

赵克中 编著

磁耦合传动装置 的 理论与设计

CIOUHE
CHUANDONG
ZHUANGZHI DE
LILUN YU
SHEJI



化学工业出版社

赵克中 编著

磁耦合传动装置 的 理论与设计

CIOUHE
CHUANDONG
ZHUANGZHI DE
LILUN YU
SHEJI



化学工业出版社

· 北京 ·

张金青 李海霞

00.00 元 份 家

本书论述了磁耦合传动装置的基本原理、工程设计的基础理论、技术特点、结构形式、运动状态及其应用领域和主要用途,特别讲述了磁耦合传动装置的结构设计基础和设计技巧。介绍了物质的磁性、磁材料、磁路排列规律和磁场的场形分布;永磁体耦合场的力学状态和作用机理,以及耦合场的数值分析方法和计算与其在工程上的应用计算等方面的内容。本书还收集了大量检测试验数据、图表,是优化设计的绝好参考资料。

本书可供石油、化工、制药、真空、军工及航天等行业中从事磁力传动传输与控制技术及设备的工程技术人员、管理人员和大专院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁耦合传动装置的理论与设计/赵克中编著. —北京:
化学工业出版社, 2009. 7

ISBN 978-7-122-05685-6

I. 磁… II. 赵… III. 机械传动装置—研究 IV. TH133

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 082229 号

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 项 激

责任校对: 王素芹

装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京市兴顺印刷厂

850mm×1168mm 1/32 印张 10 字数 275 千字

2009 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前言

《磁力驱动技术与设备》一书出版发行后，得到了广大磁工程技术人员和相关专业师生，以及磁应用领域的许多学者、专家的专注和关怀，也极大地鼓舞了我完成其姊妹篇《磁耦合传动装置的理论与设计》的信心。

特别是近年来随着高性能稀土永磁材料的蓬勃发展，加之新型轴承材料及控制技术的提升，磁耦合传动技术在应用领域得到了广泛的研究和空前的发展。磁耦合传动控制装置在过去单一旋转运动和直线运动磁传动技术的基础上，向多向运动的延伸和发展，形成磁耦合传动的多种传动方式的新技术、新装置、新产品。

本书论述了磁耦合传动装置的基本原理、工程设计的基础理论、技术特点、结构形式、运动状态及其应用领域和主要用途；介绍了物质的磁性、磁材料、磁路排列规律和磁场的场形分布；永磁体耦合场的力学状态和作用机理，以及耦合场的数值分析方法和计算与其在工程上的应用计算等方面的内容。讲述了磁耦合传动装置的结构设计基础和设计技巧。特别是通过磁路结构设计与机械结构设计的结合、配置，并且演绎出单一的或复合的、单向的或双向的、连续的或间歇的等各种类型的直线运动、圆周运动、螺旋运动等多种运动形式的装置组合。讲述了磁耦合传动装置整机和零部件的性能特点、受力状态、运行状态，检测试验与研究。收集了大量检测试验数据、图表，是优化设计的参考资料。

全书共分6章，第1、2章为磁耦合传动装置的基础理论，第3章为磁耦合传动控制装置的数理方法，第4章阐述工程应用中磁耦合传动装置的设计技术，第5、6章为其特性分析和运动学分析。本书可供石油、化工、制药、真空、军工及航天等行业中从事磁力传动传输与控制技术及设备的工程技术人员、管理人员和大专

院校相关专业的师生参阅。

本书稿编著过程中得到了东北大学徐成海、李云奇教授的指导，张世伟、刘军博士的帮助；航天集团总公司 510 研究所杨坚华研究员、谈治信高级工程师，东北大学杨乃恒、谢里杨、巴德纯教授，兰州理工大学李仁年教授，兰州交通大学蒋兆远教授对初稿做了审核工作；还有车炯、丁成斌、窦淑萍、安芝贤、闫雪兰、童小育、段武全、韩爱国、刘芳、刘挺、豆耀锋、陈雪琴等工程技术人员帮助、合作做了部分试验工作或资料整理工作；另外还得到李国坤教授、张焰研究员等专家的支持和关注，在此一并向他们致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限，不妥之处在所难免，恳请同行专家和读者批评指正。

