

经济产业局长大奖

## 不要放弃！“适应革新技术要求的大型压缩机的节能”

出光兴业(株) 千叶炼油厂

炼油一科 C 主力小组

**关键字：** 向电气的动力、热能等转换的合理化（电动力应用设备、电气加热设备等）

### 概要

我们顺应装置的运转状况及生产条件的变化，始终坚持不懈地追求最大成效的节能运转。其中，我们着眼于搞清高压·大容量的柴油直接脱硫装置的往复式氢气供给压缩机对电力的需求量，就运转台数的削减问题进行了研究和探讨，同时采取手动更改吸入阀抑压器运转模式等改善措施。但是，最终依然未能成功削减作为导致电力损耗最大原因的回流量。我们挑战极限，和保养人员及集团公司的专业技术部门相互合作，在反复的试行错误中不断摸索，确认了革新技术的无极电容调整系统可以适用。在机器上实际应用后，不但可以维持稳定的运转状态，同时还实现了几乎达到极限状态的最少回流的运转，由此获得了巨大的节能效果。

<b>上述相关事例的实施时间</b>	2004 年 4 月～2005 年 8 月	总计 17 个月
规划制定时间:	2004 年 4 月～2005 年 1 月	总计 10 个月
对策实施时间:	2005 年 2 月～2005 年 7 月	总计 6 个月
对策确认时间:	2005 年 6 月～2005 年 8 月	总计 3 个月

### 工厂概要

生产项目：LPG、粗汽油、汽油、灯油、轻油、柴油、润滑油 职工人数：469 人

年度能源使用量（2004 年度实绩）

燃料等(原油换算)：828,000kL

电力

: 541,000 千 kWh

## 对象设备的概要

柴油直接脱硫装置是将原料的重质残渣油及氢气在催化剂中进行高温·高压作用来生产低硫磺重质油的装置。对象设备大型压缩机是作为该装置中枢的氢气供给往复式压缩机。(图-1)

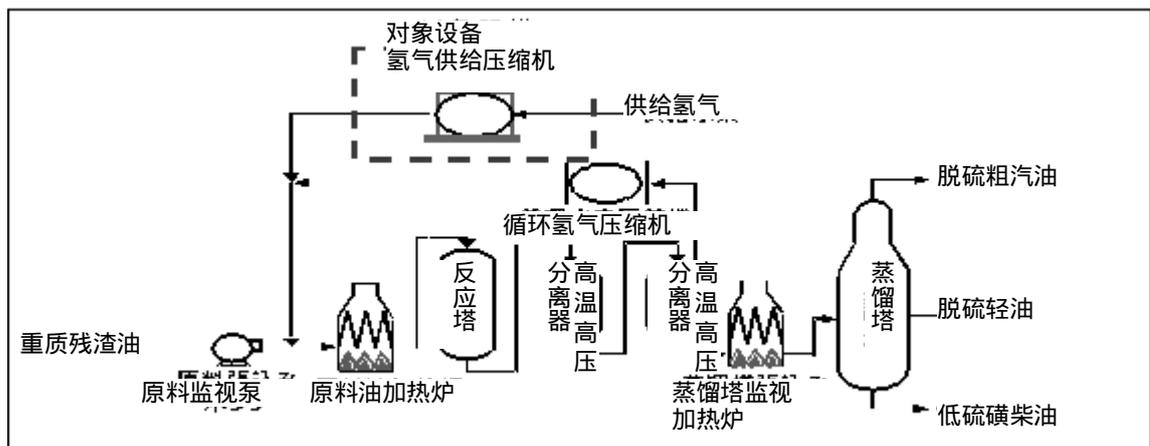


图-1 柴油直接脱硫装置概略流程及对象设备

### 1. 主题选定理由

我们的工厂自 2003 年度起伴随装置运转率的变化及新设装置的引进，能源单位能耗也逐渐增加。在推进地球变暖对策的过程中，在号召节能的呼声中，我们对节能规划进行了全面修正。当时，在提前 2 年计划的大方向下，我们积极参与设备投资，并开展削减温室效应气体排放量的相关活动，切实成功地获得了节能效果。(图

-2)

