

# 中国高端真空泵驱动电机及控制技术的现状和发展\*

邓文字<sup>1</sup>, 齐丽君<sup>1</sup>, 王光玉<sup>2</sup>, 孔祥玲<sup>2</sup>, 毕德龙<sup>2</sup>, 李明<sup>3</sup>, 安跃军<sup>3</sup>

(1. 沈阳中北通磁科技股份有限公司技术中心, 辽宁 沈阳 110159;

2. 中国科学院沈阳科学仪器股份有限公司真空干泵事业部, 辽宁 沈阳 110168;

3. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 真空泵作为真空获得的重要设备, 在电子芯片、大规模集成电路、精细化工、生物制药、光伏产业等领域受到了广泛关注及应用, 其性能指标很大程度取决于驱动电机及其控制技术。介绍了真空泵驱动电机的基本种类与工作原理, 总结了共性规律和个性特点, 对其拓扑结构、冷却方式和智能控制等关键技术进行综述, 分析了真空泵驱动电机在特殊工况条件下的控制策略问题。最后, 对真空泵驱动电机及其控制系统的主要研究方向进行了展望。

**关键词:** 特种电机; 高端装备; 真空泵; 电驱系统; 控制系统

中图分类号: TM 358 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)07-0001-08

doi: 10.12177/emca.2020.074

## Present Situation and Development of Drive Motor and Control Technology for High-End Vacuum Pump in China\*

DENG Wenyu<sup>1</sup>, QI Lijun<sup>1</sup>, WANG Guangyu<sup>2</sup>, KONG Xiangling<sup>2</sup>,

BI Delong<sup>2</sup>, LI Ming<sup>3</sup>, AN Yuejun<sup>3</sup>

(1. Technical Center of Shenyang General Magnetic Co., Ltd., Shenyang 110159, China;

2. Vacuum Dry Pump Business Division, SKY Technology Development Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China;

3. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** As an important equipment for obtaining vacuum, vacuum pump has received extensive attentions and applications in the fields of electronic chips, large-scale integrated circuits, fine chemicals, biopharmaceuticals, and photovoltaic industries. Its performance largely depends on the drive motor and its control technology. The basic types and working principles of the vacuum pump drive motors are introduced, and their common rules and individual characteristics are summarized. The topologies, cooling methods and intelligent control technologies of the drive motor are reviewed. The control strategies of the vacuum pump drive motors under special working conditions are analyzed. Finally, the main research directions of the vacuum pump drive motor and its control system are prospected.

**Key words:** special motor; high-end equipment; vacuum pump; electric drive system; control system

收稿日期: 2020-05-17; 收到修改稿日期: 2020-06-06

\* 基金项目: 国家科技重大专项项目(2017ZX02201005-002); 辽宁省重大科技专项项目(2019JH1/10100016)

作者简介: 邓文字(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为真空获得装备。

齐丽君(1981—), 男, 工程师, 研究方向为永磁材料与应用。

安跃军(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机设计及控制。(通信作者)

## 0 引言

众所周知,电子芯片、大规模集成电路、精细化工、生物制药、光伏产业等领域的生产需要在真空环境下完成,并对极限真空度和真空泄漏等方面具有很高的要求<sup>[1-2]</sup>。传统的真空获得是通过联轴器将离心泵的叶轮与电机相连,采用旋转密封装置,难以做到完全无泄漏。为了克服上述真空泄漏问题,文献[3-4]将电机转子和泵的叶轮固定在同一根转轴,并利用屏蔽套将电机的转子和定子隔开的真空泵,彻底解决了真空泄漏问题。真空泵驱动电机受到日益广泛的关注。

本文首先分析了真空泵驱动电机的种类及各自的结构特征,比较了其优点与缺点;对真空泵驱动电机的拓扑结构、散热方式、冷却系统和智能控制等关键技术进行了综述。在此基础上,进一步讨论了真空泵驱动电机在特殊工况条件下的控制策略问题。最后对真空泵驱动电机及控制技术的未来研究与发展方向加以展望。

## 1 真空泵驱动电机类型

### 1.1 真空泵驱动用屏蔽式感应电机

目前常用真空泵驱动电机是感应电机。这类电机一般由机壳、定子铁心、定子绕组、转子铁心、转子绕组、转轴、轴承和散热风扇等部件组成。交流感应电机具有结构简单、运行可靠、价格便宜、过载能力强、调速容易、寿命长及使用、安装、维护方便等优点,但是力能指标偏低,即能耗偏高。

