

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2020.10.012

医学信号处理与医学仪器

## 基于热流耦合的轴流式血泵温升影响因素研究

陈洪欢, 云忠, 胡及雨

中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083

**【摘要】**人工心脏已进入临床发展阶段,溶血现象是制约人工心脏长久使用的一大难题。不正常的温度条件会使红细胞的正常生理机能和形态发生改变,从而影响其携氧能力。为研究人工心脏正常运转时的温升情况,先利用Solidworks软件建立轴流式血泵的三维仿真模型,然后基于ANSYS Workbench软件对血泵整体进行热流耦合温度场仿真,探究了定子绕组相阻值、血泵转速、定子外壳和泵外壳之间的气隙导热系数以及血液导热系数对血泵及血液整体温升的影响。结果表明,在满足血泵供血要求的前提下,适当减小定子绕组相阻值、降低转速可有效降低血泵整体温升,而气隙物质和血液导热系数的变化对血泵整体温度的影响不是很明显。

**【关键词】**轴流式血泵;温度场仿真;温升影响因素;血液损伤;热流耦合

**【中图分类号】**R318.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)10-1281-06

### Analysis of factors affecting axial flow blood pump temperature rise based on thermal-flow coupling

CHEN Honghuan, YUN Zhong, HU Jiyu

School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract:** Artificial heart has entered the stage of clinical development, and hemolysis is a major problem restricting the long-term application of artificial heart. Abnormal temperature conditions will change the normal physiological function and morphology of red blood cells, thus affecting blood oxygen-carrying capacity. To study the temperature rise of artificial heart during normal operation, a three-dimensional simulation model of axial flow blood pump is established by Solidworks software. Then the simulation of thermal-flow coupling temperature field of the blood pump is carried out based on ANSYS Workbench software to explore the effects of different levels of stator winding phase resistance, rotate speed, air gap thermal conductivity between the stator shell and pump casing, and the thermal conductivity of blood on the global temperature rise of the blood pump and blood. The results indicate that under the premise of supplying adequate blood, the appropriate reductions of stator winding phase resistance and rotate speed can effectively reduce the global temperature rise of the blood pump, while the changes of the thermal conductivities of air gap materials and blood only have trivial effects on the global temperature of the blood pump.

**Keywords:** axial flow blood pump; temperature field simulation; factors affecting temperature rise; blood damage; thermal-fluid coupling

### 前言

人工心脏是一种辅助或代替衰弱心脏完成泵血

功能的机械装置。经过几十年的发展,人工心脏在临床上已进行了成功应用<sup>[1-5]</sup>,但仍存在一些限制其长久使用的问题。血泵运转时过高的温升会导致红细胞正常功能受损,从而导致溶血<sup>[6-7]</sup>。在温升研究方面,Marignetti等<sup>[8]</sup>对永磁电机内流场、温度场分别进行了仿真,详细地分析了电机内一些边界的热交换,为电机温度计算提供了良好的参考依据;Li等<sup>[9]</sup>建立了微型水冷感应电机模型,根据流体相似准则计算了底盘水冷套的热交换系数,并对电机进行了温度场稳态仿真分析;Dorrell等<sup>[10]</sup>分析了永磁电机和感应电机的电磁热耦合温度。然而,以上研究主要集中在电机上,对泵内的轴承和叶轮的温升场分

**【收稿日期】**2020-04-20

**【基金项目】**国家自然科学基金(31670999);浙江省重中之重学科开放基金(GK170201201003/002);湖南省自然科学基金(2019JJ40364);湖南省教育厅项目(15C0544)

**【作者简介】**陈洪欢,硕士研究生,主要研究方向:生物关联性机械系统设计及仿真,E-mail: sharllow@163.com

**【通信作者】**云忠,教授,博士生导师,研究方向:微生物机械系统设计及仿真、机电一体化装置设计,E-mail: yunzhong@126.com

析甚少,泵内流体与泵相互作用而影响泵的温度研究也较少。血泵在人体运转过程中,会将热量传递到血液,引起血液温升,另一方面血液又对血泵起到冷却作用,因此研究血泵与血液之间的传热机制对控制血泵温度,降低温度对血细胞的损害具有重要作用。本文在泵机一体式轴流血泵的基础上<sup>[11]</sup>,对血泵整体进行热流耦合温度场仿真,以探究不同因素对血泵温度场和血液温升的影响规律,对血泵设计的优化起到参考作用。

