高性能精密成形装备的电气伺服直驱系统方案探讨

梁锦涛[1]，赵升吨[1]，赵永强[1]，朱牧之[1]，李泳峄[1]，杨建辉[2]
（1. 西安交通大学 机械工程学院，西安 710049；2. 中国第二重型机械集团公司，四川 德阳 618000）

摘要：采用电气伺服直驱技术构建成形装备的驱动与传动系统，是实现高效高性能精确成形成性一体化重要的一环。对成形装备的电气伺服驱动的应用现状进行了介绍，并根据电气伺服直驱技术的研究进展，探讨了高性能精密成形装备的电气伺服直驱系统方案。

关键词：电气伺服直驱；成形装备；永磁电动机
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2015.02.002
中图分类号：TG385　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-6457(2015)02-0007-07

Discussions on the High Performance and Precise Forming Equipment with Electrical Servo Direct Driving System

LIANG Jin-tao[1], *ZHAO Sheng-dun*[1], *ZHAO Yong-qiang*[1], *ZHU Mu-zhi*[1], *LI Yong-yi*[1], *YANG Jian-hui*[2]
(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China National Erzhong Group Co., Deyang 618000, China)

ABSTRACT: Driving and transmission system of forming equipment based on electrical servo direct driving technique is a significant segment to realize high efficient performance and precise forming process. In this paper, application status of electrical servo direct driving system of forming equipment is introduced firstly. and then according to the research headway of the electrical servo direct driving technique, system scheme of forming equipment driving system is discussed.

KEY WORDS: electrical servo direct driving; forming equipment; permanent magnet motor

随着石油危机和环境恶化对人类生存的威胁加剧，要求塑性成形加工设备等机械装备向节能降耗和减排方向发展，这对装备的驱动和传动系统的技术进步提出了更高的要求。驱动与传动部件和系统需要朝着短传动链方向发展，高性能直接驱动方式得到了较多的研究。随着电-机械转换器及其驱动技术的发展，“直接驱动(direct drive)”[1]越来越受到重视。其本质就是取消从驱动器或原动机到工作负载部件之间的机械传动环节，由驱动器或原动机直接驱动工作机构运动，实现所谓“近零传动(near-zero transmission)”[2—4]，并通过对原动机的运转状态(位置、速度、力矩)的数字化伺服控制，代替传统的机械传动中的变速、变量、变向方式，实现成形装备的高效、节能、精密、柔性、可靠地运行。

根据国家自然科学基金委员会工程与材料科学部编制的《机械工程学科发展战略 2011—2020》[5]对“机械的驱动与传动科学”发展路线的论述，认为：随着材料、机械、传感器、控制等学科的发展和制造技术的进步，传统的驱动与传动原理、方式将朝着电气伺服直驱等为代表的智能驱动与传动的方向发展，如图1所示。

电气伺服直驱技术具有诸多优点：定位精度高，

收稿日期：2015-01-20
基金项目：国家自然科学基金重点项目(51335009)；陕西省自然科学基金(2014JQ7273)
作者简介：梁锦涛(1985—)，男，广东人，博士，主要研究方向为数字式交流伺服及直线电动机驱动的机械设备。

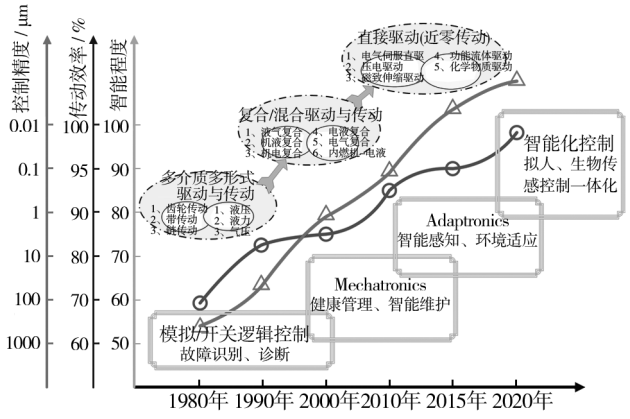


图 1 机械驱动与传动科学发展路线

Fig. 1 Development route of mechanical driving and transmission Science

高速或低速大转矩和高的加(减)速度,动态响应速度快,机械刚度和可靠性高,噪声低,保养费用低[6—9]。电气伺服直驱的核心是新型直驱式电动机的设计制造与伺服驱动控制,现有电动机由于本身的性能约束,如输出扭矩、转速范围的限制等,使其与负载的直接匹配有较大困难。随着现代电机设计技术与新型磁性材料应用的发展,出现了不同拓扑形式的永磁电动机。通过合理的结构设计及优化和伺服控制算法,使电动机满足了机械装备的直驱性能指标。

