

大间隙磁力传动系统能量传递效率

刘云龙¹, 谭建平¹, 许焰^{1,2}, 刘志坚¹, 祝忠彦¹

- (1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 长沙大学 机电工程系, 湖南 长沙, 410003)

摘要: 为了解大间隙、高转速条件下磁力传动系统的能量传递规律, 研究行波磁场驱动的大间隙磁力驱动技术; 通过微型轴流式血泵外磁场驱动, 对大间隙磁力驱动系统各部分能量耗散进行研究, 建立系统能量传递效率的数学模型。通过轴流式血泵泵水实验, 得到血泵在耦合距离 20 mm 和 30 mm 时的最大能量传递效率, 即磁力传动系统的最佳工作点, 并通过与理论解析值相比较, 得到大间隙磁力驱动系统的能量传递效率的变化趋势, 确定磁力驱动系统能量传递效率的主要影响因素, 为提高磁力驱动系统的能量传递效率提供了途径和依据。

关键词: 大间隙; 磁力传动; 轴流式血泵; 能量传递效率; 数学模型

中图分类号: TH139

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2011)05-1296-07

Energy transfer efficiency of large gap magnetic drive system

LIU Yun-long¹, TAN Jian-ping¹, XU Yan^{1,2}, LIU Zhi-jian¹, ZHU Zhong-yan¹

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Changsha University, Changsha 410003, China)

Abstract: In order to research the energy transfer law in large gap magnetic drive system under the condition of large gap and high speed, the large gap magnetic drive technology, which was driven by traveling wave magnetic field, was studied. Based on the outside magnetic driving system of axial flow blood pump, the mathematical model of energy loss was established through studying each part of the system. By the driving experiment of blood pump, the maximum energy transfer efficiencies at 20 mm and 30 mm are obtained, which is the optimal operating condition of system. Then change tendency of the energy transfer efficiency and its influential factors are obtained by analysis and experiments, so as to provide methods improving the energy transfer efficiency.

Key words: large gap; magnetic drive; axial flow blood pump; energy transfer efficiency; mathematical model

非接触磁力传动方式是由 Ikuta 等^[1]提出的, 以现代磁学的基本理论磁性物质同性相斥、异性相吸的原理替代机械式传动实现传动为目的, 应用永磁材料或电磁机构所产生的磁力作用, 实现力或力矩非接触式传递的一种新技术, 已成为机械传动研究领域的热点^[2-3]。Frařna 等^[4]采用旋转磁场方式来实现方形容器

内部流体驱动, 建立了系统磁力的计算模型。赵韩等^[5]以向心电磁轴承为例, 分析了涡流损耗与转子转速、励磁电流频率的关系; 高殿荣等^[6]提出运用永磁同步电机的原理, 依靠线圈组的交变电流产生交变磁场来驱动永磁体转动; Kilani 等^[7]提出通过利用永磁体产生的磁场作为外磁场来驱动微机械沿直线运动; 张

收稿日期: 2010-03-30; 修回日期: 2010-07-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2006AA02Z4E8); 国家自然科学基金资助项目(50775223, 50875266); 教育部博士学科点专项基金资助项目(20070533125); 湖南省教育厅科研资助项目(08C138); 湖南省研究生科研创新项目(CX2010B072)

通信作者: 谭建平(1963-), 男, 湖南攸县人, 教授, 博士生导师, 从事现代机电液控制理论与技术研究; 电话: 13607311991; E-mail: jptan@163.com

清等^[8-9]应用解析法和有限元法对圆盘式磁力驱动器的涡流损耗进行了分析, 对控制涡流损耗、提高传动效率都具有指导意义。目前, 在磁力传动技术的研究及应用中, 系统的主从磁极间隙均属于小间隙范畴(小于 3 mm^[10-11]), 而在特定的条件下, 实际或期望的磁极间隙远大于经典磁力传动所设定的范围。谭建平^[12-14]以轴流式血泵的外磁场驱动为背景, 通过对磁力耦合、磁能传递机理的研究, 提出了一种非触式大间隙磁力驱动方法^[12], 并建立了其空间磁场、空间磁力矩数学模型^[15], 但空间磁力矩随耦合距离的增大迅速衰减依然是磁力传动技术的一大难题, 本文作者针对大间隙磁力驱动系统, 通过对系统各部分能量耗散进行研究, 建立系统能量传递效率数学模型, 以便为提高磁力传动效率提供途径和依据。

