

引射器特性的实验研究和理论分析

李雪亮 (山东省电力试验研究所)

杨瑞昌 (清华大学)

摘要 在试验研究的基础上,对引射器的特性进行了分析和研究,进而提出了安装有引射器的回路系统流动特性计算方法,具有较大的应用价值。

关键词 引射器 流动特性 试验研究 理论分析

分类号 TK223.5

1 试验研究

引射器在电力、石油化工和供热工程等诸多方面有着广泛的用途,因此对引射器的特性进行研究,无论对其设计还是应用,都有十分重要的实用意义。本次实验的系统如图 1 所示,系统主要由引射器、加热段、冷却器、屏蔽泵、阀和管路等组成;为了保证实验的顺利进行,该实验系统又与清华大学热能工程系的两相流主实验台相联。工作流体(又称引射流体)从 8 点流向 1 点,被引射流体从 9 点流向 1 点,两路流体在引射器的接受室内相混合。引射器结构如图 2,它主要有喷嘴、接受室、混合段、扩压段四个部分组成,工作流体以很高的速度从喷嘴喷出,由于速度增大,流体进入接受室后静压下降,将被引射路的流体引入到接受室,两者在混合段混合后,再经扩压段减速增压流出引射器。

在进行引射器特性试验时,不断改变工作流体的流量 W_1 ,同时测量:工作流体流量 W_1 、被引射流体的流量 W_2 、工作流体压降 DP_1 和被引射流体压力升高 DP_2 。试验数据见表 1,图 3 图 4 图 5 分别表示:被引射流体的流量 W_2 、工作流体的压降 DP_1 、被引射流体的压力升高 DP_2 与工作流体流量 W_1 的关系。

2 引射器特性计算

如图 6,对引射器的工作特性,可写出如下方

程:

2.1 质量守恒方程:

$$W_g = W_o + W_h$$

$$u = W_h / W_o$$

$$W_g = (1 + u)W_o \quad (1)$$

式中: W_o 、 W_h 、 W_g 分别为工作流体、被引射流体、混合流体的质量流速 (kg/s); u 为引射器的引射系数。

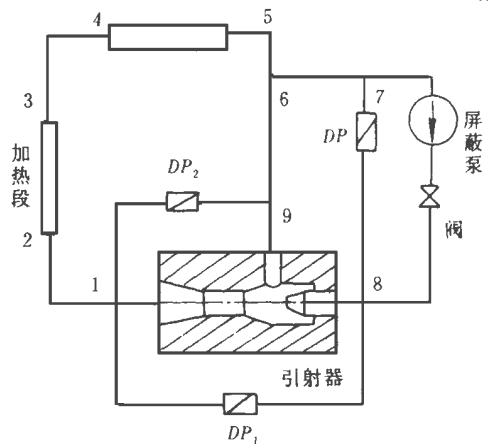


图 1 实验系统简图

2.2 动量守恒方程:

对 2-2 及 3-3 截面应用动量守恒方程有:

$$h_2(w_o u_p + w_h u_2) - (w_o + w_h)u_3 = (p_3 - p_2)f_3$$

$$h_2(u_p + uu_2) - (1 + u)u_3 = \frac{(p_3 - p_2)}{w_o} f_3 \quad (2)$$

各式中; f_p 为喷嘴出口截面积 (m^2)

f_2 为被引射流体在混合室入口截面上所占的面积 (m^2)

其中: $u_p = \frac{w_0 u_p}{f_p}$, $u_2 = \frac{u w_0 v_h}{f_2}$, $u_3 = \frac{(h u) w_0 v_g}{f_3}$
 当 $f_3 / f_p \geq 4$ 时, 有 $f_2 = f_3 - f_p$

