

小型 NaK 热真空电磁泵设计 及其特性实验研究

毕可明, 陈 硕, 柴宝华, 刘天才, 杜开文, 卫光仁
(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究部, 北京 102413)

摘要:采用等效电路法设计了额定工作温度为 500 °C、额定流量为 11 m³/h、额定扬程为 30 kPa 的小型 NaK 热真空电磁泵。利用中国原子能科学研究院的 ATC-S_{NaK} 装置获取该电磁泵的工作特性曲线,并分析了工质温度、功率、运行频率对其运行特性的影响。结果表明,泵最优运行频率与 NaK 工质的温度相关。本文研究结果对泵的设计及运行程序的制定具有指导意义。

关键词: NaK 热真空电磁泵; 环形线性感应; 流量; 等效电路

中图分类号: TL353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2020)03-0512-08

doi: 10.7538/yzk.2019.youxian.0267

Design and Characteristic Experiment Research on Small NaK Thermal Vacuum Electromagnetic Pump

BI Keming, CHEN Shuo, CHAI Baohua, LIU Tiancai, DU Kaiwen, WEI Guangren
(Division of Reactor Engineering Technology Research,
China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: Equivalent circuit method was adopted to design a small NaK thermal vacuum electromagnetic pump of which the rated working temperature was 500 °C, rated flow rate was 11 m³/h and rated head was 30 kPa. The ATC-S_{NaK} facility of China Institute of Atomic Energy was used to obtain the operating characteristic curves of the electromagnetic pump. The influence of working medium temperature, power and operating frequency on the running characteristics of the pump was analyzed. The results show that the optimum operating frequency of the pump is related to the working medium temperature of the NaK, which is meaningful for the design of the pump and development of the operating procedure.

Key words: NaK thermal vacuum electromagnetic pump; annular linear induction; flow rate; equivalent circuit

热真空电磁泵是针对热真空环境条件设计的一类特殊电磁泵,基于三相环形线性感应电

磁泵(ALIP)^[1]原理的热真空电磁泵是目前研究的主要形式。ALIP 的基本工作原理与三相

鼠笼式异步电机相似,泵沟环形流道内的液态金属相当于电机的转子,定子铁芯中的三相绕组产生行波磁场,在泵沟环形流道内的液态金属中产生感应电流,电流和磁场间的相互作用力使液态金属按照行波方向产生运动趋势,并在泵进出口之间产生压差。与大气环境中工作的电磁泵散热条件不同,向背景辐射换热是其唯一的散热途径,其结果使得热真空电磁泵的整体温度很高,这与文献[2]中所描述的浸入式 Na 电磁泵所面临的温度环境相似,高温限制了有机材料的使用,所使用的金属和无机材料使其天然具备一定的耐辐照能力。如果热真空电磁泵设想应用场景为空间核电系统,其重量、外形尺寸都必须加以控制,显然线圈绝缘物厚度、结构材料密度及力学性能、真空热屏的厚度、导磁材料高温性能、工质的物性等均直接影响泵的重量、结构尺寸和性能。

本文基于空间核电源系统应用背景为设想,采用等效电路法设计并制造三相环形线性感应式小型 NaK 热真空电磁泵,并利用中国原子能科学研究院现有 ATC-S_{NaK} 装置开展性能实验,研究工质温度、功率、运行频率等参数对该泵性能的影响。