1 大间隙磁力传动系统

大间隙磁力驱动系统原理示意图如图 1 所示; 轴流式血泵示意图如图 2 所示, 由轴承、叶轮和永磁体等构成。图 3 所示为系统的能量传递框图, 电能从直流电源输出到电磁体, 通过电磁体线圈上电压(电流)

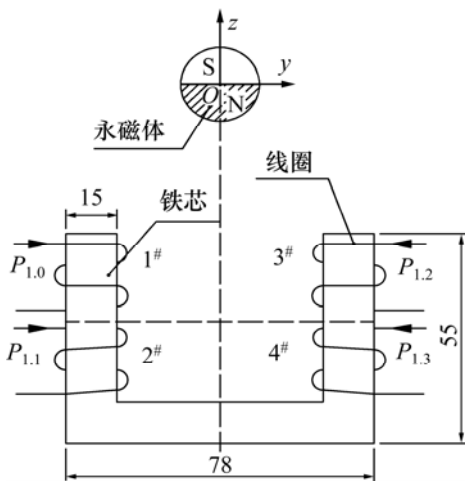


图 1 磁力驱动系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of magnetic drive system

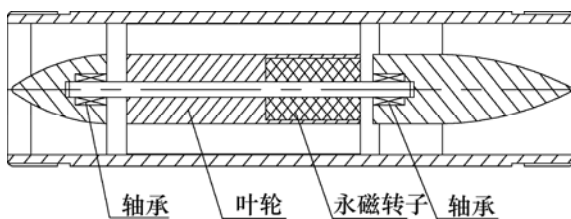


图 2 轴流式血泵示意图

Fig.2 Schematic diagram of axial-flow blood pump

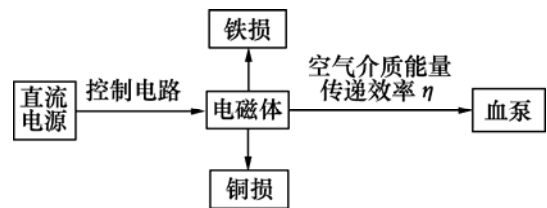


图 3 大间隙磁力驱动系统能量传递框图

Fig.3 Block diagram of energy transfer in magnetic drive system

时序的改变, 实现其左、右磁场状态的切换, 产生行波磁场, 将磁力矩传递给从动磁极(永磁转子), 从而带动血泵叶轮等装置旋转工作, 实现能量传递。文献[13]详细介绍了空间磁场的耦合机理和行波磁场的产生方法。

2 系统各部分能量损耗

2.1 涡流损耗

以单片硅钢片为模型, 建立如图 4 所示坐标系 OXYZ, 硅钢片的长、宽、高分别为 a, b 和 d , 设近似等效后的正弦交变磁场 $H = H_m e^{i\omega t}$ 的方向平行于硅钢片平面, 在没有自由电荷、传导电流的线性各向同性介质中, 麦克斯韦方程组的微分形式为:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} \\ \nabla \times H = \sigma E \\ \nabla \cdot E = 0 \\ \nabla \cdot H = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为电场强度; H 为磁场强度; σ 为电导率; μ 为磁导率。

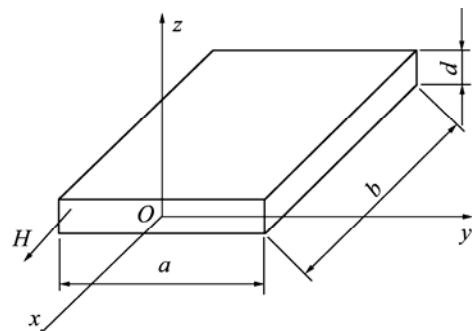


图 4 硅钢片电磁场分析模型坐标图

Fig.4 Magnetic field analytical model coordinate graph of single chip silicon steel sheet

