

液压电机泵多场耦合自冷却特性研究



高殿荣,孙亚楠,庄鑫

燕山大学,河北 秦皇岛 066004

摘要:新型高度集成化液压电机泵将电机和液压泵的功能高度融合,具有结构紧凑、能量转化效率高等优点,在航空领域具有广阔的应用前景和研究意义。然而,液压电机泵中电机的发热及冷却一直是困扰人们且需要解决的难题。本文通过研究液压电机泵电机的发热机理,建立液压电机泵的流场、电磁场及温度场的数学模型;通过数值模拟研究液压电机泵的流场、电磁场及温度场的分布及耦合影响因素,发现自冷却流道周围流体和该流体位置所对应的壳体温度会有所降低。本文对应用于航空领域的高度集成化液压电机泵的设计及自冷却方式具有一定的指导意义。

关键词:高度集成化液压电机泵;发热;自冷却特性;多场耦合;电磁损耗

中图分类号:V264

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.10.013

液压传动以其功率重量(质量)比大、传动平稳、调速方便以及动态响应快等显著优点在航空航天等领域有着广泛的应用。轴向柱塞泵在液压系统中最为常见,一般由电机驱动,能量利用率低,且轴向占用空间大。然而,航空设备空间有限,因此要求液压系统所占用空间越小越好。本文研究的液压电机泵是将柱塞泵、高速电机等原理有机融合的新型高效节能机电一体化动力单元,具有体积小、重量轻、结构紧凑、能量转化效率高等优点,特别适合应用在航空设备上。徐建新等^[1]对航空发动机涡轮叶片进行流热固耦合仿真分析。王宏喆等^[2]提出了一种可以实现可靠的无位置传感器驱动控制方案,并利用电机进行实例仿真验证了方案的正确性。胡红林等^[3]提出了一种抑制小流量时入口回流的方法,从而减小入口水力损失,保证了燃油泵性能曲线单调下降的特性。N. D. Manring等^[4]对柱塞个数对柱塞泵流量脉动的影响进行了瞬态分析。F. Fomarelli等^[5]利用AMESim分析了不同缸体转速和出口压力对高压泵容积效率的影响规律。B. Norman等^[6]对高压泵入口液体管路压损进行了模拟分析,并通过试验验证了模拟结果的准确性。中国台湾中山科学院在2006年开发出了电液复合泵浦,并针对其气隙油膜效应、电机性能、受力和流量稳定性

等做了模拟研究^[7]。华中科技大学朱碧海等^[8-10]将斜盘式轴向柱塞泵与电机集成为一体,设计了一种新型海/淡水液压斜盘式轴向柱塞电机泵。西北工业大学刘卫国等^[11-13]对轴向柱塞液压电机泵结构和动态特性进行了分析,并利用有限元软件MagNet对液压电机泵进行了空载和负载状态下电磁场数值计算和分析。燕山大学高殿荣等^[14-16]对带有不同冷却流道的电机泵模型对应的空载和负载电磁场进行数值计算,研究结果表明,带有12个条形冷却流道的电机泵铁心不易饱和,谐波影响最小。

正是由于液压电机泵体积小、结构紧凑,无法实现常规电机在尾端加装风扇以冷却电机的结构形式,所以高度集成化的液压电机泵电机发热及冷却是亟待解决的一个热点问题。本文通过对液压电机泵的流场、电磁场及温度场进行多场耦合分析,对液压电机泵电机发热及自冷却特性进行研究,以期为应用在航空航天领域的新型高度集成化的液压电机泵发热特性及自冷却方式研究提供一定的理论依据。

1 液压电机泵几何模型

1.1 液压电机泵结构

传统的液压泵与驱动电机之间一般通过联轴器进行轴

收稿日期: 2023-05-11; 退修日期: 2023-08-09; 录用日期: 2023-09-07

基金项目: 航空科学基金(20170799001)

引用格式: Gao Dianrong, Sun Ya'nan, Zhuang Xin. Research on multi-field coupled self-cooling characteristics of hydraulic motor pump[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(10): 100-106. 高殿荣, 孙亚楠, 庄鑫. 液压电机泵多场耦合自冷却特性研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(10): 100-106.

