

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2023.03.010

永磁无刷直流电机在高速电动手术工具中的选型与优化设计综述

鲁自强^{1,2}, 李保国¹, 张天逸^{1,2}, 耿晓斌^{1,2}, 程云章^{1,2}

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学上海介入医疗器械工程技术研究中心, 上海 200093)

【摘要】随着高速电动手术工具使用量的日益增加, 关于其核心部件——驱动电机的研究越来越广泛。永磁无刷直流电机因具有小巧高效、稳定可靠等特点, 在该应用领域备受关注。该文介绍了永磁无刷直流电机的组成及优势, 结合高速电动手术工具的临床应用需求, 对永磁无刷直流电机本体、位置检测电路和换相控制电路的选型与优化设计方案进行了论述和比较, 并指出了相应的关键技术难点与解决思路。最后对未来研究重点进行了总结与展望, 为永磁无刷直流电机在高速电动手术工具中的设计研发提供理论参考。

【关键词】高速电动手术工具; 永磁无刷直流电机; 结构选型方案; 优化设计策略

【中图分类号】TM33, R318.6

【文献标志码】A

文章编号: 1674-1242(2023)03-0285-09

Selection and Optimization Design of Permanent Magnet Brushless DC Motor for High-Speed Surgical Power Tools: A Review

LU Ziqiang^{1,2}, LI Baoguo¹, ZHANG Tianyi^{1,2}, GENG Xiaobin^{1,2}, CHENG Yunzhang^{1,2}

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,

Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Interventional Medical Device Engineering Technology Research Center,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】With the increasing use of high-speed surgical power tools, the research on driving motor, its core component, has become more extensive. Permanent magnet brushless DC motors have attracted much attention in this application field due to their features of small size, high efficiency, stability, and reliability. This paper introduces the composition and advantages of permanent magnet brushless DC motors, discusses and compares the selection and optimal design scheme of the motor body, position detection circuit and commutation control circuit according to the clinical application requirements of high-speed surgical power tools, and pointed out the corresponding key technical difficulties and solutions. Finally, the key points of future research are summarized and prospected, providing theoretical reference for the design and development of permanent magnet brushless DC motors in high-speed surgical power tools.

【Key words】High-speed Surgical Power Tools; Permanent Magnet Brushless DC Motor; Structure Selection Scheme; Optimal Design Strategies

收稿日期: 2023-05-30

基金项目: 上海介入医疗器械工程技术研究中心资助项目(18DZ2250900)。

作者简介: 鲁自强(1997—), 男, 安徽省滁州市人, 硕士研究生在读, 从事医用微电机研究。

通信作者: 程云章(1964—), 男, 上海市人, 教授, 博士生导师, E-mail: cyz2008@usst.edu.cn。

0 引言

近年来，随着人口老龄化进程的加快、骨科诊疗水平和手术渗透率的不断提升，我国骨科手术量保持高速增长态势^[1]。临床上对人体骨组织进行钻孔、铣削、磨削、锯切等外科操作，高速电动手术工具的作用不容小觑。相比传统使用人力的手术方法，高速电动手术工具集动力输出、转速控制和手术操作等功能于一体，具有减少手术出血及附带损伤、减轻医生工作强度、缩短手术时间、提升手术效果等优点^[2]。

高速电动手术工具主要由主机、手机、工具头和脚踏开关组成，其核心部件是手机内负责提供动力的高速驱动电机，搭配不同的工具头，可以在手术中实现多种安全有效的操作^[3]。目前临床上对高速电动手术工具的精度和平衡性能要求极高，即使是轻微的抖动，都会影响手术效果。这要求其内部的高速驱动电机在拥有较小外形与超高转速的同时，能低振动、低噪声地平稳运行，且控制响应快，在钻穿骨组织时能立即停止转动，避免对患者造成额外损伤。此外，高速驱动电机还需要具有较高的耐久性，能经受多次严酷的灭菌操作^[4]。

在众多类型的驱动电机中，永磁无刷直流电机因具备转速高、噪声低、体积小、寿命长、转矩密度大、运行稳定、维护方便及可精确控制启停等优点^[5]，逐

渐成为高速电动手术工具设计研发的首要选择。然而，不同的选型与设计会使永磁无刷直流电机具有不同的性能特点。本文基于医疗应用场景与手术需求，对永磁无刷直流电机主要组成部分的结构选型方案与优化设计策略进行综述，旨在为研究人员的设计研发提供理论参考。

1 永磁无刷直流电机的组成及优势

永磁无刷直流电机主要由电机本体（定子与转子）、位置检测电路和换相控制电路组成，运行原理如图 1 所示。永磁设计使电机转子无电枢绕组，体积小、重量轻、结构简单，便于医护人员手持使用。由于采用电子换相系统，电机在运转过程中不会产生换相火花，也无须更换碳刷，因此寿命更长，噪声更小，维护和保养成本较低。直流设计能降低电能损耗，提高电机效率与响应速度。闭环控制使其具有高精度的转速与位置控制能力，减少转速和负载变化时的抖动，保证手术过程的安全性^[6,7]。基于以上优势，永磁无刷直流电机在高速电动手术工具中得到了广泛应用，使手术过程更加精准、高效、安全。目前，临床上对其设计的要求是，在满足所需功率和转速的前提下，具有更小的尺寸和更高的可靠性，故各主要组成部分的结构选型与设计应结合使用场景进行具体分析。