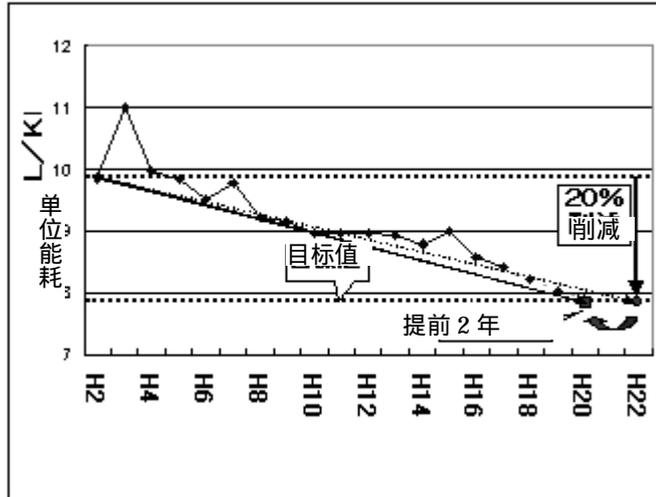


图-2 工厂节能单位能耗的推移

最近，我们又提前开始无硫化燃油的供给等，希望由此达到削减环境负荷的目的。

工厂内的使用能源大致可分为三种，分别是电力、蒸汽、燃油（燃气）。我们的工厂目前正在开展夏季期间13点~16点之间实施的、名为“削减峰值活动”的削减电力购入量活动，同时也致力于清凉商务的推进、出厂调整、旋转机运转调整等工作。电力使用的削减立足于确保电力供给余力的视点，这对于普通家庭、或者工厂来说都是一个极其重要的课题。因此，本次我们将削减电力使用量很大的柴油直接脱硫装置(以下简称：LX装置)的氢气供给压缩机 LX-C2C 的驱动功率课题正式提上节能日程。(图-3)

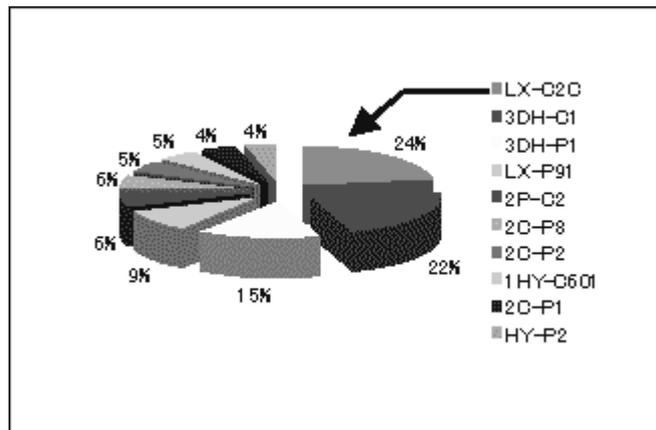


图-3 科内大型旋转机的电力使用量

## 2. 现状的掌握及分析

### 2-1 现状的掌握

#### (1) LX-C2 的概要

LX 装置诞生于 1967 年。LX-C2 是 3 段压缩往复式压缩机(图-4)，用于供给脱硫必须的氢气，共有 A 号机至 C

号机 3 台机器，不过平时只有 A 号机和 C 号机这 2 台机器在运转。B 号机是送气功率只有 50%的备用机器(各压缩机的设计规格参照表-1)。本次的活动着眼于电力的削减，并以作为发动机驱动的 C 号机为设备对象。

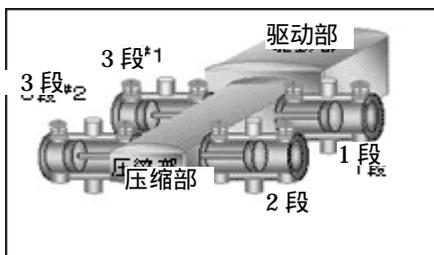


图-4 LX-C2 的概略图

表-1 LX-C2 设计规格

项目	号机	A	B	C
驱动机		复水涡轮	背压涡轮	发动机
动力源		2.1MPa 蒸汽	2.1MPa 蒸汽	6,000V 交流电
消费量		26.8 t/h	25.0 t/h	2,600 kW
能力		510kNm <sup>3</sup> /d	255kNm <sup>3</sup> /d	510kNm <sup>3</sup> /d

压缩机的负荷调整可以结合 LX 装置的氢气消费量采用以下 2 种方式。第 1 种是通过隙囊的开闭使各汽缸容积发生变化的方式(图-5)、第 2 种是手动开闭吸入阀抑压器的方式(图-6)。通过这样的组合，可以将负荷在 100%、88%、73%、50%的 4 段中进行调整。

