多源多出复杂压缩空气管网建模及能效分析

盖玉收 石 岩 蔡茂林

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对多源多出的复杂压缩空气管网, 通过分析管网的拓扑结构、压缩空气的压力损失规律以及压力与流量的联动特点,建立了管网矩阵模型,并基于所建数学模型,确定了管网中压缩空气压力和流量间的对应关系. 能够根据管网中用气点的流量或压力波动,快速预测出管网中可能出现的压力或流量波动,为准确地用气预测提供了一种解决思路,同时为管网的能效分析奠定了基础.

关 键 词: 多源多出; 压缩空气; 管网; 数学模型; 能量损失; 压力损失; 能效分析

中图分类号: TK 08

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1243-06

Analysis on mathematical modeling for multi-source and multi-outlet complex compressed air pipe network

Gai Yushou Shi Yan Cai Maolin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Array was used to build the structure mathematical model of the multi-source and multi-outlet complex compressed air pipe network. With the topology structure of the pipe network, the pressure dropping law and the linkage characteristics between the pressure and the flow of the compressed air in the pipe, the fluctuation of the pressure and flow of the air was obtained. With the model, the possible fluctuation of the pressure or the flow could be predicted rapidly, which could provide a solution for the accurate forecast of the volume of the compressed air in the network. With the accurate data of the pressure and flow, the energy efficiency of the whole pipe network can be analyzed too.

Key words: multi-source and multi-outlet; compressed air; pipe network; mathematical model; energy losses; pressure drop; energy efficiency analysis

压缩空气系统由于元器件价格低廉、系统维护容易等特点,在众多行业中发挥着越来越重要的作用. 压缩空气管网,作为压缩空气系统的重要组成部分,在企业中得到广泛应用,企业规模越大,压缩空气管网越复杂.

由于压缩空气系统调度不合理造成的能量损失约占整个压缩空气系统能耗的 15% 左右[1-2]. 若将多个独立的压缩空气管网相互连通,并合理调度,可有效降低压缩空气的压力、流量波动,提高压缩空气系统的效率[3-4]. 类似的成功案例,见文献[5].

为了获取管网重要节点压力及流量的波动特性,合理调度管网中的流体,有必要对管网进行建模研究.

目前,对管网的建模方法主要有智能方法、微分方法、数值方法及网络拓扑结构方法等. 国内,文献[6]使用遗传算法对管网进行建模分析;文献[7]用微分的方法对管网建模分析;文献[8]提出网络拓扑模型的分析方法;文献[9]提出了一种可压缩流体网络支路特性的建模方法;文献

收稿日期: 2012-10-17; **网络出版时间**: 2013-09-22 10:24

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130922.1024.003.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205008)

作者简介: 盖玉收(1971-),男,山东莱阳人,博士生,gaiyushou@126.com.

[10]提出了管网矩阵化的建模方法等.

国外,文献[11]利用求最小阻力值的数值方法对管网建模分析;文献[12-13]利用专家系统方法,对管网建模分析并优化;文献[14]用蚁群算法对管网进行优化等.

采用管网拓扑结构法建立的管网数学模型,不仅能够建立管网关键节点的压力流量关系,而且能够清晰地揭示管网的拓扑结构,为管网的合理调度及优化设计奠定重要的基础.

本文根据压缩空气管网的特性,构建一个通用的管网数学模型,并结合压缩空气的流动特性,推导出压力和流量之间的定量关系. 此外,本文还引入了压缩空气能量评价标准(气动功率),以对压缩空气管网的能效进行分析.

1 数学建模的方法

压缩空气在管网传输的过程中,存在着能量损失[15],损失程度与管网结构有直接关系. 文中以结构矩阵的方式,表示出管网的拓扑结构;并根据管网中压缩空气的压力损失特点,提炼出流阻信息,建立起压力、流量间的关系.

理论研究时,假设管道没有泄漏,即没有流量损失. 因此,可以认为管网内压缩空气的能量损失主要表现为管道的压力损失. 该损失程度主要受以下几个方面的影响:①管道材质;②管径和管道长度;③管道中的异形结构(如变径、阀等);④管道中流体速度.

