

电液泵电磁场有限元分析与研究

陈焕明, 刘卫国, 宋受俊, 习仁国

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 在屏蔽式电机泵的基础之上, 根据永磁无刷直流电机和轴向柱塞液压泵的结构特点和运行原理, 提出了一种将两者高度集成的新型液压能源系统——电液泵。通过对电液泵集成原理和结构的分析, 利用有限元分析软件 MagNet 对电液泵进行了空载和负载状态下的电磁场数值计算与分析。仿真结果证明了所提出集成设计方案的可行性, 系统内部没有出现磁场畸变与局部饱和现象, 其动态性能满足技术要求。研究结果在液压能源系统的集成设计以及性能优化等方面具有理论意义和参考价值。

关键词: 电液泵, 电磁场, 有限元, 集成, 仿真

中图分类号: V241

文献标识码: A

文章编号: 1000-2758(2013)03-0476-06

二战以来, 液压技术在飞机上的应用得到了突飞猛进的发展, 飞机液压系统担负着为飞机操纵、起落架收放、机轮刹车及地面转弯等必要功能提供液压驱动的重要任务, 对于保证飞机安全飞行、实现飞机设计性能以及飞行员的生存保障等起着至关重要的作用。现在飞机液压系统使用的液压泵是通过联轴器与发动机机匣相连, 或与电动机相连, 这种传统的连接形式和结构存在着许多缺点和不足, 难以适应未来战机的战术需求^[1-3]。因此, 提高液压系统机电一体化程度, 缩小体积, 减轻重量, 提高可靠性和降低噪声等就成为飞机液压系统迫切需要解决的问题。目前美、英、日、德及法等都在开展针对电机与液压泵集成的技术研究^[4], 并取得了一些成果, 而国内还处于起步阶段^[5-8]。

由于电机和液压泵各有很多种类, 因此, 电机与液压泵的集成方式和集成种类也很多。本文借鉴屏蔽式电机泵的特点^[9-11], 根据永磁无刷直流电机和轴向柱塞液压泵的空间结构和运动方式, 提出了一种将两者高度集成的新型液压能源系统, 称之为电液泵。电液泵体积小、重量轻、噪声低、传动效率高、因无外伸轴而避免了外部泄漏等, 具有广阔的应用前景。本文采用有限元电磁场仿真软件 MagNet 对电液泵的电磁场进行研究, 优化电液泵的磁路, 避免

出现局部磁场畸变与磁饱和情况, 减小电磁干扰, 使其达到最佳的设计参数匹配状态, 为工程应用奠定理论基础。

1 系统描述

永磁无刷直流电机和轴向柱塞液压泵集成的电液泵, 电机转子与柱塞泵缸体合二为一, 取消了传统结构的电机和液压泵之间的联结器, 是高度集成的一种机、电、液一体化的新型液压能源系统装置。电液泵是一种将电能直接转换为液压能的能量转换装置, 它减少了中间的机械过渡转换环节。其原理是给电液泵输入 270 V 直流电源, 根据外部信号或者负载需求给控制器一个指令, 通过控制器控制电液泵转子的转速, 从而给负载提供所需的压力和流量。其外形图如图 1 所示。

电液泵由定子电枢、转子、柱塞、斜盘、配流盘、传感器组件、壳体、进出油口和壳体回油口等组成, 如图 1 所示。其中转子外表面粘贴有磁钢并套有外罩。电液泵是一种新型结构, 其特征是电机和液压泵共用一个转子, 并处于电液泵磁场回路中, 这样磁场的分布必须重新考虑: 一方面, 需要考虑转子材料

收稿日期: 2012-06-05

作者简介: 陈焕明(1966—), 西北工业大学博士研究生, 主要从事机电液一体化设计与研究。

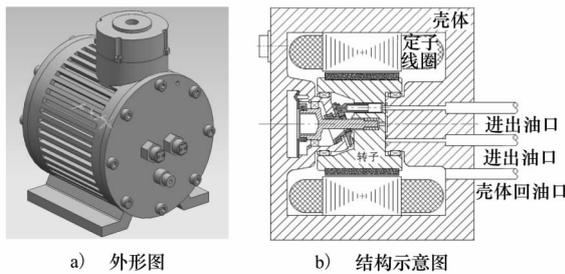


图 1 电液泵外形图及结构示意图

本身对磁场的影响,另一方面,也需要考虑转子的转动对磁场的影响,同时电液泵集成后其转子是一种不规则形状,这种不规则形状的转子结构将会影响电机的磁路特性。传统电机-泵组中,泵的转子不直接受电机磁场影响,电机磁场也不受液压泵的影响。

