

磁力机械研究综述*

赵 韩 王 勇 田 杰

(合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009)

摘要:回顾了磁学理论和应用的历史发展;较系统地介绍了现代工程磁学应用的一个重要分支——磁力机械的种类、发展过程、应用现状和一些典型的机构;列出了适用于磁力机械设计各种设计方法,分析了这些方法的优缺点和适用范围;展望了磁力机械未来的研究和应用发展前景。

关键词:磁力机械 磁场 设计方法 理论体系

中图分类号:TH138

0 前言

磁力具有很多优点,如易于控制、节约能源、减少污染、结构简单、加工容易等,越来越受到人们的重视,在机械中的应用也越来越广,其最明显的表现就是国内外发明的磁力机械越来越多,如磁力吸盘、磁力弹簧、磁力减振器、磁力齿轮、磁力联轴器、磁悬浮轴承、磁力变扭器、电磁离合器和制动器、飞轮电池和汽车尾气净化装置等。此外,我国稀土资源丰富,在应用磁力方面有着得天独厚的优势。近 20 年来,我国磁性材料工业取得了惊人的增长。各种磁性材料在世界市场已具有重要的地位,并将继续扩大影响。但我国对磁力机械的研究相对落后于应用,希望此文能引起更多的专家学者关注和加入这一领域的研究。

1 磁学理论与应用的发展历史

1.1 磁学理论的历史发展

人类认识磁现象和应用磁性材料的历史已很悠久。我国春秋时期的《管子·地数》(公元前六百多年)所述“上有慈石者,其下有铜金”,是最早关于磁石的记载。公元前约 585 年,古希腊哲学家 Thales 也记载了摩擦生电和磁石吸铁的磁现象;而东汉王充的《论衡·是应篇》(公元 82 年左右)中“司南之勺,投之于地,其柢指南”这一关于司南(指南针的前身,如图 1)的描述,表明我国早在汉代就已对磁现象加以利用,所发明的指南针是我国人民对人类进步所作的巨大贡献之一。

英国人 Maricourt 在 1269 年前后描述了磁石的 N 极和 S 极,验证了同性相吸和异性相斥的现象。

16 世纪后,人们开始从试验和理论上对电和磁作系统研究。1785 年,法国人库仑通过扭秤试验研究电荷间的作用力而发现的库仑定律开辟了近代电磁理论研究的新纪元。1820 年初丹麦科学家奥斯特(H. C. Oersted)从试验中发现了电流磁效应,成为电磁学发展史的又一里程碑。此后,毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律给出了电流磁效应的定量描述,安培从奥斯特的试验中总结了右手螺旋法则和安培定律,深化了人们对电流磁效应的认识。与此同时,电工学中最重要的基本定律欧姆定律和基尔霍夫定律相继发表。英国的法拉第(Michael Faraday)和美国的亨利(Joseph Henry)分别于 1831 年和 1830 年各自独立地发现了电磁感应现象,法拉第根据电磁感应原理发明了世界上第一台直流发电机,并提出场的观念和力线概念。德国人 Neumann 和 Weber 于 1845 年和 1846 年分别给出了电磁感应定律的定量表述,俄国人楞次(H.F.E.Lenz)给出了确定感应电流方向的楞次定律。电磁感应成为电磁学史上的重大发现^[1]。

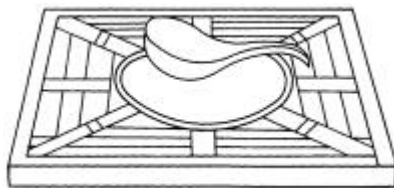


图 1 我国古代发明的司南

英国物理学家麦克斯韦(J.C.Maxwell)通过假说将法拉第的力线观念用数学公式表达,形成了自己的电磁理论,于 1865 年发表,并被后来的赫兹试验所验证。该理论经后人整理而成的 Maxwell 电磁场方程组,标志着经典电磁学理论体系的建立。洛伦兹提出电子论将麦克斯韦电磁理论应用到微观领域、爱因斯坦提出狭义相对论证明麦克斯韦方程组满足洛伦兹变换,完善了经典电磁学理论体系。

从 Maxwell 电磁场理论建立至今,磁学已成为

* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。20030926 收到初稿,20031020 收到修改稿

