

磁力驱动技术与设备

赵克中 编著

化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

磁力驱动技术与设备 / 赵克中编著. —北京: 化学工业出版社, 2003. 12

ISBN 7-5025-5083-6

I. 磁… II. 赵… III. 驱动机构, 磁力 IV. TH132

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 125427 号

磁力驱动技术与设备

赵克中 编著

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 宋 薇 廉 静 丁建华

责任校对: 陈 静 李 军

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市宇新装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 12 $\frac{1}{4}$ 字数 325 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5083-6/TH·176

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

近年来，随着磁力驱动技术的迅速发展，其应用也日趋广泛。但目前系统论述这一技术的有关书籍很少，为了普及、提高和推广该技术，在我所多年来对该项技术的研究开发中所取得的研究成果的基础上，汇集国内、外现有技术资料，对这一技术进行了系统的整理论述，编著了《磁力驱动技术与设备》一书。其主要内容包括两个方面：一是磁力驱动技术的基础理论及磁力驱动器自身的设计、计算、制造等方面的问题；二是把磁力驱动器作为非接触式传递转矩（功率）的装置应用于其他一些设备而制成的各种磁力驱动式装置及其设计、计算等方面的问题。

磁力驱动技术属于磁力应用工程范畴，作为应用科学，作者本着理论联系实际并指导实践的原则，既论述相关的基本原理、基本概念，又着重阐述了工业实际应用技术的动态和新成就，而且还提供了在设计、制造和运行中需要的基本公式、参考数据和曲线。本书可供石油、化工、制药、有色冶金、海上油井、食品及军工等行业中从事磁力驱动技术与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。

该书在编著过程中得到了东北大学徐成海教授，李云奇、张世伟老师，兰州大学李发伸教授、李飞熊老师，甘肃工业大学范宗霖教授、李仁年老师，王德喜、刘军博士，李希宁、杨坚华研究员，李国坤、杨昆元、张焰、刘命辉高级工程师，以及窦淑萍、安芝贤、刘芳、张兴全、车炯等同志的大力支持并提供了许多宝贵资料。同时在编著过程中引用了国内外许多有关书刊和资料，在此一并向他们致以诚挚的谢意。由于编者水平有限，书中疏漏和欠妥之处在所难免，恳请同行专家及读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 篇 磁力驱动技术

1 引论	1
1.1 磁力驱动技术的基本原理、驱动结构及应用特点	1
1.2 磁力驱动技术的发展历史及现状	5
1.3 磁力驱动器的分类	8
1.4 磁力驱动技术中常用的名词术语	12
2 磁力驱动技术基础	14
2.1 磁场的基本物理量	14
2.1.1 磁场的基本物理量和相关名词术语	14
2.1.2 物质的磁性	16
2.1.3 永磁材料应满足的基本条件和主要参数	18
2.1.4 磁性材料的分类、应用和发展	18
2.2 磁力驱动器用永磁材料的磁特性与物理特性	19
2.2.1 磁力驱动器选用磁性材料时的注意事项	19
2.2.2 不同永磁材料的磁特性、物理特性	19
2.3 圆筒形磁力驱动器的结构、尺寸代号	20
2.4 磁转矩计算	20
2.4.1 高斯定理求解法	21
2.4.2 经验公式求解法	22
2.5 磁场计算	25
2.5.1 基本假设与物理模型	25
2.5.2 数字模型	26
2.5.3 有限元法计算	28
2.5.4 稳定磁场磁吸引力的计算	30
2.6 转角对转矩的影响	32