2 仿真模型建立与分析

电机电磁场的数值计算方法很多,主要有:有限元法、有限差分法、体积分方程法、边界积分方程法,以及近年来出现的有限元法和边界元方程法相结合的混合法等。其中有限元法应用范围最为广泛^[12]。随着计算机的快速发展,高精度有限元分析变得越来越简单。目前用来进行电机电磁场有限元分析的软件有很多,如 MagNet 软件、Ansoft 软件以及 ANSYS 软件等。本文将利用 MagNet 软件进行电液泵电磁场的数值计算与分析。

MagNet 电磁场有限元分析软件基于 Microsoft Windows 界面,让用户能方便快速地建立模型和进行分析,帮助用户极大程度地简化设计过程,方便用户进行几何建模和材料编辑,用户还可以创建自己的模型库。允许用户建立各种电路模型并进行仿真,如电阻、电容、电感、换向器、开关、二极管、电压和电流源等。同时 MagNet 利用有限元方法精确地对 2D 和 3D 模型进行建模和预测结果。自适应网格分割器使得用户无需考虑复杂的分割问题就可以得到满意的计算精度。具备强大的求解器,如静态磁场求解器、谐振求解器、瞬态求解器和瞬态运动求解器等,以及功能完备的后处理。软件还提供了详细而又精确的多个场量和标量数值仿真结果,使设计人员可以全面了解所设计模型的性能。用户可通过等势线图、云图、矢量箭头图来观察物体表面或物

体内部剖面上的场量结果等。

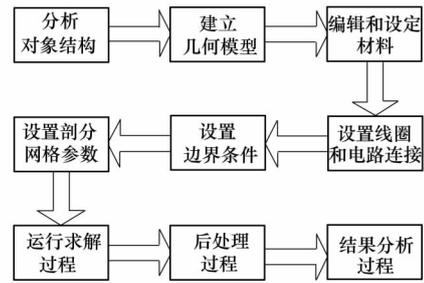


图 2 MagNet 软件项目分析步骤

MagNet 对电磁场的数值计算与分析过程包括前处理、运行求解、后处理以及结果分析等部分。具体分析步骤如图 2 所示。完成以上步骤后就可以进行电磁场的仿真分析。本文分析的电液泵功率 20KW,其电机定子 36 槽,槽型为平底槽,转子为三对极,永磁体采用表贴式安装,径向充磁。主要指标及尺寸见表 1。

表 1 电液泵的主要指标及结构尺寸

物理量	数值	物理量	数值
额定电压/(VDC)	270	定子外径/mm	166.5
额定功率/kW	20	定子内径/mm	95
额定转速/rpm	8 000	气隙长度/mm	2
额定效率/%	90	转子外径/mm	91
工作状态	长期运行	转子内径/mm	57.4
设计方式	正弦波	轴向长度/mm	66
绕组层数	双层	槽口宽/mm	1.8
并联支路	1	槽口深/mm	0.5
并绕根数	12	槽肩宽/mm	4.2
每线串联匝数	36	槽肩深/mm	0.2
导线截面积/mm ²	1	槽身深/mm	24.9
磁钢厚度/mm	5.45	槽底宽/mm	8.4

因电液泵是一种新型的结构,其转子是一种不规则形状,本文采用 MagNet 软件分析时,先对永磁同步电机的电磁场进行仿真,对电机模型进行初步的理论论证,并仿真分析电机的空载、负载工作状态。永磁同步电机的 MagNet 模型如图 3 所示。在电液泵中,其转子结构与永磁同步电机的转子结构不同。在电液泵转子中存在 3 个通油孔和 9 个柱塞孔,为了便于分析电液泵电磁场特性,特此将实际模型与简化模型进行仿真对比分析。