物理、电气、材料、化学、冶金和其他工程学科领域内的学者和工程师共同研究的一个开放领域^[2]。磁性物理学对材料微观理化结构和相互作用机理的阐述,改变了磁性材料的设计和加工方式;工程师的实际经验结合磁场设计理论和分析方法的不断完善,使高性能的磁性装置的设计制造成为可能;新技术、新材料、新工艺在磁领域的应用,尤其是近代计算机技术、计算方法和试验研究技术的应用,促进了电磁理论,特别是计算电磁学理论研究的深入和磁应用领域的空前发展。

1.2 磁学的现代应用

20世纪中叶以来,伴随着计算机存储器使用的铁氧体磁心和磁记录材料的出现和需求量增加,以及以磁放大器为代表的非线性磁性应用的相继问世,磁性应用技术得到迅猛发展^[3]。磁的应用从传统的强电应用领域扩展到计算机与信息技术、测试与自动控制、传动与动力系统等很多领域。各类磁性功率器件不断增多;利用磁性材料的各种磁效应(磁致伸缩效应、热磁效应、磁光效应和电磁效应等),人们开发了多种磁性传感器和其他测量器件;磁性材料作为信息产品的基础材料应用于各类存储设备;磁性设备和装置作为动力和控制元件(各类电动机、变压器、电感、传感器、继电器、电磁铁、开关电源和磁无源器件等)广泛应用于工业动力系统和自动控制系统中。如今,磁的应用已渗透到人们生产和生活的方方面面,严格区分磁应用的类型、尽数磁器件的所有应用实例已是件困难的事。

在工程磁学应用研究中,与磁的一些前沿应用领域同样值得关注的是磁学与相关学科的学科交叉的理论与应用发展。目前广泛应用的磁力机械,就是引人关注的一个磁应用领域。

1.3 磁力机械的应用与研究现状

利用磁能产生的力或力矩,驱动或控制置于磁场中的执行构件,使其按确定的运动或动力要求动作的机器或机构,称为磁力机械。磁力作为机械设备传动部件或执行器的动力源时,设备一般具有易于控制、节能环保、结构简单等优点,因此近年来这方面的开发和应用越来越受重视。目前采用永磁、电磁或永磁与电磁混合结构的各类磁力机械已有很多,在机械、化工、汽车、土木、电力、国防和核工业等很多工程领域的得到广泛应用。

从一些典型磁力机械的设计生产过程看,目前我国磁力应用的数量虽不断增多,但总体说来由于研究基础仍较薄弱、涉及学科交叉等客观原因而使磁力机械并没有形成较系统成熟的设计理论和方法,而长期以来国外在相关产品上可供借鉴的资料

也非常少见,这样的现状给磁力机械的深入研究和提高应用水平带来了一定难度。建立来源于机械学和电磁学等学科理论而相对独立的磁力机械系统理论体系,对磁力机械的理论和应用研究是必要的。在这方面作者做了一些基础工作,所提出的建立“磁力机械学”这一全新的交叉学科和体系结构^[4]的思想得到国内同行认可,并在国家自然科学基金和一些企业合作项目的支持下,通过总结已有理论和应用研究基础、借鉴本领域内新的研究成果、引入新的理论分析方法,对磁力机械设计理论和方法进行了较深入和系统的研究和探讨,初步形成了“磁力机械学”的理论体系。国内有关研究单位在一些新型磁力机械的研究和开发中也做了卓有成效的工作,积累了许多可行的设计方法。相信随着电磁学和机械学等相关领域内科技人员的共同努力,磁力机械学的设计方法将会不断得以完善,磁力机械设计的效率和质量将会得到提高。

2 磁力机械种类与典型磁力机械简介

磁力机械按所用磁场场源分为永磁型、电磁型和永磁电磁混合型。从磁场设计计算角度还可做不同的分类,如按磁场空间分布特性有轴对称场、平面对称场等,按时间特性有恒定场和时变场,按磁场媒质有线性媒质场和非线性媒质场等。严格地说,除永磁磁场和直流电激磁系统磁场可在一定的条件下简化为线性平面恒定场外,磁力机械中的磁场大多数场合是非线性三维恒定场或时变场。