由此可得单位体积硅钢片内的涡流损耗功率为：

$$P_e = P_e' f = \frac{1}{6} \pi^2 B_m^2 \frac{d^2}{\rho} f^2 \quad (2)$$

式中： B_m 为电磁体磁感应强度幅值； ρ 为硅钢片电阻率； f 为电磁体磁场脉冲频率。

2.2 磁滞损耗

磁滞损耗来自磁化过程。在磁化过程中的磁滞回线面积表征了这个过程中磁滞损耗。磁化 1 周的磁滞损耗能量为：

$$P_h = \oint H dB \quad (3)$$

在对电磁体单边的铁心交替磁化的过程中，由于 B 和 H 之间并不呈线性关系，使得磁滞损耗的计算变得比较困难。在瑞利区域内，磁滞回线(如图 5 所示)可以用下面的公式表示：

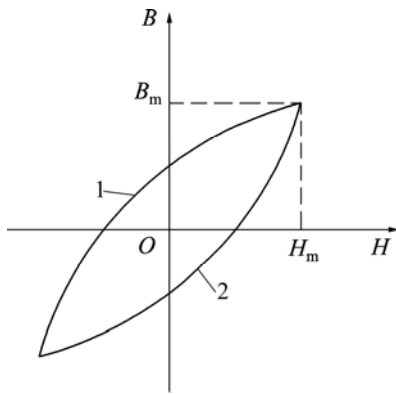


图 5 瑞利区域的磁滞回线

Fig.5 Hysteresis loop of Rayleigh area

$$B = \mu_0(\mu_i + bH_m)H \pm \frac{b}{2}\mu_0(H_m^2 - H^2) \quad (4)$$

式中：“+”号代表回线的上支(图 5 中曲线 1)；“-”号代表回线的下支(图 5 中曲线 2)。则磁化 1 周的能量损耗为：

$$P_h' = \int_{-H_m}^{H_m} B dH = \int_{-H_m}^{H_m} b\mu_0(H_m^2 - H^2) dH = \frac{4}{3}\mu_0 b H_m^3 \quad (5)$$

由此得到电磁体铁芯的磁滞损耗功率为：

$$P_h = P_h' f = \frac{4}{3}\mu_0 b H_m^3 f \quad (6)$$

式中： $b = \sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r / \rho}$ ，为瑞利常数； μ_0 为空气磁导率； μ_r 为硅钢片的相对磁导率； H_m 为电磁体磁场强度幅值。

2.3 铜损

当电磁体线圈通电时，由于铜丝本身的电阻以及线圈在交变电流作用下产生的感抗，均会以热能形式消耗功率，这部分损耗功率称为铜损。由线圈的磁场强度计算公式为 $H=NIl/l$ ，得到线圈的自感系数为：

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\mu N^2 S}{l}$$

则单组线圈的阻抗为：

$$R_z = \sqrt{R^2 + R_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2} \quad (7)$$

当电路接通时，有且仅有 2 组线圈同时导通，因此，可得电磁体线圈铜丝发热损耗功率为：

$$P_t = 2P_t' = 2\left(\frac{1}{2}I\right)^2 R_z = \frac{1}{2}I^2 \sqrt{R^2 + \left(2\pi f \frac{\mu N^2 S}{l}\right)^2} \quad (8)$$

