

文章编号: 1000-5862(2020)04-0331-04

# 真空系统抽气过程的计算方法研究

黄思<sup>1</sup>, 郭嘉炜<sup>1</sup>, 易天坤<sup>1</sup>, 李松峰<sup>2</sup>, 吴泰忠<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641; 2. 广东肯富来泵业股份有限公司, 广东 佛山 528131)

**摘要:** 有关抽真空系统的计算方法一般采用简单的理论模型, 其结果与实际情况有较大偏差. 该文以中低真空系统(包括真空室、管道和真空泵)为研究对象, 基于真空泵的抽气速率与吸入压力的特性关系, 根据管路流动状态选取层流或湍流模型, 提出一种新的抽真空时间计算方法. 选取某实测的真空系统作为案例, 采用新计算方法和传统的层流算法对该系统抽真空过程分别进行了计算, 发现在中高压阶段, 管道流动处于湍流状态并使阻力增大, 若不考虑湍流影响, 则所得到的压力下降过快与实际情况有较大偏差. 该文所提出的计算方法得到了实测结果的验证, 从而是一种切实可行的抽真空时间计算方法.

**关键词:** 真空泵; 真空系统; 抽气过程; 计算方法

中图分类号: O 211.67 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2020.04.01

## 0 引言

真空系统主要由真空泵、真空室、管道、阀门和程序控制等部件组成, 它广泛应用于化工、电子、医疗及航天等技术领域<sup>[1-5]</sup>, 其中真空泵的抽气速率  $S_p$  与吸入压力  $P_0$  的特性关系是决定真空系统性能的主要因素<sup>[6-7]</sup>. 近年来国内外学者相继开展了有关抽真空系统方面的研究. 周强等<sup>[8]</sup>采用数学建模对压缩机的性能进行了理论验算, 通过模拟试验验证了新试验工艺的效果; 许海虹<sup>[9]</sup>开发了真空泵恒速抽气的计算程序, 得到了真空循环脱气工艺中特定真空度的抽气时间; Ma Pingchang 等<sup>[10]</sup>在特定马赫数下, 以计算流体力学方法对高空环境仿真系统进行了模拟计算; 隋吉秋<sup>[11]</sup>采用层流模型对某空间环境模拟器的抽气过程进行了研究, 计算得到了模拟器内压力与抽气时间的关系.

综上所述, 有关抽真空系统的计算方法相对较少或一般采用简单的理论模型, 其结果与实际情况有较大偏差. 因此, 本文基于真空泵抽气速率  $S_p$  与吸入压力  $P_0$  的特性关系, 根据管路流动状态选取层流或湍流模型, 提出一种快捷有效的计算方法, 为抽真空系统的方案设计和工程应用提供理论依据.

## 1 计算方法

### 1.1 系统抽气理论模型

如图1所示, 研究对象为一中低真空系统, 该系统可简化为由真空室、抽气主管道和真空泵机组所组成<sup>[12]</sup>. 理论计算作出如下假设: 1) 流体介质视为理想气体, 抽气过程近似为等温过程; 2) 气体是具有连续介质性质的牛顿流体.

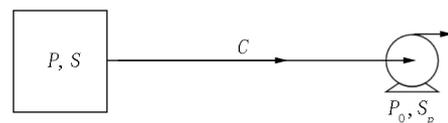


图1 简化的真空系统模型

真空室内的气体变化满足连续方程<sup>[13-14]</sup>:

$$Q = Q_0 - Q_l = -V_0 dP/dt, \quad (1)$$

其中  $Q$  为真空室的气体净流量 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_0$  为真空泵抽气量 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $Q_l$  为真空室漏气量 ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $P$  为真空室内压力 ( $\text{Pa}$ );  $V_0$  为真空室容积 ( $\text{m}^3$ ).

对抽气管道, 有

$$Q_0 = S_p P_0 = SP = C(P - P_0), \quad (2)$$

其中  $P_0$  为真空泵吸入压力 ( $\text{Pa}$ );  $S_p$  为真空泵入口抽速 ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ );  $S$  为管道进口端的有效抽速 ( $\text{m}^3 \cdot$

收稿日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(21776095)资助项目.

