压缩空气系统节能方法探析

潘胜彬 温雪媛 蓝小棚
（上汽通用五菱汽车股份有限公司 广西 柳州 545007）

摘要：为解决工厂压缩空气系统效率低、能耗高等问题，本文以汽车企业整车工厂空压站为例，对压缩空气系统进行研究。从实际运行工况出发，通过对空压机及其后处理设备进行自动化改造，制定空压机、冷冻式干燥机、吸附式干燥机的节能运行策略，实现空压站节能运行的目的，以期为相关人员（或工程）提供参考。

关键词：空压机；压缩空气节能；空压站经济运行

0 引言

压缩空气是指被空压机压缩后具有一定压力的空气，是一种较为常用的动力源。压缩空气在制造类的企业中得到广泛使用，主要作为喷涂机器人、轮胎生产线、机械手等设备的动力源。空压机是压缩空气的生产设备，单台空压机的电功率在 200kW 及以上，空压机的用电成本直接影响到工厂的制造成本。因此，如何实现空压站节能运行成为降低工厂制造成本的关键点之一。本文结合汽车企业整车工厂压缩空气系统的工艺特点、供气策略、空压机控制方式等方面进行分析，探索开发空压机及其后处理设备的远程自动控制系统，提出空压站节能运行控制方案。

1 压缩空气系统概况

空压机系统分别由 6 台 200kW 无油螺杆空压机、2 台 400kW 无油螺杆空压机和 3 台 710kW 离心式空压机组成，空压机均为水冷式。压缩空气后处理设备主要由冷冻式干燥机（以下简称“冷干机”）、无热再生吸附式干燥机（以下简称“吸干机”）组成。根据车间工艺要求，不同车间需求压缩空气的压力和露点均不一样，压缩空气系统分为 0.8MPa 和 1.0MPa 系统。0.8MPa 系统由 3 台 710kW 离心空压机和 2 台 400kW 无油螺杆空压机供气，主要供往冲压车间、焊接车间及总装车间，用气设备有机械手、气动夹具、机运设备等，设备对压缩空气的压力及露点要求不高，需求压力 0.68MPa 以上，露点控制在 20℃以下，采用冷干机对压缩空气进行干燥处理。1.0MPa 系统由 6 台 200kW 无油螺杆空压机组成，主要供往喷涂车间供机器人喷漆。由于喷漆工艺对压缩空气的质量要求较高，需求压力不低于 0.7MPa 且露点控制在 -20℃以下，采用吸干机对压缩空气进行干燥处理 [1]。

2 压缩空气系统经济运行指标

压缩空气系统经济运行的指标有电气比、单台（车）耗电量。

电气比，即生产单位 m^3 压缩空气所消耗的用电量，是空压机用电量与产气量的比值，用 kWh/m^3 表示。电气比又分为空压机电气比和空压站电气比。空压机电气比是单台空压机用电量 / 自身产气量，比值越小说明空压机效率越高，反之则效率越低，该指标反映的是空压机自身的效率。空压站电气比是空压站所有设备的用电量与站房输出压缩空气流量的比值，比值越小，说明空压站越节能，反之则越耗能，该比值反映空压站设备运行的经济性。

单台（车）耗电量是指生产一件合格产品需要消耗的空压站用电量，该指标除了衡量空压站的运行效率外，也用来衡量产品的动力成本。工厂一般通过减少压缩空气损耗，降低空压站用电量，从而降低单台（车）的动力成本，该指标适用于制造部门或成本管理部门对生产制造过程进行绩效评价 [2]。

空压站运行是否经济，最终反映在空压站的用电量和有效产气量上，站房用电量越少、空压机有效产气量越多，则越经济，反之则越不经济。因此，评价空压站运行经济性的指标主要以空压站电气比为主。

3 压缩空气系统节能方法研究

3.1 影响能耗的因素分析

空压机的用电量占据整个压缩空气系统的 93% 以上，是空压站的主要耗能设备，空压机运行效率的高低直接决定了空压站能耗的高低，压缩空气后处理设备的损耗也间接地影响到空压机的用电量。影响空压机效率的内部因素有设备润滑不良、进气过滤器堵塞、压缩机转子磨损、离心机叶轮结垢等，外部因素有电能质量差、

空气温度高、空压机组压力带设定不合理、空压机频繁启停、后处理设备损耗大、操作人员技能欠缺等。

结合现场的实际运行工况分析，空压机均按期开展预防性保养，空压机处于良好状态。供电系统高压侧、低压侧均有无功补偿装置，功率因数可达到 0.95 以上，电能质量对能耗影响较小。空压站夏季平均气温 38℃，冬季平均气温 12℃，气温对空压机效率有一定的影响，以某品牌额定产气量 120m³/min 的离心式空压机为例，冬季环境温度在 12℃时，瞬时最大产气量测量值为 7897m³/h，空压机电气比为 0.099kWh/m³；夏季环境温度在 38℃时，瞬时最大产气量测量值为 6436m³/h，空压机电气比为 0.114kWh/m³，空压机效率下降约 15%[3]。

