

Rotating right (input 01) or left (input-1)?

这时,只要按 Fortran 格式从键盘上敲入相应数据,就可以获得相应的图样。

2. 利用图形几何特性。如果图形具有对称性、周期性或其它几何上的相仿性,在计算机辅助绘图中应充分利用。螺杆阴转子端面型线是由 6 个完全相同的齿形组成(阴转子端面齿形由 4 个齿组成),只要画出其中一个完整的齿形,然后再将其绕中心点旋转  $60^\circ$  (阳转子为  $90^\circ$ ) 进行拷贝复制,就可得到完整的阴、阳转子端面型线。

同样,转子的侧视图是水平方向(Z轴方向)上周期为  $T/6$  (或  $T/4$ ,  $T$  为导程)的周形。在绘图中,只要画出一个周期图形,然后对其进行周期性复制即可。

当然,这些工作都编入程序,交计算机去自动完成。

3. 本文介绍的螺杆转子的计算机辅助作

图方法,离不开基本的绘图软件如画直线、画圆、描点、曲线拟合和图形复制等。这些不属本文介绍的范畴。欲知其详,请参看相应文献[3]。

4. 本文介绍的方法不仅适用现有标准齿形的图样绘制,而且可用于任何螺杆转子新型线的研制。

计算机辅助设计(CAD)是一个涉及内容相当广泛的新课题,有待大家深入研究。我们做的工作——CAD 辅助绘制螺杆压缩机转子图只是在这方面进行了一点初步尝试。

### 参 考 文 献

- [1] 卜啸华:“螺杆压缩机齿形曲线及其铣刀计算”,《化工与通用机械》,1975, No 1, 2
- [2] 邓定国等:《回转式压缩机》,机械工业出版社,1982
- [3] 任正凡等:《计算机绘图及图形显示》,湖南科学技术出版社,1983

## 流体输送管路计算方法的改进

天津轻工业学院化工系 王幼良

### 符 号

- T——操作温度 [K]
- V——体积流量 [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\Delta P$ ——压差 [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
- $\Sigma hf$ ——阻力损失 [ $\text{J}/\text{kg}$ ]
- $h_e$ ——泵提供的能量 [ $\text{J}/\text{kg}$ ]
- u——流速 [ $\text{m}/\text{s}$ ]
- $\Delta Z$ ——位差 [m]
- $\lambda$ ——摩擦系数
- Re——雷诺数
- $\rho$ ——流体密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $\mu$ ——流体粘度 [ $\text{NS}/\text{m}^2$ ]
- d——管内径 [m]
- e——管壁粗糙度 [m]
- l——直管长度与局部阻力当量长度之和 [m]

### 一、基本公式分析

不可压缩流体定常流动的管路计算问题中,描述各参数之间关系的基本方程有如下四个:

$$\text{机械能恒算方程: } h_e = -\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + \Delta Zg + \Sigma hf \quad (1)$$

等截面流动或忽略动能变化项,则(1)为:

$$h_e = -\frac{\Delta P}{\rho} + \Delta Zg + \Sigma hf \quad (1, a)$$

$$\text{摩擦阻力损失方程: } \Sigma hf = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (2)$$

摩擦系数函数关系式： $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{d}\right)$  (3)

流速公式： $V = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot u$  (4)

对于给定物系，在一定操作温度下，流体密度  $\rho$  和粘度  $\mu$  均为定值。对于某一管路系统，管壁粗糙度  $\varepsilon$ ，直管长度与局部阻力当量长度之和  $l$  应预先估值。于是适当给定其中的某些独立变量，利用四个基本方程，可以求出四个未知量。管路计算所需解决的问题，不外乎是要依据管路尺寸、流体的能量（包括外加能量和损失能量）和流量之间的关系，由已知量来确定未知量。工程中常遇到的管路计算问题，大致有以下几种情况：

