

文章编号:1671-6833(2023)06-0001-11

特约述评:两自由度电机及其控制

【特约专家】司纪凯:河南省特聘教授

【按语】中国在太空、深海、深地、极地等高难度科技领域已取得了较好的发展成果。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中指出,国家聚焦深海、深地领域,继续鼓励机器人、先进电力装备的研究发展。其中深层钻进、机械手臂、仿生机器人、精密数控机床等先进装备离不开多自由度复杂的驱动控制装置。两自由度电机控制作为多自由度电机控制中的一个热点领域,为先进装备的驱动控制注入新鲜血液。传统的两自由度驱动装置多采用2个或2个以上的传统电机,通过中间传动机构连接,驱动负载做两自由度运动,这种方式集成度低、磨损大、成本高,不利于高精尖技术可持续发展。两自由度电机的驱动控制策略作为新型电机的驱动装置,具有体积小、集成度高、控制算法多样等优势,能够克服传统多电机多轴驱动的复杂度高、维护成本高等不足,为未来机器人及先进电力装备的驱动提供了有效的解决方案。尽管如此,两自由度电机控制时仍然存在耦合与非线性,这使得两自由度电机模型建立以及高精度、宽速域的控制策略设计面临较大的挑战。《两自由度电机控制策略综述及发展动态分析》一文系统地总结了目前国内外所研究的两自由度电机感应式、永磁式、磁阻式等结构类型电机对应的控制策略,重点对各类两自由度电机的控制效果进行对比,剖析了各种控制策略的控制框架及控制效果的优缺点,指出了两自由度电机控制策略的应用需求及发展动态。

两自由度电机控制策略综述及发展动态分析

司纪凯¹, 刘世妍¹, 聂瑞¹, 王培欣¹, 苏鹏²

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河北工业大学 电气工程学院, 天津 300130)

摘要: 两自由度电机驱动控制的研究可以提高两自由度电机的性能,具有较高的理论与应用价值。以两自由度电机结构为分类标准,综述了感应式、永磁式、开关磁阻式及其他类型两自由度电机的控制策略;以开环控制与闭环控制为分类标准,梳理了各个两自由度电机中所用的控制策略,分析了各类控制策略的优缺点;依据现阶段汽车、医疗、工业、机器人、新能源与军工等相关领域的应用需求,分析并总结了两自由度电机控制的应用发展情况;最后根据理论研究与现实需求,从解耦、系统化、智能化与低速高精度4个角度,探讨了未来两自由度电机控制的发展动态。

关键词: 两自由度电机; 矢量控制; PID控制; 解耦控制; 智能控制; 发展动态分析

中图分类号: G353.11 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.06.010

收稿日期:2023-05-07; 修订日期:2023-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777060,52207067);郑州市协同创新专项资助项目(20XTZX12023)

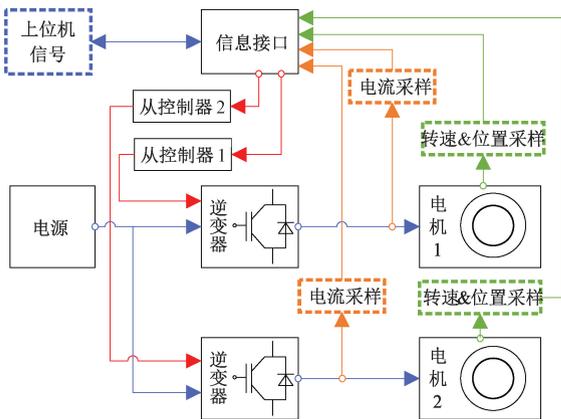
作者简介:司纪凯(1973—),男,河南扶沟人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事先进电磁驱动与控制研究, E-mail:sijikai@zzu.edu.cn。

引用本文:司纪凯,刘世妍,聂瑞,等. 两自由度电机控制策略综述及发展动态分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2023,44(6):1-11,32. (SI J K, LIU S Y, NIE R, et al. Review and dynamic development analysis of control strategies on two-degree-of-freedom motor[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(6): 1-11, 32.)

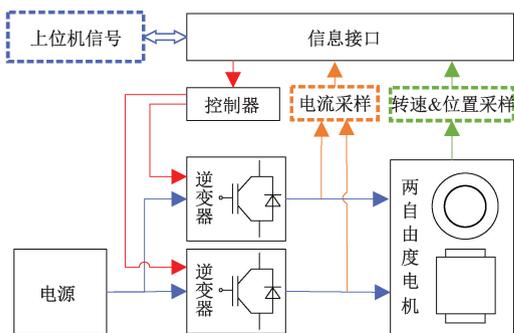
智能生产工业、深海深空探测^[1]、医疗器械、人工智能、国防军工等领域的运动驱动形式复杂,如工业3D打印机驱动、机械手臂驱动、卫星太阳能板方位驱动、医疗探测驱动^[2]、仿生机器人关节驱动^[3]、火炮升降台驱动等,这些驱动多涉及2个及以上自由度的运动。

传统两自由度运动驱动通过多电机控制技术^[4],利用中间传动机构连接,驱动2个或2个以上的旋转电机,从而实现多个不同平面的运动。尽管这种驱动方式应用广泛,但仍存在驱动装置体积大、成本高、磨损大、效率低等不足。

随着科技的进步与发展,无中间传动机构的新两自由度电机(two-degree-of-freedom motor, 2-DoFM)被提出和研究。对比图1(a)、1(b)可知,后者所示2-DoFM驱动对两自由度运动驱动控制过程进行了简化。与传统电机相同,这类电机工作原理仍然基于法拉第电磁感应定律,通过通电线圈(永磁体、铁心)间的电磁感应实现运动。值得关注的是,这类电机设计了特殊的拓扑结构及绕组(永磁体)排布,只需要1个电机就可以同时实现直线、旋转及螺旋运动,这决定了其具有驱动装置体积小、成本低、磨损小及效率高等优势。



(a) 双电机驱动的两自由度运动控制框图



(b) 两自由度电机驱动的两自由度运动控制框图

图1 两自由度运动驱动改进示意图

Figure 1 Improvement of two-degree-of-freedom drive

复杂自由度运动的需求决定了两自由度电机丰

富各异的拓扑结构,多样的拓扑结构决定了这类电机驱动控制策略的重要性与复杂性^[5-6]。在重要性上,两自由度电机驱动控制策略是两自由度电机的一个研究热点,良好的控制策略不仅可以保障电机运行的鲁棒性,还可以提高电机运行的效率,使其进一步向自动化运行靠拢。在复杂性上,多数两自由度电机共用一个定子,使得电机的不同运动状态间存在耦合现象^[7],其对电机的速度、转矩、磁密及其他特性都存在不同程度的干扰,同时也影响着电机等效模型的构成^[8]。设计电机控制策略时,若使用传统的电机方程,则会存在较大误差。

因此,在两自由度电机控制策略研究上,仍存在亟需解决的难题。首先,本文综合国内外文献,以两自由度电机结构为主要分类标准,对两自由度电机控制策略研究现状及优缺点进行综述及分析;其次,对两自由度电机控制的应用情况进行总结分析;最后,对两自由度电机控制的发展动态进行了分析与展望。