当前空压机均采用本机压力带控制，空压机在手动开机后，根据本机预设的压力带运行，当输出压力低于设定下限压力时，空压机自动启动并延时 30s 后加载运行，当本机输出压力高于设定上限压力时，空压机自动卸载 50s 后停机。为避免管网气压波动对生产线造成影响，0.8MPa 系统的离心空压机压力带设定为 0.78MPa，1.0MPa 系统的空压机压力带设定为 0.76 ~ 0.83MPa，而各车间设备实际需求压力不于 0.7MPa，系统的供气压力远大于设备所需压力，存在供大于求的情况。

后处理设备主要是冷冻式干燥机和无热再生吸附式干燥机。冷冻式干燥机主要原理是通过对压缩空气进行降温，压缩空气中的水蒸气遇冷后冷凝成液体，再通过电子排水阀定时将冷凝水排放出来，以达到干燥空气的作用。影响冷干机损耗的因素主要有电子排水阀的排水时长和排水间隔，排水时长越长、间隔时间越短，则压缩空气的损耗越大。同时，冷干机内部结冰也是导致冷干机能耗高的原因，当压缩空气流量减少时，冷干机负荷持续下降，长时间运行将引起蒸发器内部结冰，导致冷干机进出口的压降增大，增加能耗。

无热再生吸附式干燥机的原理是在 A、B 两个腔体内装满吸附剂，压缩空气通过吸干机 A 腔或 B 腔时，吸附剂将空气中的水分子捕获，只让空气通过，实现压缩空气的干燥。吸附剂在吸收一部分水分后，吸附能力下降，需要用处理后的压缩空气对其进行干燥，该过程称为“再生”。现场测量得出每台吸干机再生过程中消耗的压缩空气占比约为 14%，即每处理 100m³ 的压缩空气中就有 14m³ 用于再生，折算到空压机的用电量是 1.96kWh，当空压站所有吸干机都运行时，每小时损耗的压缩空气折算为电量约 148kWh。吸干机运行数量越多，消耗的压缩空气就越多，空压站耗电量就越多[4]。

3.2 节能措施

3.2.1 空压站降温改造

现场空压机布置在空压站西面靠墙一侧，空压站东面窗户自然进风，室内无排风装置，空压机电机热量、变频器热量、卸载的高温气体都直接排放在室内，热量聚集在空压机上方无法排到室外，导致空压站环境温度偏高。现场通过在空压机的电机散热口及空压机卸载排气口安装矩形风管，通过风管、风机将空压机的热量强制排到室外。改造后，有效地减少了空压站内的热量聚集，空压站环境温度下降 1 ~ 2℃，空压机运行效率得到较大提升。

3.2.2 管网联通供气改造

原 1.0MPa 压缩空气系统与 0.8MPa 压缩空气系统分别由不同的空压机供气，喷涂车间用气波动较大，1.0MPa 系统的螺杆空压机频繁启停，而 0.8MPa 系统离心空压机由于供气流量大，长时间处于低负荷运行状态，两个系统均存在压缩空气供大于求的情况。结合现场实际用气压力分析，1.0MPa 系统实际需求压力为 0.73MPa，0.8MPa 系统需求压力为 0.68MPa 以上，两个系统供气压力接近，满足联通供气要求。通过改造，将 0.8MPa 与 1.0MPa 系统空压机出口主管道联通，如图所示。系统管道联通供气后，离心空压机运行压力设定由原 0.78MPa 改为 0.75MPa，螺杆空压机压力带由原 0.76 ~ 0.83MPa 改为 0.73 ~ 0.78MPa。改造后，降低了空压机的本机压力带，空压机能耗下降约 3.5%。

3.2.3 空压机自动控制改造

自动控制系统采用西门子 S7-1200 PLC（CPU 1214C）作为核心控制器，通过 CAN 总线与每台空压机通讯，实时读取空压机的运行参数，再通过 PLC 模拟量模块采集压缩空气管网的压力、温度、流量、露点等运行数据，通过程序实现空压机远程控制。后台系统采用 WINCC 7.3 开发空压站设备实时运行状态页面、参数设置页面、数据报表自动导出及报表查询页面，值班人员可通后台查看每台设备的运行状态及设置空压机自动运行参数。