1. 已知：管径  $d$ 、管壁粗糙度  $\varepsilon$ 、位差  $\Delta Z$ 、管长  $l$  及流量  $V$ 。

求：流体通过管路系统的能量损失  $\Sigma hf$  及所需的外加能量  $h_e$ 。

2. 已知：管径  $d$ 、管壁粗糙度  $\varepsilon$ 、位差  $\Delta Z$ 、管长  $l$  及能量损失  $\Sigma hf$ 。

求：流体流量  $V$ 。

3. 已知：管长  $l$ 、管壁粗糙度  $\varepsilon$ 、位差  $\Delta Z$ 、流量  $V$  及能量损失  $\Sigma hf$ 。

求：管径  $d$ 。

由于计算的目的不同，命题中给定的条件也不同。但有一点是共同的，即对给定适当的独立变量，方程组（1~4）只有唯一解。管路计算的问题也就是方程组联立求解的问题。

管路的计算都离不开摩擦系数  $\lambda$  的求值。对于层流，应用理论分析的方法，根据牛顿粘性定律可以导出摩擦系数关系式：

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (5)$$

对于湍流，由于情况复杂，迄今仍不能完全用理论分析的方法导出湍流时的摩擦系数关系式，其研究的主要途径是用理论和实践相结合的方法来确定摩擦系数  $\lambda$ 。对此问题许多学者作了大量的研究工作，得出了许多半经验公式。这些公式可分为三种类型：光滑区公式、

粗糙区公式和湍流综合公式。前两种公式有一定的边界条件，在整个湍流区不能通用，使用不够方便。工程中广泛使用的是湍流综合公式，其中以柯尔布鲁克（Colebrook）公式最为常用。1939年柯尔布鲁克根据大量的工业管道试验资料，提出了湍流综合公式：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right) \quad (6)$$

柯氏公式虽然只是一个经验公式，但它是在综合了大量工业管道试验资料，并且是在合并了尼古拉则（Nikuradse）光滑区公式和粗糙区公式的基础上得出的。柯氏公式被认为是普朗特理论和尼古拉则试验相结合后进一步发展到工程应用阶段的产物，在国内外有着极为广泛的应用。但是柯氏公式的形式较为复杂，且  $\lambda$  为一隐函数，求解时需要试差，一些学者为了简化计算，曾在柯氏公式的基础上提出了一些简化方法。

莫迪（Moody）根据柯氏公式制成摩擦因子图（莫迪图），由于使用方便、直观，应用广泛。同时莫迪也提出如下不含  $\lambda$  隐函数的公式：

$$\lambda = 0.0055 \left[ \left( 1 + 20000 \frac{\varepsilon}{d} + \frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (7)$$

上式是柯氏公式的近似公式，莫迪指出：

此式在  $\text{Re} = 4000 \sim 10^7$ ， $\frac{\varepsilon}{d} \leq 0.01$ ， $\lambda < 0.05$  时和柯氏公式比较，误差不超过 5%。

阿里特苏里也提出如下简化公式：

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{\varepsilon}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25} \quad (8)$$

上式形式更简单，但误差较大。

柯尔布鲁克公式在整个湍流区具有很好的通用性和准确性，因此应用广泛，许多文献、教科书、管道设计手册都是以柯氏公式或由此产生的莫迪图为准的。但柯氏公式计算比较复杂，莫迪图使用时误差较大，并且不便代入计算机计算。所以有必要对柯氏公式重新进行简化，以导出新的摩擦系数计算式。

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{e}{d}\right) \quad (9)$$

## 二、公式的改进

为此设法把柯氏公式中 $\sqrt{\lambda}$ 项消去。

根据柯尔帮公式

$$\lambda = \frac{0.184}{\text{Re}^{0.2}} \quad (10)$$

将此式代入柯氏公式(6)可消去右端的 $\sqrt{\lambda}$ 。因为公式(10)只适用于光滑区,直接

分析柯尔布鲁克公式(b)可知,为了简化计算,关键是使公式右端不出现因变量 $\lambda$ ,

即把 $\lambda$ 表示成 $\text{Re}$ 与 $\frac{e}{d}$ 的显函数:

表 1

Re	$\frac{e}{d}$	式(6)			式(12)		式(7)		式(8)	
		$\lambda \times 100$	$\lambda \times 100$	$\Delta \%$	$\lambda \times 100$	$\Delta \%$	$\lambda \times 100$	$\Delta \%$		
4000	0.05	7.6959	7.8294	1.73	6.4746	-15.87	5.5964	-27.28		
	0.01	4.9112	5.0000	1.81	4.7646	-2.98	4.4590	-9.21		
	0.001	4.0966	4.1189	0.54	4.1048	0.20	4.0291	-1.65		
	0.0001	4.0067	4.0171	0.26	4.0239	0.43	3.9778	-0.72		
	0	3.9966	4.0056	0.22	4.0147	0.45	3.9720	-0.82		
$1 \times 10^4$	0.05	7.3756	7.4104	0.47	6.2274	-15.57	5.3701	-27.20		
	0.01	4.3132	4.3620	1.13	4.2318	-1.89	3.9602	-8.18		
	0.001	3.2417	3.2399	-0.06	3.2628	0.65	3.2690	0.84		
	0.0001	3.1078	3.0901	-0.57	3.1197	0.39	3.1703	2.01		
	0	3.0924	3.0727	-0.64	3.1028	0.34	3.1588	2.15		
$1 \times 10^5$	0.05	7.1724	7.1121	-0.84	6.0681	-15.40	5.2192	-27.23		
	0.01	3.8485	3.8420	-0.17	3.8191	-0.76	3.5362	-8.11		
	0.001	2.2179	2.2244	0.29	2.2590	1.85	2.2270	0.41		
	0.0001	1.8530	1.8426	-0.56	1.8092	-2.37	1.8383	-0.80		
	0	1.8009	1.7850	-0.88	1.7349	-3.66	1.7763	-1.36		
$1 \times 10^6$	0.05	7.1516	7.0731	-1.09	6.0517	-15.38	5.2033	-27.24		
	0.01	3.7943	3.7676	-0.70	3.7717	-0.59	3.4844	-8.17		
	0.001	1.9937	1.9917	-0.10	2.0674	3.70	1.9885	-0.26		
	0.0001	1.3445	1.3494	0.37	1.3432	-0.09	1.2523	-6.85		
	0	1.1655	1.1650	-0.04	1.1000	-5.62	0.9989	-14.30		
$1 \times 10^7$	0.05	7.1495	7.0681	-1.14	6.0501	-15.38	5.2018	-27.24		
	0.01	3.7888	3.7579	-0.81	3.7669	-0.58	3.4791	-8.17		
	0.001	1.9659	1.9563	-0.49	2.0454	4.04	1.9594	-0.33		
	0.0001	1.2163	1.2168	0.03	1.2543	3.12	1.1182	-8.06		
	0	0.8109	0.8198	1.09	0.8053	-0.69	0.5617	-30.72		
$1 \times 10^8$	0.05	7.1493	7.0674	-1.14	6.0499	-15.38	5.2016	-27.24		
	0.01	3.7882	3.7566	-0.83	3.7664	-0.57	3.4786	-8.17		
	0.001	1.9630	1.9516	-0.58	2.0432	4.08	1.9564	-0.34		
	0.0001	1.1995	1.1952	-0.36	1.2441	3.72	1.1019	-8.11		
	0									

代入误差较大, 所以应该对系数重新进行修正。即先把柯氏公式 (6) 表示成如下形式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{ad} + \frac{c}{Re^b} \right) \quad (11)$$

其中 a、b、c 为待定系数, 可以用回归分析的方法确定。首先利用威斯顿 (Wegstein) 迭代法求解柯氏公式 (6) 计算出  $\lambda$  值, 然后将  $\lambda$  值代入式 (11) 回归, 利用做图法和最小二乘法回归出待定系数 a、b、c 得到如下适用于整个湍流区的综合公式:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.8d} + \frac{5.1}{Re^{0.89}} \right) \quad (12)$$