1.1 管网结构矩阵

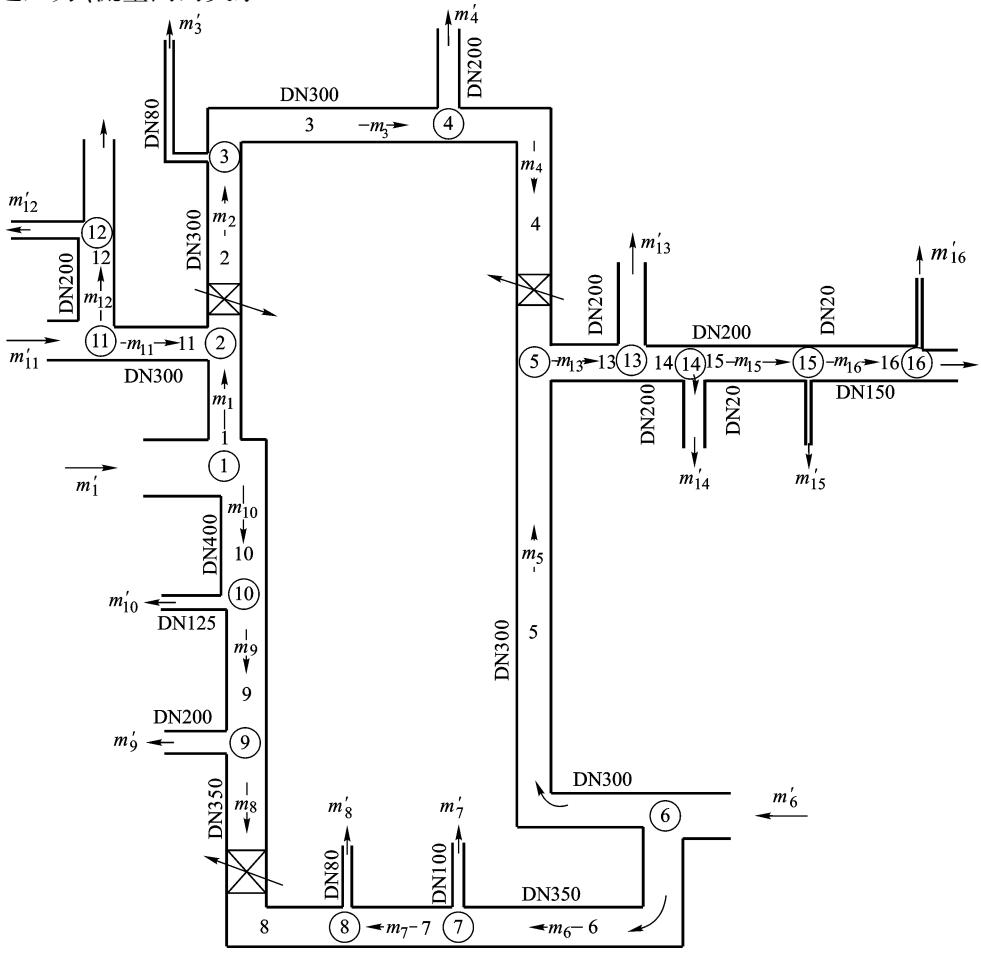
图 1 是一个复杂管网的结构示意图,图中箭头方向表示压缩空气的流动方向. 管道中有球阀、拐弯、变径等异形结构.

管网的拓扑结构,可以用矩阵的形式表示出来. 这种管网结构矩阵是分析管网结构比较简单、有效的方法[16-17].

结构矩阵的构建方法:管道有分支的地方作为节点,按顺序编号;与节点相连的管段,也按顺序编号;以节点为行,以管段为列就可以构建出一个矩阵. 矩阵中的元素 a_{ij},取值方式如下:

$$a_{ij}=\begin{cases}1 & \text{节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相交,且流体流入节点 } i\\ 0 & \text{节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 没有相交}\\ -1 & \text{节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相交,且流体流出节点 } i\end{cases}$$

图 1 所示的管网,其结构矩阵表示如下:



1~16—管道编号;①~⑯—节点编号;m_1~m_{16}—管道中的质量流量;m'_1~m'_{16}—节点上的质量流量;DN20~DN400—管道直径.

图 1 管网实际结构示意图

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
-1&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0&0&0\\
1&-1&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0&0\\
0&1&-1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&1&-1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&-1&0&0&0&0\\
0&0&0&0&-1&-1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&1&-1&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&1&1&0&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&-1&1&0&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&-1&1&0&0&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&-1&-1&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0&0&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&-1&0&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&-1&0\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&-1\\
0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1
\end{bmatrix}$$

各管段中压缩空气的质量流量组成向量 $\boldsymbol{M}$,各节点处与外界发生交互的流量向量为 $\boldsymbol{M}'$,则根据基尔霍夫第一定律[16]可得

$$\boldsymbol{A}\times\boldsymbol{M}=\boldsymbol{M}' \tag{1}$$

由式(1)可推出各节点流量之间的方程式:

$-m_1-m_{10}=m_1'$　　$m_1-m_2+m_{11}=0$

$m_2-m_3=m_3'$　　$m_3-m_4=m_4'$

$m_5+m_4-m_{13}=0$　　$-m_5-m_6=m_6'$

$m_6-m_7=m_7'$　　$m_7+m_8=m_8'$

$-m_8+m_9=m_9'$　　$m_{10}-m_9=m_{10}'$

$-m_{11}-m_{12}=m_{11}'$　　$m_{12}=m_{12}'$

$m_{13}-m_{14}=0$　　$m_{14}-m_{15}=m_{14}'$

$m_{15}-m_{16}=m_{15}'$　　$m_{16}=m_{16}'$

1.2　管网结构的简化

管网结构一般比较复杂,由此得出的管网结构矩阵会很庞大,这给计算过程带来了较大的麻烦. 为尽可能减小结构矩阵,需要在具体分析时对管网进行简化.