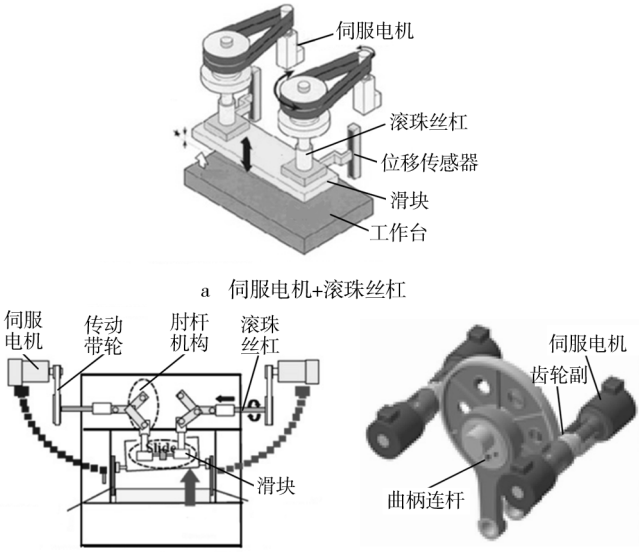
《机械工程学科发展战略 2011—2020》同时指出:今后 10 年"高性能精确成形制造科学与技术"将成为发展的重要方向,其能力、技术水平及技术经济指标将成为衡量一个国家的制造业发展水平以及核心关键技术装备自主创新能力的主要标志之一。该技术在节省材料保证轻量化的同时,更好地发挥了零件的使用性能,是一种绿色、无废料、节约、高技术的轻量化零构件制造技术。

采用电气伺服直驱技术构建成形装备的驱动与传动系统,是实现高效高性能精确成形成性一体化重要的一环。文中对成形装备的电气伺服驱动的应用现状进行介绍,并按照电气伺服直驱技术的研究进展,探讨高性能精密成形装备的电气伺服直驱系统方案。

1 成形装备的电气伺服驱动的应用现状

1.1 典型伺服压力机的驱动与传动

交流伺服电动机直接驱动压力机等锻压设备,是现代锻压成形设备发展的方向,它一出现就引起了业内研究工作者的广泛重视[10—13]。交流电动机与新型伺服控制系统相配合,可使成形过程中锤头能随时加速、减速或停止,动作灵活自由,下死点重复精度高,成形工艺的柔性和适应性更好。锻压设备的负载是典型的冲击负载,每个工作周期只在较短的时间内承受较高的工作负荷,而其他较长的时间空程运转,基本没有负载要求。如果依此短时的加工时间来选择伺服电动机,势必会造成电机容量的增大以及成本过高,因此现有的伺服压力机的驱动传动机构普遍包含飞轮和多级增力机构,如图 2 所示。设计适当惯量的飞轮,可以在一定范围内不降低伺服驱动性能的同时,减少电机的输出转矩要求,降低电动机的容量。而设计增力机构能使滑块运动具备低速锻冲、快速空程及回程的锻压成形特性[14]。常用的增力机构包括有曲柄连杆增力机构、肘杆增力机构、多连杆增力机构、螺旋增力机构、混合输入增力机构等[15—17]。



a 伺服电机+滚珠丝杠

b 伺服电机+滚珠丝杠+肘杆

c 多伺服电机同步驱动

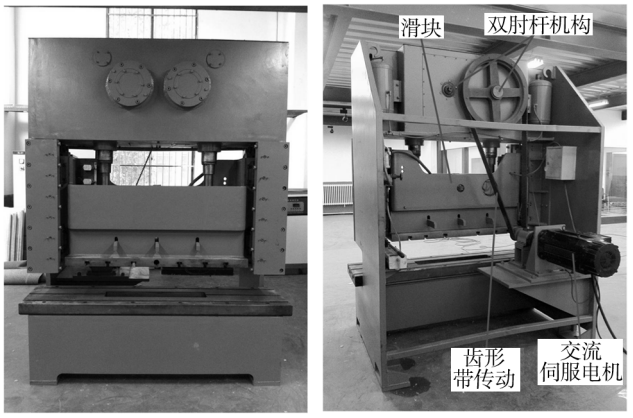
图 2 伺服压力机驱动传动装置

Fig. 2 Driving and transmission mechanism of servo press

国内外锻压生产厂商和科研机构均对伺服压力机展开了广泛研究,并已形成不同驱动传动机构的系列化产品。以西安交通大学机械工程学院模具与先进成形技术研究所智能控制课题组的研究为例,课题组先后研制了 63 t 双点伺服压力机和 160 t 双摆杆伺服压力机[18—19]。JSD25-63 双点伺服压力机采用对称双点传动方式,如图 3 所示,由交流伺服电动机经一级同步带减速机构串联一级同步齿轮机构,然后同步齿轮机构通过同轴固连的曲柄肘杆机构驱动滑块运

动。驱动电机采用 22 kW 安川伺服电机 SGMVH-2BDCD2N,其额定转速为 800 r/min,额定转矩为 262 Nm,瞬时最大扭矩为 526 Nm,一级同步带减速比为 5∶1。

