

同轴磁性齿轮的原理及应用

蹇林旻 著



科学出版社

同轴磁性齿轮的原理及应用

蹇林旒 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍近年来出现的一种新型无接触变速传动装置——同轴磁性齿轮,涉及其拓扑结构、运行原理、分析方法、优化设计及工业应用等多个方面。全书共6章:第1章为绪论,回顾了从机械齿轮到磁性齿轮的发展历程;第2章介绍同轴磁性齿轮的拓扑结构及运行原理;第3章介绍基于有限元数值模型的同轴磁性齿轮性能分析;第4章推导建立了同轴磁性齿轮内部磁场分布的解析计算模型;第5章介绍同轴磁性齿轮的优化设计方法;第6章介绍同轴磁性齿轮的几种潜在应用。本书强调基础理论的突破创新,从磁场调制、谐波耦合等方面拓展了传统磁性机构的设计思想,在此基础上,紧密联系实际应用,提出了多种具有全新型态的复合电磁装置。

本书适合从事永磁机构设计、电磁能量转换技术研究的专业人士阅读,也可作为高等院校中电气工程及其自动化、机械电子工程、自动化等专业师生的自学和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

同轴磁性齿轮的原理及应用/蹇林旋著. —北京:科学出版社,2015.10

ISBN 978-7-03-045221-4

I. ①同… II. ①蹇… III. ①磁性-齿轮-研究 IV. ①TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 164340 号

责任编辑:姚庆爽 罗 娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年10月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:230 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

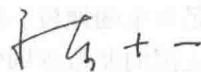
2010 年是值得我们深刻铭记的年份。在这一年,我国经济规模超过日本,成为仅次于美国的全球第二大经济体。这是一项举世瞩目的伟大成就,中国在近四十年的时间里始终保持高速增长,创造了人类史上的经济奇迹,我们也由此在实现中华民族伟大复兴的道路上踏上了新的征程。回顾过往,可以清楚地看到,中国竞争力的重要源泉在于成功建立了全世界门类最为齐全的工业体系,其中制造业更是具有举足轻重的地位。继续巩固和深化我国在制造业取得的巨大成就,全面推进从制造大国向制造强国转变,是我国提升综合国力、保障国家安全、建设世界强国的必由之路。不久前,国务院印发了《中国制造 2025》,这是我国实施制造业强国战略的第一个十年行动纲领。文件明确提出将通过市场主导、政府引导、资源整合等手段,部署和实施制造业创新中心建设工程、智能制造工程、工业强基工程、绿色制造工程、高端装备创新工程等五项重大工程。毫无疑问,在国家战略的推动下,我国制造业将迎来新的黄金时代,这将为我国经济继续保持良好快速发展提供重要保障。

南方科技大学是由广东省领导和管理、深圳市举全市之力创建的一所公办创新型大学,目标是迅速建成国际化高水平研究型大学,建成中国重大科学技术研究与拔尖创新人才培养的重要基地。学校于 2012 年 4 月由教育部批准建立,并被确立为国家高等教育综合改革试验校,这赋予我校探索具有中国特色的现代大学制度、探索创新人才培养模式的重大使命。南方科技大学在学科建设中,一方面坚持加大在基础理论学科上的投入,始终瞄准学术领域最前沿的研究方向,在短短三年时间内,我校科研人员已在生命科学、化学、物理学、材料学等领域取得了一系列高水平研究成果;另一方面将加大工程技术学科建设,目前我们正在筹建工学院,将在涉及信息、能源、环境、制造等领域推进交叉融合,力争在不久的将来形成一大批具有原始创新性的科技成果,为我国建设制造业强国、打造创新性国家的宏伟工程贡献智力。

该书是我校教师蹇林旒博士过去十年研究工作的总结,全面介绍了同轴磁性齿轮这一新兴工业技术。众所周知,齿轮是工农业生产领域广泛存在的重要装置,其主要功能是实现变速传动。传统机械齿轮依靠齿廓间的接触式啮合进行能量传递,这不可避免地带来摩擦、振动、噪声、需要定期维护保养等诸多弊端。同轴磁性齿轮采用磁体间的不接触作用实现转矩传递,有效杜绝了上述机械齿轮的种种缺陷,并展现出其独有的过载自保护能力。此外,在磁场调制效应作用下,多次磁场

谐波共同参与转矩传递,这使得同轴磁性齿轮的转矩密度达到了与传统机械齿轮相当的水平。随着磁性材料的进一步发展,同轴磁性齿轮的综合性能有望在不久的将来全面超越机械齿轮,展现出广阔的应用前景。该书立足基础理论,全面阐述了同轴磁性齿轮的工作原理及其分析、设计、优化方法。除此之外,该书的一大亮点是指出了同轴磁性齿轮与其他机电装置深度耦合的可能性,创造性地提出了多种新型集成化电磁能量转换装置,并探讨了其在风力发电、电动汽车无极调速、低速电气直驱等场合的应用。相信该书的出版将为我国高端装备自主创新提供一种新的思路。

最后,祝愿广大读者朋友们开卷有益!



