

变频泵在地面煤油加注系统中的应用

杨 寒, 吴志坚

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 煤油加注系统是大推力运载火箭动力系统试验台的重要组成部分, 其主要功能是连续、可靠、准确地向箭上贮箱加注煤油。按照系统要求对大流量煤油加注工艺进行了分析, 提出了根据管路特性曲线进行离心泵选型的依据。通过对节流控制、旁路调节及变频调速调节等几种流量控制方法进行比较, 指出采用变频调速方法进行煤油加注的优点及可行性。在地面试验系统中使用变频泵已完成数次动力系统煤油加注试验, 各次加注状态正常, 加注流量稳定, 满足各项技术要求。采用变频泵进行煤油加注具有流量跨度大, 控制精度高, 流量切换灵活及调节响应快的优点, 是确保煤油加注系统安全、稳定、长期运行的有效途径。

关键词: 煤油加注; 流量控制; 变频泵

中图分类号: V433-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 05-0111-04

Application of variable frequency pump in kerosene filling system on ground

YANG Han, WU Zhijian

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The kerosene filling system is an important part of test-bed for large thrust rocket dynamical system. It supplies kerosene continuously, reliably and accurately to the rocket tank. The selection principle of centrifugal pump is determined according to the system requirement of large flow and pipeline characteristic curve. Through the comparison among three methods of throttle control, bypass regulation and frequency control, it is pointed out that the strong points and feasibility of the frequency control method are the most. The test of several dynamical systems has been accomplished by variable frequency pump, in which every kerosene filling state is normal, filling flow is stable, and the results can satisfy the requirements of the ground test system. The variable frequency pump possesses big flow span, high control accuracy, flexible flow switch and fast modulating response. It is an effective way to ensure the kerosene filling system is secure, steady and long running.

Keywords: kerosene filling; flow control; variable frequency pump

收稿日期: 2015-01-26; 修回日期: 2015-04-25

作者简介: 杨寒 (1985—), 女, 硕士, 研究领域为发动机试验技术

0 引言

大推力运载火箭动力系统试车是初样研究阶段最复杂、最关键的大型地面试验,具有技术跨度大、工艺复杂、风险高的特点。煤油加注系统是大推力运载火箭动力系统试验台的重要组成部分,其主要功能是按任务书要求连续、可靠、准确地向箭上贮箱加注煤油。煤油加注顺序为先小流量加注,之后大流量加注,最后小流量加注并进行定量补加。加注过程需对流量和补加量进行精确控制。煤油加注流量较大,若采用传统氮气挤压的加注工艺,挤压压力升高,所设计的煤油贮罐的壁厚增加,造成成本大幅度上升,同时挤压工艺很难满足流量及补加量精确控制的效果,因此不适用于大推力运载火箭的加注需求。而采用变频泵控制流量则具有稳定性好,调节响应快的优点,克服了挤压加注的缺点,因此在靶场和地面试车场将得到越来越广泛的应用。

1 泵选型分析

泵是利用外部能量输送流体的流体机械,有叶片式和容积式2大类。叶片式中离心泵由于其具有安全可靠、流量均匀和易于调节等优点被广泛应用于石化、电力、城市供水等行业,也能很好地适应煤油加注工艺系统的需求,因此是很好和很现实的选择。变频调速技术是一种应用前景广泛的技术,原理是通过均匀改变定子供电频率,平滑改变交流电机同步转速,利用交流异步电机转速与频率成正比特性,实现对电机转速进行连续调节的目标,使用变频进行流量控制,具有调速性能好、节能效果显著、运行安全可靠等优点。变频泵的选择依据实际工作中最大工况下的流量和扬程等参数确定,加注过程对各种流量工况进行人工调节。泵特性曲线和管道特性曲线都可引起工况点的改变。泵特性方程如下:

$$H_e = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta u^2}{2g} + \lambda \left(\frac{L + L_e}{d} + \sum \xi \right) \frac{4Q_e^2}{\pi d^5} \quad (1)$$