作者简介: 黄思(1962-), 男, 广西南宁人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程的研究. E-mail: huangsi@scut.edu.cn

$s^{-1}$ );  $C$  为管道流导 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), 它表征了单位压差下管道的流量大小, 与管道的阻力成反比. (2) 式可改写为

$$Q_0 = S_p CP / (S_p + C). \quad (3)$$

真空室漏气量一般按环境条件给定:

$$Q_l = S_l P_a = S_m P_a / \rho_a, \quad (4)$$

其中  $P_a$  为当地大气绝对压力 (Pa);  $S_l$  为真空室漏气体积流率 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $S_m$  为真空室漏气质量流率 ( $kg \cdot s^{-1}$ );  $\rho_a$  为大气压力对应密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ ). 将 (1) ~ (4) 式联立得到真空系统的抽气方程:

$$V_0 dP/dt = S_m P_a / \rho_a - S_p CP / (S_p + C). \quad (5)$$

### 1.2 管道的流导方程

管道中的流动状态需要根据雷诺数  $Re$  大小判断, 当  $Re < 2000$  时为层流, 否则为湍流.  $Re$  的表达式<sup>[14]</sup>为

$$Re = Du \bar{\rho} / \mu, \quad (6)$$

其中  $\bar{\rho}$  为在管道中气体平均密度 ( $kg \cdot m^{-3}$ );  $D$  为管道直径 (m);  $u$  为管道中气体平均流速 ( $m \cdot s^{-1}$ );  $\mu$  为气体动力粘度 ( $Pa \cdot s$ ).

在等温状态下的理想气体<sup>[14]</sup>满足

$$P_a / \rho_a = \bar{p} / \bar{\rho}, \quad (7)$$

其中  $\bar{p}$  为管道中气体平均压力 (Pa)  $\bar{p} = (P + P_0) / 2$ .

联立 (6) ~ (7) 式, 管内气体的平均流速  $u$  由泵的抽速  $S_p$  近似得到, 因此有

$$Re = Du \bar{p} \rho_a / (\mu P_a) = 4 S_p \bar{p} \rho_a / (\pi D \mu P_a). \quad (8)$$

对于均匀圆截面管道, 两端的压差可用范宁公式<sup>[14]</sup>表示

$$P - P_0 = \lambda L \bar{\rho} u^2 / (2D), \quad (9)$$

其中  $L$  为管道总长;  $\lambda$  为与流动状态有关的阻力系数, 且

$$\lambda = \begin{cases} 64/Re, & \text{层流,} \\ 0.3164/Re^{0.25}, & \text{湍流.} \end{cases} \quad (10)$$

因此, 由 (8) ~ (10) 式可得管道的气体流量为

$$Q_0 = \bar{p} u A = \begin{cases} a \bar{p} (P - P_0), & Re < 2000, \\ b \bar{p}^{-5/16} (P - P_0)^{4/7}, & Re \geq 2000, \end{cases} \quad (11)$$

其中  $A$  为圆形管道横截面积 ( $m^2$ )  $A = \pi D^2 / 4$ ;  $a = \pi D^4 / (128 \mu L)$   $b = 2.2526 D^{19/7} P_a^{3/7} \mu^{-1/7} L^{-4/7} \rho_a^{-3/7}$ .

联立 (3) 式和 (11) 式得

$$C = \begin{cases} a \bar{p}, & Re < 2000, \\ b \bar{p}^{-5/16} (P - P_0)^{-3/7}, & Re \geq 2000. \end{cases} \quad (12)$$

## 2 计算方法的应用

为求解方程 (5), 可认为当时间步长  $\Delta t$  足够小时泵机组抽速  $S_p$  近似不变,  $\Delta P$  与  $\Delta t$  呈线性关系, (5) 式改写为

$$\Delta t_i = -V_0 \Delta P (S_{pi} + C_i) / (S_{pi} C_i P_i), \quad (13)$$

其中  $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$  为某时间段步长 (s);  $\Delta P = P_i - P_{i-1}$  为在对应时间段内的真空室出口压力变化值 (Pa);  $S_{pi}$  为在对应时间段内泵入口抽速 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $\bar{p}_i$  为在对应时间段开始时管道平均压力  $\bar{p}_i = (P_i + P_{0i}) / 2$  (Pa);  $P_{0i}$  为对应时间段的泵吸入压力 (Pa);  $C_i$  为对应时间段的管道流导 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ).

