最小的一款 6 挡自动变速箱 ASTronic Lite,其产品结构如图 1.3 所示,它是在 ZF 手动变速箱 6S1010BO 的基础上增加了一套电控液压离合器和换挡系统,从而实现了自动化。ASTronic Lite 主要由换挡控制模块、离合器控制模块和带一体式电控单元的动力包组成。动力包中的电机驱动液压泵,提供换挡系统和离合器系统的动力。变速箱电控单元根据采集到的车辆信息,选择最佳换挡策略,通过液压执行机构自动进行换挡操作。

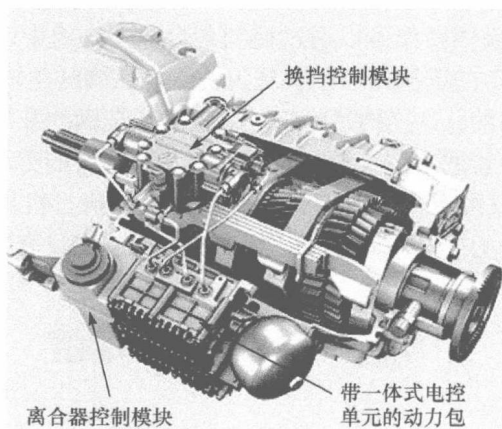


图 1.3 ASTronic Lite 变速箱

(2)宝马公司陆续开发了 SMG (Sequential manual gearbox) 系列自动变速器,7 速 SMG III 的产品结构如图 1.4 所示。其换挡操作与 AT 类似,但取消了液力变矩器,使传动过程中的能量损耗降低,简化系统结构的同时降低了生产成本。虽然现阶段宝马公司的大部分新车型都已使用 M-DCT 双离合变速器,但 SMG 系列变速箱无论在动力输出还是在换挡品质方面,与同代产品相比均有明显的优势,是一种具有代表意义的电控液动式 AMT。

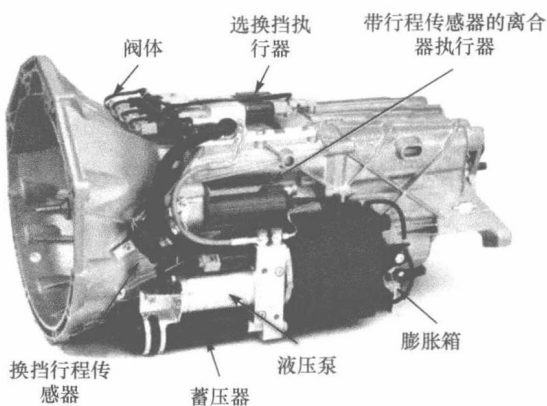


图 1.4 7 速 SMGⅢ 变速箱

(3) 意大利变速箱制造商格拉奇亚诺 (Oerlikon Graziano) 生产的 ISR (independent shift rail) 变速箱，其产品结构如图 1.5 所示。ISR 变速箱采用两轴式变速器内部结构，使用液压泵直接驱动换挡拨叉换挡，无选挡过程，缩短了换挡时间，主要装备在兰博基尼的 Aventador LP700-4 上，有效保证了此款车型的动力性能。

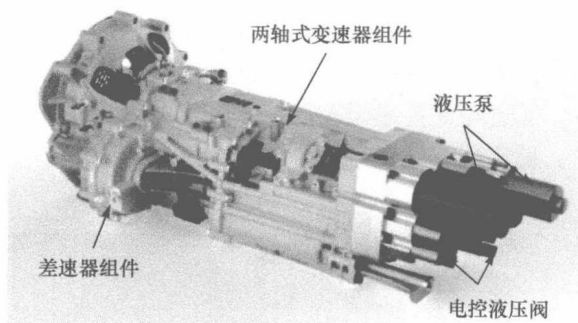


图 1.5 ISR 变速箱

电控液动式 AMT 是一种集成了 AT 和传统手动变速器优点的机电液一体化自动变速器，既具有液力自动变速器的优点，又保留了手动变速器齿轮传动的效率高和结构简单的长处，是 AMT 中相对成熟的一种形式，但也存在液压装置的迟滞性、加工难、造价高和液压油受温度影响较大且容易泄漏造成环境污染等问题^[35]。驱动装置从电控液动式到电控电动式的转变，以及实现发动机与 AMT 一体化控制已成为 AMT 技术发展的主要方向。

1.2.3 电控电动式 AMT

电子与计算机技术的飞速发展和电机及其控制技术的日臻完善,为电机作为 AMT 选换挡执行机构的驱动装置奠定了基础。气缸和液压缸驱动装置存在的固有缺陷促使国内外相关机构对 AMT 的研究重点逐渐转向了电控电动式(全电式)AMT。全电式 AMT 通过多个直流电机分别驱动离合器执行机构和选换挡执行机构,TCU(transmission control unit)接收选换挡过程中采集到的状态参数反馈信号,实现选换挡过程中离合器和选换挡执行机构的实时控制^[36],具有控制精度高、响应速度快、可靠性强和生产成本低等优点。以一个直流电机取代气缸或油缸及其两个电磁阀,简化选换挡执行机构整体结构的同时,减小了对环境的污染^[37]。