以柯氏公式 (6) 为准, 对用公式 (12) 所计算的  $\lambda$  值进行比较, 计算结果见表 1。(因计算数据表过大, 只取部分列出。) 为便于对比, 把莫迪公式 (7) 和阿里特苏里公式 (8) 计算值也一起列出。

表中可见, 公式 (12) 的误差比式 (7)、(8) 要小得多。按公式 (12) 计算的  $\lambda$  值十分接近柯氏公式的计算值。一般误差在 0.5% 左右, 只有极个别区域 ( $\frac{\epsilon}{d}$  很大时) 超过 1%, 在整个范围内比较准确。特别是公式 (12) 形式简单, 使用方便, 误差又较小, 可以直接计算摩擦系数, 给管路的计算问题带来方便。

### 三、问题求解

对于第一类命题, 由于流量、管径等条件已知, 可以很方便地用方程组联立求解, 计算框图如下:

已知:  $\rho$ 、 $\mu$ 、 $l$ 、 $d$ 、 $\epsilon$ 、 $\Delta P$ 、 $\Delta Z$ 、 $V$   
求: 能量损失  $\Sigma hf$  和所需外加能量  $he$   
求压差  $\Delta P$ 、位差  $\Delta Z$  等问题与此类同。

对于要求解流量的第二类命题, 必须联立求解方程 (2)、(3), 但方程 (3) 又是一个与流速  $u$  有关的非线性函数, 按文献资料介绍, 主要靠试差求解, 计算框图如下:

(初值按卡门公式

$$\lambda = \left( 1.74 - 2 \log \frac{2\epsilon}{d} \right)^{-2} \text{ 计算。})$$

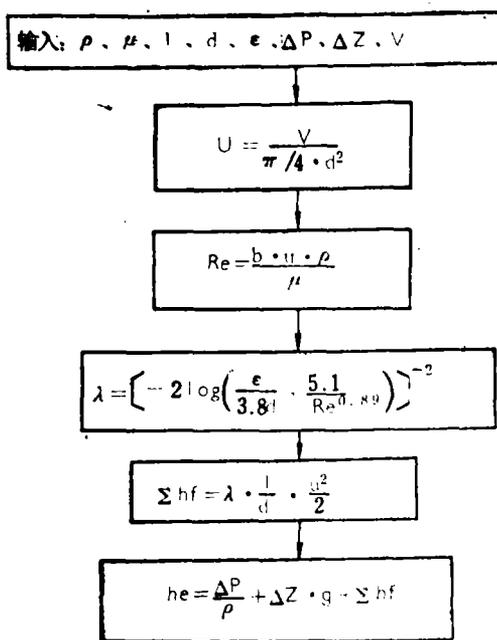


图 1 外加能量  $he$  的计算框图

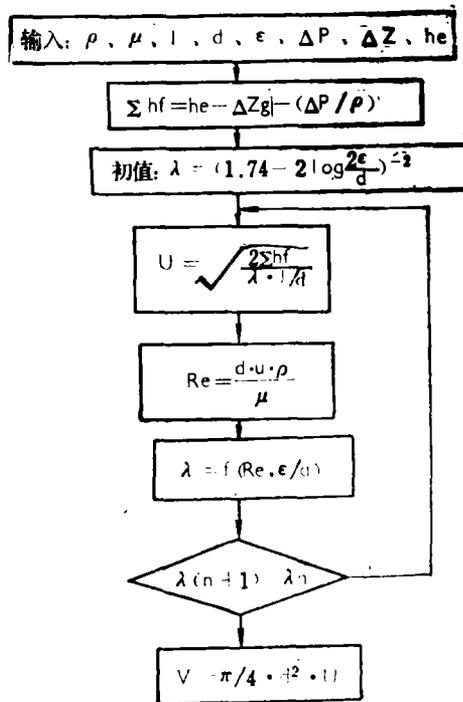


图 2 迭代计算流量  $V$  框图

已知:  $\rho$ 、 $\mu$ 、 $l$ 、 $d$ 、 $\epsilon$ 、 $\Delta P$ 、 $\Delta Z$ 、 $he$   
求: 流量  $V$

