

# 永磁滑差传动机构 设计、仿真与优化

邹政耀 付香梅 卢军锋 著

清华大学出版社

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书提出一种利用永磁非接触传动特性实现不中断动力换挡的方案,降低换挡冲击。在简要阐述相关磁学知识后,就利用永磁体本身磁导率低的特点,更进一步介绍磁学知识的应用场境,介绍了几种新发电机和电动机结构;并且重点介绍了永磁滑差传动机构方案的构思过程、性能与结构参数之间的关系、磁场仿真计算和优化设计;将已有的磁学理论和磁场仿真计算方法应用于新型的永磁滑差传动机构的设计研究,结合新结构的磁路特点提出了等效面积的计算方法。

本书理论性和实用性强,可作为机械传动相关领域的工程技术和科学研究人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

### 图书在版编目(CIP)数据

永磁滑差传动机构设计、仿真与优化/邹政耀,付香梅,卢军锋著. —北京:清华大学出版社,2023.12  
ISBN 978-7-302-65105-5

I. ①永… II. ①邹… ②付… ③卢… III. ①永磁式电机 IV. ①TM351

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2024)第 000859 号

责任编辑:许 龙

封面设计:傅瑞学

责任校对:欧 洋

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市人民印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:9

字 数:194千字

版 次:2023年12月第1版

印 次:2023年12月第1次印刷

定 价:65.00元

产品编号:089935-01

# 前言

永磁传动为非接触传动,能实现隔振、软启动和解决动密封问题。目前主要有永磁耦合传动和永磁齿轮两种方式,在食品加工、化工设备和高精度加工等领域应用。利用永磁传动的非接触特性,解决汽车换挡时的冲击问题,对提升汽车的换挡品质具有帮助。

本书对涉及的磁学知识进行了梳理,介绍了磁学的一些基本量、磁路和铁磁材料知识,穿插一些应用实例,例如自动冲压线上使用永磁体分离冲材的磁学原理;小尺寸整体式永磁转子多磁极的充磁问题;为避开相邻永磁体在磁路中的大磁阻而提出的新型永磁直线发电机、内转子永磁电动机、盘式永磁电动机和外转子永磁电动机的结构,通过这些实例更深入理解磁学知识。在此基础上对永磁滑差传动机构的实现方案进行了研究,在讨论轴向往复运动、扇形永磁体叠加这些方案后,选定扇形永磁体和偏心圆弧异形永磁体组合的方案继续研究,以获得平稳的磁扭矩-相对转角特性。重点讨论了偏心圆弧的圆心位置、半径大小这两个参数对于磁扭矩-相对转角特性的影响。结合磁路特性和铁心材料特性,讨论了气隙尺寸、扇形永磁体和异形永磁体参数、硅钢片铁心结构及尺寸对于磁扭矩-相对转角特性的影响。运用 3D 磁场分析揭示了这些参数变化对于磁扭矩-相对转角特性影响的内在逻辑,提出使用等效面积法作为优化设计和计算的方法。设计 BP 神经网络仿真模型对结构参数进行了优化设计,在给定设计目标后,能快速获得最佳匹配的系统结构参数,即扇形永磁体和异形永磁体参数,并且使用遗传算法极值寻优了异形永磁体的结构参数。最后提出了能输出精确正弦规律的双曲柄连杆机构,使用正弦规律的位移、速度驱动磁盘,能精确地动态测试永磁滑差传动机构的磁扭矩-相对转角特性。

本书由金陵科技学院邹政耀、付香梅和卢军锋共同完成,全书由邹政耀统稿。在写作过程中引用了参考文献中的相关内容,对于资料的作者表示感谢。另外还要感谢刘英老师的指导,感谢张瑞、邹务丰协助整理资料。本书由金陵科技学院高层次人才引进项目(项目号:jit-rcyj-201701)资助出版。

由于永磁传动技术还在发展中,很多相关技术和理论也在研究过程中,加上作者水平有限,书中的疏漏和不当之处在所难免,敬请指正。

作者

2023 年 5 月

清华大学出版社

# 目录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究的目的是和意义 .....	1
1.2 研究背景和研究内容 .....	2
1.3 自动变速器换挡技术国内外研究现状 .....	3
1.3.1 换挡品质指标的研究 .....	4
1.3.2 离合器控制的研究 .....	5
1.3.3 离合器和发动机联合控制的研究 .....	6
1.3.4 离合器算法的研究 .....	9
1.4 永磁传动技术国内外研究现状 .....	11
1.4.1 永磁齿轮的国内外研究现状 .....	12
1.4.2 永磁联轴器的国内外研究现状 .....	13
1.5 本书的研究目标 .....	14
1.6 拟解决的关键问题、研究方法及技术路线 .....	14
<b>第 2 章 磁学基础及几种永磁特种电动机</b> .....	16
2.1 直线发电机的结构和工作原理 .....	16
2.2 磁学相关知识 .....	17
2.2.1 磁学术语 .....	18
2.2.2 永磁体的相关知识 .....	21
2.2.3 软磁材料的相关术语 .....	22
2.2.4 磁路的相关术语 .....	25
2.2.5 充磁技术 .....	28
2.3 几种磁路有特色的装置 .....	29

2.3.1	表贴式永磁电动机磁路的不足分析	30
2.3.2	一款直线发电机的结构及原理	33
2.3.3	一款低磁阻多气隙外转子永磁电动机	35
2.3.4	一款低磁阻多气隙内转子永磁电动机	37
2.3.5	双小气隙盘式永磁电动机	38
2.4	永磁传动装置的磁扭矩计算	39
2.5	本章小结	39
<b>第3章</b>	<b>永磁滑差传动方案的研究</b>	<b>40</b>
3.1	稀疏对称排列永磁体	40
3.1.1	联轴器传动模式	41
3.1.2	滑差传动模式	41
3.1.3	机构参数特性的研究	42
3.2	驱动磁盘扇形永磁体叠加方案	46
3.2.1	建立磁扭矩计算模型	46
3.2.2	数值计算结果分析	51
3.2.3	输出磁盘导向控制机构设计	52
3.3	具有偏心圆弧结构的异形永磁体方案	53
3.3.1	建立扇形永磁体的永磁滑差离合器计算模型	54
3.3.2	异形永磁体方案研究	55
3.4	永磁体相互作用临界位置的研究	57
3.5	间隙驱动控制系统设计	61
3.5.1	系统结构设计	61
3.5.2	力学性能分析	63
3.5.3	计算实例	64
3.6	本章小结	65
<b>第4章</b>	<b>永磁滑差离合器磁扭矩仿真研究</b>	<b>66</b>
4.1	仿真模型参数的研究	66
4.1.1	永磁体间最小气隙的确定	67
4.1.2	背面硅钢片厚度的确定	74
4.1.3	铁心中的磁通量密度分布研究	75
4.2	运动仿真模型的设置	77
4.2.1	运动驱动方式和驱动速度的设置	77

4.2.2	三维磁场仿真选项设置 .....	77
4.2.3	局部三维网格模型调整 .....	78
4.2.4	铁心材料及特性 .....	79
4.3	平稳磁扭矩-相对转角特性的研究 .....	81
4.3.1	沿分割线截面变化规律的研究 .....	81
4.3.2	不同偏心圆弧方案对磁扭矩的影响 .....	82
4.3.3	异形永磁体圆心角的讨论 .....	87
4.4	边界条件设置和仿真结果 .....	87
4.5	磁扭矩-相对转角特性的评价指标的研究 .....	88
4.6	本章小结 .....	89
<b>第 5 章</b>	<b>永磁滑差离合器永磁扭矩测量试验及分析 .....</b>	<b>90</b>
5.1	试验方案研究 .....	90
5.1.1	试验目的与试验方法 .....	90
5.1.2	永磁体支架盘设计 .....	91
5.1.3	扇形和异形永磁体制作 .....	92
5.1.4	磁扭矩测试 .....	92
5.1.5	磁扭矩结果 .....	93
5.2	试验结果分析 .....	94
5.2.1	单侧磁力问题 .....	95
5.2.2	气隙和硅钢片中的磁场分布情况 .....	95
5.3	临界位置和关键位置的磁通量密度分布分析 .....	102
5.4	不同相对转速下的磁扭矩-相对转角特性曲线 .....	107
5.5	使用等效面积法仿真计算磁扭矩规律 .....	108
5.6	异形永磁体参数的遗传算法极值寻优 .....	119
5.7	输出精确正弦规律的双曲柄连杆机构 .....	122
5.8	本章小结 .....	123
<b>第 6 章</b>	<b>总结与展望 .....</b>	<b>124</b>
6.1	总结 .....	124
6.2	展望 .....	125
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>126</b>
<b>附录</b>	<b>MATLAB 计算程序代码 .....</b>	<b>130</b>

清华大学出版社

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 研究的目的是和意义

舒适的汽车乘坐体验是用户和汽车设计人员共同的追求,降低换挡冲击对实现这个目标具有非常大的意义。现代汽车普遍采用自动变速器来提高换挡品质、降低驾驶劳动强度。汽车传动系中发动机和变速器之间部件的性能对于提高换挡品质非常重要,同时要求该部件具有效率高、体积小和维护方便等特点,因而发展出较多的类型。目前使用的典型部件有膜片弹簧离合器、液力变矩器、双离合器和湿式多片离合器,各自具有优势和不足。配备手动挡变速器的汽车依赖驾驶员的驾驶技术,驾驶员依靠经验根据发动机转速、车速、路况和加减速要求对离合器分离和接合的规律进行控制。配备双离合器的自动变速器换挡时间短,可获得很好的换挡品质,但它对机电液控制系统要求很高。配备液力变矩器的液力机械式自动变速器的汽车,依靠精确控制多个湿式多片离合器的接合和分离规律达到高品质换挡,目前已经有具备 9 个前进挡位的量产产品,产品起步性能很好,但在低挡时有时能感受到换挡冲击,且结构复杂。

以膜片弹簧离合器为例,换挡冲击的产生是由于汽车使用了有级变速机构,在离合器分离前其主、从动部件转速一致,换挡是在离合器分离后,有级变速机构通过换挡改变了离合器主动部件的转速,离合器主动部件的转速和发动机转速一致,由于松开油门使得发动机转速下降,而从动部件由于车速变化小认为基本不变,因此主动部件和从动部件之间存在速度差,当离合机构接合时,如果传递扭矩的冲击度较大,则引起较大换挡冲击,使得换挡品质降低。装备有液力变矩器有级变速机构的汽车存在同样的问题,特别是在低挡时有明显的换挡冲击感觉。无级变速器虽然很好地解决了这个问题,但在成本、功率容量和起步控制等方面存在一些问题,限制了其应用推广。

