

文章编号: 1000-6893(2003)02-0170-04

## 采用多泵并联变频调速技术实现机场恒压供油

张大华<sup>1</sup>, 陈远富<sup>2</sup>, 裘丽华<sup>1</sup>, 王宗学<sup>1</sup>, 李季清<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

(2. 北京民航中天科技有限责任公司, 北京 100088)

### Pressure-Control in the Airport Refueling System with Multi-Parallel Pumps, One of Which is Powered by a Frequency Converter

ZHANG Da-hua<sup>1</sup>, CHEN Yuan-fu<sup>2</sup>, QIU Li-hua<sup>1</sup>, WANG Zong-xue<sup>1</sup>, LI Ji-qing<sup>2</sup>

(1. Institute of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Sino-Sky Technology Ltd., Beijing 100088, China)

**摘要:** 深入研究了应用多泵并联变频调速技术实现民用机场恒压供油的原理, 并通过分析给出了系统启泵、并泵、退泵和停泵的条件。所述的方案被成功地应用于多个民用机场的供油自动化系统, 以其诸多优点成为现代化民用机场供油自动化系统的首选方案。

**关键词:** 机场供油; 自动化; 变频调速

**中图分类号:** V228.1<sup>+2</sup> **文献标识码:** A

**Abstract:** The principle of pressure-control in the airport refueling system with multi-parallel pumps, one of which is powered by a frequency converter, is researched in depth. The conditions of start-pump, add-pump, subtract-pump and stop-pump are analyzed in the paper. The scheme given here is successfully used in several airport refueling automation systems, and becomes the preferred scheme in the modern airport refueling automation systems for its advantages.

**Key words:** airport refueling; automation; frequency control

我国原有的民用机场供油系统在实现恒压供油的控制手段上大多采用“回流调节法”, 即在从加油泵的出口到入口的旁路上安装回流调节阀, 通过调节回流调节阀的开度, 来调节回流流量, 从而达到调节机坪加油管网内航煤压力的目的。但这种方法的特点是“不管机坪加油需求量是多少, 先把油打出去, 多余的再泄放回来”, 这就造成了能量上的浪费; 另外, 由于回流调节阀本身的调节精度相对较低, 系统的调节性能有待于进一步提高<sup>[1]</sup>。

20 世纪 80 年代以后, 随着变频器的产生及其性能的日益提高和功能的日趋完善, 交流变频调速技术开始在工业控制的各个领域得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。近几年, 我国民航事业迅猛发展, 客流量和货运量迅速增加, 许多机场的规模和自动化程度已不能满足发展的需要, 于是纷纷进行扩建或新建, 与之相配套的机场供油系统也便进行了新建或自动化改造<sup>[1]</sup>。我们在首都国际机场、上海浦东机场等最新一代的民用机场供油自动化系统中都采用了变频调速技术实现恒压供油。

### 1 多泵并联变频调压方案

应用变频调速技术实现恒压供油的控制原理如图 1 所示。 $P_s$  是机坪加油管网的实际压力,  $P_{sr}$  是机坪加油管网的要求压力,  $Q$  是总管流量,  $C(s)$  是计算机控制律 ( $u$  为控制器输出)。系统中的离心泵用三相异步电动机驱动 ( $n$  为电机输出转速), 而三相异步电动机又通过变频器提供频率可变 (幅值也随频率变化而变化) 的三相电源 ( $U$  为幅值,  $f$  为频率), 以调节电机转速。

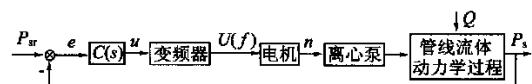


图 1 变频调速压力控制原理框图

Fig. 1 Block diagram of the principle of pressure-control by using a frequency converter

加油航班的种类和数量都是随机变化的, 为保证机坪加油管网在流量大范围变化时压力依然恒定, 系统采用一台变频调速泵和多台恒速泵并联工作的方式来实现恒压供油。变频调速泵构成一压力闭环调节回路 (见图 1), 而恒速泵要适时地启动并入或停止退出, 使压力闭环调节回路不

收稿日期: 2002-03-25; 修订日期: 2002-08-10

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2003/02/0170/>

致失去调节能力,这便构成了一个多泵并联变频调压系统。

### 2 多泵并联变频调压的原理分析

供油自动化系统设定两种工作状态:无航班加油时处于“保压状态”,有航班加油时处于“加油状态”。加油状态时,若加油量小则用单台变频调速泵实现恒压供油,若加油量大则需用一台变频调速泵与一台或多台恒速泵并联工作来实现恒压供油。系统的泵控策略如图 2 所示。