向连接驱动,也有采用将驱动电机轴直接插入泵轴中心孔的驱动方式,本文所研究的液压电机泵通过将轴向柱塞泵与高速电机高度融合为一体,省去了驱动电机与轴向柱塞泵轴向联轴器,可以显著减小轴向尺寸,同时也能消除柱塞泵与驱动电机不同心所引起的振动、噪声以及额外的能量消耗,特别适合安装在航空航天等对空间紧密性要求较高的场合。

液压电机泵二维模型图如图1所示,图1中序号1~5分别为壳体、定子、转子、斜盘、活塞。

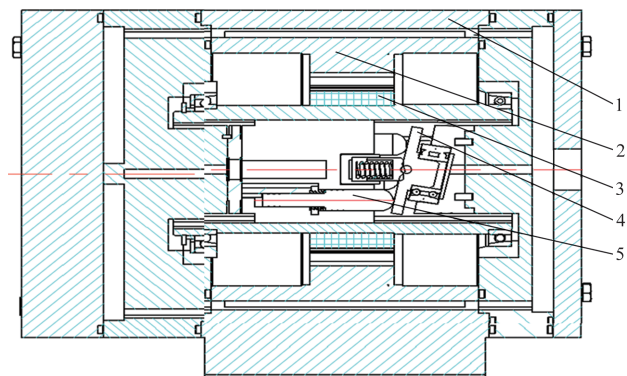


图1 液压电机泵内部结构模型

Fig.1 Diagram of hydraulic motor pump internal structure

1.2 自冷却流道结构

液压电机泵在运行过程中,低温油液在柱塞吸液作用下持续在壳体自冷却流道中持续流动,并带走液压电机泵在工作产生的热量,从而实现液压电机泵自冷却的目的,因此自冷却流道结构对液压电机泵稳定状态下整体温度场分布特性及自冷却特性具有重要影响。图2为液压电机泵壳体自冷却流道示意图,其主要结构参数包括周向分布流道个数、流道周向开角 λ_c 、流道径向宽度 w_c 、流道分布圆直径 D_c 及流道周向长度 L_c 。

2 液压电机泵电机特性分析

2.1 电机部分基本参数

液压电机泵中驱动电机采用调速永磁同步电机,调速永磁同步电机主要参数见表1。

2.2 电机部分损耗特性分析

调速永磁同步电机在工作过程中会不可避免地产生损耗,其来源主要包括定转子在电磁作用下的铁芯损耗(铁损)及绕组在电流作用下的损耗(铜损),这些损耗以热量的方式在电机内部传导扩散,导致电机整体温度不断升高,可能对液压电机泵整体的工作稳定性造成消极影响。因此,有必要对电机各部分损耗进行研究分析。

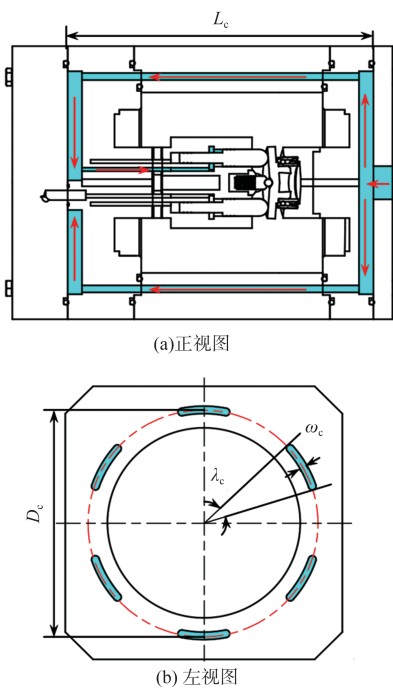


图2 液压电机泵壳体自冷却流道示意图

Fig.2 Schematic diagram of self-cooling flow path of hydraulic motor pump housing