降低换挡时扭矩的冲击度可以降低换挡冲击的强度,为解决这个问题,目前已经研究出很多方法。例如,液力机械式变速器采用增加挡位数的方法,通过缩小换挡时液力变矩器泵轮和涡轮之间的转速差来降低换挡冲击和提高效率,但提高挡位数导致变速器结构复杂,控

制元件多,在低挡时仍然存在较强的换挡顿挫感。双离合自动变速器则通过两个离合器的组合作用,即在短时间内两个离合器同时处于滑摩阶段,然后控制两个离合器压力的快速增加和减小,达到换挡品质提高的效果,但滑摩功率大会产生大量的热,引起离合器温度升高。

为实现平顺换挡的目的,提出了永磁滑差传动机构,利用永磁传动具有非接触的优势,在换挡时传递扭矩为 $10\sim 20\text{N}\cdot\text{m}$ ,能在相对转速为 $0\sim 100\text{r}/\text{min}$ 范围内无级变速传动,实现不中断动力换挡,基于这个特点达到降低换挡冲击的目的,获得较好的换挡品质。目前使用的永磁传动机构主要有永磁联轴器、永磁齿轮和永磁涡流耦合器。其中永磁联轴器主要应用于食品加工设备、化工设备和精密加工设备,为非接触传动,主动部分和从动部分有小相位差,但平均速度不能改变,即传动比为1。永磁齿轮作为一种非接触传动形式,可获得较高的传递扭矩密度,目前国内吉林大学、东南大学、江苏大学和合肥工业大学等大学有较好研究成果的报道,但它的传动比是固定的,也不能实现滑差传动。永磁涡流耦合器也是永磁耦合传动的一种,这里将其单独列出,永磁体在从动铜盘中感应电流,利用感应电流产生的电磁场与永磁场之间的力进行传动,能实现无级变速,但总是存在转速差,一般最小为3%,这使其在汽车传动中由于效率低而难以应用,且体积较大。而本课题拟研究的永磁传动机构将具有两种工作模式:永磁滑差传动模式和永磁联轴器传动模式,在固定挡位传动时为永磁联轴器传动模式,效率接近99%,在换挡时为永磁滑差传动模式,实现无级变速传动以平稳传递扭矩,降低换挡时扭矩变化的冲击度。随着永磁材料的发展,永磁材料具有高磁能积和矫顽力,为本课题的研究提供了前提条件。难点在于永磁滑差传动工况,如何保持磁扭矩波动较小和控制精度较高是一个基本的目标,其可行的前提是要设法获得平稳的磁扭矩-相对转角特性。因此本课题聚焦于平稳磁扭矩-相对转角特性的研究,驱动磁盘和发动机转速一致,输出磁作变速转动,以达到换挡时能实现无级变速平稳传动,降低换挡冲击,实现高品质换挡,提高换挡舒适性。永磁传动机构具有结构简单、制作成本低、因磨损小而使用寿命长和本身能缓冲振动的特点,使得传动更平稳可靠,在固定挡位行驶时工作于联轴器工况而具有高传动效率,和摩擦离合器配合工作时能实现低冲击度自动换挡。实现装配低成本自动换挡控制机构和较易实现的自动换挡的控制策略,为我国汽车工业自动变速器离合机构的国产化提供一个新的可选方案,永磁传动机构能有效降低换挡冲击,对避开国外自动变速器零部件专利、提升国产自动变速器离合部件的品质具有很好的参考意义。

## 1.2 研究背景和研究内容

自动变速器根据驾驶人的驾驶意图负责把发动机动力自动、高效、平顺地传递到车轮,其性能与整车的动力性、燃油经济性、安全性、舒适性和操作便利性等密切相关。自动变速器控制技术的发展分为三个阶段:液力控制阶段、电液控制阶段和智能控制阶段。智能换挡控制系统在换挡时考虑了行驶工况、驾驶人的操作意图和车辆自身性能状况,使车辆像经验丰富的驾驶人一样自动换挡,满足车辆行驶的各种性能需求<sup>[1]</sup>。2015年我国自动变速器

的市场需求超 1000 万台,而自产变速器的市场占有率不足 3%,我国是汽车大国而不是汽车强国的根本原因是我国汽车核心零部件技术不强,以汽车自动变速器为代表的核心零部件长期依赖国外进口。掌握自动变速器等核心零部件的技术及其产业化,是几代中国人一直不断努力的目标。

液力自动变速器的换挡元件通常包括多个离合器和制动器,且它们分布在自动变速器的不同部位。布置位置的不同导致每个离合器的滑移值以及转矩容量值对于整个系统的影响程度不一样,但是在换挡过程中必须完成离合器之间的转矩交换和离合器滑差控制。为解决这个问题,戴振坤等基于滑差和转矩等价的原则,将离合器等效迁移至输入轴的位置,从而使液力自动变速器的离合器控制变为双离合器的控制<sup>[2]</sup>。这些措施实现了自动变速器快速和高品质的换挡,但需要控制多个执行零件且同时按一定时序规律精确控制两个离合器接合和分离的过程,因此要求控制系统的传感器信号和执行机构的精度非常高,设计制造标准高。

基于上述结构的部分不足,因而拟采用干式离合器和永磁滑差传动机构并联的工作方式,干式离合器为开关信号控制,永磁滑差传动机构承担过渡工况的无级变速传动。由于永磁滑差传动机构有两种工作模式:永磁滑差传动模式和永磁联轴器传动模式,当车辆在固定挡位传动时效率高,在换挡时能实现小扭矩无级变速传动,类似于离合器半联动传动状态。如此则无需工作液,降低了控制系统的复杂程度和实现难度,且可以用于纯电动汽车的二挡变速器,降低换挡冲击和换挡异响。

### 1.3 自动变速器换挡技术国内外研究现状

自动变速器是集机、电、液、控于一体的汽车核心零部件,其换挡特性对乘坐舒适性有较大的影响。根据换挡过程中发动机驱动转矩正负及升降挡的不同,换挡过程工况分为以下四种主要类型:有动力升挡、有动力降挡、无动力升挡、无动力降挡,相关发动机节气门开度、发动机通过离合器对车辆的扭矩、典型工况和发动机转速变化方向如表 1-1 所示。现代液力自动变速器的换挡控制包含对发动机和离合器的双重控制,而单纯针对发动机或离合器的控制研究、两者联合的研究和控制规律的算法研究,均能降低换挡冲击以提高换挡品质。

表 1-1 四种主要换挡类型

换挡类型	发动机通过离合器对车辆的扭矩	节气门开度	典型工况	发动机转速
有动力升挡	驱动扭矩	开度不为零	车辆加速升挡	降速
有动力降挡	驱动扭矩	大开度	车辆加速超车	升速
无动力升挡	阻力矩	收起超速踏板,节气门开度减小	超车后,车辆滑行升挡的过程	降速
无动力降挡	阻力矩	开度为零	车辆减速滑行降挡	升速

### 1.3.1 换挡品质指标的研究

现代汽车的自动变速器一般依赖有级变速器进行换挡,其换挡品质与发动机性能、变速器性能、整车性能和路况等均有关。一般起步时换挡冲击较大,深入研究起步品质和换挡品质的评价指标具有较大的意义,一些新的评价指标也被提出。武汉理工大学的冯杰等以换挡过程的生物力学与工学分析为基础,提出换挡清晰度、换挡力度、操作系统的设计与布置、换挡的振动和噪声四个评价指标,系统分析和构建了基于消费者主观评价的汽车换挡性能评价体系<sup>[3]</sup>。这四个指标涉及变速器参数、控制系统性能和人体工程学,均与换挡品质有较大的关系。针对双离合自动变速器控制品质的评价系统是复杂的多层次和多指标系统,吉林大学的宋世欣从控制的角度出发将评价指标细分定义,设计了控制品质评价系统,并研究了各个评价指标与控制品质的映射关系,图 1-1 给出了起步品质和换挡品质的评价指标<sup>[4]</sup>,具体有加速度峰值  $a_p$ 、换挡冲击度  $j_{p-n}$ 、换挡时长  $t_L$  以及发动机转速波动  $\Delta\omega$ 。

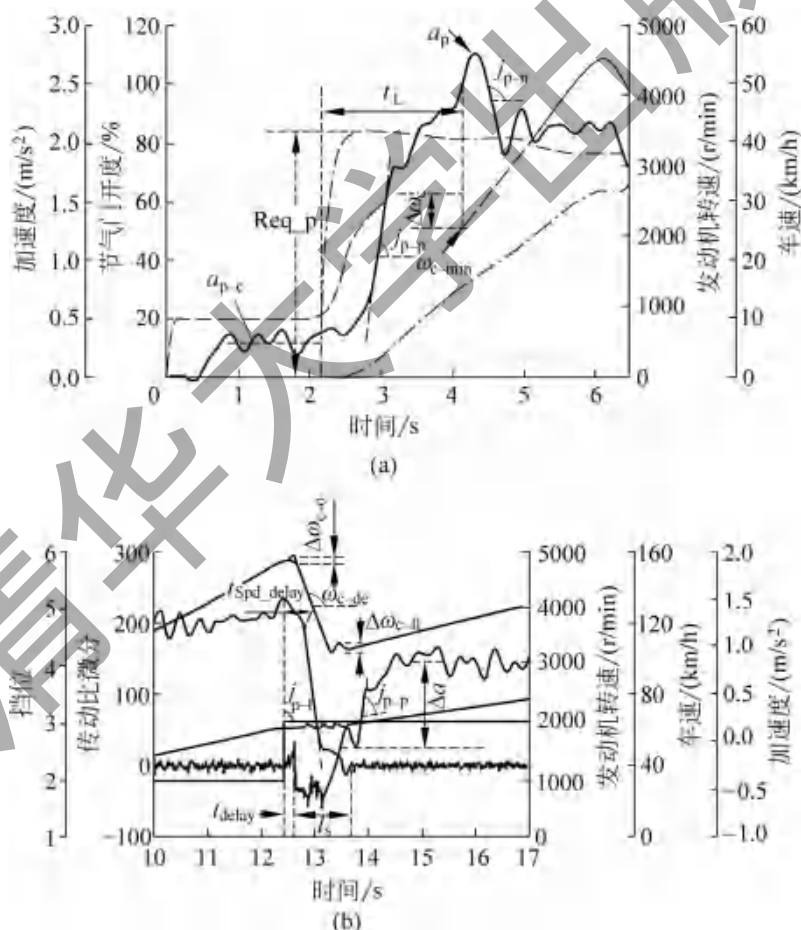


图 1-1 起步品质和换挡品质评价指标

(a) 起步品质评价指标; (b) 换挡品质评价指标

等。换挡品质较复杂且具有研究意义,有的指标是相互矛盾的,例如增加滑摩时长能降低扭矩冲击度,但对于摩擦片的热负荷和效率不利,因此需要对发动机和变速器之间的连接机构做进一步的研究。

