

## 旋片泵输出功率控制问题的探讨

黄 英<sup>1</sup>, 黄化岩<sup>2</sup>, 宋青竹<sup>3</sup>, 郭成军<sup>1</sup>, 张以忱<sup>1</sup>

(1. 东北大学机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204;  
3. 沈阳真空技术研究所, 辽宁 沈阳 110042)

**摘 要**: 旋片式真空泵是最常用的真空获得设备之一, 它工作范围广, 可以单独使用也可以作为其它真空泵的前级泵。但是旋片泵的功率随着入口压力的变化而变化, 有时甚至会相差 1~2 倍的功率, 因此驱动旋片泵的电机大部分时间处于轻载运行, 电机的效率因而降低了。本文通过分析旋片泵工作效率的影响因素与各种功率控制方法, 结合变频式电机的应用实现对旋片式真空泵驱动电机的功率控制。

**关 键 词**: 旋片式真空泵; 入口压力; 功率控制; 变频技术

中图分类号: TB75; TP23 文献标识码: A 文章编号: 1002-0322(2014)06-0001-04

### Discussion of output power control problem for rotary vane pump

HUANG Ying, HUANG Hua-yan, GUO Cheng-jun, ZHANG Yi-chen

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China;  
2. Shanghai Institute of Applied Physics, China Academy of Science, Shanghai 201204, China;  
3. Shenyang Vacuum Technology Institute, Shenyang 110042, China)

**Abstract**: The rotary vane vacuum pump is one of the most commonly used vacuum equipments. It can be exclusive used or the backing pump for another pump owing to its wide range of working state. However, the power of the rotary vane pump always change with the inlet pressure. The motor for driving rotary vane pumps are usually under loading. This paper has analyzed the factors influencing the efficiency and a variety of methods for controlling motor. We control the power of rotary vane vacuum pumps by frequency speed control technology.

**Key words**: rotary vane vacuum pump; inlet pressure; power control; frequency speed control

旋片式真空泵是一种变容式气体传输真空泵, 是真空技术中最基本的真空获得设备之一。它的工作压力范围为  $101325 \text{ Pa} \sim 1.33 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ , 属于低真空范围。它既可以单独使用, 也常常作为其它真空泵的前级泵使用。据 2003 年的一份真空行业市场调研<sup>[1]</sup>可知, 旋片式真空泵占据整个泵种市场总量的 90.38%, 虽然近些年干式机械真空泵发展迅猛, 但是旋片泵仍是真空获得设备应用领域的主力军。

旋片式真空泵是通过偏心安装的转子连续旋转, 进而周期性的压缩腔内的被抽气体, 最后使泵腔内的气体达到排气压力, 从而完成整个抽气过程。不难发现, 旋片泵的转子为了抽空或者保持真空状态一直都处在工作状态。目前大多数

的旋片泵都采用三相异步电动机驱动。电机功率并不发生改变, 然而旋片泵的压缩功率与泵的入口压力呈一定比例关系, 并且在泵的工作压力范围内的大多数情况下旋片泵的实际运转功率并未达到电动机的额定功率状态, 有些时候甚至会相差 1 倍。根据调研, 一般驱动旋片泵的三相异步电动机轻载率往往高达 20%~40%<sup>[2]</sup>, 这样电机会大部分时间处于轻载状态, 大大浪费了能源。在现今旋片泵朝着大抽速、大功率方向发展的前提下, 能耗问题越来越凸显重要。

### 1 影响旋片泵功率因素的分析

旋片泵在每个运动周期内都会经历吸气、压缩和排气三个过程<sup>[3]</sup>, 其中的  $p-V$  曲线如图 1 所示:

收稿日期: 2014-06-22

作者简介: 黄英(1957-), 女, 湖北省仙桃市人, 教授。

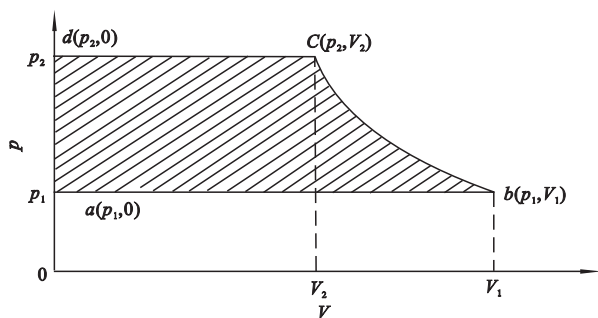


图 1 旋片泵的 p-V 图

Fig. 1 p-V chart of rotary vane vacuum pumps

其中  $ab$  为入口压力  $p_1$  时的吸气过程;  $bc$  为压缩气体至排气压力  $p_2$  时的压缩过程;  $cd$  为打开排气阀的排气过程。因此气体的压缩功为:

$$W = \int_{p_1}^{p_2} V dp \quad (1)$$

因为旋片泵腔内的气体压缩过程既不是等温过程又不是绝热过程, 而是一个复杂的多变压缩过程, 所以对于  $bc$  段, (1) 式进行积分得到:  $p_1 \cdot V_1^m = p_2 \cdot V_2^m$ , 其中  $m$  是多变指数, 一般取  $m=1.3$ ; 那么旋片泵压缩功  $W$  为

$$W = \frac{m}{m-1} p_1 \cdot V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \quad (2)$$

则旋片泵的压缩功率为

$$N = p_1 \cdot S_{th} \frac{m}{m-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \quad (3)$$

其中  $S_{th}$  是泵的几何抽速。其中当  $\frac{dN}{dp_1} = 0$  时

功率  $N$  取到最大值

$$N_{max} = p_2 S_{th} m^{\frac{1}{1-m}} \quad (4)$$

对于某一具体型号的旋片泵来说, 旋片泵的功率只与入口压力  $p_1$  有关。实际上, 旋片泵在运行过程中除了压缩气体功耗之外, 还需因摩擦、过载等原因耗功。由于泵油的黏性随泵温变化较大, 因此克服摩擦所消耗的功率也随着泵温变化。在不同泵温下, 泵的功率 - 入口压力曲线如图 2 所示。

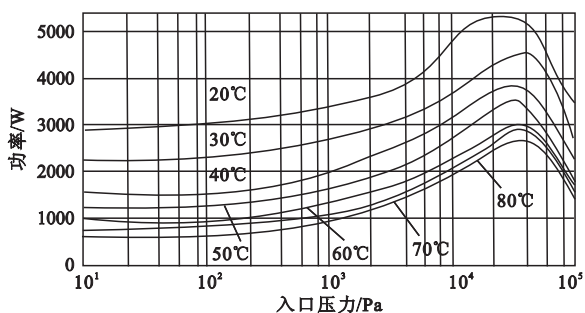


图 2 旋片泵的功率与入口压力、泵温的关系

Fig. 2 Relation between inlet pressure, temperature and power of rotary vane vacuum pumps

从图 2 可知, 在 10 Pa 至 1000 Pa 的阶段里, 旋片泵在各不同温度时的功率值只有满负荷时的一半甚至更小, 例如当泵温为 70 °C, 入口压力为 10 Pa 至 1000 Pa 时, 其功率长期保持在 1000 kW 左右, 然而当旋片泵处于满负荷时, 即泵入口压力为  $5 \times 10^4$  Pa 时, 功率达到 3000 kW 左右。

通常在设计机械泵的驱动电机时还需要考虑电机过载、机械效率及传动效率等因素, 电机功率如

$$N_m = \frac{\varepsilon N_{max}}{\eta_m \cdot \eta_p} \quad (5)$$

式中  $N_m$ ——电机额定功率

$\varepsilon$ ——过载系数, 一般取  $\varepsilon=1.2 \sim 1.4$ ;

$\eta_m$ ——泵的机械效率, 取  $\eta_m=0.75 \sim 0.80$ ;