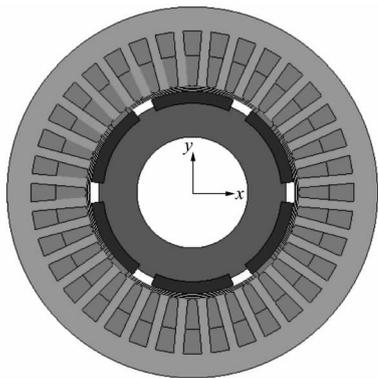


图 3 永磁同步电机的 MagNet 模型

3 仿真结果分析

3.1 转子模型励磁磁场分析

在简化模型的基础上,在转子上依次增加 3 个通油孔和 9 个柱塞孔,形成 2 个新模型,其中图 3 的模型中,转子内直径为 57.4 mm 部分全部设置为空气。图 5 在图 4 简化模型的基础上增加了 3 个通油孔,图 6 是在图 5 模型基础上又增加了 9 个柱塞孔。

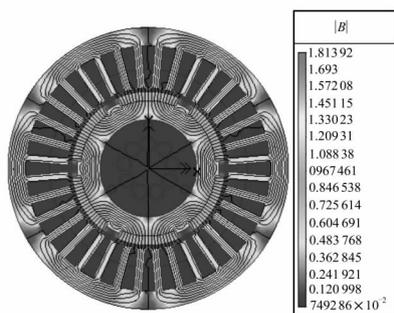


图 4 简化模型磁密云图

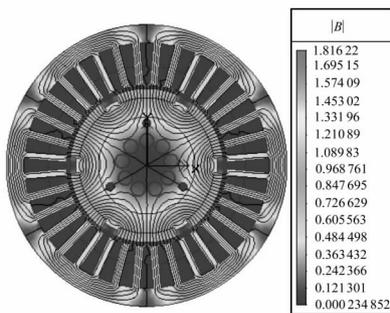


图 5 增加通油孔后的磁密云图

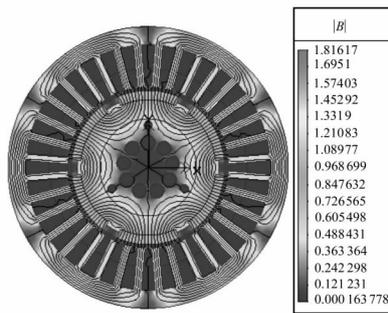


图 6 增加柱塞孔后的磁密云图

通过以上 3 组模型仿真结果对比可知,由于电液泵转子内部磁密不饱和,在转子内部打通油孔和柱塞孔对电液泵整体磁场强度分布几乎没有影响,各处磁密分析结果见表 2。因此可以将实际电机模型简化而成为电液泵模型,从而进行电液泵空载及负载情况的仿真分析。

表 2 电液泵各处磁密对比表(单位: T)

部位		简化模型	3 个通油孔模型	9 个柱塞孔模型
		气隙	最大值 0.722	0.729
	平均值	0.556	0.554	0.554
转子轭部	最大值	0.900	0.854	0.862
	平均值	0.735	0.756	0.759
定子齿部	平均值	1.315	1.318	1.318
	最大值	1.218	1.218	1.220
定子轭部	平均值	0.793	0.784	0.784

3.2 励磁磁场仿真

对电液泵进行励磁磁场仿真,求解完成后得到电液泵静态磁力线和磁密分布,如图 7 所示。电液泵气隙、转子轭部、定子齿部及轭部的磁密分布曲线如图 8 所示。

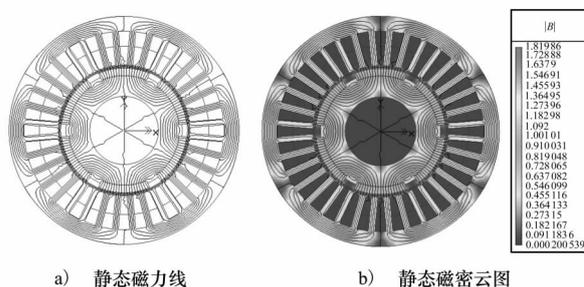


图 7 电液泵静态磁力线和磁密分布

电液泵气隙磁密最大值 0.722T,平均值为 0.556T。转子轭部磁密最大值为 0.900T,平均值为 0.735T。定子齿部磁密平均值为 1.315T,轭部磁密最大值为 1.218T,平均值为 0.793T。除了定子齿部磁密稍高以外,电液泵其他各部分均不饱和。