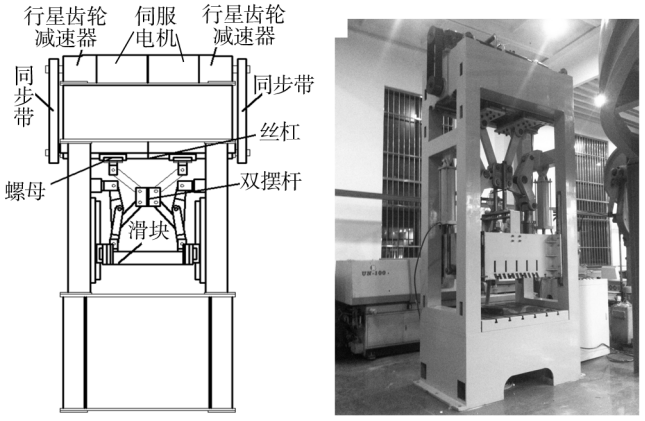
研制的 160 t 伺服压力机样机如图 4 所示,其由 2 台大功率交流伺服电机驱动,通过行星减速器降低转速后再通过同步带驱动丝杠转动,在丝杠的转动下使得左右对称螺母同时相向运动或相反运动,进而带动增力传动结构运动,通过增力传动结构,能够使得伺服压力机在冲压过程中得到所需的公称力,完成冲压工作。左右 2 台驱动电机均采用 22 kW 西门子伺服电机,型号为 1FT6108-8SF71-1DA0,额定转速为 3000 r/min,额定转矩 70 Nm,最大转矩 90 Nm,最高转速为 5600 r/min。行星减速器减速比为 4.42。



a　样机正面　　b　样机背面

图 3　JSD25-63 双点伺服压力机样机

Fig. 3 JSD25-63 double toggle servo press prototype



a　驱动系统组成结构　　b　压力机样机

图 4　160t 新型双摆杆伺服压力机

Fig. 4 160-ton novel double swing rod servo press

1.2　专用成形装备的主轴驱动与进给

除典型成形加工装备锻造冲压的回转驱动外,针对专用成形装备需要根据成形工艺要求设计电气伺服直驱系统,如主轴长行程进给驱动。传统成形装备的主轴长行程进给驱动较常采用液压缸驱动系统实现,如德国 FLESS 公司研制的卧式轴向挤压成形专机 AFH2001FM[20],如图 5 所示。通过交流伺服电机及其伺服泵控、阀控系统实现主轴进给的伺服驱动,可在主轴长行程范围获得平稳的进给速度和较大的进给推力。然而其液压控制系统结构庞大复杂,维护费用大。

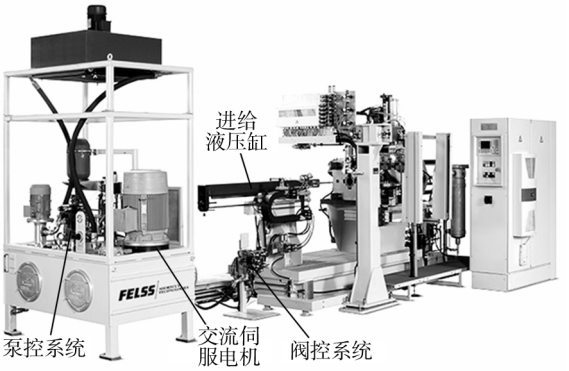
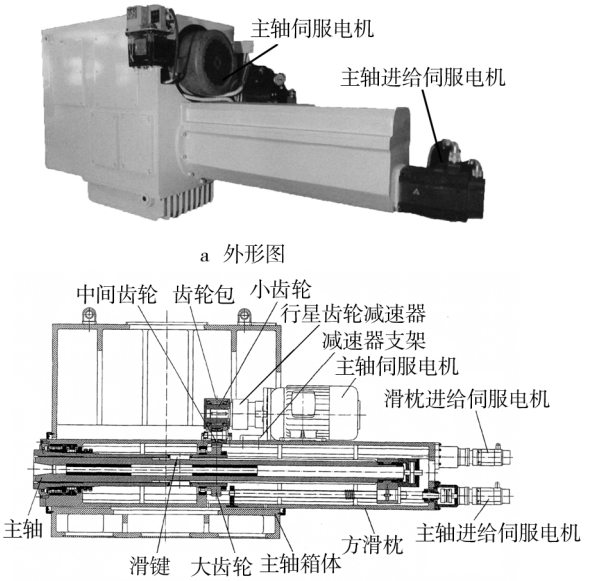


图 5　卧式轴向挤压成形专机 AFH2001FM

Fig. 5 Horizontal axial extrusion forming plane AFH2001FM

在滚打、滚轧、旋压等成形工艺装备中,主轴需要同时实现主轴回转和主轴进给。目前普遍采用的复合式主轴驱动装置如图 6 所示,主轴回转由交流伺服电机通过多级减速传动齿轮驱动主轴实现,主轴进给采用“交流伺服电机+滚珠丝杠”的方式实现。在主



a　外形图

b　内部结构示意图

图 6　复合式主轴回转进给驱动系统

Fig. 6 Compound spindle rotation-feeding drive system

轴上设置一对长滑键,使主轴能在电机转子带动旋转的同时,能在转子内直线进给,实现主轴回转和进给的复合运动。但这种进给驱动方式由于丝杠反向死区效应、扭转刚度低、摩擦磨损大、弹性变形引起的低速爬行等传动缺陷,使得主轴运动的加速度、速度、精度等关键指标均无法达到成形装备的高性能精密加工要求。

