

离心长级联水力学动态数值模拟

李 锦, 曾 实

(清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要: 针对已有的调节方法无法进行离心长级联水力学动态模拟的问题, 提出了一种新的调节方法。该方法从中间供料级出发, 根据机器滞留量和管道额定流量向两端逐级调节阀门, 从而得到离心长级联稳定运行时的水力学状态。50 级和 100 级的数值模拟结果表明, 该方法不受离心机水力学特性参数的限制, 大幅缩短了调节时间, 可以较快得到满足水力学要求的级联设计参数。在级联稳定运行的基础上, 通过改变供料量, 分别研究了在有阀门自动调节作用时水力学扰动在长级联中的传播情况。

关键词: 离心长级联; 水力学; 调节; 动态模拟

中图分类号: TL 25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2009)02-0087-05

Dynamic Numerical Simulation for Hydraulics in the Centrifuge Long Cascade

LI Jin, ZENG Shi

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For the existing adjustment approaches fail in dynamic numerical simulation for hydraulics in the centrifuge long cascade, a novel adjustment method was proposed. The approach adjusts values according to centrifuge holdup and pipe rating flow from feed to withdrawals stage by stage, and then obtains the hydraulics of the centrifuge long cascade in stable running. The 50 and 100 stages simulation results show that the approach can greatly reduce adjustment time and not be constrained by the hydraulic characteristic parameter of centrifuge. Therefore, it can quickly obtain the design parameters of cascade satisfying hydraulic requirement. Based on the stable running of cascade, by changing the feedrate, the hydraulic disturbance diffusions in the long cascade with and without auto-adjustment were investigated respectively.

Key words: centrifuge long cascade; hydraulics; adjustment; dynamic simulation

在实际离心级联运行中, 为了提高同位素产品丰度或生产效率, 对级联的流体状态有一定要

求。级联水力学以流体力学和自动调节理论为基础, 讨论级联设计、生产运行以及调节过程中

有关流体运动问题^[1-2]。目前,离心级联由于自身机器特点和级联结构的原因,水力学方面的研究还很少^[3-6]。在离心级联动力学数值计算方面,通常以工厂中常见的各级流量相等的矩形级联为例,模拟一个离心级联从机器空载到稳定运行的过程,采用从级联一端开始向另一端进行调节的方法,计算量大,调节时间长,能够计算的级联长度有限,最多计算到 30 级。同时,该方法适用的级联还受到离心机水力学参数的限制^[7]。

本工作拟采用文献^[3]中的模型,对级联从机器空载到流体状态稳定的水力学调节方法进行改进,以期将级联的计算长度大幅延长。

1 级联模型

一种典型的矩形离心级联模型示于图 1。由图 1 可以看出,该模型由中间供料,两端取料,各级的轻重组分管道和两端回流管道上安装阀门,其中, N_F 、 N 分别表示级联供料级位置和总级数。

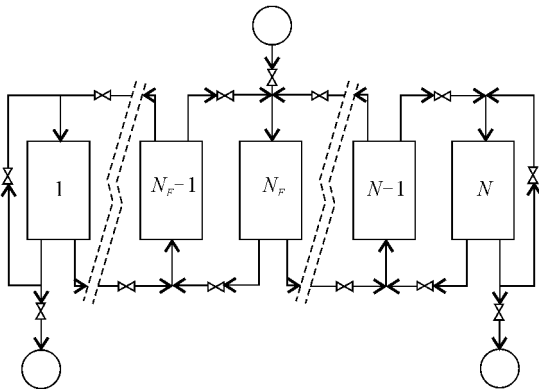


图 1 级联结构示意图

管道的连续性方程和动量方程分别列于公式(1)和(2)。

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{RT}{A} \frac{\partial m}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial m}{\partial x} + A \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2RTfM|m|m}{DPA} = 0 \quad (2)$$

(1)、(2)式中, m 为质量流量; P 为压强; t 为时间; x 为空间长度; A 为管道横截面积; D 为管道直径; f 为管道摩擦系数; R 为普适气体常数; T 为温度; M 为相对分子质量。对于级联其余各组件,如离心机、阀门、管道交汇点和自动调节器等分别如文献^[3]中建立的数学模型,构成级联管网的流体力学全方程组。