## 1 热流耦合理论计算模型

### 1.1 血泵温度场求解数学模型

根据血泵结构的对称性和电机导热特点,对血泵温度场做如下假设:(1)忽略永磁转子集肤效应;(2)不计血泵内部辐射;(3)血泵内部热源材料各向同性,分布均匀。

血泵计算区域三维稳态传热数学模型如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v = 0 \quad (1)$$

其中, $k_x, k_y, k_z$ 分别为导热介质在 $x, y, z$ 和边界法线方向的导热系数,单位为 $W/(m \cdot K)$ ;  $q_v$ 为单位介质体积发热率,单位为 $W/m^3$ ;  $T$ 为模型计算区域温度,单位为 $^{\circ}C$ 。

对应的边界条件为:

$$\begin{cases} -k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_s} = \alpha (T - T_f) \\ T|_{S_j} = T_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $k$ 为导热系数,单位为 $W/(m \cdot K)$ ;  $\alpha$ 为表面的对流换热系数,单位为 $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ ;  $T_f$ 为对流换热面周围流体的温度;  $S_s$ 为对流换热面;  $S_j$ 为绝热面;  $T_1$ 为初始温度。

根据变分原理可知,液体的连续性方程的泛函为:

$$J(T) = \frac{1}{2} \int_V \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dV - \int_V T q_v dV + \frac{1}{2} \alpha \int_{ss} (T - 2T_f) T dS_s \quad (3)$$

其中, $V$ 为求解域;  $S$ 为边界面,由绝热面和对流换热面组成,即 $S=S_s+S_j$ 。

对上述变分问题离散后,最终可得到三维温度场有限元方程为:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{F} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{K}$ 为整体温度刚度矩阵;  $\mathbf{T}$ 为未知节点温度列向量;  $\mathbf{F}$ 为节点温度的载荷列向量。

### 1.2 血泵流场求解数学模型

血液一般由水、可溶性气体、无机化合物、糖类、蛋白质、脂类等有机物质以及各类细胞组成,其体积弹性模量和水相似,为了简化流场分析,不考虑血液在体内循环过程对血泵温升的影响,将血液视为不可压缩粘性流体,即密度为常数,则其对应的质量守恒方程可简写为:

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (5)$$

其中, $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ 为哈密顿微分算子;  $\rho$ 为流体密度( $kg/m^3$ );  $\vec{u}$ 为血液流速。

其动量守恒方程可简写为:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla \tau \quad (6)$$

其中, $p$ 为流体微元体上的压强,单位为 $Pa$ ;  $\tau$ 为微元体受到的切应力,单位为 $Pa$ 。

能量守恒定律本质是热力学第一定律,其方程为:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla[\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{eff} \vec{u})] + S_h \quad (7)$$

其中, $k_{eff}$ 为有效热传导系数,单位为 $W/(m \cdot K)$ ,  $k_{eff} = k + k_t$ ,  $k_t$ 为湍流热传导系数,其值由所用的湍流模型来确定;  $E$ 为流体微团的总能,单位为 $J/kg$ ,包含内能、动能和势能之和,  $E = h - p/\rho + \vec{u}^2/2$ ,  $h_j$ 为组分 $j$ 的焓,单位为 $J/kg$ ;  $S_h$ 为包括了化学反应热及其他用户定义的体积热源项;  $J_j$ 为组分 $j$ 的扩散通量。

