

热工设计参考资料

工厂热能有效利用

第 1 集

化学工业部第六设计院

一九八〇年十一月

前

言

为使我国的能源能充分的为四个现代化服务，为有助于设计单位和工厂对热能能有效利用，我院译编了“工厂热能有效利用”集，今后将继续译编，由于我们的水平有限又缺少这方面的经验，编选不当和译错之处在所难免，诚恳地希望读者予以批评指正。

一九八〇年十二月六日

目 录

一、如何使蒸汽系统设计最佳化	1
二、大工艺装置的能量系统	3 2
三、排热的评价和利用技术的选择	4 3
四、利用中低温排热发电的方式	6 1
五、对排热回收的设想	6 8
六、关于中小型锅炉低过剩空气燃烧的问题及其对策	7 4

如何使蒸汽系统设计最佳化

在能源和设备费用增长的情况下，高效的蒸汽系统在整个工艺装置的经济性方面变得更为重要。

本文将线性规划技术应用于工业蒸汽或凝结水系统模型化和最佳化的一种方法。

James K. Clark, Jr and Norman E. Helmick, Fluor
Engineers and Constructors, Inc

迭代线性规划〔线规〕算法可用于蒸汽分配系配使净费用减到最少。这些费用表示每天运行费或包括运行费和主要投资的每年费用。

线性规划技术能够确定工艺设计变量最佳值，以便达到最低的费用。典型变量包括蒸汽母管温度、透平比率、排放流量、补充水和过热蒸汽减温水流量、冷却或加热需要量和除氧器压力。

当变更设计允许时，线性规划则能在电动机或透平两者间选择原动机，选择和确定备用的过热器、冷凝液冷却器规格。线性规划也能确定最佳系统组合。

线性规划法比基于解热量和物料平衡方程系统更灵活。此外，对一个有确定目标的我们所希望的状态组，就要在独立的计算机中运算——这就需要用情况研究的方法消去大批的解而得到最后的解。刊物上对于这个问题已强调过基于用计算机程序解热量和物料平衡的方法有很小的甚至根本没有最佳化的能力〔1、2、3、5〕。线性规划最佳化方法已由保尔劳得〔Bouiloud〕〔4〕提出，但是要求所有的热焓值为已知

和所有的热力学计算在线性规划计算以前求解。它是相当于使用者根据不同的热力学假定做反复的试验。由于这些要求，模型在最佳化方面受到限制。

当热焓引入作为题目变量时，由于能量平衡方程的非线性性质，直接的线性规划解算成为不可能。为避免用连续的线性近似法解非线性蒸汽平衡方程的困难，将在后面叙述迭代技术。随着每次新的求解，线性近似值得到改善。当全部的近似值是在实际的非线性方程的一个小公差内时，就完成了最后的解。因为每个线性规划解对于它的线性近似值是最佳的，所以最终的解也必然是佳的。

线性规划：简要回顾

线性规划是几种数学技术之一，总而言之试图把线性规划作为求几个自变函数的最小值或最大值的解题的“数学规划”。线性规划是这些数学技术中应用最广和分析复杂工业系最好的方法之一。典型的应用包括确定工程最佳资源分配（即资金、原料、人力和设备）以得到一个特殊的目的，例如最低成本或最大利润。

实际上，最佳资源分配必需是在满足下列条件下确定。这些条件是可能的资源利用率、物料的、法律的和管理的约束。必需加在资源或运行条件之上的约束，是取上、下限形式。例如：限定的原料利用率或工艺单元可能有的最大生产率。另一个例子为石油产品混合物，在这里硫含量、汽油辛烷值、燃料粘度等，必需满足其上、下限以使产品畅销。

线性规划法能求这样形式的线性目标函数最大值或最小值：

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

式中 x_j 是未知题目变量, c_j 是常数系数。变量必需用等式或不等式关系给予约束。这型式概括为:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \begin{matrix} \leq \\ \geq \end{matrix} b_i, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