对于需要真空泵与驱动电机一体化以实现更高密封的无油干式真空泵,其驱动电机采用一种屏蔽套密封的专利技术<sup>[5]</sup>。这种屏蔽式电机的非驱动端无轴伸,无法安装自冷却风扇,冷却系统多为水冷方式。图1所示为泵机一体化结构真空泵用屏蔽式感应电机三维结构示意图<sup>[6-7]</sup>。

为了提升感应电机的效率,电机转子绕组采用了铸铜或者铜条焊接结构。真空泵电机冷却水道结构图如图2所示。针对不同冷却水道形式,进行了温度场计算和试验测试<sup>[8-9]</sup>。结果表明,周向螺旋型水路的水路平滑,水流阻力损失小,但其进、出水口很难设计到电机的同一端,沿轴向产生温度梯度;轴向折返型水道可以把进、出水口设置在电机的同一端,便于散热,不会产生轴向温度

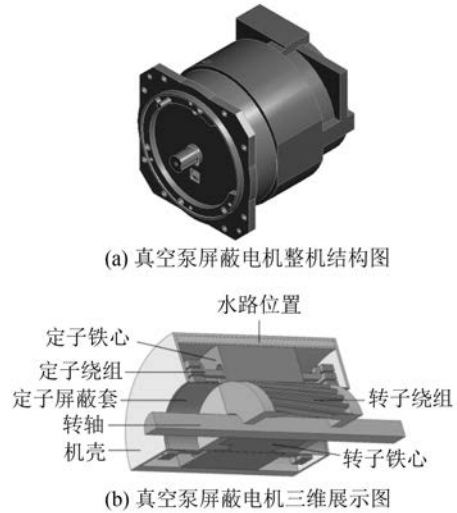


图1 泵机一体化真空泵驱动电机示意图

梯度,制造工艺简便,结构简单,但需要对水道转弯处采取流线型设计,以降低水压和流速损失。

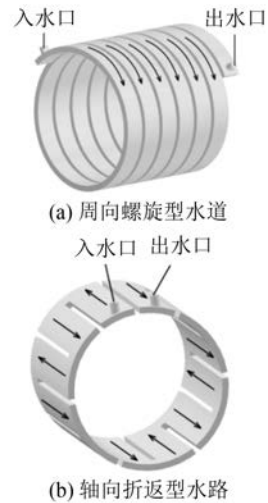


图2 真空泵电机冷却水道结构图

表1所示为真空泵驱动感应电机绕组温升的仿真计算值和试验值。表1数据满足F级绝缘的技术要求,也说明了轴向折返型冷却水道优于周向螺旋型冷却水道,良好的冷却系统使批量生产的真空泵驱动用感应电机中心高缩小了一个基座号。

表1 真空泵电机绕组温升仿真值与试验值

水道结构	温升仿真值/K	温升试验值/K
周向螺旋型	95.5	98.4
轴向折返型	85.2	88.4

类似地,文献[10]分析了真空泵屏蔽式感应

电机机壳对流散热问题,通过数值模拟确定了冷却系统结构形式和参数配置,为真空泵屏蔽电机的设计提供了有效的帮助。

## 1.2 真空泵驱动用永磁高效电机

永磁电机历史悠久,但真正发展是随着近年来高性能永磁材料的出现。与传统电励磁电机相比,永磁电机,特别是稀土永磁电机,具有力能指标高、运行可靠、体积小、质量轻、损耗小、高效节能等优点<sup>[11]</sup>,但是成本高,导致价格偏高。

真空泵驱动电机通常均是连续工作制,其力能指标体现了真空泵乃至高端装备的运行成本,近年来备受用户关注。为此,研发了真空泵专用永磁同步电机(PMSM)<sup>[12-13]</sup>。图3所示为一款真空泵用高效PMSM结构图<sup>[14]</sup>。