## 2 血泵热流耦合温度场仿真

血泵各部分与血液的接触面存在对流换热,考虑到两者的耦合关系,流体仿真时需要把固体以及固体热源加入到流体仿真软件中,从而将血液与血泵的对流换热数值加载到固体温度场仿真的边界条件中,实现血泵三维温度场的仿真求解分析。

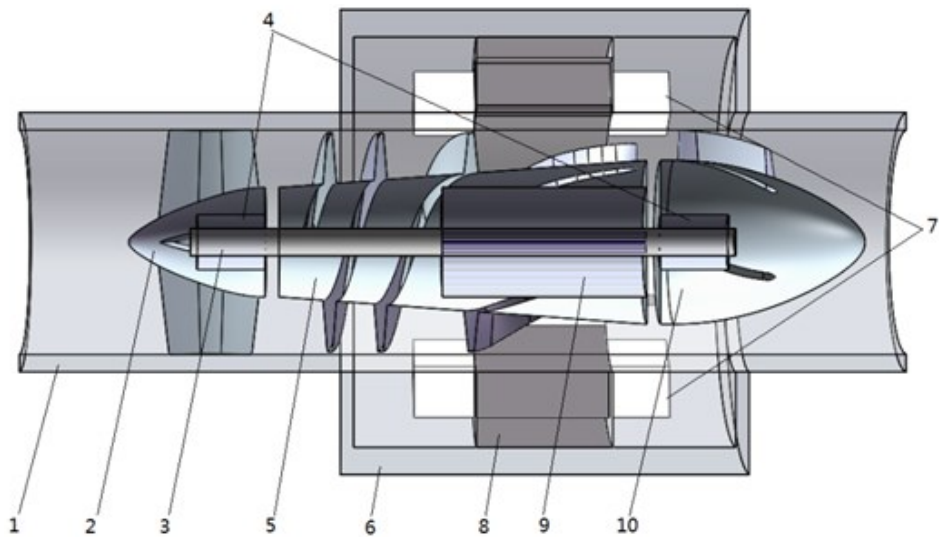
### 2.1 血泵三维仿真模型建立

血泵三维整体模型分为两个部分,一个是驱动电机部分:包括定子铁芯、定子绕组、永磁转子以及定子外壳;另一个是血液流动区域:包括前后导轮及其导叶、旋转叶轮、轴承以及泵壳。血泵结构建模图如图1所示。

### 2.2 血泵热流耦合仿真参数设置

从 ANSYS Workbench 中调出 Fluid Flow (Fluent) 模块和 Steady-State Thermal 模块,将 Fluent 模块的“Geometry”和“Solution”与 Thermal 模块的“Geometry”和“Setup”相连接完成初步设置。

根据文献[12]中实验数据,线性拟合得到转速 $n$ 与电流 $I$ 和流量 $Q$ 的关系如式(8)和式(9)所示:



1-泵外壳 2-前导轮 3-杆轴 4-轴承 5-叶轮 6-定子外壳 7-定子绕组 8-定子铁芯 9-永磁转子 10-后导轮

图1 轴流式血泵整体结构

Fig.1 Structure of axial flow blood pump

$I = 0.000\ 3n - 1.113$  (8)

$Q = 0.000\ 6n - 1.694$  (9)

2.2.1 Fluent 流场仿真参数设置 由于温度会对血液的对流换热系数产生影响,所以在做流场分析的时候把固体也导入Fluent中并设置为热源。(1)模型设置:湍流模型为k-ε模型,并打开能量方程;(2)材料属性设置:分别设置固体部分的材料参数,流动介质为血液,其相关参数参考文献[13]设置如表1所示;

(3)载荷及边界条件设置:人体每分钟搏出平均流量约4 000 mL/min,设置速度入口为0.308 m/s,温度为37 ℃,出口条件设置为outflow;设置叶轮转动区域运动类型“Moving Reference Frame”,转速为9 000 r/min;将热源部分设置为生热率体载荷;在“Mesh Interfaces”中设置固-固接触面和流-固耦合界面,主要用于接触面上温度数据的传递。

表1 血泵各部分材料特性参数

Tab.1 Material characteristics of various parts of the blood pump

部件	材料	导热系数/W·(m·℃) <sup>-1</sup>	密度/kg·m <sup>-3</sup>	比热容/J·(kg·K) <sup>-1</sup>
转轴	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 陶瓷	12.56	3 440	710
永磁转子	钕铁硼N <sub>52</sub>	6.16	7 885	430
叶轮	Ti <sub>4</sub>	22	4 500	520
血液	-	0.547 1	1 050	3 840
定子铁芯	DW310-35	21	7 650	446
铜线	铜	385	8 933	385
绝缘层	浸渍漆	0.217	1 000	1 805
泵壳	钛合金	6.8	4 510	611
气隙	空气	0.027	1.29	1 007

2.2.2 Thermal 固体域温度场仿真参数设置 (1)材料属性设置:根据表1中材料参数设置血泵固体域中各部分的密度、导热系数和比热容;(2)网格划分:采用系统自由网格划分方式,热源部分和交界处将网格细化;(3)载荷及边界条件设置:加载流场耦合面分

析的对流换热结果文件,设置各部分的热源生热率,泵外壳设置对流换热系数为14.2 W/(m<sup>2</sup>·℃),环境温度设为37 ℃,计算求解,得到血泵温度场分布及血液温度场分布如图2所示。  
其中血泵温度最高区域达到49.635 ℃,血液在

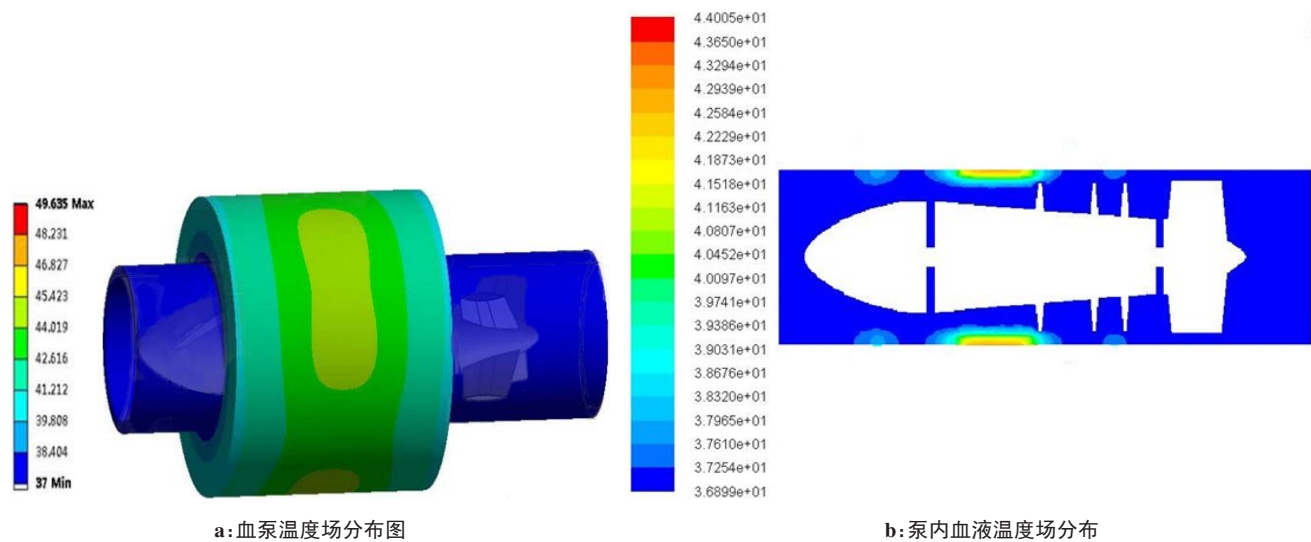


图2 血泵及血液温度场分布图

Fig.2 Blood pump and blood temperature field distribution

紧贴血泵外壳区域达到最高温度 44.005 ℃,而在血液与导轮及叶轮接触面附近区域,血液温度接近环境温度(37 ℃),这是由于叶轮和导轮本身发热较小,且流速较大(最高达 11.2 m/s),在血液对流换热的作用下,其温升相对较小。