### 1.3.2 离合器控制的研究

随着电控技术的发展,离合器成为自动变速器最主要的换挡元件,且其接合和分离规律能按一定规律被精确控制,通过控制离合器即能大幅提升换挡品质。

奥地利约翰·开普勒林茨大学的 Schoeftner 等研究了过去的自动变速器和手动变速器的应用状况,指出双离合变速器(DSG)在生产成本、转换质量、驾驶性能和燃油效率方面是合理的折中方案<sup>[5]</sup>。美国密歇根大学蒂尔伯恩分校的 Elzaghir W 等提出了具有双离合变速器的混合动力汽车的自适应控制,用于速度和档位变化期间控制电动机,与传统的操作方法相比,可以减少扭矩中断,并减少车辆晃动<sup>[6]</sup>。韩国科学技术院的 OhJJ 等侧重于对双离合变速器的每个离合器上的传递扭矩进行可靠的单独估算,所提出的双离合变速器扭矩估计器被证明适合实际汽车应用<sup>[7]</sup>。荷兰埃因霍芬理工大学的 Koos van Berkel 等利用离合器接合阶段来明确区分每个目标的控制规律,通过快速的离合器接合以减少换挡时间,通过平稳的离合器接合以准确地跟踪所需扭矩而不会出现明显的扭矩下降<sup>[8]</sup>。这些针对不同目标部件的控制是较复杂的,对于实际应用具有可见的帮助,但也使得在应用时增加了系统的复杂程度。

通过优化离合器分离和结合规律,能有效减小换挡的冲击度,达到提升换挡品质的目的。江苏大学的于英等优化了换挡品质,图 1-2 为 1 挡升 2 挡时两个离合器传递扭矩的变化规律<sup>[9]</sup>。从图 1-2 中可以看出,两个离合器分离和接合的时间非常短,在 0.3s 内完成换挡且要求两者之间具有精确的相位关系,可见控制系统的难度很大。同济大学的赵治国等基于自主开发的 6 速干式双离合变速器,提出了提前接合目标挡位离合器以减小同步器两端转速差的协调控制策略和拨叉轴位置伺服控制策略,以改善双离合变速器预换挡品质,在预换挡同步阶段及接合套与齿圈啮合阶段的初期,冲击度均未超过  $3\text{m/s}^3$ ,提升了舒适性<sup>[10]</sup>。

还有更进一步针对换挡过程中的细节的研究,如北京航空航天大学王书翰等为了解决自动变速器静态换挡中充油阶段结束时刻离合器油压波动问题,分析了静态换挡的关键充油特性,并提出了充油阶段的优化控制策略,构建了包括手动阀、液控换向阀和离合器的机电液多物理耦合的仿真模型并进行了仿真分析<sup>[11]</sup>,当换挡开始时刻手动阀阀口的开口设为 2.85mm 时,在 0.02s 间隔内离合器压力从 0.152MPa 降低为 0.148MPa。从该研究可以看出,仅仅是充油阶段的控制策略已经具有较高的技术含量,对于自动变速器的整体控制及其与整车的匹配,则更复杂。

双离合变速器是综合成本和性能而实现的一种较新的自动变速器,换挡时为避免动力中断,要求两个离合器分离同时作用一段时间,才能实现不中断动力换挡和消除换挡冲击,

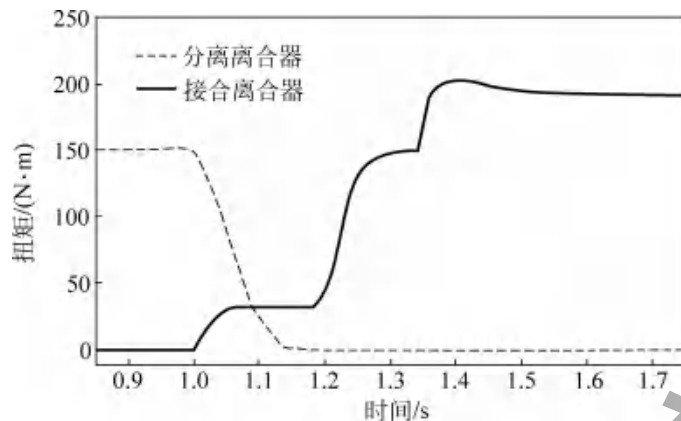


图 1-2 1 挡升 2 挡离合器扭矩

因而较好的换挡品质是其优势。但如果控制不当可能造成两个挡位之间发生互锁干涉或动力中断,使传动系统产生较大的动载荷,造成离合器滑摩、自激振动、传动系统冲击及换挡冲击等现象,表现为变速器输出轴上产生转矩波动,所以需要联合发动机控制来提高换挡品质。

双离合变速器是兼顾了成本和效率的传动方案,具有较好的换挡品质,但由于两个离合器有短时间同时摩擦的状态,必然存在运动干涉。上述研究显示对于发动机和两个离合器的控制要求高,时间短且相位精确,在实际应用的某些场合可能很难实现。

### 1.3.3 离合器和发动机联合控制的研究

发动机的速度特性和负荷特性对于换挡品质的影响也非常大,有国外品牌出现了换挡时发动机转速突然大幅升高的状况,后通过升级软件解决该问题。发动机和变速器之间的匹配研究,不仅对发动机的多项性能有影响,也对变速器的换挡品质有非常大的影响。

换挡规律如果没有和特定发动机进行较好地匹配,会引起发动机的许多问题。瑞典林雪平大学的 Lars E 等针对大型柴油发动机,研究了废气再循环系统对加速性能的影响,优化废气再循环系统的控制策略可改善低速加速时的换挡性能和排放<sup>[12]</sup>。英国 Strathclyde 大学的 Gerasimos T 等研究了可变几何涡轮增压器对柴油发动机的影响,并提出了可变几何涡轮增压器执行器的控制方法以降低机体抖动<sup>[13]</sup>。巴基斯坦首都科技大学的 Ghulam M 等使用容错技术控制可变几何涡轮增压器,使得发动机的抖动减小<sup>[14]</sup>。从针对发动机变工况控制的研究可以看出,短时间内精确控制发动机的输出性能难度较大、要求较高。

为提高换挡品质,需要结合发动机的控制。哈尔滨工业大学的高金武等结合在升挡过程中的转矩相,通过增大电子节气门的开度抑制变速器输出转矩的下降;在惯性相,通过增大点火提前角抑制变速器输出转矩的过冲。为抑制变速器输出转矩的波动、提高换挡过程的舒适性,以节气门开度和点火角作为输入量,提出一种换挡过程中的发动机转矩调节策略<sup>[15]</sup>。另外,在换挡过程中,无论是转矩相还是惯性相,车辆加速度变化率均有所减小,提

高了换挡舒适性。但双离合变速器使用滑摩方式实现换挡,还是存在磨损和发热的缺点。清华大学的万国强等搭建了由 DEUTA BF4M1013 单体泵柴油机和 Allison S2000 液力自动变速器组成的动力传动系统,制定了换挡过程发动机协调控制策略,通过发动机协调控制,减小升挡过程发动机的喷油量,就可以有效地抑制输出轴转矩的增加,并显著地减小升挡过程的正向冲击度和滑摩功,其结果如图 1-3 所示<sup>[16]</sup>。

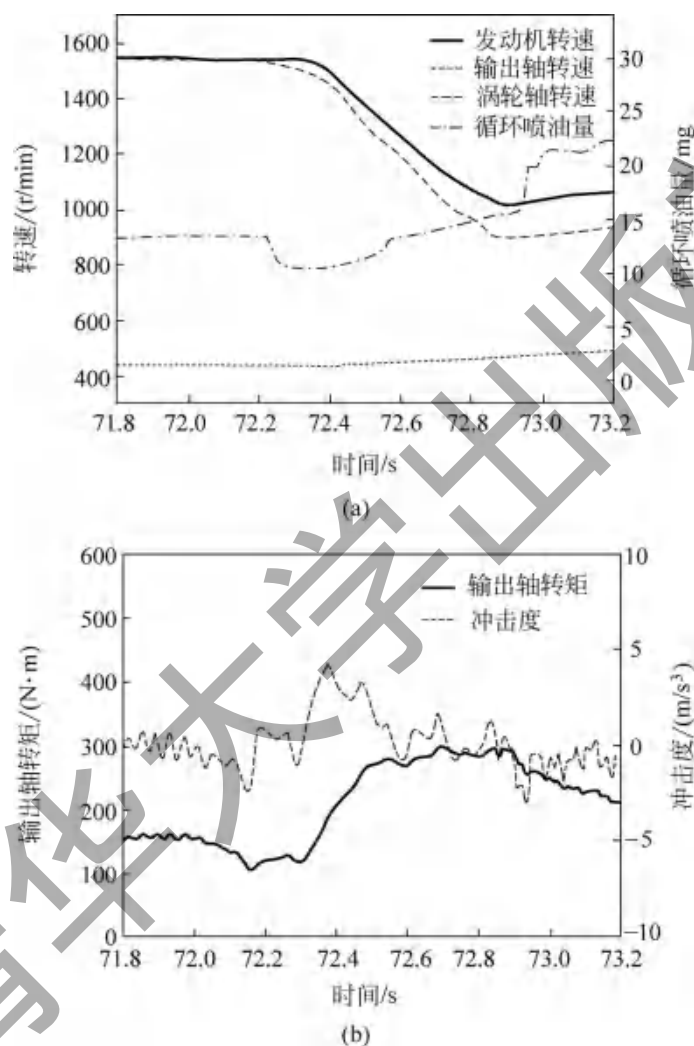


图 1-3 基于转矩的发动机协调控制的特性

(a) 换挡时的转速和喷油量曲线; (b) 换挡时发动机的输出转矩和冲击度曲线

换挡时对发动机和离合器进行联合控制,也能有效改善换挡品质。北京理工大学的高耸等通过调节发动机以对离合器进行了控制,达到降低离合器滑摩功的目的,图 1-4 展示了油门开度、输出转矩、离合器转速和滑摩功等研究结果<sup>[17]</sup>。以双离合自动变速器为分析对象,合肥工业大学的常佳男等提出并建立了双离合变速器的 3 种状态动力学模型,详细分析了换挡过程中有无功率循环及两离合器不同动作顺序对换挡冲击度的影响,提出了换挡过

程中基于发动机转速调节的双离合器控制策略,具体为在换挡时突然将发动机节气门开度从 50% 减小到 45%,提前 0.3s 降低发动机转矩,离合器滑摩功从 31W 降低到 19W,使离合器的主、从动盘同步时间缩短了约 0.3s,仿真结果表明,理论分析所得控制策略能有效降低双离合自动变速器换挡冲击<sup>[18]</sup>。