磁力机械种类众多,比较常见的有磁力吸盘、磁力弹簧、磁力减振器、磁力齿轮、磁力凸轮、磁力联轴器、磁悬浮轴承、磁力变矩器、电磁离合器和制动器、磁力间隙运动机构、磁力钻孔机,磁力搅拌器、磁力泵、磁力减速器、磁力带传动和飞轮电池等。以下简介几种典型的磁力机械。

(1) 磁力联轴器

磁力联轴器由内磁转子、外磁转子和隔离套组成(图2)。在内、外磁转子上布置偶数片永磁体,靠二者间相互耦合构成磁力系统。在处于静止状态时,由于内外磁转子磁体异性相吸作用,使二转子处于正对位置,此时内外磁体间无切向分力,也无力矩产生。当电动机带动主动件转动时,外磁转子相对于内磁转子产生超前角,内外磁体上的磁体间作用力发生倾斜,偏离径向,内外磁体永磁磁块间的吸力与斥力分别产生切向分力并对轴心形成传动力矩,由此驱动内磁转子及从动件与主动件同步转动。

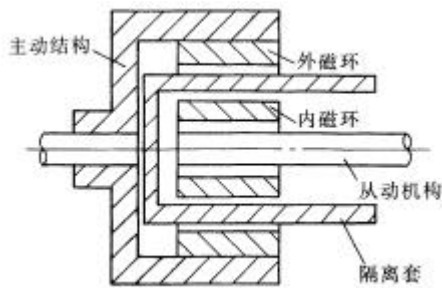


图2 同轴磁力联轴器结构示意图

(2) 磁力齿轮

磁力齿轮^[5]一般由稀土永磁材料制造，依靠磁场力作用传递运动和转矩，也有外啮合、内啮合和齿轮齿条等类型。外啮合磁力齿轮传动是由一对圆柱磁体或圆环柱体构成，其中每个柱体均被径向多极充磁(图3)。内啮合磁力齿轮传动的大齿轮是圆环体，齿轮齿条磁力传动中的齿条则是一磁极沿长度方向均布的带状磁体。磁力齿轮与常规齿轮传动相比有许多优点：首先是加工容易。它可以仅是简单的圆柱体，不需要加工轮齿，从而也就没有齿轮的一些固有缺陷，在制作小型及微型齿轮时，磁力齿轮更显其优越性。其次，磁力齿轮是非接触传动，故具有不需润滑、传动平稳、清洁、无摩擦损耗等优点。此外它的启动力矩较低，在传动系统中还具有过载保护作用，能适应不对称性，使用维护也很方便。这些优点使磁力齿轮具有良好的应用前景。目前磁力齿轮在应用中需解决的主要问题是实现大扭矩和传动系统整体结构优化等问题。

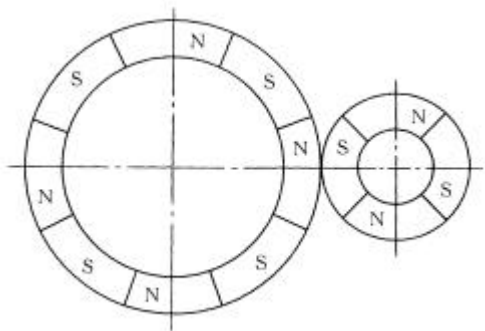


图3 外啮合稀土永磁齿轮原理图

(3) 磁力轴承

磁力轴承是利用磁场力作用将所支承的转轴悬浮，使转子与定子之间没有机械接触的一种新型轴承，有永磁轴承、电磁轴承、混合磁轴承等不同类型。永磁轴承由转动磁环部分(简称动磁环)和静止磁环部分(简称静磁环)组成，利用磁性材料同性相斥、异性相吸的原理，使动磁环悬浮于静磁环之中，保证旋转时动、静磁环不相接触。它与电磁轴承一样可制作成用于承受径向力、轴向力或同时承受径

向力和轴向力的结构形式，缺点是力学特性不稳定^[6]。电磁轴承(图4所示)的结构类似于电机的定转子结构，其基本原理是靠受控电磁铁(定子)对转子的吸力作用维持转子的稳定悬浮，其中电磁铁磁极结构经过特殊设计，电磁铁线圈的控制电流由检测转子偏离参考点位移的传感器信号经变换、放大和转换而提供。只要该闭环系统参数选择得当，电磁轴承就能获得要求的承载能力和最优刚度阻尼特性^[7]，保证转子的稳定悬浮。电磁轴承无接触支承的特点和对一些极端工况的适应性使其具有传统轴承和支承技术无法比拟的优越性，受到国内外学者的普遍关注。近年来，我国一些研究单位也对电磁轴承开展了较深入的研究并取得了可喜的理论和应用成果。