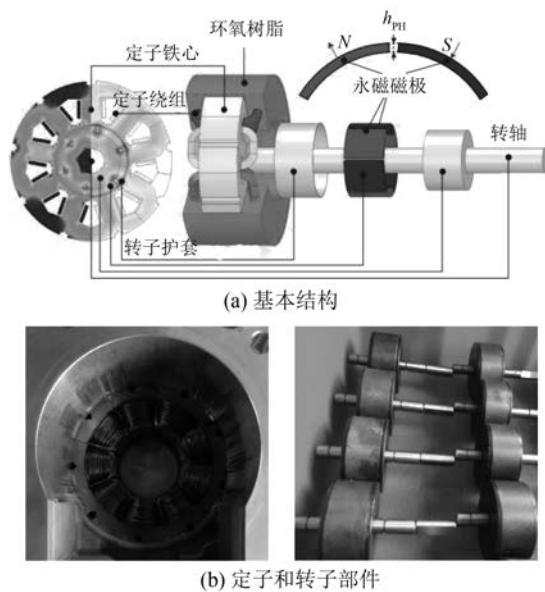


图3 真空泵用高效PMSM结构图

为了节省材料,定子铁心为分块拼接式结构,T型铁心冲片套裁可以提高硅钢片材料的利用率以降低成本;为了缩短定子绕组端部长度,降低用铜量和定子铜损耗,定子绕组设计成分数槽集中绕组形式,可减少端部用铜约40%,铜耗减少25%,效率提高8%。为了降低占PMSM总成本比例较大的永磁转子成本,永磁转子采用了少稀土或者无稀土永磁材料<sup>[15-16]</sup>。高速电机体积减小,功率密度提高。该真空泵用高效PMSM设计额定转速10 000 r/min,电机体积质量降低约15%~20%,可以实现0~15 000 r/min宽范围无级调速和

恒转矩、恒功率切换,满足用户对抽速调节的需求。

## 1.3 真空泵驱动用开关磁阻电机

现代高端装备用真空泵大多是无油干式真空泵,主流结构形式是泵机一体化趋势。这样就使得驱动电机的转子置于真空中运行,感应电机转子导条和铁心均会发热,PMSM尽管转子铁心发热很少但是永磁体涡流和谐波损耗同样会产生可观的热量。真空环境中,热对流和热传导已经不再是电机转子散热的主要方式,以往普通电机中被忽略不计的热辐射成为真空泵电机转子散热的主要甚至是唯一方式。

减少、抑制和消除转子损耗即发热源是解决真空泵驱动电机转子发热不利影响的根本方法。开关磁阻电机(SRM)转子上既没有绕组导条也没有永磁体,转子上几乎没有损耗,即不会发热。真空泵驱动用SRM结构如图4所示<sup>[17]</sup>。

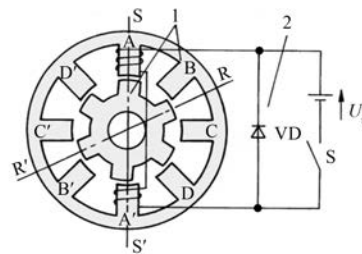


图4 真空泵用SRM结构图

图4中,数字1代表电机本体部分,数字2代表电机控制电路,A、B、C、D分别是4相正向绕组铁心,A'、B'、C'、D'分别是4相负向绕组铁心,S-S'为定子轴线,R-R'为转子轴线。SRM某相绕组通电时产生的磁通总是要沿磁阻最小的路径闭合,转子铁心的磁阻远小于空气部分,当磁场扭曲时会产生切向磁拉力而使转子转动。图5所示为真空泵驱动用SRM的转矩特性曲线<sup>[17]</sup>。可见,电机具有较高的起动转矩,进入稳态后转矩仍有较大的波动,转矩波动系数约为30%,对真空泵

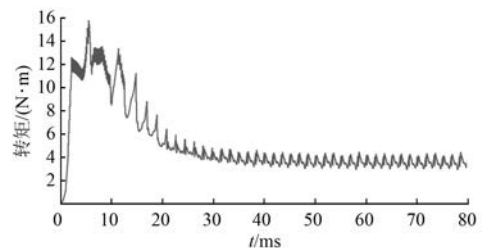


图5 真空泵用SRM转矩曲线

运行稳定性产生影响。

文献[17]针对 0.55 kW 真空泵,分别设计了 SRM、铸铝转子感应电机、铸铜转子感应电机和表贴式 PMSM,并对机壳和转子最高温度进行了分析对比,如表 2 所示。