简化的原则是:管路中的拐弯、变径、控制阀等元件与其所在的管段是串联关系,用串联管路的简化方法处理;先分支后汇合的管段,如果不需要对分支后的管段特殊研究,则该管段当作并联管路处理,用并联管路的简化方法处理. 无论是串联管路还是并联管路,简化完毕后当作一条管段处理. 如图 2、图 3,可简化成一条管路.

1.3　管段的流通能力

当不考虑局部损失(由结构变化带来的损失)时,管路的压力损失是由沿程损失造成的. 沿程损失的计算公式[18]如下:

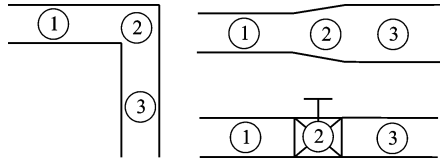


图 2　串联型管路

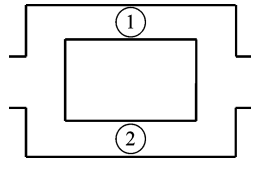


图 3　并联型管路

$$\Delta p=\lambda\frac{L}{D}\frac{1}{2}\rho\mu^2 \tag{2}$$

式中,Δp 为管段压降,Pa;λ 为沿程压力损失系数,无因次量;L 为管段长度,m;D 为管段内径,m;ρ 为压缩空气密度,kg/m^3;μ 为压缩空气的流速,m/s.

由式(2)可知,该公式主要考虑了管道材料、管径、管道长度和管道流速等造成的损失.

当引入质量流量,由式(2)可得

$$\Delta p=\frac{8}{\pi^2}\lambda\frac{L}{D^5}\frac{m^2}{\rho}=Gm^2 \tag{3}$$

式中,m 为质量流量,kg/s;G 为管道的流阻,1/(kg·m),管道的流通能力. G 越大,流通能力越弱;G 越小,流通能力越强.

同理,当管段是异形结构时,管段的流阻 G 需要根据不同的结构形式进行分析. 根据文献[19-20]可知,异形结构中压缩空气的局部压力损失为

$$\Delta p=\xi\cdot\frac{1}{2}\rho\mu^2=Gm^2=\frac{8\xi}{\rho\pi^2D^4}m^2 \tag{4}$$

式中,ξ 为与局部结构形式相关系数.

1.4 串联管路的处理方法[8]

图 2 中的串联管路,管路的压力损失表示为

$$\Delta p_s = G_s m_s^2 = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$$

式中,$\Delta p_1 = G_1 m_1^2$,$\Delta p_2 = G_2 m_2^2$,$\Delta p_3 = G_3 m_3^2$ 分别为第 1,2,3 部分管段的压力损失.

由于 3 部分管路串连在一起,其质量流量相同,即 $m_s = m_1 = m_2 = m_3$. 由此可得 $\Delta p_s = (G_1 + G_2 + G_3) m_s^2 = G_s m_s^2$.

$$G_s = G_1 + G_2 + G_3 \tag{5}$$

式中,G_s 为串联后管路的流阻.

1.5 并联管路的处理方法[8]

图 3 中的并联管路,管路两端的压力损失可以表示为:$\Delta p_p = G_p m_p^2 = \Delta p_1 = \Delta p_2$,并且 $m_p = m_1 + m_2$,所以,可以推出并联后管路的流阻:

$$G_p = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1 G_2}} \tag{6}$$

1.6 流阻的参数确定

当管段是直管时,由式(3)可知流阻:

$$G = \frac{8}{\pi^2} \frac{\lambda L}{D^5 \rho} \tag{7}$$

图 1 所示的压缩空气管道是碳素无缝钢管,绝对粗糙度在 0.04 ~ 0.17 mm 之间;管道直径在 100 ~ 400 mm 之间;压缩空气设计流速下的雷诺数在 104 左右;从莫迪图[18]可以看出,此时的 λ 值应该在 0.030 ~ 0.031 之间,因为差别极少,这里设为 0.031.

异形结构时,由式(4)可得流阻

$$G = \frac{8\xi}{\rho \pi^2 D^4} \tag{8}$$

不同的异形结构,系数 ξ 的计算方法也不相同,下面分几种情况讨论该系数的取值.