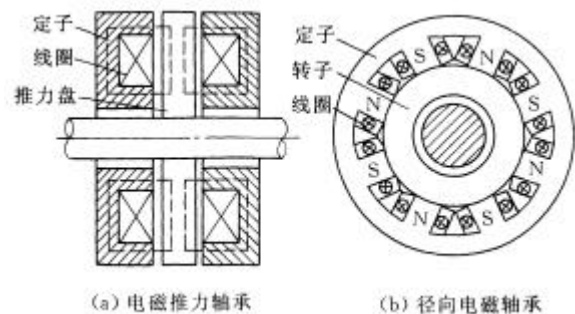


图4 磁力轴承示意图

(4) 磁力弹簧

采用永磁材料制作的磁力弹簧原理与永磁磁力轴承类似，由直径大小相等或不等的两磁环同轴排列，固定一环，另一环可承受外力沿磁环轴向移动并由磁场产生弹性恢复力(如图5所示)。磁力弹簧结构简单，工作中无振动和噪声^[8]，采用稀土永磁材料制作的磁力弹簧具有良好的力学特性^[9]。

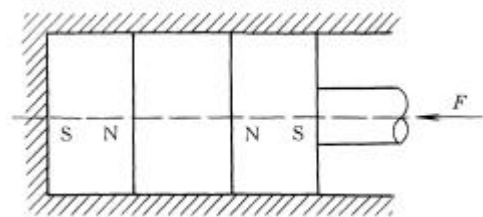


图5 磁力弹簧原理图

3 磁力机械设计与分析中的常用方法

3.1 磁力机械设计的基本问题

磁力机械设计的任务是确定合理的机械电磁结构形式和参数，实现磁能与机械能转化，以完成一定的运动和动力要求，内容包括相互联系的机械结构部分设计和磁场部分设计，对电磁场磁力机械还包括控制电路部分设计。磁场部分设计计算是磁力

机械设计的核心工作,包含两方面的问题:按执行器的静力学和动力学要求的磁场分布确定场源、媒质分布、媒质结构形式和尺寸等的反向问题和按已确定的边界条件、媒质结构尺寸求场分布的正向问题。正向问题,即磁场分析问题,到目前为止在计算电磁学中已给出了不少较可行的解决方案;反向问题,即磁场设计问题,目前尚没有系统和成熟的解决方法,但却是磁力机械设计特别是开发性设计中首先遇到的问题。在此,化“场”为“路”将磁场设计问题转化为磁路设计问题,并借助于求解正向问题的方法还“路”为“场”作校验和修正,是目前普遍采用的方法。

磁力机械的磁场问题简化为磁路问题后,设计的主要任务在于建立优化的(按外形尺寸、重量、稳定性、可靠性和价格等)、在工作间隙内具有设计要求的场强或驱动力(力矩)的结构,设计内容相应地简化为:已知磁路组成要素、求解工作间隙内的磁通分布或电磁力(力矩)的正问题和给定场强或电磁力(力矩)、求解磁路要素的反问题。