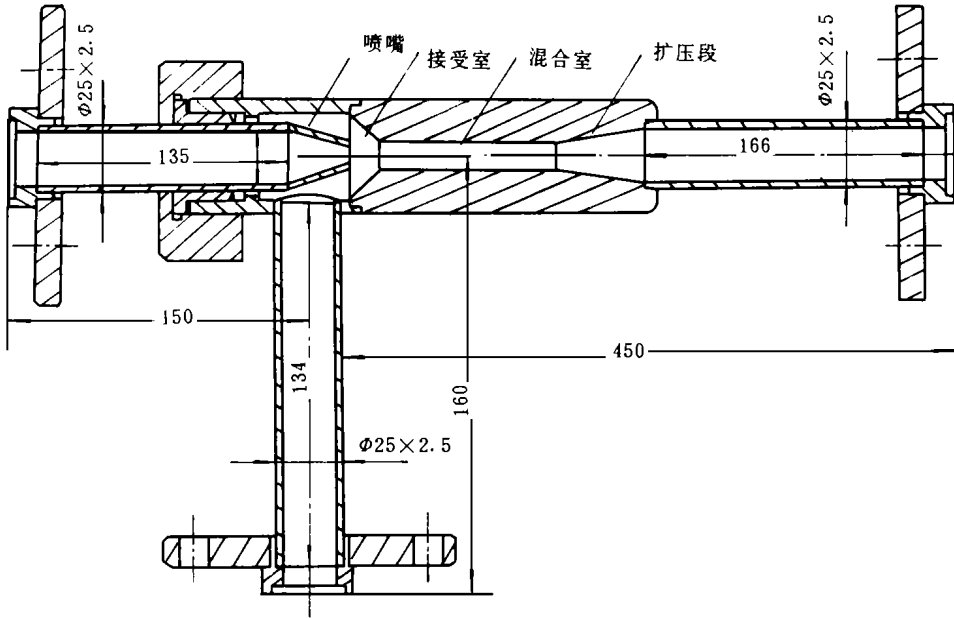


图 2 引射器结构图

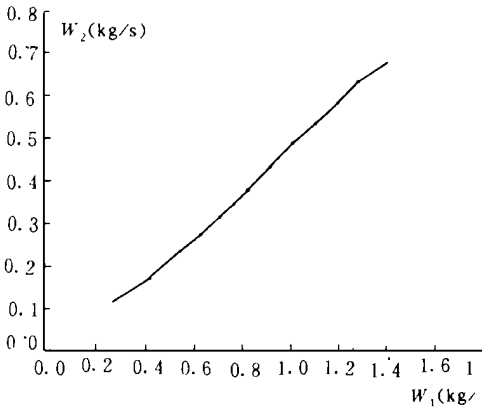


图 3 被引射流量与引射流量的关系

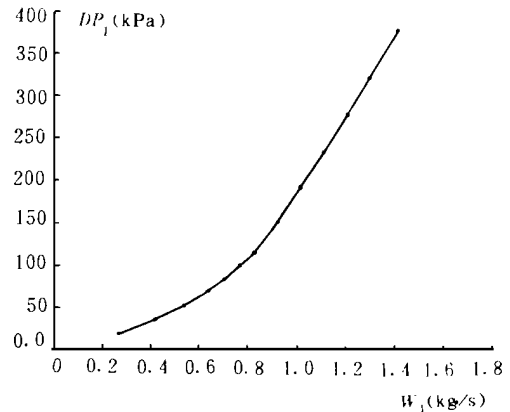


图 4 工作流体压降与引射流量的关系

v_p, v_h, v_g 分别为工作流体、被引射流体、混合流体的比容 (m^3/kg)

u_p 为 2-2 截面工作流体的流速 (m/s)

u_2 为 2-2 截面被引射流体的流速 (m/s)

u_3 为 3-3 截面混合流体的流速 (m/s)

p_2, p_3 分别为 2-2 截面、3-3 截面上流体的压力 (Pa)

h_2 为混合室的速度系数

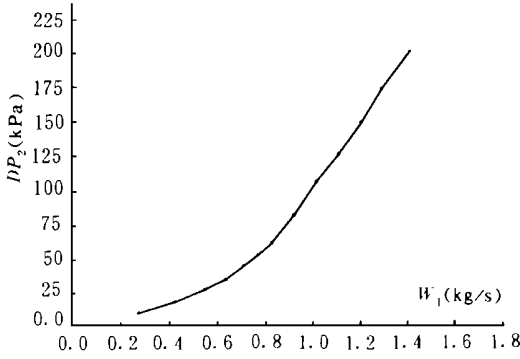


图 5 被引射流体压升与引射流量的关系

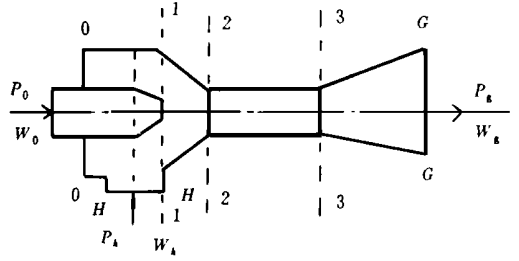


图 6 引射器计算用图

2.3 喷嘴工作方程:

$$w_0 = h_1 f_p \cdot \frac{\overline{(\rho_0 - \rho_h)}}{v_p} = h_1 f_p \cdot \frac{\Delta p_p}{u_p} \quad (3)$$

$$p_2 = p_h - \frac{\left(\frac{u_2}{h_1}\right)^2}{2v_h} \quad (4)$$

$$p_3 = p_g - \frac{(h_3 u_3)^2}{2v_g} \quad (5)$$

上面各式中: $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_4$ 分别为喷嘴、扩压段、混合室入段的速度系数

p_0 为工作流体进喷嘴时的压力 (Pa)

p_h 为被引射流体被引射时的压力 (Pa)

p_g 为引射器出口混合流体的压力 (Pa)

由式 (3) 推得喷嘴工作方程如下:

$$\Delta p_p = \frac{w_0^2}{2h_1^2 f_p^2} \cdot v_p \quad (6)$$

将式 (4)、(5) 代入 (2) 并整理得引射压降方程:

$$\Delta p_g = p_g - p_h = w_0^2 \left\{ \left[h_2 \left(\frac{v_p}{f_3 f_p} + \frac{u_2 v_h}{f_2 f_3} \right) - \frac{(1+u)^2 v_g}{f_3^2} \right] - \left[\frac{u^2 v_h}{2f_2^2 f_3^2} - \frac{(1+u)^2 h_3^2 v_g}{2f_3^2} \right] \right\} \quad (7)$$

由式 (6)、(7) 得引射器特性方程:

$$\frac{\Delta p_g}{\Delta p_p} = h_1^2 \frac{f_p}{f_3} \left[2h_2 + \left(2h_2 - \frac{1}{h_3} \frac{f_3}{f_2} \right) \frac{v_h}{v_p} \times \left[\frac{f_p}{f_2} u^2 - (2 - h_3^2) \frac{v_g}{v_p} \frac{f_p}{f_3} (1+u)^2 \right] \right] \quad (8)$$

当 $v_p = v_h = v_g = \frac{1}{\rho}$ 时, 式 (6)、(7)、(8) 简化为:

喷嘴工作方程:

$$\Delta p_p = p_0 - p_h = \frac{w_0^2}{2df_p^2 h_1^2} \quad (9)$$

引射压降方程:

$$\Delta p_g = p_g - p_h = k_0^2 \left\{ \left[h_2 \left(\frac{1}{df_3 f_p} + \frac{u^2}{df_2 f_3} \right) \right. \right.$$

$$\left. - \frac{(1+u)^2}{df_3^2} \right] - \left[\frac{u^2}{2h_3^2 df_2^2} - \frac{h_3^2 (1+u)^2}{2df_3^2} \right] \} \quad (10)$$

引射器特性方程:

$$\frac{\Delta p_g}{\Delta p_p} = \frac{p_g - p_h}{p_0 - p_h} = h_1^2 \frac{f_p}{f_3} \left[2h_2 + \left(2h_2 - \frac{f_3}{h_3 f_2} \right) \times \left[\frac{f_p}{f_2} u^2 - (2 - h_3^2) \frac{f_p}{f_3} (1+u)^2 \right] \right] \quad (11)$$

进行计算时, 各速度系数分别取值: $h_1 = 0.95, h_2 = 0.975, h_3 = 0.9, h_4 = 0.925, f_2, f_3, f_p$ 由引射器的结构参数求得。这样对任一给定的 w_0 或 u , 就可以算出相应的 Δp_p 和 Δp_g , 计算值与试验值的比较见表 1 可以看出二者相当吻合, 误差很小, 说明上述关于引射器的分析方法是正确的。