目前成形装备的电气伺服直驱系统大多以选择市面上现有的交流伺服电机为主,而往往实质上各类成形工艺的负载特性与通用交流伺服电机工作特性并不匹配。

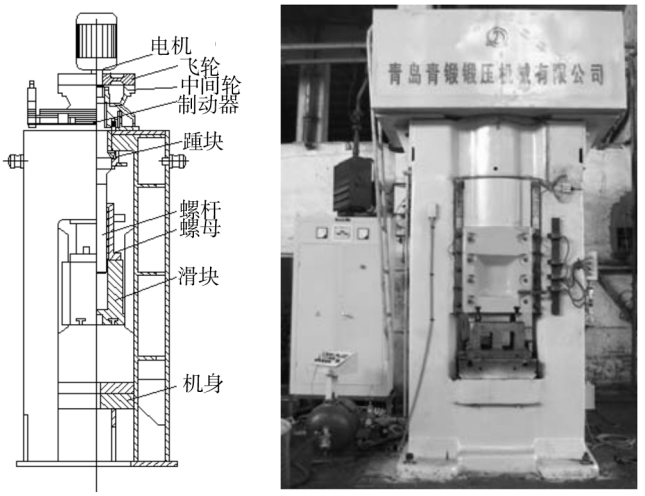
2 电气伺服直驱技术的研究发展

开发成形装备的电气伺服直驱系统,新型伺服直驱电动机的研制尤为关键。需要根据成形工艺驱动要求,设计伺服电机的拓扑结构,配置合适的外围设备和驱动控制电路。例如,针对压力机低速锻冲的冲击负载特性,应使直驱电动机具备低速大力矩特性,以满足冲压力输出要求;电机结构具备足够鲁棒性,以承受冲击载荷;另外,需要配置外围冷却装置,配置再生制动装置,以提高能量利用率。以下介绍各类新型伺服直驱电动机的国内外研究发展及应用现状,分析其作为成形装备驱动系统直接驱动源的优缺点。

2.1 开关磁阻电动机

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)是 20 世纪 80 年代初发展起来的一种新型调速驱动系统,SRM 为双凸极可变磁阻电动机,定子转子的凸极均由普通硅钢片叠压而成,转子上既无绕组也无永磁体,定子极上绕有集中绕组。SRM 可以设计成多种不同相数结构,且定、转子的极数有多种不同的搭配。SRM 作为一种结构简单、成本低、鲁棒性好和运行可靠性高的调速电机,具有很多优越的特性。SRM 和其驱动器在起动过程中电流冲击小,发热较连续额定运转时还小;四象限控制灵活,在制动运行和电动运行时,同样具有优良的转矩输出能力和工作特性。在欧美发达国家 SRM 从理论到实践,从通用机械、机床到专用设备的驱动,从电动到发电及一体化起动/发电机,都有非常成功的研究成果[21—23]。

近年来,国内一些高校和企业开始就开关磁阻电机在金属成形加工行业的应用展开了研究与推广工作。由于 SRM 起动电流小,结构鲁棒性高,使其特别适用于螺旋压力机等需要频繁起停或频繁正反转运行的设备。青岛青锻锻压机械有限公司开发的 EP/EPC 系列电动螺旋压力机[24],如图 7 所示,利用伺服型开关磁阻调速电动机作为驱动源,取代传统“异步电动机+大惯量飞轮+多级齿轮”的驱动传动系统。具有能耗低,打击力控制精确,抗偏载能力强,模具应力小、寿命长,锻件成形精度高等优点。



a 结构原理 b 实物

图 7 青岛青锻锻压机械有限公司的 EP-400 电动螺旋压力机

Fig. 7 Electric screw press EP-400 of Qingdao Qingduan Metal-forming Machinery Co., Ltd

由于 SRM 是以磁阻转矩作为输出转矩,其转矩密度较低,难以实现低速大力矩的直接驱动,往往需要经过多级齿轮传动,但 SRM 优越的性价比仍然使其在成形设备伺服驱动领域占有一席之地。