$\eta_p$ ——泵的传动效率, 取  $\eta_p=0.9 \sim 0.95$

把式(4)带入式(5)中, 我们就可以得到:

$$N_m = (2.07 \sim 1.57) \cdot N_{max} \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 设计选择旋片泵驱动电机时, 额定功率的选择至少是泵最大功率的 1.5 倍, 假设  $N_{max}=3000$  kW, 那么  $N_m=6210$  kW~4710 kW。然而通过图 2 可以看出, 泵满负荷或较高负荷工作时间只占到整个抽气过程中的 60%。

在这里我们选用 2X-70 型旋片泵, 其抽速为 70 L/s, 去抽除  $600 \times 600 \times 800$  mm<sup>3</sup> 容积的真空容器, 要求达到的真空度为  $10^{-1}$  Pa。假设抽气管道尽可能得粗、短, 因此流导  $C \geq S$ ,  $S$  是旋片泵抽速。管道流阻对泵抽速的影响可以忽略。在此基础上, 计算得到抽至  $10^{-1}$  Pa 所需的时间  $t \approx 2.63$  h。此台旋片泵配用的电机额定功率为 5.5 kW, 假设旋片泵最大功率为 3000 kW, 轻载时间占据整个抽气时间段的 60%, 所以这段时间  $t_1=1.58$  h。这时旋片泵实际功率只有 1000 kW 左右, 因此  $t_1$  时段内, 浪费的电能  $W_1=4.5$  kW·1.58 h=7.1 kWh。而整个抽气时段内  $t$  消耗的电能  $W=5.5$  kW·2.63 h=14.47 kWh。  $W_1/W \approx 50\%$ , 浪费了近一半的电能。事实上, 因为上述计算忽略了流导对抽速的影响, 旋片泵抽速变化的影响, 而这些因素会加大抽气时间, 所以实际浪费的电能会超过 50%。因此控制旋片泵驱动电机频率就显得尤为重要了。

## 2 旋片泵的输出功率控制方法探讨

### 2.1 旋片泵输出功率控制的方法

控制旋片泵的输出功率归根结底是控制驱动旋片泵电动机的功率, 实现电机功率控制有以下几种方法供考虑探讨:

1)改变交流供电电压来实现控制。这种方法是通过一个压力传感器接受真空容器中的压力信号,经变送放大送入控制装置,控制装置将送过来的压力信号与已经设定好的压力信号进行对比,进而控制一个交流调压装置,降低电动机的输入电压从而实现了降低电机频率的功效。这种控制方法的好处是当某些真空工艺过程中充入一定量气体造成真空室压力上升时,控制装置可以接受压力传感器的反馈信号,更快得实现功率上升,旋片泵转速回升的作用。然而,预定的压力值并不能覆盖整个压力范围,并且调整电压不宜太低,不能实现精确控制。

2)在上述方法基础上,把交流调压装置换成现今技术较为先进的三相正弦波脉宽调制交流调压装置。这种调压装置在接受到传感器传来的压力信号时,可以实现无级向下调节供给电动机的电压,实现高效控制。然后,采用这种控制方法会使得整个旋片泵控制系统造价过高,不利于市场推广和大范围使用。

3)无功补偿功率控制<sup>[4]</sup>。这种方法是通过直接与电机相连的一个补偿装置,对电机功率进行无功补偿。这种方法投资小,易开发。但是对于旋片泵这种不是常开状态的设备来说,无功补偿方式并不适合。

4)电磁调速。电磁调速系统由电动机、电磁转差离合器和直流励磁控制器组成。相对来说这种方法结构较为简单,易集成到旋片泵的控制系统中去。同时,它调速平滑、无级调速等优点也很适合旋片泵。但是,这种方法不适于调控转速过快的电机,然而旋片泵需求转速一般都超过它的调控范围。