1 泵的基本结构

小型 NaK 热真空电磁泵的基本结构^[2]如图 1 所示,由泵沟、定子、励磁线圈、气密腔室 4 个总成构成。

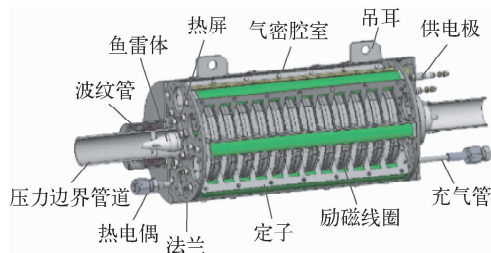


图 1 小型 NaK 热真空电磁泵的基本结构

Fig. 1 Basic structure of small NaK thermal vacuum electromagnetic pump

泵沟总成主要包括压力边界管道和鱼雷体,压力边界管道及鱼雷体水力外壳由 316 不锈钢制造,压力边界管道的外部设有小尺寸的真空热屏,以减小管道向定子、励磁线圈的传

热。鱼雷体内部装有由电工硅钢棒沿径向放射状开槽并在槽内填充电工硅钢片结构的中央导磁体。中央导磁体的作用是使行波磁场在泵沟内的磁力线沿径向和轴向方向对准,以便产生洛伦兹力驱动流体^[3]。单片定子呈梳状,采用无机绝缘硅钢片叠制而成,表面有陶瓷层覆盖,6 片定子通过螺栓固定在两侧法兰盘上,与轴向、径向定位法兰共同构成定子总成。励磁线圈总成被安装在定子的梳齿中,呈环状,内侧为陶瓷支撑环,外侧为带陶瓷涂层的金属卡箍,中间是由高温电磁线螺旋对绕形成的线圈。为增强线圈与定子间的绝缘,陶瓷纤维侧板被设置在线圈的两侧。气密腔室总成由 304 不锈钢制造,其内部充有一定压力的惰性气体,供电极和充气管位于气密腔室的一侧,热电偶位于另一侧。为应对热膨胀,气密腔室还拥有 1 个小型波纹管。定子轭部与气密腔室筒体内部有直接接触,能通过导热提高气密腔室表面的温度,以增强向背景环境的辐射散热。

小型 NaK 热真空电磁泵的设计遵循平衡原则^[4],如:高温环境下绝缘材料的绝缘系数较常温降低了几个数量级,所以泵的工作电压一般不高,通常在 150 V 以下,为保证输出功率,线圈匝数和电流则相对稍大,但线圈导体载流却较低,通常仅为 2~3 A/mm²,以降低线圈自身产热;泵沟真空热屏的设置,一定程度上增加了磁路无效气隙高度,降低了泵的效率,但电磁线圈工作温度的降低可大幅度提高泵的工作寿命。

2 设计参数

ALIP 有多种设计方法,本文采用了最常见的等效电路法。假定 ALIP 的三相电流是对称的,计算中仅使用了单相模型,但由于纵向端部效应,导致在输入三相电压基本相等的情况下,绕组中的电流分布实际上是不对称的^[5]。ALIP 的单相等效电路如图 2 所示。图 2 中, I 为等效输入电流, V 为等效输入电压, R_1 为等效初级电阻, X_1 为泄漏等效电抗, X_m 为磁化电抗, I' 为液态金属感应电流, R_2 为液态金属等效阻抗, s 为滑差率。初级部分主要包括电磁铁芯和线圈,次级部分则为泵沟中流动的液态金属。

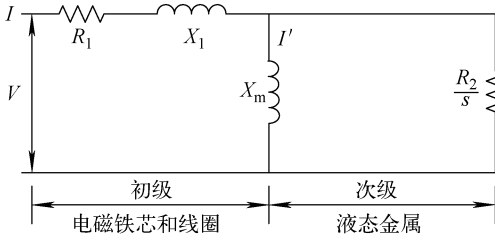


图2 ALIP 单相等效电路

Fig. 2 Single phase equivalent circuit of ALIP

等效电路中的等效变量由 ALIP 的几何参数和运行参数共同构成。由初、次级功率平衡可得出泵的扬程 ΔP 与流量 Q 间的关系:

$$\Delta P = \frac{3I^2 R_2 (1-s)}{Q \left(\frac{R_2^2}{X_m^2 s^2} + 1 \right)} \quad (1)$$

利用 Laithwaithe 公式整理得到等效电阻和电抗:

$$R_1 = \frac{\pi \rho_c q k_p^2 m^2 D_0 N^2}{k_f k_d p \tau^2} \quad (2)$$

$$X_1 = \frac{2\pi \mu_0 \omega D_0 \lambda_c N^2}{p q} \quad (3)$$

$$X_m = \frac{6\pi \mu_0 \omega \tau D_0 (k_w N)^2}{\pi^2 p g_e} \quad (4)$$

$$R_2 = \frac{6\pi D \rho_r' (k_w N)^2}{\tau p} \quad (5)$$

式中: ρ_c 为线圈导体的电阻率; q 为每极相槽数; k_p 为基波绕组短距系数; m 为输入功率相位数; D_0 为鱼雷体内铁芯直径; N 为线圈槽匝数; k_f 为槽填充系数; k_d 为基波绕组分布系数; p 为极对数; τ 为极距; μ_0 为真空磁导率; $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率; 中间变量 $\lambda_c = k_d (1 + 3\alpha)/12$, α 为弦因子; k_w 为绕组系数; g_e 为有效气隙宽度; D 为流体平均直径; ρ_r' 为液态金属的电阻率。利用上述公式, 整理得出:

$$\Delta P = \frac{36\sigma s f \tau^2 (\mu_0 k_w N I)^2}{p g_e^2 (\pi^2 + (2\mu_0 \sigma s f \tau^2)^2)} \quad (6)$$

$$\varepsilon =$$

$$\frac{6k_w^2 (1-s)}{\left(\frac{\rho_c q k_p^2 m^2 \sigma g_e}{k_f k_d \tau} \left(1 + \left(\frac{\pi}{2\mu_0 s f \sigma \tau^2} \right)^2 \right) + \frac{6k_w^2}{s} \right) \cos \psi}$$

$$(7)$$

式中: σ 为电导率; ε 为 ALIP 的效率; $\cos \psi$ 为功率因数。

通过式(6)和(7)可得到 ALIP 的运行特性曲线^[5]。基于具体的水力特性需求, 采用等效

电路法, 设计获得小型 NaK 热真空电磁泵的主要参数(表 1)。

表 1 主要设计参数

Table 1 Main design parameter

设计参数	设计值
水力参数	
流量 Q , m ³ /h	11
扬程 ΔP , kPa	30
滑差率 s , %	70
效率 ε , %	6
几何参数	
直径 T , cm	21.0
极距 τ , cm	16.8
内铁芯直径 D_0 , cm	3.0
极对数 p	1
泵芯有效长度 L , cm	33.6
有效气隙宽度 g_e , cm	0.815
电气参数	
电流 I , A	40
电压 V , V	40
有功功率 P , kW	1.4
槽匝数 N	35
频率 f , Hz	50
功率因数 $\cos \psi$	0.50
宏观参数	
质量 M , kg	40
总长 L_T , cm	68.6
最大直径 D_{\max} , cm	21.8
操作温度 T_{op} , K	570~800
接管口径 D_{IP} , cm	44

3 实验装置及过程

3.1 实验装置

性能测试在中国原子能科学研究院现有 ATC-S_{NaK} 装置上开展, 主要由回路系统、环境模拟真空室、电磁泵驱动电源、测量仪器 4 部分构成, 装置示意图如图 3 所示。

回路系统主要由电磁泵(小型 NaK 热真空电磁泵)、流量计、加热器、冷却器、膨胀罐、流量调节阀、热阱、真空泵、工艺管路、相关仪表及控制系统等组成。使用了自制的基于法拉第电磁感应原理的永磁流量计及由德国 FLEXIM 公

司生产的高温超声波流量计用于相互比对。加热器和冷却器用于回路工质的温度控制,稳态工况下工质的温度最高控制精度为 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。带有两支液位探针的膨胀罐位于回路的最高点,通过波纹管与回路管道最高点相连接,用于容纳回路内工质膨胀所产生的体积变化及通过氩气覆盖气体提供系统压力。流量调节阀为 Y 型波纹管液态金属调节阀,由电动机构驱动,通过 $4\sim 20\text{ mA}$ 信号对阀门开度进行控制,阀门的开度控制是开环的。热阱与流量调节阀并联,内部装有滤网和铅片卷,主要通过化学反应的方式将工质中的氧化物杂质去除^[6]。3 L/s 的小型真空泵设置在气路,用于回路氩气置换和工质的真空充装过程。回路主管道口径为 40 mm,和其他涉钠设备相同,由 316 不锈钢制造,并呈一定倾斜角度(约 3°)布置,使工质充排口位于最低点的同时膨胀罐接口位于最高点,管道转角采用弯管,以降低总阻力。除流量计外,回路上还安装有若干热电偶和压力传感器,热电偶是基于 Swagelok VCR 自制的,具有较薄的热偶阱壁和较快的响应速度,压力传感器由成熟的货架产品改造而来。

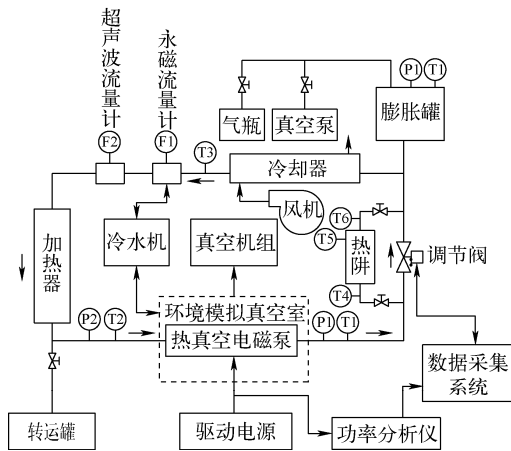


图3 ATC-S_{NaK}装置示意图

Fig. 3 Scheme of ATC-S_{NaK} facility

环境模拟真空室内尺寸为 $\phi 600\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$,其中直筒段长度为 600 mm ,两侧为椭圆型封头,直筒段水平位置中部及两侧封头 55° 角位置设有观察窗,同时拥有贯穿法兰若干,采用分子泵驱动,常温极限真空度优于 $5.0 \times 10^{-5}\text{ Pa}$,高温工作真空度优于 $3.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$,

