

文章编号: 1671-7104(2019)05-0355-04

# 永磁电机及其控制在人工血泵领域中的发展与应用

【作者】 苏晓莲<sup>1</sup>, 蒋山<sup>2</sup>

1 江苏大学 京江学院, 镇江市, 212000

2 博众精工科技股份有限公司, 苏州市, 215000

【摘要】 永磁电机具有高功率密度、高稳定性和易于控制等特点, 在人工血泵领域取得了广泛的应用。该文就血泵用永磁电机的发展历史和研究进展展开综述。首先根据电机结构和应用场景对血泵电机进行分类, 介绍了不同类型的电机为达到相应的性能要求而采取的措施, 并给出具体应用案例。而后介绍了人工血泵电机常用的控制算法, 分析了其优缺点和应用的侧重点。最后对全文进行简要总结。

【关键词】 人工心脏; 永磁电机; 控制算法; 应用案例; 研究进展

【中图分类号】 R654.2

【文献标志码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7104.2019.05.012

## Development and Application of Permanent Magnet Motor and Its Control in the Field of Artificial Blood Pump

【Writers】 SU Xiaolian<sup>1</sup>, JIANG Shan<sup>2</sup>

1 Jingjiang College of Jiangsu University, Zhenjiang, 212000

2 Bozhon Precision Industry Technology Co., Ltd., Suzhou, 215000

【Abstract】 Permanent magnet motor has been widely used in the field of artificial heart pump due to its high power density, high stability and easy control. In this paper, the development history and research progress of permanent magnet motor for blood pump were described. Firstly, the motors were classified according to their structures and application scenarios. And then, the measures taken by different types of motors to meet the corresponding performance requirements were introduced, and the specific application cases were given. After that, commonly used control algorithms of these motors were enumerated. What's more, the advantages and disadvantages of the control algorithms and their application emphasis were carefully explained. Finally, the paper was summarized in short.

【Key words】 artificial heart, permanent magnet motors, control method, application emphasis, research process

### 0 引言

近年来, 随着我国人口老龄化加剧以及人们生活习惯的改变, 心血管疾病发病率剧增。而心力衰竭是各种心血管疾病发展到晚期的一种临床综合征, 是心血管疾病致死的头号杀手。患者在心脏供体不足的情况下, 可通过移植人工心脏, 以暂时或者永久的代替心脏功能, 维持机体的需要。

人工心脏的组成主要包括三部分: 人体插管、流体动力装置和系统控制部分。流体动力装置, 即人工血泵, 决定着人工心脏泵血能力的强弱, 因此最为重要。人工血泵有气动、液动、电动以及磁液混动四种形式, 其中电动和磁液混动型血泵多由永磁电机驱动, 性能最佳, 是当前人工血泵发展的主线。因此本文就人工血泵用永磁电机及其控制展开阐述, 详细介绍血泵用永磁电机及其控制方法的研究现状。

### 1 血泵用永磁电机的研究现状

常用的血泵电机主要有永磁无刷直流电

机(Permanent Magnet Brushless DC Motor, PMBLDCM)、永磁直线电机(Permanent Magnet Linear Motor, PMLM)和无轴承电机(Beardless Motor, BM)。三类电机应用于人工血泵的技术难点各有不同, 本节将据此展开论述。

#### 1.1 永磁无刷直流电机(PMBLDCM)

##### 1.1.1 电机运行平顺性研究

就电机本体结构而言, 绕组分布不满足正弦规律、磁路饱和、永磁体结构形式不合理以及齿槽效应等因素均会导致电枢磁链不正弦, 从而引发转矩脉动。常用的解决办法包括分数槽绕组法<sup>[1]</sup>、电机齿部开槽法<sup>[2]</sup>、Halbach永磁阵列<sup>[3]</sup>以及无铁芯结构<sup>[4-5]</sup>等方案。

##### 1.1.2 电机温升研究

当血液温度高于43℃时, 红细胞开始出现功能性受损, 溶血的概率大大增加, 因此降低电机温升是一项重要的研究内容<sup>[6]</sup>。电机发热源主要有线圈铜耗、铁芯损耗和永磁体涡流损耗, 其中线圈铜耗和铁芯损耗占比90%以上, 设法控制铜耗和铁耗是解决人