式中： I 为通过单相绕组的电流； R 为单组线圈电阻； f 为通入的交变电流频率； N 为单组线圈匝数； S 为线圈横截面积； l 为线圈长度。

3 能量传递效率数学模型

设直流电源输出电压为 U ，输出电流为 I ，则直流电源输出功率为：

$$P = UI$$

电磁体的输出功率为：

$$P_1 = P - P_2 = UI - (P_h + P_e + P_t) \quad (9)$$

式中： P 为电源输入功率(即电磁体输入功率)； P_1 为电磁体输出功率； P_2 为电磁体损耗。

根据已经建立的大间隙磁力传动系统驱动力矩计算模型式^[15]：

$$T = \frac{2}{\cos\theta} \int_{-l/2}^{l/2} dx \int_{r_1 \cos\theta}^{r_2 \cos\theta} (yMB_y + yMB_z \tan\theta) dy \quad (10)$$

式中： θ 为永磁体的转角； l 为永磁体轴向长度； r_1 和 r_2 分别为永磁体内、外径； M 为永磁体磁化强度； B_y 和 B_z 分别为电磁体空间磁场 y 方向和 z 方向的分量。若 ω 为血泵转子角速度，则轴流式血泵永磁转子的输出功率为：

$$P_3 = \omega T \quad (11)$$

由式(9)和(11)得到系统大间隙能量传递效率的数学模型：

$$\eta_a = \frac{P_3}{P_1} = \omega T / \{ UI - [\frac{1}{6} \pi^2 B_m^2 \frac{d^2}{\rho} f^2 V + \frac{4}{3} b \mu_0 H_m^3 f + \frac{1}{2} I^2 \sqrt{R^2 + (2\pi f \frac{\mu N^2 S}{l})^2}] \} \quad (12)$$

4 实验

4.1 实验系统模型

以轴流式血泵驱动为研究对象, 建立大间隙磁力驱动血泵泵水实验系统, 如图 6 所示。根据流体力学相关理论, 可得实际泵水消耗功率(以 P_s 表示)和回路损耗功率(以 P_h 表示)分别为:

$$P_s = Q \rho_h g h_a \quad (13)$$

$$P_h = Q \rho_h g (h_f + h_m + h_v) \quad (14)$$

所以, 血泵的负载功率为:

$$P = T_1 \omega = Q \rho_h g (h_a + h_f + h_m + h_v) \quad (15)$$

式中: T_1 为血泵负载扭矩; ω 为血泵转子角速度; Q 为回路流量; ρ_h 为水溶液密度; h_a 为净扬程(即泵水回路扬程); h_f 为管路沿程损失; h_m 为管接头局部损失; h_v 为血泵出口能量转化的水柱高度。

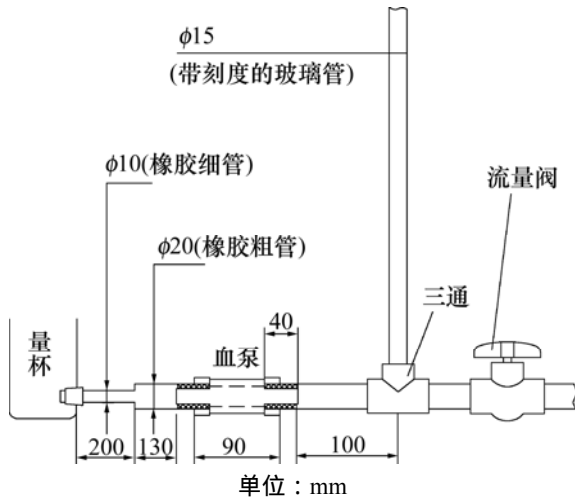


图 6 轴流式血泵泵水实验系统

Fig.6 Experimental system of axial-flow blood pump

由此得到大间隙磁力驱动系统能量传递效率的实验模型:

$$\eta_e = \omega T / \{ UI - [\frac{1}{6} \pi^2 B_m^2 \frac{d^2}{\rho} f^2 V + \frac{4}{3} b \mu_0 H_m^3 f + \frac{1}{2} I^2 \sqrt{R^2 + (2\pi f \frac{\mu N^2 S}{l})^2}] \} \quad (16)$$