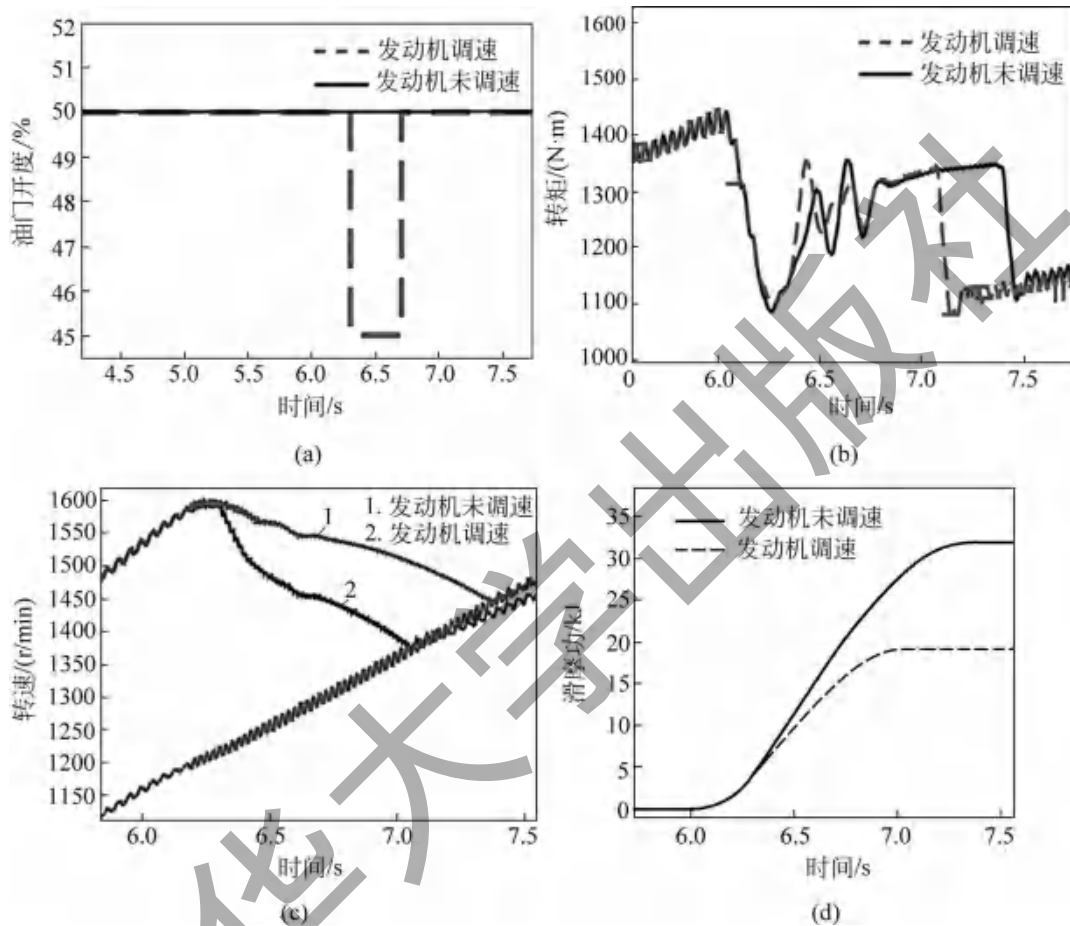


图 1-4 换挡过程相关参量变化图

(a) 油门开度; (b) 输出转矩; (c) 离合器转速; (d) 滑摩功

北京理工大学的武达等针对电动汽车的两挡变速器在换挡过程中出现油泵供油不足的情况增加蓄能器,通过 Simulink 仿真分析和试验验证表明,该方法不仅能缩短换挡时间,还能降低转矩冲击<sup>[19]</sup>。吉林大学的韩鹏等采用动态规划理论制定了基于传动系一体化控制的传统双离合变速器最佳换挡规律,并对最佳换挡规律分别进行仿真和实车试验,结果表明在不影响动力性的前提下,能够有效降低换挡频率和换挡冲击<sup>[20]</sup>。合肥工业大学的夏扩远等提出了静压-机械双流传动机构,该机构兼具静压传动传递转矩大和机械传动效率高的优点,对系统及各组成模块进行了动力学建模,基于 AMEsim 和 Simulink 搭建了联合仿真模型,并且验证了换挡调控策略的正确性<sup>[21]</sup>。上海交通大学的郑昌舜等介绍和分析了丰田

THS 和通用 Voltech 两种混合动力变速器的结构及工作原理,比较了它们的混合动力效率<sup>[22]</sup>,同时评价了它们的乘坐舒适性的提高程度。重庆理工大学的林昌华等人在无极变速器(continuously variable transmission, CVT)的基础上提出了 IVT(ininitely variable transmission),IVT 是综合 CVT 和其他传动机构的一种功率分流传动机构,拓展了无级传动速比范围且提高了最大输出扭矩<sup>[23]</sup>,在一定程度上解决了金属带 CVT 输出扭矩较小的问题,但是 IVT 在传动过程中存在一定的功率回流,妨碍传动效率的进一步提高。华南理工大学的黄向东等和北京理工大学的陈东升等提出了其改进方案<sup>[24-25]</sup>。

液力自动变速器(AT)由于具有换挡品质相对较高和扭矩适应面广等优点,仍将是未来汽车市场自动变速器的主流产品<sup>[26]</sup>。AT 换挡时,往往会引起换挡冲击、动力中断、操纵件加剧磨损等换挡品质不良的问题,导致汽车舒适性下降和机件寿命缩短,对整车性能有很大的影响。换挡过程的高质量控制是 AT 研究领域中的重要课题。北京航空航天大学的戴振坤等提出了不同换挡模式对应的发动机转速控制具有各自的规律(如图 1-5 所示)<sup>[2]</sup>。这些规律和液力变矩器的特性是相关的,不同的液力变矩器特性也不同,再综合考虑发动机性能、整车性能和变速器参数,匹配要求也不相同。

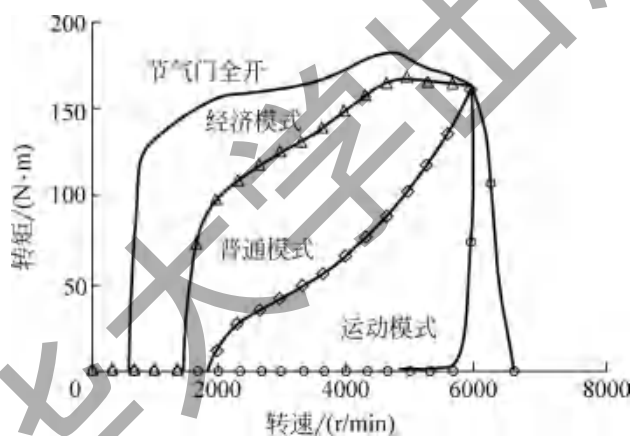


图 1-5 发动机的不同驱动模式

液力变矩器的铸造工艺非常复杂,铸造砂型的包浆很薄,其厚度一致性要求高,制造成本高。其最高传动效率与齿轮传动有一定的差距,在需要变速的工况时效率有待提高,且效率随转速差的增大而减小。虽然实现了小速比范围内的无级变速,但由于随转速差的增大而输入扭矩增大,使得换挡冲击较大,尤其在低挡时换挡冲击大,降低了起步品质。如有更好的小速比变化范围的无级传动机构,能在一定范围内替代液力变矩器,且具有更好的效率和换挡品质,则具有现实应用意义。

#### 1.3.4 离合器算法的研究

对于非液力自动变速器中的车用离合器,在自动换挡时也需要精确控制其分离和接合规律。电动汽车的两速变速器同样存在换挡冲击,多种机械结构已经有研究报告,与现有的

单减速器不同,当使用两速变速器时,在变速较大时会发生换挡冲击。韩国国立交通大学的 Kim 等提出了一种具有变速序列的速度控制算法,通过仿真研究以减少装备有两速电控机械自动变速器(AMT)的中/大型电动汽车的变速冲击<sup>[27]</sup>。澳大利亚理工大学的 Walker 等研究了在多速可动力换挡的电动汽车中基于转矩的动力总成控制,换挡瞬变可从较小的转子惯性和最小的飞轮惯量需求中受益,可以实现高质量的换挡<sup>[28]</sup>。在自动变速器换挡的离合器接合过程中普遍存在抖动现象,极大地影响了车辆的乘坐舒适性。针对该难题,湖南大学肖力军等研究了升挡中抑制离合器接合抖动的最佳控制,获得了电机转矩和离合器摩擦转矩的最优轨迹,从而可以明显降低抖动<sup>[29]</sup>。但由于驱动电动机转子的转动惯量远大于摩擦离合器从动部分的转动惯量,目前装配有二挡变速器的电动汽车在高速换挡时均存在较大换挡冲击和换挡异响。

AMT 换挡算法对于提升其换挡品质具有较大的潜质,能有效降低滑摩功等指标。合肥工业大学姜建满等采用基于模糊推理的变论域方法,为 AMT 自动离合器提出变论域模糊控制策略,当仿真和试验验证换挡时间从 0.93s 增长到 1.02s 时,冲击度从  $7.55\text{m/s}^3$  下降到  $5.69\text{m/s}^3$ 、滑摩功从 14.96kJ 下降到 13.69kJ,降低了离合器的磨损,提高了换挡过程的平顺性<sup>[30]</sup>。华南理工大学的叶杰等综合考虑冲击度与滑摩功等换挡性能指标,提出如图 1-6 所示方案,在转矩相阶段,以电机转矩变化率为控制变量,基于极小值原理求解控制系统的最优状态变化轨迹;在惯性相阶段,协调控制电机转矩使摩擦片式离合器转速差轨迹曲线跟随目标曲线,能较好地处理转矩相中冲击度与滑摩功的矛盾,也可有效降低惯性相的滑摩功<sup>[31]</sup>。

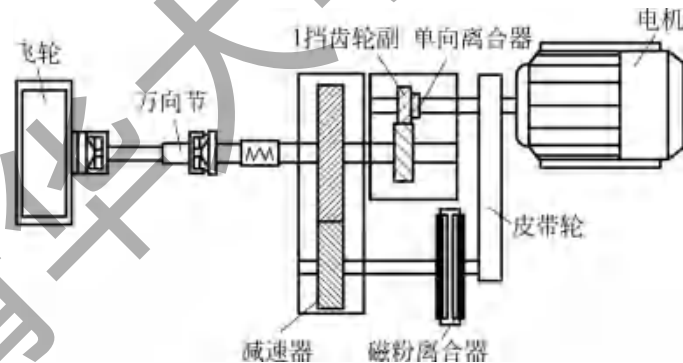


图 1-6 试验台架方案原理图

为更好解决换挡时间和滑摩功之间的矛盾,提升乘坐舒适性,有研究提出了针对性的控制算法。湖南大学的何雄等针对电动机械式自动变速器换挡时间较长的特点,基于动态滑模理论,提出了一种换挡电机动态滑模控制方法,并将它应用于电动 AMT 汽车换挡执行机构的位置跟踪控制,换挡时间有明显缩短,有效地改善了 AMT 的换挡品质<sup>[32]</sup>。武汉理工大学的黄斌等以装备电驱动自动变速器(EMT)的纯电动汽车动力系统为研究对象,将换挡控制过程分为 5 个阶段,以冲击度为主要边界条件、动力中断时间为次要边界条件,分析各