2 调整方法

采用从中间供料级出发,向级联两端逐级调节的方法。供料开始时,级联的供料管道阀门置于正常供料的状态,其余各阀门置于完全关闭状态。当供料级的滞留量达到额定值后,供料级轻重组分管道阀门完全打开,与供料级相邻的两级开始充气,同时供料级轻重组分管道的阀门面积根据额定流量进行调节。随后,与供料级相邻两级的滞留量上升至额定值,该级对应的轻重管道阀门打开并以额定流量为目标进行调节。如此逐级调节,直至整个级联的流体状态达到要求。以 16 级的矩形级联为例, $F=2 \text{ g/h}$, $N=6$, $P/F=0.2$ 。水力学调节目标: $G_n=20 \text{ g/h}$, $H_n=10 \text{ mg}$, $\theta_N=0.5(1+P/G_n)$, $n=1,2,3,\dots,N$ 。其中, F 、 P 分别为级联外部供料流量和精取料流量, G_n 、 H_n 分别为流量和机器滞流量, θ_N 为第 N 级分流比, θ 为级联外部分流比。级联启动阶段供料级轻重组分管道阀门面积和滞留量随时间的变化示于图 2,供料级及相邻两级轻重组分管道阀门面积和滞留量随时间的变化分别示于图 3 和图 4。

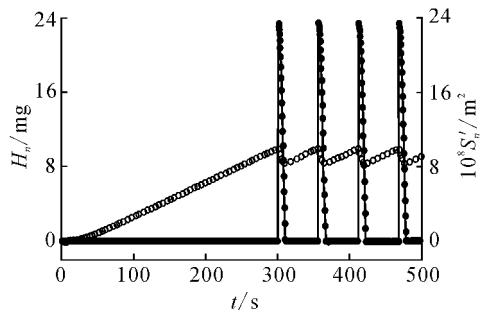


图 2 供料级滞留量和轻重组分管道阀门面积随时间的变化

●— S_n ; ○— H_n

按照这种调节方法,在级联的启动阶段,各管道的流量远小于额定流量,水力学状态的调节主要是按照各级滞留量的大小调节阀门的开启面积,直至级联各级滞留量基本达到额定值,各管道的流量才会逐渐增加到额定大小。

图 2 可以看出:1)级联供料级被充气,当供料级滞留量达到额定值 10 mg 后,该级轻、重组分管道上的阀门完全打开;2)由于流经供料级轻、重组分管道的流量远小于额定流量,在流量调节的作用下,阀门开启面积逐渐减小,直至完

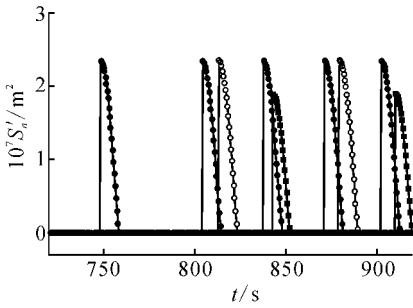


图 3 供料级及相邻两级轻组分管道阀门面积随时间的变化
■—— $n=5$; ●—— $n=6$; ○—— $n=7$

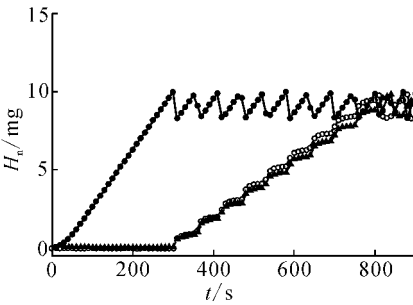


图 4 供料级及相邻两级滞留量随时间的变化
▲—— $n=5$; ●—— $n=6$; ○—— $n=7$

全关闭,供料级滞留量在该过程中随着阀门开启面积的减小也逐渐减小;3)当供料级阀门完全关闭后,供料级滞留量又开始逐步回升,直至再次达到 10 mg,供料级阀门再次完全打开,调节过程回到 2)。

图 3、图 4 中,供料级阀门首次完全开启后,与供料级相邻的两级便开始充气,在供料级阀门开启和关闭的往复循环中,两级的滞留量持续增加。当滞留量达到 10 mg 后,与它们相对应的管道阀门完全打开,随后的调节过程和供料级完全相同。随着调节过程的继续,物料从供料级逐级向级联两端扩散,直到整个级联所有各级滞留量和各管道流量都达到额定值时,各阀门开启面积不再调节,整个级联的流体状态稳定,调节过程完成。

3 长级联水力学数值模拟算例

利用机器滞留量和管道额定流量同时进行调节的方法,可以模拟离心长级联从开始启动到

稳定运行的过程。同时,在稳定运行的基础上通过改变供料量的大小、机器水力学参数和管道阀门因子等方式人为地添加扰动,还可以研究级联的水力学扰动特性。这里给出 2 个长度的离心级联水力学模拟算例,并以供料量的变化为例,讨论扰动在级联中的传播问题。

算例 1。选取长度为 50 级的矩形级联, $F=2 \text{ g/h}$, $N_F=16$, $P/F=0.2$ 。水力学调节目标: $G_n=20 \text{ g/h}$, $H_n=5 \text{ mg}$, $\theta_N=0.5(1+P/G_n)$ 。水力学状态稳定后,级联各级滞留量和流量与额定值误差都约为 10^{-6} ,各级轻组分管道阀门面积和流量示于图 5。