3.2 磁力机械设计中电磁计算与分析方法

在上述磁力机械磁场设计的两类问题中,一般所用的电磁计算和分析方法有如下几种。

3.2.1 磁路法

磁路法在很多磁性装置的设计中已较成熟,并已成为磁应用领域工程技术人员普遍掌握和使用的应用技术。Maxwell 方程组从原理上保证了磁路设计与计算的可能性,但严格地解析、求解磁路问题却遇到许多数学上的困难:磁路的固有特点使其数学模型一般具有强烈非线性,大多数问题无法得到解析解;磁路参数与铁磁体的形状、尺寸和性能往往有着不明确或复杂的映射关系。为回避这种复杂性又能解决实际问题,在以往的磁力机械设计中普遍采用的办法是:磁场设计用化磁场为磁路的集中参数方法,把磁路和电路引以数学形式上的相似关系,用求解电路的方法对磁路做定量计算,并依赖于经验参数对计算结果进行修正。为保证计算结果的可靠性,设计人员在实践中总结了诸如退磁因子法、比例法、连续积分法、解析法、相似法、模型法等实用方法^[10],在电流和铁磁材料的分布具有较简单的几何形状、磁路各处磁导率是一个标量时,磁路法较成功地解决了一些磁力机械和电磁装置的设计问题。然而,磁路法作为简化算法无法对磁路的漏磁和磁阻作精确的计算、对磁性材料非线性的特点无法准确体现、在复杂磁路设计中人为简化的因素过多、不能给出准确的场分布,因而在磁力机械设计中磁路法必须和其他方法磁场计算方法结合

使用。

3.2.2 图解法

图解法也是一种近似的分析计算方法。在不少实际问题中,由于场域几何特性的复杂性,有时难以应用解析法做精确计算,这时所研究的场是二维场或轴对称场时,可应用图解法。对电动机或一些电器的气隙磁导的确定常用图解法,在电磁场图的分析研究中也常使用图解法^[11]。

3.2.3 试验法

电磁场的试验分析研究在解决实际问题中常常起着很重要的作用。试验法包括实测法和电模拟法,后者包括数学模拟和物理模拟。实测法采用电磁测试设备和方法实测磁力设备的磁场性能参数,特别是动态过程参数,直观真实地反映设备的设计性能指标,并据此验证和修改设计计算方法、数学模型和实际结构。在不同场合中使用数字存储示波器、微机控制动态测力装置、瞬变过程的暂态记录仪以及各类磁场参数测试仪器作参数测试,是一些磁力装置和电磁控制元件制造中必不可少的环节。近年来随着仪器性能和测试技术的提高,实测法的准确度和使用范围有了更大发展。电模拟是根据被研究的真实装置(原型)的性质或现象与模型之间场方程上的相似性,表征原型和模型的物理量间有确定的对应关系(相似判据^[11]),从而通过测量模型的物理量以定量研究原型的一种试验方法。仅建立在微分方程和类比概念基础上、模型与原型对应物理量的物理本质相异的电模拟称为数学模拟,方法简单但精度有限;保持模型和原型中对应的物理量具有相同的物理本质、按实际原型尺寸或按比例制成模型进行实测以确定设计参数的电模拟称为物理模拟,模拟过程需花费较多时间和资金,但较数学模拟更准确和符合原型。

除上述试验方法外,还有一些其他方法,如在解决多网孔复杂磁路计算中所采用的网络拓扑分析法^[12]等。

3.2.4 解析法和近似解析法

解析法和近似解析法中常用分离变量法、有效等位面法、均匀磁化法等方法^[11,13]。其中分离变量法用于求解由拉普拉斯方程或泊松方程所描述的边值问题,是将待求的位函数分解为几个一维函数的乘积,从而变偏微分方程为常微分方程的一种解法。该方法中只要选取的坐标系能使场域的边界面和相应的坐标面吻合(从而边值能得到明确描述),则一般可获得待求问题的解析解,因此是边值问题解析法的基本方法之一。有效等位面法是将铁磁表面作某些修正作为等位面,再以它为基础算出极间场的

分布。均匀磁化法是先假设铁磁材料在外场作用下被均匀磁化,然后在计算极间场分布的方法。

3.2.5 数值计算法

如前所述,电磁场分析和计算问题的本质是给定边界条件、载荷条件和各种约束关系下的偏微分方程的求解问题。以现代数学和力学理论为基础、以计算机为求解工具的数值解方法,解决了绝大多数问题无法得出解析解的矛盾,满足了工程应用要求。用于电磁场设计计算的数值方法,一般以 Maxwell 方程和加权余数技术(Galerkin 法,最小二乘法等)^[14]为基础,主要有以下几种。

(1) 有限差分法(Finite difference method, FDM)

将磁场连续场域离散化,利用差分原理用各离散点的差商近似代替该点的偏导数,将偏微分方程组变成代数形式的差分方程组,解之得边值问题的数值解。该方法是最早应用于电磁场的数值方法之一,曾广泛用于各类磁场的各类边值问题求解,缺点是研究的场域有很不规则的几何特性时其适应性远不如有限元法。1966年由 K.S. Yee 提出的时域有限差分法(Finite difference time-domain, FDTD)^[13]直接用有限差分式代替 Maxwell 时域旋度方程的微分式,得到 Maxwell 方程的四维数值解(含时间变量),适用于瞬态磁场的分析计算。