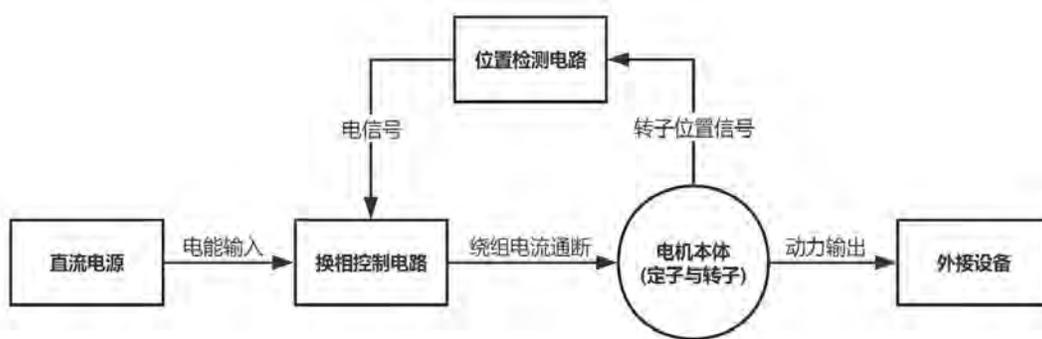


图 1 永磁无刷直流电机运行原理

Fig.1 Principle of operation for a permanent magnet brushless DC motor

2 电机本体选型与优化设计

2.1 电机定子

电机定子的主要结构包括定子铁心和电枢绕组。定子铁心构成传导磁通的磁路，但在工作中会产生磁滞损耗和涡流损耗，影响电机的效率与温升，所以通常选用导磁性好、较薄且损耗较低的优质硅钢片叠压

而成^[8]。这种加工方式能够增加涡流电阻路径长度，从而提高涡流电阻，减少涡流损耗的发生，但确保硅钢片的平整度和厚度均匀性是主要技术难点^[9]，需要进一步提升精密切割与叠压工艺。新兴的非晶合金定子铁心具有更低的损耗和更高的效率，Lai 等^[10]研究了非晶合金定子铁心对电机性能的影响，对比硅钢铁心，

电机效率提高了 4.76%，重量减轻了 11.36%，性能得到了有效提升。Xu 等^[11]对非晶合金定子铁心的径向电磁振动进行了分析研究，发现其材料应力敏感性和磁致伸缩系数相比硅钢铁心更高、更大，导致高转速时更易产生径向振动。而国家医药行业标准规定，当转速大于 30 000rpm 时，高速电动手术工具径向跳动不能超过 0.08mm^[12]。此外，较高的制造难度与成本，也是限制非晶合金定子铁心在医疗领域普遍应用的原因之一。

定子铁心的形状决定了电机的磁路特性，对电机的性能和效率有着重要影响。根据是否在内圆上开槽，定子铁心分为有槽式与无槽式。有槽式通常采用开口槽、半开口槽、半闭口槽（梨形槽和梯形槽），如图 2 所示。开口槽结构简单、散热性好，但电机效率和输出功率较低；半开口槽具有更好的

磁路特性，可以降低电机损耗与噪声，但制造成本较高；半闭口槽转矩波动小、转速稳定，但散热较差，限制了电机功率的提高^[13]。有槽设计的研究重点是减小齿槽转矩，降低电机振动与噪声，提高手术操作安全性。通过定子斜槽、转子斜极、不等齿宽、辅助凹槽等方法来抑制齿槽转矩十分有效，但制造的复杂性和生产成本也会随之增加^[14]。Panchal 等^[15]在不增加制造成本的情况下，采用永磁体偏移技术降低齿槽转矩，当永磁体偏移角为 3° 时，齿槽转矩从 1.1N·m 减小到 0.6N·m，降低比率达 45.5%。Anuja 等^[16]通过将不同厚度（2.5mm 和 2mm）的永磁体交替放置，将齿槽转矩降低了 55.5%，并使电机的机械摩擦损失得到有效减少。因此，在经济性的前提下，优化永磁体布局是降低齿槽转矩的有效方法。