表 2 真空泵驱动电机关键部件最高温度

电机类型	转子温度/℃	机壳温度/℃
SRM	46.4	45.6
铸铝转子感应电机	69.3	63.4
铸铜转子感应电机	50.5	49.0
表贴式 PMSM	44.3	32.0

可见,相同体积和功率等级条件下,SRM 优于铸铝转子和铸铜转子感应电机,逊色于 PMSM,主要是由于 PMSM 永磁体对气隙磁场的建立起到了辅助作用,减少了定子电流励磁分量,从而降低了与电流平方成正比的绕组铜耗,进而降低了机壳温度。随着电力电子元器件性能的提高和价格的降低,SRM 专用控制器成本会明显降低,使其发展和应用前景广阔。

### 1.4 真空泵驱动用同步磁阻电机

如上所述,SRM 具有结构简单、运行可靠、成本低廉、转子无损耗等优势,但是其需要专用控制器供电运行,这是其没有得到广泛应用的关键问题。同步磁阻电机有望克服这一弊端。文献[18]针对一款罗茨真空泵驱动用额定功率 1.9 kW、额定转速 4 800 r/min 的同步磁阻电机进行研发,电机基本结构如图 6 所示。研究表明,随着磁障厚度、磁障层数和转子肋宽的增加,电机输出转矩变大,当转子磁障占空比为 0.55 时,电机的综合性能最好。

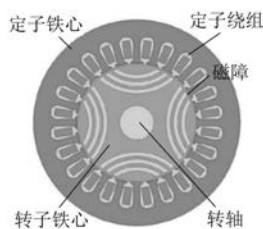


图 6 真空泵用同步磁阻电机结构示意图

利用商业有限元软件对真空泵用同步磁阻电机内部关键部件温度场分布进行分析计算,各部件温度云图如图 7 所示<sup>[18]</sup>。

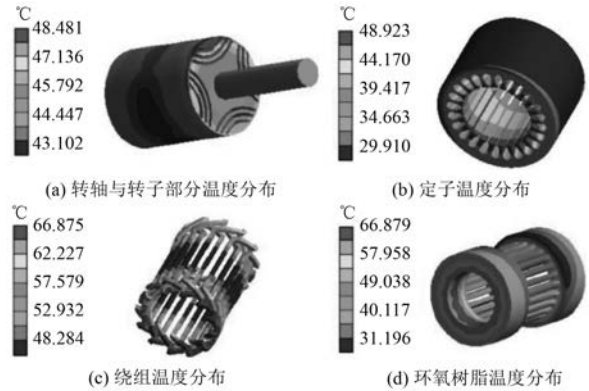


图 7 真空泵用同步磁阻电机温度场分布图

可见,当同步磁阻电机处于稳态时,其内部最高温度为 67℃,温升约为 47 K,符合温升 70 K 的技术要求,并留有一定安全裕量。

### 1.5 真空泵驱动用永磁辅助同步磁阻电机

永磁辅助同步磁阻电机是一种多属性电机,其基本原理是基于电磁转矩式:

$$T_{em} = \frac{mpE_0U}{\omega X_d} \sin\theta + \frac{mpU^2}{2\omega} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \quad (1)$$

式中: $T_{em}$  为电机电磁转矩; $m$  为电机相数; $p$  为电机的极对数; $E_0$  为电机的空载反电动势; $U$  为电机的相电压; $\omega$  为电机的电角速度; $X_d$  和  $X_q$  分别为电机的  $d$ 、 $q$  轴同步电抗; $\theta$  为  $U$  和  $E_0$  之间的夹角。

电磁转矩中同时含有第一项励磁转矩和第二项磁阻转矩<sup>[19]</sup>。当励磁转矩中空载反电动势  $E_0$  由转子励磁绕组磁场产生时,励磁转矩分量通常比磁阻转矩分量大,该状态即为普通电励磁同步电机;当励磁转矩中空载反电动势  $E_0$  由转子永磁体磁场产生时,励磁转矩即为永磁转矩,且永磁转矩分量比磁阻转矩分量作用大,该状态即为 PMSM;当励磁转矩中空载反电动势  $E_0$  由转子永磁体磁场产生时,永磁转矩分量比磁阻转矩分量作用小,该状态即为永磁辅助同步磁阻电机<sup>[20]</sup>。辅助励磁的永磁材料可以使用不含贵重稀土成分的廉价永磁体(如硬磁铁氧体)<sup>[21-22]</sup>,以降低产生永磁转矩分量的成本,同时弥补同步磁阻电机出力的缺陷,使得真空泵电驱系统性价比更高,益于批量生产和推广应用。