1 两自由度电机控制策略研究现状

两自由度电机根据结构主要分为感应式^[9-17]、永磁式^[18-28]和开关磁阻式^[29-34]3大类,同时也包含音圈电机^[35-38]、超声电机^[39]与摆线磁阻电机^[40]等其他类型。此类电机可视为直线和旋转2个电机的组合,其控制策略多为传统电机控制策略的改进与结合,主要包含比例积分微分(PID)控制、恒压频比(V/F)控制、矢量控制(VC)等。

对于不同结构的两自由度电机,其控制策略存在着一定差异,本文依据结构分类对两自由度电机控制策略研究现状进行综述。

1.1 两自由度感应电机的控制策略

文献[41]提出了一种对四定子单动子(4s1m)两自由度螺旋感应电机的相位控制方法,其相位控制原理如图2所示。相位控制是控制通入4个定子线圈中电压相位角 φ 的差 $\Delta\varphi$,使得电机产生辅助线性力,实现对螺旋运动的控制。文献[41]对比通入不同相位角差值时输出磁密、推力等数值大小,发现在螺旋运动中, $\Delta\varphi = 90^\circ$ 时,辅助线性力最大。

文献[42]对Hely单动子双定子串联式两自由度感应电机(图3)提出了一种基于恒压频比控制策略的控制方法,分别控制直线速度和旋转速度^[9,12]。

该两自由度感应电机的控制系统主要分为旋转控制、直线控制及参数设置这3个模块。文献[42]分别模拟螺丝拧紧机、机械手臂及钻床3种实际情况,给定不同的负载值和时间间隔,对比输入转速(直线速度)与仿真输出转速(直线速度)的曲线,2

个自由度速度在稳定时与给定参考速度一致,验证了控制策略的有效性,但是直线部分速度控制仍然存在较大的滞后与超调。

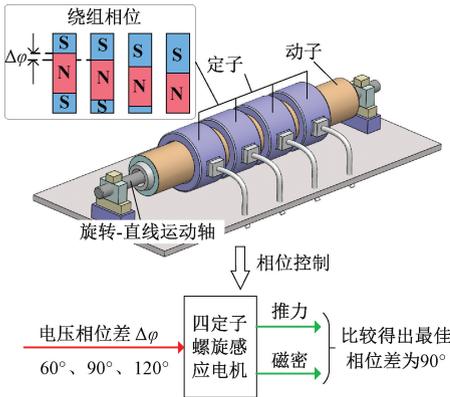


图 2 4s1m 电机及相位控制原理示意图

Figure 2 Schematic diagram of 4s1m motor and its phase control

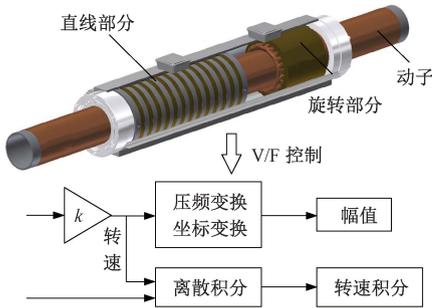


图 3 Hely 及恒压频比控制策略示意图

Figure 3 Schematic diagram of hely and its V/F control

文献[15,43]对提出的对半式两自由度直驱感应电机(2-DoFDDIM)设计了转子磁场定向的矢量控制策略,图 4 为 2-DoFDDIM 及其控制策略。

在对 2-DoFDDIM 进行数学建模时,采取 2 个自由度运动分开建模的策略,一方面,考虑到 2-DoFDDIM 对半式结构的特点,将直线电机的动态端部效应加入数学模型^[43];另一方面,由于电机进行空载螺旋运动时,2 个自由度运动速度均小于单自由度运动时空载转速。文献[15]分析了电机等效展开模型的行波磁场与旋转磁场对电机通电绕组的安培力作用,引入耦合系数(式(1)、(2)),提高了 2-DoFDDIM 数学模型的精确性。

$$T_{\text{coupling}} = k_r n; \quad (1)$$

$$F_{\text{coupling}} = k_1 v_0. \quad (2)$$

2-DoFDDIM 的矢量控制策略参考 LIM 的矢量控制,建立直线和旋转 2 个独立的控制模型,分别供电控制,这种控制策略是通过直接修正滑差频率(式(3))导致的解耦错误实现的。尽管控制策略在电机稳定时速度控制效果良好,但旋转速度与直线速度在启动时仍存在超调及滞后的现象,其中直线部分的速度控制滞后较多,电机的电流、电压与磁密等特性也有待进一步分析。

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{L_m}{T_r \psi_r} i_{st}; \\ \psi_r = \sqrt{\psi_{rx}^2 + \psi_{ry}^2}. \end{cases} \quad (3)$$

对比同样对半式结构的两自由度感应电机,不同极槽配合的电机特性及控制特性存在着较大的不同。文献[43]控制的 3 对极电机较文献[15]控制的 2 对极电机耦合效应有一定的削弱,这在文献[17]中有较为详细的理论分析。观察矢量控制后的电机速度曲线可以发现,3 对极电机较 2 对极电机有更好的跟随性。

1.2 两自由度永磁电机的控制策略

文献[20]对提出的螺旋结构两自由度永磁电机设计了传统的三相逆变器 PWM 直接驱动控制,图 5 为该电机内部结构及控制驱动示意图。

该电机的控制方程依据该电机的等效磁导模型列写,其中,转矩与推力的方程则是结合磁共能与气隙位移的关系式进行推导。尽管可以获得接近电机特性的方程,文献[20]也指出,在实验过程中发现电机的等效转子较大、加速性能差等问题。在此基础上,文献[44]对改进的该类结构电机提出了集成扰动观测器的解耦控制,不仅可以直接驱动电机,且获得了良好的鲁棒性。文献[45]为提高能量利用率,对该类结构电机提出了一种前馈电流积分零功率控制策略,抑制了波动,提高了功率。这 2 种控制策略的示意图如图 6 所示。