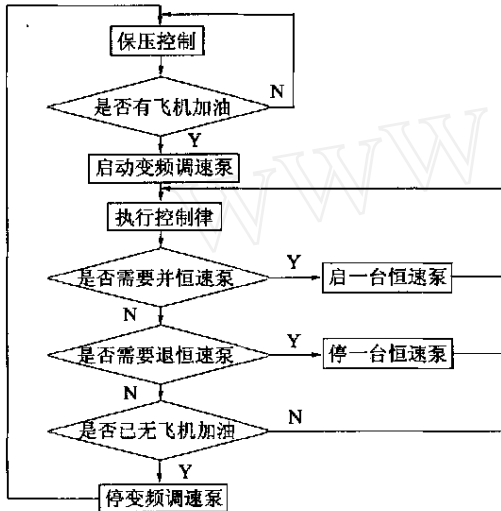


图 2 泵控策略

Fig. 2 Strategy of pump-control

#### (1) 保压状态的压力控制

系统处于保压状态时,要求机坪加油管网的压力  $P_s$  自动保持在 0.20 ~ 0.70MPa。其控制流程如图 3 所示,这是一个简单的开环控制。

#### (2) 开始加油的自动识别

保压状态的显著特征是总管流量  $Q = 0$ ,且机坪管网的压力  $P_s$  的下降速度非常缓慢(如图 4)。当出现加油时不仅有  $Q > 0$ ,且  $P_s$  会急剧下

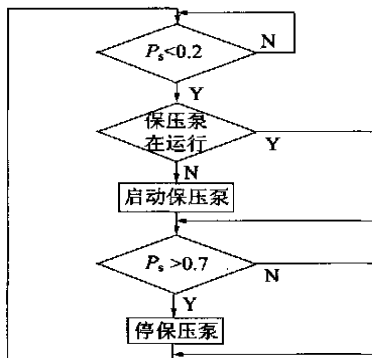


图 3 保压状态压力控制流程

Fig. 3 Pressure-control in the state of pressure-keeping

降(如图 4)。因此,在保压状态对  $Q$  和  $P_s$  进行连续实时测量就能判断系统是否应转入加油状态。

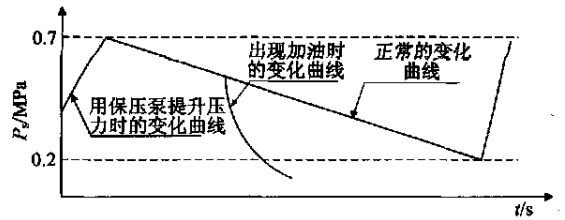


图 4 保压状态时  $P_s$  的 3 种变化

Fig. 4 The 3 kinds of variations of  $P_s$  in the state of pressure-keeping

实践证明,判断系统是否应由保压状态转入加油状态只需使用  $P_s$  是否急剧下降这一条件即可。这有两方面的原因:一方面,由于流量计灵敏度不高,大尺寸的流量计对小流量几乎没有反应,且响应迟缓,这使得用  $Q > 0$  这一条件不能对保压状态出现加油做出准确而及时的反映;另一方面,在保压状态,只有出现加油时才会出现  $P_s$  急剧下降的情形,而且压力的测量都能做到准确而迅速(如美国 Rosemount 公司的 3051 系列压力表的测量精度为 0.075%,响应时间不大于 0.2s)。

#### (3) 单台泵变频调压的原理

当系统由保压状态转入加油状态时,先启动变频器控制的离心泵,其调压原理如图 5 所示。图中,  $n_0, n_1, n_2, n_N$  所指示的 4 条曲线表示泵在不同转速下的扬程—排量特性;  $f_0, f_1, f_2, f_N$  为电机转速为  $n_0, n_1, n_2, n_N$  时所对应的变频器输出给电机的电压的频率。  $f_N$  为变频器设定的输出电压的最高频率,不妨设为 50Hz;  $n_N$  为电机在工作电压频率为  $f_N$  时的输出转速,对应电机的额定输出转速。若机坪加油管网的要求压力为  $P_{sr}$ ,则只有泵的扬程  $H$  大于  $P_{sr}$  时,泵才能提供排量。因此,  $n_0$  是变频调速泵有意义的最低运行转速,  $f_0$  是变频器输出电压的有意义的最低频率。若泵在额定转速  $n_N$  下的零排量扬程  $H_0 = 150\text{m}$ (对航煤介质,等效为 1.15MPa),机坪加油管网要求的压力为  $P_{sr} = 0.7\text{MPa}$ ,则根据泵的相似原理,可得  $f_0 = 39\text{Hz}$ 。