2.6.1	实验测试数据	32
2.6.2	理论计算结果	35
2.6.3	理论计算数据与实验测量数据比较	35
2.7	磁力驱动技术中的磁涡流损失	42
2.7.1	涡流的产生及影响	42
2.7.2	涡流损失的计算	42
3	磁力驱动器的设计与计算	47
3.1	磁力驱动器设计方法分析	47
3.2	磁力驱动器磁路的配置方式	47
3.3	磁力驱动器的磁路设计	50
3.3.1	静磁能与传动力	50
3.3.2	磁路形式与选择	52
3.3.3	组合拉推式磁路的转矩方程	54
3.3.4	组合拉推式磁路的应用实例	57
3.3.5	大磁隙磁路设计方法的修正	59
3.4	磁路材料选择	62
3.4.1	磁性材料的选择	62
3.4.2	隔磁材料选择	64
3.4.3	软磁材料选择	64
3.5	永磁体厚度、工作气隙、极数和永磁体轴向排列的合理匹配	64
3.6	隔离套的设计与计算	67
3.6.1	隔离套的结构形式	67
3.6.2	隔离套材料的选择	68
3.6.3	隔离套设计中特殊性问题的处理	69
3.6.4	隔离套的设计计算	72
3.6.5	隔离套变形设计计算	75
3.6.6	压力实验	76
3.6.7	隔离套结构及材料的最新进展	77
3.7	磁转子长径比的选择	78
3.8	磁力驱动器结构参数的优化设计	79
3.8.1	磁极数的优化	80

3.8.2	轭铁厚度的优化	83
3.8.3	永磁体厚度的优化设计	85
3.9	影响磁路磁性能的因素	87
3.9.1	有效磁场强度 H 的影响	87
3.9.2	磁路结构对磁转矩的影响	88
3.9.3	工作气隙及磁极数的影响	88
3.9.4	永磁材料对磁转矩的影响	89
3.9.5	转子轮毂与轴材料对磁转矩的影响	89
3.10	磁力驱动器的静态性能测试	90
3.10.1	静态性能测试装置原理及实验方法	90
3.10.2	测试结果及误差分析	91
3.11	磁力驱动器的动态性能测试	97
3.11.1	试验装置、原理及测试方法	97
3.11.2	效率与转速的测试结果及数据分析	100
3.11.3	测试结果及数据分析	101
3.12	磁力驱动器的运转特性	106
3.13	磁力驱动器损坏原因分析及使用中应注意的问题	111
3.13.1	磁力驱动器损坏原因分析	111
3.13.2	磁力驱动器使用中应注意的问题	112

第 2 篇 磁力驱动离心泵

4	磁力驱动离心泵概论	113
4.1	磁力驱动离心泵结构工作原理及特点	113
4.2	磁力驱动离心泵的结构形式	115
4.3	磁力驱动离心泵的功率损失及减少功率损失的措施	119
4.3.1	磁力驱动离心泵的功率损失	119
4.3.2	减小功率损失的措施	123
4.4	磁力驱动离心泵的涡流损失比率	124
4.5	磁力驱动离心泵的应用领域及发展前景	127
5	磁力驱动离心泵的设计与计算	129
5.1	磁力驱动离心泵设计中应考虑的问题	129
5.1.1	磁力驱动离心泵的整体设计问题	129

5.1.2	磁力驱动离心泵轴在泵体内的运动形式	130
5.1.3	轴向力及轴向力的平衡方法	132
5.1.4	径向力及平衡	134
5.1.5	磁性材料的选择及磁平衡性问题	135
5.1.6	隔离套材料的选择	137
5.1.7	隔离套的冷却散热	138
5.1.8	合理确定导流（或回流）液体的流量	139
5.1.9	泵的检测与监控	140
5.2	磁力驱动离心泵的设计参数	141
5.2.1	磁性能参数	141
5.2.2	永磁体结构参数、设计实例与试验验证	144
5.3	磁力驱动离心泵的泵头设计	149
5.4	润滑冷却流道及流道孔的确定	159
5.5	动静环的合理安置	163
5.6	泵轴设计	163
5.6.1	泵轴的受力分析与计算	163
5.6.2	轴的强度计算	173
5.7	磁力驱动离心泵用轴承	175
5.7.1	泵用轴承的选择及支撑	175
5.7.2	轴承材料	177
5.7.3	轴承材料的选择	184
5.7.4	滑动轴承设计中几个主要参数的确定	187
5.7.5	滑动轴承润滑方式的结构选择	188
5.7.6	滑动轴承导流槽基本尺寸确定的考虑	192
5.7.7	滑动轴承结构设计中应注意的一些技术问题	193
5.8	磁力驱动离心泵用特殊材料的选用	196
5.9	氟塑料粘接问题	199
6	磁力驱动离心泵的制造与调试	200
6.1	磁力驱动离心泵主要零件的加工工艺	200
6.1.1	磁力驱动器的加工工艺	200
6.1.2	泵轴的加工工艺	206
6.2	磁力驱动离心泵整机的启动特性	214