式中: H_e 为泵对 1N 煤油做的净功, J/N 或 m; ΔZ 为箭上贮箱与煤油贮存容器之间的压头差,

m ; $\frac{\Delta P}{\rho g}$ 为箭上贮箱与煤油贮存容器之间的静压

头差, m; $\frac{\Delta u^2}{2g}$ 为箭上贮箱与煤油贮存容器之间的动压头差, m; λ 为摩擦系数, 无量纲; L 为管路长度, m; L_e 为局部阻力当量长度, m; ξ 为局部阻力系数, 无量纲; Q_e 为煤油流量, m^3/s ; d 为管径, m。

对于特定的管路, 摩擦系数 λ 随雷诺数 Re 基本不变化, 忽略泵运行过程中受到叶片间的环流、流体摩擦和冲击损失、泄漏等因素及避开泵压头和流量关系曲线的驼峰现象, 流量和压头关系曲线可近似为直线关系。上式中 ΔZ 与 $\frac{\Delta P}{\rho g}$ 均为定值, 将已知参数代入得不同加注流量下加注特性曲线参数。该参数由管路特性及流量条件等确定。

另外, 管网设计是否合理、阻力大小、泵与管网匹配性等也是影响泵的选型依据。泵选用离心式, 该泵具有结构简单、操作方便、流量稳定、性能参数好及便于维修等优点, 加之煤油粘度小, 非常适合离心泵的工况。离心泵工作时, 其所提供的流量和压头应与管路系统所要求的一致, 联解上述两方程即可选型出合适的泵。根据计算结果, 选用 ISY125-100-250B 型号离心泵, 有关参数如下:

$$\begin{aligned} Q &= 104 \text{ m}^3/\text{h} & H &= 75.8 \text{ m} & N &= 37 \text{ kW} \\ \eta &= 66\% & H_s &= 3.8 \text{ m} & n &= 2\,950 \text{ r/min} \end{aligned}$$

2 流量调节

流量控制是煤油加注的核心内容, 对于煤油加注来说, 技术上可行的流量调节方案不止一个。为了找出最优方案, 首先必须根据管道系统的特点, 通过水力模拟, 确定出各种可行的流量调节方案, 然后再对它们进行评价比较, 确定出最优方案。常用的流量控制方法包括节流控制、旁路调节和变频调速调节等^[1]。

2.1 节流控制

这是一种最常用的离心泵流量控制方法, 在加注管路上安装节流调节阀或限流孔板, 通过改

变调节阀开度或限流孔板面积从而改变管路中的局部阻力, 使管路特性曲线发生变化。开大阀门或增大限流孔板面积, 管路特性曲线变平坦, 流量向增大方向变化; 关小调节阀时, 管路中局部阻力损失增加, 需要泵提供更多能量头来克服这个附加阻力损失, 当泵在接近允许最小流量范围运转时, 效率低下, 动力端提供相当部分能量将转变为热能, 泵效率急剧下降, 而导致泵内流体温度升高, 叶轮烧坏, 系统可靠性降低。同时若流速过大, 流体处在紊流状态, 沿程损失猛增, 管道压力增大, 管路振动加大。

2.2 旁路调节

在这种装置中, 煤油出泵后分 2 路: 一路为加注管路; 另一路返回煤油贮罐。调节阀安装在旁路上, 在最小流量时打开调节阀调节, 泵选型时应把旁路流量附加到操作流量上, 使用过程中可能存在泵出力不够的情况。另外当使用旁路调节时, 旁路打开后如果压力控制不好, 高压煤油可能返回煤油贮罐而造成超压引起事故发生。另外, 使用旁路调节还存在经济性差和由于增加一套回路而使工艺系统变得复杂, 可靠性降低的缺点。