自动控制系统的运行策略以 1.0MPa 管网的系统压力为控制点，设定自动控制压力为 0.7MPa，上下浮动

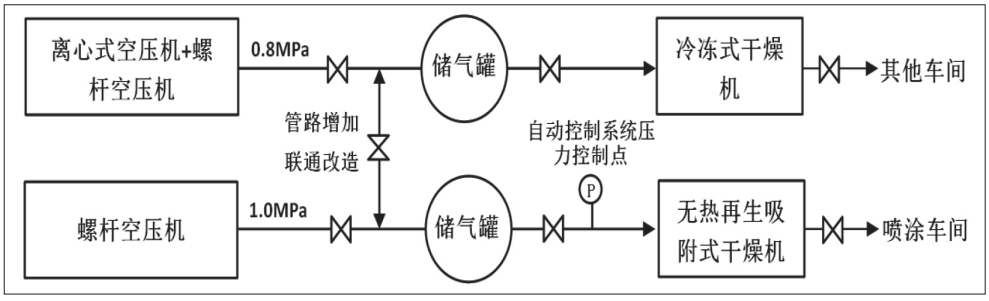

图 改造后的压缩空气系统图

0.015MPa，当管网气压低于下限值并延时 30s 后，后台自动加开 1 台螺杆空压机，若压力仍无法满足设定要求时，延迟 30s 再加开一台螺杆空压机。当压力持续上升且超过上限时，系统延时 60s 自动关停一台螺杆空压机，管网压力仍高于设定压力上限值，系统延时 60s 再关停一台螺杆空压机。同时，增加离心空压机满载率作为辅助控制模式，即当离心空压机负荷降低至 75% 时，系统逐台关停螺杆空压机，当离心空压机负荷大于 95% 且管网压力低于设定下限压力时，系统延时 30s 后自动加开一台螺杆空压机。离心空压机效率高，具备根据管网压力动态调节负荷的能力，自动控制系统增加离心空压机满载率辅助控制螺杆空压机的启停，能够最大限度将空压机控制在满负荷运行状态，减少空压机放空或卸载运行的损耗，降低空压机能耗 [5]。

空压机增加自动控制系统改造后，空压站运行效率得到大幅提高，根据空压站历年用电量及站房输出气量数据分析，空压站电气比由原 0.183kWh/m³ 下降至 0.14 kWh/m³（计算公式：所有空压机用电量 / 站房压缩空气出口总流量），每输出 1m³ 压缩空气节约电量 0.043kWh，空压站能耗同比下降 23.5%，节能效果显著。

3.2.4 冷干机节能措施

冷干机主要通过控制冷干机空气进出口压差和调整排污周期实现节能。现场根据压缩空气瞬时流量及冷干机进出口压差控制冷干机开启数量，当持续流量小于 3000m³/h 时，开启处理量为 80m³/min 的冷干机；当瞬时流量大于 3000m³/h 且机组进出口压差大于 0.03MPa 时，开启处理量为 150m³/min 的冷干机；当瞬时流量大于 6000m³/h 且机组进出口压大于到 0.03MPa 时，分别开启处理量为 150m³/min、80m³/min 机组各一台。通过控制冷干机的开机数量，在提高冷干机负荷的同时控制冷干机进出口压差，降低冷干机进气压力，实现节能。另外，通过延长排污间隔时间、缩短单次排放时间及安装零气损自动排污阀的方式，减少压缩空气消耗。

3.2.5 吸干机节能措施

吸干机损耗压缩空气量较大的原因在于吸附剂的再生过程，可通过在每一台吸干机增加露点自动控制装置，将吸干机固定切换周期改为根据出口露点动态调整切换，即当吸干机出口露点高于设定露点 0.5℃时，进入保压控制模式；当出口露点高于设定露点 1℃时，进入再生模式，再生时间为 3min，其他时间均工作在节能模式。通过对吸干机进行露点自动控制改造，吸干机的平均切换时间由原 3min 延长至 7.6min。秋冬季度，空气较干燥，吸干机最长切换时间可达 9min，大大减少了吸干机再生次数，压缩空气消耗量约下降 60.5%，当所有吸干机均运行时，压缩空气瞬时流量为 7560m³/h，折算每小时用电量可节约 89.54kWh。另外，通过空压站自动控制系统根据吸干机进出口压差控制吸干机启停，当压差大于 0.03MPa 时，自动加开一台吸干机，当压差小于 0.01MPa 时，自动关停一台吸干机，通过控制吸干机运行数量，减少压缩空气损耗，从而实现节能运行目的。

4 结语

通过对空压机、冷干机、吸干机进行自动控制改造，制定空压站节能运行策略并验证，形成空压站经济运行准则，实现空压站设备自动运行，解决了空压站设备自动化程度低、机组运行效率低、耗能大等问题。空压站能耗持续下降，大大降低了工厂的制造成本，提高了产品竞争力。

参考文献：

[1] 蓝小棚，温雪媛．浅谈模块化无热再生吸附式干燥机 DDS 技术改造 [J]. 压缩机技术，2018(1):48-49+34.
[2] 赵利平．压缩空气系统节能优化探讨 [J]. 压缩机技术，2022(4):56-58+51.
[3] 许德鹏，杨文勇．降低压缩空气电气比的改造 [J]. 轮胎工业，2020(12):752-755.
[4] 何东发．压缩空气系统节能案例探索 [J]. 能源研究与利用，2020(5):50-52.
[5] 步彬．压缩空气系统节能研究与应用 [J]. 冶金动力，2019(4):32-35+39.

作者简介：潘胜彬（1989.08-），男，汉族，广西平南人，本科，工程师，研究方向：工厂 110kV 降压站、工厂配电、空压站、制冷站等设备的运行维护。