南方科技大学校长、中国科学院院士

2015年8月6日

前 言

同轴磁性齿轮是一种能够提供不接触变速传动功能的新型磁性机构,自诞生之日至今不过十来年时间,却吸引了学术界和工业界的广泛关注。截至当前,在全球范围内发表的关于同轴磁性齿轮的学术论文已多达上万篇。作为国际磁学界顶级的学术会议之一,2015 年度的国际磁学大会甚至为其开设了专题,用以交流该领域的最新进展。究竟是什么原因令这项新生事物具有如此大的魅力呢?

回顾历史不难发现,人们在 20 世纪初便开始为寻求能够摆脱机械齿轮的替代技术而持续努力。事实上,机械齿轮几乎无处不在,它已经被公认为现代工业文明的象征,这一点可以从我国的国徽图案中得到印证。然而,由于完全依赖齿廓间的接触应力进行变速传动,机械齿轮存在诸多无可规避的先天性缺陷:首先,接触式机械应力会引发各种失效形式,为延长齿轮的使用寿命,人们需要定期对其进行维护,并采取严苛的润滑措施;其次,齿轮对工作环境也有较高的要求,细小的尘埃、过高的温度、过大的温差等都会对齿轮体的刚度及润滑剂的效用产生不利影响;最后,齿轮在运行时会引发振动与噪声,造成很坏的用户体验。正因为如此,人们一直在探索实现无接触变速传动的方式和方法,由此而产生的基于磁体间无接触作用的齿轮机构即为磁性齿轮。早期的平行轴磁性齿轮的工作原理非常简单,但因其转矩密度太低而无法在实际场合中得到应用。同轴磁性齿轮采用了同心拓扑结构,大大提高了磁体的利用效率,加上近年来永磁材料性能的不断提升,使得其转矩密度达到与机械齿轮相当的水平。此外,由于具有与其他永磁装置进行深度融合的可能性,近年来不断涌现出各种集成磁性齿轮的复合电磁机构,并表现出了优越的综合性能。这些都成为同轴磁性齿轮得以快速发展的主要原因。

笔者自 2006 年开始介入同轴磁性齿轮领域的研究,迄今已积累了较为丰富的研究成果,而本书即为笔者过去数年工作的总结。全书共 6 章:第 1 章为绪论,回顾了从机械齿轮到磁性齿轮的发展历程;第 2 章介绍了同轴磁性齿轮的拓扑结构及原理;第 3 章介绍了基于有限元法的同轴磁性齿轮性能分析;第 4 章推导建立了同轴磁性齿轮内部磁场分布的解析计算模型;第 5 章介绍了同轴磁性齿轮的优化设计方法;第 6 章介绍了同轴磁性齿轮的几种潜在应用。本书强调基础理论的突破创新,从磁场调制、谐波耦合等方面拓展了传统磁性机构的设计思想,在此基础上,紧密联系实际应用,深入挖掘同轴磁性齿轮的应用潜力。书中的部分插图的绘制工作由笔者指导的研究生及科研助理完成,他们是邓正兴、石玉君、尉进、宋建建、武渊源、刘程。此外,全书的校对工作由邓正兴完成。在此对他们的辛勤付出

表示衷心的感谢。

笔者还要由衷感谢博士阶段的指导老师邹国棠教授和江建中教授,是他们将我引入这一迷人的领域,并在起步阶段给予我宝贵的指导。笔者在过往的研究过程中还得到了诸多朋友的无私帮助,他们是刘春华博士、张东博士、龚宇博士、刘新华博士、赵文祥博士、朱孝勇博士,借此机会向他们致以诚挚的谢意。笔者还要特别感谢家人一直以来的支持与鼓励,她们在背后默默的付出保障了笔者科研、教学工作的顺利进行。

书中所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金(项目号:51107141、51377158)、广东省自然科学基金(项目号:2014A030306034)和深圳市科技创新委员会(项目号:KQCX20140522151322948)的大力资助,在此一并致谢!