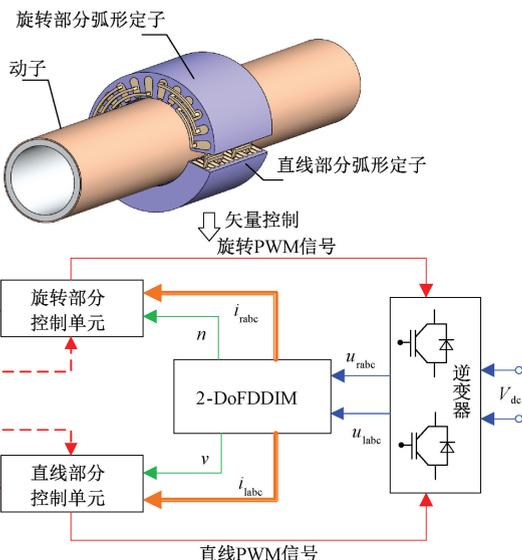


图 4 2-DoFDDIM 及矢量控制示意图

Figure 4 Schematic diagram of 2-DoFDDIM and its vector control

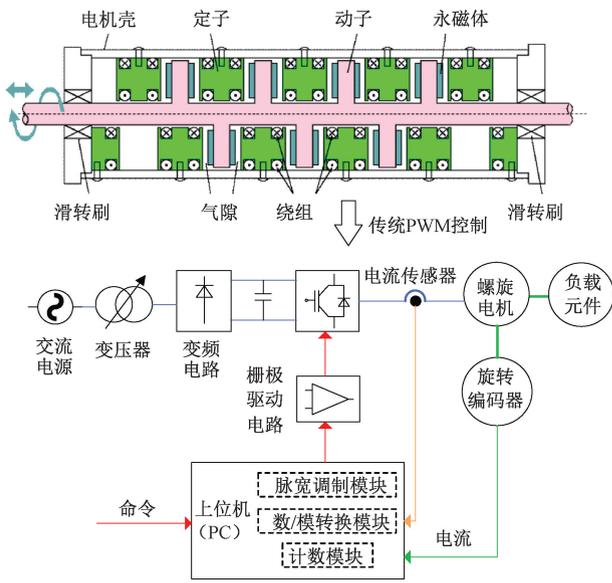


图5 螺旋永磁电机及PWM直接驱动示意图
Figure 5 Schematic diagram of HPMM and its PWM direct drive

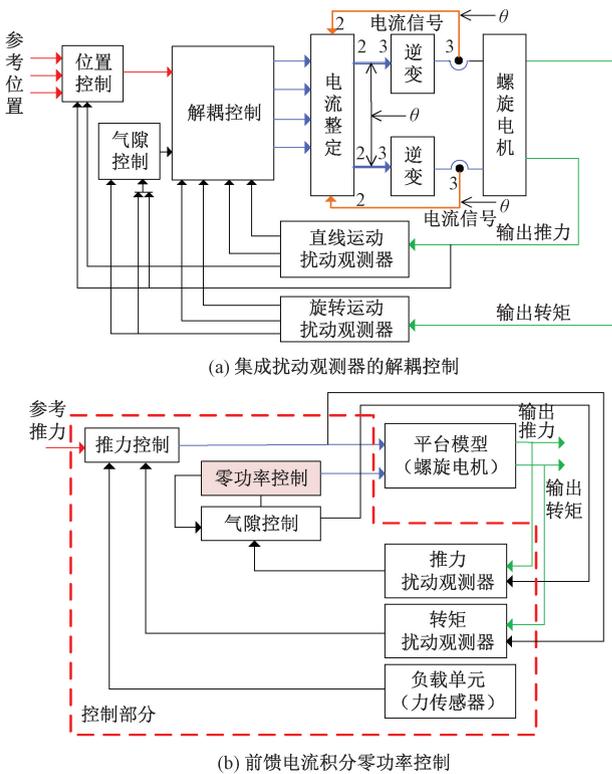


图6 螺旋永磁电机及改进控制策略示意图
Figure 6 Schematic diagram of HPMM and its improved control

此类两自由度电机内部只有完整的一套三相绕组,且受到结构的限制,两自由度螺旋运动的螺距固定,因此推导出相关的电机数学模型及运动方程后,其控制策略可以按照传统的控制策略来设计。

遵循传统电机控制策略的单套绕组电机还包括文献[21]提出的变转速磁齿集成电机(MITROMAG),该电机也是一种单绕组螺旋永磁电

机,其动子表面的永磁体螺旋间隔缠绕,图7为MITROMAG的示意图及其速度闭环控制策略^[46]。

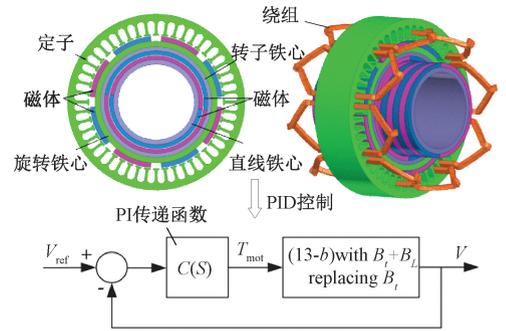


图7 MITROMAG及PID控制示意图
Figure 7 Schematic diagram of MITROMAG and its PID control

由于只存在1组三相绕组,该螺旋永磁电机的控制策略采用传统的开环控制及PID速度闭环控制。

在开环控制时,考虑电机运动中的总质量、摩擦及涡流等因素,推导运动方程(equation of motion);在PID速度闭环控制中,考虑到电机的动态响应及非线性,文献[46]设置控制目标转矩大于“拉出转矩”的25%以提高动态性能;采用遗传算法(GA),以绝对误差和时间积分的最小值为优化目标,整定PI控制参数 K_p 和 K_i ,PI的传递函数 $C(s)$ 为

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{4}$$

文献[46]在实验中指出,在实际测试中,测量的速度在控制后仍然存在着一一定的波动,并归因于直线电机齿槽力影响。

文献[47]提出了四相多凸极直线旋转无刷永磁电机的一种新型PID解耦控制策略,图8为该电机结构拓扑及改进的PID解耦控制系统。

在推导电机数学模型时,给出了该类电机的广义表达式,其电机的转矩与推力方程为

$$\begin{cases} T = \frac{4}{\pi} p \psi_m \left[i_T + \frac{x}{a} i_C \right]; \\ F = \frac{\psi_m}{a} \left[i_F + \frac{4p}{\pi} \gamma_k i_C \right]. \end{cases} \tag{5}$$

该两自由度电机的解耦控制系统主要包括供电控制电路、电机数学模型块、电流逆变控制块、直线位置控制块、直线速度控制块、旋转速度控制块及传感器块等。其中,供电控制电路采用五桥臂分别控制四相电。在控制系统中,直线位置控制部分采用改进的PID控制策略输出参考位置 n_{sr} ,直线速度控制采用PI控制输出电流参考值 i_f ,旋转速度控制经过改进的PI调节输出时间 t ,电流逆变控制块采用

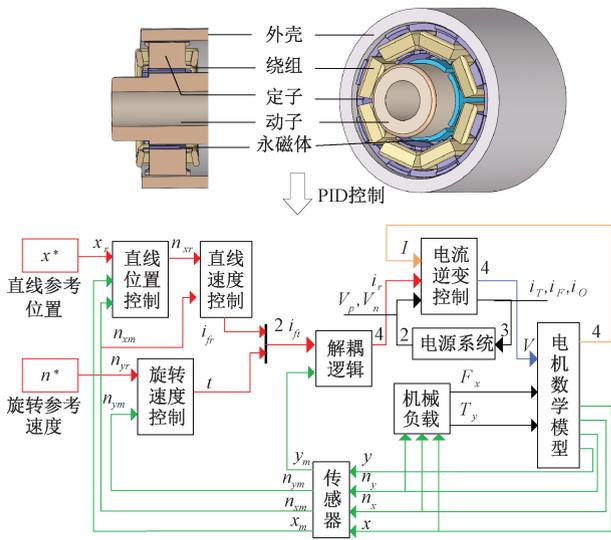


图 8 四相多凸极 LRM 及其 PID 控制

Figure 8 Four phase multi-salient pole LRM and its PID control

标准的 PI 控制,直接将四相电压输出至电机数学模型块,电机数学模型块检测到的各类信号经传感器再反馈给各控制块,实现闭环。从文献[47]在 MATLAB/Simuink 中的仿真结果分析可得,这类控制策略稳定时可控,在转矩较低时,存在转速控制的延迟时间较长的不足,有待进一步改善。