表1 调速永磁同步电机主要参数

Table1 Main parameters of permanent magnet synchronous motor

基本参数	数值	基本参数	数值
额定电压/V	380	并联支路	1
额定功率/W	3000	线规/mm	1
额定电流/A	5.3	定子外径/mm	210
额定转速/(r/min)	1500	定子内径/mm	148
相数	3	铁芯材料	硅钢片
最高转速/(r/min)	1800	定子槽数	48
工作频率/Hz	100	铁芯叠厚/mm	60
极对数	4	定子绕组接法	Y
线圈匝数	30	转子外径/mm	142.8
绕组材料	漆包线	永磁体材料	钕铁硼
每极每相槽数	2	转子内径/mm	116

调速永磁同步电机定转子铁芯涡流损耗为

$$P_e = C_e A^2 f^2 B_m^2 V \tag{1}$$

磁滞损耗为

$$P_h = C_h f^2 B_m^n V \tag{2}$$

式中, C_e 为涡流损耗系数; C_h 为磁滞损耗系数; B_m 为最大磁通密度; A 为硅钢片叠压厚度; f 为电磁场变化频率。

调速永磁同步电机绕组产生的铜损为

$$P_c = mI^2 R \quad (3)$$

式中, I 为绕组单相额定电流; m 为电机相数; R 为绕组等效电阻。

2.3 电磁特性分析

在对电机特性进行分析时,根据表1所示的电机主要参数在软件 Ansys Electronics 电机模块中建立相应的电机模型,同时根据电机模型构建如图3所示的电机二维模型。

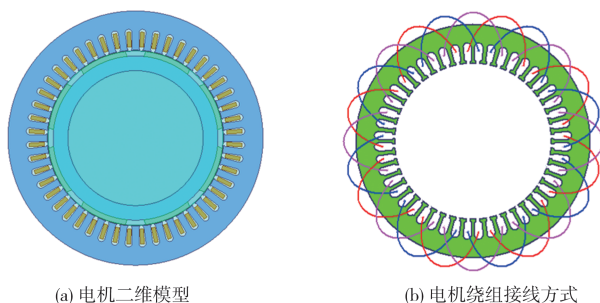


图3 调速永磁同步电机模型

Fig.3 Speed-regulated permanent magnet synchronous motor model

在经过对电机二维模型进行网格划分、边界条件赋予及额定工况加载之后,通过分析得到图4所示的调速永磁同步电机在额定工况下的磁力线及磁感强度云图。由图4(a)可知,在额定工况下该电机定转子部分磁力线分布合理均匀,最大磁力线磁通密度为0.025Wb/m,且相邻永磁体周围具有大小相同方向相反的磁力线分布,这符合电机的基本设计和运行规律,说明电机各参数的设计选定符合电机泵工作的基本要求。

由图4(b)可知,该电机定转子部分磁感强度分布云图与磁力线分布基本一致。同时由图4可知各永磁体沿中心径向方向对应的定子外表面及转子内表面处(图中红色圆框处)磁感应强度基本接近于0。转子磁场分布在旋转过程中基本不发生变化,即转子零磁感应强度位置是固定的,因此在保证电机自身工作性能不受影响的前提下,可通过在转子零磁感应强度位置开设冷却孔以进一步加强液压电机泵的自冷却性能。