2.3 变频调速调节

交流异步电动机有 3 种基本调速方法, 即变极调速、变转差率调速、变频调速。变频调速是其中一种最理想的调速方法, 由整流器、滤波系统和逆变器 3 部分组成。工作时先将三相交流电经桥式整流为直流电, 脉动的直流电压经平滑滤波后在微处理器调控下, 用逆变器将直流电再逆变为电压和频率可调的三相交流电源, 输出到需要调速的电动机上。由于电机转速与电源频率成正比, 通过变频器可改变电源输出频率从而任意调节电机转速, 实现平滑的无级调速。由于采用恒转矩特性, 变频调速后的电动机转矩不变, 拖动转矩恒定, 输出流量稳定, 运行可靠。异步电机转速公式如式(2)所示^[9]。

$$n=60f(1-s)/p \quad (2)$$

式中: n 为异步电动机的转速; f 为异步电动机的频率; s 为电动机转差率; p 为电动机极对数。

当泵的转速发生变化时, 泵的流量、压头随

之发生变化, 并引起泵的效率 and 功率相应改变, 通过变频器的频率来控制输油泵电机的转速, 从而达到改变泵的输出流量目的: 频率增加电机转速提高, 泵输出流量增加; 频率降低电机转速降低, 泵输出流量减少。

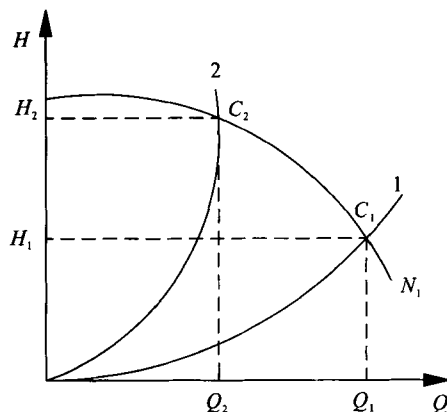


图 1 泵的特性曲线

Fig. 1 Characteristic curves of pump

图 1 中, N_1 为泵的扬程-流量特性曲线; C_1 为管路特性曲线^[9]; 曲线 1 为泵在给定转速下满负荷, 即系统阀门全开时运行时的扬程、流量点和效率点的轨迹; 曲线 2 为部分负荷时系统阀门部分开时的阻力特性曲线, 即泵要克服摩擦, 压力随流量的平方而变化。泵运行工况点是泵的特性曲线与管路阻力曲线的交点, 当用阀门控制时, 由于要减少流量, 就要关小阀门, 使阀门的摩擦阻力变大, 阻力曲线从 1 移到 2, 扬程则从 H_1 移到 H_2 , 流量从 Q_1 减小到 Q_2 , 运行工况点从 C_1 移到 C_2 。

对于实际的分布式变频泵调节系统管网, 当管网的管线已确定时, 根据不同加注时段的流量要求, 就可以直接模拟出变频泵的性能参数, 之后根据变频泵不同流量下的工作点, 根据泵的相似定律, 便可求出泵对应转速下的特性曲线, 同时画出管网的阻力特性曲线。

3 变频调节及数据采集

由于煤油加注流量覆盖范围较宽, 为了更好地实现中低流量的加注要求, 泵后设置阀门来调节管道阻力, 调试过程中使用其进行流量调试。实际加注过程中, 将该阀门开度控制在某一位

置,对变频器的频率进行调节。变频器为ABB公司的ACS510型,根据加注口令,通过变频器内置PID自动调节输出频率,利用PLC200程序进行信号处理与逻辑控制。ACS510型为泵和风机类专用变频器,可以实现PID闭环控制、循环软启动、电机自动轮换、频率补偿及电机互锁等诸多功能^[3]。该变频器还具有以下特点:1)高可靠性,返修率仅为0.5%;2)多功能,如内置PID调节功能、可编程PLC功能,可方便地用于煤油加注的精确控制;3)较高的电网电压适应范围,可在较大的电压范围内使用,从而减少了由于环境电压不稳而对变频器造成的不利影响。