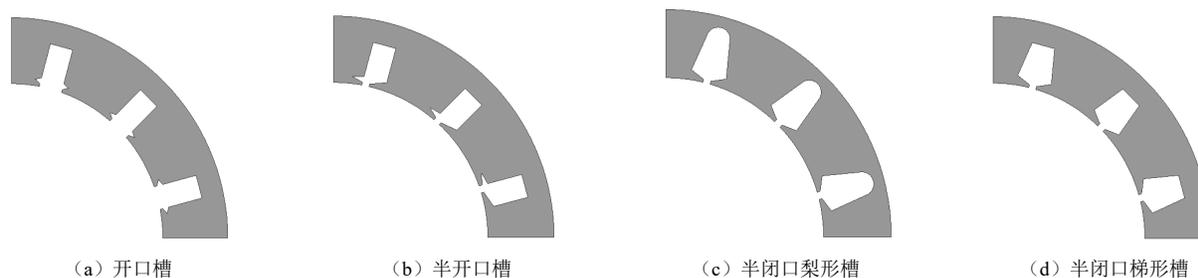


图 2 有槽式定子的槽型

Fig.2 Slot types of slotted stator

无槽设计可以更加紧密地包裹转子，从而减少漏磁和涡流损耗，使电机转速与效率更高，其结构模型如图 3 所示。由于没有定子齿，电机运行时不会产生齿槽转矩，振动和噪声较低，稳定性更好^[17]。然而，高速电动手术工具在手术前后需要进行灭菌处理，医院最常用的灭菌方法是高压灭菌，也称蒸汽灭菌。将高速电动手术工具的手机和工具头在 121 ~ 134℃ 温度、15 ~ 30 psi 压力下进行 10 ~ 60 分钟的高压灭菌处理，并通过真空循环促进蒸汽渗透，杀死附着在手机和工具头内部的细菌、病毒、真菌和孢子等微生物^[18]。无槽设计会使电机绕组暴露在外部潮湿的环境中，使用普通涂层或模制保护绕组将导致磁气隙增加，从而降低电机的性能和工具的效率^[19]。因此，超薄绝缘涂层的研发是目前推动无槽式定子电机在高速电动手术工具领域深入应用的主要方案。

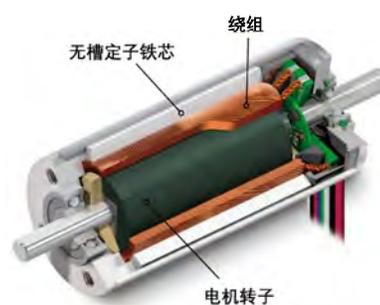


图 3 无槽式定子电机结构模型

Fig.3 Structure model of slotless stator motor

电枢绕组产生电磁转矩并进行机电能量转换。在有槽式定子结构中，绕组根据布线形式的不同，可分为集中绕组与分布绕组，如图 4 所示。集中绕组只缠绕在一个定子齿上，加工简单、散热性好，但在高转速时容易产生谐波，导致电机损耗加大、效率降低；

分布绕组至少缠绕在两个定子齿上，具有较小的转矩脉动、损耗和噪声，更适用于要求高转速、高稳定性的高速电动手术工具^[20]。无槽结构为绕组设计提供了更多可能，国内外科研人员在其尺寸、形状、材料方面进行了广泛的研究。Burnand 等^[21]建立了阻力与转矩的无槽电机常数模型，通过缩短无槽绕组端部长度和选用不同的导线宽度，将电机常数提升了 18%~24%。Dehez 等^[22]用柔性 PCB 技术生产的绕组取代由圆形导线制成的传统斜交或菱形绕组，使永磁无刷直流电机的功率密度提高了 23%，但绕组的热导率也随之提高。国家医药行业标准规定，在额定工作条件下，高速电动手术工具可触及的外壳表面温度不应超过环境温度 20°C^[12]，因此在绕组设计研究中，除了常规的电磁性能，还应对其导热性能进行优化。

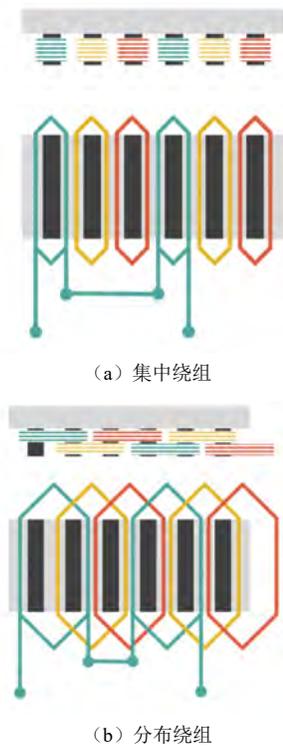


图 4 绕组类型
Fig.4 Type of winding

2.2 电机转子

电机转子分为外转子与内转子，如图 5 所示。外转子结构的电机形状紧凑且扁平，具有更大的转矩密度，但瞬态响应差且不易达到超高转速，在医用领域常应用于手术机器人和电动夹具等低速大转矩场合^[23]。内转子结构的电机功率密度大，转动惯量小，响应快，

