

变频电机驱动往复压缩机适应性分析

兰洪强¹ 蒲继平² 叶桦¹ 吴巧¹ 高兴¹ 邢超¹ 杨亮¹

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;

2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300308

摘要:目前,在天然气增压过程中对变频电机驱动往复压缩机组存在较大的争议,为了研究往复压缩机在变转速情况下的适应性,从压缩机本体、变频电机、标准规范三个方面,分析了转速变化对压缩机本体、驱动机的影响。分析得出:在满足流量调节的要求下,变转速调节流量是一种被动调节流量方式,同时需要从多方面进行匹配;变转速对压缩机本体及上下游管网要求也较高;变转速对往复压缩机的反向角也存在影响。分析结果可为类似工程选取变频电机驱动往复压缩机的实际应用提供参考。

关键词:天然气增压;变频电机;往复压缩机;变转速

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.06.018

Analysis on Adaptability of Reciprocating Compressor Driven by Variable Frequency Motor

Lan Hongqiang¹, Pu Jiping², Ye Hua¹, Wu Qiao¹, Gao Xing¹, Xing Chao¹, Yang Liang¹

1. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;

2. China National Offshore Oil Corporation(CNOOC)Ltd. Tianjin Branch, Tianjin, 300308, China

Abstract: In view of the controversy over the reciprocating compressor unit driven by variable frequency motor in the process of natural gas supercharging, in order to study the adaptability of reciprocating compressor to variable speed, the influence of speed change on compressor body and driver are analyzed in this paper from three aspects, including compressor body, variable frequency motor and standard specification. It is concluded that, under the requirement of flow regulation, variable speed regulation is a passive flow regulation mode, which needs to be matched from many aspects. Variable speed also has a higher requirement on the compressor body and upstream and downstream pipeline network. Variable speed also has an impact on the reverse angle of reciprocating compressor. The result can provide reference for the practical application of similar projects.

Keywords: Natural gas supercharging; Variable frequency motor; Reciprocating compressor; Variable speed

收稿日期:2019-05-13

基金项目:中国石油天然气集团公司重点工程项目“黄金坝集气脱水站页岩气集中增压”(S 2017183 E)

作者简介:兰洪强(1986-),男,四川成都人,工程师,硕士,主要从事动设备、LNG 储罐设计和研究。

0 前言

目前,天然气需求日益增长,官方统计近几年天然气需求复合增长率为13.6%;国内在天然气勘探、开采、输送管网等各个环节均投入较大的力度。其中往复压缩机在天然气增压环节使用频率较大,尤其是高压比、低流量的工况下,均需要选用往复压缩机。

往复压缩机实际使用过程中,在流量调节方面有余隙调节流量(范围为额定流量85%~100%)、旁路调节(范围为额定流量0%~100%)、卸荷器调节流量(多档位调节25%、50%等)、气阀无级调节流量(多档位调节10%~100%等)^[1-4]、变转速调节流量(范围为额定流量50%~100%)等多种方法。其中变转速调节流量目前争议较大,虽然工艺条件变化较大时使用变频机组有一定程度的节能,但目前实际运用的机组不多,经验不

丰富,没有对变转速调节流量的方式进行深入分析,在转速变化同时对驱动电机、往复压缩机本体存在哪些影响也需要进行详细讨论。

1 转速变化对流量适应性的影响

1.1 流量适应性

以某工程实际选用的往复压缩机为例,该压缩机分别在500、600、700、800、900、1 000 r/min转速下相关参数相应改变,该机组为4列2级对置式往复压缩机^[5-9],具体参数如下:

末级出口压力6.5 MPa,一级入口压力0.6~6 MPa,转速变化范围500~1 000 r/min,转速级差100 r/min。

通过压缩机不同进口压力、不同转速情况下压缩机所对应的流量进行计算,得到曲线簇见图1。

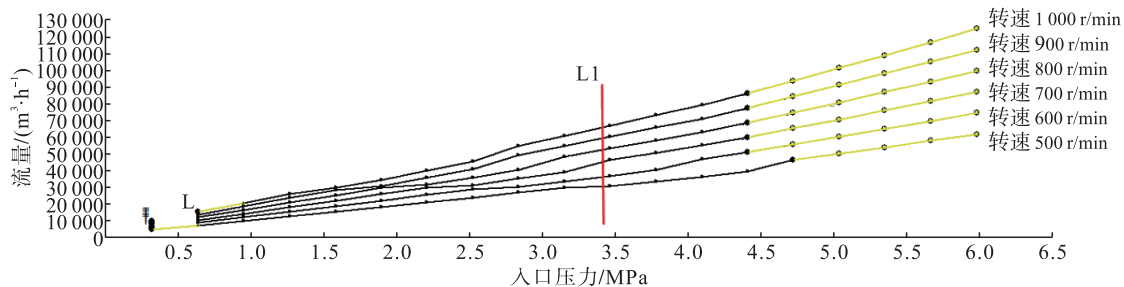


图1 往复压缩机流量曲线簇图

从图1可看出,选取入口压力直线L1上的点作为对象。从L1上的点所对应流量随着转速从1 000 r/min逐级降低到500 r/min时,L1上的点对应流量从67 000 m³/h逐渐降低到30 897 m³/h,这个流量变化仅针对该固定缸径的往复压缩机,而此时上游管网的流量参数并没有实际改变,往复压缩机组变转速流量 Q_1 与上游管网流量 Q_1^* 存在 $Q_1 \neq Q_1^*$,即流量不匹配;因此L1所对应的工况在其他参数均未改变的情况下是不存在的。

因此,对往复压缩机通过转速调节流量,实际是一种被动的流量调节方式,即上游工艺参数实际改变的情况下,进行转速调节,这样往复压缩机和上游管网参数才能互相匹配;而往复压缩机的其他流量调节方式(余隙调节、旁路调节、卸荷器调节、气阀无级调节)均能实现在其他条件不变的情况下进行流量调节,即实现主动流量调节。若在其他参数不变的情况下,将往复压缩机的转速降低,则会出现机组超载情况。

1.2 转速变化对反向角的影响

在往复压缩机转速变化过程中,反向角作为保证十字头销被充分润滑的关键参数^[10-13],应对其进行分析。

不同工况下分别调节往复压缩机转速为500、600、700、800、900、1 000 r/min,计算这些转速下的反向角数

值见表1,转速变化对反向角的影响见图2。

表1 不同转速下反向角数值表

转速 / (r·min ⁻¹)	功率 / kW	入口压力 / MPa	一级反向角	二级反向角	流量 / (m ³ ·h ⁻¹)
1 000	1 660	1.8	164	179	29 959
900	1 481	2.1	167	176	29 959
800	1 305	2.4	176	175	29 959
700	1 110	2.7	180	175	29 959
600	911	3.0	164	176	29 959
500	761	3.3	164	150	29 959

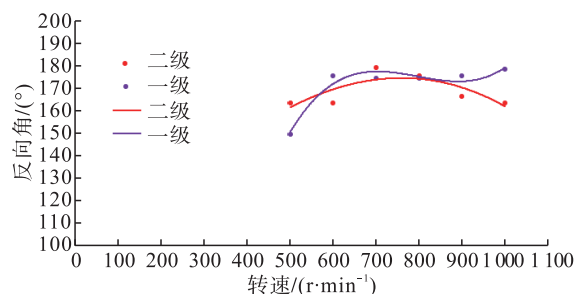


图2 转速变化对反向角的影响图

从图2可看出,随着转速从1 000 r/min逐级降低到500 r/min,一级压缩的两列机头反向角有逐步增大趋

势,而二级压缩的两列机头反向角有逐步减小趋势;其中一级压缩反向角最小值为 164° ,二级压缩反向角最小值为 150° ,均满足 API Std 618 5 th《石油、化学、天然气工业用往复式压缩机》中的“无润滑槽衬套反向角 $\geq 45^\circ$ ”要求。对于功率较小的往复压缩机组,转速变化对反向角的影响会更显著;还应该关注在反向角满足标准规范要求的同时是否存在转速降低出现两段式反向角的情况,这样即使反向角在数值上满足标准规范要求,也会增加活塞杆疲劳断裂的风险^[14-20]。

2 转速变化对驱动电机的影响

变频电机驱动往复压缩机调转速是通过变频器改变频率实现转速调节的。往复压缩机由于自身结构限制,对活塞线速度上限值有要求,活塞线速度过大会降低活塞环和填料密封的使用寿命,因此往复压缩机转速大多控制在 $1\ 000\ \text{r}/\text{min}$ (也有少数高速往复机超过该值)。通常情况下基准频率为 $50\ \text{Hz}$,变频电机的基本特性为工作频率在基准频率之上为恒功率输出,工作频率在基准频率之下为恒扭矩输出;所以变频电机驱动往复压缩机时工作频率在基准频率之下,电机的工作方式为恒扭矩输出,电机扭矩计算公式如下:

$$T = 9\ 54 \times \frac{P}{N} \quad (1)$$

$$P = U \times I \quad (2)$$

式中: T 为扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; P 为功率, W ; N 为转速, r/min ; U 为电压, V ; I 为电流, A 。

将式(2)带入(1)可得式(3):

$$T = 9\ 549 \times \frac{UI}{N} \quad (3)$$

从式(1)可以看出,当恒扭矩输出时,降低转速功率会随着降低;而转速降低是通过变频器改变频率实现。变频电机的工作特性为:电机在某一频率工作下,电流及电压为 I 、 U ,当频率降低时由于变频器自身的特点电压会大幅下降,对应的电流及电压为 I_0 、 U_0 ,电压下降幅度比电流上升幅度大,此时为维持扭矩恒定需要增加电流(非线性关系),电流增加会使电机运行温度提高,增加带载荷停车的风险,因此在选用变频电机驱动往复压缩机时应该着重考虑这方面的影响。

3 标准规范对变速驱动往复机的规定

目前,国内外主流标准对变速驱动有要求为 API Std 618 5 th《石油、化学、天然气工业用往复式压缩机》6.1.10节,即:“为避免扭振、声学 and 机械共振的激发,往复压缩机通常宜规定为恒速运行。使用变频驱动时,所有设备应设计成在跳闸转速前整个运行速度范围内安全运行。对应变速驱动,卖方应列出不希望的运行转速

表提供给采购方。运行范围内不希望运行转速的出现应减到最小。”

从以上内容不难看出,变速驱动对振动分析的要求较定速驱动高,需要避开全转速范围内的所有风险点以保证机组安全稳定运行。

4 结论

通过以上分析得出,变频电机驱动往复压缩机在流量调节方面为被动流量调节,在采用转速调节流量时,往复压缩机组需要与实际管路特性综合考虑;在转速发生变化时其各级反向角也会存在不同程度变化,驱动电机温升和振动也是在选用变频电机驱动往复压缩机应注意的问题。由于目前变频电机驱动往复压缩机使用数量有限,尤其是大功率机组,因此还需总结实践经验,结合变频电机驱动节能等多方面因素进行综合分析,保证天然气增压环节安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 李金波. 往复式压缩机的流量调节方式探讨[J]. 石油化工设备技术, 2013, 34(1): 45-46.
Li Jinbo. Discussion on the Flow Adjustment Methods of Reciprocating Compressors [J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2013, 34(1): 45-46.
- [2] 金江明, 洪伟荣, 梁萌, 等. 往复压缩机气量调节方法的研究进展[J]. 压缩机技术, 2007(4): 28-32.
Jin Jiangming, Hong Weirong, Liang Meng, et al. Research Progress on Capacity Control Method of Reciprocating Compressor [J]. Compressor Technology, 2007(4): 28-32.
- [3] 宋健, 洪伟荣, 吴荣仁. 活塞式压缩机排气量的全量程无级调节[J]. 机械工程师, 2006(9): 85-87.
Song Jian, Hong Weirong, Wu Rongren. Stepless Capacity Regulation in Reciprocating Compressor [J]. Mechanical Engineer, 2006(9): 85-87.
- [4] 王宏斌. 压缩机容积流量的调节方式与经济性[J]. 压缩机技术, 2007(6): 25-28.
Wang Hongbin. Adjustment Method and Economy of the Volume Rate of Flow of Compressors [J]. Compressor Technology, 2007(6): 25-28.
- [5] 王应来, 张利平, 尤磊. 变频调速技术在往复压缩机上的应用[J]. 煤气与热力, 2000, 20(6): 426-427.
Wang Yinglai, Zhang Liping, You Lei. Application of Frequency Converting in Reciprocating Compressors [J]. Gas & Heat, 2000, 20(6): 426-427.
- [6] 周天旭, 王存智, 郑学鹏. 流量调节系统对往复压缩机反向

- 角影响分析(二)部分顶开吸气阀流量调节系统的影响分析[J]. 压缩机技术, 2017(6): 11-13.
- Zhou Tianxu, Wang Cunzhi, Zheng Xuepeng. Analysis of the Influence of Stepless Capacity Regulation System on Reciprocating Compressor Reverse Angle—Part 2: Analysis of the Influence of Stepless Capacity Regulation Systems [J]. Compressor Technology, 2017 (6): 11-13.
- [7] 周天旭, 王存智, 郑学鹏. 流量调节系统对往复压缩机反向角影响分析(一)可变余隙流量调节系统的影响分析[J]. 压缩机技术, 2017(5): 5-8.
- Zhou Tianxu, Wang Cunzhi, Zheng Xuepeng. Analysis of the Influence of Stepless Capacity Regulation System on Reciprocating Compressor Reverse Angle—The Influence Analysis of Variable Clearance Volume Regulation System (I) [J]. Compressor Technology, 2017 (5): 5-8.
- [8] 席治国. 气田用往复压缩机气量调节方式应用分析[J]. 石油化工设备技术, 2017, 38(4): 31-36.
- Xi Zhiguo. Application Analysis on the Gas Capacity Regulation for Reciprocating Compressors Used in Gas Field [J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2017, 38 (4): 31-36.
- [9] 包彬彬. 往复压缩机无级气量调节系统研究与应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- Bao Binbin. Research and Application of Stepless Capacity Control System of Reciprocating Compressors [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [10] 李新, 王立辉. 天然气往复压缩机反向角的理论分析及实例[J]. 压缩机技术, 2008(2): 21-24.
- Li Xin, Wang Lihui. The Analysis of Natural Gas Reciprocating Compressor's Reversal Angle and Example [J]. Compressor Technology, 2008 (2): 21-24.
- [11] API. Reciprocating Compressors for the Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services: API Standard 618 [S]. 5th ed. Washington D. C.: American Petroleum Institute, 2007.
- [12] 黄梓友. 加氢裂化新氢压缩机连杆小头衬套与十字头销烧损原因分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(11): 111-115.
- Huang Ziyou. Analysis of Small End Bushing and Crosshead Pin Failure of Fresh Hydrogen Compressor Connecting Rod in Hydrocracking Unit [J]. Lubrication Engineering, 2009, 34 (11): 111-115.
- [13] 郁永章. 容积式压缩机技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 231-248.
- Yu Yongzhang. Technical Manual of Displacement Compressor [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 231-248.
- [14] 郭权, 戴新西. 氮氢气压缩机曲轴裂纹修复[J]. 化工设备与防腐蚀, 2003, 6(3): 28-29.
- Guo Quan, Dai Xinxi. Renovation of the Fractured Crankshaft of Nitro-Hydrogen Gas Compressor [J]. Chemical Equipment & Anticorrosion, 2003, 6 (3): 28-29.
- [15] 李晓星, 王军, 宋宏志. H 22 III 氮氢气压缩机曲轴断裂后的修复[J]. 压缩机技术, 2002(3): 19-20.
- Li Xiaoxing, Wang Jun, Song Hongzhi. Renovation of the Fractured Crankshaft of H 22 III Nitro-Hydrogen Gas Compressor [J]. Compressor Technology, 2002 (3): 19-20.
- [16] 何洪波. 高压压缩机曲轴有限元分析及相关问题研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- He Hongbo. Finite Element Analysis and Related Problems Research on Crankshaft of High Pressure Compressor [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [17] 张海峰. 大型压缩机曲轴特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- Zhang Haifeng. Study on Crankshaft Characteristics of Large Compressor [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2005.
- [18] Nitmiz W W. Reliability and Performance Assurance in the Design of Reciprocating Compressor Installations-Part I: Design Criteria [C] // Purdue University. Proceedings of the International Compressor Engineering Conference. West Lafayette: Purdue University, 1974.
- [19] 何洪波, 束鹏程, 李连生. 6M32A 氮氢气压缩机曲轴有限元分析[J]. 压缩机技术, 2005(4): 3-6.
- He Hongbo, Shu Pengcheng, Li Liansheng. FEM Analysis of 6M32A Nitrogen-hydrogen Compressor Crankshaft [J]. Compressor Technology, 2005 (4): 3-6.
- [20] Pennock G R, Beard J E. Force Analysis of the Apex Seals in the Wankel Rotary Compressor Including the Influence of Fluctuations in the Crankshaft Speed [J]. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32 (3): 349-361.