可确保泵在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作时不发生氧化。真空室外壁由冷水机冷却,冷水机出口温度可在 $5\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内设定。

电磁泵驱动电源为三相变频形式,电源的前端和后端均设有隔离变压器,频率可在 $40\sim 100\text{ Hz}$ 范围内调节,电流输出范围为 $0\sim 70\text{ A}$,电压输出范围为 $0\sim 150\text{ V}$,可星形、角型连接。

测量仪器主要为功率分析仪和数据采集系统。功率分析仪为致远 PA3000,配有 50 A 电流采集卡 6 块,电机采集卡 1 块,可对电磁泵驱动电源的上下游同时进行电气参数测量与分析。数据采集系统基于 NI 公司的软硬件构建,用于实验相关数据的采集、分析与记录。软件基于 LabVIEW 开发,硬件包括 1 块使用 WIN7 操作系统的 PXIe-8840 控制器、4 块 PXIe-6358 模拟量同步输入卡、1 块 PXIe-4322 模拟量输出卡、1 块 PXI-6521 开关量输入/输出卡,均安装在 PXIe-1082 机箱中。信号处理采用 EW 光电隔离转换器,提供隔离能力的同时将与数据采集系统的交互信号统一转化为 $0\sim 10\text{ V}$ 。

3.2 实验过程

ALIP 的特性实验一般是在等电压(即变电压/工频方案)条件下开展^[7]。近年来,由于变频器的广泛使用,特性实验也常在等频率(即变频方案)条件下开展。本次实验采用了等有功率/频率(即变有功功率/变频方案)调节方案,这种选择更方便于 ALIP 的性能评价。

在 ATC-S_{NaK} 装置回路系统工质充装完毕后,将覆盖氩气压力调整至 $(0.05 \pm 0.01)\text{ MPa}$ 附近,依次开启环境模拟真空室的前级泵和分子泵,使真空室内压力 $\leq 7.0 \times 10^{-5}\text{ Pa}$,确认流量调节阀全开后,开启小型 NaK 热真空电磁泵开始性能测试,在冷却器和加热器的配合下,将工质依次升高至 $100, 200, 300, 400$ 和 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的实验温度。在上述工质温度下,通过流量调节阀开度调节回路阻力,分别获取泵在工作频率为 $40, 45, 50, 55$ 和 60 Hz ,有功功率为 $0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ 和 1.4 kW 条件下的扬程-流量曲线(即 $\Delta P-Q$ 曲线),实验共记录 125 组实验数据。在实验过程中,系统压力控制在 $0.05\sim 0.15\text{ MPa}$ 范围内,工质温度控制精度为 $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,有功功率控制精度为 $\pm 20\text{ W}$ 。

4 实验结果与讨论

实验中被记录的参数包括泵的线电压 V_a 、 V_b 、 V_c ，线电流 I_a 、 I_b 、 I_c ，平均线电压 V ，平均线电流 I ，有功功率 P ，功率因数 $\cos \psi$ ，频率 f ，回路温度 $T_1 \sim T_6$ ，泵出入口及系统压力 p_1 、 p_2 、 p_3 ，扬程 ΔP ，流量 Q ，阀门位置 Z_1 ，以及泵的电压谐波、电流谐波等。

实验中，泵效率为：

$$\epsilon = \frac{\Delta PQ}{\sqrt{3}VI \cos \psi} = \frac{\Delta PQ}{P} \quad (8)$$

利用等效电路法计算了扬程与体流量的关系，与实验结果的比对如图 4 所示。

4.1 温度影响

对于热真空电磁泵，温度影响主要体现在工质、线圈、导磁物质的物性参数变化上，工质和线圈的电导率及导磁物质的磁导率均具有负的温度系数。温度对热真空电磁泵性能的影响如图 5 所示，随工质温度的升高，泵的最高运行效率下降，最高效率点向左侧偏移，泵在 40 Hz 频率运行时，工质温度由 100 °C 升至 500 °C，最高效率下降了近一半，而在 60 Hz 频率运行时，则下降了约 1/3。