3 相关因素对血泵温度场的影响仿真分析

温度会影响红细胞的携氧能力,结合赵玉衡等<sup>[14]</sup>和 Utoh 等<sup>[15]</sup>对红细胞在不同温度下的理化性质的研究,在仿真分析时将血液损伤临界温度值定为 43 ℃。

3.1 转速对血泵温度场的影响

取定子绕组相阻值为 5.4 Ω,改变叶轮转速分别为 5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000、12 000 r/min,仿真分析得到不同转速下血泵导轮、叶轮、血泵定子绕组、定子铁芯和血液的温升情况如图 3 所示。可知,随着转速的增加,血泵各部分温升均随之增大,血泵转速在 9 000 r/min 附近时,血泵整体温升的变化趋势也随之变大。当血泵转速为 8 000 r/min 时,定子绕组最高温度为 43.474 ℃、定子铁芯为 41.034 ℃、血液为 40.617 ℃、叶轮为 37.454 ℃。

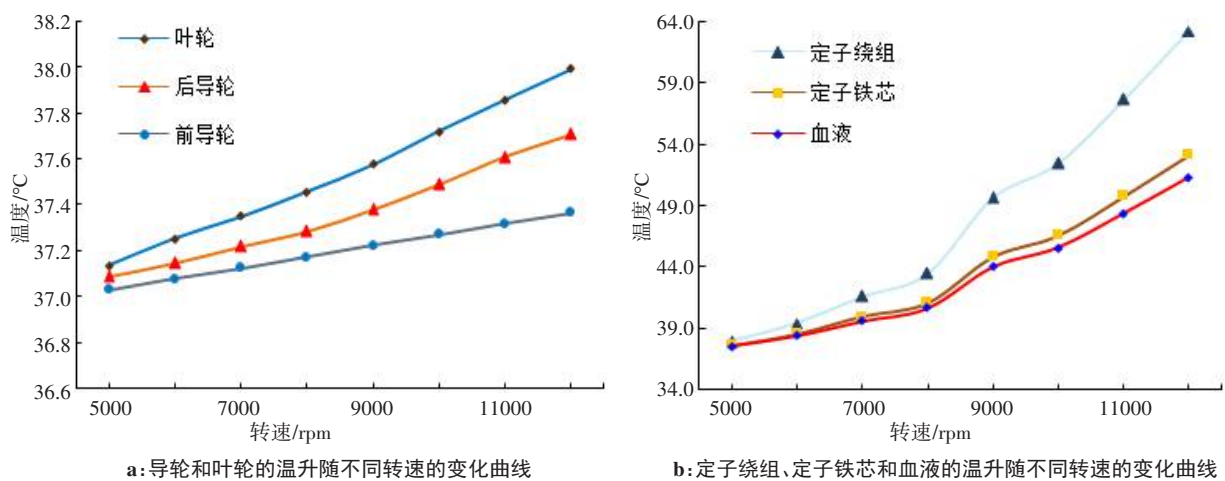


图3 转速对血泵温度场的影响

Fig.3 Effects of rotate speed on blood pump temperature field

3.2 绕组相阻值对血泵温度场的影响

血泵转速为 9 000 r/min 时,改变定子绕组相阻值分别为 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0、5.5 Ω,仿真得到血液及血泵各部分的温升随绕组相阻值的变化曲线如图 4 所示。可知,导轮、叶轮、定子绕组、定子铁芯

和血液的温度随着绕组相阻值的增大而增大,近似呈一次函数关系。当绕组相阻值低于 4.5 Ω 时,血液温度保持在 42.867 ℃ 以下,即血液温度在 43 ℃ 范围内,未达到血液损伤的临界值。