阶段的换挡影响因素,阐述各阶段的控制方法。台架试验结果表明,换挡动力中断时间最大值小于1s,平均值小于0.8s;换挡过程最大冲击度小于 $16\text{m/s}^3$ ,平均冲击度小于 $8\text{m/s}^3$ ,提高了换挡品质<sup>[33]</sup>。为详细分析换挡过程中有无功率循环及两离合器不同动作顺序对换挡冲击度的影响,合肥工业大学的常佳男等提出并建立了双离合变速器3种状态动力学模型,提出了换挡过程中基于发动机转速调节的双离合器控制策略,如图1-7所示<sup>[18]</sup>。

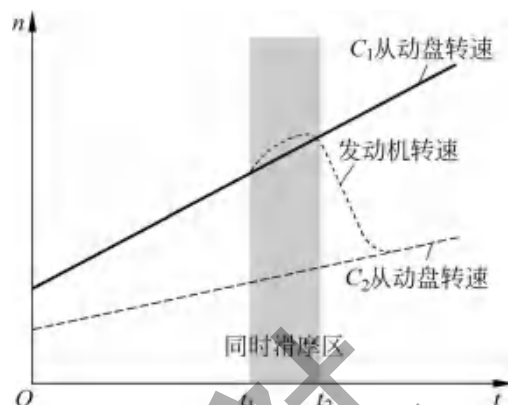


图 1-7 无功率循环的发动机控制方式

换挡冲击在 AMT 和 EMT 中均是一个较大的问题,其根本原因是存在中断动力换挡,特别是 EMT 用于高速电动汽车的二挡变速器时,由于受成本、重量和效率等因素的影响,其控制难度较大。且由于驱动电动机转子的转动惯量较大,使得控制换挡时的快速性和各元件精确相位关系难以完美获得,如果在机械上能降低其难度,则能大幅降低控制难度。可见如果能解决中断动力换挡,更好地突出 AMT 和 EMT 结构简单、造价低和维护成本低的优点,则对于进一步扩展它们的应用范围,具有非常大的推动作用。

综上所述,为获得较好的换挡品质,国内外的研究者在变速器的结构、控制算法、控制机构方案、与发动机匹配策略等方面均进行了深入研究。这些措施有效提高了系统效率和换挡平顺性,但摩擦式离合器依赖驾驶员的技术获得较好的换挡品质,难以在装配排量大于 3.0L 的汽车上使用。在这些通过精确控制离合器换挡规律的方案中,有两种情况,一种是离合器分离后换挡,再接合离合器;另一种是两个离合器在一个分离的同时另一个接合。第一种情况存在动力完成后会中断一小段时间,而第二种情况则需要非常复杂和精确的控制系统,且在汽车起步时需要进一步提高汽车舒适性。例如装配 AT 存在换挡冲击,特别是在起步时偶尔冲击较大让驾驶者觉得车被追尾。双离合器有潜在的过热危险,甚至有报道汽车失去动力。液力变矩器在汽车低速行驶时存在效率需要提高的问题,而较多的挡位引起汽车初始购置成本较高。因而尝试开发发动机与变速器之间的新型连接部件,使其有结构简单、成本低和维护少的特点,具有现实意义。

## 1.4 永磁传动技术国内外研究现状

永磁传动为非接触传动,能实现隔振、软启动和解决密封问题,其类型主要有永磁联轴器、永磁齿轮和永磁涡流传动机构,主要用于食品机械、化工机械和精密加工等领域。其中永磁涡流传动机构由于主动元件和被动元件之间必须存在转速差,降低了效率和需要散热,不再讨论。重点讨论永磁联轴器和永磁齿轮。

### 1.4.1 永磁齿轮的国内外研究现状

永磁齿轮的非接触传动特性使其具有巨大的潜在优势,美国得克萨斯农工大学的 Matthew 等比较了单级设计、串联连接单级和复合差动三种结构磁场调制齿轮的扭矩密度和效率<sup>[34]</sup>。俄罗斯莫斯科国立大学动力学院的 Oleg 等提出了一种仅具有两个旋转部件的行星式永磁齿轮的新颖拓扑结构,提出的磁齿轮的扭矩密度为  $187\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ <sup>[35]</sup>。

意大利帕多瓦大学的 Mauro 等将非接触永磁齿轮传动装置用于机载飞轮储能系统以驱动重型电动客车<sup>[36]</sup>。磁场调制式永磁齿轮传动由于扭矩密度高,近年来在国内外被广泛研究,同时也有其他多种新型的结构被研究。随着研究的深入,永磁齿轮的应用领域将会得到进一步的拓展。

永磁齿轮为一种非接触传动,同时为非刚性传动,能有效隔振,使得电动机使用寿命更长,特别是发展起来的永磁斜齿轮传动,用于精密加工则显著提高了加工精度。东南大学的付兴贺等按照时间顺序综述了有关磁力齿轮的研究历程,如图 1-8 所示,2001 年后快速发展得益于稀土强磁材料的发展,2006 年后则有很多新型的永磁齿轮出现,以满足不同应用场合的需求<sup>[37]</sup>。

为提升永磁齿轮的传动性能,适应不同场合的需求,有相关研究提出了新型结构。例如,兰州理工大学的刘美钧等引入了阻尼线圈<sup>[38]</sup>,燕山大学的郝秀红等针对偏心内转子设计的磁场调制型磁齿轮<sup>[39]</sup>。

为了提高同轴齿轮的高扭矩密度,三峡大学的井立兵等提出了一种带有内转子偏心极和外转子 Halbach 阵列的大容量同轴磁力齿轮<sup>[40]</sup>。

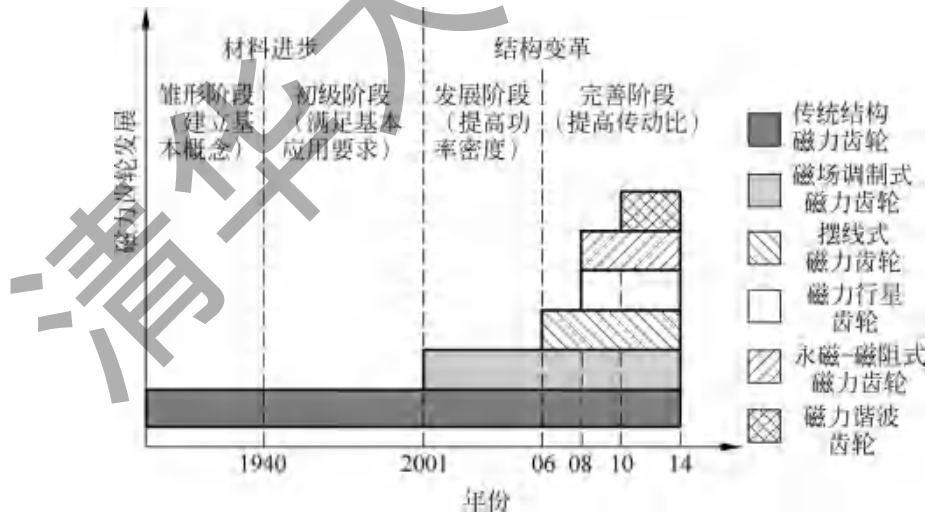


图 1-8 磁力齿轮的发展历程

磁场调制型磁齿轮中的磁通调制器的形状是影响转矩及其波动的关键因素之一,一般磁通调制器是通过堆叠分列的钢叠片来组装的,为了使磁通调制器结构简化、工作更可靠,

华北电力大学的詹阳等实现了由全叠片制成的互连磁通调制器,并分析和试验了其扭矩性能和波动性能<sup>[41]</sup>。

由于永磁齿轮具有非接触传动的优点,使其在一些场合应用具有较大的优势,但存在强磁材料成本较高、永磁齿轮体积较大等不足。因而为提高永磁齿轮的扭矩密度提出了较多的新型结构。随着对永磁齿轮研究的深入,将会有更多的新型永磁齿轮结构出现。

#### 1.4.2 永磁联轴器的国内外研究现状

永磁联轴器目前被广泛用于食品行业和化工行业,将原来的动密封转变为静密封,可靠地解决了密封问题,提高了食品工业的生产标准和质量,使得化工设备的使用寿命显著延长,减少泄漏带来的环境污染。

永磁联轴器的设计很灵活,国外有一些新方案的报道。例如,韩国忠南大学的 Kang Han-Bit 等进行的研究<sup>[42]</sup>; Johnson M 等也进行了类似的轴向和径向齿轮研究<sup>[43-44]</sup>。

国内有一些专家注重对永磁联轴器方案性能的分析研究。东华大学的孟焯等测试了两种实际应用的磁耦合器<sup>[45]</sup>。西华大学的高振军等优化了组合推挽式磁驱动联轴器的磁性能影响因素,得到了磁传动联轴器的最佳几何参数方案<sup>[46]</sup>。

利用永磁联轴器可以将传动轴的动密封转换为静密封,显著提高传动效率和可靠性,可以有效地解决深海密封问题。西北工业大学的李玉凯等设计了一种新型的圆锥形永磁联轴器<sup>[47]</sup>。西北工业大学的程波等提出了适用于深海机器人的径向 Halbach 永磁联轴器传动机构,给出了独特的 Halbach 永磁联轴器的一般解析解,应用遗传算法解决了优化问题。海尔贝克阵列(Halbach array)是一种磁体结构,是工程上的近似理想结构,目标是用最少量的磁体产生最强的磁场<sup>[48]</sup>。1979年,美国学者 Klaus Halbach 在做电子加速试验时,发现了这种特殊的永磁铁结构,并逐步完善这种结构,最终形成了所谓的“Halbach”磁铁。也有一些更有意思的永磁传动结构的研究,可以提高扭矩密度、快速便捷测试磁扭矩和适用于海洋环境,能更有效地推广永磁传动机构的应用领域。