具体计算方法为: 将从起始压力  $P_0$  到结束压力  $P_e$  分割为  $n$  段, 给定初值  $P_0 = P_{01}$  和  $\Delta P_1 = P_1 - P_0$ , 求得  $\bar{p}_1$ , 根据  $P_{01}$  利用真空泵的  $S_p - P_0$  特性曲线查得  $S_{p1}$  后计算雷诺数  $Re_1$  和  $C_1$ , 由 (12) 式得到对应的时间段  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$   $t_0 = 0$ ; 再令  $P_{02} = (P_1 + P_{01}) / 2$ , 由此进行叠加计算, 最终得到抽气的总时间  $\sum_{i=1}^n \Delta t_i$ .

选取文献 [11] 的测试系统作为计算案例: 真空室容积  $V_0 = 740 m^3$ , 主管道总长  $L = 9 m$ , 直径  $D = 0.32 m$ . 真空室内介质为  $20^\circ C$  空气,  $\mu = 1.820 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ ,  $\rho_a = 1.205 kg \cdot m^{-3}$ , 泄漏量  $S_m = 0 kg \cdot s^{-1}$ , 初始压力  $P_0 = P_{01} = 101325 Pa$ , 计算结束压力  $P_e = 10 Pa$ ; 主管道的另一端并联了 4 台相同的真空泵, 等效抽速为 4 台泵叠加<sup>[15]</sup>, 单台真空泵实际运行的  $S_p - P_0$  特性曲线如图 2 所示.

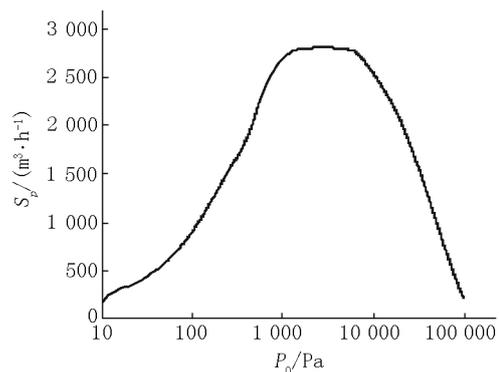


图2 单台真空泵实际运行的  $S_p - P_0$  特性曲线  
为便于计算, 将图 2 中的实际特性曲线拟合得到如下  $S_p - P_0$  关系式:

$$S_p = \begin{cases} -170348.07e^{-P_0/1.36} - 1961.72e^{-P_0/212.56} + 2127.71, & P_0 < 384, \\ -3793.80e^{-P_0/289.70} + 2810.98, & 384 \leq P_0 < 6218, \\ 3434.75e^{-P_0/48136.69} - 218.53, & P_0 \geq 6218. \end{cases} \quad (14)$$

整个计算流程如图 3 所示,由此编写程序进行数值计算,在计算中取  $\Delta P_i = 1.0 \text{ Pa}$ .