散热好，电机封闭性和抗干扰性好，易实现超高转速和精确控制，非常适合对灵敏性和稳定性要求较高的高速电动手术工具领域^[24]。

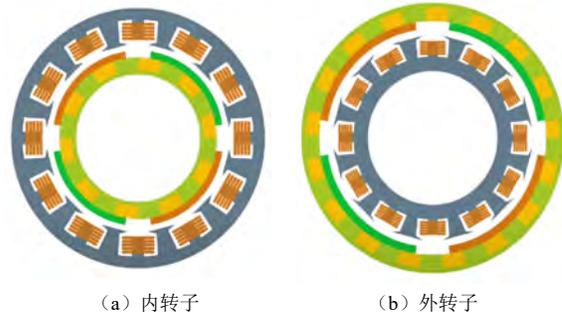


图 5 转子类型
Fig.5 Rotor types

转子上的永磁体负责产生磁场，最早采用铝镍钴或铁氧体制成，新兴的钕铁硼稀土材料具有高矫顽力、高磁能积和高剩磁通密度等优势，但价格较高，为兼顾成本与性能，目前多采用混合材料的永磁体设计^[25]。永磁体的结构根据排布位置的不同，分为表贴式与内置式，如图 6 所示。Du 等^[26]通过多物理有限元模型，对两种不同的结构进行分析比较。在相同条件下，表贴式永磁体结构的转子和定子铁心损耗更低，电机使用寿命更长，且工艺简单，转矩波动小，磁场分布均匀，具有更好的磁通利用率，但套筒的屈服强度和散热性能优化是研究重点。Mukherjee 等^[27]通过对比研究发现，内置式永磁体结构具有更大的弱磁范围、更好的消磁耐受能力和更高的临界转速，能缩小电机尺寸，增大磁阻转矩，提高电机功率密度。其中，径向内置式结构强度更大，切向内置式功率密度更大。内置式永磁体的缺点是磁桥设计复杂、制造成本较高，会产生更大的电磁转矩脉动和齿槽转矩，只适用于对转矩波动要求较低的高速电动手术工具。

永磁体的磁极数量用极对数表示，极对数越多，电机的转速越低，转矩越大；极对数越少，电机的转速和输出功率越高，转矩越小^[28]。Hajnrych 等^[29]研究发现，极对数越接近槽数的一半（极距约为 0.8），越容易产生良好的转矩密度，齿槽转矩、反电势畸变和理想转矩脉动越小。对于高速电动手术工具这种要求高速、低转矩的应用，通常选用较少的极对数，能够降低噪声和振动，提高手术操作的精度与安全性。

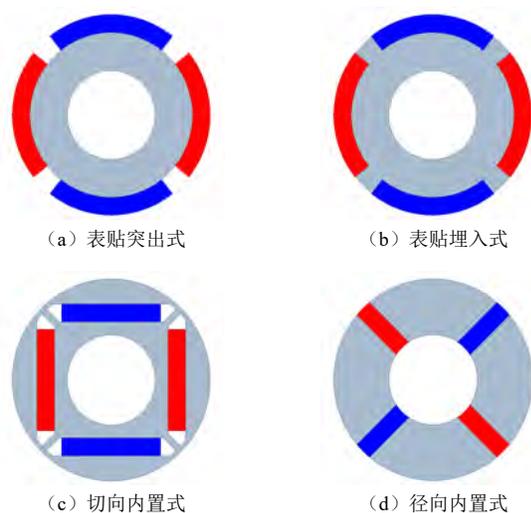


图 6 永磁体排布方式

Fig.6 Arrangement of permanent magnets

3 位置检测电路选型与优化设计

永磁无刷直流电机根据转子相对于定子绕组的位置,进行换相导通,使电机持续运转。转子位置信号由位置检测电路负责检测,分为有传感器检测与无传感器检测两种方式。有传感器检测常用的传感器有电磁式、光电式和磁敏式。电磁式通过检测绕组中电磁场的变化实现转子位置检测,不易受温度、压力等因素的影响,但信噪比小、位置分辨率低、体积较大,容易受到外界磁场的干扰,不适用于高速电动手术工具领域^[30]。光电式通过检测光源和接收器之间的遮挡程度来确定转子位置,精度和位置分辨率高,缺点是容易受到灰尘或潮气的影响,可靠性低^[31],同样不符

合高速电动手术工具的设计要求。磁敏式基于霍尔效应或磁阻效应进行位置检测,其中的霍尔传感器不仅具备其他传感器的优点,而且体积小、结构简单、经济耐用、可靠性高,是高速电动手术工具中最主要使用的转子位置传感器^[32]。

霍尔传感器在使用中可能会由于安装精度不足而输出错误的位置信号,所以其安装误差的故障检测、识别和相关补偿控制算法一直以来都是研究重点^[33]。近年来,人工智能技术在永磁无刷直流电机领域高速发展,Veni 等^[34]开发了一种基于人工智能算法的故障诊断和容错系统,可以在最多两个霍尔传感器出现故障时,对转子位置信号进行重建与补偿,快速且有效。Chu 等^[35]使用卷积神经网络和长短期记忆结合(CNN-LSTM)来检测故障并恢复霍尔传感器信号,诊断准确度达 99.3%,故障恢复率达 95%,凸显了深度学习在该领域的潜力。

无传感器检测通过测量和计算电枢绕组的反电动势或电流波形,间接推断转子的位置信息,电路原理如图 7 所示。由于无须安装与维护传感器,所以能有效缩小电机尺寸、降低生产成本。而使用电机本身反电动势或电流作为反馈信号,可以有效降低外界干扰的影响,提高系统的响应速度与控制的稳定性,但电机内部结构变化或损坏时,可能会导致检测精度降低^[36]。无传感器检测应用于高速电动手术工具领域,需要更加复杂的控制算法与硬件设计来满足其高精度控制、高响应速度的需求,这就增加了控制系统和高效电路的设计与调试难度,是目前研究的主要方向^[37]。