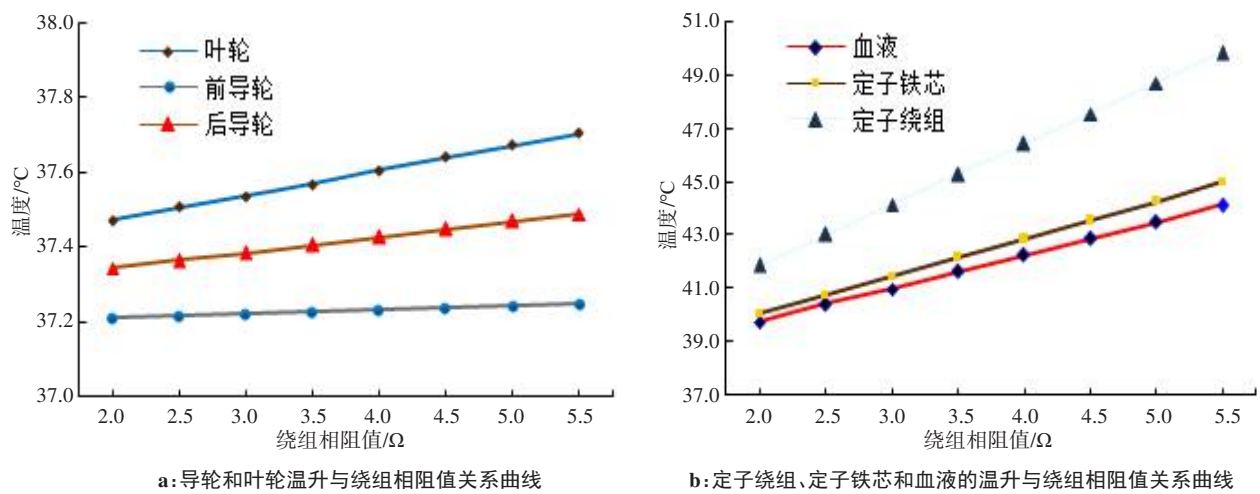


图4 绕组相阻值对血泵温度场的影响  
Fig.4 Effects of stator winding phase resistance on blood pump temperature field

3.3 气隙间物质对血泵温度场的影响

定子铁芯与定子外壳之间存在气隙,气隙物质的导热系数也会对血泵温度场产生一定的影响。取叶轮转速为9 000 r/min,绕组相阻值为4.5  $\Omega$ ,改变气隙物质的导热系数范围为0.1~1.0 W/(m $\cdot$  $^{\circ}\text{C}$ ),分析定子绕组、定子铁芯和血液的温度随气隙物质导热系数改变的变化情况,如图5所示。可知,随着气隙物质导热系数的升高,定子绕组、定子铁芯和血液的温度均有所下降,但其值从0.1~1.0 W/(m $\cdot$  $^{\circ}\text{C}$ )变化时,血液温升不超过1  $^{\circ}\text{C}$ ,对血泵整体温度的影响并不是很明显。

3.4 血液导热系数对血泵温度场的影响

人体血液主要由血浆和血细胞组成,血液成分的变化会引起血液导热系数的改变。取叶轮转速为9 000 r/min,绕组相阻值为4.5  $\Omega$ ,血液导热系数从0.1~1.0 W/(m $\cdot$  $^{\circ}\text{C}$ )变化时,得到图6血泵各部分及血液的温度变化曲线,虚线为泵外壳内壁对流换热系数随血液导热系数变化曲线。