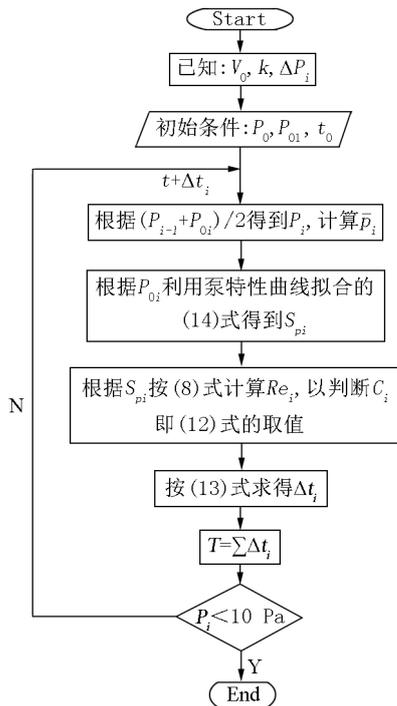


图 3 计算流程图

### 3 计算结果分析和验证

图 4 给出了理论计算和文献 [11] 实测结果的对比情况,其中 2 条曲线分别是按常规的层流算法和本文考虑湍流的算法得到的结果.由图 4 可见,湍流对抽气时间的计算结果影响较为显著.在中高压阶段,按层流计算得到的  $P-t$  曲线下降过快,而考虑湍流计算得到的  $P-t$  曲线下降相对缓慢;在低压阶段,考虑湍流的  $P-t$  曲线下降趋势与层流的趋势基本接近.

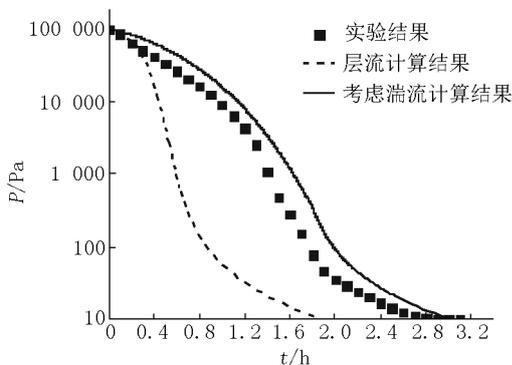


图 4 理论计算与实测结果对比

在图 4 中考虑湍流的  $P-t$  计算曲线和实测曲线趋势较为一致,都是在  $P = 500 \text{ Pa}$  前压降较快,到  $P = 500 \text{ Pa}$  为拐点直到最后压降逐渐减慢.2 者到达

真空室压力  $P = 10 \text{ Pa}$  的结束时间分别是  $t = 3.03 \text{ h}$  ( $10\,913 \text{ s}$ ) 和  $t = 3.19 \text{ h}$  ( $11\,484 \text{ s}$ ),相对误差为  $-4.97\%$ ,可见考虑湍流的算法明显优于仅考虑层流的算法.当真空度逐渐增大时,系统中漏气放气的现象也相应增多,在接近  $P = 10 \text{ Pa}$  时实测的压降较为缓慢,这是实测结果与理论计算产生偏差的主要原因.此外,由图 4 中考虑湍流的计算曲线可见,在相同的真空泵抽速  $S_p$  下,高压段即使受到湍流的影响,也比低压段有较快的压降速度.低压段的抽气时间对于抽速变化较为敏感,因此应注意提高真空泵在低压段的抽气速度以提高抽气效率.图 5 是整个抽气过程中按 (9) 式计算得到的  $Re-t$  关系曲线.由图 5 可见,在中高压阶段管道的  $Re$  较高,流动处于湍流状态.湍流使管道阻力增大,  $P-t$  曲线下降放缓.当  $t > 1.79 \text{ h}$  ( $6\,450 \text{ s}$ ) 时,即真空室压力  $P < 384 \text{ Pa}$ ,管内气体密度相应减小,管内气流由湍流转变为层流 ( $Re < 2\,000$ ).换句话说,整个抽气过程中管内气流至少有 50% 的时间处于湍流状态,因此在计算中不应忽略湍流的影响.

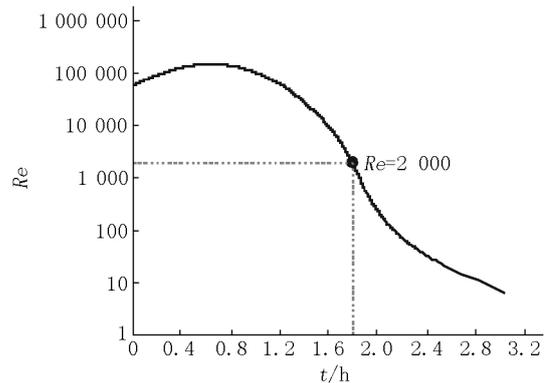


图 5 管内气流  $Re$  与时间  $t$  关系曲线

### 4 结论

本文提出了一种抽真空系统的计算方法,通过案例计算得到如下结论:

- 1) 湍流对抽气时间计算结果的影响较为显著,主要体现在中高压阶段,此时  $Re$  较高,流动处于湍流状态并使管道阻力增大,若按层流计算得到的  $P-t$  曲线下降过快则与实际情况有较大的偏差;
- 2) 在抽气过程中在低压段用时相对较长,抽气时间对于低压段抽速变化比较敏感,因此应注意提高真空泵在低压段的抽气速度以提高抽真空效率;
- 3) 采用气流状态选择湍流或层流模型计算得到的  $P-t$  曲线和实测曲线趋势较为一致,误差在工程容许范围内,这表明该方法是一种切实可行的抽

真空系统计算方法.