在高速磁力泵的输出端使用永磁联轴器,将动密封变为静密封,实现了零泄漏。江苏大学的董亮等对 400Hz 永磁联轴器进行了二维有限元瞬态计算,获得了转矩和涡流损耗随转速、磁转角变化的关系<sup>[49]</sup>。在转速提高时由于隔离套的存在,使得涡流损耗大幅上升,可以考虑用非导体材料进行替代。郑州大学的张建立等使用 Maxwell 软件对盘式永磁联轴器的工作过程进行仿真,讨论了永磁盘不同直径和永磁体极数对传递最大转矩的影响,得出极数在 10~16 之间能获得较大的扭矩<sup>[50]</sup>。合肥工业大学的田杰等提出了混合式永磁联轴器,该联轴器兼有轴向、径向力处于相对平衡的优势,解决了鼠笼式磁力联轴器的径向不稳定和盘式磁力联轴器的轴向不稳定的问题<sup>[51]</sup>。南京理工大学的牟红刚等仿真计算了一种新型永磁安全联轴器的磁路,结果表明该安全联轴器设定的过载力矩恒定,可手动恢复自动脱开磁耦合传动的安全装置<sup>[52]</sup>。上述研究均为对永磁联轴器的改进设计研究,满足了一些特殊应用场合要求。但永磁联轴器只能做较小相对转角的转动,无法做连续多圈的滑差传

动,对于不中断动力换挡场合,主动部件和从动部件之间有较大的转角,则难以满足要求。

## 1.5 本书的研究目标

在深入分析已有提升换挡品质理论和措施的基础上,详细比较永磁联轴器传动、永磁齿轮传动和永磁涡流传动的特点,依据永磁磁场力的特点,提出永磁滑差传动机构的若干种方案,对比研究后确定一种方案进行详细研究,最终获得在固定挡位传动时具有较高的传动效率,在换挡过渡传动阶段能实现平稳不中断动力换挡。

围绕不中断动力换挡时需要平稳的磁扭矩-相对转角特性,因此研究永磁体的排列方式、永磁体的形状和磁路变化规律的特点,以及在驱动磁盘相对输出磁盘连续转动时,磁扭矩值波动较小,主要研究内容如下:

(1) 研究驱动磁盘和输出磁盘中永磁体的数量和排列方式,欲使相对转角在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围磁扭矩波动小、方向不变,能在滑差传动工况下连续输出平稳磁扭矩,并确定一种控制传动机构方案;

(2) 利用场论和静磁场理论,研究永磁体不同形状、尺寸、叠加方式,选择对应的硅钢片形状和尺寸,期望获得平稳的磁扭矩-相对转角特性;

(3) 研究并设计合理的磁路,主要使用 MagNet 软件和 MATLAB 软件对磁场力进行仿真计算,要求在相对转角改变时漏磁少,以提高永磁体的利用率,且获得平稳扭矩特性时系统的结构紧凑,并进行实物实验和测试结果分析;

(4) 研究永磁体尺寸参数对磁扭矩特性的影响,优化参数以获得更好的滑差传动性能,并根据研究进展情况进一步进行参数优化。

## 1.6 拟解决的关键问题、研究方法及技术路线

本书技术路线如图 1-9 所示。其中提取特征参数非常关键,整个项目能否实现主要体现在这一步。首先需要了解和掌握静磁场理论和场论的相关知识,提出永磁传动机构的结构方案和计算方法,对获得的结果进行分析和研究,以获取结构特征与磁扭矩-相对转角特性之间的对应关系,分析内在联系因素,改进后获得需要重点研究的结构模型。通过仿真计算结果和试验结果对比,确定结果与设计目标是否相符合。进一步分析传动机构的结构特性与结构参数之间的内在联系,预估结构参数和磁扭矩-相对转角特性之间没有明确的解析计算公式,为获得快速计算模型,拟选择神经网络方法,建立结构参数与磁扭矩-相对转角特性之间的联系,仿真计算获得符合预期的神经网络模型,从而根据设计任务能快速确定结构参数,并通过计算模型能对传动符合预期机构进行优化,达到快速获得传动机构参数的目标。

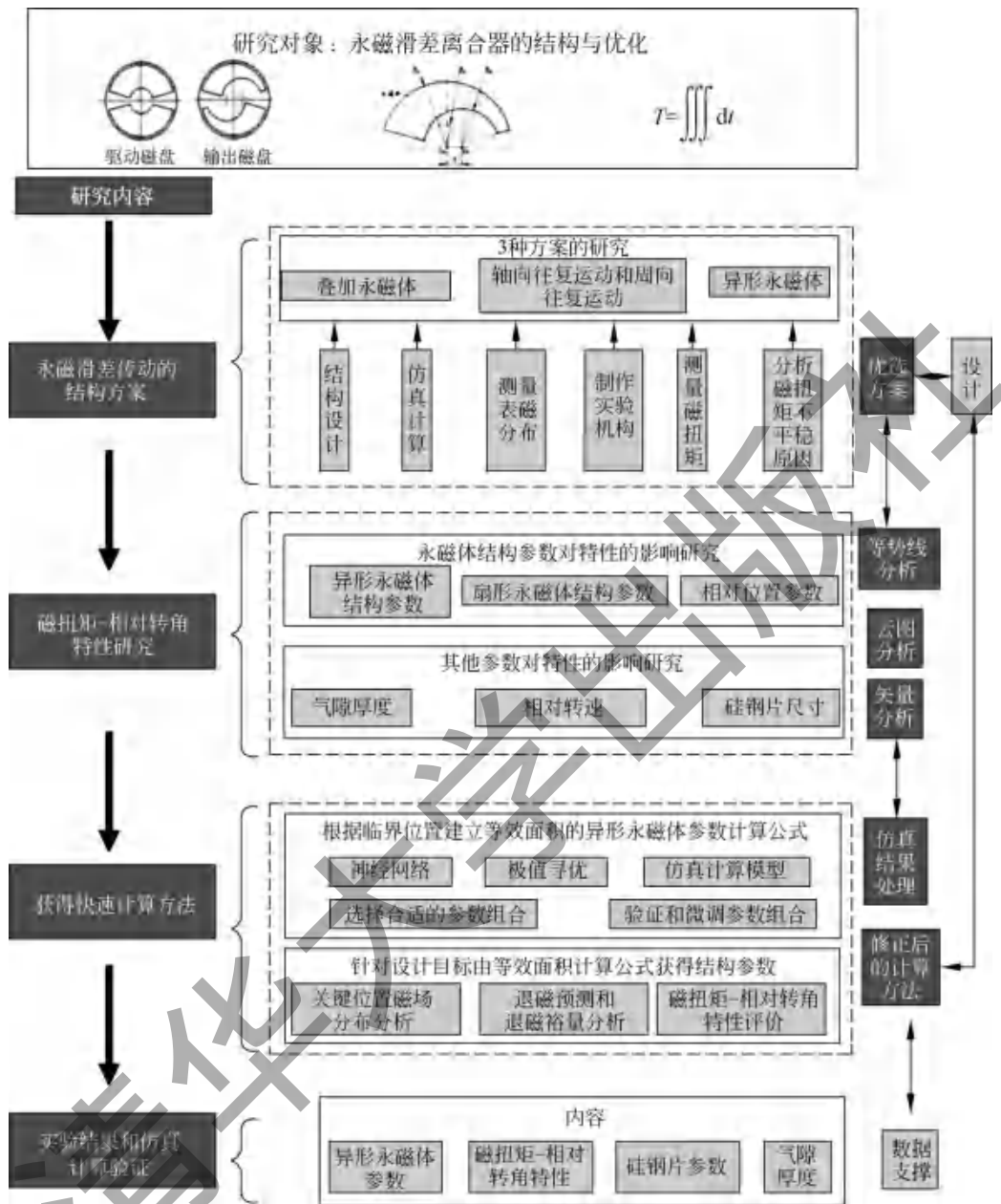


图 1-9 研究的技术路线

## 第2章

# 磁学基础及几种永磁特种电动机

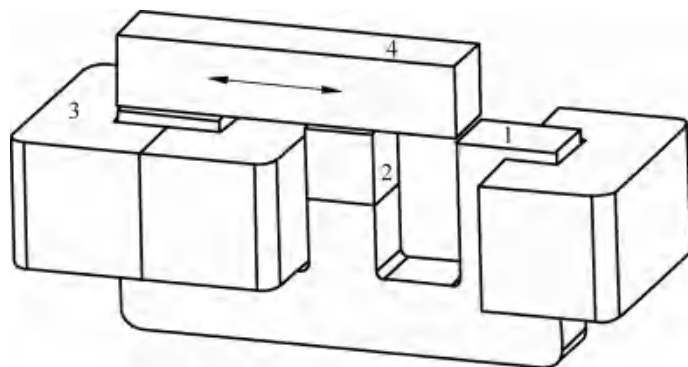
永磁滑差传动机构主要依靠磁力进行动力传递,在主动磁盘和从动磁盘的相对转动角度发生变化时,其磁扭矩-相对角度特性发生变化,因而有必要对永磁场的相关术语进行了解,并结合工程应用对永磁体及磁学基础相关知识进行稍深入的讨论。例如永磁磁路的特性和充磁技术等,它们均对新型磁传动机构的设计有不同程度的影响。因而本章结合工程应用对永磁场术语进行了解读,以加深对永磁体性能永磁场的了解。在此基础上,对永磁场力的计算进行讨论。为了更贴近工程实际应用,以下结合小行程往复直线发电机进行讨论。

### 2.1 直线发电机的结构和工作原理<sup>[53]</sup>

磁场为一种特殊的物质,电磁场被讨论很多,永磁滑差传动机构完全由永磁体提供磁场,因而本书对永磁磁路重点讨论,以便于读者更好地理解永磁滑差传动机构的工作原理。通过工程应用和理论结合的方法解释永磁场相关概念。下面以一款开关磁阻永磁直线发电机(以下简称发电机)为例进行说明。图 2-1 为该发电机的结构,E 型铁心中柱上固定安装永磁体,永磁体充磁方向为中柱轴线方向;E 型铁心两个边柱外围安装有线圈,其中一个线圈保留一半以显示内部铁心,两个边柱上端面 and 永磁体上磁极面处于一个平面;I 型铁心沿两个边柱上端面和永磁体上端面如图示方向作往复直线运动,同时在两个线圈中感应出电动势,实现发电功能。该发电机的特点是两个并联磁路的磁阻能关联变化,当 I 型铁心接受外部低速往复直线运动输入时,在 E 型铁心两个边柱中的磁通量能高速关联变化,两个线圈能同步感应出电动势。由法拉第电磁感应定律可知,边柱铁心中变化的磁通量能在线圈中感应出电动势,其磁通量由永磁体提供,而磁通量的变化由铁心的往复直线运动激发。磁通量  $\Phi$  是表示磁场分布情况的物理量,单位为韦伯(Wb),在匀强磁场中:

$$\Phi = BS \quad (2-1)$$

式中, $B$  为磁通量密度,表示磁感应强度的大小,如果不是匀强磁场,取  $B$  的平均值, $\text{Wb}/\text{m}^2$ ;  $S$  为磁通道面积, $\text{m}^2$ 。