文献[48-49]提出了一种对双定子 L RPM 的最小电阻损耗控制策略,图 9 为该电机及这种控制的示意图。这种控制在电机控制状态方程建立时就以最小电阻损耗为目标函数,推导了电磁推力(F)和转矩(C)的表达式,由于电机容量与电阻损耗 $P_{R\ loss}$ 相关,因此,将电阻损耗描述为

$$\begin{cases} P_{R\ loss\ max} = \left(\frac{F''}{1}\right)^2 + \left(\frac{C''}{g(y')}\right)^2 \leq 1; \\ g(y') = \frac{1}{\max\{f_A(y'), f_B(y')\}} \end{cases} \quad (6)$$

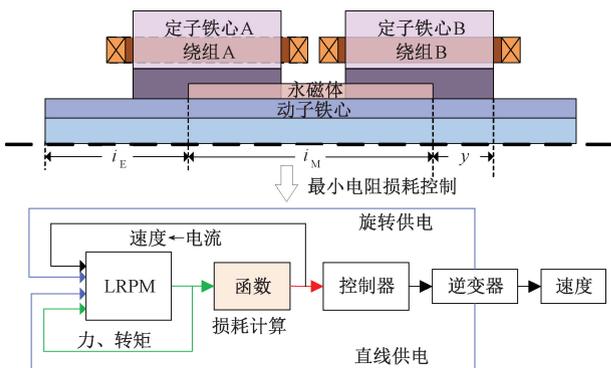


图 9 L RPM 及最小电阻损耗控制示意图

Figure 9 Schematic diagram of L RPM and its minimum loss control

根据文献[49]给的仿真结果分析可知,除直线位置控制的超调及滞后现象较明显及存在明显的转矩波动外,控制效果良好。

有关直线旋转永磁电机(LRPM)不同结构的控制策略还包含:①基于矢量控制,设计了最小铜损控制策略,在控制系统中采用双 DSP 控制^[50-51];②对所提磁通反向 LRPM 沿用双 DSP 控制,基于矢量控制对其设计了解耦控制系统^[52]。③文献[53]对双定子 LRPM 设计了矢量控制策略并基于 DSP28355 构建了电机驱动控制系统,为进一步改进耦合影响提出了可平滑切换运动状态的多运动协调控制策略。文献[54]对有关双定子 LRPM 控制策略及系统设计进行了详尽的总结分析。

1.3 两自由度开关磁阻电机的控制策略

图 10 为一种基于螺旋绕组结构的 STRM 的示意图。最初这种电机只用来做直线运动,后对其原理进行分析,发现了其旋转运动的状态。

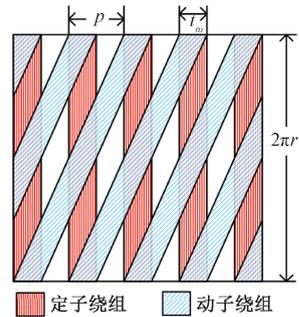


图 10 STRM 的绕组示意图

Figure 10 Schematic diagram of STRM's windings

文献[55]推导了该类电机的等效电路模型,依据涡流分析转矩输出给出了该类直线电机进行旋转运动的原理,而后对电机的 2 种运动状态建立动态模型,提出了一种 PID 控制。微控制器系统与 PC 机串行通信后,馈入信号经过电流控制器和 PWM 单元形成驱动脉冲,切换单相供电六脉冲逆变器的 IGBT,逆变器的输出连接并控制电机运动。而后,引入倍增的 APF 因子描述饱和的非线性效应,并给出了该类电机的阻尼函数对电机运动控制进一步改进。文献[55]指出在未来控制研究中,有必要在闭环中控制电机的磁场定向,以达到与纯直线运动 STRM 相当的甚至更高的定位精度。

图 11 所示的是日本学者 Sato^[29]提出的直线旋转开关磁阻电机(LR-SRM)。该电机包含一对同轴串联的 6/4 SRM 定子,两定子同轴耦合,其转矩为两定子转矩之和,直线推力为两定子间磁吸力之差。文献[29]基于旋转轴位置传感器和附加线性电位器的反馈信息,采用传统的定子电流 PID 控制

策略。

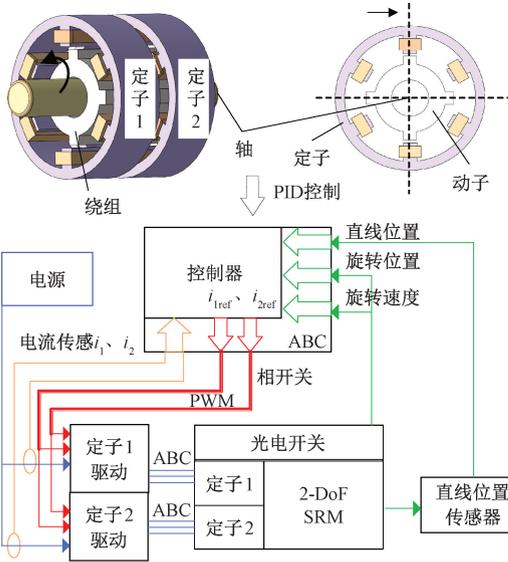


图 11 LR-SRM 及其 PID 控制框图

Figure 11 Schematic diagram of LR-SRM and its PID control

经过控制性能测试,得出推力和转矩可以独立控制。而后,又在转速一定时测试了直线定位控制,观察其直线定位阶跃响应可以发现,稳定时控制效果良好,但仍然存在一定的过冲,文献[29]也指出该现象可以通过加强阻尼效应改进。

文献[32,56]也对该类双定子 SRM 电机提出了一种 PID 控制策略,控制框图如图 12 所示。当输入给定信号时,将其解耦为直线运动和旋转运动,分别产生相应的给定信号,进入机械耦合模块后,生成 2 个定子的电流激励信号进入相应的 PID 电流控制器,进而控制直线旋转开关磁阻电机。在整个控制中采用电流环和位置环的闭环控制方法,调节 PI 参数后,该电机的电流与速度控制精度得到提升。

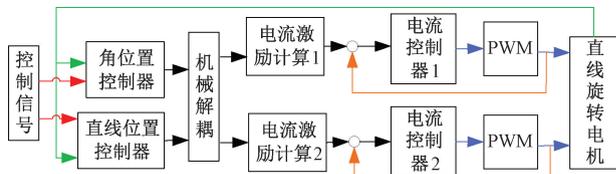


图 12 直线旋转开关磁阻电机控制框图

Figure 12 Control block for the linear-rotary switched reluctance motor

文献[57]对三定子 LR-SRM 提出了 3 种运动状况独立控制的解耦控制方法,将 12 个绕组的通电顺序列表格,不同运动情况对应不同通电顺序。其控制框图如图 13 所示。