6.2.1	启动过程的数学模型	214
6.2.2	启动过程的参量特性	215
6.2.3	启动和工作过程中的最大转矩点的确定	218
6.2.4	脱耦条件分析	219
6.2.5	磁力驱动泵的延时启动	220
6.2.6	启动器的原理及使用效果	222
6.3	磁力驱动离心泵的故障分析与监控	223
6.3.1	故障产生的原因及消除方法	223
6.3.2	故障诊断与监控	224
7	磁力驱动离心泵的选用	231
7.1	FC 系列化工流程磁力驱动离心泵	231
7.1.1	结构	231
7.1.2	性能参数	231
7.1.3	使用中应注意的问题	233
7.2	FFC 系列耐腐蚀磁力驱动离心泵	235
7.3	FSC 系列耐腐蚀磁力驱动离心泵	245
7.4	DGC 系列磁力驱动多级离心泵	254
7.5	FGC 系列磁力驱动管道离心泵	259
7.6	磁力驱动旋涡式离心泵	261
7.6.1	工作原理及特点	261
7.6.2	结构形式及使用要求	262
7.6.3	结构与计算	265
7.6.4	FXC 型磁力驱动耐腐蚀旋涡离心泵的选用	268
7.7	磁力驱动低温液体泵	269
7.7.1	特点及结构	269
7.7.2	设计中应考虑的问题	270
7.7.3	磁力驱动低温液体泵的选用	273
7.8	CAY 型磁力驱动离心油泵	274

第 3 篇 磁力驱动容积式转子泵

8	磁力驱动齿轮泵	278
8.1	齿轮泵的工作原理	279

8.1.1	外啮合齿轮泵工作原理	279
8.1.2	内啮合齿轮泵工作原理	280
8.2	磁力驱动齿轮泵的结构及特点	281
8.3	磁力驱动齿轮泵的设计	282
8.3.1	设计参数	282
8.3.2	设计计算中的特殊问题	285
8.3.3	特性试验研究	286
8.3.4	磁涡流能耗损失的测定	289
8.4	磁力驱动齿轮泵设计应注意的问题	290
8.4.1	径向不平衡力	290
8.4.2	困油现象	292
8.4.3	泄漏控制	294
8.4.4	材料选择与加工精度	294
8.4.5	隔离套的散热方式	295
8.5	2CY 型磁力驱动齿轮泵	296
8.5.1	结构及其特点	296
8.5.2	主要技术参数	297
8.5.3	安装与使用	297
8.6	MCB 型磁力驱动齿轮泵	299
8.6.1	主要零部件材料	299
8.6.2	结构	299
8.6.3	性能参数	299
9	磁力驱动螺杆泵	300
9.1	磁力驱动螺杆泵的工作原理及结构	301
9.2	磁力驱动技术在螺杆泵上应用的可靠性	304
9.3	磁力驱动螺杆泵的设计	304
9.3.1	总体设计方案的考虑	304
9.3.2	磁力驱动装置的配套设计	305
9.3.3	磁力驱动螺杆泵的设计	306
9.4	3GY-7/52-C 型磁力驱动三螺杆泵	308
9.4.1	结构及特点	308
9.4.2	主要参数	309