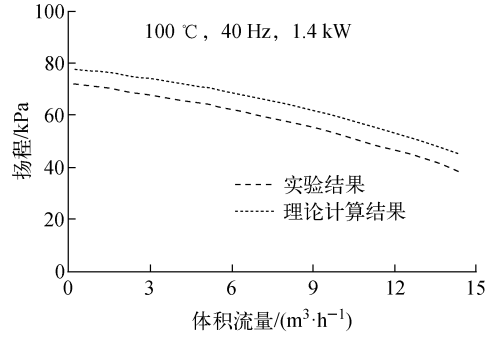


图 4 扬程理论计算与实验结果比对
Fig. 4 Comparison of head of theoretical calculation and experiment result

4.2 功率影响

功率对热真空电磁泵性能的影响如图 6 所示。在 100 °C、40 Hz 时，随运行功率的提高，泵的输出能力逐步变大，效率逐渐提高，最高效率点向右侧偏移。在 500 °C、40 Hz 时，随运行功率的提高，泵的运行效率先上升后下降，最高效率点先向左偏移后向右偏移。在 500 °C、55 Hz 时，随运行功率的提高，最高效率点向右偏移，在泵运行功率为 1.2 kW 与 1.4 kW 时，效率曲线的最高点几乎相同。在 500 °C、60 Hz

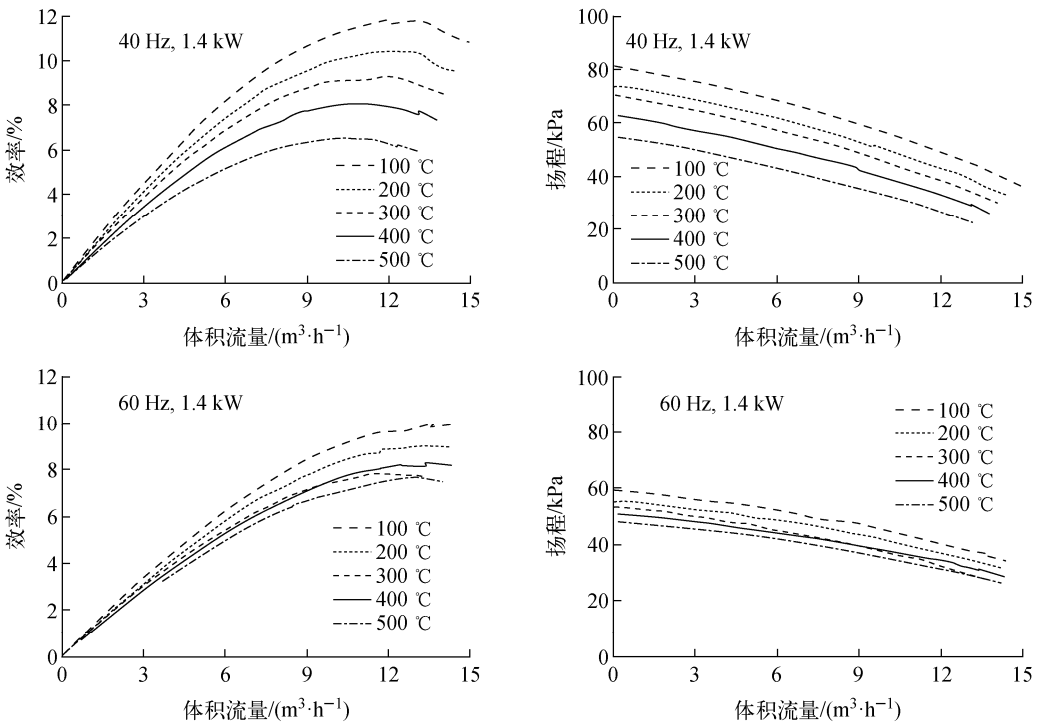


图 5 温度对热真空电磁泵性能的影响

Fig. 5 Effect of temperature on performance of thermal vacuum electromagnetic pump