编著者

目 录

1 概述	1
1.1 磁耦合传动装置及其应用特点	1
1.2 磁耦合传动装置的基本结构及运动形式	4
1.3 磁耦合传动装置的运动特性	9
1.3.1 磁耦合传动装置的稳定性	9
1.3.2 磁耦合传动装置的分离性	12
1.3.3 磁耦合传动装置运动的可靠性	12
1.4 磁耦合传动装置的应用	13
1.4.1 磁耦合传动装置在流体机械及流体系统上的应用	13
1.4.2 磁耦合传动装置在空调机上的应用	15
1.4.3 磁耦合传动装置在核反应系统中的应用	18
1.4.4 磁耦合传动装置在真空设备上的应用	18
1.4.5 磁耦合传动装置在齿轮传动中的应用	18
1.4.6 磁耦合传动装置在全密封阀门中的应用	19
1.5 磁耦合传动控制技术的发展及应用前景	23
参考文献	24
2 磁耦合传动技术的理论基础	25
2.1 磁耦合传动技术的磁学基础	25
2.1.1 物质的磁性及磁性体的划分	25
2.1.2 磁场的基本物理量及相关术语	26
2.1.3 永磁材料	29
2.2 耦合运动磁场的动力学分析	45
2.2.1 耦合运动磁场的组合模型	45
2.2.2 耦合运动磁场的数理分析	46

2.2.3 耦合运动磁场的力学特性·····	55
2.3 耦合运动磁场的运动学分析·····	63
2.3.1 耦合运动磁场的运动模型·····	63
2.3.2 耦合运动磁场的运动特性分析·····	65
2.3.3 耦合运动磁场磁转矩数理分析·····	70
2.4 影响耦合运动磁场运动特性的因素·····	78
2.5 磁场运动力的数学分析·····	81
参考文献·····	83

3 耦合磁场的有限元分析与理论计算 ····· 85

3.1 耦合磁场的有限元分析与建模·····	85
3.1.1 有限元分析的理论基础·····	85
3.1.2 实体建模·····	101
3.2 耦合磁场的力学二维分析与计算·····	119
3.2.1 2D模型数理参量定义·····	119
3.2.2 2D磁场动力学分析·····	119
3.2.3 2D磁场运动学分析·····	137
3.2.4 2D磁场结构参数特性分析·····	144
3.3 耦合磁场的力学三维分析与计算·····	154
3.3.1 3D模型数理参量定义·····	154
3.3.2 3D磁场动力学分析·····	155
3.3.3 3D磁场运动学分析·····	156
参考文献·····	177

4 磁耦合传动装置的结构设计与计算 ····· 178

4.1 磁耦合传动装置的结构功能及其控制系统·····	178
4.2 磁耦合传动装置结构设计的技术要求·····	180
4.2.1 功率与效率·····	180
4.2.2 转速与寿命·····	180
4.2.3 工作温度·····	180
4.3 磁耦合传动装置的特征参数及其相关尺寸·····	180
4.4 磁耦合组件的结构设计·····	182

4.4.1	确定磁耦合组件外形尺寸的长径比	182
4.4.2	磁耦合组件磁路设计中若干问题的探讨	183
4.4.3	隔离套的设计与计算	191
4.4.4	磁耦合传动装置的功率匹配问题	219
4.4.5	磁耦合组件的设计实例	221
4.5	磁耦合传动装置磁路工程设计的思路与方法	224
4.5.1	磁路工程设计的基本思路	224
4.5.2	磁路工程设计方法	226
4.5.3	磁路工程设计的修正及讨论	231
4.6	两种典型的磁-机械传动方式的实例	232
4.6.1	电动机与磁耦合传动装置组合的直线运动 传动系统	232
4.6.2	齿轮传动与磁耦合传动装置组合的旋转运动 传动系统	238
	参考文献	248

5 磁耦合传动装置的特性实验与分析 **249**

5.1	磁耦合传动装置的静态特性实验与分析	249
5.1.1	磁耦合传动装置静态特性实验设备与仪器	249
5.1.2	力矩和转角的静态特性实验	250
5.1.3	8极磁耦合传动装置全周期特性实验	259
5.1.4	静态退磁实验	260
5.1.5	静态特性实验的结论	265
5.2	磁耦合传动装置的动态特性实验与分析	266
5.2.1	动态特性实验装置及实验设备与仪器	266
5.2.2	转矩和转角的动态特性实验	267
5.2.3	动态特性实验研究的结论	276
5.3	涡流损失实验与分析	276
5.3.1	涡流损失实验测试结果	276
5.3.2	涡流损失特性实验数据处理	277
5.3.3	涡流损失实验的结论	283

5.4 振动测试实验与分析	284
5.4.1 振动测试实验及结果	284
5.4.2 振动测试实验数据处理与分析	284
5.4.3 振动测试实验的结论	286
参考文献	286

6 磁耦合传动装置的运动学分析 287

6.1 磁耦合传动装置内磁转子振动频率的响应分析	287
6.2 磁耦合传动装置启动过程分析	288
6.2.1 磁耦合传动装置空载启动	290
6.2.2 磁耦合传动装置负载启动	292
6.3 磁耦合传动装置稳定性分析	294
6.3.1 磁耦合传动装置内转子转速的变化	294
6.3.2 磁耦合传动装置外转子状态的改变	296
6.4 磁耦合传动装置的使用与故障诊断	299
6.4.1 磁耦合传动装置损坏原因分析及使用中应注意的问题	299
6.4.2 磁耦合传动装置的故障诊断与监控	300
参考文献	306

1

概述

1.1 磁耦合传动装置及其应用特点

磁耦合传动装置是随工业生产的发展, 传动与控制技术的提高和环境保护的需要, 依据高性能稀土永磁材料和磁传动技术的成熟而研发的新技术、新产品。

目前在工业化大生产中, 许多工业过程是在传输、反应、搅拌、加热、冷却、吸收、清洗、扩散、分离等运作下实现的, 其输送、通断、控制、变换、调节等功能必须通过一定的传动部件来实现。这种部件应该是既能随工作机件正常运转, 自动调节位置和实现控制等功能, 又能满足运转灵活、控制自如、全密封、不泄漏、不扩散等要求。这样的传动控制装置如果能在现代工业生产的设备上得到应用, 必将给生产带来明显的经济效益。此外, 在机械传动中还有一些传动装置, 如样品传递的输入与取出, 载荷位移与运动以及一些高精度的力和转矩的传递, 在其传递过程中使传输结构可实现主、从动件分离开来, 并能使运动方向或运动状态在同步或不同步条件下完成其各自的运动轨迹等方面的要求, 对于这些具有特殊要求的传动形式, 如果采用磁耦合传动与机械传动相结合的传动形式取代单纯的复杂的机械传动形式, 不仅可以简化传动装置, 而且还可以提高装置运行的可靠性和传动效率。在这里所阐述的磁耦合传动装置就是一种完全可以实现上述要求的磁耦合传动与机械传动相互结合起来, 并且在一定程度上还可以实现运动过程的自动控制的一种全新的技术。^[1]

磁传动技术即永磁耦合传动技术的简称, 它是指在外力的作用下, 利用传动部件中主、从动永磁场所产生的耦合力(包括吸引力和排斥力)来实现力或转矩(功率)无接触传递的一种新兴的传动

技术。磁耦合双向或多向传动控制技术是磁传动技术的衍生，是磁传动与机械传动组合的发展和提升。

这一技术是利用磁耦合力作用的超矩特性与机械传动组合创造出来的一种新型的传动装置，这种新型的磁耦合传动装置（也称磁耦合传动控制器），不仅具有常规的磁力传动器的特征，变直联式的硬传递为耦合式的软传递来实现主、从动装置完全分离，获得动态下的静密封，保证零泄漏的条件，又可从根本上实现对传动控制装置进行改进，减小机械传动构件的重量和体积，提高其传动与控制的灵敏度、稳定性、可靠性，从而改善传动系统的机械性能，优化其品质。此外，磁耦合传动装置在结构上还具有变单向运动为多向运动；从一维的运动空间转化为二维或三维的运动空间；实现对工作机械的控制、量度的调节和介质传输的断送等一系列功能。可见磁耦合传动装置的研究与开发是对常规磁耦合传动技术的一种演变、发展和提升，是磁耦合传动与机械传动结构相结合的一种新型的传递装置。

磁耦合传动控制技术是在 20 世纪发展并趋于成熟的磁力传动技术的基础上，完成质的飞跃，是磁耦合传动技术在多层面、全方位的拓展和提升，是从单一的同步旋转的圆周运动（二自由度）跃变为螺旋运动、曲线运动或三维空间的有序复合运动，在设计上很好地把复杂的磁路设计与巧妙的机械结构设计有机地结合起来；在技术上成功地解决了主、从动磁组件在运行过程中完成推进位移和旋转角度的制约关系等，无论是技术和功能均可提升到前所未有的程度。

磁耦合传动技术早在 20 世纪 30 年代就已经被人们所提出，但是由于当时对这一技术尚缺乏足够的认识，而且也受到永磁材料发展局限性的制约，虽然在这一时期内对这一技术进行过很多的实验研究，但终未取得多大的进展。20 世纪 50 年代，一些科学技术工作者又提出了这一技术，对此进行重新探讨、研究和研制。虽有一些进步，但仍然由于永磁材料性能的低劣及当时工业水平等条件的限制，其结果基本上还是在以往的水平徘徊。直到 20 世纪 70 年代末、80 年代初，随着现代工业的进步和发展，工业生产日益重视

对新技术的需求和环境的保护,西方工业发达国家还相继制订了严格的环境保护和产品可靠性等法规,促进了新技术、新产品的发展。磁耦合传动技术正是在这一时期又被一些科技工作者所重视和关注,从而引起进一步的深入研究,因此在这一时期有了很大的发展和工业中的逐步应用。如磁耦合传动技术在真空技术与流体输送泵上的应用就是在这—时期人们探索的一例。

自从1946年,英国HMD无泄漏磁力泵公司(原称霍华佳机械发展有限公司)将世界上第一台磁力传动泵推向市场而得到工业上的应用以来,磁耦合传动技术作为独立的专门技术在世界范围内开始受到了普遍的重视^[1]。随着现代工业,特别是化学合成工业的发展,人们察觉并且意识到工业废液、废气、废渣以及生产过程中的渗出、泄漏等对人类生产和生活环境的污染和破坏会带来毁灭性的损害。人类提出了环境保护要求的同时也制订了对可污染环境的工业生产和设备的限制性法规、法令。因此研究、开发、设计、制造全密封、无泄漏的各种工业装置生产设备及其技术成为科技和工业领域积极探索的主要课题。加之近年来由于稀土永磁材料的开发及其应用技术迅猛发展,磁耦合传动技术使设计和制造全密封、无泄漏的装置成为现实。

数十年来磁耦合传动技术的发展一直与磁性材料的发展密切相关。20世纪80年代开始,随着新的稀土永磁材料的问世、开发,磁力传动技术进入了一个前所未有的辉煌阶段。稀土永磁材料的诞生自然就成为了磁力传动技术发展的里程碑。

磁耦合传动装置除了具有常规的磁力传动器所具有的可转化轴传递动力的动密封为静密封,实现工作平稳运行,避免振动传递,实现工作装置在运行中的过载保护,与刚性联轴器相比较易于安装调试,拆卸维修,净化环境,消除污染,实现文明生产等一系列特点外,它还具有传递动力方式较多、结构功能齐全等特点。

① 把磁耦合传动技术从简单的二维的平面圆周运动,变为四维空间的螺旋式复合型运动,很好地解决了最大转角与转动范围的控制技术,把复杂的螺旋式复合运动定域在有效空间。

② 将磁路设计和机械结构设计有机结合成运动的整体,完成

复杂的运动轨迹。突破了传动系统传统机械联动机制，而且很好地实现了动态下的静密封。

螺旋运动是在三维空间运行的，可以说它是在平面圆周运动的基础上叠加了轴向推进位移和时间因素，同时解决了转角与推进位移（二者皆为时间的函数）的数量关系；解决了转动力矩与轴向推进作用的矢量关系。

③ 把磁极的紧密型排列、对称性排列和非对称性排列进行合理配置，使耦合的两组分离部件相对地做彼此相关、同步和不同步的双向异型运动。

④ 为任意条件和任意状态的运行摸索出普遍适用的规律。

1.2 磁耦合传动装置的基本结构及运动形式^[2~5]