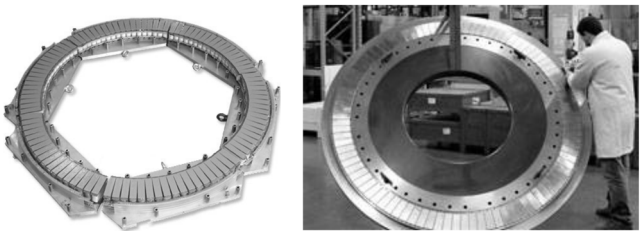
2.2 盘式永磁力矩电动机

盘式永磁力矩电动机(Disc Permanent Magnet Torque Motor, DPMTM)又称轴向永磁同步电机,其最突出的特点是定、转子均为圆环盘形状,沿轴向对称放置,定转子间的气隙磁场为轴向磁场。电机转子由实心钢构成的圆环盘及其上粘有的多块永磁磁钢组成,且磁钢按 N/S 极性交替排列。电机定子的电枢绕组的有效导体像车轮辐条一样周向排列在盘式定子铁心圆盘上。DPMTM 的径向辐射结构能合理利用转轴上的径向空间,另外,电机气隙为轴向平面结构,磁场易于调节;同时盘状的铁心结构有利于散热,提高电机功率密度和过载能力。

目前,在欧美等发达国家,DPMTM 已在电动车、轮船等电力推进直驱系统上得到了广泛应用[25—28]。在成形装备的电气伺服直驱装置上,意大利的 Phase

Motion Control 公司曾研制了用于螺旋压力机的盘式直驱大力矩电机[29],如图 8 所示,采用有槽定子铁心和表面式磁钢结构,其峰值功率达 1 mW, 最大输出转矩为 20 000 Nm,最高转速为 500 r/min。电机转子直接与压力机飞轮连接,驱动系统结构紧凑,具有良好的动态性能。

美国 Core Innovation 公司一直致力于高性能新型盘式永磁电机的研究[30],并具有成熟生产线,能制作功率达 1000 hp(750 kW)的电机。其研制的用于燃油管道螺杆泵直接驱动的 100 hp 盘式电动机如图 9 所示,电机为双转子单定子结构,采用独特的印刷线路板制成电枢绕组,使电机铜耗低、效率高、重量小,可靠性高。电机输出扭矩最大可达 1707.3 Nm,转速范围为 0 ~700 r/min。



a 有槽铁心式定子　　b 表面式转子

图 8　意大利 Phase Motion Control 公司研制的盘式永磁力矩电动机

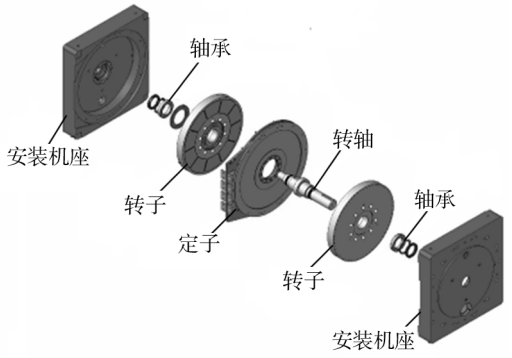
Fig. 8 Disc torque motor of Phase Motion Control Co. , Ltd.

盘式永磁力矩电机的高功率密度和高转矩密度特性,使驱动装置结构紧凑,转动惯量低,动态响应性能好,但其加工工艺和装配技术复杂,制作成本较高。

2.3　开关磁通永磁电动机

开关磁通永磁电动机(Flux Switching Permanent Magnet, FSPM)是一种永磁体安装在定子上的电机,其转子上只存在导磁铁心,结构上具有很好的鲁棒性。其原型机最早由 Rauch 和 Johnson 于 1955 年提出[31]。与 SRM 相同,FSPM 的转子结构简单且鲁棒性强,适合高速运转。同时由于高性能永磁体的使用,使得 FSPM 也具备了现行永磁力矩电机功率密度高、输出转矩大等优点。可以说 FSPM 既综合了开关磁阻电机和永磁力矩电机的优点,又互补了不足,因此 FSPM 被认为是成形装备伺服驱动源的理想选择。如图 10 所示为一种常见的三相 12/10 极 FSPM 结构示意图,FSPM 的定子铁心制造成 U 形模块,周向充磁的永磁体间隔放置在 2 个 U 形铁心模块之间,且相邻 2 个永磁体充磁方向相反,各相线圈以集中绕组的

a 表面式转子　　b 印刷线路板定子

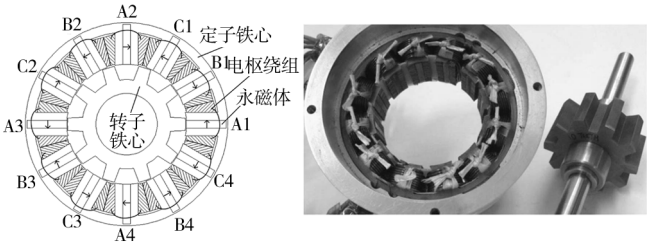


c 整体结构轴向剖分

图 9　美国 Core 创新公司研制的 100hp 印刷电路盘式永磁力矩电动机

Fig. 9 PBC disc torque motor of America Core Innovation Co. , Ltd.