4.2 实验条件及步骤

4.2.1 实验条件

电磁体参数如下: 电磁体铁芯采用厚度为 0.35 mm 的硅钢片叠成(硅钢片尺寸如图 2 所示, 由 71 片叠成), 线圈匝数为 650 匝, 线径为 0.31 mm; 轴流式血泵参数如下: 永磁转子内半径 $r_1=1$ mm, 外半径 $r_1=6$ mm, 轴向长度 $l=15$ mm, 磁化强度 $M=900$ kA/m; 实验参数如下: 电磁体与血泵永磁转子耦合距离分别为 20 mm 和 30 mm, 泵水实验回路尺寸参数如图 6 所示。

4.2.2 实验步骤

(1) 调节电磁体与血泵永磁转子耦合距离为 20 mm, 设定直流电源为恒流输出状态, 电流初值为 $I=0.5$ A, 按下启动按钮, 使血泵逐渐加速至转速 $n=3\ 000$ r/min, 调节电流旋钮, 改变输出电流, 找到系统长时间维持 3 000 r/min 转速所需最小电流, 记录当前电源输出参数(电压 U 和电流 I); 此时, 对应的玻璃管(如图 6 所示)中的水柱扬程为系统零流量下的净扬程, 然后, 将流量阀门开启一个角度。随着开启角度的增大, 玻璃管中水柱高度下降的幅度也随之增大, 待水柱高度稳定后, 记录当前水柱净扬程; 启动秒表, 同时将阀门另一端流出的水接入量具, 大约 2 min, 停止计时, 同时关闭阀门。由以上实验得到一组实验参数: I, U, Q, h_a 和 n 。

通过以上步骤, 即得到转速为 3 000 r/min 时的流量 Q 、净扬程 h_a , 以及最小输入功率 $P=UI$ 。重复以上步骤, 分别得到耦合距离 20 mm 时, 血泵在 3 000~9 400 r/min 时的各实验参数。

(2) 调节电磁体与血泵永磁转子耦合距离为 30 mm; 重复步骤(1), 即得到耦合距离 30 mm 时, 血泵在各转速下的实验参数。

4.3 实验结果

通过实验步骤(1)和步骤(2), 分别得到电磁体与血泵永磁转子在耦合距离分别为 20 mm 和 30 mm 时的实验参数, 分别如表 1 和表 2 所示。

由式(11)可知: 轴流式血泵永磁转子的输出功率为 $P=\omega T$, 由文献[15] 建立得系统驱动力矩计算模型式可知: 驱动力矩同电流成正比。将电磁体参数和实验参数代入式(10), 得到不同耦合距离下, 1 个耦合周期内的平均磁力矩 T 与电流的关系曲线。

由式(15)可知: 轴流式血泵的负载功率为 $P=T_1 \omega$ 。由表 1 和表 2 的实验参数, 得到各个电流下的负载扭矩 T_1 与电流的关系曲线。耦合距离为 20 mm 和 30 mm 时, 驱动扭矩 T 与负载扭矩 T_1 的对比曲线分别如图 7 和图 8 所示。

表 1 耦合距离为 20 mm 时实验参数

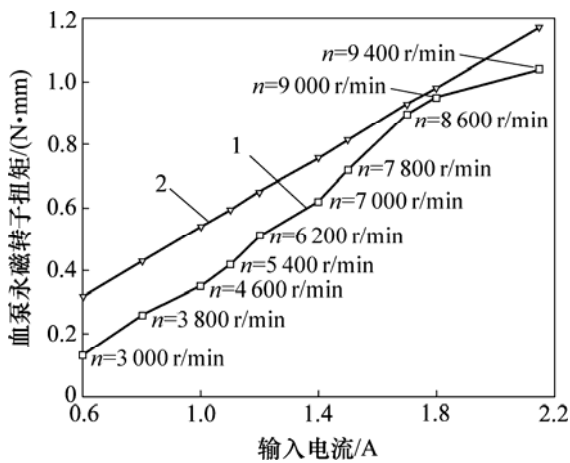
Table 1 Experimental data under coupling distance of 20 mm