收稿日期: 2019-03-08

作者简介: 苏晓莲, E-mail: sxl15262902499@163.com

工血泵温升问题的关键<sup>[7]</sup>。由铜耗和铁耗的计算公式可知<sup>[8]</sup>，降低铜耗的方法是尽可能降低电阻或减小电流，而降低铁耗的措施则是降低磁密高次谐波。具体措施有<sup>[9]</sup>：①选用低阻铜线或增加绕线截面积；②绕线整齐，减少线圈总长度；③控制电机转速。此外，为防止铜耗产热集中导致泵壳温度分布不均匀，应选用导热性能优异的泵壳材料<sup>[10]</sup>。

### 1.1.3 避免机械摩擦导致溶血的措施

PMBLDCM体积小，易放置于血泵内，因此可采用泵机一体式结构，即电机定子部分集成于泵壳，电机转子位于泵腔。为避免轴承磨损造成溶血，可使电机转子通过被动或主动悬浮控制悬浮起来<sup>[11-12]</sup>。以文献[4]中的人工血泵为例，其整体结构如图1所示。电机转子内置于血泵泵腔内部以驱动叶片，在径向和轴向的方向上采用磁轴承主动悬浮。定转子无接触，降低了血栓和溶血的风险，而整个电机转子部分用钛合金包裹，具有良好的生物相容性。

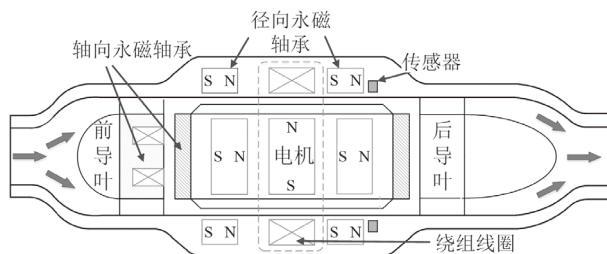


图1 磁悬浮人工心脏泵的结构图  
Fig.1 Structure of maglev artificial heart pump

## 1.2 永磁直线电机 (PMLM)

PMLM因其直线运动方式，更适合应用于搏动式人工血泵。与旋转电机不同，PMLM应用人工血泵时，关键要提供大推力。本节将介绍几款结构新颖的血泵用PMLM，并详述大推力产生方案。

### 1.2.1 双定子结构

2015年，YAMAGUCHI等<sup>[13]</sup>研发了一款脉动式PMLM。为提高推力-体积比，采用双定子结构，相当于把两台单定子电机合二为一，共用一个动子，因此产生的推力理论上为单定子PMLM的两倍（考虑到磁饱和的影响，双定子PMLM实际最大推力小于理论值）。此外，研究表明：增加电机轴向长度，可在牺牲部分轻量化特征的基础上大幅提高电机推力。最终测试结果显示在80 mm/s的速度下可提供77 N推力。

### 1.2.2 游标结构

刘正蒙等<sup>[14]</sup>设计了一款具有低速大推力特性的双

定子游标PMLM。所谓“游标电机”，是一种基于磁场调制效应的特殊结构的电机。电枢磁链经过调制极的调制后，在气隙处形成高次谐波，这些高次谐波和多极永磁体作用，产生比传统PMLM更大的推力<sup>[15]</sup>。实验表明，该电机在额定工况（3 A）下可产生70 N的推力。

### 1.2.3 磁力丝杠

磁力丝杠电机结构，如图2所示<sup>[16]</sup>。外圈是传统的表贴式永磁电机，内圈则是磁性丝杠。磁性丝杠的内、外圆筒镶嵌螺旋永磁体，分别相当于螺栓和螺母，转动螺栓便将旋转运动转换成直线运动。磁性丝杠永磁体排布方式采用Halbach结构，用以增强气隙磁密，提供大转矩。实验结果显示，电机最大推力达130 N。