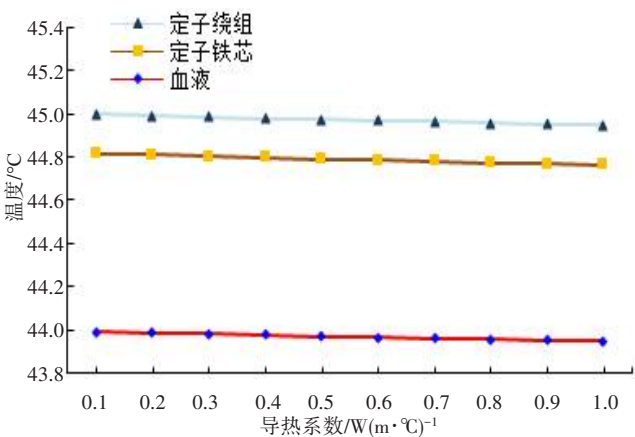


图5 气隙物质导热系数对血泵温度场的影响  
Fig.5 Effects of the thermal conductivity of air gap materials on blood pump temperature field

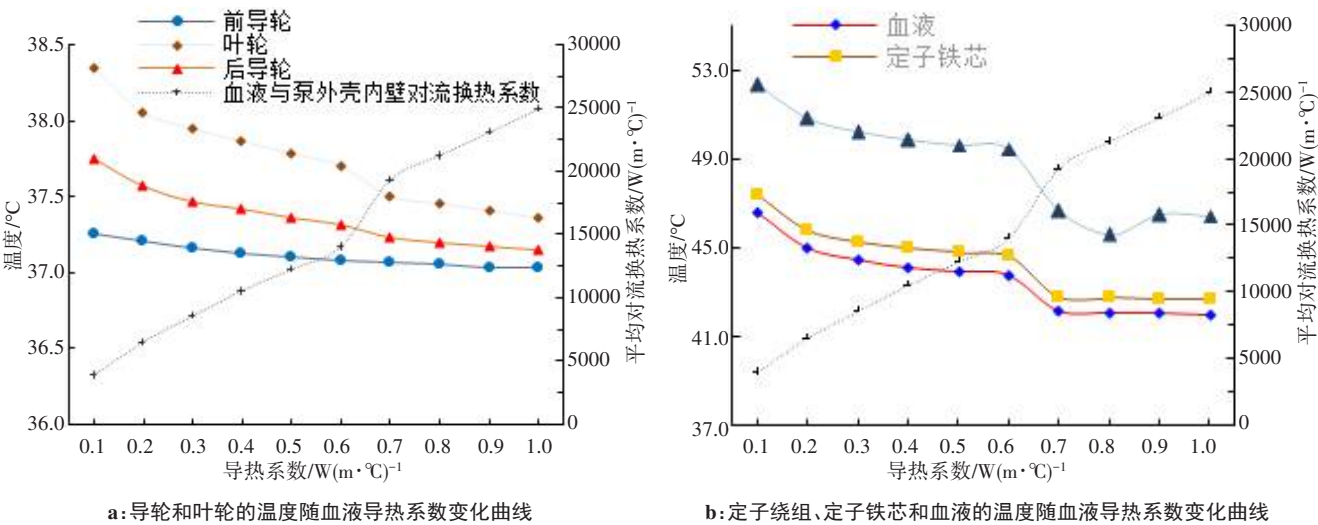


图6 血液导热系数对血泵温度场的影响  
Fig.6 Effects of the thermal conductivity of blood on blood pump temperature field

随着血液导热系数的增大,血液与泵外壳内壁的对流换热逐渐上升,血泵中各部件的温度逐渐降低,血液导热系数从 $0.6\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 到 $0.7\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 变化时,血液与泵外壳之间的对流换热系数骤增,从而导致此范围内,血液温度大幅下降。当血液导热系数为 $0.7\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 及以上时,其仿真温度保持在 $43^{\circ}\text{C}$ 以内。