流量采集使用罗斯蒙特8800DF040扩展型数字式涡街流量计,其结构简单,安装维护方便。输出为脉冲频率,其频率与被测量流体的实际体积流量成正比,它不受流体组分、密度、压力及温度的影响;量程比宽,可达10:1,甚至更高;压损小(约为孔板流量计1/4~1/2),无可动部件,可靠性高;精确度较高,可适用液体、气体和蒸汽。罗斯蒙特8800DF040扩展型数字式涡街流量计能充分满足加注过程的具体要求,准确、客观、实时地反映总体提出的各项流量技术指标^[4]。

煤油加注过程主要分几个阶段:小流量加注、大流量加注、小流量加注及定量补加。小流量和大流量加注频率分别为15 Hz和35 Hz。试验过程进行全程数据采集,流量测定时使用2台互为备份的流量计进行数据采集,结果见图2。

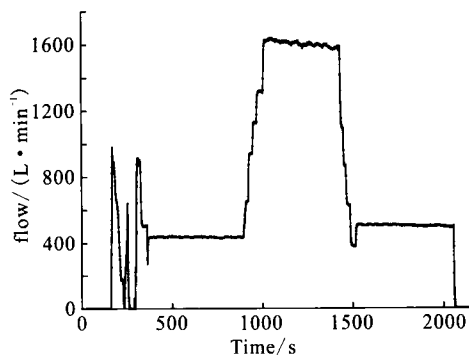


图2 某次试验煤油加注流量数据

Fig. 2 Kerosene filling flow data in one test

由图2可见,开始加注阶段,流量波动较大,此时管道特性与泵输出特性不匹配;调节泵

出口为某一固定开度,变频器频率设置在15 Hz,流量数据开始保持稳定在450 L/min,流量数据整个大流量加注过程流量曲线平缓,流量参数稳定。小流量加注特别是补加时,可以获得稳定的补加流量。整个加注过程无明显压力峰,流量计前、后压力等参数保持稳定,说明煤油在输送过程管道状态良好,无气蚀。所获得的加注流量值基本满足使用需求,2台流量计读数差别很小,数据高度吻合,标准偏差 $\sigma=0.015$ L/s,相对误差 $\leq 0.2\%$ 。这说明流量数据测量准确、真实、可靠,试验验证方案正确,加注过程平稳。

4 结语

使用变频泵进行加注是最有发展前途的流量控制手段,但在火箭推进剂加注系统中应用较少。采用变频调速泵进行煤油加注,能满足大推力运载火箭加注系统加注流量跨度大,控制精度高,大小流量间切换灵活的具体要求,是确保煤油加注系统安全、稳定、长期运行的有效途径。实践证明采用变频泵进行加注,不仅能对加注流量进行精确调节,而且对于提高整个系统的自动化水平,减轻操作人员的误操作,提高系统的可靠性均具有显著的效果。煤油加注系统使用变频泵加注方式已成功完成数次动力系统试验,各次试验加注状态良好,满足总体提出的各项试验参数要求。

参考文献:

- [1] 陈智强.离心泵最小流量旁路设计[J].石油化工设计,1998,15(3): 42-44.
- [2] 晃宏洲,祁顺仁,周明基,等.变频调速技术在油田中的应用[J].工业计量,2006(增刊): 79-81.
- [3] 聂建英,于洋,罗雄麟.离心泵变频控制对流量控制性能的影响分析[J].化工自动化及仪表,2012,40(4): 485-488.
- [4] 孟彦京,李红垒,段明亮.基于ABB ACS510变频器的多泵控制系统设计[J].电气传动,2010,40(11): 66-68.
- [5] 刘广新.涡街流量计在石油化工行业中的应用[J].广州化工,2012,40(18): 115-117.

(编辑:马杰)