迭代法使得管路计算变得十分复杂。如果查图求解  $\lambda$ , 更增加了计算工作量, 并且

$\lambda$  值的初估有很大盲目性, 计算收敛缓慢, 结果也不准确。为解决此问题, 首先分析一下方程 (2)

$$\Sigma hf = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (2)$$

$$\text{即: } \lambda = \frac{2d}{l \cdot u^2} \cdot \Sigma hf \quad (2, a)$$

为了避免试差, 应该设法消去未知量  $u$ , 故方程两端同乘以  $Re^2$ :

$$\begin{aligned} \lambda Re^2 &= \frac{2d \Sigma hf}{l \cdot u^2} \cdot \frac{d^2 u^2 \rho^2}{\mu^2} \\ &= \frac{2 \Sigma hf \cdot \rho^2 \cdot d^3}{l \cdot \mu^2} \end{aligned} \quad (13)$$

上式右端的无因次数群在命题中全部是已知量, 可以很方便地求解。对于方程左端, 考虑到  $\lambda$  值的变化范围不大 (一般在  $0.01 \sim 0.06$ )、 $Re^2$  又是一个很大的数, 可以对式 (13) 做近似计算, 忽略  $\frac{e}{d}$  对  $\lambda$  的影响, 将式 (10) 代入式 (13) 并整理可得:

$$Re = \left( \frac{10.87 \Sigma hf \rho^2 d^3}{l \cdot \mu^2} \right)^{0.556} \quad (14)$$

因为方程 (10) 中忽略了  $\frac{e}{d}$  的影响, 故方程

(14) 所求出的  $Re$  值有一定误差, 不可用来直接求流速  $u$ , 这里的  $Re$  只用于求  $\lambda$  值, 因为微小的  $Re$  误差不会引起  $\lambda$  的很大误差。

这样管路计算中的试差问题就可以直接计算求解了。计算框图如下:

已知:  $\rho$ 、 $\mu$ 、 $l$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $\Delta P$ 、 $\Delta Z$ 、 $he$

求: 流量  $V$

同理, 对于要求解管径  $d$  的第三类问题, 关键是找出不含管径  $d$  和流速  $u$  的数群, 但此时流量  $V$  必为已知量, 所以把  $Re$  表示为流量  $V$  的函数:

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 u \quad (4)$$

$$d \cdot u = \frac{4V}{\pi d} \quad (4, a)$$

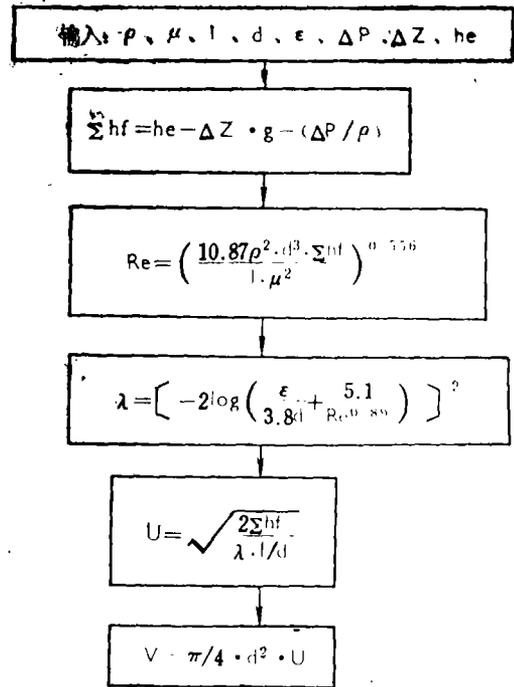


图3 直接计算流量  $V$  框图

$$Re = \frac{4V}{\pi d} \cdot \frac{\rho}{\mu} \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (13) 消去管径  $d$  并整理得:

$$\lambda Re^5 = \frac{4.13 \Sigma hf V^3 \rho^5}{l \cdot u^5} \quad (16)$$

将式 (10) 代入式 (16) 并整理得:

$$Re = \left( \frac{22.4 \Sigma hf V^3 \rho^5}{l \cdot \mu^5} \right)^{0.208} \quad (17)$$