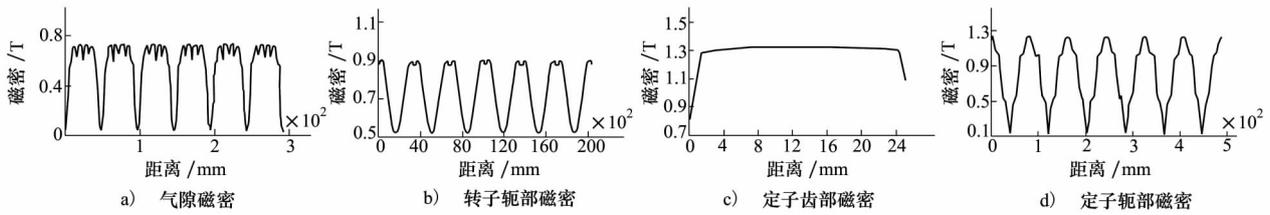


图 8 电液泵各部分磁密分布

3.3 空载运行仿真

电液泵连接三相绕组和三相电压源进行空载运行仿真。相电压幅值为 162.63 V (有效值为 115 V) 频率为 400 Hz 的正弦信号,相互之间的相位差为 120° ,电液泵负载为 0.2 Nm,起始速度为 8 000 rpm。

选择电液泵基本稳定后的某一时刻,观察电液泵空载稳定运行时的磁场情况,结果如图 9 所示。

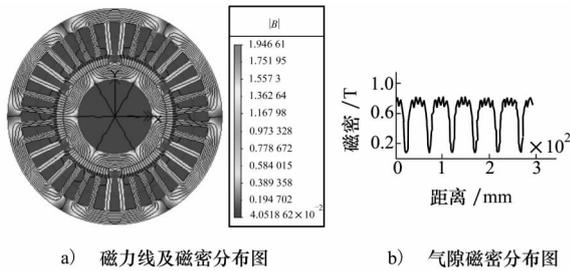


图 9 空载稳定运行时的磁场

从仿真结果中可以得到,气隙磁密最大值为 0.81T,平均值为 0.61T。转子轭部磁密最大值为 1.30T,平均值为 0.98T。定子齿部磁密平均值为 1.53T,轭部磁密最大值为 1.45T,平均值为 0.93T。从气隙磁密波形图中可以看出,空载运行时,气隙磁密基本没有发生扭斜,只是磁密增大了。仿真结束后即可得到电液泵空载运行时的转速曲线及电枢电流曲线,如图 10 和图 11 所示。

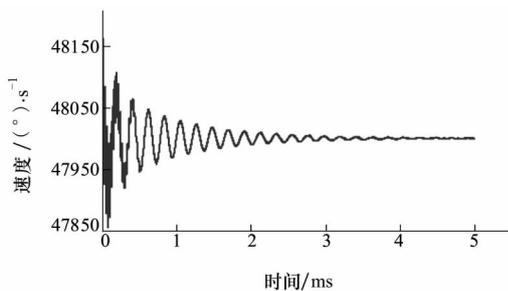


图 10 空载运行转速曲线

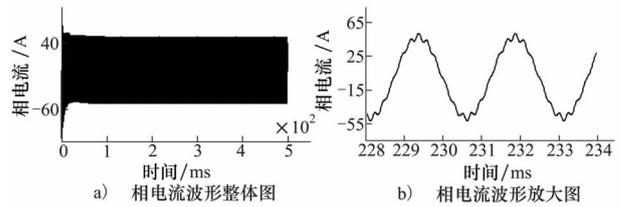


图 11 空载运行电流曲线

对于图 10 需要说明的是,在仿真开始时转速震荡比较大,这是由软件本身的算法引起的,实际中不存在这样的震荡,电磁转矩和电流波形开始时的震荡也是这个原因。从图 10 中可以得到,电液泵转子速度振荡后趋于稳定,基本稳定在 8 000 rpm,电液泵转速最大振幅为 28 rpm,其误差为 0.35%,仿真到 300 ms 时,电液泵转速基本稳定,上下波动幅值为 ± 2 rpm,其误差为 0.025%,小于设计指标中的 0.4%,满足高精度要求。图 11 是 A 相电流及其放大图,可以看出电液泵 A 相电流稳定后为正弦波,幅值为 51.5 A,周期为 2.5 ms。