通过主机输出参考转矩 ω^* 和参考直线速度 v^* ,经过运动控制器和 3 个电流控制器及整流器后,定子输出的转矩和直线速度再反馈给主机,实现

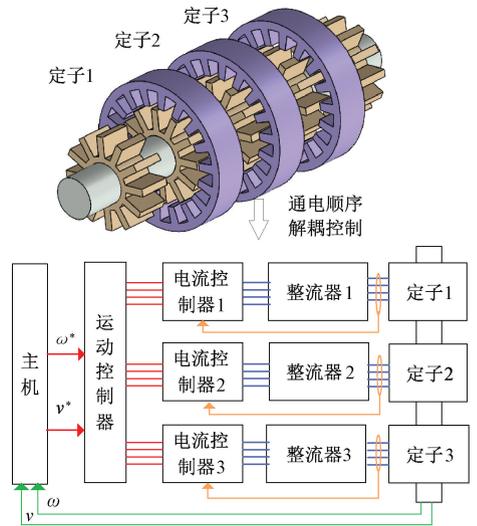


图 13 LR-SRM 的解耦控制

Figure 13 Decoupling control of LR-SRM

闭环的通电顺序解耦控制。该控制策略不仅实现了 2 个自由度运动的解耦,获得了响应较好的闭环控制效果,适用于具有多个定子的控制,兼容性好,但在速度超调及转矩波动方面有待改进。

1.4 其他两自由度电机的控制策略

除了传统的感应式、永磁式及磁阻式的电机结构外,其他两自由度电机的也有相对应的控制策略的研究,其中两自由度音圈电机、两自由度超声电机、两自由度步进电机控制策略的研究值得关注。

(1)两自由度音圈电机(VCM)控制。VCM 是一种用于多维精密加工系统的直接驱动电机^[35],它同样具有 2 个自由度的运动,图 14 是该电机及控制方法。文献[35]在研究其控制方法时,首先,建立了线性旋转数学模型,应用双脉宽调制技术,独立控制 2 个自由度,分析了伺服控制系统的传递函数关系;其次,先后建立了控制系统的电流环、速度环与位置环;最后,结合模糊控制和前馈控制这类智能控制方法,提出了一种三重闭环控制系统,使得线性位置跟随误差与旋转角度跟随误差分别降低到 1.4% 和 0.9%,控制效果较好,几乎观测不到超调现象,控制精度高。

(2)两自由度超声电机控制。图 15 是两自由度超声电机(2-DoFUM)控制驱动测试示意图。文献[58-59]分析该电机的材料结构特性后,采用近谐振点惯性冲击的控制方式,设计了主要由 DSP、隔离电路 ADUM1200、半桥驱动及放大电路组成的驱动电路,该电机控制系统中的控制芯片采用 TMS320F2808,通过该芯片输入 PWM 控制信号。输入不同方波的频率、占空比,可以得到不同速度、不同自由度的运动,以此控制两自由度运动。

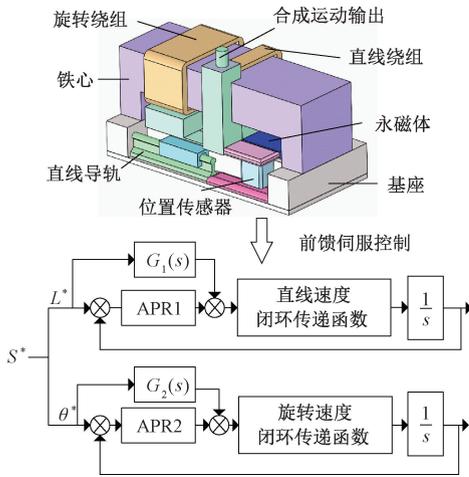


图 14 VCM 的前馈伺服控制

Figure 14 Feed-forward servo control of VCM

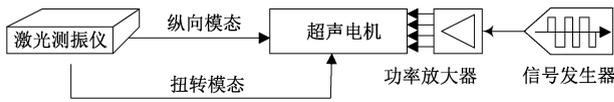


图 15 两自由度超声波电机驱动测试系统示意图

Figure 15 Experiment system of 2-DoFUM

(3)两自由度步进电机控制。文献[60-61]对所提出的仿生眼用两自由度混合步进电机(2-DoFMSM)设计了双电阻检测的恒频脉宽调制细分控制驱动,并设计了基于 51 单片机的控制系统,其电机控制系统如图 16 所示。

在串口通信时设置 2 个电机选择位,根据信号

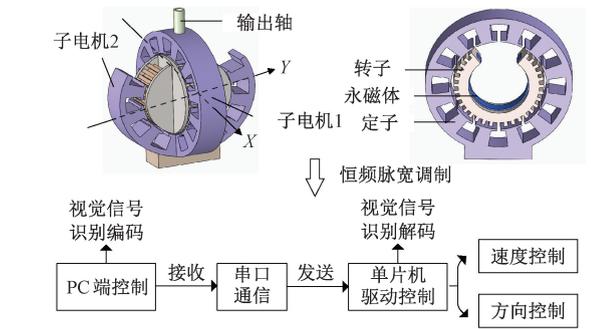


图 16 2-DoFMSM 示意图

Figure 16 Schematic diagram of 2-DoFMSM

0/1 的切换确定眼球运动方式。文献[61]实验测试了该控制策略在单步运行角度 40°电流 32 细分时电机最大定位误差仅 0.04°,达到了良好的控制效果。

表 1 综合比较了两自由度电机不同的控制策略。结合运动方程建立解耦的电机模型和电机的空间状态方程,选择如直接驱动控制、PID 控制、矢量控制等传统的控制策略对电机的特性进行控制。这些方法解决了电机数学模型误差大、控制效果差等问题,但在直线电机的控制中仍然存在较明显的超调与滞后现象。在控制策略中引入前馈控制、模糊控制等智能控制策略可以改进超调与滞后的现象。因此,在对两自由度电机进行控制时,不仅可以建立解耦数学模型提升准确性,还可以通过引入智能控制的方法,进一步实现高精度解耦控制。

表 1 不同两自由度电机控制策略比较

Table 1 Comparison of different 2-DoF motor controls

控制类别	控制策略	控制对象	优缺点分析
开环控制	直接 PWM 控制	螺旋永磁电机 ^[20] 、两自由度超声波电机 ^[58-59]	优点:复杂度低、成本低 缺点:控制范围、控制对象及方式具有局限性,鲁棒性较差
	V/F 控制	定子串联式两自由度感应电机 ^[42]	
	相位差控制	4 定子 1 动子螺旋电机 ^[41]	
	恒频脉宽调制细分控制	两自由度步进电机 ^[60-61]	
闭环控制	PID 控制	四相多凸极旋转直线永磁电机 ^[47] 、螺旋磁阻电机 ^[55] 、同轴旋转直线开关磁阻电机 ^[29,32,56] 、变转速磁齿集成电机 ^[46]	优点:适用性强、鲁棒性好 缺点:参数调节复杂、人工成本高;智能控制加入后简化参数调节,但数据量较大
	矢量控制	定子对半式两自由度感应电机 ^[15,43] 、双定子直线旋转永磁电机 ^[50-53]	优点:动态响应快、低频转矩大 缺点:依赖电机参数,适用性较差
	最优与智能控制	双定子直线旋转永磁电机 ^[48-49] 、两自由度音圈电机 ^[35] 、螺旋永磁电机 ^[44-45]	优点:控制精度高、鲁棒性好、适用性强 缺点:参数量大、计算量大、成本较高