3 安装有引射器的回路流动特性计算方法

对于安装有引射器的系统, 提出进行其流动特性的计算方法, 具有非常重要的工程应用意义; 参见图 1, 在公共点 6 和 9 点 (9 点为引射器喷嘴出口截面) 之间有三个回路, 亦即引射支路 (6789)、被引射支路 (69) 和大支路 (916)。 w_8, w_1 分别为引射支路和被引射支路的流量, 对这三个支路分别写出其公共点 6-9 之间的压差方程:

3.1 引射支路 (泵路):

$$p_6 - p_7 = k_{67} \frac{w_8^2}{2df^2} \quad (12)$$

$$p_7 - p_8 = -dgh - Dp \quad (13)$$

$$p_8 - p_9 = \frac{w_8^2}{2df_p^2 h_1^2} \quad (14)$$

其中: Dp 为泵有效压头, 即循环泵的压头扣除 7-8 点之间的流阻后的压头

f 为泵路的截面积

由式 (12) (13) (14) 得:

$$(p_6 - p_9)_p = k_{67} \frac{w_0^2}{2df^2} + \frac{w_0^2}{2df_p^2} - dgh - Dp \quad (15)$$

3. 2 被引射支路:

$$p_6 + \frac{w_h^2}{2df^2} + dgh = p_9 + \frac{w_h^2}{2d(f_9 - f_p)^2} + k_{69} \frac{w_h^2}{2df^2} \quad (16)$$

推得

$$(p_6 - p_9)_N = \frac{w_h^2}{2d(f_9 - f_p)^2} + k_{69} \frac{w_h^2}{2df^2} - \frac{w_h^2}{2df^2} - dgh \quad (17)$$

式中: $k_{69} = \sum (\alpha \lambda \frac{L}{d})_{69}$;

$f_9 - f_p$ 为喷嘴出口处引射器截面积与喷嘴出口截面积之差。

3. 3 大支路 (加热支路):

$$p_1 - p_9 = \Delta p_g \quad (18)$$

$$p_1 + \frac{(w_0 + w_h)^2}{2df^2} = p_6 + dgh + \frac{(w_0 + w_h)^2}{2df^2} + k_{16} \frac{(w_0 + w_h)^2}{2df^2} \quad (19)$$

推得:

$$(p_6 - p_9)_J = \Delta p_g - dgh - k_{16} \frac{(w_0 + w_h)^2}{2df^2} \quad (20)$$

式中 $k_{16} = \sum (\alpha \lambda \frac{L}{d})_{16}$;

由式 (17)、(20) 得:

$$\Delta p_g = w_0^2 \left[\frac{u^2}{2p(f_9 - f_p)^2} + k_{69} \frac{u^2}{2df^2} + k_{16} \left(\frac{1+u}{2df^2} - \frac{u^2}{2df^2} \right) \right] \quad (21)$$

结合式 (10), 得下列方程:

$$Au^2 + Bu + C = 0 \quad (22)$$

式中:

$$A = \frac{1}{2d(f_9 - f_p)^2} + \frac{k_{69}}{2df^2} + \frac{k_{16}}{2df^2} + \frac{1}{df_3^2} - \frac{h_2}{df_2 f_3} - \frac{h_3}{2df_3^2} - \frac{1}{2df^2}$$

$$B = \frac{2}{df_3^2} + \frac{k_{16}}{df^2} - \frac{C_3}{df_3^2}$$

$$C = \frac{1}{df_3^2} + \frac{1}{2hp f_2^2} + \frac{k_{16}}{2df^2} - \frac{h_2}{dh_3 f_p} - \frac{h_3}{2df_3^2}$$

对于给定的回路系统, 当流动进入自模化区后, 阻力特性参数 k_{67} , k_{69} , k_{16} 就成为常数, 不再变化; 经计算求得: $k_{67} = 1.5$, $k_{69} = 7.5$, $k_{16} = 13.5$; 这样

任意给定一工作流体的流量, 解方程 (22) 就可求出相应的被引射流体的流量, 然后把已知参数代入式 (15), 就可求得泵的有效压头 DP 。采用此法计算值与实验值的比较见表 1