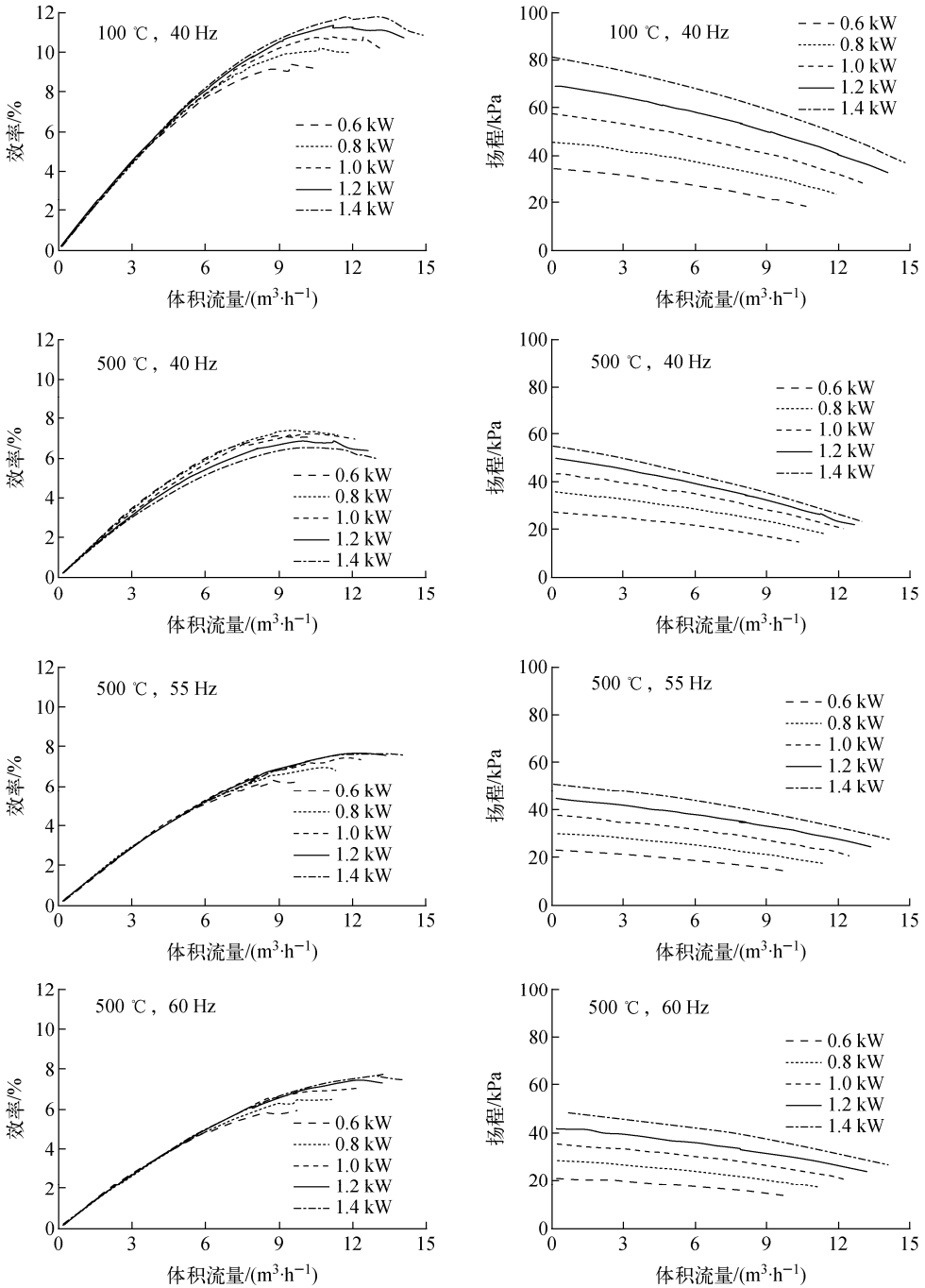


图 6 功率对热真空电磁泵性能的影响

Fig. 6 Effect of power on performance of thermal vacuum electromagnetic pump

时,随运行功率的提高,泵的运行效率逐渐提高,最高效率点向右偏移。在实验工况包络范围内,当工质温度、运行频率恒定时,泵的关阀扬程变化率与功率变化几乎呈固定系数,这一点与理论符合得较好。

4.3 频率影响

频率对热真空电磁泵性能的影响如图 7 所

示。在 100 °C、40~60 Hz 范围内,在工质温度、运行功率恒定时,随运行频率的提高,泵的水力效率逐渐下降,最高效率点轻微向右偏移, $\Delta P-Q$ 曲线斜率绝对值变小。随工质温度的提高, $\Delta P-Q$ 曲线斜率随运行频率的提高发生变化,使曲线较低温时扁平,泵的运行最高效率点所在的曲线频率由低向高偏移。直观地看:工