这里的 x_j 与方程(1)中的 x_j 一样, 是未知题目变量, a_{ij} 是常数系数, b_i 是右边常数。由方程(2)表示的 m 个关系式称为约束组。目标函数和约束组一起构成线性规划模型。方程(2)所示的关系可以是上限(最大约束), 下限(最小约束), 或相等。这关系是线性的。

当改进蒸汽系统线性模型时, 工程师必须涉及到关联题目变量(即工艺流量和热焓)推导出热量平衡和物料平衡方程。本文中, 约束组的大多数正好由这些方程组成。然而, 确定所有的适用于这题目的上限和下限也是必需的。不等式的大多数并不是用来辨别最大和最小的温度限制。最后, 所有的线性规解的代码要求所有 x_j 为非负值(即 $x_j \geq 0$)。这特性有助于保证得到可行的热量和物料平衡。

许多计算机已经具有“解”线性规划模型的代码。这许多代码可以通过主机算机制造商和服务公司得到。解算代码确定一组 x_j 值, 将使目标函数达到最大值(或最小值), 同时满足包含在约束组中的关系。

已编出许多简化计算, 这些计算被所有的线性规代码使用——例如数学码、选择码和结果翻译码。这些课题已超过本文范围。欲阅详细的资料见参考文献 6、7。

应用于蒸汽系统的线性规划

主要由下面四个关系来描述一个具有代表性的蒸汽系统约束组。

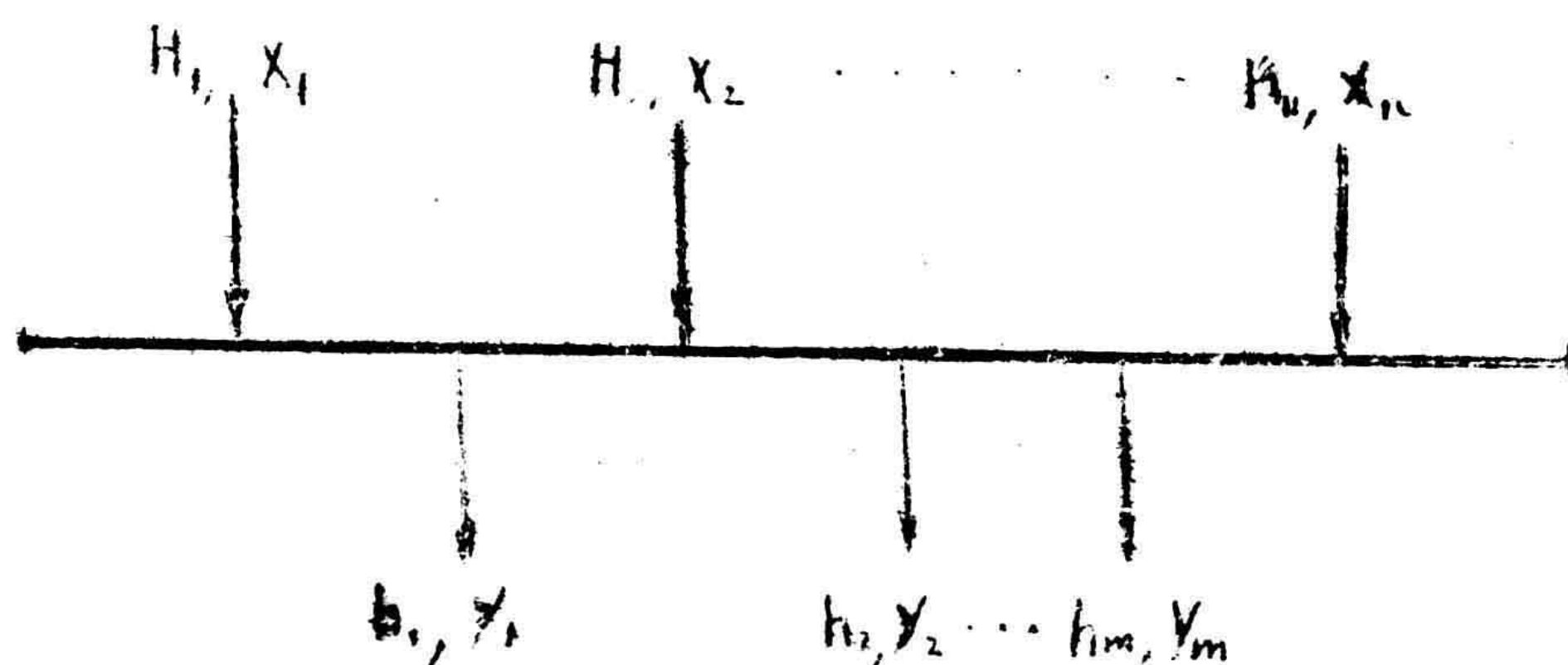
1、每个工艺单元和设备项目（包括全部母管、锅炉、过热器、透平、热交换器、闪蒸鼓、除氧器等）的物料和能量平衡方程。