3 泵摩擦发热损耗及温度场分析

3.1 摩擦发热损耗分析

3.1.1 定转子间液膜的黏性摩擦损耗

由于液压电机泵的定转子的间隙充满了液压油,当电机转子高速旋转时引起的定转子间隙中液压油的周向流动

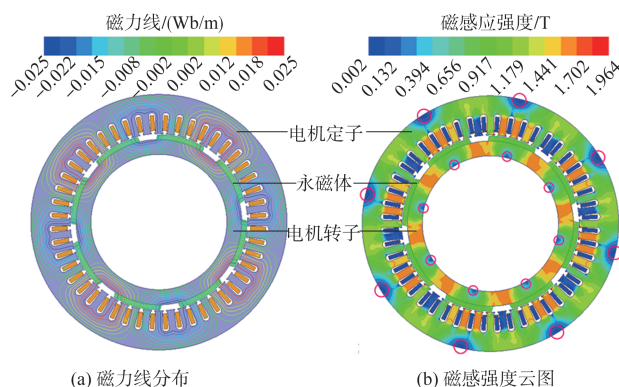


图4 额定负载下磁力线分布及磁感强度云图

Fig.4 Distribution of magnetic force lines and magnetic induction intensity contour under rated load

视为层流流动,则在液膜处产生的黏性摩擦损耗为

$$P_f = \mu \frac{2\pi\omega^2 r^3}{\Delta r} l \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中, μ 为油液动力黏度; ω 为电机旋转角速度; r 为电机转子半径; Δr 为气隙宽度; l 为电机转子轴向长度。

3.1.2 机械摩擦损耗

电机转子及其内部部件产生的机械摩擦损耗不可忽略,所产生的机械摩擦损耗为

$$P_b = \frac{\mu_b F_b D_b}{2} \omega \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中, μ_b 为轴承摩擦因数; D_b 为轴承内径; F_b 为轴承承载力。

3.2 多场耦合温度场分析

3.2.1 多场耦合分析前处理

对液压电机泵温度场特性进行分析时,在对电机部分电磁场损耗及摩擦损耗分析的基础上,将相应的损耗功率以发热源的形式添加到相应的发热部件上以对其流场及温度场进行耦合分析。表2所示为液压电机泵内部件材料属性。

用于温度场分析的液压电机泵几何模型网格划分结果如图5所示。网格划分完成后,对模型中各几何域进行相应的边界条件设定,其他参数采用默认设置,最后为液压电机泵部件设置材料属性。

3.2.2 网格独立性检验

为了同时满足液压电机泵温度场的模拟精度和减少计算所需时间,提高计算结果的可信性和准确信,需要对液压电机泵温度场模型网格划分结果进行网格独立性检验,以消除网格数量对计算结果的影响,网格独立性检验结果见表3。由表3可知,选定的5套温度场网格模型对液压电机泵机体最高温度影响非常小,总体影响偏差均在0.5%之

表2 电机泵内主要部件材料属性

Table 2 Material properties of main components in motor pump

	定转子铁芯	永磁体	定子绕组	壳体	冷却流道
材料	硅钢片	钕铁硼	铜	铝合金	油液
密度/(kg/m ³)	7700	7400	8933	2689	890
导热系数/(W/(m·K))	40	89.4	400	237.5	0.14
比定压热容/(J/(kg·K))	480	502	385	951	2093

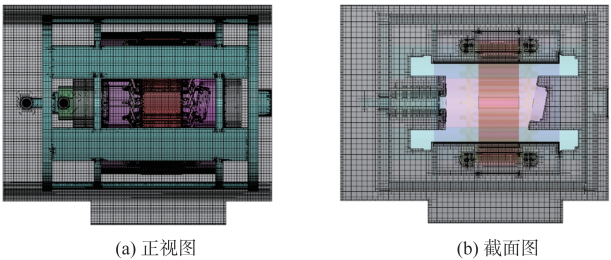


图5 电机泵温度场分析网格模型

Fig.5 Grid model for temperature field analysis of motor pump

表3 网格独立性检验

Table 3 Mesh independence verification

网格数量/($\times 10^4$ 个)	24.9	26.9	29.9	34.1	37.6
最高温度/°C	43.88	44.00	43.79	43.68	43.94
偏差/%	0.19	0.48	0.00	0.25	0.33