## 5 参考文献

- [1] 师宇. QSN750 型直读光谱仪真空系统故障分析与排除 [J]. 分析仪器, 2010(4): 72-73.
- [2] 范海强. 真空系统节能技术在火电厂的应用 [J]. 通讯世界, 2019(12): 231-232.
- [3] 刘一山. 透平真空泵及其在纸机真空系统中的应用 [J]. 纸和造纸, 2019, 38(5): 9-13.
- [4] 董荣华, 周宏, 胡兵, 等. 干式(机械泵)真空系统应用于 RH 工艺的实践 [J]. 中国冶金, 2011, 21(4): 43-48.
- [5] 钱秋朦, 但志宏, 张松, 等. 大型高空台进排气控制半物理仿真系统设计 [J]. 测控技术, 2019, 38(5): 146-150.
- [6] Morris T A, Marciniak M A, Wollenweber G C, et al. Analysis of uncertainties in infrared camera measurements of a turbofan engine in an altitude test cell [J]. Infrared Physics and Technology, 2006, 48(2): 130-153.
- [7] Strozier J A, Sterling M, Schultz J A, et al. Wake vacuum measurement and analysis for the wake shield facility free flying platform [J]. Vacuum, 2001, 64(2): 119-144.
- [8] 周强, 张雷, 庄春龙, 等. 某高空台气源机组匹配计算方法及试验技术研究 [J]. 风机技术, 2017, 59(2): 48-55.
- [9] 许海虹. RH 用机械真空泵抽气过程计算机仿真程序的开发 [J]. 真空科学与技术学报, 2019, 39(3): 206-213.
- [10] Ma Pingchang, Yan Lutao, Li Hong. Aerodynamic design and optimization of high altitude environment simulation system based on CFD [J]. AIP Conference Proceedings, 2017, 1839(1): 020128.
- [11] 隋吉秋. 空间环境模拟器真空抽气过程的计算研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [12] 王继常. 真空系统设计 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
- [13] 王欲知, 陈旭. 真空技术 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [14] 丁祖荣. 流体力学: 上册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [15] 康勇, 李桂水. 过程流体机械 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2016.

## The Study on the Calculation Method for Pumping Process in a Vacuum System

HUANG Si<sup>1</sup>, GUO Jiawei<sup>1</sup>, YI Tiankun<sup>1</sup>, LI Songfeng<sup>2</sup>, WU Taizhong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China;  
2. Guangdong Kenflo Pump Company Limited, Foshan Guangdong 528131, China)

**Abstract:** The calculation methods for vacuum pumping system are usually based on some simple theoretical models, so the corresponding results have significant deviations from the actual situations. In this study, the medium and low vacuum systems (including vacuum chambers, pipes and vacuum pumps) are taken as research objects. Based on the characteristic relationship between vacuum pump's suction flowrate and inlet pressure, a novel calculation method for vacuum pumping time, in which either the laminar model or the turbulent model is selected according to the flow state of the pipeline, is proposed. A measured vacuum system is taken as example for calculation. The proposed method and traditional laminar method are respectively used to calculate the vacuum process of this system. It is found that in the middle and high pressure stage the pipeline flow is in a turbulent state and the resistance is increased. If the influence of turbulence is ignored, the calculated pressure drop will be faster and greatly deviated from actual situation. The calculation method proposed in this study was verified by actual measurement results, indicating that the method is practical for vacuum pumping time calculation.

**Key words:** vacuum pump; vacuum system; pumping process; calculation method

(责任编辑: 王金莲)