表 1 实验结果与计算结果

压力 <i>P</i>	实验值 (计算值)				
	<i>W</i> ₁	<i>W</i> ₂	<i>DP</i> ₁	<i>DP</i> ₂	<i>DP</i>
(MPa)	(kg/s)	(kg/s)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
1. 87	0. 271	0. 119	19. 1	10. 1	29. 3
		(0. 123)	(13. 6)	(7. 20)	(20. 7)
1. 87	0. 420	0. 175	36. 4	18. 7	55. 8
		(0. 192)	(32. 2)	(18. 0)	(50. 1)
1. 89	0. 540	0. 238	53. 1	28. 1	83. 5
		(0. 248)	(54. 0)	(29. 1)	(83. 5)
1. 91	0. 631	0. 278	69. 1	35. 9	108. 3
		(0. 288)	(74. 1)	(39. 3)	(113. 1)
1. 93	0. 707	0. 317	85. 8	45. 3	132. 4
		(0. 323)	(93. 6)	(48. 7)	(142. 0)
1. 95	0. 768	0. 347	101. 6	53. 4	156. 6
		(0. 351)	(110. 2)	(57. 2)	(167. 6)
1. 97	0. 826	0. 378	117. 9	62. 2	185. 0
		(0. 377)	(128. 3)	(65. 7)	(193. 6)
2. 00	0. 920	0. 433	154. 1	82. 2	241. 4
		(0. 420)	(161. 3)	(79. 7)	(240. 6)
2. 04	1. 015	0. 487	196. 6	106. 1	307. 3
		(0. 464)	(197. 3)	(95. 7)	(292. 7)
2. 06	1. 109	0. 531	235. 7	125. 8	366. 3
		(0. 507)	(235. 6)	(114. 4)	(349. 5)
2. 09	1. 206	0. 580	280. 5	148. 5	436. 9
		(0. 551)	(279. 1)	(134. 8)	(413. 3)
2. 11	1. 294	0. 631	323. 2	172. 9	503. 0
		(0. 591)	(323. 5)	(153. 5)	(475. 6)
2. 12	1. 416	0. 678	379. 0	200. 4	582. 3
		(0. 647)	(384. 2)	(186.)	(569. 8)

可以看出, 二者符合得很好, 因此上面提出的分析计算方法是正确可行的, 可以加以推广应用。

4 结论

本文在试验研究的基础上, 对引射器的特性进行了分析和研究, 进而提出安装有引射器的回路的流动特性计算方法。理论计算结果与试验数据吻合最好, 说明本文提出的计算方法可作为实际安装有

引射器的回路的流动特性计算之用。

数值模拟. 清华大学硕士论文, 1992

2 索科洛夫著, 董秋云译. 喷射器. 科学出版社, 1977.

参考文献

(李乡复 编辑)

1 李雪亮. 强制循环到自然循环过渡特性的实验研究与

作者简介 李雪亮, 男, 1965 年生于山东莘县, 1984 年考入清华大学热能工程系, 1989 年毕业于, 同年被免试推荐为清华大学热能工程系研究生, 主攻多相流和传热, 1992 年 3 月硕士毕业, 1992 年 4 月到山东省电力试验研究所 (现已改名为: 山东电力科学研究院) 锅炉室工作, 在《中国电力》等多种学术杂志和期刊上发表论文 10 余篇, 并在“中国动力工程学会第一届青年学术年会”和“中国电机工程学会第四届青年学术会议”上发表和宣读论文。通信地址: (250021) 济南市经四纬十路 183 号 山东电力科学研究院锅炉室

联合循环效率的预测

据“Modern Power Systems”1997 年 4 月号报道, 商业运行燃气轮机联合循环 (GTCC) 电站的最高热效率已达到 53%, 在今后 4 年内可望提高到 60%。