管路特性可描述为

$$P = P_s + KQ^2 \tag{1}$$

其中:  $P$  是泵的出口压力;  $P_s$  是机坪加油管网的实际压力;  $Q$  为总管流量;  $k$  是管路的等效阻力系数(含沿程损失和局部损失)。  $k$  与管路参数和流体的雷诺数有关,对特定的管线和输送介质,  $k$  仅是  $Q$  的一个非线性函数<sup>[3]</sup>;对民用机场供油系统

而言,管道内航空煤油的流动几乎都处于大雷诺数的湍流状态,这时  $k$  随  $Q$  的变化不是很明显,可将  $k$  视为常数。

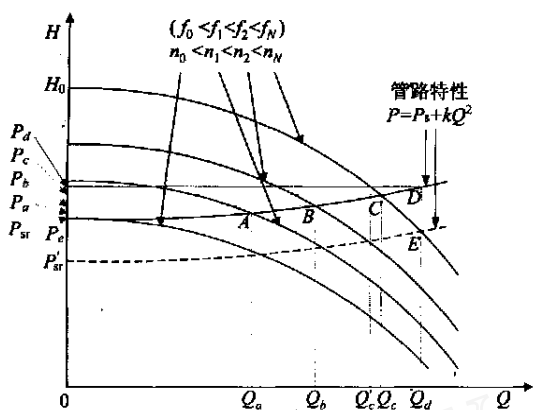


图5 单台泵变频调压的原理  
Fig. 5 Pressure-control with one pump powered by a frequency converter

如图5所示,只要机坪的加油流量  $Q$  在  $0 \sim Q_c$  间变化,图1所示的压力控制回路就能使变频调速泵的转速在  $n_0 \sim n_N$  间变化,泵的工作点就是泵的特性曲线与管路特性曲线的交点  $A、B、C$  等。这样就保证了机坪加油管网的压力  $P_s = P_{sr}$  不变。

(4) 多泵并联变频调压的原理

需并入一台恒速泵的条件

如图5所示,当  $Q = Q_c$  时,有  $f = f_N, n = n_N$  而不能再增大;换句话说,仅有这一台变频调速泵工作时,图1所示的压力控制回路的抗负载扰动  $Q$  的能力为  $0 \sim Q_c$ ,在负载为  $Q_c$  时回路出现正饱和,当负载扰动  $Q$  由  $Q_c$  增大到  $Q_d$  时,已不能对压力进行调节。在  $Q_d$  作用下,泵的出口压力  $P$  由  $P_c$  下降到  $P_e$ ,泵的工作点由  $C$  转到  $E$ ,管路特性曲线下移为图中的虚线,机坪加油管网的压力由  $P_s = P_{sr}$  下降为  $P_s = P_{sr}$ ,不能稳定在  $P_{sr}$ 。

因此,只靠一台变频调速泵已不能保证恒压供油的特征是:  $f = f_N$ ,且  $P_s$  一直小于  $P_{sr}$ 。这时,需要再启动一台恒速泵,让它稳定运行后承担  $Q_c$  的流量 ( $Q_c$  稍小于  $Q_c$ , 见图5)。因为要维持  $P_s = P_{sr}$  不变,泵的扬程必须由  $P_c$  上升为  $P_d$ ,而剩下的流量 ( $Q_d - Q_c$ ) 已在  $0 \sim Q_c$  范围之内,压力控制回路退出正饱和,又能进行正常的压力调节了。

一台变频调速泵和一台恒速泵并联工作的调压原理

一台变频调速泵和一台恒速泵并联工作的压

力调节原理如图6所示。图中,  $n_0、n_1、n_2、n_N$  所指示的曲线为一台变频调速泵和一台恒速泵并联的一簇特性曲线。在运行中,恒速泵的流量在  $Q_1 \sim Q_0$  之间变化,而变频调速泵的流量在  $0 \sim (Q_4 - Q_0)$  之间变化。可见,由于流量  $Q$  变化,恒速泵的流量也会发生变化,且  $Q$  增大,恒速泵提供的流量反而减小。这是由于管线压降随流量增大而增大,泵的扬程也需增大所致。

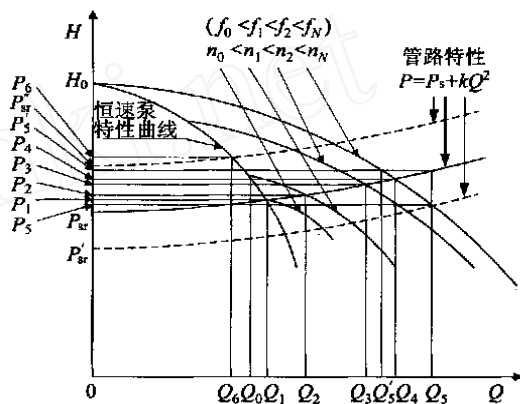


图6 一台变频调速泵和一台恒速泵并联工作的调压原理  
Fig. 6 Pressure-control with two parallel pumps, one of which is powered by a frequency converter