形式缠绕在 2 个 U 形铁心齿和永磁体形成的“三文治”上。转子铁心呈凸极式结构。



a 拓扑结构图　　b 样机实物图

图 10　三相 12/10 极 FSPM 结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of FSPM with three phases 12/10 poles

目前有关 FSPM 的电机特性分析研究还处在进一步探索和开发阶段,英国谢菲联大学、诺丁汉大学,国内东南大学、浙江大学等高校,对不同拓扑结构 FSPM 电机的特性展开了广泛研究,其对电机的制作也主要集中在 5 kW 以下的小型样机试验中[32—33]。

2.4　永磁直线电动机

传统成形装备均由旋转电机驱动曲柄连杆、肘杆、丝杠等机构实现直线运动的成形工艺过程,利用永磁直线电动机(Permanent Magnet Linear Motor, PM-

LM)直接驱动装备主轴,可省略一切中间传动转换机构,实现真正的零传动直接驱动。

PMLM 按电机形状可分为平板式和圆筒式两大类[34—36],平板式结构较为常用,用于驱动锻压设备的平板式直线电机,可将电机初级定子固定在设备机身,电机次级动子安装在冲头滑块上,利用电机定子和动子之间产生的电磁推力带动冲头直线运动。如图 11 所示为土耳其萨班哲大学 Ahmet Onat 等人[37]研制的用于无绳电梯曳引驱动的平板式 PMLM。平板式结构电机由于存在法向吸力,在电机安装固定方面存在一定困难;圆筒式直线电机由于轴对称结构使法向吸力相互抵消,并有利于直接安装在主轴上,使设备整体结构更为紧凑。图 12 所示为本课题组设计开发的圆筒型 PMLM 直驱式 16 t 冲压机模型。

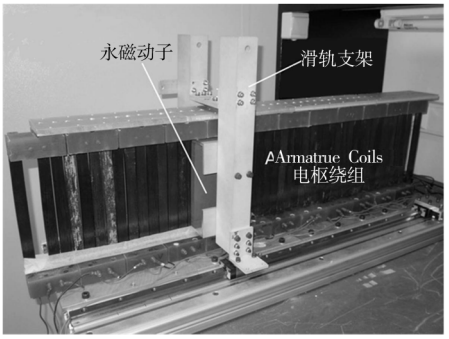


图 11 平板永磁直线电动机

Fig. 11 Flat type PM linear motor

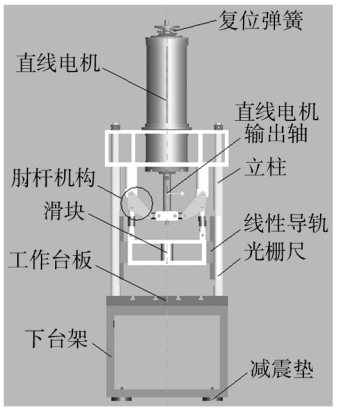


图 12 圆筒型 PMLM 直驱式 16 t 冲压机模型

Fig. 12 16-ton press direct driven by tubular type PMLM

由于 PMLM 直接与成形装备的主轴连接,成形过程的冲击载荷直接施加在电机本体上,对直线电机制造的鲁棒性提出了极高的要求,目前一个有效可行的办法是采用磁阻式或开关磁通式的直线电机,设计电机次级动子只包括动子铁心,从而大大提高直线电机的鲁棒性。

3 结论

目前成形装备的电气伺服直驱系统,大多在选用现行的交流伺服电机的基础上搭建起来,需要根据伺服电机的工作特性设计传动机构以满足成形装备的驱动要求。这种方式一定程度上降低了电气伺服系统的运行效率和动态响应性能,因此,需要根据成形工艺要求设计合理结构的伺服直驱电动机。文中仅大致讨论各类适合于成形装备伺服直驱的电动机拓扑结构,在实际研发中,还需要根据具体的工艺技术指标对伺服驱动系统结构进行优化设计,如提高电机过载能力,降低电机惯量提高动态响应性能等。另外,还需要对主轴驱动系统配置合适的外围驱动电路、冷却系统、再生制动系统等。

参考文献:

[1] BUDIG P K. Simplification of the Mechanical Design of Drives with the Application of Direct Drives[C]. Proc Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Taormina, Italy, 2006: 862—874.

[2] HARING T, FORSMAN K, HUHTANEN T, et al. Direct Drive: Opening a New Era in Many Applications[C]. Conference Record of the 2003 Annual Pulp Paper Industry Technical Conference, 2003: 171—179.

[3] 郑建明,赵升吨,尚万峰. 电机调速与伺服驱动技术在压力机行业中的应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2007, 42(6): 10—14.
ZHENG Jian-min, ZHAO Sheng-dun, SHANG Wan-feng. Application of the Motor Speed Regulation and Servo Driving Technique in Press Machine[J]. China Metal Forming and Equipment & Manufacturing Technology, 2007, 42(6): 10—14.

[4] SCHÄFERS E, DENK J, HAMANN J. Mechatronic Design of Direct Drive Systems[C]. Proc Int. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Taormina, Italy, 2006: 1051—1055.