文献[23]针对真空泵用永磁辅助式同步磁阻电机进行设计与分析,该电机基本结构如图 8 所示。

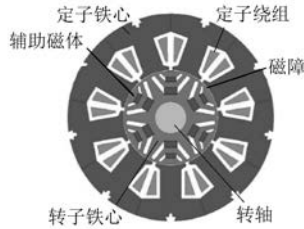


图 8 真空泵用永磁辅助同步磁阻电机结构示意图

分析研究了极槽配合、磁障结构、永磁辅助方式、永磁和磁阻转矩贡献比例、永磁体辅助槽和磁阻磁障槽的协调与优化、损耗发热和温升以及复合转子应力等关键问题。图 9 和图 10 所示为真空泵用永磁辅助同步磁阻电机关键部件温升与冷却水流量和水道尺寸的关系曲线<sup>[23]</sup>。可见,电机冷却水流量为 3.5 L/min,水道直径为 10 mm 比较合适,为工程实施提供了科学依据。

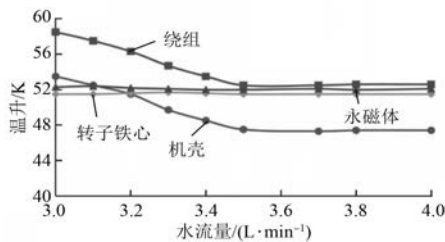


图 9 永磁辅助同步磁阻电机温升与冷却水流量关系

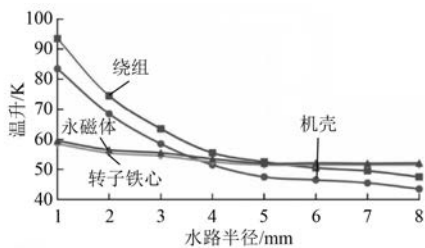


图 10 永磁辅助同步磁阻电机温升与水道尺寸关系

## 2 真空泵电驱控制系统

### 2.1 真空泵直排大气快速恢复控制

真空泵由于生产线工艺等原因,会出现直排大气的情况。对于真空泵驱动电机来讲,直排大气就相当于给电机突然增加了一个大负载,可能是额定负载的几倍;受电机过载能力和安全保护的限制,驱动电机会快速减速甚至停机,用户要求在最短时间内真空泵能恢复运行,以保住真空度不受太大影响。

文献[24]针对涡旋真空泵驱动电机基于模糊 PID 控制方法设计开发了真空泵直排大气快速恢复控制系统。图 11 所示为涡旋真空泵模糊 PID 控制系统图。表 3 所示为推导建立的 PID 控制系统增益参数模糊规则表。表 3 中,NB 表示负大、NM 表示负中、NS 表示负小、ZO 表示零、PS 表示正小、PM 表示正中、PB 表示正大。图 12 所

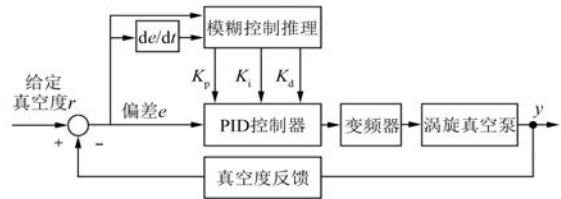


图 11 涡旋真空泵模糊 PID 控制系统图

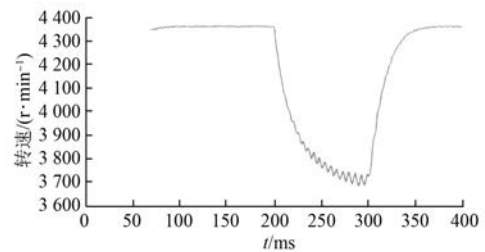


图 12 模糊 PID 控制下涡旋真空泵直排大气时转速恢复曲线

表 3 真空泵控制系统增益参数模糊规则表

$\Delta K_p/\Delta K_i/\Delta K_d$	$e$							
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS	
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO	
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO	
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO	
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO	
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB	
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB	