内。因此,选定表3中最小网格数对应的网格划分参数对液压电机泵温度场几何模型进行网格划分。

3.2.3 温度场分析

图6为液压电机泵整体温度场分布及各关键截面的温度场分布,其中序号1~6关键截面分别为径向后部端面、径向中部面、径向前部端面、径向尾部面、竖直轴向面及水平轴向面。

由图6(a)液压电机泵温度场分布图可知,该电机泵最高温度出现在电机定子周围,该位置对应壳体外侧最高温度达到26°C,同时液压电机泵整体温度分布由电机定子向其他区域均匀降低扩散,并在沿径向经过自冷却流道之后温度出现明显降低。同时由图6(b)液压电机泵各个关键截面的温度分布图可知,在额定工况下液压电机泵定转子区

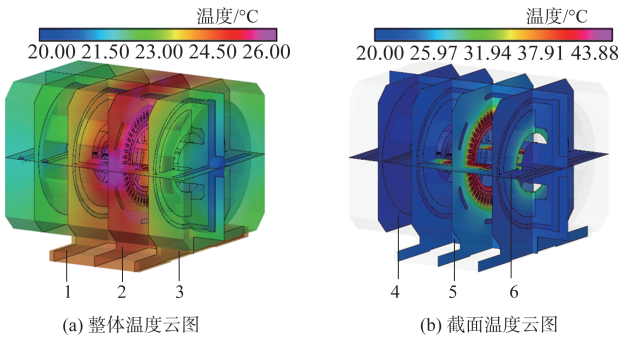


图6 温度场分布云图

Fig.6 Temperature field distribution contour

域温度较高,最高温度约为43.88°C,且沿各轴向截面和径向截面均匀扩散。

为了对液压电机泵关键截面温度场特性进行详细分析,分别选取图7、图8所示的径向尾部面、径向中部面、竖直轴向面及水平轴向面为观测面,对各观测面温度场特性进行分析。

图7为径向尾部面及径向中部面温度场特性。由图7可知,由于壳体导热性能较好,因此相较于流体域温升较大,具有较高的温度。同时由图7(a)可知,径向尾部截面流体域处温度分布较不均匀,这是由于图7(a)中红圈位置与自冷却流道接通,此处流体流动速度较大,在液压电机泵运行过程中有低温油液持续流过,从而使得该处流体温度较低,导致了此处温度分布不均匀。

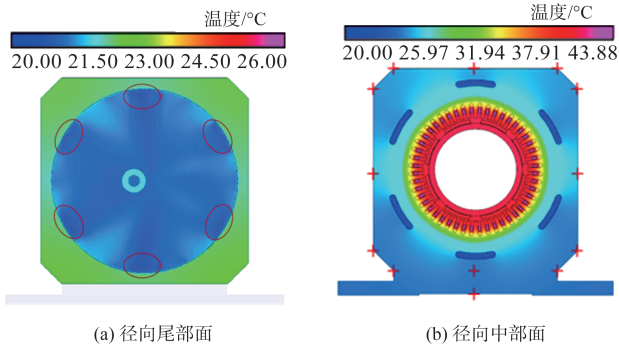


图7 径向尾部面及径向中部面温度场云图

Fig.7 Temperature field distribution contour of radial tail plane and radial middle plane

由图7(b)可知,液压电机泵在额定工况下最高温度出现在定子绕组部分,由电机定子及定子绕组产生的热量沿壳体及电机内部流体域均匀扩散,在沿壳体径向扩散过程中,经过自冷却流道后温度出现明显下降,而沿壳体径向经过不含自冷却流道部分,则具有较大温升,说明液压电机泵

内各部件间可实现热量的顺畅均匀传递。

图8为竖直轴向面及水平轴向面温度场特性。由图8可知,该液压电机泵最高温度出现在定子绕组处,约为43.88℃。同时从图8中可以发现,电机产生的热量在沿径向经过自冷却流道后明显降低,这说明自冷却流道在冷却过程中具有较好的冷却效果。图8(b)为水平轴向面温度场分布云图,由图8(b)可知,由于该截面没有自冷却流道通过,因此电机定子及其绕组产生的热量在壳体的传递过程中壳体的总体温升略高于竖直轴向面温度场分布,因此由电机传递至壳体外表面的热量较多,这使得该位置处温升较高,也同样说明自冷却流道在液压电机泵散热过程中的重要性。