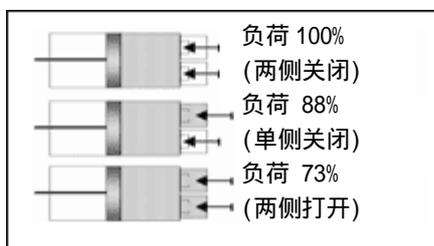


图-5 隙囊调整事例

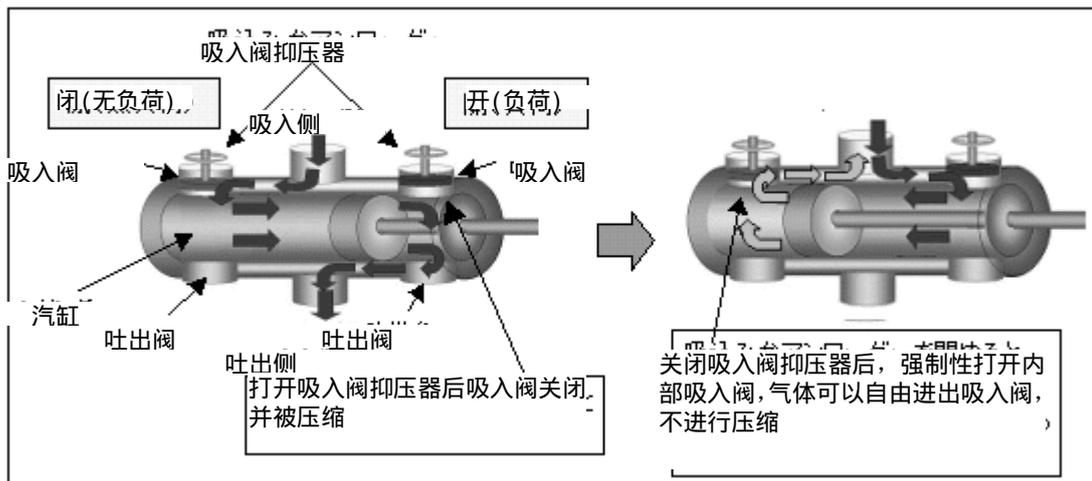


图-6 通过吸入阀抑压器的开闭调整负荷 (50%)

## (2) 氢气供给量的调整

LX-C2 周边概略流程如(图-7)所示。如上所述, 在通过隙囊及吸入阀抑压器方式调整氢气供给量时, 流量分为 4 段, 无法进行流量的微调。

因此, 可以根据 1 段吐出后又被吸回的量(以下称“回流”)进行调整。供给氢气的升压状况分别是, 第 1 段中从 1.47MPa 至 3.13MPa、第 2 段中至 6.66MPa、第 3 段中至 14.5MPa, 各段升压后的压力通过第 2、3 段的回流调整为规定的数值。

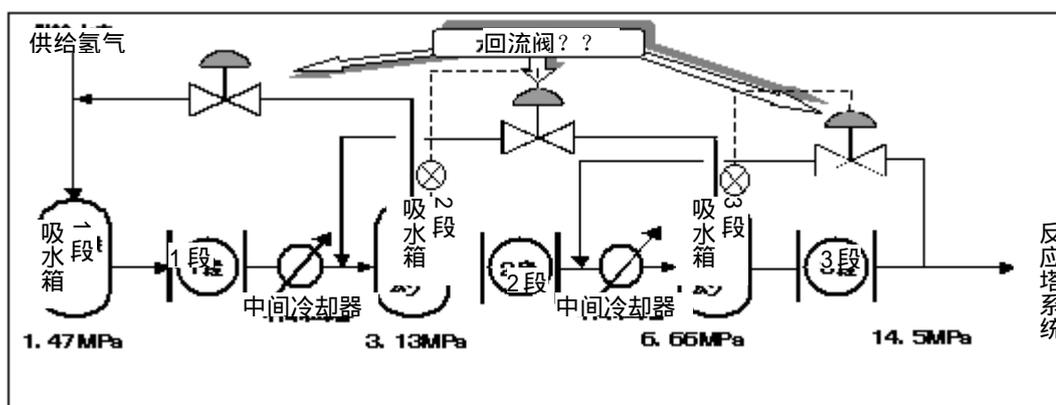


图-7 LX-C2 周边概略流程图

## (3) LX 装置的运转及氢气消费量

LX 装置的原料分为 2 类。第 1 类是从处理原油的常压蒸馏装置塔底输出的柴油(以下称“RC”), 第 2 类是

从润滑油炼制装置中输出的残渣油(以下称“LF0”),这两种油每隔几天就交替作一次通油。氢气平均消费量分别是,RC运转时为 $550\text{kNm}^3/\text{d}$ 、LF0运转时多达 $470\text{kNm}^3/\text{d}$ 、而更换原料时为 $80\text{kNm}^3/\text{d}$ ,消费量在以上范围内发生很大变化。系统压力的下降会对产品性状产生巨大的影响,而压力的上升却相反,它具有可能带来设备破损等重大灾害的危险性。因此就要求我们应快速追踪供给压缩机上的氢气消费量的急速变化状况。由此才能始终确保较多的回流量,并对各段压力进行调整。本来由于回流量较少因此损耗也较少,可以进行经济运转,但从原料切换时等的变化来看,要想吸收这些变动,则必须具备庞大的回流量。

## 2-2 现状的分析

### (1) 回流量的掌握

从氢气消费量及压力控制性的角度来看,最少的回流量之和也会超过1台压缩机的能力,因此,通常必须同时运转1台为50%、另一台为73%负荷的压缩机。这种状态下,压缩机吐出量被固定为 $627\text{kNm}^3/\text{d}$ ,因此,在氢气平均消费量为 $492\text{kNm}^3$ 的运转环境下,将会有 $135\text{kNm}^3$ 被回流而成为动力损耗(图-8)。这个数字占使用动力的18.4%,相当于478KW的电力损耗(与回流量为0时的对比)。