9.4.3	安装、维护与检修	309
9.5	磁力驱动螺杆泵的应用前景	311

第 4 篇 磁力驱动技术的其他应用领域

10	磁力驱动技术在真空动密封中的应用	312
10.1	真空动密封的分类	312
10.2	接触式真空动密封	313
10.2.1	固体接触式真空动密封的结构及特点	313
10.2.2	液体式真空动密封的结构及特点	315
10.3	软件变形式真空动密封	318
10.3.1	非金属软件变形真空动密封连接	318
10.3.2	金属软件变形真空动密封连接	319
10.4	磁力驱动式真空动密封	319
10.4.1	工作原理及特点	320
10.4.2	分类及选择	321
10.4.3	在真空获得设备以及容积式真空泵上的应用	323
10.4.4	在超高真空设备上的应用	323
10.4.5	在真空设备上的应用实例	331
11	磁力驱动技术在搅拌反应釜中的应用	333
11.1	磁力驱动搅拌反应釜的结构型式、工作原理及特点	334
11.2	磁力驱动搅拌反应釜的分类	336
11.2.1	按选用材质分类	336
11.2.2	按釜体结构形式分类	337
11.2.3	按工作压力分类	337
11.2.4	按搅拌形式分类	338
11.3	磁力驱动搅拌反应釜的结构设计	338
11.3.1	设计前的准备工作	338
11.3.2	设计的基本程序	338
11.4	磁力驱动搅拌反应釜的设计计算	339
11.4.1	磁力驱动装置的设计计算	339
11.4.2	釜体设计	340
11.4.3	夹套设计	341

11.4.4	法兰选择	342
11.4.5	接管口的选择	342
11.4.6	搅拌系统的形式选择	343
11.4.7	搅拌轴支承方式的选择	345
11.4.8	工艺条件及技术要求	347
11.4.9	冷却方法	347
11.4.10	搅拌釜性能参数	349
11.4.11	磁力驱动装置性能参数	350
12	磁力驱动技术在全密封阀门中的应用	351
12.1	磁力驱动全密封阀门的结构、工作原理及特点	351
12.2	磁力驱动全密封阀门的分类	353
12.3	磁力驱动全密封阀门设计应注意的问题	354
12.4	阀用磁力驱动结构形式	355
12.5	磁力驱动阀门主要参数计算	356
12.6	磁力驱动全密封阀门性能参数测试	359
12.7	测试分析	363
12.8	磁力驱动全密封阀门的选用	365
13	磁力驱动技术在仪表工业中的应用	366
13.1	磁力驱动在液面检测仪中的应用	366
13.2	磁力驱动在界面检测仪中的应用	367
13.3	磁力驱动在流量计中的应用	367
	参考文献	370