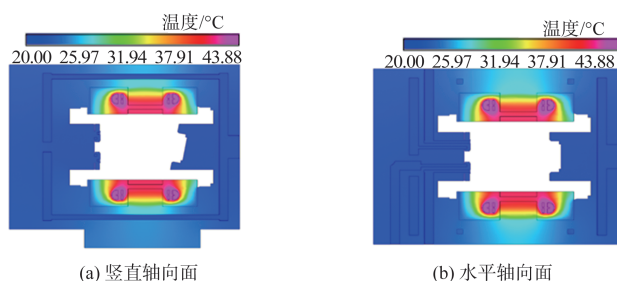


图8 竖直轴向面及水平轴向面温度场分布

Fig.8 Temperature field distribution contour of vertical axial plane and horizontal axial plane

竖直轴向面及水平轴向面自冷却流道温度场分布如图9所示。由图9可知,在电机定子区域的壳体部分温度较高,因此与自冷却流道内低温油液间的热交换较为剧烈,但同时发现在靠近自冷却流道径向中心位置温度变化较小。由图9(b)可知,低温油液由入口循环至出口时温度有一定上升,即在循环中低温油液能够将电机产生的热量带走。

为了更好地观察自冷却流道对液压电机泵壳体表面温度的影响,取图7(b)径向中部面所示壳体表面的13个监

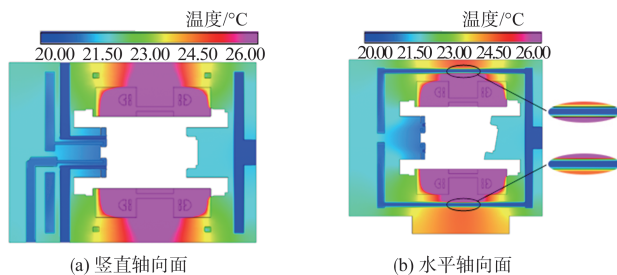


图9 竖直轴向面及水平轴向面自冷却流道温度场分布云图

Fig.9 Temperature field distribution contour of the self-cooling flow channel of the vertical axial plane and the horizontal axial plane

测点以观察液压电机泵在额定工况下壳体外表面的温度值情况,从而得到图10所示的液压电机泵壳体温度场曲线图。其中,X轴负方向为壳体左侧,正方向为壳体右侧;Y轴负方向为壳体底部,正方向为壳体顶部。

由图10可知,液压电机泵壳体沿电机定子径向外表面处左右两侧表面中心点温度最高,达到25.91℃,这是由于该位置对应的壳体内部没有自冷却流道通过,热量直接通过壳体传递至壳体表面。相对于壳体外表面左右两侧温度场特性,由于壳体顶部和底部内侧有自冷却流道存在,电机产生的热量在通过壳体时会与流道内低温油液发生热交换,因此壳体顶部和底部的温升较小。

同时,由于壳体底部面积较大,具有更大的散热长度和散热量,因此在图10中壳体底部具有更低的温度。由于液压电机泵径向中部面四条边的中心点相较于端点的散热距离较小,因此在额定工况下液压电机泵径向中部面各边中心点处具有更高的温升,即各边中心点温度均高于两端点温度。