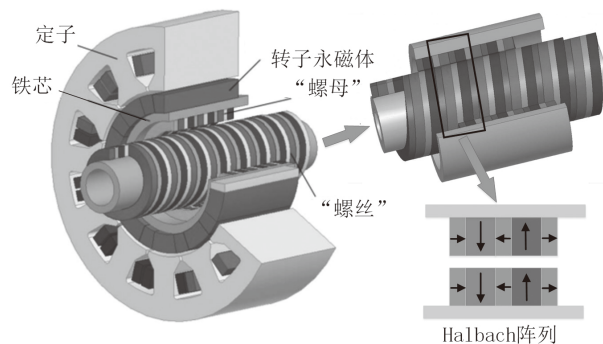


图2 磁力丝杠电机  
Fig.2 Magnetic lead screw motor

### 1.2.4 双层绕组

文献[17]介绍一种搏动式电磁直驱泵。借鉴了通电螺线管的工作原理，在线圈中通入直流电流使得螺线管内部形成匀强磁场，和螺线管内部的永磁体产生作用力，推动永磁体作直线运动。鉴于单层线圈不足以产生足够的推力，提出增加辅助线圈的方法，即采用双层绕组。实验显示，双层螺线管产生的推力比单层螺线管高出约70%。

## 1.3 无轴承电机 (BM)

用于血泵的BM根据悬浮方式可分为磁悬浮、液悬浮和磁液混合悬浮三种。

### 1.3.1 磁悬浮

磁悬浮电机根据悬浮力产生方式分为电主动悬浮、永磁被动悬浮和混合磁力悬浮<sup>[18]</sup>。电主动悬浮通过通电线圈产生悬浮力，属于可控悬浮，缺点是电气元件复杂；永磁被动悬浮通过永磁体间的相互作用力实现悬浮，结构简单，但不可控；混合磁力悬浮结合二者的特点，有助于精简机构、提升性能，在磁悬浮

人工血泵中应用最广。

KURITA等<sup>[19]</sup>设计了一款双边定子型磁悬浮电机,属于混合磁力悬浮电机。电机定子位于两侧,中间为悬浮转轴。每侧定子上均安装永磁体和绕组线圈,一侧用于控制轴向位移和旋转,另一侧用于控制转轴的倾斜。该电机的特点在于,驱动力和悬浮力均在轴向上产生,径向上无电磁器件。

2018年,杨石平等<sup>[20]</sup>采取了与上述双边定子型磁悬浮电机不同的悬浮方案,即采用轴向永磁轴承和径向电磁轴承结合的方案,通过永磁磁环控制轴向位移。研究表明,同轴永磁环之间的电磁作用力在一定范围内与距离成正比,因此根据悬浮动子的最大移动距离确定所需提供的最大电磁作用力即可,很大程度上简化了控制方案,也降低了成本。

### 1.3.2 液悬浮

液力悬浮血泵,其原理是利用运动流体在渐缩结构上产生的动压实现血泵的被动悬浮,依靠转子或侧壁的线圈产生驱动力<sup>[21]</sup>。液力悬浮式人工心脏的技术核心在于悬浮机构和螺旋叶片的设计,对电机并无特别要求。目前比较成熟的产品包括Ventrassist、TinyPump以及HVAD等。

### 1.3.3 磁液混合悬浮

磁液混合悬浮,顾名思义,同时利用电磁悬浮和液力悬浮,二者配合达到稳定的悬浮效果。磁力和液力既可以分别控制两个方向(轴向、径向)上的悬浮,也可以协作用于控制一个方向上的悬浮。

OKAMOTO等<sup>[22]</sup>采用第一种方法设计了一款磁液混合式悬浮心脏泵。通过永磁体斥力实现转子轴向位移的被动控制,而倾斜和横向位移则依靠液力被动控制。王伟等<sup>[23]</sup>则采用第二种磁液混合方式,液力和磁力同时作用于叶轮,以保持叶轮在轴向方向上的稳定悬浮。

## 2 人工心脏用永磁电机的控制

已成功应用的人工血泵控制算法包括传统的PID控制、神经网络PID控制、模糊PID控制、自适应鲁棒控制、无位置传感器控制等。上述算法各有优缺点,因此应用的侧重点也有所不同。

### 2.1 PID控制

PID算法是最基本的控制算法,根据技术指标不断调节PID参数以达到最优控制效果。其应用成熟、稳定性好,已广泛应用于人工心脏泵的控制<sup>[24-25]</sup>。PID控制的通用性和有效性毋庸置疑,但是在寻找最

优PID参数的时候往往需要大量的调试,较为繁琐。为此,专家学者着手研究参数自整定算法,使得PID算法的应用更进一步。

### 2.2 神经网络PID控制

神经网络是一种具有自学习功能的智能算法,主要用于非线性、时变系统的控制。而神经网络PID控制,就是将神经网络算法和传统PID控制结合起来,以被控量之目标值与反馈值的差值作为输入,以PID参数作为输出,实现PID参数的自动调整。