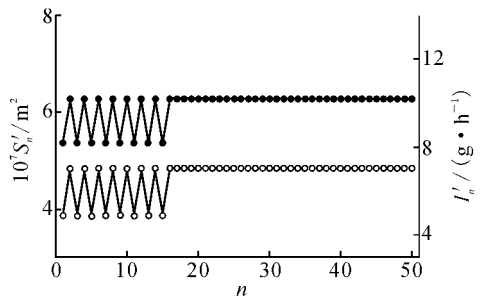


图 5 级联各级轻组分管道阀门面积和流量分布
●—— S_n ; ○—— I_n

在级联稳定运行的基础上,级联供料量减少 5%,持续时间 10 s,研究自动调节情况下,扰动对级联水力学状态的影响。从供料量发生扰动到级联重新稳定过程中各级流量的变化示于图 6。为了便于查看和比较,将不同时刻级联各级的流量分布绘制在同一幅图上,并以等间距的形式隔开。

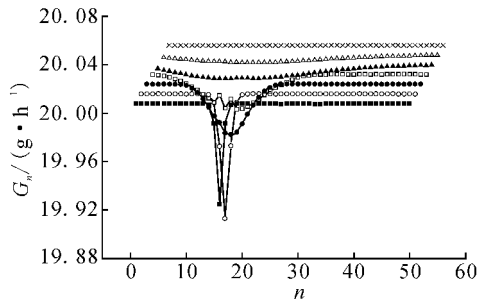


图 6 不同时刻的级联各级流量分布
■——5 s; ○——10 s; ●——50 s;
□——100 s; ▲——500 s;
△——1 000 s; ×——10 000 s

从图 6 可以看出供料扰动在级联中的传播过程。在供料量减少的过程中,供料级的流量迅速减小,并带动相邻级的流量大幅减小,而距离供料级较远的各级流量变化不大。供料量的扰动消失后,供料级流量带动相邻各级流量共同回复,同时,扰动继续向级联的两端传播。从扰动发生后的 500 s 和 1 000 s 两个时刻都可以看出,级联贫化段各级流量下降的幅度大于浓化段的变化,说明由于供料量减小造成的不足气体主要由级联的重取料端补充。这一方面是因为级联总的分流比,使得级联中的不足气体部分大多向贫化段传播;另一方面级联贫化段长度小于浓化段,扰动也可以更快地传至重取料端。在扰动发生后的 10 000 s 时,级联各级流量再次相等,即级联再次恢复至稳定运行状态。

级联两端取料级流量随时间的变化示于图 7。由图 7 可以看出,扰动发生后,轻、重取料级流量迅速下降,随着扰动的消失,两端取料级流量呈上升趋势,直至最后回复到扰动前的状态。同样,由于级联分流比和贫化段长度小于浓化段长度的原因,级联重取料级的流量变化幅度远大于轻取料级的流量变化。

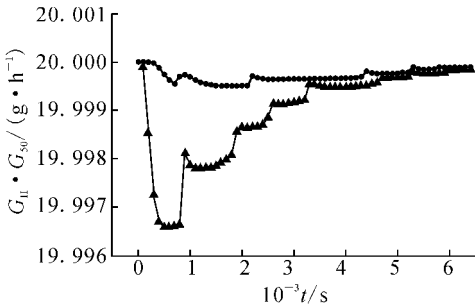


图 7 级联两端取料级流量随时间的变化

■ — $n=1$; ○ — $n=50$

算例 2。选取长度为 100 级的矩形级联, $N_F=50$, $F=3$ g/h, $P/F=0.85$ 。水力学调节目标: $G_n=30$ g/h, $H_n=30$ mg, $\theta_N=0.5(1+P/G_n)$ 。水力学状态稳定后,级联各级滞留量示于图 8。

调整完成后,级联达到预期的流量状态,得到了满足水力学要求的各管道阀门面积。如果将各阀门面积固定为级联稳定运行时的数值,屏蔽掉自动调节的作用,通过改变级联外部供料量,就可以研究阀门不调节情况下扰动对级联水

力学状态的影响以及扰动在级联中的传播。级联供料量增加 50%,持续时间 30 s,级联各级滞留量分布示于图 9。由于级联的长度较大,在供料量发生扰动后 2 000 s 内,流体状态发生变化的各级集中在级联的中间部分,两端各级基本无变化,所以将前 2 000 s 内第 26 至第 75 级滞留量的分布绘制成等间距图像, 2E3s 至 2E5s 级联各级滞留量变化幅度不大,绘制成一般图像,示于图 10。