2、每台机械功率需要量（即蒸汽透平）和每个工艺能量需要量方程。

3、所有自变量有上限和下限。

4、等式、上限、下限（随题目而不同）。

让我们以具体的例子来讨论下面的蒸汽母管吧：



X_j 是母管输入流量。则对于每个 X_j 有一个对应的热焓变量 H_j （如果有一些 X_j 或 H_j 已知是定值时，一般不计损失）。 Y_i 和 h_i 分别表示母管输出流量和热焓变量。用方程(3)表达物料平衡，用方程(4)表达能量平衡。

$$\sum Y_i - \sum X_j = 0 \quad (3)$$

$$\sum h_i Y_i - \sum H_j X_j = 0 \quad (4)$$

方程(3)和方程(4)对于我们讨论母管状态是不够的。具体的 h_i 的值

取决于母管的压力、状态（液体或蒸汽）和温度。因此，我们必须知道温度、压力和状态以便利用热力学的相互关系计算热焓。相反、如果已知压力、热焓和状态，就能计算出温度。本文中母管压力为已知取定值。此外，输出的全部热焓变量 h_i 应该有相同的值，我们标作 H ，那么， $h_i = h_2 \dots = h_m = H$ 。

令 K_1 为母管压力下饱和蒸汽的热焓。如果我们希望能保证所有离开蒸汽的状态，那么，我们就必须加上不等式：

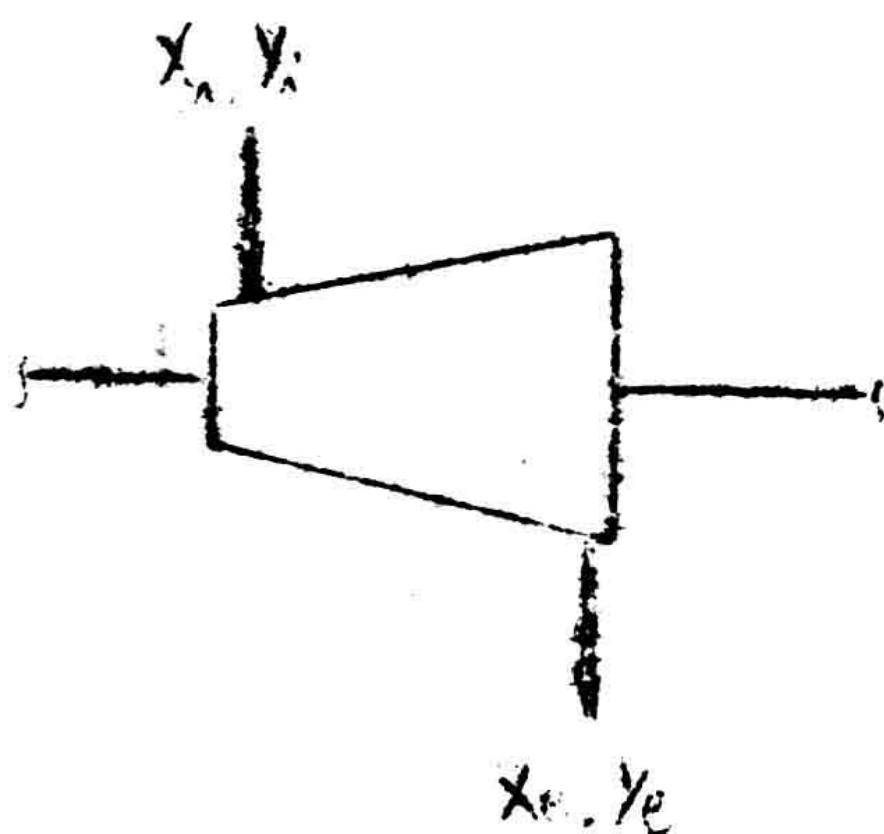
$$H \geq K_1 \quad (5)$$

工艺或设备给予的限制，对于母管蒸汽热焓通常需要加上一个上限。如果 K_2 是最大值于是如下的不等式也是必需的：

$$H \leq K_2 \quad (6)$$

如果母管压力已假定，那么方程(3)、(4)、(5)和(6)的关系对于物料和能量平衡是足够的。

让我们现在讨论一台背压蒸汽透平，如图所示。



这里 H_i 和 X_i 表示进口蒸汽焓和流量； H_e 和 X_e 是排汽焓和流量。物料平衡是：

$$X_i = X_e \quad (7)$$

能量平衡也就是马力需要量方程：

$$H_i X_i - H_o X_o = D / C \quad (8)$$