[5] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011—2020)[M]. 北京:科学出版社, 2010.
Department of Engineering and Material Science, National Natural Science Fund Committee. Report the Mechanical Engineering Discipline Development Strategy (2011-2020)[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[6] RAHMAN M K, PATEL R N, WARD T G, et al. Application

of Direct-drive Wheel Motor for Fuel Cell Electric and Hybrid Electric Vehicle Propulsion System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2006,42(5):1185—1192.

[7] YANG Y P,CHUANG D S. Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passengers Cars[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(1):51—61.

[8] 赵升吨,梁锦涛,赵永强,等. 机械压力机伺服直驱式新型永磁电动机的设计与应用研究[J]. 锻压技术,2014,39(4):59—66.
ZHAO Sheng-dun, LIANG Jin-tao, ZHAO Yong-qiang, et al. Design and Applied Research on Novel Permanent Magnet Motors for Servo Direct Driving Mechanical Press[J]. Forging & Stamping Technology,2014,39(4):59—66.

[9] 梁锦涛,赵升吨,朱牧之,等. 一种数控模锻锤用打击液压阀的电磁直驱式设计[J]. 锻压技术, 2014,39(10):84—88.
LIANG Jin-tao,ZHAO Sheng-dun,ZHU Mu-zhi,et al. Design on an Electromagnetic Direct Driving Hydraulic Directional Valve of CNC Forging Hammer[J]. Forging & Stamping Technology,2014,39(10):84—88.

[10] OSAKADA K,MORI K,ALTAN T,et al. Mechanical Servo Press Technology for Metal Forming[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology,2011,60:651—672.

[11] OSAKAD K,MATSUMOTO K,OTSU M,et al. Precision Extrusion Methods with Double Axis Servo-press Using Counter Pressure[J]. Cirp Annals-Manufacturing Technology, 2005,54(1):245—248.

[12] MORI K,AKITA K,ABE Y. Springback Behaviour in Bending of Ultra-high-strength Steel Sheets Using CNC Servo Press[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2007,47(2):321—325.

[13] CHENG H L,PEI L T. Experimental Study on a Hybrid-driven Servo Press Using Iterative Learning Control[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2008, 48(2):209—219.

[14] 何予鹏,赵升吨,杨辉,等. 机械压力机低速锻冲机构的遗传算法优化设计[J]. 西安交通大学学报,2005,39(5):490—493.
HE Yu-peng,ZHAO Sheng-dun,YANG Hui,et al. Optimum Design of the Mechanical Press with Low-speed and Stamping-punch Mechanism Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2005,39(5):490—493.

[15] CHOI H,JANG D,KO B,el al. A study on the Optimization of a Mechanical Press Drive[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part B:Journal of Engineering Manufacture,2004,218(2):189—196.

[16] 邹军. 新型交流伺服直接驱动双点压力机设计理论及其关键技术的研究[D]. 西安:西安交通大学,2007.
ZOU Jun. Investigation in Design Theory and Key Technology of a New Type of Double Point Press Directly Driven by AC Servo-motor[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2007.

[17] KOGA N,KUBO M,JUNLAPEN K. Burr-free Shearing Using NC Servo Press Machine[J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity,2007,48(558):645—649.

[18] 谢嘉,赵升吨,梁锦涛,等. 压力机杆系优化求解的变量循序组合响应面法[J]. 西安交通大学学报,2012,46(5):13—17.
XIE Jia,ZHAO Sheng-dun,LIANG Jin-tao,et al. Variable Sequential Combination Response Surface Methodology for Press Rod System Optimization[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2012,46(5):13—17.

[19] 梁锦涛,赵升吨,谢嘉,等. 双肘杆机械压力机实现柔性加工的混合闭环伺服控制系统的研究[J]. 机械工程学报,2014,50(7):120—127.
LIANG Jin-tao,ZHAO Sheng-dun,XIE Jia,et al. Research on Hybrid-loop Servo Control System of Double Toggle Mechanical Press for Achieving Flexible Process[J]. Journal of Mechanical Engineering,2014,50(7):120—127.

[20] FELSS SHORTCUT TECHNOLOGIES. Axial Forming Machines[EB/OL]. [2015-02-15]. http://www.felss.com/article/axial-forming-machines-of-the-felss-group/91/.

[21] YAMAI H,KANEDA M,OHYAMA K,et al. Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump Unit[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2000,3:1555—1562.

[22] LIM J Y,JUNG Y C,KIM S Y,et al. High Efficiency and Low-cost Switched Reluctance Motor for Air-conditioner Blower[J]. IEEE Transactions on Power Conversion,2002, 3:1460—1467.

[23] ZHENG J M,ZHAO Sheng-dun,WEI S G. Application of Self-tuning Fuzzy PID Controller for a SRM Direct Drive Volume Control Hydraulic Press[J]. Control Engineering Practice,2009,17:1398—1404.

[24] 青岛青锻锻压机械有限公司. EP 系列直驱式电动螺旋压力机[EB/OL]. [2015-02-15]. http://www.qingduangroup.com/products_list.
Qingdao Qingduan Metalforming Machinery Co., Ltd. EP Series Electric Screw Press[EB/OL]. [2015-02-15]. http://www.qingduangroup.com/products_list.