2 两自由度电机控制系统应用分析

传统的电机驱动器如直流驱动器、伺服驱动器、步进驱动器等,已经可以实现批量自动化制造,适用于较多的应用场景。

两自由度电机的控制策略多为传统结构单自由度电机控制策略的改进与延伸,因此,其自动化生产

应用具有较强的可行性,也在汽车行业、机械制造业、医疗领域以及机器人驱动方面有一定的应用实践基础,同时在新能源发电、军工等领域也有良好的应用前景。表 2 总结了其不同应用场合的需求。

(1)汽车行业。早期,两自由度直线旋转永磁电机在汽车换挡器中就有应用,其驱动采用 2 个 MOSFET-H 桥分别控制,驱动器中的 PWM 波采用

PID 控制策略由 ETAS ES1000 高速控制器控制^[25]。可见,两自由度电机的控制系统在汽车领域有良好的实践基础,随着汽车行业革新,高精尖技术发展,两自由度电机驱动将为汽车行业注入新的血液。

(2)机械制造业。直线旋转两定子串联的两自由度感应电机^[49]的控制驱动器设定了3种负载情况,驱动电机样机在稳定状态下可以达到较好的控制效果。两自由度感应电机继承了传统感应电机低成本、高耐用性等特点,更适用于高强度的工业应用。因此其控制驱动器的研究也应结合其应用领域,选用高强度、高耐用性的封装。

(3)医疗领域。两自由度步进电机驱动在用于活体检测的医疗器械中已有实际应用^[2],文献^[2]也讨论了其他两自由度电机在医疗中应用的可能性。由于医疗应用有着高精度、小体积等要求,两自由度电机驱动的设计应当考虑高精度控制策略,设计集成度高的驱动器。

(4)机器人驱动。两自由度电机的控制在机器人中有诸多应用场合,如仿生眼球驱动^[61]、关节驱动^[62]等,其驱动器一般选用集成驱动芯片作为驱动核心,选取合适型号的单片机作为主控制器,封装成控制驱动器。两自由度电机驱动在机器人中的应用应当重点关注高集成度及其驱动的兼容性。

(5)清洁能源发电。两自由度电机包含两自由度电动机与两自由度发电机。两自由度电机中的两自由度永磁电机不仅可以通电成为驱动的电动机,也可结合海上风浪场景实现清洁能源发电^[63]。合适的两自由度发电控制,可以将不稳定的风浪能量控制为稳定性较高的可并网电能,这对其兼容性、对环境的适应性与耐用性都有着较高的要求。

(6)军工应用。军工器械如坦克车炮火升降台、投掷器、跟踪导弹等需要高精度多维的运动控制。两自由度电机控制驱动在军事应用的研究不仅需要实现多维运动控制,更需要极高的控制精度,是未来两自由度电机控制的一个重要应用领域。

表 2 两自由度电机驱动在不同应用场合的需求

Table 2 Requirement of 2-DoF motor drive in different applied situation

应用场合	特性需求				
	集成度	精度	兼容性	耐用性	经济性
汽车	√	√	√		
医疗	√	√		√	
机械制造				√	√
机器人	√	√	√		
新能源			√	√	
军工	√	√		√	

注:“√”表示在其应用领域“需要”对应的特性。

3 两自由度电机控制发展动态分析

两自由度电机具有多方面的优势,其研究迅速发展,但其控制策略的设计仍存在问题。两自由度电机的控制策略发展处于起步阶段,存在着与电机结构绑定性太强、与传统电机驱动器兼容性差等局限性。未来两自由度电机控制可以从以下几个方面进行研究。

(1)解耦控制。分析本文各类结构的两自由度电机的控制方法可以发现,电机2个自由度运动中存在不同程度的耦合。在推导电机等效模型时,解耦电机的两自由度运动,实现解耦控制。解耦控制可以减小电机模型误差,提高控制性能。

(2)系统化控制。在未来研究中,可以将耦合效应作为两自由度电机分析的一项指标。综合各类电机的耦合分析方法,将解耦控制设计系统化,结合“专家系统”,将各类解耦控制策略列入“专家库”,使两自由度电机解耦控制策略设计科学化、标准化,提高效率。

(3)智能化控制。早期,少数两自由度电机在控制中结合遗传算法(GA)确定PI参数值^[46],节省了手工计算的时间。近年来,随着人工智能及深度学习的发展,结合神经网络的电机控制方法也不断更新。在两自由度电机的控制中,应用人工智能的方法可以节省控制策略设计时间,利用计算机进行深度学习可以降低人工成本。

(4)低速高精度控制。多数两自由度电机在样机生产时都会设计匹配电机的基础驱动器,控制效果在额定条件时可以满足要求。然而,当电机低速运行时,控制效果降低甚至失效。因此,未来两自由度电机控制设计时不仅需要关注电机低速时的控制效果,而且需要提高电机在运行时的控制精度,应使用如模型预测控制策略^[64]等高精度控制策略。

4 结语

本文综述了国内外包括两自由度感应电机、两自由度永磁电机、两自由度开关磁阻电机、两自由度超声电机、音圈电机及步进电机等在内的不同结构的两自由度电机控制策略,其控制策略以传统控制策略为主,如PID控制、V/F控制、矢量控制等,也不断引入新型的控制策略,如GA、前馈控制、模糊控制、最小损耗控制等。在此基础上,本文对两自由度电机控制系统在汽车、机械制造、医疗、清洁能源发电、军工等领域的应用情况进行了分析与展望。最后,探讨了两自由度的电机控制在解耦控制、系统

化控制、智能化控制及低速高精度控制的发展动态。在科技不断革新的信息化时代,未来两自由度电机控制的发展必将为电机领域带来突破与革新。

参考文献:

- [1] 陈理. 深刻理解把握新发展理念的由来、内涵和要义[J]. 当代世界与社会主义, 2021(3): 4-21.
CHEN L. Deeply understand and grasp the origin, connotation and essence of the new development concept[J]. Contemporary World and Socialism, 2021(3): 4-21.
- [2] NAIK A U, VADDE A. A review on rotary-linear motors for biopsies[C]//2020 2nd International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIM-IA). Piscataway: IEEE, 2020: 30-35.
- [3] 杨尚奎. 面向肩腕关节的单电机驱动两自由度变刚度执行器研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
YANG S K. Research on single motor driven two-DOF variable stiffness actuator for shoulder and wrist joints[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [4] 叶宇豪, 彭飞, 黄允凯. 多电机同步运动控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2922-2935.
YE Y H, PENG F, HUANG Y K. Overview of multi-motor synchronous motion control technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2922-2935.
- [5] 司纪凯, 司萌, 封海潮, 等. 两自由度直驱电机的研究现状及发展[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 97-107.
SI J K, SI M, FENG H C, et al. Research status and development of two-degree-of-freedom direct drive motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 97-107.
- [6] 付兴贺, 林明耀. 基于电磁感应原理的两自由度直线旋转电机研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 1-13.
FU X H, LIN M Y. Development of two-degrees-of-freedom linear-rotary motor based on the principle of electromagnetic induction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 1-13.
- [7] XIE L J, SI J K, HU Y H, et al. Overview of 2-degree-of-freedom rotary-linear motors focusing on coupling effect[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(4): 1-11.
- [8] SI J K, XIE L J, HAN J B, et al. Mathematical model of two-degree-of-freedom direct drive induction motor considering coupling effect[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2017, 12(3): 1227-1234.
- [9] FLESZAR J, MENDRELA E A. Twin-armature rotary-linear induction motor[J]. IEE Proceedings B Electric Power Applications, 1983, 130(3): 186.
- [10] MENDRELA E A, GIERCZAK E. Performance of rotary-linear induction motor with rotating-traveling field[J]. Electric Machines & Power Systems, 1984, 9(2/3): 171-178.
- [11] MENDRELA E A, GIERCZAK E. Double-winding rotary-linear induction motor[J]. IEEE Power Engineering Review, 1987, 7(3): 32.
- [12] AMIRI E, JAGIELA M, DOBZHANSKI O, et al. Modeling dynamic end effects in rotary armature of rotary-linear induction motor[C]//2013 International Electric Machines & Drives Conference. Piscataway: IEEE, 2013: 1088-1091.
- [13] SI J K, FENG H C, AI L W, et al. Design and analysis of a 2-DOF split-stator induction motor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 1200-1208.
- [14] 司纪凯, 韩俊波, 司萌, 等. 两自由度直驱感应电机优化设计及特性分析[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 75-82.
SI J K, HAN J B, SI M, et al. Optimization and characteristic analysis of 2-DOF direct drive induction motor[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(2): 75-82.
- [15] 司纪凯, 韩俊波, 谢璐佳, 等. 两自由度直驱感应电机耦合效应分析和矢量控制建模[J]. 电气工程学报, 2015, 10(12): 7-12.
SI J K, HAN J B, XIE L J, et al. Coupling analysis and field orientation control for two degree of freedom direct drive induction motor[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(12): 7-12.
- [16] 司纪凯, 王培欣, 谢璐佳, 等. 两自由度直驱感应电机旋转部分对直线部分的耦合效应[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(12): 85-92.
SI J K, WANG P X, XIE L J, et al. Coupling effect of rotary part on linear part of 2-degree-of-freedom direct drive induction motor[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(12): 85-92.
- [17] XIE L J, SI J K, WU T F, et al. Analysis and suppression techniques of helical motion coupling effect for the 2DoF direct drive induction machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1200-1210.
- [18] JANG S M, LEE S H, CHO H W, et al. Design and analysis of helical motion permanent magnet motor with cylindrical Halbach array[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3007-3009.
- [19] TURNER A, RAMSAY K, CLARK R, et al. Direct-drive rotary-linear electromechanical actuation system for control of gearshifts in automated transmissions[C]//2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 267-272.
- [20] FUJIMOTO Y, KOMINAMI T, HAMADA H. Development and analysis of a high thrust force direct-drive linear actuator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1383-1392.
- [21] PAKDELIAN S, DESHPANDE Y, TOLIJAT H A. An electric machine integrated with trans-rotary magnetic gear[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Piscataway: IEEE, 2012: 3356-3362.

- [22] XU L, LIN M Y, FU X H, et al. Analysis of a double stator linear rotary permanent magnet motor with orthogonally arrayed permanent magnets[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2016, 52(7): 1-4.
- [23] XU L, LIN M Y, FU X H. End-effects analysis and experimental study of a double stator linear-rotary permanent magnet motor with long mover[J]. *IET Electric Power Applications*, 2017, 11(9): 1601-1609.
- [24] 徐磊, 林明耀, 付兴贺. 双定子直线旋转永磁电机特性分析与实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(16): 4791-4799.
- XU L, LIN M Y, FU X H. Characteristics analysis and experimental study of a double stator linear and rotary permanent magnet motor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(16): 4791-4799.
- [25] GUO K K, LI J Z, FANG S H. Design and analysis of flux reversal linear rotary permanent magnet actuator[C]//2018 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Piscataway: IEEE, 2018: 1-2.
- [26] GUO K K, GUO Y G. Key parameter design and analysis of flux reversal linear rotary permanent magnet actuator[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(2): 1-5.
- [27] 马瑞. 交替极定子两自由度直线旋转电机设计与电磁特性分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- MA R. Design and electromagnetic characteristics analysis of two-degree-of-freedom linear rotating motor with alternating pole stator[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.
- [28] JIANG G Y, ZHOU H W, TAO W G, et al. Design and analysis of a linear-rotary fault-tolerant consequent-pole PM actuator[C]//2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). Piscataway: IEEE, 2021: 1-5.
- [29] SATO Y. Development of a 2-degree-of-freedom rotational/linear switched reluctance motor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(6): 2564-2566.
- [30] PAN J F, CHEUNG N C, CAO G Z. A rotary-linear switched reluctance motor[C]//2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). Piscataway: IEEE, 2009: 1-4.
- [31] PAN J F, CHEUNG N C, CAO G Z. Investigation of a rotary-linear switched reluctance motor[C]//The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM. Piscataway: IEEE, 2010: 1-4.
- [32] PAN J F, ZOU Y, CHEUNG N C. Performance analysis and decoupling control of an integrated rotary-linear machine with coupled magnetic paths[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, 50(2): 761-764.
- [33] SZABÓ L, BENTIA I, RUBA M. A rotary-linear switched reluctance motor for automotive applications[C]//2012 XXth International Conference on Electrical Machines. Piscataway: IEEE, 2012: 2615-2621.
- [34] LI S Y, CHENG K W E, CHEUNG N, et al. Design and control of a decoupled rotary-linear switched reluctance motor[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 33(3): 1363-1371.
- [35] LUO M Z, ZHOU H B, DUAN J, et al. Design and analysis of a servo control system for a novel linear-rotary voice coil motor[C]//2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Piscataway: IEEE, 2016: 1-5.
- [36] ZHANG Z J, LUO M Z, ZHOU H B, et al. Design and analysis of a novel two-degree-of-freedom voice coil motor[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(6): 2908-2918.
- [37] XING F Z, KWON B I. Design of a rotary-linear motor with unipolar SPM and voice coil structure[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 150291-150300.
- [38] XING F Z, KWON J W, LI M J, et al. A rotary-linear SPM voice coil motor with PM flux bridges for output performance improvement[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 57054-57063.
- [39] 闫纪朋. 面向可旋转式套筒伸展机构的两自由度压电超声电机研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- YAN J P. Research on two-degree-of-freedom piezoelectric ultrasonic motor for rotatable sleeve extension mechanism[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [40] FATEMI A, LAHR D. A comparative study of cycloidal reluctance machine and switched reluctance machine[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(3): 1852-1860.
- [41] ONUKI T, JEON W J, TANABIKI M. Induction motor with helical motion by phase control[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1997, 33(5): 4218-4220.
- [42] CARUSO M, CECCONI V, DIO V D, et al. Speed control of a two-degrees of freedom induction motor with rotor Helical Motion for industrial applications[C]//2014 AEIT Annual Conference-From Research to Industry: the Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT). Piscataway: IEEE, 2015: 1-6.
- [43] 张成杰, 封海潮, 李祎博, 等. 两自由度直驱感应电机矢量控制系统建模与仿真分析[J]. *磁性材料及器件*, 2022, 53(1): 35-40.
- ZHANG C J, FENG H C, LI Y B, et al. Modeling and simulation analysis of two degree of freedom direct drive induction motor vector control system[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2022, 53(1): 35-40.
- [44] SMADI I A, OMORI H, FUJIMOTO Y. Development, analysis, and experimental realization of a direct-drive helical motor[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(5): 2208-2216.
- [45] KOYAMA M, FUJIMOTO Y. Proposal of current integral