综上,上述四种控制方法虽然都各有优点,但在关键性质上还不能满足旋片泵功率控制问题。例如,第一、二种方法利用交流调压装置来进行功率控制时,控制范围不能覆盖整个压力范围或者说就算能也造价极高,不适合投入工业生产;第三种方法虽然投资小,但是它适合于常开状态的设备,而在工业生产中旋片泵并不是一种常开设备;最后一种方法在造价和使用性方面已经非常接近我们所需要的程度了,然而电磁调速有它的局限性,这主要是在于通过磁-电转换实现电机转速微调的方式并不是适用于转速快的电机,当电机转速过快时有较大的即时电流,这时候对磁场负载要求极大,而旋片泵的驱动电机转速非常快,这是由旋片泵本身特点造成的,因此它也不适合控制旋片泵功

率。总结旋片泵功率控制需适应的特点包括:调节范围广,适宜高转速,平滑启动,精度高等。而为了满足所有上述特点的控制方式,本文选用变频控制技术来实现旋片泵的功率控制。

## 2.2 变频控制技术

变频技术就是通过改变用电设备的供电频率,进而达到控制设备输出功率的目的。变频技术随着微电子学、电力电子、计算机和自动控制理论等的发展,已经进入一个崭新、逐渐成熟的技术,其应用亦进入了一个新的高潮。应用该技术可通过变频调速改变轴输出功率,从而达到减少输入功率节省电能的目的,是感应式异步电动机节能的一个重要技术手段。<sup>[5]</sup>变频电机将“专用变频感应电动机+变频器”共同使用进行交流调速,从而使机械自动化程度和生产效率大为提高,目前正取代传统的机械调速和直流调速方案。变频已广泛应用于各行各业无级变速传动。特别是随着变频器在工业控制领域的应用,变频电机的适用也日益广泛起来。<sup>[6]</sup>

一般来说变频技术控制手段现在主要有三种<sup>[7]</sup>:U/f控制、转差频率控制和矢量控制。U/f控制虽然构造简单、价格低廉但是动态性能较差不适宜用在本文讨论的功率控制技术上。转差频率控制虽然在U/f控制基础上加强了动态性能,但是通用性较差。只有矢量控制方式不仅有较高的调速动态性能并且有广泛的通用性,现在应用范围日益广泛起来,是相当成熟的一种变频调速技术。考虑到旋片式真空泵驱动电机只有一台,对入口压力需要有动态调控,再结合经济效益最大化等问题,选用矢量控制方法最适合旋片泵功率控制。

根据式(3)可知旋片泵的功率跟泵入口压力呈一定关系,入口压力就是本文的控制对象。此时我们只需要采集泵的入口压力,利用PLC控制器输出信号给变频器,变频器通过矢量控制方式控制电机实现电机的频率控制,进而控制旋片泵的转速。具体的系统控制思路如下图:

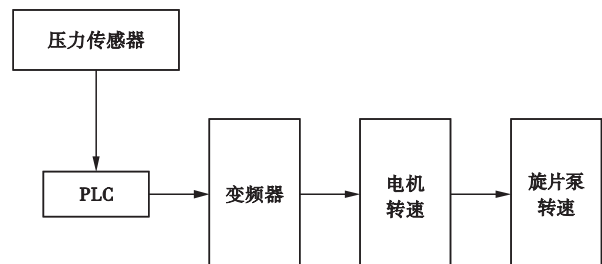


图3 旋片泵功率控制原理图

Fig. 3 Schematic of rotary vane vacuum pump controller

其中 ,几个重要元件建议如下 :

PLC——实现对系统的运行数据采集、运算及处理同时根据需要向变频器发布操作命令 ;可以选用三菱 FX1S 系列 ,这种 PLC 集成性能优良 ,功能完整 ,出于考虑安装控件和成本等因素 ,选用这款 PLC 非常实用。

变频器——根据抽气过程的进行 ,泵入口压力的变化 ,接受 PLC 传达的指令实现对电机的变频调节。可以选用 ABB 公司的 ACS2000 变频器 ,它具备高性能的矢量控制技术 ,另外这款变频器应用于包括化工 ,冶金 ,纸浆等多行业领域 ,具备良好的前端兼容能力。