由于笔者水平所限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏之处,希望广大读者朋友不吝指正。

寒林旋

2015 年仲夏于南方科技大学

目 录

序

前言

第1章 绪论——从机械齿轮到磁性齿轮	1
1.1 机械齿轮装置简介	1
1.2 早期的磁性齿轮装置	4
1.3 磁性联轴器	7
1.4 同轴磁性齿轮概述	10
1.5 本章小结	13
参考文献	14
第2章 同轴磁性齿轮的结构及原理	16
2.1 同轴磁性齿轮的拓扑结构	16
2.2 磁场调制效应	20
2.2.1 引入调磁环定子前气隙中永磁磁场的分布	21
2.2.2 调磁环定子作用下的气隙中永磁磁场的分布	23
2.3 工作转矩的形成机理	27
2.4 脉动转矩的形成机理	30
2.5 同轴磁性齿轮的多种工作型态	32
2.6 本章小结	33
参考文献	34
第3章 基于有限元法的同轴磁性齿轮性能分析	36
3.1 有限元法概述	36
3.2 建模与剖分	38
3.3 稳态性能分析	41
3.3.1 气隙磁场分布	42
3.3.2 峰值转矩	45
3.3.3 脉动转矩	48
3.4 瞬态性能分析	48
3.5 其他问题	53
3.5.1 调磁环上连接桥及紧固过孔对磁性齿轮性能的影响	53
3.5.2 磁性齿轮的端部效应	56

3.6 本章小结	58
参考文献	59
第4章 同轴磁性齿轮内的磁场解析计算	61
4.1 磁场解析计算概述	61
4.2 问题的描述	62
4.3 问题的求解	66
4.3.1 气隙中的磁场分布	66
4.3.2 内转子永磁体中的磁场分布	67
4.3.3 空气槽中的磁场分布	68
4.3.4 边界条件的处理	71
4.4 磁场计算结果及分析	75
4.5 转矩计算结果及分析	86
4.6 本章小结	88
参考文献	88
第5章 同轴磁性齿轮的优化设计	91
5.1 优化设计方法概述	91
5.2 改善磁场调制效应	91
5.2.1 基于一维磁路模型的磁场调制效应分析	91
5.2.2 调磁铁心块形状参数的优化	96
5.3 优化磁极排布方式	102
5.3.1 采用 Halbach 磁体阵列的同轴磁性齿轮	102
5.3.2 性能对比分析	105
5.3.3 实验验证	112
5.4 本章小结	113
参考文献	114
第6章 同轴磁性齿轮的应用	116
6.1 潜在应用场合分析	116
6.2 双定子集成磁性齿轮的直驱风力发电机	119
6.2.1 风力发电系统概述	119
6.2.2 双定子集成磁性齿轮直驱风力发电机的结构及设计方法	120
6.2.3 性能分析及实验验证	124
6.3 单定子集成磁性齿轮的低速直驱电机	134
6.3.1 单定子集成磁性齿轮低速直驱电机的拓扑结构	135
6.3.2 单定子集成磁性齿轮低速直驱电机的工作原理	136
6.3.3 建模仿真与性能分析	142

6.4 集成磁性齿轮的无级变速传动系	149
6.4.1 基于行星齿轮的动力分流型电子无级变速传动系	150
6.4.2 两段式集成磁性齿轮无级变速传动系	152
6.4.3 同心式集成磁性齿轮无级变速传动系	159
6.5 本章小结	168
参考文献	169

第 1 章 绪论——从机械齿轮到磁性齿轮

1.1 机械齿轮装置简介

尽管本书旨在向读者介绍新近出现的无接触磁性齿轮装置,但考虑到知识的完备性及系统性,笔者认为有必要简单回顾一下机械齿轮装置的相关要点。众所周知,机械齿轮在日常生活和工业生产的各行各业中广泛存在,小到钟表、玩具,大到飞机、火车……它已被公认为近现代工业文明最有力的象征之一。这一点可以从我国国徽图案的设计理念中得到印证。就其功能而言,机械齿轮通常被用来实现不同机构间运动形式的匹配以及机械能的传递。图 1.1 给出了四种典型机械齿轮装置的示意图^[1],分别为外啮合圆柱齿轮、内啮合圆柱齿轮、行星齿轮系及齿条齿轮。其中,内、外啮合圆柱齿轮实现了不同转速旋转运动的匹配,齿条齿轮实现了旋转运动与直线运动的转换,而行星齿轮系可以实现多个旋转运动的耦合。

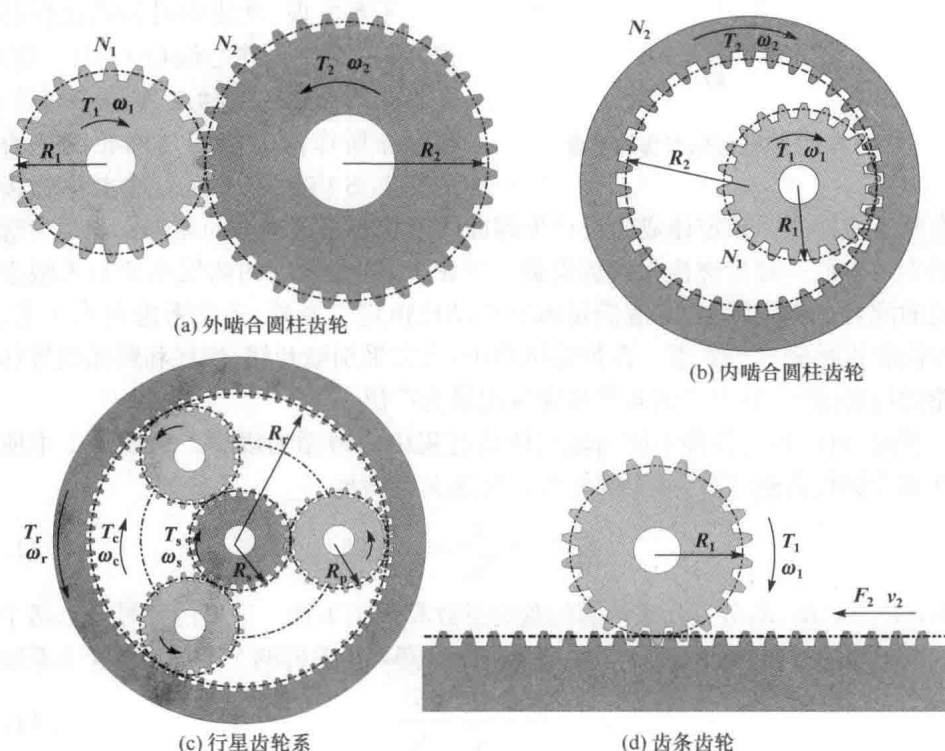


图 1.1 几种典型的机械齿轮装置

齿轮在进行传动时,主动轮齿廓依次推动从动轮齿廓,通过齿面的机械应变来传递力或转矩,这一过程称为齿轮的啮合^[2]。为确保在相互啮合的轮盘间实现精准、平稳、高效的机械传动,齿轮的瞬时传动比应保持不变。否则,不断变化的瞬时传动比会在主、从动轮上产生额外的加速度和惯性力。这种惯性力不仅会缩减齿轮的工作寿命,还会引发机体的振动和噪声。

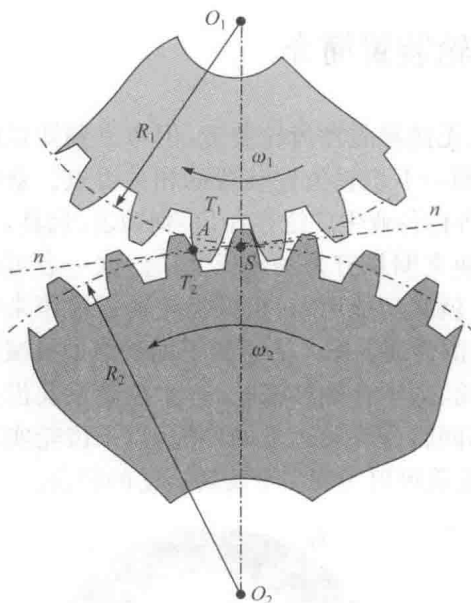


图 1.2 机械齿轮齿廓的啮合

如图 1.2 所示,一对啮合的齿轮齿廓 T_1 、 T_2 相互接触于点 A ,且它们的圆心分别位于点 O_1 、 O_2 。过点 A 作两齿廓的公法线 $n-n$,与连心线 O_1O_2 交于点 S ,该点即为两齿轮的瞬心。以点 O_1 、 O_2 为圆心过瞬心 S 所作的两个相切的圆,称为节圆,其半径记为 R_1 、 R_2 。由此,齿轮的瞬时传动比可定义为

$$G_r = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\overline{O_2S}}{\overline{O_1S}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1.1)$$

其中, ω_1 、 ω_2 为两轮的转速。

不难发现,欲使瞬时传动比保持不变,瞬心 S 应为连心线 O_1O_2 上一定点。即不论两齿廓的接触点 A 位于何处,过接触点所作的公法线与两轮的连心线的交点 S 应恒定不变。这也称为齿廓

啮合基本定律^[2]。该定律成为设计齿廓曲线形状时必须遵循的原则。满足齿廓啮合基本定律的一对齿廓称为共轭齿廓。理论上,共轭齿廓的曲线形状有无限多种可能的配合。但实际上,除应满足瞬时传动比恒定不变外,还应考虑制作工艺、装配方法和机械强度等要素。在齿轮机构中,通常采用渐开线、摆线和圆弧线等作为齿轮的齿廓曲线,其中以渐开线齿廓应用最为广泛^[3]。

至此,可以确定各种不同齿轮在传动过程中应遵循的规律。对图 1.1 中所示的外啮合圆柱齿轮而言,两个圆柱盘的转速关系满足

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1.2)$$

其中, N_1 、 N_2 、 R_1 、 R_2 分别代表两圆柱盘的齿数和节圆半径。这里的负号表示两个圆柱盘以相反的方向转动。图 1.1 中所示内啮合圆环齿轮的两个圆环的转速关系满足

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1.3)$$

这意味着,两个圆环以相同的方向转动。图 1.1 所示齿条式齿轮中的两个运动部

件分别为做旋转运动的圆柱盘和做直线运动的齿条,它们满足如下运动关系:

$$\omega_1 R_1 = v_2 \quad (1.4)$$

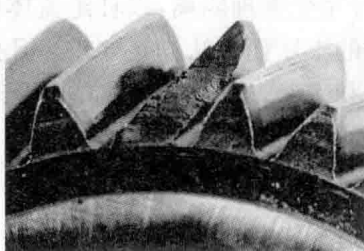
其中, R_1 和 ω_1 分别代表圆柱盘的节圆半径和转速, v_2 代表齿条的直线运动速度。相对前面三种齿轮而言,图 1.1 中所示行星齿轮系的结构更为复杂^[4]。它由四个主要部件构成:环形轮、太阳轮、行星轮和行星架(图中未画出)。图示的行星齿轮拥有三个行星轮,而根据实际需要,可以装配四个或者更多的行星轮。全部行星轮由行星架组合成一个整体。因此,行星齿轮可以提供三个旋转机械端口。分别以 ω_r 、 ω_c 和 ω_s 来表示环形轮、行星架和太阳轮的转速,则它们应该满足以下关系:

$$\omega_s + k\omega_r - (k+1)\omega_c = 0 \quad (1.5)$$

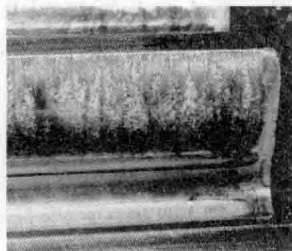
$$k = \frac{R_r}{R_s} \quad (1.6)$$

其中, R_r 和 R_s 分别代表环形轮和太阳轮的节圆半径。

如前所述,机械齿轮依靠齿廓间的啮合实现接触式传动。在负载情况下,齿廓间相互挤压、摩擦所产生的不可逆损伤在累积到一定程度时必将导致齿轮丧失其原先设计的基本功能,即为齿轮失效。如图 1.3 所示,齿轮的常见失效形式包括轮齿折断、齿面磨损、齿面点蚀、齿面塑性形变及齿面胶合。导致轮齿折断的主要原因有两种:①过载折断,因短时过载或冲击载荷而产生的折断;②疲劳折断,齿轮在运行过程中,齿根处产生的弯曲应力最大,在反复作用下,弯曲变应力一旦超过轮齿疲劳极限便会引起折断。齿面磨损主要是由于灰砂、屑粒等进入齿面间而引起的磨粒性磨损;其次是因齿面互相摩擦而产生的跑合性磨损。齿面点蚀是由齿面接触应力的脉动循环变化引起的。接触应力经多次反复后,轮齿表层下方会产生疲劳裂纹,随着裂纹逐渐扩大最终会致使齿面金属脱落而形成麻点状凹坑。齿面胶合主要是因为高速重载工况下,啮合区温度升高引发润滑失效,致使两齿面金属直接接触。又由于两齿面相对滑动速度较高,从而沿着相对滑动方向,较软的齿面被撕下而形成沟纹。低速重载或缺润滑油时,由于压力过大,润滑油膜被挤破也引起齿面胶合。齿面塑性形变是在过大的机械应力作用下,轮齿材料处于屈服状态而产生的齿面或齿体塑性流动所形成的^[5]。



(a) 轮齿折断



(b) 齿面磨损



(c) 齿面点蚀

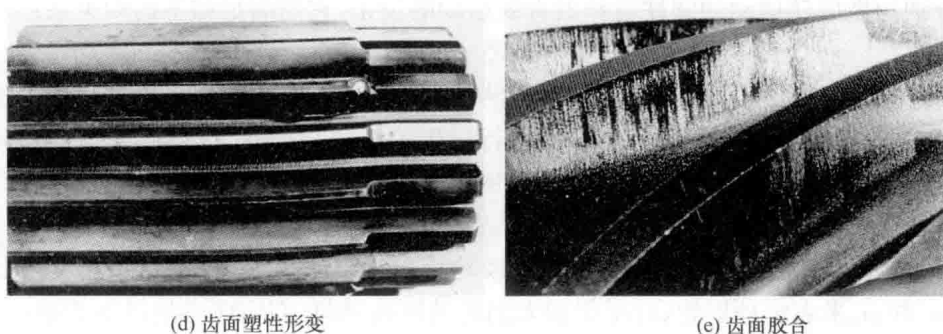


图 1.3 机械齿轮常见的失效形式

机械齿轮依赖齿廓间的接触应力进行传动,这也成为制约齿轮装置实际性能的主要因素。衡量一个齿轮性能优劣的一个非常重要的指标便是转矩密度(或力密度),它指的是齿轮装置单位体积所能够传递的转矩或力的大小,即齿轮所能够传递的最大转矩或力与齿轮体积的比值。在某些对空间要求很高的应用场合,如汽车、精密机床、航空航天等,转矩密度的大小显得尤为重要。为了提高机械齿轮的转矩(力)密度,工程技术人员付出了大量的努力,主要的改进方向包括:采用高强度的金属材料、改善金属加工工艺、优化齿廓形状等。现在市场上可以提供的机械齿轮,其转矩密度最高能达到 $150 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ 。

在生产实践中,人们发现机械齿轮依然存在诸多弊端,且均是由其接触式传动的工作机理造成的。首先,接触式机械应力会引发前述各种失效形式。为延长齿轮的使用寿命,人们需要对其进行定期维护,并采取严苛的润滑措施,有时甚至需要将整个传动机构完全浸泡在润滑油中。这些都不可避免地带来很高的制作及维护成本。其次,齿轮对工作环境也有较高的要求,过多的尘埃、过高的温度、过大的温差等都会对齿轮体的刚度及润滑剂的效用产生不利影响。最后,尽管人们在设计齿轮时遵循齿廓啮合基本定律,但依然无法完全消除机体的振动与噪声。而在高级轿车、高档家电等应用场合,过大的振动与噪声会造成很坏的用户体验。此外,在涉及特种流体流量控制的场合,如对有毒、有害或者对卫生要求非常高的气体、流体进行输送,往往需要在输入端和输出端进行完全物理隔离,以杜绝流体泄漏或遭受污染。然而,机械齿轮由于其接触式传动的本质而无法满足要求。凡此种种,人们一直在探索实现无接触变速传动的方式和方法。由此而产生的基于磁体间无接触作用的齿轮机构即为接下来要讨论的磁性齿轮装置。

1.2 早期的磁性齿轮装置

基本物理学常识告诉我们,两块极性相同的磁体在靠近时会相互排斥,而两块

极性相反的磁体在靠近时会相互吸引。这种力是依赖磁场的作用,在相互无接触的情况下产生的。基于此,人们很容易将磁体、磁力与变速传动联系起来。事实上,磁性齿轮的基本概念可以追溯到大约 100 年前。在 1916 年发布的一份美国专利^[6]中展示了这样一种装置:它由两个转子构成,在每个转子的边缘安装着凸极,凸极上缠绕着电磁线圈。给这些电磁线圈通电便可以形成多个电磁磁极。通过位于两个转子上的电磁磁极间的相互作用,一个转子旋转时便可带动另外一个转子旋转起来。只要两个转子的直径大小不同,其上装配的电磁磁极的个数不同,两个转子的旋转速度也会不同。也就是说,该装置如机械齿轮一样,可以实现变速传动的功能。由于它依靠磁场的无接触作用进行传动,所以又被特指为磁性齿轮。然而,这种磁性齿轮并未引起人们的广泛关注,原因主要有三点:首先,在给转动的电磁线圈供电时需要采用电刷和滑环,附加装置的结构相当复杂,制作成本很高;其次,采用电磁线圈会产生大量的电阻发热损耗,因而传动效率很低;最后,该装置的转矩密度非常低,很难满足实际应用的需要。