近年来国内外的部分汽车企业和相关科研单位已对全电式 AMT 做了大量的研究工作^[38,39]。国内的汽车企业和科研单位主要包括深圳市欣源晟实业有限公司、同济大学、吉林大学、重庆大学、奇瑞汽车研究院、吉利汽车研究院和湖南中德汽车自动变速器股份有限公司等。深圳市欣源晟实业有限公司在轿车上试装了全电式 AMT,通过 3 个普通电动机分别完成油门执行机构、离合器执行机构、选换挡执行机构的运动,提高了 AMT 上各个执行机构的控制精度和响应速度^[12]。

吉林大学研制的典型全电式 AMT 选换挡执行机构如图 1.6 所示。该选换挡执行机构的工作原理为:采用螺旋丝杠作为选挡轴,选挡电机输出和丝杠相连,螺旋丝杠将选挡电机的旋转运动转换为选挡拨头的直线运动,进而带动换挡拨头运动至目标挡位拨块凹槽中,实现选挡;换挡轴和换挡拨头之间通过花键连接,换挡电机旋转换挡轴,通过花键传递至换挡拨头,完成换挡动作。这种方案具有结构简单、零部件少、易实现等优点。

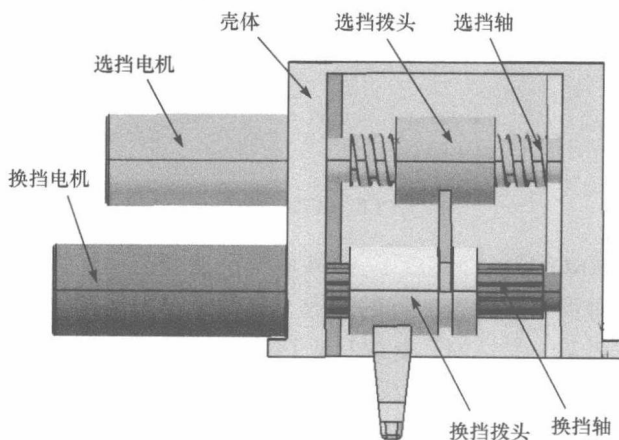


图 1.6 吉林大学研制的全电式 AMT 选换挡执行机构

湖南中德汽车自动变速器股份有限公司研制的新型全电式 AMT 选换挡执行机构和离合器执行机构，深入探讨了全电式 AMT 与发动机的系统一体化控制，并已在长丰猎豹越野系列车型上得到应用^[40]，使用的 AMT 样机如图 1.7 所示。

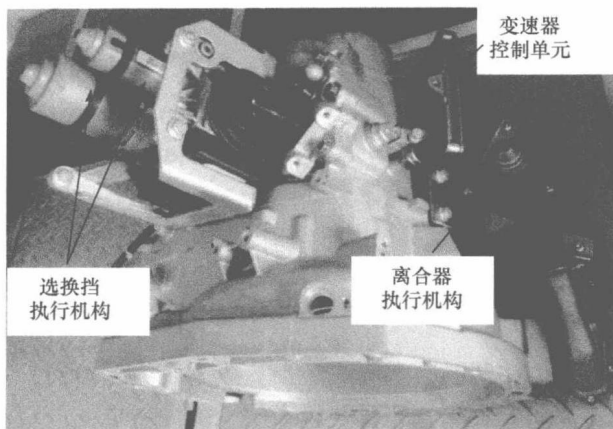


图 1.7 中德汽车自动变速器股份有限公司研制的全电式 AMT

图 1.7 中的全电式 AMT 主要包括变速器控制单元、选换挡执行机构和离合器执行机构等^[41]，执行机构的工作原理如图 1.8 和图 1.9 所示。选换挡执行机构是一个单摇臂机构，其上两个直流电机分别通过齿轮齿条机构和连杆机构的运动转换实现选换挡功能，结构简单、成本低，提升了选换挡执行机构的可控性和传动效率^[42]；离合器执行机构由直流电机、减速机构、补偿机构、分离摇臂、分离杆、弹簧助力机构组成，具有离合器位置自补偿功能，即离合器磨损后，通过补偿机构保证离合器的分离摇臂和分离轴承之间无间隙^[43]。

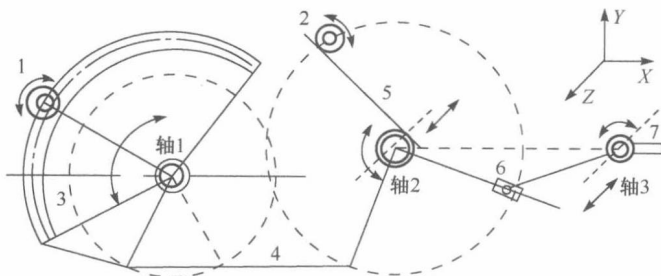


图 1.8 选换挡执行机构原理图

1-换挡电机输出轴；2-选挡电机输出轴；3-换挡减速齿轮；4-连杆机构；5-齿轮齿条机构；6-换挡球头；7-换挡指