#### 4 讨论

由以上分析可知,血泵温升较大的区域主要集中在定子铁芯、定子绕组部分,前、后导轮及叶轮发热不大,基本不超过 $38.5^{\circ}\text{C}$ ,始终保持在 $43^{\circ}\text{C}$ 之下。定子外壳和泵外壳之间的气隙导热系数以及血液导热系数的提高都有利于降低血泵整体温升,但定子外壳和泵外壳之间的气隙导热系数对温升的影响较小,且不易人为干预。绕组相阻值对血泵整体温升有较大影响,减小绕组相阻值可以有效降低系统温升,设计时考虑选择横截面较大、电阻率低的铜线;绕线方式可采用机器绕线,以保证绕线准确,避免因绕线错位而导致的绕组长度增加。血泵转速越高,需要的定子绕组相电流值越大,温升越大。定子绕组相阻值为 $5.4\ \Omega$ 时,转速需控制在 $8\ 000\text{ r}/\text{min}$ 内,考虑到血泵正常工况下的供血量需求,可采取减小叶轮轮毂比、降低叶轮叶顶间隙、降低叶轮进出口轴径比和减小叶轮叶片安装角度等方法,以增大血泵流量。

#### 【参考文献】

- [1] MIN B G. Applications of artificial heart research to the life-saving device[J]. *Artif Organs*, 2013, 37(7): 587-590.
- [2] ABSHIRE M, DENNISON C R, RUSSELL S D. Functional status in left ventricular assist device-supported patients: a literature review[J]. *J Card Fail*, 2014, 20(12): 973-983.
- [3] POHLMAN A, LEßMANN M, FRITSCHI A, et al. Experimental validation of the linear drive train for a total artificial heart system[J]. *Mechatronics*, 2013, 23(2): 222-226.
- [4] MILANO C A, SCHRODER J, DANESHMAND M. Total artificial heart replacement with 2 centrifugal blood pumps[J]. *Operative Tech Thorac Cardiovasc Surg*, 2015, 20(3): 306-321.
- [5] KATO H, GANDHI S K. Use of berlin heart ventricular assist devices as a total artificial heart[J]. *J Thoracic Cardiovasc Surg*, 2018, 156(2): 743-745.
- [6] ARAUJO P, BJØRKKJÆR T, FRØYLAND L, et al. Effect of storage time, temperature, antioxidant and thawing on fatty acid composition of plasma, serum and red blood cells-A pilot biobank study[J]. *Clin Biochem*, 2018, 52: 94-105.
- [7] XIE H W, ZHANG Y. The effect of red blood cells on blood heat transfer[J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2017, 113: 840-849.
- [8] MARIGNETTI F, COLLI V D, COIA Y. Design of axial flux PM Synchronous machines through 3-D coupled electromagnetic thermal and fluid-dynamical finite-element analysis[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2008, 55(10): 3591-3601.
- [9] LI C P, PEI Y L, NI R G, et al. Analysis of 3D static temperature field of water cooling induction motor in mini electric vehicle[C]. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE, 2011: 1-5.
- [10] DORRELL D G. Combined thermal and Electromagnetic analysis of permanent-magnet and induction machines to aid calculation[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2008, 55(10): 3566-3574.
- [11] 胡及雨, 云忠, 向闯, 等. 轴流血泵电机温度场分析及其对血液和组织的损伤[J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(12): 1254-1260.  
HU J Y, YUN Z, XIANG C, et al. Temperature field analysis for axial flow blood pump motor and damages of increased motor temperature to blood and tissue[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2017, 34(12): 1254-1260.
- [12] 谭卓. 大气隙永磁轴流式血泵磁力传动系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
TAN Z. Magnetic drive system research of permanent axial blood pump in large air gap[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [13] 朱光明. 生物组织传热及其若干应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.  
ZHU G M. Study of bio-heat transfer for some practical applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [14] 赵玉衡, 张晓华, 曹石. 温度对红细胞变形性的影响[J]. *北京医科大学学报*, 1994, 30(4): 279-280.  
ZHAO Y H, ZAHNG X H, CAO S. Effect of temperature on the deformability of red blood cells[J]. *Journal of Beijing Medical University*, 1994, 30(4): 279-280.
- [15] UTOH J, HARASAKI H. Damage to erythrocytes from long-term heat stress[J]. *Clin Sci (Lond)*, 1992, 82(1): 9-11.

(编辑:薛泽玲)