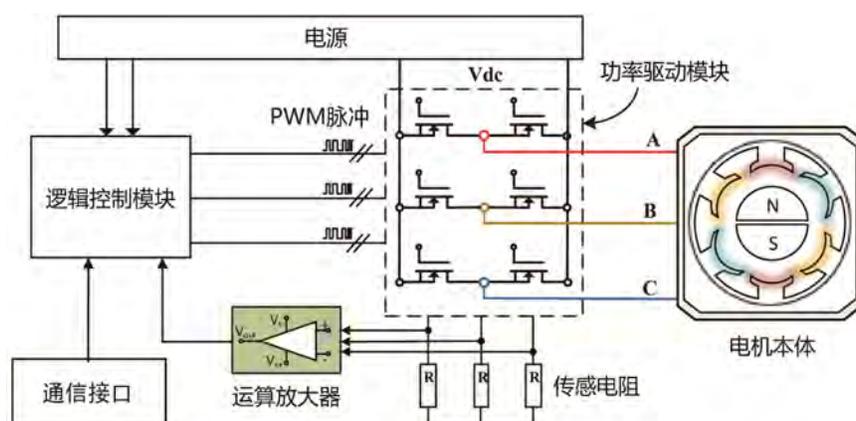


图 7 无位置传感器检测电路

Fig.7 Sensorless detection circuit

目前，常用的无传感器检测方法有反电动势法、磁链法、电感法、状态观测法和人工智能法^[38]。反电动势法利用电机反电动势过零点信号延迟 30° 与换向逻辑之间的关系，实现转子位置检测^[39]。Zhao 等^[40]通过比较终端电压和母线电压获得零交叉点与续流信号，通过固定延迟数字滤波器处理换向干扰脉冲，实现了瞬态换相控制，与传统反电动势法相比，避免了低通滤波的产生。Jafarboland 等^[41]基于线对线磁链，采用无迹卡尔曼滤波方法识别参数，与反电动势法相比，具有减少换向操作引起的转矩脉动和抵抗电机参数变化等优点。方红伟等^[42]利用电机凸极效应，通过对电机三相绕组注入固定时长的电压矢量并检测对应单相电流响应来检测相电感值，根据电机转子位置与相电感值的关系确定换相点，与传统电感法相比，检测时间缩短，加速能力提高。Kim 等^[43]提出了一种低阶扰动观测器，利用可测输出变量，渐近估计频率已知但幅值和相位未知的谐波干扰，保持抗参数不确定和偏谐波干扰的标称性能，且具有与全阶扰动观测器相同的鲁棒性。Pradeep 等^[44]开发了一种基于自适应网络模糊推理系统（Adaptive Network based Fuzzy Inference System, ANFIS）和人工蜂群（Artificial Bee Colony, ABC）算法的无传感器智能控制技术，用生成霍尔信号的 ANFIS 控制器取代霍尔传感器，基于 ABC 的脉冲取代生成开关脉冲的逻辑门电路。该技术响应速度快，稳态误差低于现有方法，但在低速情况下的检测效果还有待验证。

4 换相控制电路选型与优化设计

换相控制电路与有刷电机中的机械电刷和换相器的作用相同，由逻辑控制模块和功率驱动模块组成。逻辑控制模块根据预设的控制策略，将位置检测电路检测到的转子位置信号处理为电信号。该功能通常由数字信号处理器（Digital Signal Processor, DSP）、现场可编程门阵列（Field Programmable Gate Array, FPGA）或微控制器（Microcontroller Unit, MCU）等芯片实现。DSP 具有高性能、低延迟和低功耗等优点，但价格相比其他处理器高^[45]；FPGA 具有高度的可定制性和可扩展性，但存在开发难度较大的缺点^[46]；MCU 虽然不适用于需要大量存储的应用，但因其处理速度较快、性价比高，且具有丰富的通用接口与开发工具，因而最符合高速电动手术工具的设计需求^[47]。

功率驱动模块输出电信号控制电枢绕组换相导通，产生交变磁场，实现电机的持续转动。通常采用半桥式或全桥式驱动电路来实现功率驱动模块，其拓扑结构如图 8 所示。半桥式结构简单、成本低，但输出的电压和电流只有一半可控，因此精度相对较低^[48]；全桥式结构虽然成本较高，但其高精度、高效率和高稳定性的优点，能够满足高速电动手术工具低噪声、低振动的控制要求，因此成为该领域电路设计的首要选择^[49]。