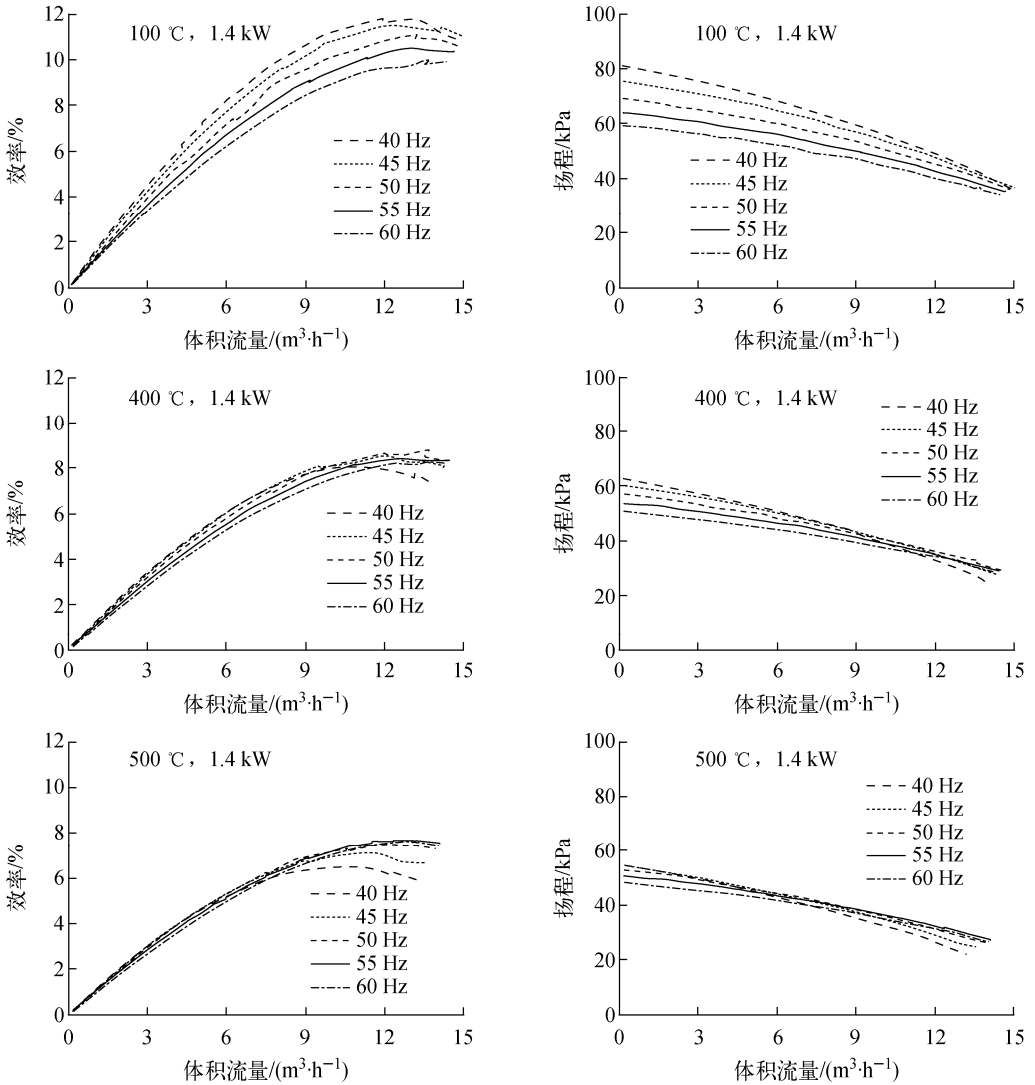


图7 频率对热真空电磁泵性能的影响

Fig. 7 Effect of frequency on performance of thermal vacuum electromagnetic pump

质温度为 100 °C 时, 泵的最高效率点发生在 40 Hz; 工质温度为 400 °C 时, 泵的最高效率点发生在 50 Hz 附近; 工质温度为 500 °C 时, 最高效率点则发生在 55 Hz 附近。

4.4 电气参数变化

热真空电磁泵的电气参数变化如图 8 所示。在 40~60 Hz 范围内, 当工质温度、运行功率恒定时, 泵的效率因数、工作电压随运行频率的升高而升高, 而工作电流则随运行频率的上升而下降, 且不论工质温度高低, 均呈现这一规律。本实验一个有趣的巧合是, 当运行功率为 1.4 kW, 泵运行在 100 °C/40 Hz、200 °C/45 Hz、300 °C/50 Hz、400 °C/55 Hz、500 °C/60 Hz 时, 功率因数曲线近乎重合。

5 结论

1) 利用等效电路法进行 ALIP 设计是理想化的, 它忽略了端部效应、壁面涡流加热效应、液态金属内感应电流分量等诸多影响因素, 使得理论计算值明显高于实验值, 设计时必须进行修正。