同理式 (17) 所求出的  $Re$  值也只用来求解  $\lambda$  值。此时  $\frac{e}{d}$  是未知量, 可以根据经验预先估值。对于光滑管取  $e/d = 0$ , 对于粗糙管, 一般取  $\frac{e}{d} = 0.001$ 。  $\lambda$  值求出后, 再代入方程 (2)、(4), 管径  $d$  就可以直接求解了。计算框图如下:

已知:  $\rho$ 、 $\mu$ 、 $e$ 、 $l$ 、 $\Delta Z$ 、 $\Delta P$ 、 $V$ 、 $he$

求: 管径  $d$

应用式 (14)、(17) 可以很方便地解决管路计算中需要试差求解的问题, 为工程中的

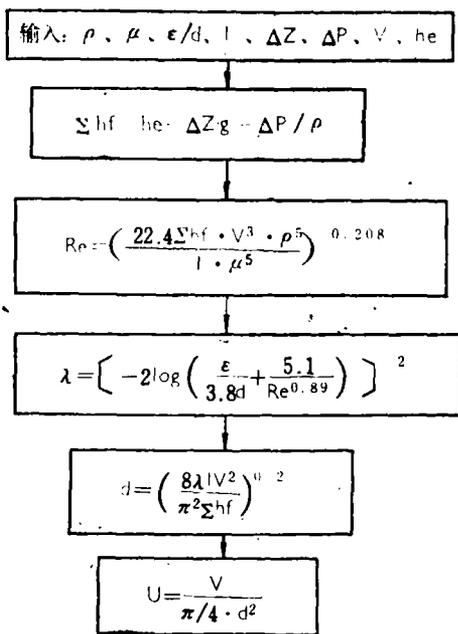


图4 直接计算管径d框图

设计计算带来方便。用这种方法计算的误差一般都可以满足工程上的要求，比用试差法的误差要小得多。因为公式(13)、(16)都是经过严格的数学推导，不会出现误差。引起误差的主要原因是公式(10)，这里为化简进行了近似计算，所以式(14)、(17)求出的Re值有一定误差，但这里求解出的Re值并没有用来求计算结果，而是用于求解 $\lambda$ 。由式(12)可知，Re值的微小变化，对 $\lambda$ 值的影响很小，在Re值较高、 $\frac{\epsilon}{d}$ 值较大时，Re值对 $\lambda$ 值的影响更小。分析式(14)、(17)可知，Re的误差只有在Re值较高， $\frac{\epsilon}{d}$ 值较大时才出现。而在低Re值， $\frac{\epsilon}{d}$ 较小时误差很小。这样两式的误差就自动消除了。计算结果的误差就非常小。用直接计算方法对各种试差题目进行计算，均获得了满意的结果。

为了说明直接计算过程，取上海化工学院等编之《化学工程》P49之例1-13进行计算，原书此题是做为试差法例题进行计算的，因为多次试差过程比较复杂。现用直接计算法计算：

已知：d=0.081m； $\Delta P=0$ ； $\Delta u=0$ ；  
 $\rho=1000\text{KJ/m}^3$ ； $\mu=1.2363\text{CP}$ ；  
 $l=120\text{m}$ ； $h_e=0$ ； $\Delta Z=10\text{m}$ ；  
 $\epsilon=0.15\text{mm}$ 。

求：V=?

解： $\Sigma hf = h_e - \Delta Z g - \frac{\Delta P}{\rho} = 98.1$

$$\text{Re} = \left( \frac{10.87 \Sigma hf \rho^2 d^3}{l \cdot \mu^2} \right)^{0.556} = 1.88972 \times 10^5$$

$$\lambda = \left[ -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.8d} + \frac{5.1}{\text{Re}^{0.89}} \right) \right]^{-2} = 0.023913$$

$$u = \sqrt{\frac{2 \Sigma hf}{\lambda \frac{l}{d}}} = 2.3534 [\text{m/s}]$$

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 u = 0.012127 [\text{m}^3/\text{s}]$$