示为模糊PID控制时涡旋真空泵电驱系统受直排大气冲击负载后转速恢复曲线<sup>[24]</sup>。可见,直排大气失速后的约70 ms即可恢复到之前的转速,比传统控制方式约200 ms的恢复时间缩短了65%。

文献[25]研究了影响真空泵屏蔽电机在线运行时间的电机温升和负载突变2个因素以及影响机理,提出了提高真空泵电机在线运行时间的控制系统。

文献[26]对1台隔膜真空泵用直线磁阻电机控制系统进行了设计分析,并在此基础上提出了一种基于基波扰动观测器的泵进口压力估算方法。

### 2.2 真空泵无传感器带速重投控制

在真空泵受到直排大气等冲击负载时,不希望停机后再重新起动,原因是这样恢复时间会很长。要求在转速还没有降到零的时候就能重新二次上电运行,即带速重投。带速重投需要实时检测电驱系统的转速,以便确定变频器的切入频率。真空泵电驱系统受结构形式的限制,无法安装转速传感器,为带速重投增加了难度<sup>[27]</sup>。

文献[28]基于定子残压,提出定子扇区内的平均转速算法和轴线角度差算法,克服了采用传统方法计算结果滞后一个扇区的问题,设计了基于调制波模拟器的无速度传感器带速重投系统,如图13所示。通过软件仿真及22 kW罗茨真空干泵机组试验,验证了计算方法和控制策略的正确性。图14所示为真空泵带速重投时驱动电机的转速和电流恢复曲线<sup>[28]</sup>。可见,真空泵电驱系统恢复时间在60 ms以内,重

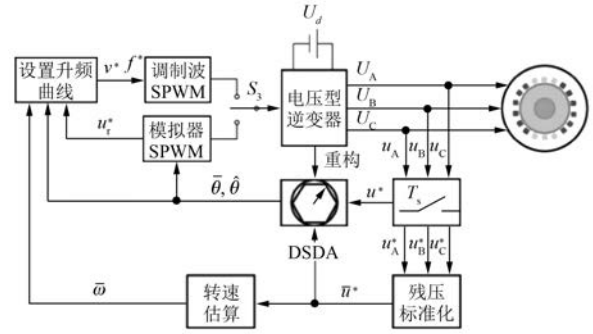


图13 真空干泵屏蔽电机带速重投控制系统框图

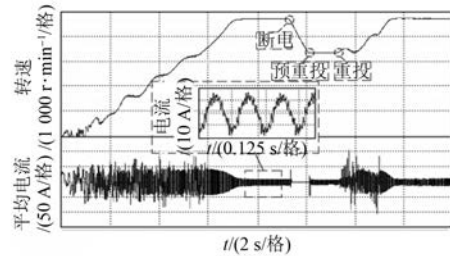


图14 真空泵带速重投时电驱系统转速及电流曲线

投冲击电流降低了51.27%。

### 2.3 真空泵多电机直驱协调控制

罗茨真空泵是一种常用的结构形式<sup>[16]</sup>。传统罗茨真空泵均采用1:1比例的齿轮带动彼此反方向同步旋转运动,可以实现两轴同步运转且具有一定的保护作用,防止2个“8”字形泵叶撞到一起。经长期运转后,加工精度再高的齿轮传动也会产生磨损间隙,当齿侧间隙大于转子间最小间隙时,将产生刮蹭或碰撞而发生故障,导致罗茨真空泵损坏<sup>[29]</sup>。