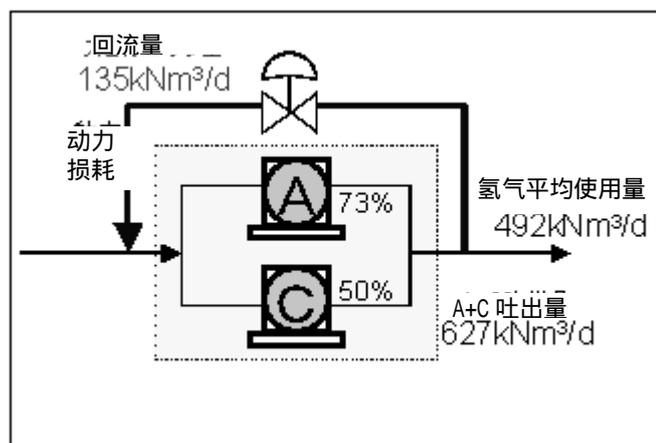


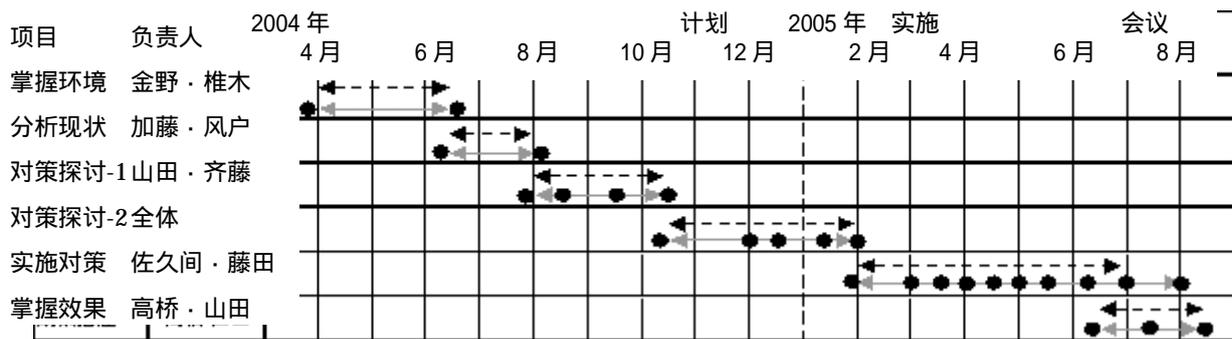
图-8 氢气消费量与回流量的关系

## 3. 活动经过

### 3-1 管理体制

本次讨论确定由最初的科内小组负责开展相关活动。同时制定行动规范,规定可能影响活动进程的问题应及时汇报,定期召开会议等。(表-2)

表-2 活动计划及职责分工



### 3-2 目标设定

将 LX-C2 的回流量  $135\text{kNm}^3/\text{d}$  降低至可以适应压力变动的最少回流量  $50\text{kNm}^3$ ，削减驱动动力  $11.5\%$  ( $300\text{kW}$ )。

### 3-3 改善方案及其讨论

为了达到作为节能目标的削减驱动动力的目的，我们立足于“如何将回流量降低至极限”的视点在小组内展开讨论，并将讨论结果通过矩阵图的方式、从操作性、安全性、期待效果、投资额等方面进行评估。(表-3)

#### (1) 改善方案的探讨-1

[1] 根据现状，对隙囊进行细调

对于在无设备投资状态下的节能效果虽然也持有很高的期待值，但各段压力调整中的难题、以及在全开·全闭状态以外使用时极有可能发生的震动等问题，都使我们意识到所面临的风险之大。

[2] 增加吸入阀抑压器、隙囊的数量，对各容量进行细分

虽然期待效果很大，但由于负荷变动时需要频繁地在现场进行手动操作，而且跟踪也迟延，因此难以实现。

[3] 采用变频器(控制旋转次数)

是结合变频器的负荷来控制驱动机旋转次数的系统。可以通过改变旋转次数来调整必需的吐出量，因此，只要在对变动的跟踪上没有问题，那么理论上则可以实现回流量为零的目标。此外，如果可以只采用2台运转压缩机中的其中1台，并将这1台作为缓冲器，那么就可以对总体负荷进行调整。

不过我们了解到，这虽然是项计划性的改善方案，但如果用在往复式压缩机上，不但控制性低下，而且跟踪也会大幅度地迟延。同时，由于还需要变电站增设等新的设备成本，因此此方案的采用是难上加难。

表-3 改善案评估结果

改善方案	评估项目	评估项目			评估	
		操作性	安全性	期待效果		投资额
调整隙囊细度, 应低于现状(负荷的细分化)						
增加吸入阀抑压器、隙囊的数量, 并将各电容细分(负荷的细分化)		△	×	△	○	×
采用变频器(控制旋转次数)		×	△	○	△	×
		○	×	○	△	×

正当我们的探讨陷入完全停滞的状态时, 领导给我们提出建议: “不要放弃! 回归原点, 汇集睿智, 再创新招”。于是, 我们通过公司内部技术讨论会的现场汇报了至此为止的改善方案及其结果, 同时从设备保养人员等集团公司的专业技术部门等各方面收集了信息。当时我们获得了这样一条信息, 即“如果要对负荷进行细分, 那么有一个采用了最新技术、可以将各段吸入电容调整为无极电容的系统”。如果可以在 LX-C2 上采用, 那么就可以通过无极电容调整来自由地控制负荷, 不但可以将回流量降低至极限值, 还可以获得大幅度超越初期计划目标的重大成果。同样的道理, 如果可以采用 1 台变频器, 那么也可以实现总体负荷的调整。我们为了实现这个目标, 在联合厂商共同参与合作的同时, 开始了详细的再讨论。