WU等<sup>[26]</sup>将BP神经网络PID控制应用到人工心脏泵的速度控制。与传统PID控制相比,BP神经网络PID控制调节时间更短、跟踪性能更好且鲁棒性更强。尽管如此,一个成熟的神经网络系统需要花费大量时间和精力进行大量的训练,因此在使用上并非十分便捷,很大程度上限制了神经网络的应用<sup>[27]</sup>。

### 2.3 模糊PID控制

模糊PID控制是一种模糊化的非线性智能控制算法,不需要对受控对象进行精确数学建模,乃是根据人类经验数据进行系统设计。模型的核心在于模糊推理模块和解模糊模块的设计,应尽可能实现对人类思维的模拟推理。刘佩璋<sup>[28]</sup>针对一款微型轴流血泵运用模糊PID控制,实现了PID参数实时自整定。与传统PID算法进行对比,模糊PID控制器的输出响应超调量更小,而且在加入外界扰动的情況下具有较强的鲁棒性。

### 2.4 自适应鲁棒控制

人工血泵系统实际上是一个耦合的非线性系统,而且血泵安装在病人体内,会因人体活动引入扰动,因此要求控制系统具有一定的抗干扰性。非线性自适应控制可克服系统不确定性,但对于外界干扰较为敏感。而鲁棒控制在抑制干扰和补偿未建模动态时具有良好的性能,二者结合可形成优势互补。文献<sup>[29]</sup>将 $H^\infty$ 鲁棒控制与自适应控制结合起来用于人工血泵的控制,结果显示控制系统参数会随着人体不同心跳速率下的血压要求进行动态调节,证实控制系统具有很好的自适应性和抗干扰性。

### 2.5 无位置传感器控制

无位置传感器控制通过采集电机绕组的电压和电流并进行一系列推导估算出转子的位置信息。当电机转速较低时,感应反电势幅值小,难以检测,需要采取必要的措施进行转子定位,致使起动过程精度较低<sup>[30]</sup>。但对于磁悬浮心脏泵,无需频繁启动,



一旦起动便可长期稳定运行,因此无位置控制非常适合应用于人工血泵。

谭亚<sup>[1]</sup>针对苏州同心人工心脏采用了基于滑膜观测器的无位置传感器控制方案。实测的速度响应曲线显示,电机从1 000 r/min加速到3 000 r/min只要2 s,而且可在3 s内达到稳定状态。3 000 r/min转速下,脉动速度仅为125 r/min,满足人工心脏运行要求。

### 3 总结

本文综述了永磁电机在人工心脏领域的应用和研究现状,总结了不同类型电机的特点并介绍了具体的应用案例,而后列举了血泵用永磁电机常用的控制算法和实际使用效果。可以看到,人工心脏经过多年的发展,已经做到了小型化、轻量化,以便长期植入人体。而磁悬浮电机的出现,更是降低了人工心脏溶血和血栓的风险。尽管如此,人工心脏还存在诸如经皮电缆易感染、控制系统复杂、使用寿命短等问题,相关研究工作还需持续进行。

#### 参考文献

- [1] 王芳群,郝根,吴雯珏,等.基于分数槽的人工心脏用永磁无刷直流电动机设计[J].微特电机,2014,42(12):33-37.
- [2] 王芳群,王志宾,郝根,等.人工心脏用永磁无刷电机的齿槽转矩的削弱设计和数值研究[J].微电机,2014,47(2):6-10.
- [3] 王芳群,吴义荣,束月霞,等.基于Halbach阵列的人工心脏永磁电机的数值分析[J].微特电机,2016,44(7):4-7.
- [4] 张文山,刘淑琴.磁路法与有限元法相结合的磁悬浮人工心脏泵驱动电机设计[J].电机与控制应用,2016,43(4):71-76.
- [5] WANG H, LIU S Q. Study on driving motor for magnetic levitated artificial heart pump[C]. 2016 International Conference on Mechanical, Control, Electric, Mechatronics, Information and Computer, 2016: 289-295.
- [6] 余群,王丽平,翁锡全.高温高湿环境下耐力运动对红细胞溶血影响的研究现状及展望[J].现代预防医学,2015,42(13):2334-2337.
- [7] 陈起旭,梁得亮,徐俊,等.盘式交流永磁同步电机温升影响因素研究[J].电机与控制学报,2018,22(3):33-41.
- [8] XU G H, LIU G H, JIANG S, et al. Analysis of a hybrid rotor permanent magnet motor based on equivalent magnetic network[J]. IEEE Trans Magn, 2018, 54(4): 1-9.
- [9] 谭卓.大气隙永磁轴流式血泵磁力传动系统研究[M].湖南:中南大学,2014.
- [10] 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损伤[J].中国医学物理学杂志,2017,34(12):1254-1260.
- [11] 李国荣,田步升,陈海丰,等.对称结构磁悬浮离心泵心脏辅助装置及流体力学特性[J].中国医疗器械信息,2017,23(13):14-16.
- [12] 云忠,蔡超,向闯.轴流血泵微型驱动系统的研究设计[J].机械工程师,2016(4):83-86.
- [13] YAMAGUCHI M, KANO Y, KOBAYASHI M, et al. Design investigation of a linear motor for artificial heart driving[J]. Electr Eng Jpn, 2015, 117(5): 603-608.
- [14] LIU Z M, ZHAO W X, JI J H, et al. A novel double-stator tubular vernier permanent-magnet motor with high thrust density and low cogging force[J]. IEEE Trans Magn, 2015, 51(7): 1-7.
- [15] 林鹤云,张洋,阳辉,等.永磁游标电机的研究现状与最新进展[J].中国电机工程学报,2016,36(18):5021-5034.
- [16] JI J H, LING Z J, WANG J B, et al. Design and analysis of a halbach magnetized magnetic screw for artificial heart[J]. IEEE Trans Magn, 2015, 51(11): 8108604.
- [17] 刘京京,葛斌,陆通,等.短期辅助用直流电磁驱动搏动式血泵设计与测试[J].中国生物医学工程学报,2018,37(1):49-56.
- [18] 张维煜,朱詠秋,鞠金涛,等.磁悬浮轴承研究现状及其发展[J].轴承,2016,(12):56-63.
- [19] KURITA N, ISHIKAWA T, SAITO N, et al. A double-sided stator type axial self-bearing motor development for total artificial heart [C]. IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2017: 1-6.
- [20] 杨石平,任永武,余海涛.可植入血泵磁悬浮支承结构设计与研究[J].机床与液压,2018,46(1):87-90.
- [21] 李卫东,姚奇,杜建军,等.基于CFD的液悬浮人工心脏泵叶轮人口优化分析[J].北京生物医学工程,2017,36(1):21-28.
- [22] OKAMOTO E, ISHIDA Y, YANO T, et al. Passive magnetic bearing in the 3rd generation miniature axial flow pump-the valvo pump 2[J]. J Artif Organs, 2015, 18(2): 181-184.
- [23] 王伟,姜洋,孙昊成,等.磁液悬浮式离心血泵的性能仿真分析与实验研究[J].北华航天工业学院学报,2013,23(4):4-6.
- [24] 杨丁丁.左心室辅助装置磁悬浮技术研究[M].武汉:中南民族大学,2013.
- [25] 孙传余,肖楠,曹茂永,等.人工心脏单自由度悬浮控制仿真研究[J].微特电机,2018,46(5):76-78.
- [26] WU W J, WANG F Q, HE W X, et al. A new control method of heart pump drive system based on neural network control[C]. International Conference on Biomedical Engineering & informatics, 2013: 619-622.
- [27] 李存岑,杨明,李世阳.人工神经网络在人工心脏研究中的应用[J].北京生物医学工程,2008,27(3):324-327.
- [28] 刘佩璋.基于模糊PID控制策略的人工心脏轴流泵控制方法研究[D].山西:中北大学,2014.
- [29] RAVANSHADI S, JAHED M. Introducing an adaptive robust controller for artificial heart[C]. The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics Roma, 2012: 24-27.
- [30] 刘计龙,肖飞,沈洋,等.永磁同步电机无位置传感器控制技术研究综述[J].电工技术学报,2017,32(16):76-88.
- [31] 谭亚.人工心脏血泵电机无位置传感器控制[D].苏州:苏州大学,2015.