第 1 篇 磁力驱动技术

1 引 论

1.1 磁力驱动技术的基本原理、驱动结构及应用特点

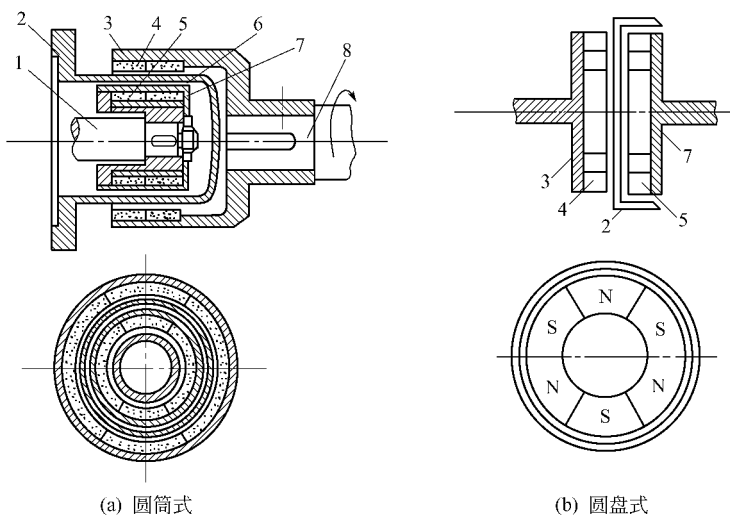
(1) 磁力驱动的基本原理

磁力驱动是以现代磁学的基本理论，应用永磁材料或电磁铁所产生的磁力作用，来实现力或转矩（功率）无接触传递的一种新技术^[1]。实现这一技术的装置称为磁力驱动器，或称磁力传动器、磁力耦合器、磁力联轴器等。磁力驱动器传递力或转矩的结构如图 1-1 所示。其中图（a）为圆筒式，属于套筒状磁圆环形结构；图（b）为圆盘式，为两平面形结构，磁路为紧密排列组合形磁路，组合磁路具有拉推作用，传递力或转矩的效率 high，因此在各种磁力驱动设备中经常被优先采用。

(2) 圆筒式磁力驱动器的结构

圆筒式磁力驱动器是由内、外两个导磁体和设置其上的瓦形永磁体组成的主、从动磁转子以及在主动和从动磁转子间的工作气隙中设置的隔离套等三部分构件所组成。通常称外磁筒为主动磁转子或外磁转子，内磁筒为从动磁转子或内磁转子。在包括外磁转子与永磁体和内磁转子与永磁体在内的两个主、从动磁部件上设有均匀排列并呈现偶数排列的几对永磁体，其磁极的 N、S 极按交错方式排列，如图 1-2 和图 1-3 所示^[2]。

当电动机带动主动磁转子旋转时，即可通过内、外磁转子中永

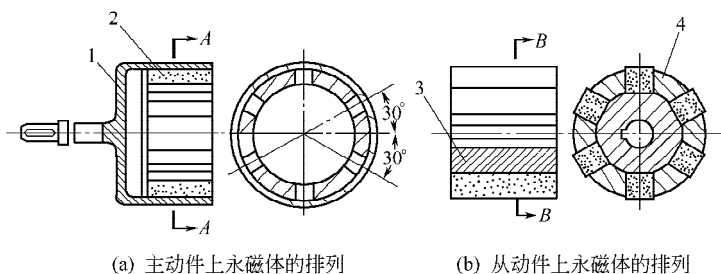


(a) 圆筒式

(b) 圆盘式

图 1-1 磁力驱动器结构示意图

1—从动轴；2—隔离套；3—外磁转子；4—外磁转子用永磁体；
5—内磁转子用永磁体；6—工作气隙；7—内磁转子；8—主动轴



(a) 主动件上永磁体的排列

(b) 从动件上永磁体的排列

图 1-2 间隙分散式永磁体在磁筒上的排列

1—外磁筒；2—永磁体；3—内磁筒；4—隔磁块

磁体相互间产生的磁转矩（或磁场力）来实现两组成部件的同步旋转。由于在主、从动件之间设有用金属或非金属材料制成的隔离套或称密封套，将从动件以及用以从事不同工作的运动件（如泵的叶轮、风机的叶片、化学反应釜的搅拌器等）一起封闭在工作容器