2) 主要由于工质物性随温度变化, 导致泵的运行效率随工质温度的上升而下降, 从常温至 500 °C, 下降了约一半。

3) 在工质温度较低时, 选择较低的运行频率可获取更高的推进能力及水力效率, 随工质温度的提高, 则需提高运行频率, 不同工质温度对应着不同的最优运行频率。

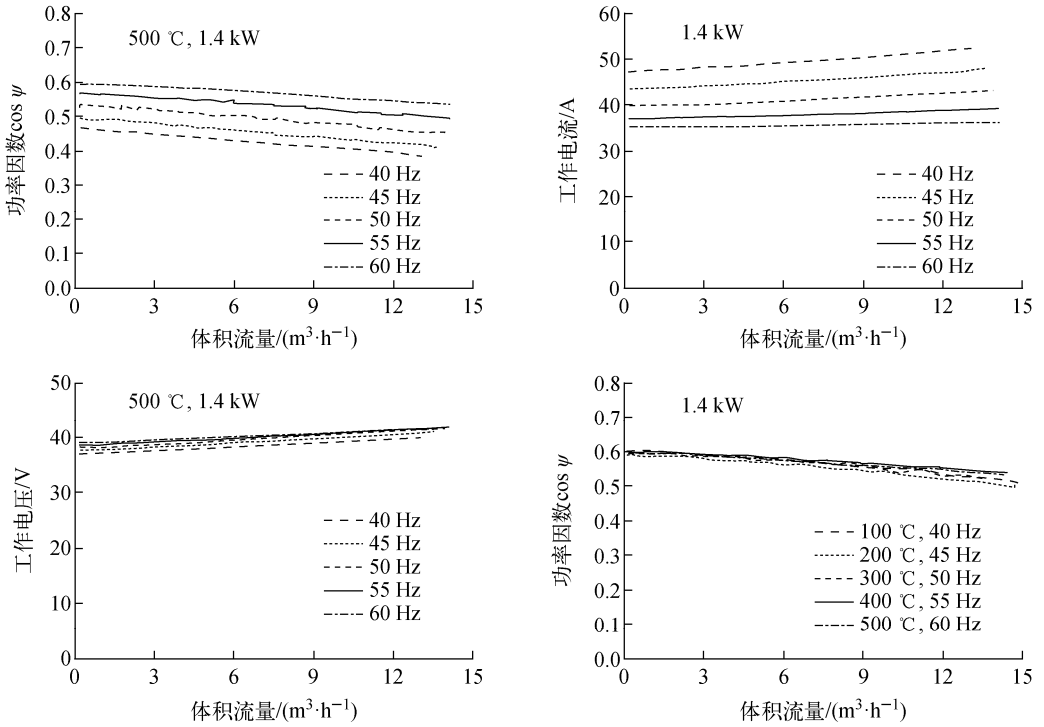


图 8 热真空电磁泵的电气参数变化

Fig. 8 Electrical parameter change of thermal vacuum electromagnetic pump

4) 泵的 $\Delta P-Q$ 曲线随运行频率的增加变得扁平, 高温时选择较高的运行频率会获得更高的功率因数及更低的工作电流, 可大幅减少线圈的自身发热。线圈平均温度降低, 可提高泵的使用寿命。

对于效率较低的小型 NaK 热真空电磁泵, 尤其考虑其在空间应用的场景下, 上述结论对于泵的设计及运行程序的制定具有重要指导意义。

参考文献:

[1] 丘京, 著. 液态金属电磁泵[M]. 严陆光, 译. 北京: 科学出版社, 1964.
 [2] 毕可明, 柴宝华, 赵守智, 等. 一种空间核环境用液态金属电磁泵: 中国, CN106451996A[P]. 2016-10-25.

[3] KIM H R, LEE Y B. A design and characteristic experiment of the small annular linear induction electromagnetic pump[J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38: 1 046-1 052.
 [4] WERNER J, ADKINS H. Electromagnetic pump fabrication and predicted performance[C]// Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space 2009. Atlanta GA: [s. n.], 2009.
 [5] KIM H R, HONG S H. Design and experimental characterization of an EM pump[J]. Journal of Korean Physical Society, 1999, 35(4): 309-314.
 [6] 《快堆研究》编辑部组译. 钠、钠钾工程手册: 第 V 卷[M]. [出版地不详]: [出版者不详], 1986.
 [7] 中国科学院力学研究所、上海电器科学研究所电磁泵小组. 液态金属电磁泵[M]. 北京: 科学出版社, 1979.