同理,只要机坪的加油流量  $Q$  在  $Q_1 \sim Q_4$  间变化,图1所示的压力控制回路就能使变频调速泵的转速在  $n_0 \sim n_N$  间变化,从而保证机坪加油管网的压力  $P_s = P_{sr}$  不变。

需退出一台恒速泵的条件

在图6中,若流量  $Q$  小于  $Q_0$ ,为  $Q_6$ ,则由于恒速泵在排量为  $Q_6$  时提供的扬程  $P_6$  已大于机坪加油管网的压力为  $P_{sr}$  时所要求的泵的出口压力  $P = P_{sr} + kQ_6^2$ ,系统的工作点移到恒速泵特性曲线的  $(P_6, Q_6)$  点,机坪加油管网的压力上升为  $P_{sr} = P_6 - kQ_6^2$ 。此时,图1所示的压力控制回路进入负饱和,若不停恒速泵,则机坪加油管网的压力就一直维持在  $P_s = P_{sr}$ ,不能回到要求的  $P_{sr}$ 。

同时,当调节器的输出使变频器的输出电压频率  $f = f_0$  时,变频调速泵对应的转速为  $n_0$ ,所能提供的零排量扬程小于  $P = P_{sr} + kQ_6^2$  (当然比  $P_6 = P_{sr} + kQ_6^2$  更小)。故变频调速泵的排量为  $0$ ,效率为  $0$ 。

综上所述,系统需要停恒速泵所反映出来的特征是:  $f = f_0$ ,且  $P_s$  一直大于  $P_{sr}$ 。

当恒速泵停止退出后,由于流量  $Q_6$  在变频调速泵的调节范围内,故系统又回到图5所示的单台变频调速泵进行压力调节的状态。

多台恒速泵的相继并入与退出的条件和系统的运行原理分析与上述完全相同,不再赘述。

### (5) 加油停止的自动识别

按正常的泵控策略,在加油完全停止前,处于工作状态的恒速泵的台数  $N = 0$ ;同时,由于加油完全停止,必有  $f = f_0$ ,且  $P_s$  一直大于  $P_{sr}$ 。因此,系统在加油状态时,只要对  $f$ 、 $P_s$  和  $N$  作连续实时测量就能判断系统是否应转入保压状态。

## 3 结 论

采用多泵并联变频调速技术实现民用机场恒压供油在首都国际机场、上海浦东机场、福州长乐机场、新疆乌鲁木齐机场、成都双流机场等最新一代的机场供油自动化系统中得到了成功的应用。

这种方案的优点首先是节约能源,与“回流调节法”相比,这种能量的节约在原理上是显而易见的;事实上,在新疆乌鲁木齐机场供油自动化系统中做对比试验,发现这种方法要比“回流调节法”平均节能 19% 以上。其次,由于变频器本身调节精度较高,使得机坪加油管网的压力调节更加平稳。

总之,由于以上这些优点使得多泵并联变频调压方案成为众多现代化民用机场供油自动化系统建设的首选。

## 参 考 文 献

- [1] 陈远富. 首都机场供油自动化系统技术开发研究与工程实现[D]. 北京:北京航空航天大学,1999.  
(Chen Y F. Technology development research and engineering realization for the capital airport supply oil automation system [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999.)
- [2] 张燕宾. SPWM 变频调速应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.  
(Zhang Y B. Technology of SPWM frequency control [M]. Beijing: China Machinery Industry Press, 1999.)
- [3] 李玉柱,苑明顺. 流体力学[M]. 北京:高等教育出版社,1989.

(Li Y Z, Yuan M S. Hydromechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.)

### 作者简介:



张大华(1973 - ) 男,籍贯:北京,北京航空航天大学自动化学院博士研究生,研究方向为计算机控制、工业过程控制和计算机仿真。Zhangdh@sino-sky.com。



陈远富(1968 - ) 男,籍贯:贵州,1999 年于北京航空航天大学获得飞行器控制、制导与仿真专业硕士学位,现工作于北京民航中天科技有限责任公司。



裘丽华(1935 - ) 女,籍贯:上海,北京航空航天大学自动化学院教授,博士生导师。主要研究领域为流体传动与控制、流体控制优化理论、冗余伺服系统和故障诊断与监控系统。



王宗学(1935 - ) 男,籍贯:江苏,北京航空航天大学自动化学院教授。主要研究领域为飞行器控制、制导与仿真,计算机控制和工业过程控制。



李季清(1965 - ) 男,籍贯:北京,毕业于中国民航学院机电系,现工作于民航中天科技有限责任公司。

(责任编辑:俞 敏)