二种方法比较可知，直接算法比试差法简便得多。

本文承天津大学麦本熙教授悉心指导和热情帮助，提出了宝贵的意见，在此表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] 上海化工学院等编《化学工程》第一册 化学工业出版社 1980
- [2] 谭天恩、麦本熙、丁惠华编《化工原理》上册 化学工业出版社 1984
- [3] 周漠仁编《流体力学泵与风机》建筑工业出版社 1979
- [4] J. M. Coulson and J. F. Richardson "Chemical Engineering" Vol I 1977 Pergamon Press

#### ●离心泵叶轮径向力的测定……陈文梅(1)

在现代技术中,最受关注的问题之一是不断提高机器的功率系数,离心泵也不例外。在大型或特大型泵的设计过程中,叶轮的横向推力是一个不容忽视的问题。基于目前对径向力产生的机理及其影响因素尚未弄清楚,无法正确计算径向力。本文作者在总结大量的国外资料基础上,着重介绍了三种典型的径向力测试方法,并列出了作者在加州理工学院新型试验台上的测试结果及分析。

#### ●大型旋转机器的气体动力激振 ……沈庆根(8)

大型离心式压缩机、轴流式压缩机、风机及蒸汽透平机常会由于设计、安装和操作中的问题产生气体动力激振,这种激振力可大到使机组完全失去稳定,从而产生严重的破坏性振动。本文描述了几类气体动力激振的机理,频谱特征,并举了工厂大机组产生气体动力激振的情况和处理办法,着重指出了气体动力激振的特点是表现为亚异步振动,多数情况可激起转子系统的一阶自振频率。振动一般与机器的转速及负荷有关,并且会影响到轴承力的大小和方向,对于工厂大机组振动问题的分析可提供参考。

#### ●HTY016 螺杆副啮合检查仪 ……刘嗣洪(12)

螺杆转子是螺杆式压缩机和制冷机的关键零件,其工作齿面成型复杂,加工和检验都十分困难。对一个转子精度优劣评价,必须测出端面型线误差、导程误差和分度误差。但在国内外对于螺杆转子的检测还缺乏成熟的仪器。本文作者详细介绍了汉江机床厂试制的HTY016 螺杆副检查仪的使用方法及其优越性。这种检查仪能对单个转子的分度误差、导程误差进行检测,对型线误差能进行布点检

测。利用端面型线样板调整传感器零位,还能检测一对转子的啮合间隙变化量。同国内目前采用的能进行某几项误差检测的通用量仪相比,HTY016 检查仪具有显著的优越性。

#### ●离心机转鼓及轴对称回转体的重量、重心 及转动惯量的计算……申亚明(22)

在对转子系统进行临界转速或其他有振动特性方面的计算时,需要求出力学模型上各个转子的(如离心机转鼓,离心式压缩机叶轮等)重量、重心及转动惯量等等。对于截面较为复杂的转动体,按常规法计算比较繁复。本文介绍一种简化了的但又相当准确的计算方法。这种计算方法极易编成程序,通过计算机,就能按实际要求的精度进行迅速计算。文章最后给出了作者在PC-1500机上使用过的简单程序,以供参考。

#### ●螺杆压缩机转子的计算机辅助设计 ……季林生(26)

螺杆压缩机转子齿形的组成齿曲线复杂,手工制图,不但费时且精度低。为了得到精度较高的图样,作者在设计中采用了计算机辅助绘图。文章介绍了转子的绘制过程,并对其过程中值得注意的问题进行了说明。计算机辅助设计是一个涉及内容相当广泛的新课题,作者所作的工作只是在这方面进行了一点初步尝试,欢迎有兴趣的读者共同探讨。

#### ●流体输送管路计算方法的改进 ……王幼良(29)

本文作者在探索管路计算方面作了不少工作,通过对现有管路计算的基本公式的分析,导出了适用于整个湍流区的柯氏近似公式。计算结果表明,这个公式计算简便,误差较小,可用来直接计算摩擦系数。最后,文章介绍了管路计算中出现的四大命题,并列出了程序框图。