20 世纪 80 年代,永磁材料得到了长足的发展。1983 年,日本住友金属株式会社和美国通用汽车公司分别研制成功第三代稀土钕铁硼(NdFeB)永磁体^[7]。它可以提供的最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 高达 366 kJ/m ,因而又被称为“磁体王”。在此背景下,磁性齿轮的概念再一次引发人们关注的热潮^[8~14]。由于无需外部充磁电流的持续激励,采用永磁体进行励磁的磁性齿轮可以摆脱电磁线圈结构复杂、效率低下的弊端,其系统转矩密度也得到了一定程度的提升。图 1.4 给出了几种早期的磁性齿轮的示意图。不难发现,它们只是图 1.1 所示的机械齿轮的简单模拟。永磁体装配在各个运动部件的外沿上,因而称为表贴式磁极。其上的箭头标记了磁极的充磁方向。为了增强永磁体在空间中建立的磁场强度,运动部件上还需要装配导磁铁心来减小磁路的磁阻。在设计这类磁性齿轮时,需要遵循以下两条原则。

(1) 任何一个运动部件上表贴式永磁磁极的个数必须为偶数,并且相邻两个磁极的充磁方向相反。

(2) 相互靠近的两个运动部件上的永磁磁极的极矩应该相等。

第一条原则是为了确保磁场的对偶分布。一般来说,磁力线应该穿过相邻的两个磁极,从而形成一个闭合的回环。也正因为如此,在本书接下来的叙述中将采用“磁极对数”这一概念来表示磁极的数目。对于图 1.4 所示的表贴式磁极而言,每一对磁极均由极性相反的两个相邻磁极组成。但对于以其他形式排布的磁极,如内嵌式磁极,磁极对数与磁极个数的关系或许存在差别。随后,笔者会在相应的地方进一步解释这一问题。第二条原则是为了确保相邻两个运动部件的磁极所激发的磁场之间能实现有效的耦合,从而实现稳定的能量传递。这一点可以对照机械齿轮的齿廓啮合基本定律来理解。