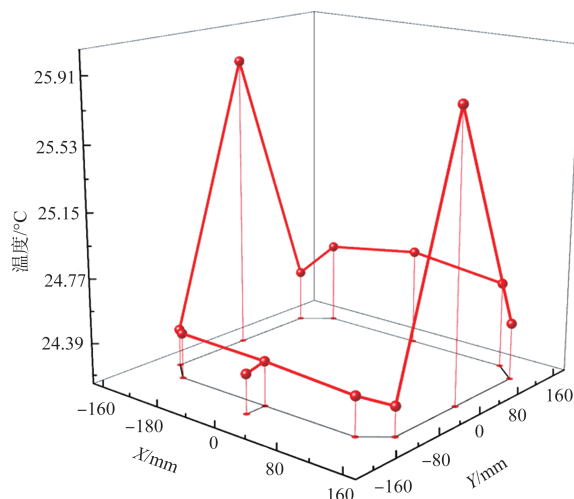


图10 液压电机泵壳体温度场曲线图

Fig.10 Temperature field curve diagram of hydraulic motor pump shell

4 结论

本文以新型高度集成化液压电机泵为研究对象,利用多场耦合方法对液压电机泵工作中的电磁场、流场、温度场进行耦合处理,并基于此开展了液压电机泵温度场特性及自冷却特性的研究分析。得出的主要结论如下:

(1)通过建立液压电机泵相应的电机模型,验证了所选取电机各参数的正确性。对液压电机泵工作过程中主要发

热部件进行了分析,构建了各发热部件损耗数学模型,并对电机电磁特性进行了分析。

(2)研究并建立了液压电机泵电磁热及流固热多场耦合作用机制及能量转换机理。

(3)通过研究自冷却流道在冷却过程中的影响特性,发现自冷却流道周围流体和该流体位置所对应的壳体温度会有所降低,从而证明了冷却流道在冷却过程中具有较好的冷却效果。

本文没有用物理样机的试验结果去验证仿真结果的正确性。未来将在仿真结果的基础上,用物理样机的试验结果与仿真结果对比来验证仿真结果的正确性,使本文的研究方法更具参考价值和意义。

AST

参考文献

- [1] 徐建新,许立敬. 基于流热固耦合的航空发动机涡轮叶片仿真分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 26-33.
Xu Jianxin, Xu Lijing. Simulation analysis on aero-engine turbine blades based on fluid-thermal-solid coupling[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 26-33. (in Chinese)
- [2] 王宏喆,甘醇,倪锴,等. 基于SMO和RLS的航空电推进永磁电机驱动系统[J]. 航空科学技术, 2023, 34(1): 97-104.
Wang Hongzhe, Gan Chun, Ni Kai, et al. Research on sensorless control of SPMSM in aviation electric propulsion drive system based on SMO and RLS[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(1): 97-104. (in Chinese)
- [3] 胡红林,凡佳飞,崔宗泰. 航空燃油泵入口回流抑制方法研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(11): 58-63.
Hu Honglin, Fan Jiafei, Cui Zongtai. Research on the suppression method of aviation fuel pump inlet backflow[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(11): 58-63. (in Chinese)
- [4] Manring N D. The discharge flow ripple of an axial-piston swash-plate type hydrostatic pump[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000, 122(2): 1-6.
- [5] Fomarelli F, Lippolis A, Oresta P, et al. A computational model of axial piston swashplate pumps[J]. Energy Procedia, 2017, 126: 1-8.
- [6] Norman B, Jan K, Jürgen W. Analysis and improvement of the suction performance of axial piston pumps in swash plate design[J]. International Journal of Fluid Power, 2014, 15(3): 1-15.
- [7] 付永领,李祝锋,安高成,等. 电液泵发展现状与关键技术综述[J]. 机床与液压, 2012, 40(1): 143-149, 160.
Fu Yongling, Li Zhufeng, An Gaocheng, et al. State of the art and core techniques of edropump[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2012, 40(1): 143-149, 160. (in Chinese)
- [8] 朱碧海,吴肖宇,牛壮,等. 水液压双斜盘轴向柱塞式电动机泵试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(2): 146-150.
Zhu Bihai, Wu Xiaoyu, Niu Zhuang, et al. Experimental research on the water hydraulic axial piston canned motor pump with double swash plate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(2): 146-150. (in Chinese)
- [9] 朱碧海,钱鹏程,姬增起. 双斜盘阀配流轴向柱塞式液压电机泵配流特性和变量原理的研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 220-234.
Zhu Bihai, Qian Pengcheng, Ji Zengqi. Research on the flow distribution characteristics and variable principle of the double-swashplate hydraulic axial piston electric motor pump with port valves[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 220-234. (in Chinese)
- [10] 朱碧海,牛壮,向鹏,等. 水液压柱塞式电机泵的试验研究[J]. 液压与气动, 2010(6): 74-75.
Zhu Bihai, Niu Zhuang, Xiang Peng, et al. Experimental research of water hydraulic piston motor pump[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2010(6): 74-75. (in Chinese)
- [11] 习仁国,刘卫国,肖息,等. 基于Matlab的永磁同步电机泵系统仿真与分析[J]. 航空计算技术, 2013, 43(3): 128-130.
Xi Renguo, Liu Weiguo, Xiao Xi, et al. Simulation and analysis of PMSM motor-pump system using Matlab[J]. Aviation Computing Technology, 2013, 43(3): 128-130. (in Chinese)
- [12] 陈焕明,刘卫国,宋受俊,等. 电液泵电磁场有限元分析与研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(3): 476-481.
Chen Huanming, Liu Weiguo, Song Shoujun, et al. Electromagnetic field analysis and research of electrohydraulic pump based on finite element method[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(3): 476-481. (in Chinese)
- [13] 习仁国,刘卫国,肖息,等. 电机泵系统动态性能仿真与分析[J]. 航空计算技术, 2013, 43(4): 129-131.