[25] YAN G J,HSU L Y,WANG J H,et al. Axial-flux Permanent Magnet Brushless Motor for Slim Vortex Pumps[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2009,45(10):4732—4735.

[26] HILL-COTTINGHAM R J,COLES P C,EASTHAM J F,et al. Novel Axial Flux Machine for Aircraft Drive: Design and Modeling[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2002,38(5):3003—3005.

(下转第 82 页)

shape Forming Engineering,2013,5(6):27—29.

[9] 王宏松,汪程,修辉平. 模具数字化设计与快速制造[J]. 精密成形工程,2014,6(2):55—59.
WANG Hong-song, WANG Cheng, XIU Hui-ping. Digital Design and Rapid Manufacturing of mould[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2014,6(2):55—59.

[10] 陈文琳,李志杰,王少阳. 汽车前围板冲压数值模拟及工艺参数优化[J]. 精密成形工程,2011,3(3):15—19.
CHEN Wen-lin, LI Zhi-jie, WANG Shao-yang. Numerical Simulation and Parameter Optimizing of the Stamping Forming Process of Auto Front Panel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2011,3(3):15—19.

(上接第 13 页)

[27] FEI W, LUK P C, JINUPUN K. Design and Analysis of High-speed Coreless Axial Flux Permanent Magnet Generator with Circular Magnets and Coils[J]. IET Electric Power Applications,2010,4(9):739—747.

[28] ZHAO Sheng-dun, LIANG Jin-tao, ZHAO Yong-qiang. Optimization Design and Direct Torque Control of a Flux Concentrating Axial Flux Permanent Magnet Motor for Direct Driving System[J]. Electric Power Components and Systems,2014,42(14):1517—1529.

[29] PHASE MOTION CONTROL. "TORQUE" Servomotors[EB/OL]. [2015-02-15]. http://www.phase.it/.

[30] CORE INNOVATION. Disc Permanent Magnet Machines [EB/OL]. [2015-02-15]. http://www.coreotionllc.us/.

[31] CHENG M, HUA W, ZHANG J Z, et al. Overview of Stator-permanent Magnet Brushless Machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(11):5087—5101.

[32] ZHU Z Q, PANG Y, Howe D, et al. Analysis of Electromagnetic Performance of Flux-switching PM Machines by Nonlinear Adaptive Lumped Parameter Magnetic Circuit Model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (11): 4277—4287.

[33] ZHU Z Q, CHEN J T. Advanced Flux-Switching Permanent Magnet Brushless Machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,46(6):1447—1453.

[34] GUERAS J F, PIECH Z J. LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS: Transportation and Automation Systems [M]. New York: CRC Press,2000.

[35] BIANCHI N, BOLOGNANI S. Tubular Linear Permanent Magnet Motors an Overall Comparison[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2003,39(2):466—475.

[36] 赵升吨,梁锦涛,赵永强. 用于直接驱动机床主轴的大推力圆筒型永磁直线电机的研究[J]. 机床与液压,2014,42(9):66—70.
ZHAO Sheng-dun, LIANG Jin-tao, ZHAO Yong-qiang. Research on the Large Thrust Tubular Permanent Magnet Linear Motor for Direct-driving Machine Tool Spindle[J]. Machine Tool & Hydraulics,2014,42(9):66—70.

[37] AHMET O, CAGRI G, SANDOR M. A New Active Position Sensing Method for Ropeless Elevator[J]. Mechatronics, 2013(23):182—189.

(上接第 75 页)

DU Ting, LIU Yu-qi, ZHANG Zhi-bing, et al. A Fast Analysis System Based on UGS NX for Sheet Metal Forming[J]. Froming & Stamping Technology,2008,33(4):145—149.

[9] 黄兵锋. CATIA V5 的 Publication 功能及应用[J]. 湖北汽车工业学院学报,2009,23(2):9—11.
HUANG Bing-feng. Application of Publication of CATIA V5 [J]. Journal of Hubei Automobile Industries Institute, 2009,23(2):9—11.

[10] 闫卫京,柳玉起,章志兵,等. 基于 CATIA 的汽车覆盖件产品设计可成形性同步仿真系统[J]. 塑性工程学报,2010,17(6):37—40.
YAN Wei-jing, LIU Yu-qi, ZHANG Zhi-bing, et al. Formability Synchronous Emulation System for Automobile Panel Design Based on CATIA[J]. Journal of Plasticity Engineering,2010,17(6):37—40.

[1] 张智霞,章志兵,柳玉起,等. 基于模板的汽车覆盖件交互式模具设计系统的研究[J]. 精密成形工程,2014,6(6):127—132.
ZHANG Zhi-xia, ZHANG Zhi-bing, LIU Yu-qi, et al. Template-Based Interactive Die Design System of Automobile Panel[J]. Journal of Netshape Forming Engineering,2014, 6(6):127—132.