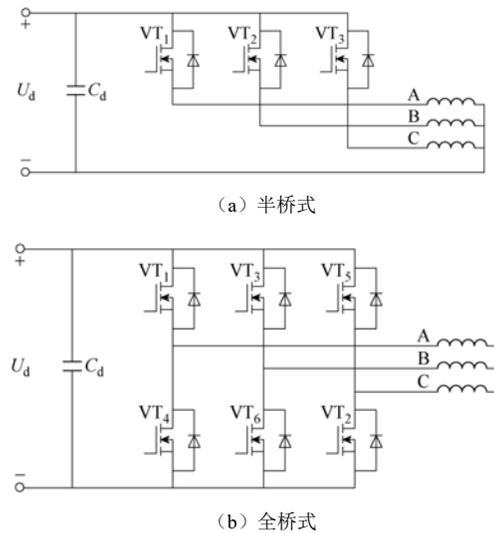


图 8 常用驱动电路拓扑结构

Fig.8 Common topologies of drive circuits

电子换相时，电流磁场方向发生突变会产生换相转矩波动，不仅会降低电机调速性能与负载能力，还会产生振动和噪声，影响高速电动手术工具的运行效果与操作体验，甚至会对患者造成危害。减少换相转矩波动对手术过程的精确性和稳定性至关重要，目前的主要方法为重叠换向法、脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation, PWM）法、电流预测法、拓扑结构法、直接转矩控制法^[50]。重叠换向法通过延迟关断相时间或提前开通相时间，使非换相电流基本保持不变。PWM 法通过斩波控制换相过程中的电压幅值，使关断相电流变化速率与开启相电流变化速率相同。电流预测法利用当前电流值对下一周期的电流值进行估算，调节电压占空比。Zhou 等^[51]在数学分析的基础上，提出了一种优化占空比的方法，通过动态调整换相期间的电压占空比，使转矩脉动目标公式为零，从而使换相过程更平滑，减小了转矩波动。Raj 等^[52]在电机拓

扑结构前端使用混合电压增益转换器, 逆变器直流链路连接辅助开关, 控制相变期间电流的上升速率, 在减少换相转矩波动的同时, 还能使电机在低于额定电压的电源条件下工作。Huang 等^[53]分析了关断相电流与转矩波动的关系, 提出了相电流闭环重叠换相策略, 通过控制换向过程中关断相位的施加电压和延迟时间, 使关断相电流的下降速率显著降低, 补偿了换相中的转矩损失, 从而有效抑制了换相转矩波动。但该方法应用在可靠性要求更高的高速电动手术工具中, 需要开发控制算法更加先进的驱动电路。

5 总结与展望

永磁无刷直流电机在高速电动手术工具应用中具有高速度范围、高转矩密度、高精度控制、小体积尺寸、低噪声振动等优势, 为骨科、神经外科、整形外科手术操作提供了更好的性能与可靠性。其中, 内转子永磁体表贴式电机结构因转动惯量和转矩波动小、绕组散热性能和电机封闭性好, 在高速电动手术工具中应用最佳。

永磁无刷直流电机的研究重点是根据不同的手术需求, 对电机本体、位置检测电路和换相控制电路进行高性能、高稳定的选型与优化设计研究。目前, 在手术和消毒过程中, 电机容易受到潮湿和腐蚀的影响而发生各种故障, 为了最大限度地提高其在外界环境干扰下的可靠性, 延长使用寿命, 工具设计人员和电机设计人员应合作制定全面的保护策略。另外, 随着智能化时代的到来, 神经网络、自适应控制、模糊控制等新型人工智能控制方法成为电机传感器故障检测和补偿控制、无位置传感器控制的研究热点。未来的研究应以降低转矩脉动、减小电机噪声与振动为目标, 进一步增强手术安全性与握持舒适度。此外, 高性能材料的开发、加工制造技术的进步, 也将提升永磁无刷直流电机在高速电动手术工具领域的应用效果, 对我国医疗卫生事业的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 孙啸云, 申玉英, 纪木火, 等. 老年骨科手术患者术前衰弱与术后 1 年内死亡的相关性[J]. *临床麻醉学杂志*, 2022, 38(4): 395-399. SUN Xiaoyun, SHEN Yuying, JI Muhuo, *et al.* Association between preoperative frailty and postoperative death within one year in elderly patients undergoing orthopedic surgery[J]. *Journal of Clinical Anesthesiology*, 2022, 38(4): 395-399.
- [2] BOIADJIEV G, BOIADJIEV T, DELCHEV K, *et al.* Basic characteristics of handheld robotized systems in orthopedic surgery[C]. 28th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2020: 491-495.
- [3] 孙良伟. 医用手术动力装置高速微电机设计[D]. 重庆大学, 2016. SUN Liangwei. The design of high-speed micro-motor used in medical power plant operation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [4] HUNG S S, HSU A S F, HO T H, *et al.* A robotized handheld smart tool for orthopedic surgery[J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2021, 17(5): 1-10.
- [5] DERAMMELAERE S, HAEMERS M, DE VIAENE J, *et al.* A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping motor technologies[C]. 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016: 1-5.
- [6] MOHANRAJ D, ARULDAVID R, VERMA R, *et al.* A review of BLDC motor: state of art, advanced control techniques, and applications[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 54833-54869.
- [7] GANDHI S U, PRASAD B K S. Modelling and intelligent control of micro PMBLDC for surgical robotic applications[J]. *Procedia Computer Science*, 2020, 171: 745-754.
- [8] SUN S J, JIANG F, LI T L, *et al.* Comparison of a multi-stage axial flux permanent magnet machine with different stator core materials[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4): 1-6.
- [9] NGO M H, LE V T, GANDHAM B, *et al.* Unique characteristics of the Novel-GTAW process for the butt joint of ultra-thin silicon steel sheets[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 894-903.
- [10] LAI Y F, HU X L, SHI G B, *et al.* Loss and efficiency analysis of the brushless direct current motor with an amorphous stator core[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2023, 18(3): 2075-2085.
- [11] XU X P, HAN Q K, QIN Z Y, *et al.* Analytical methods for the radial electromagnetic vibration of stator in permanent magnet motors with an amorphous alloy core[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 145(3): 106909.
- [12] 中华人民共和国医药行业标准. 电动骨组织手术设备: YY/T 0752—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. Pharmaceutical industry standards of the People's Republic of China. Electric bone tissue surgery equipment: YY/T 0752—2016 [S]. Beijing: China Standards Press, 2016.
- [13] ZHU C H, LU R J, MEI C L, *et al.* Design and simulation analysis of stator slots for small power permanent magnet brushless DC motors[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023,