压力传感器——采集泵入口出的压力变化并向 PLC 输出信号。值得注意得是 ,这里要选用适用于真空范围的传感器 ,例如 ,如果真空系统中旋片泵极限压力在  $10^{-2}$  Pa 左右 ,压力传感器的额定压力范围应该大于  $10^{1325}$  Pa~ $10^{-2}$  Pa。

本文以某典型旋片泵真空系统为例 ,设计出某旋片泵功率控制原理图如下 :

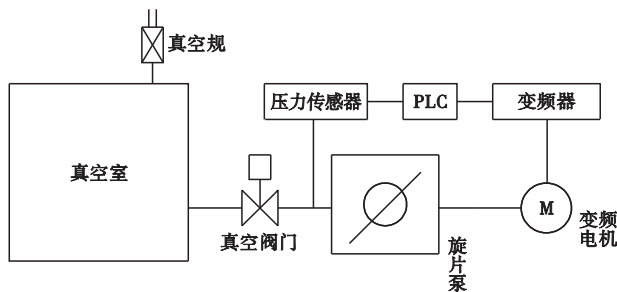


图 4 旋片泵功率控制设计图

Fig. 4 Design of rotary vane vacuum pump controller

### 3 结论

通过结合旋片泵对功率控制的诸多要求 ,本文比较了多种交流电调压、无功补偿、电磁调速和变频技术四种功率控制实现方法 ,最终使用变频技术解决变频器的功率控制问题。在认真分析了旋片泵功率影响因素后 ,本文给出了其功率控制的技术思路图 ,并举出了一个简单旋片泵真空系统功率控制实例。

### 参考文献

[1] 于溥. 我国真空设备行业制造的主要真空获得设备概况与思考[J].真空 ,2004 ,41(6) :1-7.

[2] 莫力林. 旋片式真空泵节能控制的实现[J].大众科技 ,2010(3) :115-117.

[3] 王晓东 ,巴德纯 ,张以忱等.真空技术[M].北京 :冶金工业出版社 ,2006 :107-108.

[4] 梁金昌.电动机节能降耗可行性分析[J].煤炭技术 ,2007 ,26(12) :47-49.

[5] 李林.变频电机特点及其应用[J].城市建设理论研究 ,2011 ,23 :17-20.

[6] 游丙均 ,董智光 ,李成福.变频器与变频电机的适用[J].中华纸业 ,2009(1) :94-95.

[7] 崔纳新 ,张承慧 ,杜春水.变频调速异步电动机效率优化控制的研究进展[J].电工技术学报 ,2004 ,19(5) :36-42.

## 《真空》杂志编委会调整

2013 年 9 月 22 日 ~ 26 日在沈阳东北大学召开了《真空》杂志编委会及第十一届国际真空冶金与表面工程学术会议、真空工程学术会议、真空咨询工作会议 ,有来自国内外 150 位代表出席了联席会议 ,会议一致同意 2013 年《真空》杂志编委会调整名单。

台湾省是我国重要的省份之一 ,2010 年起增聘(新竹)清华大学凌永健教授为编委会副主任。继续聘请中国真空学会理事长 ,中国科技大学校长侯建国院士以及(北京)清华大学查良镇教授 ,东北大学杨乃恒教授 ,中国科学院江南研究员 ,昆明理工大学戴永年院士担任编委会副主任 ;为加强国际交流与合作 ,聘请国际真空学会主席以及研究和生产真空产品的大国(如中国 ,美国 ,德国 ,法国 ,日本 ,加拿大等)的真空学会理事长(现任或曾任)担任真空杂志的国际编委。2010 年起特聘国际真空学会主席、曾任法国真空学会主席 M. G. Barthes 教授(法国) ,日本真空学会主席 ,东京大学岗野 达雄(Tatsuo Dkano)教授(日本) ,继续聘请 Alfred Benninghoven 教授(德国) ,Marcel Baril 教授(加拿大)担任真空杂志国际编委。

2014 年 6 月经编委会讨论通过 ,增选东北大学王晓冬教授和合肥工业大学干蜀毅教授为编委会编委。

(真空杂志社 供稿)