图 1.4 所示各种磁性齿轮的速度变速比由运动部件上安置的磁极对数来决

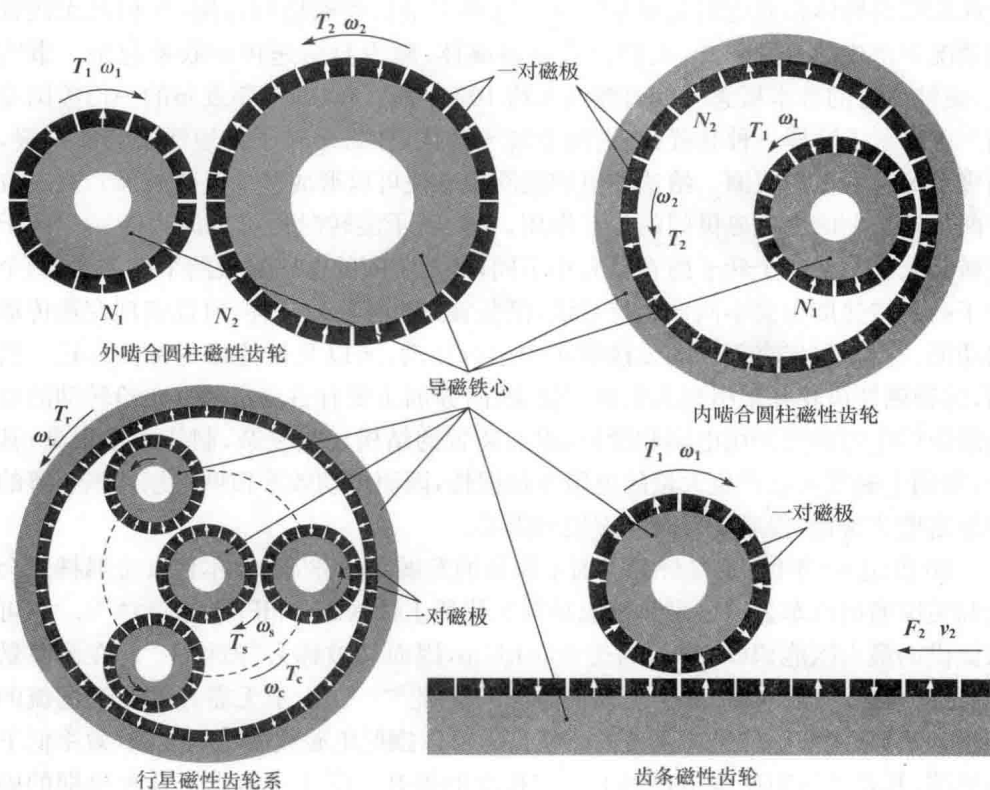


图 1.4 早期的磁性齿轮装置

定。以外啮合圆柱磁性齿轮为例,它的两个转子的转速关系应满足

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{N_2}{N_1} \quad (1.7)$$

其中, N_1 和 N_2 分别表示安装在左侧转子和右侧转子上的永磁磁极对数。

尽管稀土永磁体能够提供较强的磁感应强度,但和机械齿轮比起来,图 1.4 所示的早期的磁性齿轮的转矩密度依然是相当低的。

例如,文献[15]中报道了一种外啮合圆柱磁性齿轮,它的两个转子间的间隔只有 1 mm。然而,经过实验测定,其转矩密度仅为 $17.6 \text{ kN} \cdot \text{m}/\text{m}^3$,仍然难以满足实际需要;文献[16]报道了一种采用超导永磁体的磁性齿轮。尽管其转矩密度得以提高,但超导材料需要额外的冷却设备,这无疑增加了系统的成本。正是由于转矩密度难以达到要求,所以这些早期的磁性齿轮并未得到广泛推广。即便如此,在某些对工作环境洁净程度要求非常严苛的场合,如液晶面板、等离子显示屏的生产和传送,无接触的磁性轮传动还是得到了很好的应用^[17~19]。如图 1.5 所示,一对交叉排布的磁力轮的表面均装有呈 45° 螺旋分布的永磁磁极。在相邻磁极的磁场

作用下,可以实现旋转运动空间 90° 转向传动。由于采用无接触传动,这种物料传送系统可以杜绝由粉屑脱落、油料渗漏等原因造成的对所传送物料的污染。此外,它还具有噪声低、振动小、寿命长等优点。

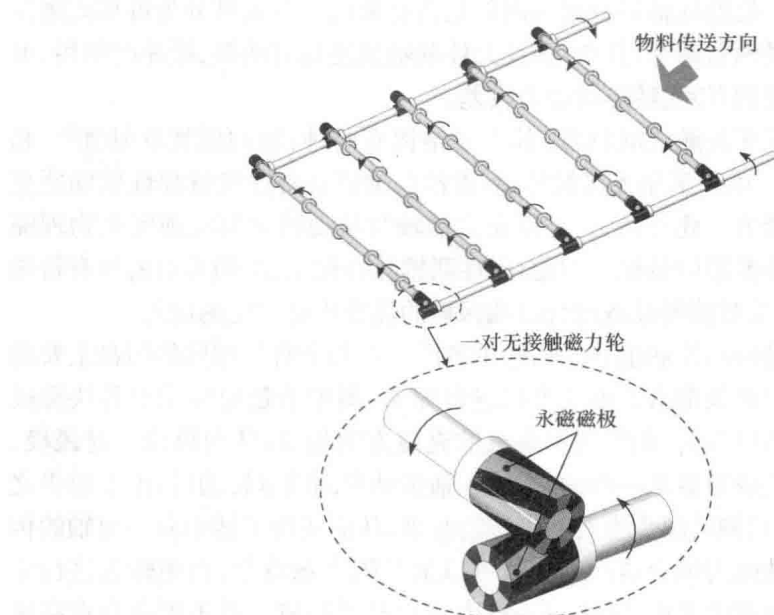


图 1.5 采用磁力轮的无接触物料传送系统

1.3 磁性联轴器

1.2 节已经提到,早期形态的磁性齿轮之所以难以得到广泛应用,最主要原因是它们的转矩密度太低,无法满足实际需求。仔细观察图 1.4 便不难发现,在这些早期的磁性齿轮中,永磁磁极的利用率非常低下:任何一个运动的瞬间,只有相互靠近的极小部分磁体参与了转矩或力的传递,而其他大部分磁体对此并没有任何贡献。因此,即便采用高性能的稀土永磁材料来制作磁极,这些齿轮也无法提供令人满意的转矩传递能力。提高磁极利用效率成为改善磁性齿轮转矩密度最直接的途径,而这必须从改变装置的拓扑结构入手。事实上,有一种依靠磁力传动的装置——磁性联轴器^[20~22]已经在工业生产中广泛应用,而它采用的就是所谓的“同轴”拓扑结构,并以此来确保所有磁极能够同时参与转矩的传递。

联轴器广泛应用于各种通用机械上,用来连接两根轴使其一起旋转,以传递转矩和运动。传统联轴器均为机械接触式联轴器^[23]。根据两根被连接轴的相对位置关系,机械接触式联轴器又可分为刚性联轴器和挠性联轴器两大类。在刚性联