- 2023: 1-19.
- [14] KANAPARA A J, BADGUJAR K P. Performance improvement of permanent magnet brushless DC motor through cogging torque reduction techniques[C]. 2020 21st National Power Systems Conference (NPSC), 2020: 1-6.
- [15] PANCHAL T H, PATEL A N, PATEL R M. Reduction of cogging torque of radial flux permanent magnet brushless DC motor by magnet shifting technique[J]. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022(3): 15-20.
- [16] ANUJA T A, DOSS M A N. Asymmetrical magnets in rotor structure of a permanent magnet brushless DC motor for cogging torque minimization[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2022, 17(2): 1271-1279.
- [17] KIM T H, LEE S H, KIM W M. Design and characteristic analysis of high speed slotless permanent magnet synchronous motor for surgical hand-piece[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2014: 219-222.
- [18] OZSAHIN D U. Applications of multi-criteria decision-making theories in healthcare and biomedical engineering[M]. North Nicosia: Elsevier Inc, 2021.
- [19] LEE H Y, YOON S Y, KWON S O, *et al.* A study on a slotless brushless DC motor with toroidal winding[J]. *Processes*, 2021, 9(11): 1881-1889.
- [20] QIU H B, ZHANG Y, YANG C X, *et al.* Performance analysis and comparison of PMSM with concentrated winding and distributed winding[J]. *Archives of Electrical Engineering*, 2020, 69(2): 303-317.
- [21] BURNAND G, THABUIS A, ARAUJO D M, *et al.* Novel optimized shape and topology for slotless windings in BLDC machines[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(2): 1275-1283.
- [22] DEHEZ B, BAUDART F, MARKOVIC M, *et al.* Theoretical and experimental investigation of Flex-PCB air-gap windings in slotless BLDC machines[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(5): 3153-3160.
- [23] TOSUN O, SERTELLER N F O. The design of the outer-rotor brushless DC motor and an investigation of motor axial-length-to-pole-pitch ratio[J]. *Sustainability*, 2022, 14(19): 12743.
- [24] VERBEEK N, DEHEZ B. Comparison of inner and outer rotor configurations in slotless PM machines with PCB windings[C]. 11th IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2019: 1311-1317.
- [25] YAZDAN T, HUMZA M, ALI Q, *et al.* Design and analysis of a two-phase brushless DC motor with hybrid permanent magnet material for only-pull drive technique[J]. *Electrical Engineering*, 2021, 103(5): 2335-2343.
- [26] DU G H, LI N M, ZHOU Q X, *et al.* Multi-physics comparison of surface-mounted and interior permanent magnet synchronous motor for high-speed applications[J]. *Machines*, 2022, 10(8): 700-719.
- [27] MUKHERJEE P, PAITANDI S, SENGUPTA M. Comparative analytical and experimental study of fabricated identical surface and interior permanent magnet BLDC motor prototypes[J]. *Sādhanā*, 2020, 45(1): 26-49.
- [28] WU S S, WANG B J, ZHANG T, *et al.* Design optimization and electromagnetic performance analysis of an axial-flux permanent magnet brushless DC motor with unequal-thickness magnets[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15): 7863-7875.
- [29] HAJNRYCH S J, JAKUBOWSKI R, SZCZYPIOR J. Yokeless axial flux surface-mounted permanent magnets machine rotor parameters influence on torque and back-emf[J]. *Energies*, 2020, 13(13): 3418-3432.
- [30] CAI J, LU L N, LIU Z Y, *et al.* An inductive position sensor with switched reluctance motor structure[C]. 20th IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017: 1-4.
- [31] 丁凡, 王军伟, 姚春良, 等. 基于微电机传动机构位置检测的设计与评测[J]. *机电工程技术*, 2022, 51(6): 220-223.
- DING Fan, WANG Junwei, YAO Chunliang, *et al.* Design and evaluation of position detection based on micromotor transmission mechanism[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2022, 51(6): 220-223.
- [32] AL-ADSANI A S, ALSHARIDAH M E, BEIK O. BLDC motor drives: a single hall sensor method and a 160 degrees commutation strategy[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(3): 2025-2035.
- [33] 王凯, 刘细平, 张云, 等. BLDCM 霍尔传感器故障诊断与容错控制[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(2): 84-90.
- WANG Kai, LIU Xiping, ZHANG Yun, *et al.* Fault diagnosis and fault-tolerant control of hall sensor of brushless DC motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(2): 84-90.
- [34] VENI K S K, KUMAR N S, GNANAVADIVEL J. Hall sensor fault diagnosis and compensation in brushless DC motor drive using artificial intelligence technique[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2023, 51(6): 2777-2797.
- [35] CHU K S K, CHEW K W, CHANG Y C. Fault-diagnosis and fault-recovery system of hall sensors in brushless DC motor based on neural networks[J]. *Sensors*, 2023, 23(9): 4330-4352.
- [36] WANG G L, VALLA M, SOLSONA J. Position sensorless permanent magnet synchronous machine drives-a review[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(7): 5830-5842.