## (2) 改善方案的探讨-2

### [1] 无极电容调整系统

本系统是从装置的运转控制上使用的分散型计装系统(以下称“DCS”)、通过专用的控制盘(Compressor Interface Unit: 以下称“CIU”)、并利用油压来驱动吸入阀抑压器、控制吸入阀的关闭时间、调整压缩机负荷的系统。

吸入阀的关闭时间是根据驱动机的旋转脉冲推断出回流位置并算出, 同时根据压缩机负荷来决定(图-9)。

本压缩机的旋转次数达 300rpm, 因此 1 次的压缩周围为 0.2 秒。由此, 各压缩行程将以 0.05 秒左右的速度进行, 这样即会在极短时间内反复且连续地进行控制作业。

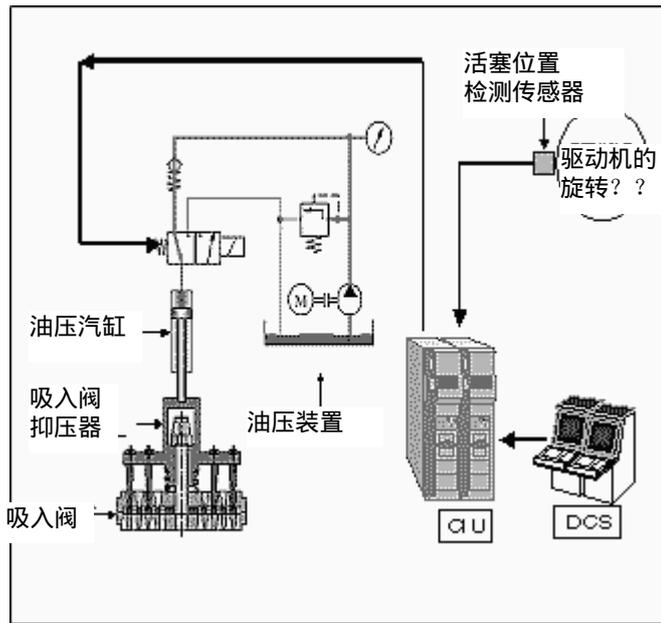


图-9 无极电容调整系统的概要

[2] 无极电容调整系统的原理及削减动力的可能性

往复式压缩机是通过活塞压缩气体然后进行送气的设备，活塞将在往复期间执行吸入、压缩、吐出、膨胀的各个行程。(图-10)为该设备的概略结构图。活塞开始从 a 地点向 b 地点移动时，汽缸(A)的压力低于吸入阀入口处的压力，根据差压状况，吸入阀会打开，然后气体被供给到汽缸内。接下来，活塞开始从 b 地点向 a 地点移动，当汽缸内的压力正好超过吸入阀入口处的压力时，吸入阀即会关闭、并被压缩至吐出压力为止。当汽缸内的压力正好超出吐出阀下游的压力时，根据差压状况，吐出阀会打开并吐出被压缩的气体。这就是压缩周期。

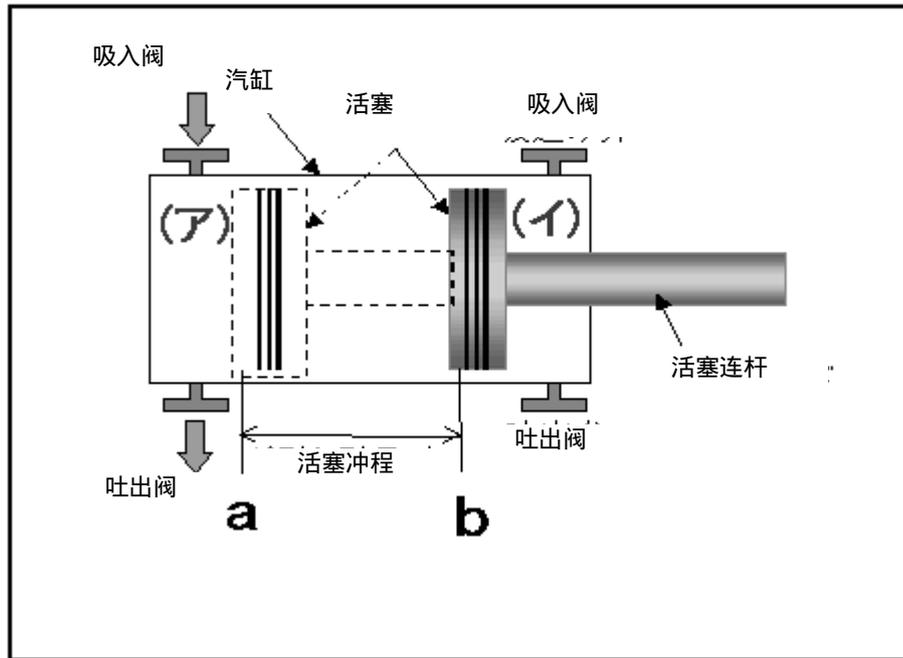


图-10 汽缸的概略结构图

往复式压缩机的行程可以通过 PV 线图(图-11)进行显示，由各行程的曲线围起的面积表示工作量。如果可以  
将此面积缩小，及表示削减了工作量。具体来说，无论是缩短活塞的行程、还是降低吐出压力，从目前压缩机  
的结构面、运转面来看，上述变更均无法现实。