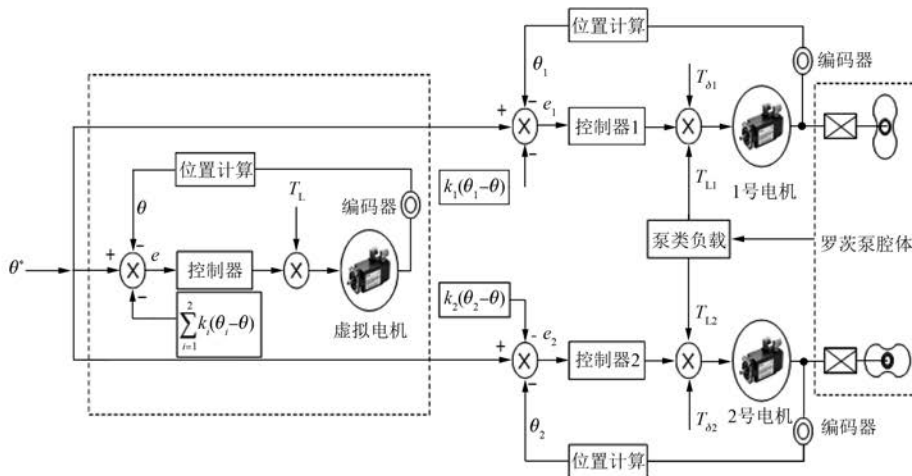


图15 罗茨真空泵基于虚拟电机的交叉耦合控制

为了解决上述问题,近期开展了取消 1:1 齿轮传动的方式,改用多台电机协调直驱的驱动方式<sup>[30]</sup>。采用主从控制、并行控制、交叉耦合控制和虚拟电机的交叉耦合控制来实现真空泵驱动电机的协调同步控制。图 15 所示为罗茨真空泵基于虚拟电机的交叉耦合协调控制系统框图<sup>[31]</sup>。

图 16 所示为罗茨真空泵基于虚拟电机交叉耦合协调控制时,双驱动电机的转速跟踪特性曲线<sup>[32]</sup>。可见,这种改进的控制策略具有良好的动态控制效果。

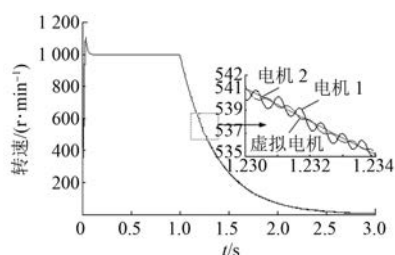


图 16 罗茨真空泵双驱动电机跟随性能

### 3 结 语

本文针对真空泵驱动电机及控制技术的研究现状,介绍了用于真空泵驱动的屏蔽式感应电机、PMSM、SRM、同步磁阻电机和永磁辅助同步磁阻电机的基本结构及智能控制技术等,对各类电机应用范围进行了总结。真空泵驱动电机及控制技术的未来发展趋势如下:

(1) 感应电机结构简单、可靠性高、成本低,但功率密度、效率和功率因数偏低,适用于驱动注重价格的真空泵。

(2) PMSM 具有高效率、高功率因数、高功率密度等优点,适用于驱动对真空度要求较高且注重降耗的真空泵。但是,泵机一体化真空泵中,转子热量不易散出,永磁体在高温下易发生不可逆退磁的问题,应该引起供应商和用户的关注。

(3) SRM 具有制造工艺简单、耐高温、成本低等特点,但是功率密度偏低,需由专用控制器驱动,且需要通过实时检查转子位置信号构成闭环驱动系统。SRM 适用于工作环境温度高的场合。同步磁阻电机可以使用通用变频器供电,以克服 SRM 控制复杂的缺点,随着其功率密度不断提升,应用会持续增加。