磁耦合传动装置属于机械传动系统，其基本结构如图 1-1 所示，主要由三个部分组成。

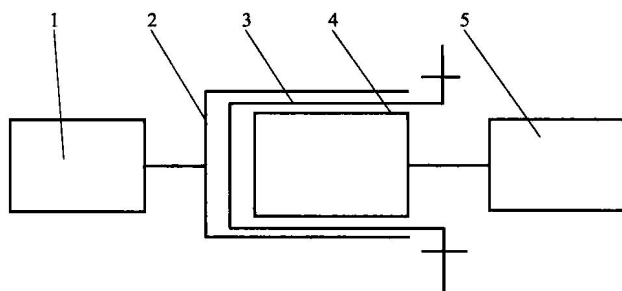


图 1-1 磁耦合传动装置的基本结构示意图

1—动力机；2—主动磁组件；3—隔离套；4—从动磁组件；5—负载

① 与主动磁场和从动磁场相结合的机械分别构成主动磁机械运动部件和从动磁机械运动部件，还有与运动状态相配套的导向装置等；

② 主、从动磁运动部件之间的工作气隙中设置了隔离套部件，包括隔离套工作状态（如温度等）的测试装置及导向装置等；

③ 运动的动力装置及控制系统。

磁耦合传动装置的运动系统如图 1-2 所示。

它的程序是：动力控制系统控制动力机工作，根据运行要求，动力机工作转速可调，工作转向可变换，动力机带动主动磁组件运行后，主、从动磁组件磁场透过隔离套 4 的器壁相互耦合，当主动磁组件 3 运动时，从动磁组件 6 由于磁场作用开始运动；从动磁组件带动和控制负载传动及导向装置 5 正常运行，5 工作时拖动传动杆及负载按程序进行

工作，运动状态检测器 8 主要检测从动磁组件及负载传动及导向装置 5、负载装置 7 的工作运行状态；温度检测装置 9 主要检测隔离套及内部温度状态；隔离套 4 除具备密封隔离的作用外，还对主、从动磁组件具有定位、支撑以及控制从动磁组件定向运动的作用。

从磁耦合传动装置的结构和应用功能来看，其运动形式大致可分为以下几种^[6]：

(1) 主、从动磁组件做同步旋转运动

主、从动磁组件做同步旋转运动的装置如图 1-1 所示，其结构属于基本类型，普遍应用于磁传动泵、磁传动搅拌反应釜、高速转动机械等设备上。当主动磁组件被动力机带动做旋转运动时，从动磁组件在耦合磁场的作用下跟随主动磁组件同步旋转，同时，由于耦合磁场的作用，从动磁组件的运动状态完全受主动磁组件运动状态的牵动和制约。

(2) 主、从动磁组件做同步直线运动

主、从动磁组件做同步直线运动装置如图 1-3 所示。

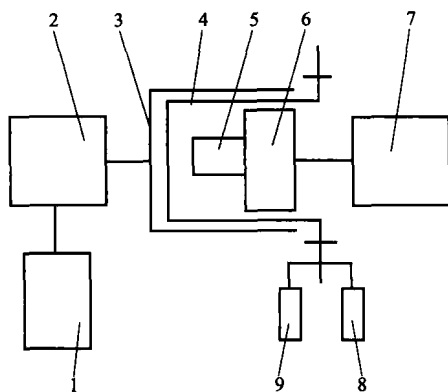


图 1-2 磁耦合传动装置的运动系统示意图

- 1—动力控制系统；2—动力机；3—主动磁组件；
4—隔离套；5—负载传动及导向装置；
6—从动磁组件；7—负载装置；
8—运动状态检测器；9—温度检测装置

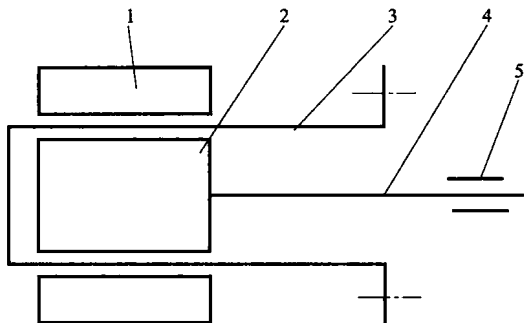


图 1-3 主、从动磁组件做同步直线运动磁耦合传动装置示意图

1—主动磁组件；2—从动磁组件；3—隔离套；4—传动杆；5—滑动组件

当主动磁组件 1 做直线运动时，从动磁组件 2 跟随 1 做直线运动。主动磁组件 1 为环状，设置在隔离套外侧，通常由外磁体、磁屏蔽体、外罩、传动支撑部件等零部件所组成。从动磁组件也是环状，由内磁体、内隔离罩、磁屏蔽体、紧固件、传动支撑部件等零部件所组成。