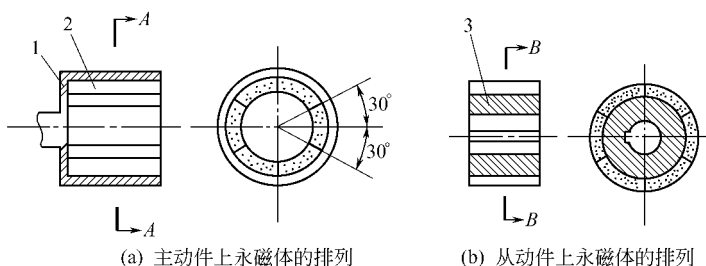


图 1-3 组合拉推式永磁体在磁筒上的排列

1—外磁筒；2—永磁体；3—内磁筒

内，即可制成无接触传递动力可从事各种不同工艺的无泄漏磁力驱动设备。

磁力驱动和机械驱动的根本不同点，在于它向传动部件传递转矩时与液体或气体介质相接触的动力传送轴不与外界空间相连通，而是利用磁场透过磁路工作间隙或隔离套的薄壁传递转矩。比如磁力驱动泵和磁力驱动搅拌反应釜，采用磁力驱动密封装置后取消了传统的机械传动泵、釜采用的轴为接触式的动密封装置，变动密封为静密封。因此从根本上消除了转动轴密封处所产生的泄漏，解决了工业用泵、釜等设备一直存在的跑、冒、滴、漏和机械密封发热、磨损等一系列问题，为安全可靠输送或搅拌反应有毒、易燃、易爆、腐蚀以及各种贵重介质创造了条件。

(3) 磁力驱动技术的应用特点

① 可将轴传递动力的动密封转化为静密封，实现动力的零泄漏传递 磁力驱动传递力或转矩，是利用磁场力作用特性而实现的。由于磁力驱动并不需要两个永磁件之间相对接触或连接，因此当主动件旋转时，在磁场力的作用下即可实现从动件同时进行旋转，而工作容器内外之间并不需要主动轴（或传动杆）必须穿过容器壁来达到工作的目的，从而可实现动力传递过程的静密封状态彻底做到零泄漏。

② 可避免振动传递，实现工作机械的平稳运行 由于主动件

与从动件相互间无接触，不存在刚性连接问题，因此在主动件发生突变或振动时都不会直接传到从动件上。同时从动件发生突变或振动时同样也不会影响主动件的工作状态，从而可避免振动或突变的传递，实现工作机械的平稳运行。

③ 可实现工作机械运行中的过载保护 在主动件与从动件无刚性连接的条件下，设计时可适当增加工作转矩以增加安全运动感，但当从动件负载突然增加超载过大时，两件之间可产生滑脱而结束转矩的传递，从而避免了从动件在不能进行正常工作时（如主动轴抱死、扫膛等）易被损坏的危险，同时也对电机起到了保护作用。

④ 与刚性联轴器相比较，安装、拆卸、调试、维修均较方便 磁力驱动式装置在结构上较为简便，主动件与从动件之间存在间隙，因此易于安装拆卸和维修，既可减小设备维修的难度和劳动强度，又可提高设备的工作效率。

⑤ 磁力驱动传递动力的运动方式 磁力驱动传递动力时可作直线运动、旋转运动以及直线运动与旋转运动相结合的螺旋型复合运动；同时与不同机械结构设计相结合，实现三维空间的有序运动、其他一些不同方式的运动或一定距离的位移及任意角度的定向运动。

⑥ 可净化环境，消除污染，实现文明生产 环境保护是我国经济可持续发展的一项基本国策，在石油、化工、制药、海上油井作业、有色金属冶炼、湿法选矿、食品等行业的生产流程中，物料输送时应用磁力驱动泵可完全避免有毒、有害、易燃、易爆、强酸、强碱等腐蚀性介质的泄漏，既保护了操作者的安全，又防止了对环境的污染。

(4) 磁力驱动技术在应用中存在的问题

① 磁场的存在可干扰周围环境 磁场在某一空间的存在干扰了周围环境，使某些应避免磁场干扰的仪器与设备的使用受到了限制。

② 磁力驱动器在启动过程中易产生滞后 在启动运转过程中

主动磁转子的磁转角与从动磁转子的磁转角存在着转角差并随时间变化而变化；在正常运转中负载转矩变化时磁场力转矩也同样发生变化，从而可导致主、从动件之间产生错动，因此在要求精确设备的使用上受到了限制。

③ 磁力驱动器与接触式密封装置相比较，效率相对降低。这主要是因为采用金属材料作为隔离套时，由于金属隔离套处于正弦交变磁场中，该磁场不但大小变化而且方向也发生变化，因此由于这种变化可导致金属材料隔离套中在垂直于磁力线方向的截面上感应出涡流电流。这种涡流的产生，既能减弱工作磁场，降低传递转矩，又可产生涡流损失，并以焦耳热的形式释放出能量，从而消耗了主轴的一部分传递功率，降低了传递效率。

1.2 磁力驱动技术的发展历史及现状

磁力驱动技术早在 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，因此在这一时期内虽然对这一技术进行过很多的实验研究，但终未取得较大的进展。20 世纪 50 年代一些科学技术工作者又提出了对这一技术的重新探讨、研究和研制，虽有一些进步，但由于条件的限制，其结果基本与以往一样。20 世纪 70 年代起随着现代工业的进步和发展，工业生产中日益重视对新技术的需求和对环境的保护，西方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、新产品的开发和利用。磁力驱动技术在这一时期又被一些科技工作者重视和关注，从而引起了进一步的深入研究，因此有了很大的发展和工业的逐步应用。如磁力驱动技术在泵上的应用就是显著的一例。随着工业的发展，对工业用泵轴封的泄漏问题提出了苛刻的要求，由于各种工业用泵所存在的最薄弱的环节就是轴封的泄漏，即使是机械密封也始终有 3~8mL/h 的泄漏量，这对一个大型化工业生产厂家而言，数千台运转的工业泵的总泄漏量是十分严重的。因此开发无泄漏全密封的各

种设备就成为工业界的重要课题，其中磁力驱动离心泵的开发和研究就成为当时发展此项技术的一个重要课题。20世纪70年代磁力驱动离心泵，主要是采用铁氧体永磁材料和铝镍钴永磁材料，这些材料不但存在着易退磁、占用空间大、传动效率低等缺点，而且造价和维修费用较高，因此，在应用上受到了限制。20世纪70年代后期随着稀土永磁材料，如稀土钴和钕铁硼类等新兴永磁材料的发展和运用，使磁力驱动技术有了迅速的发展和极大的提高，如采用钕钴永磁材料制成的磁力驱动器，在传递相同转矩时与采用铁氧体永磁材料制成的磁力驱动器相比，其质量差距很大。钕铁硼永磁体的磁能积已达到 $38\text{MGs} \cdot \text{Oe}$ ^① 以上。从而可使磁力驱动器传递转矩（功率）能力提高 3~4 倍。传递的最大功率已达到 400kW。另外，由于碳化硅（陶瓷）滑动轴承等材料的应用，使磁力驱动泵的使用寿命大幅度提高。由于技术上的这些突破和设计工艺等方面的改进，使磁力驱动泵的可靠性和经济性均有较大的提高。因此进入 20 世纪 80 年代后，磁力驱动技术在泵工业上的应用迅速发展，磁力驱动泵已经成为石油、化工、制药等许多领域中的常用设备。

英、德、日、美、意等国对磁力驱动泵研究和开发较早。目前生产磁力驱动泵的厂商有英国的 HMD 无密封泵公司，Seal loss 无密封泵公司，德国的 Dicker 泵公司及 Klaus、Kcaes 泵公司，美国的 Dresser 泵公司，日本的三和特殊制钢株式会社等。这些外国公司生产的磁力驱动泵，从总体结构设计上看大同小异，绝大部分采用定轴式和动轴式两种结构。目前从配套功率上看，应用在工业生产上的产品多在 30kW 以下，其中 2.2~7.5kW 的磁力驱动泵用量最多。采用的磁性材料多为一般性稀土永磁材料。

当今国际上磁力驱动泵发展最快的是德、英、日、美等国家。日本主要在 7.5kW 以下功率领先，特别是其塑料泵，工艺、质量都很好，日本国内化工行业已普遍使用。德国已发展到 300kW。英国 HMD 公司近年研制的两级磁力驱动泵，其流量为 $560\text{m}^3/\text{h}$ ，

① $1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$ ， $1\text{Oe}=79.5775\text{A/m}$ 。