(2) 有限元法(Finite element method, FEM)

以变分原理和剖分插值为基础,将待求的边值问题转化为相应的变分问题(泛函极值问题),再利用不同的单元体将场域剖分插值,将变分问题离散化为普通多元函数的极值问题,解这一组多元代数方程组得边值问题的数值解。有限元法由于能适应复杂形态的场域边界、离散点比较随意、较好的计算精度、各环节易于标准化和形成通用程序,因此在电磁场分析计算中成为应用最为广泛的数值方法。从 Silvester 和 Chari 在 20 世纪 70 年代首次使用它求解电磁场问题以来,有限元法已成为研究磁场问题的有效手段^[15]。

(3) 边界元法和边界点法(Boundary element method)

有限差分和有限元法基于偏微分方程,而边界元法则基于积分方程,是将高维问题降低一维,在待求场域的边界上处理。拉普拉斯方程不需剖分整个求解区域而只需划分边界单元;泊松方程和非齐次扩散方程,剖分求解矢量只是为了处理右端矢量而不增加未知量,因此计算的工作量可减小。边界元法的缺点是求解中系数阵不是稀疏阵,计算多媒质场时手续较复杂等,有时与有限元法结合使用^[16]。

以上简介了在磁力机械磁场设计计算中几种常

用方法。系统和完善的磁力机械磁场设计理论目前尚未形成,基于磁路的传统设计方法针对一些具体问题在精度许可范围内仍然有效,而引入基于场量的数值计算方法可有效提高计算精度和设计效率;对一些磁力机械设计中必须解决的耦合问题、涡流损耗问题等,数值计算方法则是必需的^[17]。

3.3 磁力机械结构和控制参数设计方法

磁力机械结构部分设计需同时满足机械参数和磁场参数两方面要求,故较常规结构设计复杂。在选材方面,目前永磁材料和软磁材料一般只有磁性能参数,而可用的磁力机械材料也往往只有机械性能参数,因此建立兼有机械和电磁性能参数的材料数据库是必要的。在结构形式和参数设计中,各种辅助建模和分析工具为提高设计精度和效率提供了可能,在此基础上建立较通用的磁力机械设计模型与分析工具间的数据交互和处理平台,是实现磁力机械系统结构整体优化的有效手段。

在一些磁力机械中,控制系统设计是设计过程的重要环节。根据使用要求不同,控制系统设计可采用不同的控制策略和算法。以电磁轴承的控制系统为例,控制方法除应用较成熟的模拟或数字 PID 控制方法外,自适应控制、滑模控制(SMC)、时延控制(TDC)、迭代学习控制、LQG、 H 、 μ -综合、模糊控制、基因算法、神经网络及各类方法的综合运用等现代控制方法的应用,改善了电磁轴承闭环控制系统的控制精度和对元器件噪声、参数变化及外扰的适应性等性能。与常规机电控制系统一样,可靠性、鲁棒性、性价比等指标是电磁场磁力机械系统控制方法的选择依据,基于虚拟仪器的系统仿真等计算机辅助控制系统设计是提高设计效率的有效手段。在控制系统的参数调整过程中,正确测试相关机械和电磁参数也是重要的环节之一。

4 磁力机械的发展趋势

从上述磁力机械研究和应用的现状看,在未来一段时间内,磁力机械将会在以下几方面得到发展。

(1) 磁力机械的应用领域将会不断加大。目前磁力机械的应用情况已显现了这种发展趋势。新型磁力机械将会不断被开发利用,尤其在一些常规机械不能胜任的极端工况下,磁力机械的应用将成为有效的解决方案。

(2) 考虑耦合和非线性的磁力机械系统建模方法,将使设计和分析模型更趋合理。一些磁力机械中考虑位移场、温度场和电磁场等多场耦合效应的数学模型能更真实地反映系统工作过程的动态行