对于这一点，无极电容调整系统则可以在压缩时强制性地打开吸入阀，并可以保持几乎无负荷的状态。例如：  
必需的气体量为 50%，在 C 地点至 C' 地点之间打开吸入阀，之后关闭吸入阀开始压缩。通过上述操作，  
的面积部分的工作则无需再做，也无需经过回流即可进行流量的控制，同时还可以实现削减动力的目的。

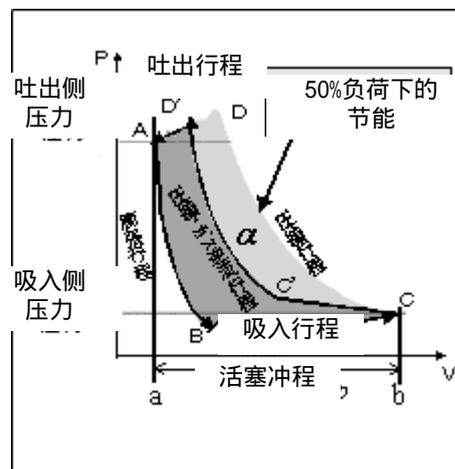


图-11 往复式压缩机的 PV 线图

### [3] 无极电容调整系统的行程

无极电容调整系统的行程分为吸入、回流、压缩·吐出、膨胀。(图-12)记载了PV线图上各点的详细状况。在(B点)吸入行程中,控制油通过油压装置供给,吸入阀抑压器呈压下状态。汽缸在接收侧活动并吸入气体。(C-C'点)逆流行程中,控制油通过止回阀将吸入阀抑压器保持在被压下的状态,汽缸在压下一侧活动,但因吸入阀保持在打开状态,因此,气体想吸入侧逆流。在(C'-D')压缩·吐出行程中,到达必要的气体流量目标后,控制油被返回油压装置,吸入阀抑压器被解除并呈关闭停止状态,只有必需的气体量进入压缩行程、吐出阀打开并吐出气体。(A点)膨胀行程维持吸入阀抑制器的解除状态,吸入阀及吐出阀均关闭。

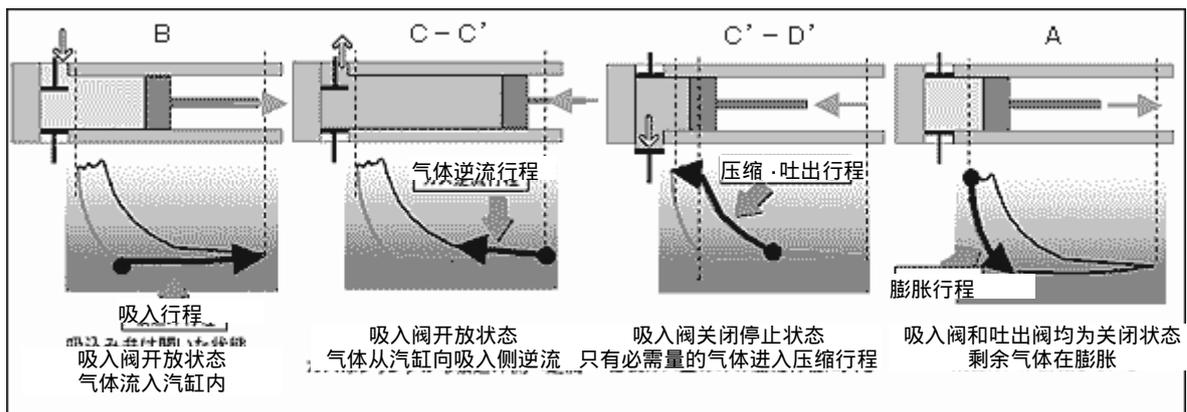


图-12 无极电容调整系统的行程

从理论上来说,引进新技术的可能性很高,但在应对 LX 装置上急剧的氢气消费量的变化、以及本系统出现异常时的装置的安全性方面还存在若干现实性问题。

因此,我们抓住以下几个项目作为今后研究的课题,并就其对策展开讨论。

- (1) 无极电容调整系统的控制性(对氢气流量变化的跟踪性)
- (2) 无极电容调整系统发生异常时的应对措施

### 3-4 问题点及其研究

#### (1) 无极电容调整系统的控制性

##### [1] 无极电容调整范围

要想从本系统上获得最好的效果,则需在尽可能广泛的范围内对压缩机进行负荷调整。我们向厂商确认了负荷调整的实际限度。如果将负荷调整至 10%以下,那么在气体逆流行程中,返回吸入侧的气体量则会过多。这

时，穿过吸入阀气体通道的贮气阀电阻将会引起吸入气体的温度急速上升(图-13)。这时可以发现，吸入气体的温度已经超过了吸入管道的 93 设计温度。考虑到安全性的问题，即使我们将最小负荷设置为 20%时也依然可以获得理想的效果，将 20%作为最小负荷，在最小负荷下也可以降低时，则打开回流阀对负荷进行了调整。