- Xi Renguo, Liu Weiguo, Xiao Xi, et al. Simulation and analysis of dynamic performance for motor-pump[J]. Aerospace Computing Technology, 2013, 43(4): 129-131. (in Chinese)
- [14] 高殿荣, 刘金慧. 交流伺服轴向柱塞液压电机泵效率分析与研究[J]. 液压与气动, 2011(1):55-59.
- Gao Dianrong, Liu Jinhui. The analysis and research of the efficiency of a new axial piston hydraulic motor pump[J]. Hydraulic and Pneumatic, 2011(1):55-59.(in Chinese)
- [15] 高殿荣, 王有杰, 陆向辉, 等. 基于CFD技术的新型轴向柱塞液压电机泵流场计算与分析[J]. 机床与液压, 2010, 38(5):4-8.
- Gao Dianrong, Wang Youjie, Lu Xianghui, et al. Computation and analysis of the flow field for the new type axial piston hydraulic motor pump based on CFD[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2010, 38(5):4-8.(in Chinese)
- [16] 高殿荣, 刘金慧, 温茂森. 轴向柱塞液压电机泵内部流场的分析[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(6):483-492, 500.
- Gao Dianrong, Liu Jinhui, Wen Maosen. Analysis of internal flow field of a new axial piston hydraulic motor pump[J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(6): 483-492, 500. (in Chinese)

Research on Multi-field Coupled Self-cooling Characteristics of Hydraulic Motor Pump

Gao Dianrong, Sun Ya'nan, Zhuang Xin

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: The new highly integrated hydraulic motor pump highly integrates the functions of the motor and the hydraulic pump. It has the advantages of compact structure and high energy conversion efficiency, and has broad application prospects and research significance in the field of aviation. However, the heating and cooling of the motor in the hydraulic motor pump have always been a problem that needs to be solved. By studying the heating mechanism of the motor in the hydraulic motor pump, a mathematical model of the flow field, electromagnetic field, and temperature field of the hydraulic motor pump was established. Through numerical simulation, the distribution of the flow field, electromagnetic field, and temperature field of the hydraulic motor pump and the coupling influencing factors were studied. It was found that the temperature of the fluid around the self-cooling flow channel and the corresponding temperature of the shell would be reduced. This provides some guidance for the design and self-cooling method of highly integrated hydraulic motor pumps that can be applied in the aviation field.

Key Words: highly integrated hydraulic motor pump; heating; self-cooling characteristics; multi-field coupling; electromagnetic loss

Received: 2023-05-11; **Revised:** 2023-08-09; **Accepted:** 2023-09-07

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20170799001)