- [37] HO T Y, HUYNH C K, LIN T H, *et al.* The design and implementation of a sensorless power tool based on a microcontroller[J]. **Electronics**, 2020, 9(6): 921-942.
- [38] 郑笑咏, 邓锦祥, 胡荏, 等. 无位置传感器无刷直流电机控制技术综述[J]. **电气传动**, 2022, 52 (24): 3-11+66.
ZHENG Xiaoyong, DENG Jinxiang, HU Ren, *et al.* Summary of control technology of position sensorless brushless DC motor[J]. **Electric Drive**, 2022, 52(24): 3-11+66.
- [39] ATTAR A, BOUCHNAIF J, GRARI K. Control of brushless DC motors using sensorless Back-EMF integration method[J]. **Materials Today: Proceedings**, 2021, 45: 7438-7443.
- [40] ZHAO D, WANG X P, XU L C, *et al.* A new phase-delay-free commutation method for BLDC motors based on terminal voltage[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2021, 36(5): 4971-4976.
- [41] JAFARBOLAND M, SILABI M H R. New sensorless commutation method for BLDC motors based on the line-to-line flux linkage theory[J]. **IET Electric Power Applications**, 2019, 13(6): 703-711.
- [42] 方红伟, 陈奇, 王瑜. 无刷直流电机单相电感检测法无位置传感器控制 (英文) [J]. **中国电机工程学报**, 2022, 42 (2): 783-796.
FANG Hongwei, CHEN Qi, WANG Yu. Sensorless control of brushless DC motor with single-phase inductance detection[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2022, 42(2): 783-796.
- [43] KIM I H, SON Y I. Design of a low-order harmonic disturbance observer with application to a DC motor position control[J]. **Energies**, 2020, 13(5): 1020-1036.
- [44] PRADEEP S S S, BENO M M. Hybrid sensorless speed control technique for BLDC motor using ANFIS automation[J]. **Intelligent Automation & Soft Computing**, 2022, 33(3): 1757-1770.
- [45] TIAN D, HUANG Z. Design of brushless direct current motor control system based on DSP[J]. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2018, 186: 1-9.
- [46] PINDORIYA R M, MISHRA A K, RAJPUROHIT B S, *et al.* FPGA based digital control technique for BLDC motor drive[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2018: 1-5.
- [47] CHE J Q, XU X R, ZHANG H Z, *et al.* Design of DC motor and stepping motor controllers based on MSP432P401R MCU[C]. 2022 International Seminar on Computer Science and Engineering Technology (SCSET), 2022: 217-221.
- [48] WANG S, ZHANG X H, XIONG G S, *et al.* A half-bridge strategy based fault-tolerant control for BLDCM under open circuit fault[C]. 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2020: 1750-1755.
- [49] SUN H T, CHEN Y, LIU J Q, *et al.* A novel structure for switched reluctance motor to be driven by full-bridge power converter[C]. The Proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society, 2022: 94-101.
- [50] 梁超, 段富海, 邓君毅, 等. 无刷直流电机转矩脉动抑制方法研究综述[J]. **机电工程技术**, 2020, 49 (11): 20-22+170.
LIANG Chao, DUAN Fuhai, DENG Junyi, *et al.* Literature review of brushless DC motor torque ripple suppression method[J]. **Mechanical & Electrical Engineering Technology**, 2020, 49(11): 20-22+170.
- [51] ZHOU Q X, SHU J H, CAI Z W, *et al.* Optimal duty cycle method to suppress the commutation torque ripple of brushless DC motor in braking mode[J]. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, 2022, 17(3): 1731-1739.
- [52] RAJ R A, NAIR D S, MP S, *et al.* A novel high-voltage gain circuit topology for commutation torque ripple reduction[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2022, 58(5): 6227-6236.
- [53] HUANG Q, LUO L, ZHANG Y, *et al.* Commutation torque ripple suppression in three phase brushless DC motor using open-end winding[J]. **International Journal of Control, Automation and Systems**, 2021, 19(8): 2747-2758.