为,运用非线性理论和现代数值模拟技术对模型求解得出的系统结构和控制参数将更趋合理和精确,系统动力学品质相应地会得到提高。

(3) 相关学科理论的发展将使磁力机械系统设计计算的精度和效率不断提高。计算电磁学的发展将带动磁力机械学磁场设计理论和方法的完善,设计中一些长期使用的试凑方法和经验参数将被精确的计算方法和数据取代。一些现代控制方法的不断成熟,将提高磁力机械控制系统综合性能。系统结构的实体建模、结构和控制参数的仿真与优化、多物理场量的数值模拟与分析等相关应用软件已经并将继续提高磁力机械设计效率和水平。

(4) 工程领域内的技术进步,将克服目前一些磁力机械中存在的制造困难和性价比低等问题。磁应用领域的新材料、新工艺、新技术将使复杂结构的磁力机械的加工制造成为可能,性价比得到提高,从而也为磁力机械的开发和应用拓宽空间。

5 结 论

磁力机械虽然非常古老,但随着能源危机和环境的恶化,也随着科学技术的发展,它却越来越焕发出活力。我国发展磁力机械有磁材资源、产品市场等内部条件,有全球化竞争与合作的外部环境,因此将会有较大发展空间和较好的应用前景。我们要抓紧这难得的机遇,把磁力机械的研究推向一个新的高度。

参 考 文 献

- 1 胡友秋,程福臻,刘之景. 电磁学. 北京:高等教育出版社,1994
- 2 Handley Robert C O. 现代磁性材料原理和应用. 周永治等译. 北京:化学工业出版社,2002
- 3 [日]櫻井良文. 现代工程磁学. 北京:机械工业出版社,1987
- 4 赵韩,田杰,杨志轶. 磁力机械学. 北京:高等教育出版社,2003
- 5 田杰. 稀土永磁齿轮的理论实验研究:[博士学位论文]. 合肥:合肥工业大学,1999
- 6 杨志轶. 飞轮电池储能关键技术研究:[博士学位论文]. 合肥:合肥工业大学,2002
- 7 赵雷. 电磁轴承最优刚度与系统结构参数关系的研究. 机械工 程 学 报,2000,36(12):62~64
- 8 钱坤喜,吕利昌,茹伟民,等. 一种新颖的磁力弹簧及其弹性. 机械工 程 学 报,1998,34(3):57~59

- 9 杨红,赵韩. 稀土永磁弹簧的力学特性研究. 农业机 械 学 报,2003(1):111~113
- 10 林其壬,赵佑民. 磁路设计原理. 北京:机械工业出版社,1987
- 11 冯慈璋. 电磁场. 北京:高等教育出版社,1983
- 12 费鸿俊,张冠生. 电磁机构动态分析与设计. 北京:机械工业出版社,1993
- 13 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计. 北京:清华大学出版社,2000
- 14 周克定. 工程电磁场专论. 武汉:华中工学院出版社,1986
- 15 Ratnajeevan S, Hoole H. Flux density and energy perturbations adaptive finite element mesh generation. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1):322~325
- 16 Salon S J, Angelo J D. Applications of the hybrid finite element-boundary element method in electromagnetics. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1):80~85
- 17 程志光,高生,李琳. 电气工程涡流问题的分析与验证. 北京:高等教育出版社,2001

REVIEW OF STUDY ON MAGNET MACHINE AND MECHANISM

Zhao Han Wang Yong Tian Jie
(Hefei University of Technology)

Abstract : Development history of magnetics and its applications is reviewed. One of its main application branches, i.e. the magnet mechanism is introduced, including its catalogue, development, present application situation and typical mechanisms. Design methods that are suitable for magnet mechanism designs are listed, and their advantages, disadvantages and applicable areas are also analyzed. Future research and development of mechanisms are forecasted.

Key words : Magnet mechanism Magnetic field

Design method Theoretical system

作者简介:赵韩,1957年出生,院长,教授,博士生导师。兼任教育部机械基础课程指导委员会委员,国际 IFTOMM 教育委员会委员,中国机械工程学会机械传动分会理事,中国机械工业教育协会机械设计学科副主任委员,全国机械原理教学研究会副理事长,《机械工 程 学 报》编委。主要从事机械传动、磁力机械学、数字化设计与制造、汽车等方面的研究。获得实用新型专利 2 项。出版专著及合著 6 部,发表论文 100 余篇。