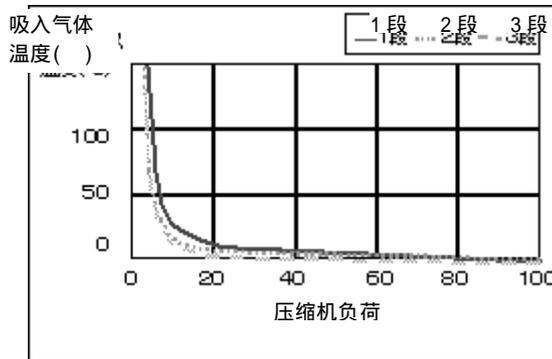


图-13 负荷及吸入气体温度上升

## [2]无反应带及曲线型负荷变化部分的控制

无极电容调整系统的 CIU 控制信号带有无显著变化和应答的无反应带。CIU 以 4~20mA 的幅度调整输出功率，这将成为 0~100%的负荷。无反应带中包括负荷的最小区域及最大区域，负荷的跟踪性开始迟延。同时，负荷与控制信号之间的关系也是犹如曲线一样的关系，以单纯的一次曲线进行近似化后可能无法进行稳定的控制。为了使这个无反应带及曲线型负荷变化部分能够顺畅地运转，我们使用与 DCS 曲线近似的折线功能进行操作，实现了稳定的控制。(图-14)

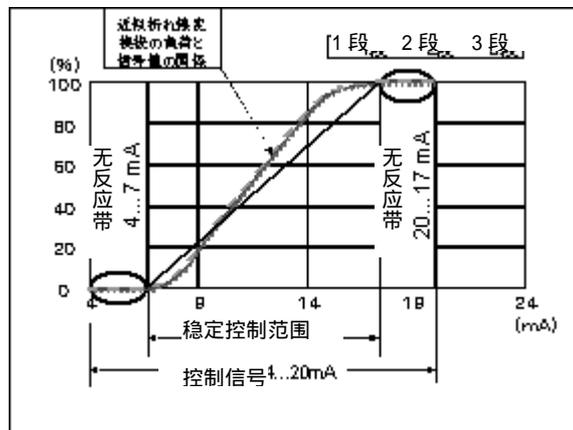


图-14 无反应带及近似折线

## (2) 无极电容调整系统发生异常时的应对措施

## [1] 系统异常时的安全对策

导致无极电容调整系统发生异常的主要原因分为电气·计装异常及油压系统异常 2 大类。将这些异常时的动作方向作为负荷 0% 还是 100% 这个问题，从工序面方面进行了探讨。

压缩机负荷为 0% 时，氢气供给量会急速减少，因此就必须减少装置的原料处理量。考虑到对工序及机器的影响，因为无法在短时间内对原料处理量的减少进行调整，可能会在期间导致产品不合格，因此不能采用。相反，如果压缩机负荷为 100% 时，氢气供给量会急速增加，这样会影响 LX 装置的压力上升或氢气供给装置的运转变化。在此，我们有效利用回流系统来控制压力的上升，并根据计算来确认能否吸收运转变动。

计算时，通过回流阀的 Cv 值导出全开时的流量，然后与压缩机的电容进行了对比。

$$\text{临界条件} \quad Q = \frac{C_v \times 238 \times C_f \times P_1}{\sqrt{G \times T}}$$

· $P_1$ :	入口压力	· $G$ :	气体比重
· $C_v$ :	阀门流量系数	· $T$ :	流体温度
· $C_f$ :	临界流量系数	· $Q$ :	流量

结果表明，针对物理上的 100% 负荷流量 510kNm<sup>3</sup>，回流系统中可达 836kNm<sup>3</sup>，能够确保充分的流量，同时确定压力上升也会被控制。

不过，发生异常时负荷会在瞬间发生变化，操作人员不可能做到随时根据此负荷变动即时进行应对。因此，我们有效利用最擅长的自动控制技术，对异常时无极电容调整系统负荷瞬间变为 100% 时的动作进行了模拟测试，并根据其结果，通过 DCS 自动打开回流阀，构筑可以自动控制压力的后台控制系统。首先要算出各段现状负荷上升至 100% 负荷时的吐出流量的增加值，并将该量换算为回流阀的开度，对于回流阀的开度在多少的情况下才会是压力发生变化这一点应随时进行计算备份。发生异常时，可以给予该计算值立即恢复控制系统的操作。由此，可以将运转变动控制在最小限度。

## [2] 确认安全阀的运转可能性

自动后台控制可以启动控制功能，回流阀正式启动时间迟延 1.3 秒。由此看来，当负荷发生最大量变化时，压缩机吐出压力会在这个迟延期间上升，需要确认安全阀是否运转。一般来说，这样的动态分析都会委托设计公司进行研究，但会产生莫大的费用支出，因此，我们凭借工作人员各部门的智慧，一边学习一边通过自己的力量进行了计算。