- zero power control with force feedforward for helical motor [C]//2014 IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). Piscataway: IEEE, 2014: 663-668.
- [46] PAKDELIAN S, MOOSAVI M, HUSSAIN H A, et al. Control of an electric machine integrated with the trans-rotary magnetic gear in a motor drive train [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 106-114.
- [47] BOLOGNESI P, LANDI A, TAPONNECCO L. Control of an unconventional rotary-linear brushless machine [C]//2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway: IEEE, 2006: 1387-1392.
- [48] BOLOGNESI P, BRUNO O, PAPINI F, et al. A low-complexity rotary-linear motor useable for actuation of active wheels [C]//Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM). Piscataway: IEEE, 2010: 331-338.
- [49] BOLOGNESI P, BIAGINI V. Modeling and control of a rotary-linear drive using a novel isotropic brushless machine [C]//The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM. Piscataway: IEEE, 2010: 1-6.
- [50] JIN P, YUAN Y, JIAN G, et al. Static characteristics of novel air-cored linear and rotary halfbach permanent magnet actuator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 977-980.
- [51] 金平. 直线旋转永磁作动器及其控制系统研究 [D]. 南京: 东南大学, 2012.
JIN P. Research on linear rotary permanent magnet actuator and its control system [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [52] 郭凯凯. 磁通反向直线旋转永磁作动器的设计及其控制系统研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
GUO K K. Design and control system research of permanent magnet actuator with reverse linear rotation of flux [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [53] 徐磊. 双定子直线旋转永磁电机的设计、分析与控制 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
XU L. Design, analysis and control of double stator linear rotating permanent magnet motor [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [54] 徐磊, 朱孝勇, 张超, 等. 直线旋转永磁电机及其控制技术综述与新发展 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1972-1984.
XU L, ZHU X Y, ZHANG C, et al. Overview and new development of linear and rotary permanent MagnetMachines and control technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1972-1984.
- [55] GOBEL L, HOFMANN W. Control of a rotation-thrust drive with helical motor [C]//Proceedings of the IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Piscataway: IEEE, 2002: 1343-1348.
- [56] PAN J F, MENG F J, CAO G Z. Decoupled control for integrated rotary-linear switched reluctance motor [J]. IET Electric Power Applications, 2014, 8(5): 199-208.
- [57] BENTIA I, RUBA M, SZABÓ L. On the control of a rotary-linear switched reluctance motor [C]//2011 5th International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics (ISCIII). Piscataway: IEEE, 2011: 41-46.
- [58] 白洋, 王剑, 王班, 等. 新型旋转-直线超声波电机的机理与特性 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2013(10): 1852-1856, 1888.
BAI Y, WANG J, WANG B, et al. Mechanism and characteristic of novel rotary-linear ultrasonic motor [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013(10): 1852-1856, 1888.
- [59] 白洋. 一种旋转-直线运动的两自由度超声波电机的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
BAI Y. Research on a two-degree-of-freedom ultrasonic motor with rotation-linear motion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [60] 何航, 徐衍亮, 鲁炳林. 新型球形结构两自由度混合式步进电机二维等效模型分析方法 [J]. 微电机, 2018, 51(8): 12-16.
HE H, XU Y L, LU B L. 2-dimensional equivalent model analysis method of a novel spherical 2-DOF hybrid stepping motor [J]. Micromotors, 2018, 51(8): 12-16.
- [61] 何航. 仿生眼用两自由度混合式步进电机及其驱动系统研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
HE H. Research on two-degree-of-freedom hybrid stepping motor and its driving system for bionic eye [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [62] ZHAO F Y, LUO Y Y, LI C R. Kinematic simulation of a two-dof joint actuated by one single motor [C]//The 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industrial Application. Piscataway: IEEE, 2010: 121-124.
- [63] 聂瑞, 司纪凯, 张国振, 等. 海上风浪结合发电系统用两自由度发电机研究综述及展望 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 135-146.
NIE R, SI J K, ZHANG G Z, et al. Overview and prospect of research on two-degree-of-freedom generator for offshore wind-wave combined energy conversion system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 135-146.
- [64] FRETES H, RODAS J, DOVAL-GANDOY J, et al. Pareto optimal weighting factor design of predictive current controller of a six-phase induction machine based on particle swarm optimization algorithm [C]//IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. Piscataway: IEEE, 2021: 207-219.

Low-rank Sparse Representation Based on Elastic Least Squares Regression Learning

WU Jigang, LI Miaojun, ZHAO Shuping

(School of Computer Science and Technology, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to overcome the disadvantage that the redirected least squares regression model might destroy the structure of the regression target, a low-rank sparse representation based elastic least squares regression learning (LRSR-eLSR) model was proposed. The model based on the least squares regression, but did not use the strict 0-1 label matrix as the target matrix. Instead, it introduced the margin constraint to directly learn the regression objective from the data, which could increase the flexibility of the regression model while maintaining the regression target structure. Moreover, in order to capture the structure information of the data, a low rank representation of the data was used to maintain the structure of the data. In the process of calculation, considering the complexity of the problem, the kernel norm regularization was used instead of the rank function. In addition to this, the model introduced a sparse error term with a $L_{2,1}$ -norm to compensate for regression errors, which facilitates learning more flexible transformations. The model also imposed additional regularization terms on the projection matrix to avoid overfitting. The experimental results showed that the recognition accuracy of the model in this paper is better than that of other methods on four published datasets. The recognition rate could be up to 98% in the COIL-20 dataset.

Keywords: sparse representation; least squares regression; low-rank representation; flexibility; sparse error term

(上接第 11 页)

Review and Dynamic Development Analysis of Control Strategies on Two-degree-of-freedom Motor

SI Jikai¹, LIU Shiyan¹, NIE Rui¹, WANG Peixin¹, SU Peng²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: An examination on studies of the control of a two-degree-of-freedom motor can improve its performance, and is of high theoretical and practical value. This study reviewed the control strategies for various types of two-degree-of-freedom motors, including induction, permanent magnet, switched reluctance, and other types, based on their structures. The study also classified the control strategies used in these motors as open-loop or closed-loop, analyzed the advantages and disadvantages of different strategies, and summarized the application development of two-degree-of-freedom motor control based on the requirements of relevant fields such as automobiles, medical, industrial, robotics, new energy, and military. Finally, based on the theoretical research and practical needs, this study discussed the future development trends of two-degree-of-freedom motor control from four aspects: decoupling, systematization, intelligence, and low-speed high-precision control.

Keywords: two-degree-of-freedom motor; vector control; PID control; decoupling control; intelligent control; dynamic development analysis