(4) 永磁辅助同步磁阻电机平衡了上述几类

电机的优缺点,既拥有良好的性能,又解决了转子散热困难的问题,且成本适中,综合性能最好,被认为是未来高端真空泵驱动电机的发展方向 and 理想类型。

真空泵屏蔽电机作为真空泵核心部件,未来主要着眼于发掘新型结构电机的优势和潜力,探寻与泵体高度契合的新型结构和适合真空泵运行工况的智能控制系统。

### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 张保全. 真空干燥技术及真空泵的应用技术探讨 [J]. 内燃机与配件, 2019(13): 264.
- [ 2 ] ZHANG Y, ZHOU F, LI J, et al. Application and research of new energy-efficiency technology for liquid ring vacuum pump based on turbulent drag reduction theory [J]. Vacuum, 2020, 172: 109076.
- [ 3 ] 槐孝纪, 晏才松, 曾纯. 真空泵用大功率高转速永磁同步电机研制 [J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55(1): 39.
- [ 4 ] BRENDENBERGER S, STORCH H V, BULFIN B, et al. Vacuum pumping options for application in solar thermochemical redox cycles-assessment of mechanical-, jet- and thermochemical pumping systems [J]. Solar Energy, 2017, 141: 91.
- [ 5 ] 孙睿. 光伏产业用真空泵屏蔽式电动机设计研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [ 6 ] 殷福久. 半导体装备用真空泵屏蔽电动机设计与分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [ 7 ] 曹建平. 耐腐蚀超洁净涡旋真空泵用屏蔽电动机设计研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [ 8 ] 杨维国. 真空干泵用特种电机转子散热新方法 with 工程实施分析 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
- [ 9 ] 胡鑫, 安跃军, 杨维国, 等. 基于流固耦合方法的真空泵用屏蔽电机冷却系统分析 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(2): 80.
- [ 10 ] WERNIK J. Investigation of heat loss from the finned housing of the electric motor of a vacuum pump [J]. Applied Sciences, 2017, 7(12): 1214.
- [ 11 ] 三胜咨询. 我国永磁电机行业运行现状分析 [J]. 电器工业, 2020(增刊 1): 38.
- [ 12 ] 安跃军, 杨维国, 胡鑫, 等. 真空干泵用定子拼装式永磁电机性能分析与实验 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 114.
- [ 13 ] 柴嘉南. 真空干泵驱动用宽调速永磁同步电动机设计与控制研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.

- [14] 张志恒. 真空泵屏蔽电机无速度传感器带速重投控制系统研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2020.
- [15] 黄鑫. 真空泵用经济性铁氧体永磁同步电机设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.
- [16] 安跃军, 娄利岗, 杨天宇, 等. 晶圆 FAB 厂罗茨真空泵用永磁电机研发设计与实验[J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(3): 185.
- [17] 杨南. 超洁净涡旋真空干泵用开关磁阻电动机研究与热场分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2018.
- [18] 杨天宇. 真空泵用同步磁阻电动机设计研发与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2019.
- [19] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [20] 沈建新, 蔡顺, 袁赛赛. 同步磁阻电机分析与设计(连载之一)概述[J]. 微电机, 2016, 49(10): 72.
- [21] 肖勇, 黄辉, 胡余生, 等. 无稀土永磁辅助同步磁阻电机电感参数研究[J]. 日用电器, 2016(7): 98.
- [22] 徐媚媚, 刘国海, 陈前, 等. 永磁辅助同步磁阻电机设计及其关键技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 7033.
- [23] 娄利岗. 真空泵用永磁辅助式同步磁阻电动机设计与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2019.
- [24] 安辉. 涡旋真空泵驱动电机与模糊 PID 控制系统设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2017.
- [25] AN Y, ZHANG Z, WANG G, et al. Control system to improve online running time of canned motor for vacuum pump[C]//2018 37th Chinese Control Conference(CCC), 2018.
- [26] BENECKE S, FORSTER N, HORN B, et al. Design and control of a linear reluctance motor for a vacuum diaphragm pump[C]//2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion(SPEEDAM), 2018.
- [27] 宋存丰. 真空泵用屏蔽式感应电动机冲击载荷失速和重投特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2019.
- [28] 安跃军, 张志恒, 张振厚, 等. 真空干泵用屏蔽电机无速度传感器带速重投控制系统[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2665.
- [29] 王浩, 王福维, 谢星. 罗茨真空泵状态监测与故障诊断系统应用[J]. 设备管理与维修, 2020(5): 155.
- [30] 张志恒, 安跃军, 吴炜桦, 等. 虚拟电机在无齿轮真空泵用永磁双电机协调控制中的应用[C]//第十五届沈阳科学学术年会论文集(理工农医), 2018.
- [31] 吴炜桦. IC 制造装备无齿轮罗茨真空泵永磁同步电动机控制研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2018.
- [32] 张永龙, 安跃军, 张志恒, 等. 真空泵用多台屏蔽电机模式切换与位置补偿偏差耦合同步控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 21.

## 《电机与控制应用》新网站启用

为了更好地服务于作者和读者,《电机与控制应用》建设了新的网站。服务升级,内容丰富,域名不变,仍为 [www.motor-abc.cn](http://www.motor-abc.cn)。

新网站设有网刊系统。2018 年至今《电机与控制应用》发表的所有论文均可通过该系统检索、阅读、下载。

新网站同时开通了移动版。关注《电机与控制应用》微信公众号(djykyzy),即可在移动端阅读最新论文、查询稿件处理状态,并可登录投稿

系统进行其他操作。

请扫码关注《电机与控制应用》微信公众号:

