

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0005.003

螺杆式空压机变频节能联合控制及应用研究*

曾维刚¹, 屈翔^{2**}

(1. 南方天合底盘系统有限公司, 重庆璧山 402760; 2. 重庆理工大学 车辆工程学院, 重庆 400050)

摘要:为降低设备能耗和维护成本,提高生产效率,通过对两台不同型号的螺杆式空气压缩机实施“一控二”的变频节能联合控制方案,采用独立外挂式变频控制系统与原有的空气压缩机组的电气控制系统紧密结合,同时结合 PLC 与变频器实现变频恒压供气;该方案设有变频和工频状态的两套控制回路,两个系统可自由切换,既能够实现分时控制,也能实现变频、工频的实时转换以及两套设备同时运行,以实现较大范围的供气量的调节;对改造前后能耗进行对比分析和计算结果表明:满负荷生产后每年可节约电量为 $6.1 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 累计节约金额 50 多万元,按生产件数计算,每件共节约 $0.07 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 节约效果明显;这种变频联合控制技术改造具有较大的推广价值,有一定的借鉴作用。

关键词:螺杆式空压机;变频;联合控制

中图分类号:TH455

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2020)05-0016-07

0 引言

螺杆式空压机是一种回转式压缩机,利用在气缸内做回转运动的螺旋形转子来进行压缩和运输气体^[1-3]。螺杆式空压机的结构简单、易损件少、排气温度低,压比大,即使气体中带液、带尘也不影响压缩效果^[4-6]。随着对螺杆式空压机结构研究的不断深入和研发制造技术的持续提高,其机械性能得到进一步的提升,在制造业中一直作为主要的动力设备,其应用领域十分广泛^[7-10]。螺杆式空压机一般采用传统控制方式,通过反复加、卸载供气方式由压力上下限控制或启停式控制^[11]。这种工作模式存在明显的弊端^[12-15]:由于螺杆式空压机在工频运行状态下无法做到恒压控制,无法避免加载能耗以及卸载能耗,在正常工作状态下,空压机卸载率

高达 50% 以上;空压机启动瞬间电流会发生阶跃变化,很容易造成变压器跳闸,同时对其他电网设备也造成了冲击;电机运行温度高,电机温度常常处于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,严重影响螺杆式空压机的使用寿命。为了提高生产效率,延长设备寿命,对工频空压机进行变频节能联合控制改造是目前逐步开始使用的新技术。另外,在国家节能减排大环境下,降低空气压缩机的能耗,也成为大家迫切需要实现的目标。

1 工频空压机基本控制原理及存在的弊端

工频空压机采用传统的控制方式由压力上下限控制或启停式控制方式来加载、卸载供气。如图 1 所示,当空压机的储气罐内压力达到设定最大值 P_{\max} 时,空压机通过步进电机或气缸来关闭进

收稿日期:2020-01-02;修回日期:2020-02-20.

* 基金项目:重庆市应用开发计划项目资助(CSTC2014YYKFB70008).

作者简介:曾维刚(1976—),男,四川新都人,工程师,硕士研究生,从事生产运营和工艺制造技术等管理研究.

** 通讯作者:屈翔(1978—),男,湖南常德人,副教授,硕士研究生,从事车辆现代设计理论与方法研究. Email: quxiang@

气阀,同时通过卸载阀卸载分离罐中多余的压缩空气。当空气压力下降到最小设定值 P_{\min} 时,空气压缩机打开通气阀,空压机又重新启动直至压力达到设定最大值。一般情况下, P_{\max} 与 P_{\min} 的关系为 $P_{\max} = (1+\delta)P_{\min}$ 。其中 δ 为压力变化幅度,一般为 10%~25%^[8]。

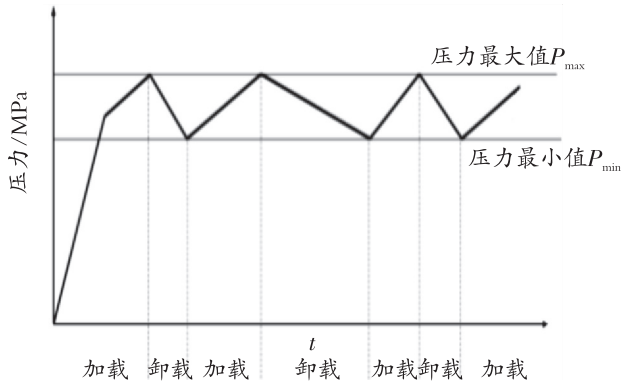


图1 工频空压机压力控制示意图

Fig. 1 Power frequency air compressor pressure control diagram

根据上面的分析,工频空压机的控制方式在两方面导致能耗过大:加载方面,空压机工作时的控制方式使得压缩空气的压力 P_{air} 始终满足 $P_{\min} \leq P_{\text{air}} \leq P_{\max}$,其使得空压机处于反复的加载中,增加了能耗;卸载方面,即卸载时空压机利用执行部件关闭进气阀,能量传递路线长,能耗较大。

此外,工频空压机电机启动时的电流阶跃变化,极易对电网造成冲击,加重电网的压力并导致前端过流保护动作,影响电网中的其他设备。且其工作特点决定了在用气量较小情况下加卸载频繁,相关阀门频繁动作,会缩短使用寿命。工频高速运行,轴承磨损严重,造成空压机主要部件维护维修量大;空压机长时间高转速运行,设备机头部位发热量增大,轴承润滑脂润滑效果衰减加快,设备冷却油加速失效,使得运行时磨损加剧、噪音增加;另一方面,空压机输出压力依靠进气阀门开启或者关闭调节,整个过程较为缓慢,且控制精度较低,很难准确得到波动较小的输出压力。这些弊端都需要采用新的控制方式来消除或减小。

2 变频节能联合控制方案

2.1 变频螺杆式空压机控制原理

螺杆式压缩机的产气量:

$$V = 2\varepsilon_n LDn \quad (1)$$

其中, ε_n 为转子系数; L 为转子长度; D 为阳转子直径; n 为电机转速。

工频螺杆式空压机中,式(1)中的前3个参数是在设备出厂时就固定设置的,只有转速是可调的,产气量与转速成正比。

空压机所使用的电机转速为

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

其中, n 为电机转速; f 为电源频率; s 为电动机转差率; p 为电动机极对数。

由式(2)可知,调节电源频率可以有效地控制电机的转速,进而控制空压机的产气量,保持管道中的气压恒定。

在供气系统中,储气罐中的气压能够充分反映供气能力与用气需求之间的关系:若供气流量 > 用气流量,则储气罐气压上升;若供气流量 < 用气流量,则储气罐气压下降;若供气流量 = 用气流量,则储气罐气压不变。

因此,维持管路中气压值的稳定,有利于满足工作需求。也就是说,实现管道中气压恒定是保证恒压供气的关键环节。螺杆式空压机采用变频调速技术,根据实际用气量大小来改变压缩空气的产气量从而实现恒压供气控制。

2.2 变频节能联合控制方案

改造两台 40 m³ 的 LU250 和 M250 工频空气压缩机,功率都是 250 kW。为节约成本,实施“一控二”方案,即一台变频节能系统控制两台 40 m³ 的 MU250 和 LU250 空压机,如图2所示。其中,1 为变频控制柜;2 为空压机组;3 为压力采样传感器; W_1 为电源进线电缆; W_2 为多芯控制电缆; W_3 为主电机电力电缆; W_4 为电源供电电缆; W_5 为屏蔽电缆; 11 为大电流塑壳断路器; 12 为 PLC 模块; 13 为变频器; 14 为大电流接触器; 15 为旋钮开关; 16 为辅助接触器; 21 为电控柜, 22 为主电机; 23 为工频强冷散热轴流风机。新增“一控二”变频柜,把主电源直接引入变频柜 1。通过变频柜内的接触器 14 的不同组合方式给空压机组 1 和空压机组 2 提供相应的

有效电源。通过变频柜分别与原有空压机组 1、空压机组 2 之间的控制线缆对相应的空压机组实现有效的变频或工频控制。同时通过压力传感器 3 采集压力信号转化为电流信号输送给变频柜中的 PLC 模块 12, 结合 PLC 与变频器 13 之间通讯交流实现变频恒压供气。本方案采用独立的外挂式变频控制系统, 与原有的空压机组的电气控制系统紧密结合, 基本不改变原有的电气系统, 从而降低了改造成本和保证了后续变频柜的可移植再利用。为了确保主电机低频条件下大发热量温度升高的有效控制, 根据工况需求增加工频强冷散热轴流风机, 保证了原传统工频电机能够长时间大负荷在低频条件下运行, 降低了变频节能改造硬件投资成本。

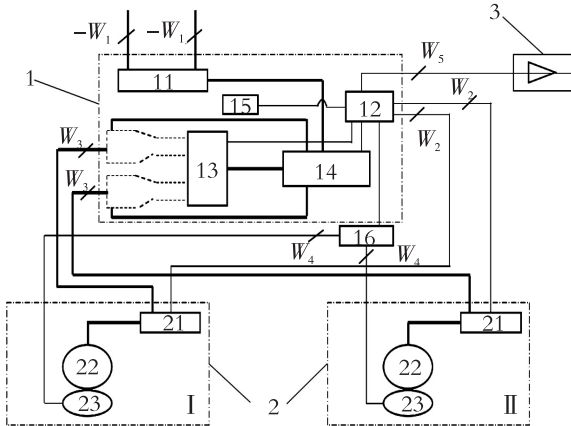


图 2 变频节能联合控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of variable frequency energy-saving joint control

空气压缩机采用变频调速技术通过调节电机转速来改变压缩空气的产气量进行恒压供气控制, 控制原理如图 3 所示。

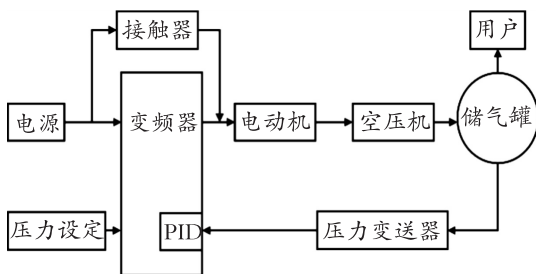


图 3 变频空压机控制原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the control principle of the inverter air compressor

将压力变送器采集到的压力 P 与 PID 智能控

制器中的压力设定值 P_0 相比, 并根据两者的差值计算出电动机相应的频率值。变频器输出相应的频率和幅值的交流电, 改变电动机的转速, 从而调节空压机的排气量, 使 P 始终接近 P_0 , 维持供气压力稳定。整个控制过程如图 4 所示。

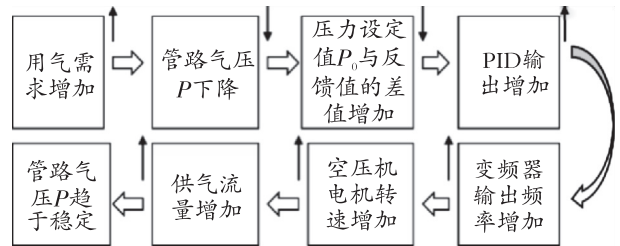


图 4 控制过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the control process

(1) 分时控制。变频系统能够实现分时控制 M250 空压机和 LU250 空压机, 即根据工况需求, M250 和 LU250 之间能自由切换使用。当 M250 运行一个周期时停止保养, 通过系统能够切换到 LU250 系统运行。这样可以保证两台空压机轮换维修、保养。

(2) 变频和工频双模式切换。变频系统设有变频和工频两种模式的两套控制回路。空压机可以通过控制面板先以变频系统运行后续根据工作需求可以切换至工频系统运行, 反之也可以实现两个系统自由切换。该模式可以当变频系统出现问题时, 启用备用的工频模式应对生产需求。

(3) 变频和工频同时运行。变频系统在控制一台空压机变频运行的同时也能够开启另外一台空压机的工频模式运行。该方案能够实现当生产用气量增加较多时, 两台空压机同时工作以满足生产需求。

(4) 变频系统能够在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 正常运行。

(5) 变频系统配置触摸屏, 便于人机互动, 操作简单。

(6) 考虑 M250 空压机使用年限较长, 为保证温度受控, 在主机电机后端加装风机强制冷却降温。

变频系统实施“一控二”方案如图 5 所示, 设有变频和工频状态的两套控制回路, 两个系统实现自由切换; 变频系统在控制一台空压机变频运行的同

时也能够开启另外一台空压机的工频模式运行,以解决当生产用气量增加较多时,两台空压机能够同时工作以满足生产所需;还能够实现分时控制,保证两台空压机轮换维修、保养。具体工作方案如下:接触器 KM_1 与 KM_3 互锁;接触器 KM_2 与 KM_4 互锁;接触器 KM_3 与 KM_4 互锁;接触器 KM_5 与 KM_6 互锁。

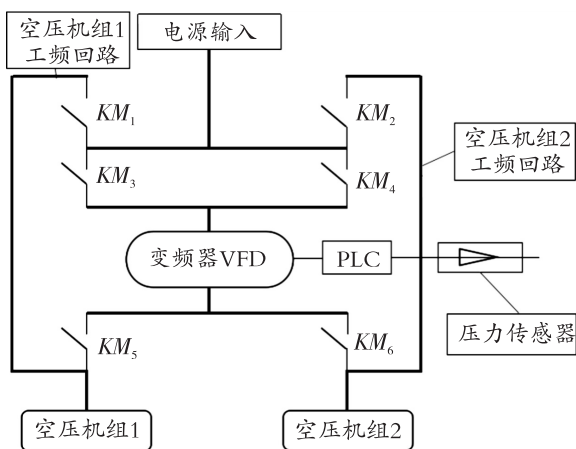


图5 变频系统“一控二”方案图

Fig. 5 “One control two” scheme of the frequency conversion system

2.2.1 空压机组变频运行控制

(1) 启动。通过旋钮开关选择变频运行空压机组1,接触器 KM_3 和 KM_5 闭合,变频器启动,PLC 控制器输出初始值对应电流给变频器,变频器按照预设程序完成软启动,加载电磁阀得电,进气阀门打开,空压机加载运行。

(2) 自动运行阶段。电动机启动完成后,空压机开始全负荷加载,气罐压力开始升高,当压力升高到一定程度,逐步接近设定值时,空压机由全负荷加载变为半负荷加载,压力升高速度减慢;当压力升高到超过设定压力值时,压力传感器电流信号传输到变频器,变频器经过信号处理,提供给电机的输出频率降低,电动机转速降低从而减小供气压力;当气压低于设定压力值时,压力传感器电流信号传输到变频器,变频器经过信号处理,提供给电机的输出频率增加,电动机转速增大从而增加供气压力。

(3) 停机控制。加载电磁阀失电,空压机空载

运行,延时一段时间后, KM_3 和 KM_5 断开,空压机停止运行。

同理,通过旋钮开关选择空压机组2变频运行。对应接触器 KM_4 和 KM_6 闭合完成变频运行。其工作控制方式与空压机组1变频运行相同。

2.2.2 空压机组工频运行控制

(1) 启动。通过旋钮开关选择工频运行空压机组1,接触器 KM_1 闭合,空压机组1按照原有的Y- Δ 方式启动。

(2) 自动运行控制。电动机按照 Δ 状态启动,延时一段时间,加载电磁阀得电,进气阀门打开,空压机开始加载运行,气罐压力上升。当气压升高到设定压力上限时,加载电磁阀失电,进气阀门关闭,停止加载。当气压低于设定压力下限时,加载电磁阀得电,进气阀门再次打开,空压机加载运行。空压机低于设定压力下限加载,高于设定压力上限卸载,如此往复加卸载运行,从而达到自动控制。

(3) 停机控制。加载电磁阀失电,进气阀门关闭,空压机卸载运行,延时一段时间后,电动机接触器失电停止运行。

同理,通过旋转开关选择空压机组2工频运行。对应接触器 KM_2 闭合完成空压机组2工频运行。其工作控制方式与空压机组1工频运行相同。

2.2.3 空压机组1变频和空压机组2工频同时运行控制

通过旋钮开关选择空压机组1,接触器 KM_3 和 KM_5 闭合实现空压机组1变频运行。其启动、运行、停机与空压机组变频控制方式相同。

与此同时通过旋钮开关选择空压机组2,接触器 KM_2 闭合实现空压机组2工频运行。其启动、运行、停机与空压机组工频控制方式相同。

同理,可以选择旋钮开关切换为空压机组1工频和空压机组2变频同时运行控制。

综上,通过“一控二”方案多种运行模式选择,将实现较大范围的供气量的调节,从而满足生产不同条件下的需求。

3 变频节能联合控制改造及应用

根据第 2 节方案对两台空压机实施了变频联合控制改造。考虑当前空压机运行特点,如果长时间在低频率工况下运行,该普通大功率电机转速降低,自身发热量增加,缸体的润滑效果减弱,磨损加快,空压机的稳定性变差。根据变频器生产厂家的建议及实际运行情况,最终频率下限设置为 30 Hz,上限为 50 Hz,正常运行后变频工作在 30 Hz ~ 50 Hz。根据生产现场的需求,终端管理压力设置 5.3 MPa。改造完成后进行了长期运行,整个系统运行良好,能耗大大降低。改造前空压机运行状况如表 1 所示。

表 1 变频改造前 40 m³ 空压机运行状况

Table 1 Operation status of 40 m³ air compressor before inverter conversion

加载时间占比/%	加载电流/A	卸载时间占比/%	卸载电流/A
50	460	50	230

改造前用电量 W_F 为

$$W_F = 1.732IUT/1\ 000 \quad (3)$$

其中, W_F 为改造前用电量; I 为电流; U 为电压; T 为运行时间。

每天按照 24 h, 每月 30 d 计算, 则每月能耗为

$$W_F = W_a + W_d$$

其中, W_a 为加载能耗; W_d 为卸载能耗。

$$W_F = 1.732 \times 460 \times 380 \times 24 \times 50\% \times 30 + 1.732 \times 230 \times 380 \times 24 \times 50\% \times 30 = 163\ 486 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

改造后空压机运行状况见表 2。

表 2 变频改造后 40 m³ 空压机运行状况

Table 2 Operation status of 40 m³ air compressor after inverter conversion

加载时间占比/%	加载电流/A	卸载时间占比/%	卸载电流/A
85	260	15	110

利用式(3)可求得变频改造后用电量 W_L 为

$$W_L = 112\ 545 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

改造后每月的能耗节约 W_S 为

$$W_S = W_F - W_L = 50\ 941 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

改造后每年满负荷条件下能耗节约为 $50\ 941 \times 12 = 611\ 292 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

当前每千瓦·时按照 0.95 元计算, 每月节约金额 = $50\ 941 \times 0.95 = 48\ 394$ 元, 每年节约金额 = $48\ 394 \times 12 = 580\ 728$ 元。

该系统于 2018 年 10 月份改造, 11 月份起正式使用至今, 设备各项功能运行正常, 无异常发生。根据空压机单件电量统计, 单件用电量从变频改造前 0.16 kW·h 已经下降到变频改造后 0.09 kW·h, 每件用电量节约 0.07 kW·h, 节约效果明显。

通过运行, 发现变频改造还带来其他收益:

(1) 变频改造后, 空压机启动改变为软启动, 大大减少了对变电站的冲击和影响, 没有发生变电站跳闸保护现象。

(2) 空压机温度由原来的 100 °C 以上降低到当前的 78 °C ~ 82 °C, 处于电机最佳温度控制区间。

(3) M250 至今已经使用 17 a, 根据原来的工况预计在 2 a 内报废。由于变频改造后, 整个运行负载降低, 使用寿命将有所延长。

4 结束语

通过对两台不同型号的螺杆式空气压缩机实施“一控二”方案, 采用独立的外挂式变频控制系统, 与原有的空压机组的电气控制系统紧密结合, 同时结合 PLC 与变频器实现变频恒压供气。

联合控制方案分别设有变频和工频状态的两套控制回路, 还能实现自由切换; 既能够实现分时控制, 也能实现变频和工频双模式切换以及同时运行, 实现较大范围的供气量的调节, 也保证满足不同工作需求;

该方案实施后, 若满负荷生产每年可节约电量约 $6.1 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 年可节约金额 50 多万元, 按生产件数计算, 每件共节约 0.07 kW·h, 节约效果明显。

该方案对原有的电气系统基本不做改变,从而降低了改造成本和保证了后续变频柜的可移植再利用,使得工厂设备的维护成本降低,设备的使用寿命得到延长,大大节约了能源,提高了生产效率,为公司带来较大的经济效益。同时这种变频技术改造具有较大的推广价值,为制造行业中正在使用的工频空压机变频改造提供了较好的实例,具有一定的借鉴作用。

参考文献(References):

- [1] 姜辉.多作用式回转压缩机的研究[D].武汉:华中科技大学,2007
JIANG H. Research on Multi-action Rotary Compressor[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2007(in Chinese)
- [2] 张兴顺.螺杆空压机国产化与本土化发展[J].通用机械,2011(12):24—25
ZHANG X S. Development of Localization and Localization of Screw Air Compressors[J]. General Machinery, 2011(12):24—25(in Chinese)
- [3] 李军.试论螺杆空压机节能改造的技术措施以及经济效益[J].科技经济导刊,2017(6):98
LI J. Technical Measures and Economic Benefits of Energy-saving Reconstruction of Screw Air Compressors [J]. Science & Technology Economics Guide, 2017(6):98(in Chinese)
- [4] 童法松,刘文进,张威.空压机变频改造节能技术的研究与应用[J].南方农机,2017,48(12):61
TONG F S,LIU W J,ZHANG W. Research and Application of Energy-saving Technology for Frequency Conversion Transformation of Air Compressor[J]. South Agricultural Machinery,2017,48(12):61(in Chinese)
- [5] 徐志花.螺杆式空压机的变频节能改造[J].能源与环境,2009(6):29—31
XU Z H. Frequency Conversion Energy Saving Retrofit of Screw Air Compressor [J]. Energy and Environment, 2009(6):29—31(in Chinese)
- [6] 廖凌.螺杆式空压机变频节能改造研究[J].山东工业技术,2017(19):28
LIAO L. Research on Frequency Conversion Energy Saving Reconstruction of Screw Air Compressor [J]. Shandong Industrial Technology, 2017(19):28(in Chinese)
- [7] 马文.MM430变频在螺杆空压机中的应用[J].新疆有色金属,2018,41(S1):125—126
MA W. Application of MM430 Frequency Converter in Screw Air Compressor [J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2018, 41(S1):125—126(in Chinese)
- [8] 卢业坚.螺杆空气压缩机节能技术的验证与分析[J].福建农机,2018(1):24—28
LU Y J. Verification and Analysis of Energy-saving Technology of Screw Air Compressor [J]. Fujian Agricultural Machinery, 2018(1):24—28(in Chinese)
- [9] 邹江,张霞,王韬.螺杆式空压机变频节能改造[J].机械制造与自动化,2015,44(6):88—90
ZOU J, ZHANG X, WANG T. Frequency Conversion Energy Saving Retrofit of Screw Air Compressor [J]. Machinery Manufacturing & Automation, 2015, 44(6):88—90(in Chinese)
- [10] 陈国防.变频调速技术在螺杆式空压机上的节能应用[J].江西煤炭科技,2015(4):85—86
CHEN G F. Energy Saving Application of Variable Frequency Speed Regulation Technology on Screw Air Compressor [J]. Jiangxi Coal Science and Technology, 2015(4):85—86(in Chinese)
- [11] 宋丽娟.空气压缩机变频改造的技术研究[J].中国氯碱,2016(2):46—47
SONG L J. Research on Frequency Conversion Reformation of Air Compressor [J]. China Chlor-Alkali, 2016(2):46—47(in Chinese)
- [12] 孙俊.变频器在空压机节能改造上的应用[J].科技风,2015(9):84
SUN J. Application of Inverter in Energy-saving Retrofit of Air Compressor [J]. Science and Technology Wind, 2015(9):84(in Chinese)
- [13] 骆洋,袁建军.普通螺杆空压机的变频改造[J].机电信息,2014(26):27—28
LUO Y, YUAN J J. Frequency Conversion of Ordinary Screw Air Compressors [J]. Electromechanical Information, 2014(26):27—28(in Chinese)

[14] 高相家,陈放. 螺杆空压机变频节能改造的经济分析和技术方案[J]. 压缩机技术,2009(3):19—22
GAO X J, CHEN F. Economic Analysis and Technical Scheme of Energy Saving Retrofit for Screw Air Compressors[J]. Compressor Technology, 2009 (3): 19—22(in Chinese)

[15] 余万民,王振伟. 螺杆式空压机变频节能改造[J]. 化工管理,2017(13):132—136
YU W M, WANG Z W. Frequency Conversion Energy Saving Retrofit of Screw Air Compressor [J]. Chemical Industry Management, 2017 (13):132—136(in Chinese)

Study on Variable Frequency Energy Saving Joint Control and Application of Screw Air Compressor

ZENG Wei-gang¹, QU Xiang²

(1. CSG TRW CHASSIS Systems Co., Ltd, Chongqing Bishan 402760, China;

2. School of Vehicle Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

Abstract: In order to reduce the energy consumption and maintenance cost of the equipment and improve the production efficiency, the "one control two" joint comprehensive control scheme of frequency conversion and energy saving is implemented for two different types of screw air compressors. The independent external frequency conversion control system is closely combined with the electrical control system of the original air compressor unit, and the frequency conversion and constant pressure gas supply are realized by combining PLC and frequency converter. The scheme is equipped with two sets of control loops in frequency conversion and power frequency state. The two systems can realize free switching, which can not only realize time-sharing control, but also realize frequency conversion and power frequency dual-mode switching, as well as two sets of equipment running at the same time, so as to realize the adjustment of gas supply in a large range. The comparative analysis and calculation results of the energy consumption before and after the transformation show that about 490000 degree electric of electricity can be saved each year, and the accumulated saving amount is more than 500000 yuan. According to the calculation of the number of production pieces, 0.07 degree electric of electricity can be saved for each piece, and the saving effect is obvious. The technical transformation of the frequency conversion joint control has a great promotion value and a certain reference value.

Key words: screw air compressor; variable frequency; joint control

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

曾维刚,屈翔. 螺杆式空压机变频节能联合控制及应用研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2020,37(5):16—22
ZENG W G, QU X. Study on Variable Frequency Saving Energy Joint Control and Application of Screw Air Compressor[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition),2020,37(5):16—22