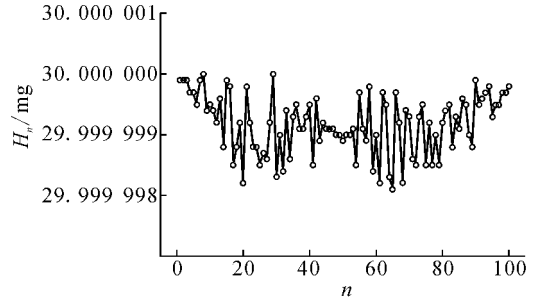


图 8 水力学状态稳定后级联各级滞留量分布

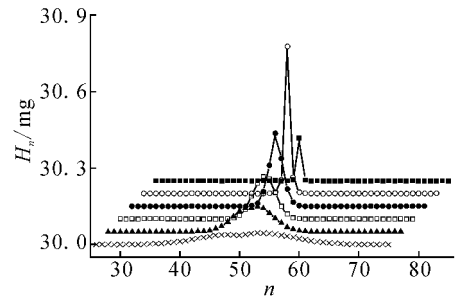


图 9 2 000 s 内的中间各级滞留量分布

■ — 10 s; ○ — 30 s; ● — 100 s;
□ — 200 s; ▲ — 500 s; × — 2 000 s

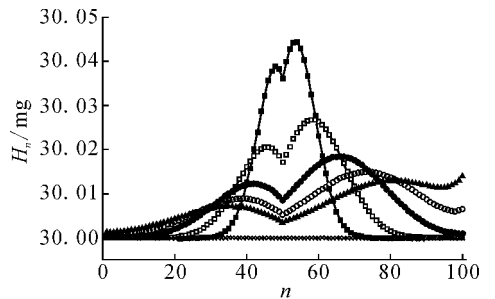


图 10 2E3s 至 2E5s 级联各级滞留量分布

■ — 2.0×10^3 ; □ — 5.0×10^3 ;
● — 1.0×10^4 ; ○ — 1.5×10^4 ;
▲ — 2.0×10^4 ; × — 2.0×10^5

从图 9 可以看出,在供料量增加的 30 s 中,供料级的滞留量迅速增加,并带动相邻级的滞留量大幅增加,级联滞留量的分布形成一个以供料级为中心的尖锐波峰。扰动消失后,供料级滞留量持续增加,随后开始带动相邻各级回复,同时,扰动向级联的两端传播,该过程与算例 1 十分类似。从扰动发生 2 000 s 时的图像可以明显看到,在滞留量持续回复的过程,供料级滞留量已小于其相邻各级的数值,级联滞留量的分布形成了以供料级为分割点,在贫化段和浓化段各形成一个波峰的图像。随着时间的推移,峰点逐渐向级联两端移动。由于本算例中级联分流比,使得供料扰动带来的多余气体主要向级联浓化段传播,因此浓化段波峰明显高于贫化段的峰值。扰动发生 2E5s 后,级联恢复至稳定运行状态。

4 结 论

对级联从机器空载到流体状态稳定的水力学调节方法改进后,级联的计算长度大幅延长。可以计算到 100 级甚至更长的级联。同时,该调节方法不受离心机水力学参数的限制,在调节时间上也大幅缩短。以 16 级矩形级联为例,新的调节方法 2 h 就可以得到级联稳定运行的状态,采用现有的方法计算时间约需要 2 天。

针对离心长级联水力学的动态数值模拟,提出了从中间供料级出发,根据机器滞留量和管道额定流量向两端逐级调节的方法。该方法可以模拟离心长级联从开始启动到稳定运行的过程,大幅提高了级联的调节速度,快速得到满足水力

学要求的级联设计参数,使得离心长级联水力学的数值模拟成为可能。在长级联稳定运行的基础上,进行长级联的水力学扰动特性分析,对将来离心长级联的设计和参数调整具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 郭松涛,吴英禄. 扩散级联水力学[R]. 北京:清华大学,1986.
- [2] Malik MN, Afzal M, Tariq GF. Mathematical modeling and computer simulation of transient flow in centrifuge cascade pipe network with optimizing techniques[J]. Computers & Mathematics With Applications, 1998, 36(4): 63-76.
- [3] Malik MN, Afzal M, Tariq GF. Global solution algorithm with some assisting techniques for modeling of unsteady flow in centrifuge cascade pipe network[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 173(1): 257-269.
- [4] Wood HG, Morton JB. Onsager pancake approximation for the fluid dynamics of a gas centrifuge[J]. Fluid Mech, 1980, 101: 1-31.
- [5] 许平. 离心级联水力学问题的研究[D]. 北京:清华大学,1984.
- [6] Ying Chuntong, Guo Zhixiong, Wood HG. Solution of the diffusion equations in a gas centrifuge for separation of multicomponent mixtures[J]. Sep Sci Technol, 1996, 31(18): 2 455-2 471.
- [7] 傅云清,曾实. 离心级联的流体状态模拟[J]. 清华大学学报:自然科学版,2005, 45(3): 407-411.