(3) 主、从动磁组件做同步螺旋运动

由于螺旋运动是平面圆周运动与圆周平面垂直方向上的直线运

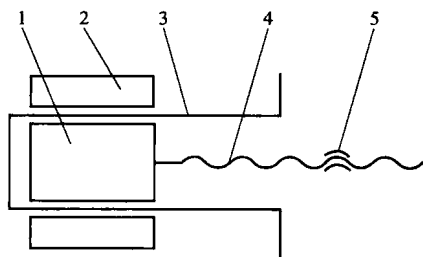


图 1-4 主、从动磁组件做同步螺旋运动磁耦合传动装置示意图

1—内转子；2—外转子；3—隔离套；
4—传动螺杆；5—导向件

动相结合的复合运动，所以它较前两种单一运动形式的磁耦合传动装置复杂得多，从磁路排布上完成了复合运动磁场的叠加，使得彼此叠加的多个场的作用力有序化而实现复杂运动。主、从动磁组件做同步螺旋运动磁耦合传动装置如图 1-4 所示。

这种磁耦合传动装置的外形与直线同步运动装置相

接近。螺旋型复合运动装置的主动磁组件做螺旋形旋转复合运动时，从动磁组件同时也随之做相同的复合运动，其主、从动件的运

排列为径向轴向组合排列。

图 1-6 和图 1-7 所示装置也属此类运动形式。图 1-6 中, 传动轴 1 带动螺旋套 4 做旋转运动, 主动磁组件 3 与从动磁组件 5 耦合, 传动杆 6 与从动磁组件 5 连接, 由于导向装置 7 的作用, 传动杆 6 做直线运动。图 1-7 中, 传动轴 1 带动导向槽旋转套 4 做旋转运动, 主动磁组件 3 跟随 4 做旋转运动, 从动磁组件 5 在传动螺杆 6 的作用下做螺旋运动, 而传动杆 7 在导向装置 8 的作用下输出直线运动, 其中由于主、从动磁组件相互耦合, 则主动磁组件在做旋转运动的同时, 于导向槽中做直线滑移运动。

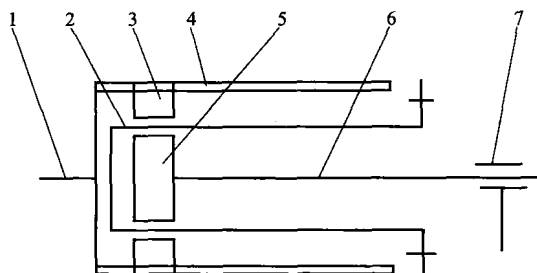


图 1-6 螺旋套磁耦合传动装置结构示意图

1—传动轴；2—隔离套；3—主动磁组件；4—螺旋套；5—从动磁组件；
6—传动杆；7—导向装置

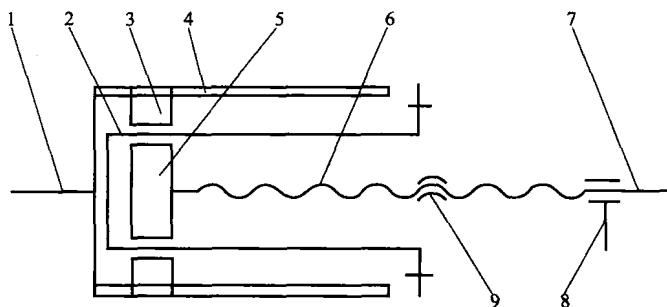


图 1-7 旋转与直线复合运动结构示意图

1—传动轴；2—隔离套；3—主动磁组件；4—旋转套；
5—从动磁组件；6—传动螺杆；7—传动杆；
8—导向装置；9—螺旋副