联合循环电站 (CCPP) 效率的进一步进展可通过对燃气轮机和 或 CCPP 设计的下述 3 个方面设计构思的工程分析来估计: (1) 硬件设计—燃气轮机采用成熟的航空改装技术, 如定向凝固和 或单晶叶片或先进的陶瓷材料。闭路蒸汽冷却尤其在美国受到欢迎, 可使燃烧温度超过 1400°C, 并达到 1 位数的 NO_x 排放; (2) 先进的燃气轮机结构——如 ABB GT24 和 GT26 中使用的顺序燃烧系统, 无须显著增加燃烧温度就可使联合循环效率达到 58%。另一个先进结构是中间冷却航改型 (ICAD) 联合循环; (3) 先进的循环——包括 3 级联合循环系统, 例如, 高效增压燃料电池用作上部前置循环。其它先进的循环将包括新的底部循环, 如 Kalina 循环。

随着诸如 ICAD Kalina 循环、先进燃料电池等新技术在联合循环电站中出现, 并随着现有各型常规联合循环过程的改进, 在今后 10 年内联合循环效率最高可望达到 70%。

(思娟 供稿)

新技术

等离子气化过程

“Энергетик” 1996 年 9 月号报导了褐煤等离子气化装置的构造和系统。紧凑的相容式等离子反应器结构允许以少的电力和材料消耗实现劣质煤的气化。

煤气色谱分析证实得到的合成煤气具有高的发热值。制定了对取决于反应物组成的气化效率进行比较研究的方法

(思娟 供稿)

Air Preheaters in Utility Boilers [刊,中] / Yan Weiping, Shan Wei, Jiang Ping (Northeast Electric Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 416~ 418

An investigation and study of the operation of heat pipe air preheaters in some utility boilers and the thermodynamic calculation results of various schemes involving the replacement of a low-temperature pipe air preheater by a heat pipe preheater for a 200 MW coal-fired boiler have shown that the installation of a heat pipe air preheater for a drastic reduction of exhaust gas temperature is very irrational from technical and economic viewpoints. This paper also presents methods for justifying the adoption of various modification decisions. **Key words** boiler, heat pipe type air preheater, economic analysis

引射器特性的实验研究和理论分析 = Experimental Study and Theoretical Analysis of an Ejector Behavior [刊,中] / Li Xueliang, Yang Ruichang (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 419~ 423

On the basis of an experimental study the behavior of an ejector is analysed and studied. Furthermore, the calculation method of flow characteristics for an ejector-mounted circuit system is given, which has practical value in engineering applications. **Key words** ejector, hydrodynamic characteristics, experimental study, theoretical analysis

炉内喷钙脱硫实验研究 = Experimental Study of Limestone Desulphurization in Pulverized Coal-fired Boilers [刊,中] / Yao Hong, Zhou Jianping, et al (Central China University of Science and Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 424~ 428

The influencing factors of SO₂ and NO_x emissions are discussed under the conditions of limestone desulphurization in pulverized coal-fired boilers. The test results show that the SO₂ and NO_x emissions are heavily dependent on such factors as furnace temperature, Ca/S, sorbent particle size, coal type, excess air coefficient, etc. Also studied in this paper is the effect of various types of coal under different Ca/S ratios on slagging, fouling, ash load, fly ash carbon content and specific electrical resistance. **Key words** desulphurization ratio, slagging, fouling, Ca/S ratio, electrical precipitator

S1A-02燃气轮机箱装体隔声设计与试验研究 = The Acoustic Design and Experimental Study of a S1A-02 Gas Turbine Package [刊,中] / Wang Xu, Tian Yuchun, Liu Jiancheng (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 429~ 433

Based on the analysis of S1A-02 gas turbine noise and frequency spectra the authors have provided the related acoustic design parameters for the S1A-02 gas turbine package. The operation test has shown that the said package features a good sound-isolation performance, which approaches the world advanced level of sound-proof quality of gas turbine packages. **Key words** gas turbine, package, noise, frequency spectrum

核蒸汽轮机系统数模混合实时仿真 = The Hybrid Real-time Simulation of a Nuclear Steam Turbine System [刊,中] / Yu Mingyi, Huang Shanheng, Weng Shilie (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 1997, 12(6): 434~ 437

This paper describes a mathematical model and a hybrid digital/analog real-time simulation model for the analysis of a nuclear submarine plant steam turbine system. With the effect of moisture separator volume inertia and thermal inertia on the system being taken into account a real-time simulation of the dynamic behavior of nuclear steam turbine system was conducted on a Dornier 960 hybrid simulation system. **Key words** nuclear