方程(8)中， C 是把所需马力转换为焓(Btu/h)的一个常数，它表明机械效率。当进口蒸汽从已知压力的一根母管来和出口蒸汽进入已知压力的一根母管时，出口焓 H_o 可由进口焓 H_i 的函数来表示：

$$H_o = \alpha + \beta H_i \quad (9)$$

方程(9)中 α 和 β 常数将从后面推导出来。如果母管提供的蒸汽有可变的温度(即热焓)，方程(9)是从属于问题的和是唯一的要索。其它的从属问题的约束例子，有燃料利用率、锅炉排污率和除氧器压力的限制。

目标函数的型式

蒸汽系统线性规划的目标函数可以从很简单到十分复杂。最简单地只有一个变量。这个目标函数或者表示为蒸汽发生率(由于工艺热回收产生的过量蒸汽)或者表示为总燃料消耗。两种情况下目标函数都最少。

另外的目标函数使总运行费趋于最小值。总运行费包括燃料、锅炉给水、电力、补充冷却水、水处理燃煤和化学品费。(本文将要讨论的例子以运行费最少为目标。)因为这目的的是一个存在系统的运行费最少，这样类型的目标函数型式，应该被运行企业所采用。

更加复杂的目标函数能被确定，包括运行费、资金回收费加上主要设备投资方面的利润率。对于一个新的蒸汽系统设计阶段，目标函数表示系统和汽源总的可变费用趋于最小。

这里叙述的三种型式的目标函数是具有代表性的。实际目标函数的选择取决于研究的目的。

非线性问题

方程(4)到方程(8)所给出的关系式可以有非线性项。例如 Hx ，这 H 表示未知热焓， x 表示未知流量。由于简化算法（用于线性规划解代码）不能处理非线性项，所以约束关系应该是线性的。

为了解决这个问题，用简单变量或线性近似值代替非线性项是可能的，以便构成能被线性规划法解算的线性模型。近似值需要估算系数。当估算正确时，由于用近似值而引入的误差意义不大。我们用系数的迭代估算和随后题目解算，直到满足最大误差要求的一个稳定系数组被求得为止来描述线性规划这方法。我们寻求的答案就是利用最后一组系数所得的线性规划解。

本文后面部分我们将通过一个具有代表性的蒸汽系统的例子得到希望的解来叙述线性化技术和迭代法技巧。

蒸汽系统的模型化

一个具有代表性的蒸汽分配系统工艺流程图示于图 1。这系统提供三个压力等级的蒸汽：850、250 和 40 磅/平方英寸·表。母管温度范围能够从饱和到最大过热值。每级母管温度最佳值将用线性规划法确定。