伴随气体量的增加而翻身的压力变化可以通过以下计算公式算出。

$$\text{吐出换算流量 } \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \text{增加气体量} \left[ \frac{Nm^3}{s} \right] \times \frac{273 + \text{系统温度 } ^\circ\text{C}}{273} \times \frac{1.03 \times 0.0981}{\text{系统内压} \left[ \text{MPa} \right] + 0.101} \quad (1)$$

$$\text{增加量} \left[ m^3 \right] = \text{吐出换算流量} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \times \text{时间 } [s] \quad (2)$$

$$\text{压力比} = \frac{\text{系统容积} \left[ m^3 \right] + \text{增加量} \left[ m^3 \right]}{\text{系统容积} \left[ m^3 \right] \times \text{比热比}} \quad (3)$$

$$\text{压力变化} \left[ \text{MPa} \right] = \text{系统内压} \left[ \text{MPa} \right] \times E \text{压力比} \quad (4)$$

计算结果表明，最大负荷增加时，达到3段吐出的安全阀设定压力(18.05MPa)需要12秒的时间。此计算是以闭锁系统为前提的保守算法。实际上，1段回流阀在1.3秒后及开始打开，3秒后即可达到全开状态，因此吐出压力的上升可以通过上述计算得到调整。通过上述操作，确认了安全阀在回流阀开始运转的迟延时间段不会运转的事实。

### [3] 确认回流阀的最小开度

使用的氢气中含有饱和水分，如果一直关闭停止回流阀，则可能导致凝缩水的积存。由于负荷调整或异常时的应对措施而打开回流阀时，积水会和气体一起急速流出，有损坏压缩机的危险。为了避免发生凝缩水积存现象的发生，应始终确保回流阀最小开度时的5%的流出。

在此结果下，无极电容调整系统异常时的运转方向在100%负荷时可以保持正常状态的事实得以确认，同时也确认了可以确保安全性的事实。

## 4 对策的内容

### (1) 对策实施项目

[1] 配合2005年度的装置定期维修，在LX-C2上导入无极电容调整系统，并将负荷调整范围设定为20%~100%之间。

[2] 为了通过DCS顺利进行无极电容调整系统的输出调整狠下功夫。

[3] 无极电容调整系统发生异常时，将负荷设定为100%，打开回流阀控制压力。通过构筑·引进自动后台控制系统确保安全性。

[4] 从保护机器的视点出发，将回流阀的最小开度设定为5%。

### (2) 对策实施后的效果确认

[1] 可以见 LX-C2C 的最小负荷从 50%降低至 20%，回流阀的开度也基本可以长期保持 5%的最小开度状态。

[2] 原料切换时的氢气消费量变化上也保持稳定的负荷，跟踪效果也得到确认。

[3] 通过实体机器对系统发生异常时的自动后台控制作业进行了测试，并确认未发生运转压力的变动。

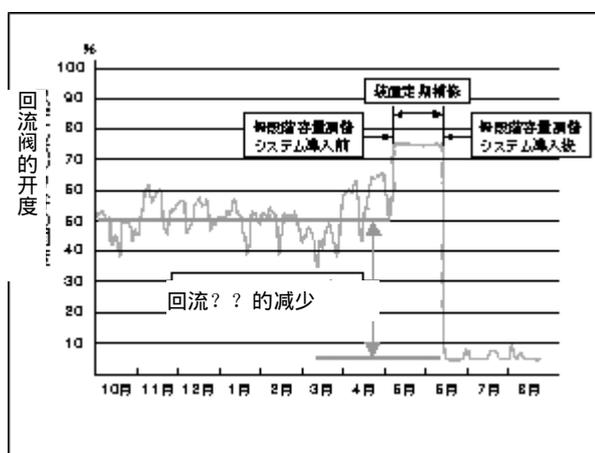


图-15 回流阀开度的推移

## 5. 对策实施后的效果

通过将回流量从 135kNm<sup>3</sup>降低至回流阀的 5%最小开度时的 20kNm<sup>3</sup> (图-15)，针对削减 11.5%(300kW 的电力削减的原计划目标的，成功实现了 15.7%的驱动动力削减(407kW 的电力削减)目标，获得了超越原计划目标的巨大成果。(表-4)

表-4 节能效果

驱动电力削減	3,226 千 kWh/年
节能金额	2,000 万日元/年
节能量	790 COE-kL/年
CO <sub>2</sub> 削減量	2,093 t/年

## 6. 总结

往复式压缩机的基本设计自明治时代以来始终保持原始状态，由于无极电容调整在结构上比较复杂，故未能和节能结缘。不过，即使有这样的设备，也会随着最新技术的诞生和热电联产的出现，也终究会改头换面，以带有弹性运转范围的新型设备形象出现在节能大舞台。

本次的改善过程中，接受了环境省控制二氧化钛排放对策事业费等津贴的支援。今后我们还将继续有效利用

支援制度，积极进行设备投资，在削减负荷保护地球环境的活动中始终保持积极的态度，进一步推动节能活动的开展。

## 7. 今后的计划

今后我们将不断发掘智慧，继续曾经放弃的改善对策的构思和创意，带着“能做到这一点就好了”的意识，深入最新技术领域探求新知识，寻找适用于装置的新技能。

完