1—E型铁心；2—永磁体；3—线圈；4—I型铁心

图 2-1 开关磁阻永磁直线发电机

一般永磁直线发电机和本永磁直线发电机的差异如下：

(1) 一般永磁直线发电机的永磁体和线圈分属定子或转子，本发电机的永磁体和线圈均安装于 E 型铁心上，在稍大行程的发电机中，I 型铁心作为定子则成本低，E 型铁心中的永磁体和线圈能被高效利用。

(2) 一般永磁直线发电机中永磁体极性交错排列，在一个线圈铁心中产生的磁通量方向交替变化，引起的磁通量变化大，而本发电机线圈铁心中的磁通量方向不变，在其他因素相同的前提下，其磁通量变化速度只有一般永磁直线发电机铁心中的磁通量变化速度的一半，但在两个边柱均有线圈，这种结构的效果和目前一般永磁直线发电机的磁通量变化速度基本相同。

(3) 一般永磁直线发电机中磁场方向变化较大，一般使用无取向硅钢片，本发电机磁路中磁通量方向基本不变，因而可以采用取向硅钢片，在磁场方向上饱和磁导率高，最大磁通量相应被提高，则对应能提高磁通量变化速度。

(4) 还有一项必须要比较的是永磁体的厚度，一般永磁直线发电机的永磁体厚度较小，本发电机则可以采用稍厚的永磁体，或者采用磁极面积更大的永磁体，在条件变化不大的情况下能获得更大的磁通量极值。

(5) 一般永磁直线发电机的磁路截面变化较大，而本发电机的磁路截面基本不变，因而能设计更大磁通量极值的磁路。

(6) 本发电机两个线圈采用类似变压器中紧密绕制的紧凑线圈，用铜量少。

综上所述，本发电机能在同样小行程往复运动输入时输出更高的电压，涉及的知识点细节，后面章节中再详细讨论。

## 2.2 磁学相关知识

永磁滑差传动机构采用的硅钢和稀土永磁体均为磁性材料。对于闭路永磁体，磁场能以磁能积( $BH$ )的形式储存于永磁材料内部，对于开路永磁体，磁场能一部分储存于永磁材

料内部,一部分储存于永磁材料两磁极附近的空问,显然永磁滑差传动机构属于开路磁路。气隙中没有磁力存在,磁力作用于两个磁盘中的磁性材料。永磁滑差传动机构利用永磁体磁极的相互作用,实现了动力传动。钕铁硼永磁体的能量密度很高,在其周围产生一定磁场需要的体积是马氏体磁钢的 1/60,铝镍钴永磁体的 1/5,钐钴永磁体的 1/2~2/3。我国具有稀土资源储量优势,为了获得较大扭矩密度和性价比高的永磁滑差传动机构,需要选择永磁体和硅钢片类型,因而需要对涉及的磁学知识、永磁体、软磁材料、磁路和充磁技术进行讨论<sup>[54-55]</sup>。

## 2.2.1 磁学术语<sup>[56-57]</sup>

### 1. 磁化强度和磁感应强度

细条形永磁体两个磁极为等值异号的点磁荷  $m$ , 永磁体两磁极间距离为  $l$ , 两个点磁荷构成的系统定义为磁偶极子, 用  $j_m = ml$  来表示它所具有的磁偶极矩, 方向由负磁荷指向正磁荷, 单位为  $\text{Wb} \cdot \text{m}$ , 但由于难以精确确定磁极位置使得磁偶极矩的大小难以确定。电子的运动可等效为闭合电流回路, 可视为磁偶极子, 因此将无限小电流回路所表示的小磁体定义为磁偶极子。磁偶极子磁性的大小和方向可以用磁矩 ( $\mu_m$ ) 来表示, 定义为磁偶极子等效的平面回路的电流  $i$  和回路面积  $s$  的乘积, 方向由右手螺旋定则确定, 单位为  $\text{A} \cdot \text{m}^2$ 。  $j_m$  和  $\mu_m$  之间的关系为

$$j_m = \mu_0 \mu_m \quad (2-2)$$

式中,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , 单位为  $\text{N}/\text{A}^2$ 、 $\text{Wb}/(\text{A} \cdot \text{m})$  和  $\text{H}/\text{m}$  三者之一。

单位体积内磁偶极矩  $j_m$  的矢量和为磁极化强度  $J$ , 单位为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ , 单位体积内磁矩  $\mu_m$  的矢量和为磁化强度  $M$ , 单位为  $\text{A}/\text{m}$ , 可见  $J$  为  $M$  和  $\mu_0$  的乘积。磁场强度为单位强度的磁场对应于  $1\text{Wb}$  强度的磁极受到  $1\text{N}$  的力, 单位为  $\text{A}/\text{m}$ 。

任何物质在外磁场作用下, 除了外磁场  $H$  外, 还要产生一个附加的磁场。物质内部的外磁场和附加磁场的总和称之为磁感应强度  $B$ 。真空中的磁感应强度与外磁场成正比。

$$B = \mu_0 H \quad (2-3)$$

在物质内部的磁感应强度为

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 (H + M) \\ B &= \mu_0 M + \mu_0 H \\ J &= \mu_0 M \end{aligned} \quad (2-4)$$

式中,  $B$  的单位为  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ,  $1\text{Wb}/\text{m}^2 = 1\text{T}$ ;  $J$  为磁极化强度, 有时也称为内禀磁感应强度。真空中由于  $M=0$  则  $B = \mu_0 H$ ,  $B$  和  $H$  始终是平行的, 数值上也成比例。在磁体内部, 两者的关系较复杂, 在外磁场  $H$  作用下, 磁体具有一定的磁化强度  $M$ , 且  $M$  和  $H$  方向不一定相同, 须由式(2-4)表示。

### 2. 磁化曲线

磁体处于外磁场时会发生磁化, 其磁化强度  $M$  和外磁场强度  $H$  存在以下关系:

$$M = \chi H \quad \text{或} \quad \chi = M/H \quad (2-5)$$

式中,  $\chi$  为磁体的磁化率, 它表征磁体对外磁场响应的难易程度。  $M$  与  $H$  的单位为  $A/m$ , 所以  $\chi$  是一个无量纲的量。退磁状态的铁磁性物质的  $M$ 、 $J$  和  $B$  随磁场强度  $H$  的增加而增加的关系曲线称为起始磁化曲线(如图 2-2 所示), 也称为磁化曲线, 不同物质的磁化曲线是不同的。  $M_s$ 、 $J_s$ 、 $B_s$  分别为饱和磁化强度、饱和磁极化强度以及饱和磁感应强度。  $M_s$  是永磁材料重要的磁参量, 一般均要求  $M_s$  越高越好, 它取决于组成材料的磁性原子数、原子磁矩和温度。图 2-2 分为 5 个阶段, 阶段 1 为弱磁场下的可逆磁化阶段, 在该阶段,  $M/B$  与外磁场  $H$  保持线性关系。阶段 2 处  $M/B$  与外磁场  $H$  不再保持线性关系, 开始出现不可逆磁化。阶段 3 出现不可逆磁畴壁位移过程, 出现最大磁导率。阶段 4 趋于饱和, 磁导率下降。阶段 5 为顺磁区域, 一般技术磁化不讨论这个过程。

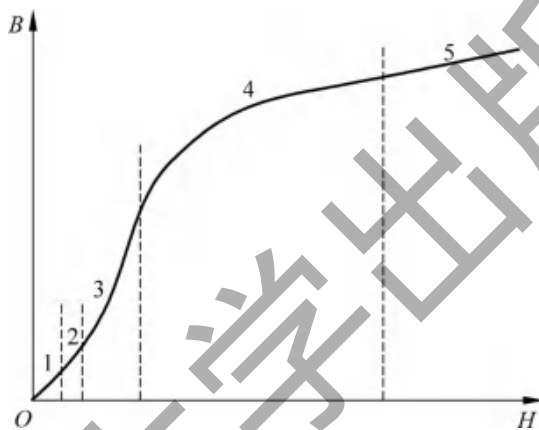


图 2-2 永磁体的起始磁化曲线

将式(2-5)代入式(2-4)中的第一式, 可得

$$\mu = 1 + \chi \quad (2-6)$$

$\mu$  为相对磁导率, 即

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2-7)$$

材料磁化到饱和以后, 逐渐减小外磁场  $H$ , 材料中对应的  $M$  或  $B$  也随之减小, 但是由于材料内部存在各种阻碍  $M$  转向的机制,  $M$  并不沿着初始磁化曲线返回。并且当外磁场  $H$  减小到零时, 材料仍保留一定大小的磁化强度或磁感应强度, 称为剩余磁化强度或剩余磁感应强度, 用  $M_r$  或  $B_r$  表示, 简称剩磁。在反方向增加外磁场  $H$ ,  $M$  或  $B$  继续减小。当反方向磁场  $H$  达到一定数值时, 满足  $M=0$  或  $B=0$ , 那么该磁场强度就称为矫顽力, 分别记作  $M_c$  或  $H_c$ 。它们具有不同的物理意义,  $M_c$  表示  $M=0$  时的矫顽力, 又称为内禀矫顽力;  $H_c$  表示  $B=0$  时的矫顽力, 又称为磁感矫顽力。这两种矫顽力大小不等, 一般有  $|M_c| > |H_c|$ 。铁磁体处于剩磁状态时, 外磁场  $H=0$ , 但是  $M \neq 0$ , 因为在从饱和磁化到  $H=0$  的反磁化过程中, 由可逆磁畴壁位移和可逆磁畴转动实现的磁化强度会回归到起始

状态,而由不可逆磁畴壁位移和不可逆磁畴转动实现的磁化强度则无法回到初始状态。对于 $M H_c$ 远大于 $H_c$ 的磁体,当反向磁场 $H$ 大于 $H_c$ 但小于 $M H_c$ 时,虽然此时磁体已被退磁到磁感应强度 $B$ 反向的程度,但在反向磁场 $H$ 撤消后,磁体的磁感应强度 $B$ 仍能因内部的微观磁偶极矩的矢量和处在原来方向而回到原来的方向,永磁材料尚未被完全退磁。因此,内禀矫顽力 $M H_c$ 是表征永磁材料抵抗外部反向磁场或其他退磁效应,以保持其原始磁化状态能力的一个主要指标。同时也是表征磁性材料在磁化以后保持磁化状态的能力,它是磁性材料的一个重要参数。矫顽力不仅是考察永磁材料的重要标准之一,也是划分软磁材料、永磁材料的重要依据。