序号	血泵转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	电流 I/A	电压 U/V	流量 $Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	净扬程 h_a/mm
1	3 000	0.60	12	1.50	160
2	3 800	0.80	19	1.55	400
3	4 600	1.00	25	1.50	680
4	5 400	1.10	31	1.60	890
5	6 200	1.20	37	1.75	1 270
6	7 000	1.40	45	2.25	1 300
7	7 800	1.50	50	3.00	1 200
8	8 600	1.70	59	3.50	1 300
9	9 000	1.80	63	4.00	1 250
10	9 200	2.00	72	4.50	1 000
11	9 400	2.15	77	4.00	1 450

表 2 耦合距离为 30 mm 时实验参数

Table 2 Experimental data under coupling distance of 30 mm

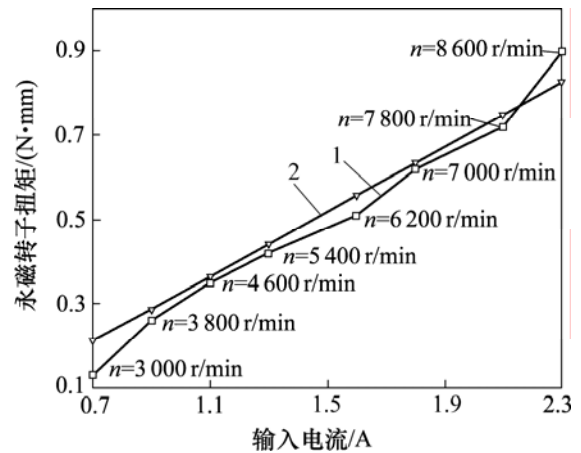
序号	血泵转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	电流 I/A	电压 U/V	流量 $Q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	净扬程 h_a/mm
1	3 000	0.7	14	1.50	160
2	3 800	0.9	21	1.55	400
3	4 600	1.1	28	1.50	680
4	5 400	1.3	36	1.60	890
5	6 200	1.6	46	1.75	1 270
6	7 000	1.8	55	2.25	1 300
7	7 400	2.0	65	2.55	1 250
8	7 800	2.1	71	3.00	1 200



1—血泵负载扭矩；2—血泵输入扭矩

图 7 耦合距离 20 mm 时 T 与 T_1 对比曲线

Fig.7 Comparison of T and T_1 under coupling distance of 20 mm



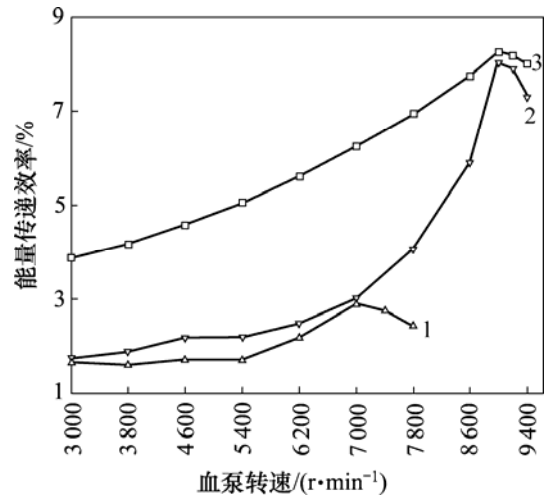
1—血泵负载扭矩；2—血泵输入扭矩

图 8 耦合距离 30 mm 时 T 与 T_1 对比曲线

Fig.8 Comparison of T and T_1 under coupling distance of 30 mm

图 7 和图 8 中，各负载扭矩 T_1 上所标示的转速，均对应耦合距离处相应电流下的最大驱动能力。

将 T, T_1 以及表 1、表 2 中各实验参数分别代入能量传递效率数学计算模型式(12)和实验模型式(16)，得到系统在耦合距离为 20 mm 时能量传递效率的理论值、实验值，以及耦合距离为 30 mm 时的能量传递效率的实验值，如图 9 所示。