3.4 负载运行仿真

电液泵进行负载运行仿真时,三相绕组与电源的连接方式与空载仿真时一致。此时设置电液泵负载 23.88 Nm。

选择电液泵基本稳定后的某一时刻观察电液泵负载稳定运行时的磁场情况,结果如图 12 所示。

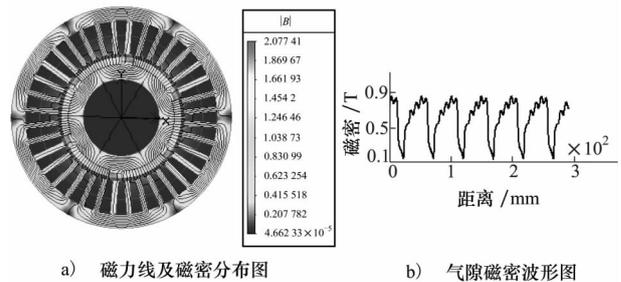


图 12 负载稳定运行时的磁场

从仿真结果中可以得到,气隙磁密最大值为0.86T,平均值为0.62T。转子轭部磁密最大值为1.18T,平均值为0.97T。定子齿部磁密平均值为1.60T,轭部磁密最大值为1.45T,平均值为0.94T。从气隙磁密波形图中可以看出,负载运行时,气隙磁密发生了很明显的扭斜,同时较静态时磁密有所增大。

仿真结束后,得到电液泵负载运行时的转速曲线及电枢电流曲线,分别如图13、图14所示。

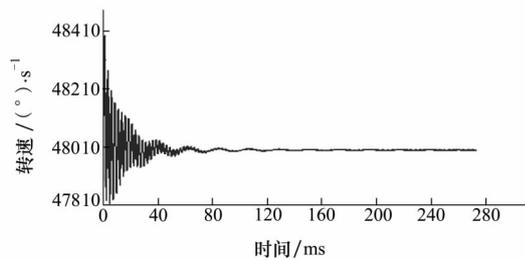


图13 负载运行转速曲线

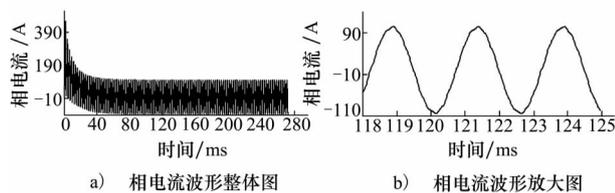


图14 负载运行电流曲线

从图13中可以得到,电液泵转子速度振荡后趋于稳定,基本稳定在8000 rpm,电液泵转速最大振幅为67 rpm,其误差为0.8375%,仿真到200 ms时,电液泵转速基本稳定,上下波动幅值为 ± 2 rpm,其误差为0.025%,小于设计指标中的0.4%,满足高精度要求。图14是电液泵A相电流及其放大图。可以看出A相电流稳定后为正弦波,周期为2.5 ms,幅值为101.5 A,有效值约为71.3 A,符合设计指标中对电流大小的要求。

4 结 论

本文借鉴屏蔽式电机泵的特点,根据永磁无刷直流电机和轴向柱塞液压泵的空间结构和运动方式,提出了一种将两者高度集成的新型液压能源系统——电液泵。通过对电液泵集成原理和结构的分析,基于MagNet软件,本文对电液泵电磁场进行了数值计算与分析,通过仿真得到了电液泵电磁场的分布、变化及空载和负载两状态下的性能曲线。仿真结果表明,电液泵的集成对电机磁路特性的影响不大,没有出现局部磁场畸变与磁饱和情况,电液泵集成是可行的,所设计的电液泵性能满足技术要求。仿真结果对系统集成设计和工程优化提供了理论依据和指导作用。

参考文献:

- [1] 郭圣洪,许云峰. 新一代攻击型飞机的性能要求. 航空科学技术, 2003, 1: 31-33
Guo Shenghong, Xu Yunfeng. Performance Requirement of the New Generation Attack Aircraft. Aeronautical Science and Technology, 2003, 1: 31-33 (in Chinese)
- [2] 张加圣,王海涛,万小朋等. 第四代战斗机的性能指标分析. 航空科学技术, 2008, 4: 9-11
Zhang Jiasheng, Wang Haitao, Wan Xiaopeng, et al. Analysis of the Fourth Generation Battleplan Performance. Aeronautical Science and Technology, 2008, 4: 9-11 (in Chinese)
- [3] 冯培德. 发展中国大型飞机机载设备的思考. 航空学报, 2008, 29(3): 681-685
Feng Peide. Ideas for Developing Airborne Equipments of China's Large Aircraft. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 681-685 (in Chinese)
- [4] Jensen S C. Flight Test Experience with an Electro Mechanical Actuator on the F-18 Systems Research Aircraft. NASA/H22425, 2000
- [5] 孙卫华,裘丽华,王占林. 电机泵复合系统的协调控制. 机床与液压, 2006, 6: 75-77
Sun Weihua, Qiu Lihua, Wang Zhanlin. Coordination Control for Electromotor-Pump Compound System. Machine Tool & Hydraulics, 2006, 6: 75-77 (in Chinese)
- [6] 祁琦,冀宏. 基于Ansoft的液压电机叶片泵的仿真研究. 机床与液压, 2010, 38(17): 102-105
Qi Qi, Ji Hong. Simulation and Analysis of Special Motor of the Hydraulic Motor-Vane Pump Based on Ansoft. Machine Tool &

- Hydraulics ,2010 ,38(17) : 102-105 (in Chinese)
- [7] 李 大 柯 坚 邓 斌 ,于兰英. 基于一体化的电机泵装置的研究. 机械研究与应用 2007 ,20(4) : 55-56
Li Da ,Ke Jian ,Deng Bin ,Yu Lanying. Research of the Device of Motor and Pump Based on Integration. Mechanical Research & Application ,2007 ,20(4) : 55-56 (in Chinese)
- [8] 张大杰 ,高殿荣 ,王有杰 ,郭明杰. 基于 ANSYS 的轴向柱塞电机泵电磁场的数值计算与分析. 机械工程学报 2008 ,44(12) : 69-74
Zhang Dajie ,Gao Dianrong ,Wang Youjie ,Guo Mingjie. Numerical Calculation and Analysis of Electro-Magnetic Field of Axial Piston Hydraulic Motor Pump Based on ANSYS. Chinese Journal of Mechanical Engineering ,2008 ,44(12) : 69-74 (in Chinese)
- [9] 陈世亮 ,邓菊香 ,易书翔等. 旋涡式屏蔽泵的设计及试验研究. 流体机械 2005 ,33(7) : 9-11
Chen Shiliang ,Deng Juxiang ,Yi Shuxiang ,et al. Design and Experimental Research of Peripheral Canned Pump. Fluid Machinery ,2005 ,33(7) : 9-11 (in Chinese)
- [10] 涂建安. 屏蔽泵的性能特点及选型. 流体机械 2002 ,28(2) : 34-35
Tu Jianan. Performance Characteristic and Type Selection of Canned Motor Pump. Fluid Machinery ,2002 ,28(2) : 34-35 (in Chinese)
- [11] Scott C. The Advantage of Retrofitting Using Canned Motors. World Pumps ,2005 ,462: 32-34
- [12] 冀 宏 孙 磊 ,王峥嵘 ,许丹丹 ,李志峰. 液压电机泵中浸油电机的负载效应. 兰州理工大学学报 2009 ,35(8) : 52-56
Ji Hong ,Sun Lei ,Wang Zhengrong ,Xu Dandan ,Li Zhifeng. Load Effect of Electro-Motor of Hydraulic Electro-Motor Pump. Journal of Lanzhou University of Technology ,2009 ,35(8) : 52-56 (in Chinese)

Electromagnetic Field Analysis and Research of Electrohydraulic Pump Based on Finite Element Method

Chen Huanming , Liu Weiguo , Song Shoujun , Xi Renguo

(Northwestern Polytechnical University , 710072 , Xi'an , China)

Abstract: In this paper , according to the structural features and operating principles of PM brushless DC motor and axial plunger-type hydraulic pump , a new hydraulic energy system , named electrohydraulic pump , is proposed based on traditional canned motor pump. The integrating principle and structure are analyzed , and then , the electromagnetic field numerical calculation and analysis of the electrohydraulic pump are conducted with MagNet under both no-load and load conditions. The simulation results verify the feasibility of proposed integrated design. The magnetic field in the system has no distortion and local saturation , and the dynamic performances satisfy the technical requirements. The simulation results , we believe , provide some theoretical basis and serve as some guidance for the integrated design and performance optimization of the hydraulic energy system.

Key words: brushless DC motors , calculations , computer simulation , computer software , electromagnetic fields , electromagnetic pumps , finite element method , optimization; integration