磁场强度应该与磁感应强度对比认识。磁场强度和磁感应强度均为表征磁场强弱和方向的两个物理量。由于磁场是电流(或者说运动电荷)引起的,而磁介质在磁场中发生的磁化对源磁场也有影响(场的迭加原理)。因此,磁场的强弱有两种表示方法:在充满均匀磁介质的情况下,若包括介质因磁化而产生的磁场在内时,用磁感应强度 $B$ 表示,其单位为T,是一个基本物理量;单独由电流或者运动电荷所引起的磁场(不包括介质磁化而产生的磁场时)则用磁场强度 $H$ 表示,其单位为A/m,是一个辅助物理量。在各向同性的磁介质中, $B$ 与 $H$ 的比值即介质的绝对磁导率 $\mu$ 。从定义来看,磁感应强度是完全只考虑磁场对于电流元的作用,而不考虑这种作用是否受到磁场空间所在介质的影响,这样磁感应强度就是同时由磁场的产生源与磁场空间所充满的介质来决定的。相反,磁场强度则完全只是反映磁场来源的属性,与磁介质没有关系。就是说,磁场强度是表征一个单独磁场的性质的,与它所在的介质无关,而磁感应强度则考虑了介质的影响,是一个合成量。

### 3. 一个磁力线之间为排斥力的工程应用实例

磁力线是封闭的,且磁力线不交叉,同向磁力线之间是排斥力。下面的工程实例即为上述原理的一个小应用。如图2-3所示,铁质冲材被叠放在一起,自动生产线在抓取冲材时需

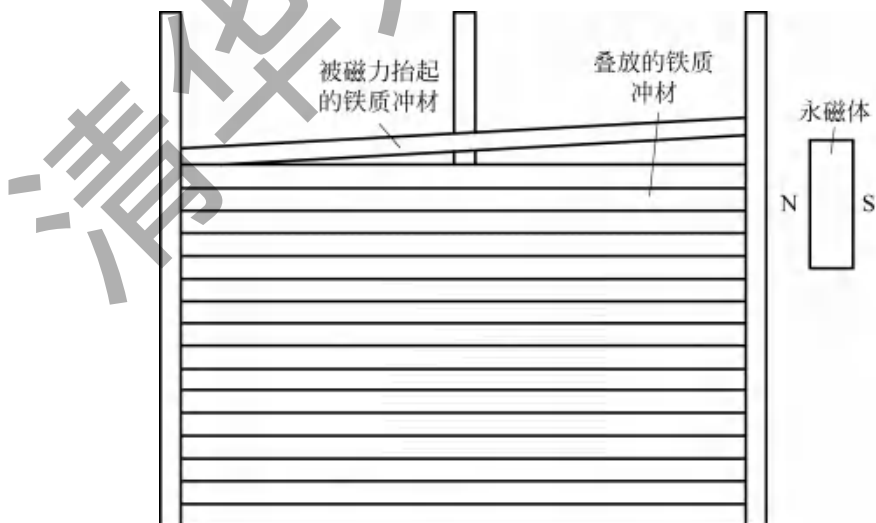


图 2-3 永磁体用于自动冲压生产线分离铁质冲材

要防止同时抓取 2 片,这时在堆叠冲材侧面安装一块强磁铁,铁质冲材被磁化后,最上面一块铁质冲材被抬升,在吸盘抓取时仅最上面一块铁质冲材被抓取,其原因就是铁质冲材内的磁力线相互不交叉且具有排斥力。磁体大小与冲材的材质和重量有关,且磁体和冲材之间的距离可以调整,以达到最上面一块铁质冲材获得合适的抬升距离。

### 2.2.2 永磁体的相关知识

永磁体主要技术指标是剩磁  $B_r$ 、矫顽力  $H_c$  (内禀矫顽力  $H_{ci}$  和磁感矫顽力  $H_{cb}$ )、磁能积  $(BH)_m$  和居里温度  $T_c$ 。 $B_r$  的极限值是磁极化强度  $J_s$ ,  $(BH)_m$  的极限值是  $J_s^2/4$ , 取决于组成该材料的磁性原子数和原子磁矩的大小。强磁的内禀矫顽力和磁感矫顽力分别用  $H_{ci}$  和  $H_{cb}$  表示,当  $H_{ci} > B_r$  时,  $H_{cb} = B_r$ ,  $(BH)_m = B_r^2/4$ , 而  $B_r$ 、 $H_{cb}$  和  $(BH)_m$  均取决于材料的反磁化过程。由于采用的是钕铁硼永磁材料,因而重点讨论该稀土永磁材料的性能。磁体磁化到饱和并去掉外磁场后,在磁化方向保留的  $M_r$  或  $B_r$  简称剩磁,与 2.2.1 节讨论的剩磁不同的是,永磁体的剩磁特指较大值的剩磁。 $M_r$  称为剩余磁化强度, $B_r$  称为剩余磁感应强度,其表磁可以用特斯拉计或高斯计测得。

#### 1. 永磁体的退磁场

环状磁体具有闭合磁路时不存在磁极,因而不产生退磁场,但开路磁体的两端具有磁极,当一定形状的磁性材料被外磁场磁化时,其两端出现的磁极将产生一个与磁化强度方向相反的磁场,该磁场被称为退磁场。磁极产生的退磁场的方向总是与其磁化强度方向相反,具有退磁作用,用  $H_d$  表示,退磁场与磁化强度的大小成正比,比例系数为退磁因子  $N_1$ ,  $N_1$  与磁体形状有关。表 2-1 给出了退磁因子的一些数值,可以看出磁性材料在生产制作时,如果较薄则无法充磁,即其剩余磁场强度较小,原因是  $N_1$  大。为进一步说明永磁体自身产生的退磁场,以一块长方体磁体为例,可以看成沿磁极方向并在一起的两块磁体,一块磁体处于另一块磁体的磁场中,其磁极方向和另一块磁体的磁场方向相反,因而互相提供了退磁场,因而永磁体具有磁性的同时也产生了退磁场。例如沿轴线充磁的圆柱体在叠加到一定长度后,继续叠加则两极的表磁升高非常缓慢,这是自身存在退磁场的一个证明。对于钕铁硼永磁体,一般退磁场没有达到矫顽力的强度,所以钕铁硼永磁体存放较长时间其剩磁基本不变。对于电动机或发电机,线圈流过电流时产生电磁场,有部分时间电磁场方向与永磁体磁化方向相反,因而电磁场也为永磁体的退磁场之一。

表 2-1 圆柱状永磁体沿长度方向的退磁因子  $N_1$

$k=l/d$	0	1	2	5	10	20
$N_1$	1.0	0.27	0.14	0.040	0.0172	0.00617

#### 2. 永磁体的磁能积

永磁材料作为磁场源或磁力源(动作源),主要是利用它在气隙中产生的磁场,这是因为

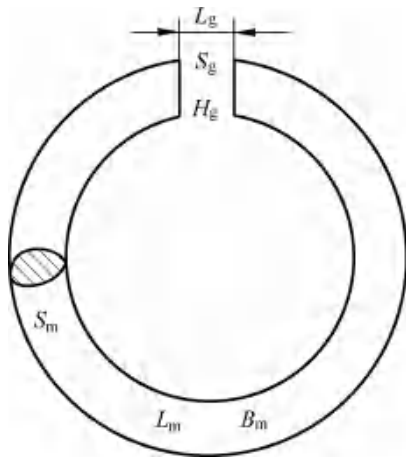


图 2-4 带气隙的环形磁铁

一般气隙两端属于不同的两个零件,利用两个零件间的相互作用,完成功能转化。图 2-4 展示了一个带气隙的环形磁铁,设  $S_m$ 、 $L_m$ 、 $B_m$ 、 $H_m$  和  $S_g$ 、 $L_g$ 、 $B_g$ 、 $H_g$  分别代表磁铁和气隙的截面积、长度、磁感应强度和磁场强度。根据安培环路定律推导可知:磁体在气隙中产生的磁场强度  $H_g$  与磁铁内部的  $H_m$  和  $B_m$  的乘积有关。 $B_m H_m$  代表永磁体的能量,称为磁能积。一般选择永磁体时需要退磁曲线,有时还需要磁能积曲线。但在实际的设计应用中,为迅速判定各点的磁能积,方便而快速地判别磁体工作点是否合理和经济,正确选择工作点,可以画出等磁能积曲线图。

### 3. 我国钕铁硼永磁体的牌号及性能

表 2-2 为部分牌号的钕铁硼永磁体的性能参数,烧结钕铁硼永磁体等级牌号都以字母“N”开头,代表钕,后两位数字表示最大磁能积,单位以 MGOe 表示,代表磁铁退磁曲线或  $BH$  曲线上的最大值,数值越大则  $B_r$  越大,末尾字母表示耐高温等级。

表 2-2 烧结钕铁硼磁性能参数

牌号	剩磁 $B_r$		矫顽力 $H_{cb}$		内禀矫顽力 $H_c$		最大磁能积 $(BH)_{max}$		工作温 度 $T_w$
	mT	kGs	kA/m	(kOe)	kA/m	(kOe)	$\text{kJ/m}^3$	(MGOe)	$^{\circ}\text{C}$
N35H	1170~1220	(11.7~12.2)	$\geq 868$	( $\geq 10.9$ )	$\geq 1353$	( $\geq 17$ )	263~287	(33~36)	120
N38H	1220~1250	(12.2~12.5)	$\geq 899$	( $\geq 11.3$ )	$\geq 1353$	( $\geq 17$ )	287~310	(36~39)	120
N40H	1250~1280	(12.5~12.8)	$\geq 923$	( $\geq 11.6$ )	$\geq 1353$	( $\geq 17$ )	302~326	(38~41)	120
N42H	1280~1320	(12.8~13.2)	$\geq 955$	( $\geq 12.0$ )	$\geq 1353$	( $\geq 17$ )	318~342	(40~43)	120
N45H	1320~1360	(13.2~13.6)	$\geq 963$	( $\geq 12.1$ )	$\geq 1353$	( $\geq 17$ )	326~358	(43~46)	120
N48H	1370~1430	(13.7~14.3)	$\geq 995$	( $\geq 12.5$ )	$\geq 1353$	( $\geq 17$ )	366~390	(46~49)	120

### 2.2.3 软磁材料的相关术语

软磁材料在低强度磁场中可以被磁化,去除外加磁场则易恢复到低剩磁状态,具有高初始磁导率  $\mu_i$ 、高最大磁导率  $\mu_{max}$ 、高饱和磁感应强度  $B_s$  和低功耗的特点。

#### 1. 软磁材料的磁导率 $\mu$

磁导率的测量:将某种铁磁物质做成环形样品,再绕上匝数一定的线圈,在该线圈中通以电流  $I$ ,根据电流值可以计算出铁磁物质内部的磁场强度  $H$ ,同时用仪器测量穿过环形样品横截面的磁通量  $\Phi$  并计算出  $B$  值,从而得出对应的  $H$  与  $B$  值。由此得到材料的  $B-H$  曲线,也叫铁磁材料的磁化曲线,如图 2-5 所示。从图 2-5 可以看出,铁磁材料的磁化曲线是