1—耦合距离 30 mm 效率实验曲线；2—耦合距离 20 mm 效率实验曲线；3—耦合距离 20 mm 效率理论曲线

图 9 不同耦合距离下的能量传递效率对比曲线

Fig.9 Comparison of efficiencies under different coupling distances

4.4 分析

(1) 图 7 和图 8 所示为驱动扭矩 T 与负载扭矩 T_1

在不同耦合距离下的对比曲线。可见:驱动扭矩取决于输出电流,并且与电流成正比关系,而负载扭矩取决于血泵转速;血泵的驱动扭矩 T 与负载扭矩 T_1 之间的差值来源于血泵本身的机械损耗。

(2) 耦合距离 20 mm 时,驱动扭矩大于负载扭矩,转速为 9 000 r/min 时两者最为接近;随着电流的进一步增大,系统能输出更大的驱动能力;当耦合距离 30 mm 时,驱动扭矩同负载扭矩在 2.1 A 以及 7 800 r/min 处交汇,之后负载扭矩大于驱动扭矩,理论上不能驱动。实验证明:当电流达到 2.1 A,血泵转速达到 7 800 r/min 时,系统能量传递效率已经明显开始下降,在增大电流至 2.3 A 后,仍没有达到下一个速度等级(8 200 r/min)的驱动能力。

(3) 图 9 所示为能量传递效率对比曲线。由耦合距离 20 mm 时能量传递效率实验值和理论值的比较,可以看出:随着输入电磁体脉冲频率的增大,血泵转速的增加,系统能量传递效率逐渐提高,但并不是无限提高;由理论解析求得,在一定电磁参数条件下,系统在转速为 9 000 r/min 时,能量传递效率达到了最大值,经过对 9 000 r/min 附近各转速进行试验,得到了与理论计算结果相同的实验结论,验证了理论模型的正确性。

(4) 当耦合距离分别为 20 mm 和 30 mm 时,从能量传递效率实验值的对比中可以看出:当耦合距离为 30 mm 时,系统在 7 000 r/min 达到额定工作点,远低于耦合距离 20 mm 时的额定工作点;当耦合距离为 30 mm 时的最大效率仅为 2.9%,远远小于耦合距离为 20 mm 时的 8.0%。随着耦合距离的增大,系统驱动力矩呈平方次衰减,所以,系统能量传递效率随着耦合距离的增大而急速降低。

(5) 从能量传递效率模型式(12)和式(16)可以看出:影响能量传递效率的因素较多,但总的来说,主要来自于 3 个方面:电磁体、血泵以及泵水回路。在保证驱动扭矩(即保证血泵转速)的前提下:采用更薄、具有更大磁导率的材料制作铁芯,增大电磁体磁能输出;采用具有更大磁能积的材料制作血泵永磁转子;尽可能减小输入电流,从而减小涡流损耗、磁滞损耗以及铜损,进而提高效率。

5 结论

(1) 针对提出的非接触式大间隙磁力驱动方法,通过对磁力驱动系统各部分能量耗散的研究,建立了系统能量传递效率的数学模型和实验模型。

(2) 通过轴流式血泵泵水实验,得出了驱动扭矩与负载扭矩在不同耦合距离时的对比曲线,以及血泵在耦合距离 20 mm 和 30 mm 时的最大能量传递效率分别为 8.0%和 2.9%。

(3) 通过将实验值与解析值进行对比分析,得出了系统能量传递效率的变化趋势,验证了模型的正确性,分析了实验值与解析值之间偏差的产生原因。

(4) 通过对磁力驱动系统能量耗散模型的研究,从能量和效率的角度,提出了磁力驱动系统的优化方案,为提高磁力驱动系统的能量传递效率提供了途径和参考。

参考文献:

- [1] Ikuta K, Makita S, Arimoto S. Non-contact magnetic gear for micro-transmission mechanism[C]//Proceedings of the 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems. New York: IEEE, 1991: 125-130.
- [2] 徐先懂, 龚中良, 谭建平. 基于外磁场耦合的血泵驱动系统[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(4): 711-714.
XU Xian-dong, GONG Zhong-liang, TAN Jian-ping. Blood pump driven system based on extracorporeal magnetic filed couple[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(4): 711-714.
- [3] 赵韩, 王勇, 田杰. 磁力机械研究综述[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 31-36.
ZHAO Han, WANG Yong, TIAN Jie. Review of study on magnet machine and mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 31-36.
- [4] Fra`na K, Stiller J. A numerical study of flows driven by a rotating magnetic field in a square container[J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2008, 27(4): 491-500.
- [5] 赵韩, 李露, 王勇. 电磁轴承中磁场时间和空间变化对涡流的影响[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6): 129-133.
ZHAO Han, LI Lu, WANG Yong. Influence of changing the magnetic field on eddy current effect of electromagnetic bearing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6): 129-133.
- [6] 高殿荣, 韩康壮. 血泵转子远场驱动的原理及分析[J]. 液压气动与密封, 2008, 28(4): 39-42.
GAO Dian-rong, HAN Kang-zhuang. Principle and research on far field driving system of blood pump[J]. Hydraulics Pneumatics and Seals, 2008, 28(4): 39-42.
- [7] Kilani M I, Jaw S Y, Haik Y, et al. Numerical simulation of flow in a screw-type blood pump[J]. Journal of Visualization, 2005, 8(1): 33-40.
- [8] 张清. 圆盘式磁力驱动器的涡流分析[D]. 吉林: 吉林机械科学与工程学院, 2008: 43-62.

- ZHANG Qing. Study on eddy current in discal magnetic driver[D]. Jilin: Jilin University. School of Mechanical Science and Engineering, 2008: 43-62.
- [9] 郑福胜, 谭庆昌, 张清, 等. 盘式磁力驱动器隔离套的涡流损耗分析[J]. 工程与试验, 2008(3): 62-66.
ZHENG Fu-sheng, TAN Qing-chang, ZHANG Qing, et al. Study on eddy current in partition of discal magnetic drivers[J]. Engineering and Test, 2008(3): 62-66.
- [10] 倪平涛, 王开文, 陈健. 一系纵向定位间隙对磁流变耦合轮对车辆横向动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(2): 6-9.
NI Ping-tao, WANG Kai-wen, CHEN Jian. Influence of primary longitudinal position clearance on lateral dynamics of vehicle with MRF coupled wheelsets[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 6-9.
- [11] 兴涛, 杨建波, 郭永献. U型磁铁磁路分布与气隙磁感应强度[J]. 机械设计与制造, 2008(7): 82-83.
XING Tao, YANG Jian-bo, GUO Yong-xian. Hypotheses of a U type magnet circuit distributing and the calculating and testifying on the air gap intensity of magnetic induction[J]. Machinery Design and Manufacture, 2008(7): 82-83.
- [12] 谭建平, 许焰, 刘云龙, 等. 一种非接触式大间隙磁力驱动方法: 中国, 200810030545.1[P]. 2008-10-01.
TAN Jian-pin, XU Yan, LIU Yun-long, et al. A non-contact large floating interval magnetic force driving method: China, 200810030545.1[P]. 2008-10-01.
- [13] 龚中良, 谭建平. 外场驱动血泵磁力耦合传动受力分析[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(6): 725-727.
GONG Zhong-liang, TAN Jian-ping. Analysis of the magnetic coupling force transmission in extra magnetic field driven blood pumps[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(6): 725-727.
- [14] 徐先懂, 谭建平. 基于磁能传递的血泵驱动系统研究[J]. 机械, 2006, 33(10): 7-9.
XU Xian-dong, TAN Jian-ping. Research of blood pump driven system based on magnetic energy transmission[J]. Machinery, 2006, 33(10): 7-9.
- [15] 许焰, 谭建平, 刘云龙, 等. 大间隙磁力传动系统驱动力矩的计算方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(7): 30-35.
XU Yan, TAN Jian-ping, LIU Yun-long, et al. Calculation method of driving torque of the large gap magnetic drives system[J]. Journal of Hunan University: Science and Technology, 2009, 36(7): 30-35.

(编辑 杨幼平)