对于每一压力级都已标出工艺蒸汽需要量和/或加热需要量。通常，这样的需要量是用常数（英热单位/时和磅/时）给出。这图上也表示了每个压力级有系统应该接受的给定汽源。

低的和中间的的压力级每级有一个蒸汽的比容和热含量是固定的蒸汽源。然而，去高压和中间压力母管的两个另外的蒸汽源的温度，可以通过过热器增加。后面用虚线表示的装置表明潜在的可选择的设备项目。线性规划法将确定这些过热器的最佳温度（燃料用法），过热器燃料量

为零，简单地意味着这是过热器最佳解。

动力要求

有四台需要马力的机械用标识符 T/M 示于图 1。这表明所需功率不是用透平就是用电动机满足。这些虚线表示的装置表明将由线性规划法做选择。已有三种不同型式的透平：背压、冷凝和抽汽冷凝。在某种情况下，对于一个给出的马力负荷可以在各透平型式与电动机两方案中选择。这还是线性规划法选择年运费最少的方案。

从满足马力需要来选择透平型式的联合或透平和电动机两者的联合都是可能的。如果这需要表示一台单独的原动机。这样一个解实际上不可能，对于选择最佳组合做不同的情况研究已成为必需。为了研究每种情况，除独立的一台动力源外，所有的情况都是把每台机械所需的功率调整到零。于是，如果电动机和透平两者都满足动力需要，则两种情况都需要研究。其解，以最低成本为最佳。

对于这样一种情况，那里马力需要是表示多台原动机，那么各种组合是可行的。具体的原动机型式，利用相对的转换能源的效率来选择。例如，如果一个动力需要量表明要十台原动机，线性规划解指出 40 % / 60 % 在透平与电动机两者间进行分配，则 4 台将是透平驱动，6 台将是电动机驱动。

冷凝器、冷却器和过热蒸汽减温器

五个冷凝器/冷却器中的四个用虚线示于图 1 中，线性规划算法将确定最佳组合需要什么样的冷凝器/冷却器。冷却水量为零表示不需要从属的冷却器。

注意图 1 中，中压和低压母管没有示出过热蒸汽减温器。然而，这

图已示出排汽和冷凝液到这些母管去。这都是我们所需的。因为线性规划法能够确定满足母管物料和能量平衡所必需的蒸汽和冷凝液数量。线性规划的解要求母管增加冷凝液，则表明需要一个过热蒸汽减温站。如果不止一股蒸汽流可以被减温，那么设计工程师有选择这些汽流减温的权力。这又是一个如何用线性规划模型帮助我们确定最佳系统组合的例子。

除 氧 器 压 力

系统的重要变量是除氧器压力。因为排汽焓和在除氧器压力下锅炉给水对应的饱和水焓是系统的变量，这些焓在线性规划模型中也是变量。实际上，只有一个锅炉给水焓继续作为模型变量。线性相关法已被发展来阐明排汽焓作为在实际压力范围内锅炉给水焓的函数。

因为，锅炉给水直接去所有锅炉和过热蒸汽减温站，水的焓在总的系统设计上有重要作用。线性规划法为除氧器压力选择最佳值，作为最后最佳解的一部分。

蒸汽系统（例如 图1）的数学模型将包括系统中每个元件包含的热量和物质平衡方程。方程(5)到方程(6)是蒸汽母管具有代表性的数学模型。这些方程与附加的例子一道将进一步探讨。然而，首先还是让我们研究线性化吧。

线 性 化

我们曾经指出过方程(4)中 HX 项的类型：这 H 是蒸汽焓（英热单位/磅）和 X 是流量（磅/时）。一般情况下， H 和 X 是解题变量，它们的积是非线性的。只要有可能，就用简单变量来取代这一项。（变量取代的例子，将作为表示主要锅炉方程的一部分而被讨论）在多数情况下，

H_X 的积必须按一阶泰勒级数展开〔见参考文献8, 325页〕后代替。
例如

$$H_X \approx H_0 X + X_0 H - H_0 X_0 \quad (10)$$

方程(10)中 H_0 和 X_0 是泰勒级数展开的系数, 同时又是 H 和 X 真值估算的最好变量。系数的值首先必须估算, 然后通过连续的线性规划解算反复求值, 直到公差试验符合要求为止。执行公差试验的计算机算法将在后面部分讨论。同样, 系数最初估算法也在后面讨论。

在目标函数遇到非线性项时就要用到类似的线性化技术; 当设备项目的投资, 用题目变量的函数表示时, 通常就会出现非线性项。

让我们讨论用泰勒级数展开说明线性化的例子。

蒸 汽 母 管

第一个例子, 让我们分析蒸汽母管方程〔如式(4) 页上的实例〕。由于方程(3)给出物料平衡。现在热焓平衡表示如下:

$$H \sum y_i - \sum H_j X_j = 0 \quad (11)$$

用方程(10)的概念, 我们能写出方程(11)的线性形式如下:

$$\begin{aligned} \sum H_0 y_i + (\sum y_{i0}) H - \sum H_{j0} X_j - \sum X_{j0} H_j = \\ H_0 \sum y_{i0} - \sum H_{j0} X_j \end{aligned} \quad (12)$$

方程(12)中每个带有角注零的符号是泰勒展开的系数。除热量平衡和物料平衡方程以外还有蒸汽离开分配母管(母管压力不变)的限制温度、及对应的焓方程都是必须的。我们曾经指出过最小焓值是对应于饱和温度的如方程(5)。最大焓将由工艺或设备要求确定〔方程(6)〕。

方程(3)和(12)与方程(5)和(6)一道足够描写蒸汽母管。注意, 类似

于方程(5)和(6)那样的上限和下限。对于全系统的焓(这些自变量)来说都是需要的。

图1中的每条母管都有标记为“排放”的一股流量。这股流量是表示维持合理的母管热平衡和物料平衡时抛弃的蒸汽和冷凝液量。这样一个变量 y_i ，即一个输出流量，可以被包含在方程(8)和(12)里。然而，这个变量，值得特殊讨论。令 V 表示示于 页的母管排放流量。则方程(8)和方程(11)变成：

$$V + \sum y_i - \sum x_j = 0 \quad (13)$$

$$HV + H \sum y_i - \sum H_j x_j = 0 \quad (14)$$

如果系统设计得好，在大多数情况下 V 的最佳值将是零。所以，当用泰勒级数展开乘积 HV 时，我们有：

$$HV = H_0 V + V_0 H - H_0 V_0 \quad (15)$$

$$V_0 = 0 \quad (16)$$

$$HV \approx H_0 V \quad (17)$$

把这个关系式代入方程(14)，展开非线性项，得出最后的热平衡方程：

$$H_0 V + \sum H_0 y_i + (\sum y_{i0}) H - \sum H_{j0} x_j - \sum x_{j0} H_j = H_0 \sum y_{i0} - \sum H_{j0} x_{j0} \quad (18)$$

方程(18)*和(18)是典型母管的热量和物料平衡的最后方程组。排放变量将增加每根蒸汽母管和冷凝液回路的方程。一个设计好的系统，所有这些变量会等于零。如果从工艺汽源来的量比系统能够使用的量有多时，这就表明排放量不等于零。在这样的情况下，这样做是明智的。

* 原文误为方程(15)。

工艺设计和设备规范重新确定，可能使热源经济性降低一些或是系统设计重新修改。

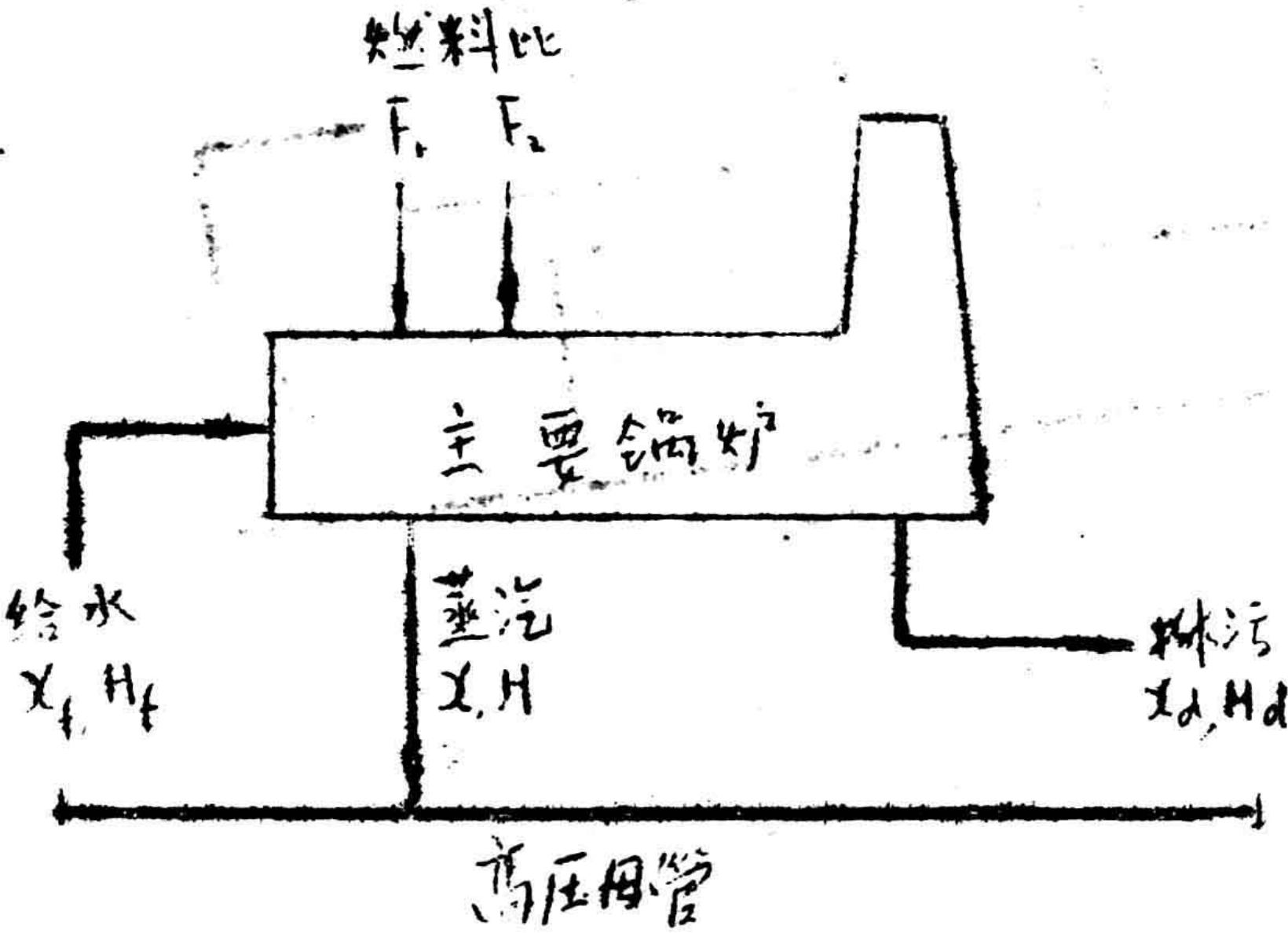


图 2 只有变量输出的有单一目标
的主要锅炉

背 压 透 平

线性化第二个例子。让我们讨论背压透平（与示于 5 页的实例同）。
以矩阵的格式表示的线性规划模型是：

	X_i	X_e	H_i	H_e	RHS
(I)	-1	1			= 0
(II)	$-H_{i0}$	H_{e0}	$-X_{i0}$	X_{e0}	$= X_{e0}H_{e0} - X_{i0}H_{i0} - \frac{D}{Q}$
(III)			Z_1	-1	= Z_2

这里：

$$z_1 = \left(1 - \rho_t \left(\frac{\partial \Delta h_s}{\partial H_i} \right)_p \right) H_i$$

$$z_2 = \rho_t \left[\Delta h_{s0} - \left(\frac{\partial \Delta h_s}{\partial H_i} \right)_p H_{i0} \right]$$

在矩阵数组里的行1是物质平衡；行2是热量平衡；行3是输出热焓 H_o 与输入热焓 H_i 的关联。在右手边 (RHS) 的C是把所需马力转变成的焓 (英热单位/时)。把行3表示为一个方程就变为：

$$\left(1 - \rho_t \left(\frac{\partial \Delta h_s}{\partial H_i} \right)_p \right) H_i - H_o = \rho_t \left[\Delta h_{s0} - \left(\frac{\partial \Delta h_s}{\partial H_i} \right)_p H_{i0} \right] \quad (19)$$

方程 (19) 下面将进一步探讨。令 Δh_s 为等熵焓的变化，这变化是从进口温度和压力状态到排汽压力状态的变化。实际可利用的功比理想可逆过程小。因此，引入一个热力学效率 ρ_t 是需要的。确定如下：

$$\rho_t = \frac{\Delta h_s - \int T ds}{\Delta h_s} = \frac{\Delta h}{\Delta h_s} \quad (20)$$

出口焓由此得出：

$$H_o = H_i - \Delta h = H_i - \rho_t \Delta h_s \quad (21)$$

因为排汽压力不变， Δh_s 的值只取决于进口状态。令 Δh_{s0} 是 Δh_s 最后的线性规划解值。那么，就可以表示 Δh_s 了：

$$\Delta h_s = \Delta h_{s0} + \left(\frac{\partial \Delta h_s}{\partial H_i} \right) (H_i - H_{i0}) \quad (22)$$

$$H_e = H_i - p_t \left[\Delta h_{s0} + \left(\frac{\partial \Delta h_s}{\partial H_i} \right)_p (H_i - H_{i0}) \right] \quad (23)$$

因此方程 (19) 亦可以从方程 (23) 得来。

偏导数 $(\partial \Delta h_s / \partial H_i)$ 可以数值上近似的用最后线性规划的解 H_{i0} 和 Δh_{s0} 表示：

$$\left(\frac{\partial \Delta h_s}{\partial H_i} \right) \approx \frac{\Delta h_{s0} - \Delta h'_{s0}}{H_{i0} - H'_{i0}} \quad (24)$$

取一个小的温度变化计算 $\Delta h'_{s0}$ 和 H'_{i0} 的值 (那是给出 H_{i0} 和 Δh_{s0} 后由线性规划解出的值)，也可以利用蒸汽的热力学相关性计算 H'_{i0} 和 $\Delta h'_{s0}$ 。

置 换 变 量

在这个例子中，我们将用变量置换去掉非线性项。输出只到一个目标——高压蒸汽母管的一台主要锅炉示于图 2。由于输出是一个单一的目标，所以置换是可能的。

该图表示了两种燃料 F_1 和 F_2 ，它的流量用 (磅/时) 表示。对应于每种燃料燃烧的净热量是 ΔH_1 和 ΔH_2 ；锅炉效率是 e_1 和 e_2 。排污率 X_d ，是锅炉给水量 X_f 的不变份额 f 。最后 F_1 有一个上限 K (磅/时) 锅炉给水和蒸汽的物料平衡方程是：

$$X_f - X_d - X = 0 \quad (25)$$

$$f X_f - X_d = 0 \quad (26)$$

热平衡方程必须包括燃料燃烧的热量：

$$H_f \cdot X_f + e_1 \Delta H_1 F_1 + e_2 \Delta H_2 \cdot F_2 - H_x - H_d \cdot X_d = 0 \quad (27)$$