1) 直角拐弯管段. 由文献[19]可知,弯管的局部损失系数为

$$\xi = K_\Delta K_{Re} C_1 \xi_\alpha \xi_{loc} \tag{9}$$

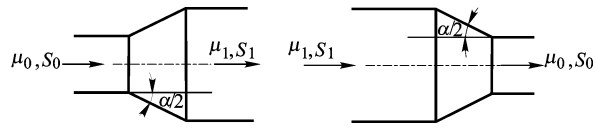
式中,K_Δ 为与管道的相对粗糙度相关的系数,值为 1.0;K_{Re} 为与空气的雷诺数相关的系数,值为 1.40;C_1 为与管截面形状相关的系数,值为 1.0;ξ_α 为与拐弯角度相关的系数,值为 1.20;ξ_{loc} 为与弯管两端尺寸相关的系数,值为 0.99.

2) 管径发生变化的管段. 管径由小变大和由大变小时的 2 种简图如图 4 所示.

局部损失系数为

$$\xi = K/Re \tag{10}$$

式中,管径由小变大时 $K = \dfrac{20\psi_1^{0.33}}{(\tan\alpha)^{0.75}}$,$\psi_1 = \dfrac{S_1}{S_0}$;管径由大变小时 $K = \dfrac{19}{\psi_0^{0.5}(\tan\alpha)^{0.75}}$,$\psi_0 = \dfrac{S_0}{S_1}$.



μ—流速;S—截面积;α—变径部分与原管路的夹角.

图 4 管径变化示意图

3) 三通结构的管段. 水平与垂直方向进入的空气合流成水平方向流出时的简图如图 5 所示.

局部压力损失系数为

$$\left.\begin{aligned} \xi_s &= \frac{\xi_{c.s}}{(q_s S_c / q_c S_s)^2} \\ \xi_{st} &= \frac{\xi_{c.st}}{(1 - q_s/q_c)^2} \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

式中,ξ_s 为垂直入口到水平出口的压力损失系数;ξ_{st} 为水平入口到水平出口的压力损失系数;q 为体积流量;$\xi_{c.s}$ 与 $\xi_{c.st}$ 可以分别从文献[19](219 页)的图表中查出.

水平流入的空气,分水平和垂直 2 个方向流出时的简图如图 6 所示.

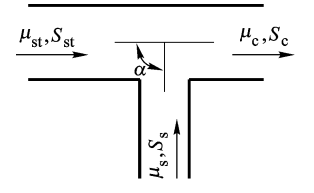


图 5 合流形式的三通示意图

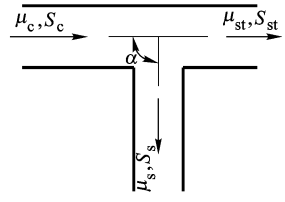


图 6 分歧形式的三通示意图

局部压力损失系数是

$$\left.\begin{aligned} \xi_s &= \frac{\xi_{c.s}}{(q_s S_c / q_c S_s)^2} \\ \xi_{st} &= \frac{\xi_{c.st}}{(1 - q_s/q_c)^2 (S_c/S_{st})^2} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中,$\xi_{c.s}$ 和 $\xi_{c.st}$ 可以从文献[19](230 页)的图表中查出.

4) 管道中的阀. 管路中各种阀的压力损失系数,可以直接查出来. 例如,带 45°缓冲面的标准球阀,根据出气口的直径,如表 1 所示.

表 1 45°标准球阀参数

D_0/mm	ξ	D_0/mm	ξ
13	10.8	150	4.40
20	8.00	200	4.70
40	4.90	250	5.10
80	4.00	300	5.40
100	4.10	350	5.50

由以上的分析得知,管网中每一个位置,无论是直管段还是异形结构,压力损失系数及流阻都

能够计算出来.

2　压力与流量关系

如果用向量 $\boldsymbol{P}$ 表示图 1 所示管网中各节点位置处的压力值,则任何一个管段两端的压力差向量,均可以用管网结构矩阵 $\boldsymbol{A}$ 表示为

$$\Delta \boldsymbol{P} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{P} \tag{13}$$

分别代入式(3)和式(4)可得

$$\Delta \boldsymbol{P} = \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{P} = \boldsymbol{E}_G \cdot \boldsymbol{M}^2 \tag{14}$$

式中,$\boldsymbol{E}_G$ 为阶数与管段数量一致的单位阵中,主对角线上的元素 1 分别换成了 $G_1, G_2, \cdots, G_{16}$.

由式(14)可以推导出式(15)和式(16).

$$\boldsymbol{P} = (\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{-1} \cdot \boldsymbol{E}_G \cdot \boldsymbol{M}^{[2]} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{M}^{[2]} = \boldsymbol{E}_G^{-1} \cdot \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{P} \tag{16}$$

式中,上标[2]表示的是矩阵中各元素的平方,而不是普通意义上的矩阵平方;$\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{E}_G$ 为已知量,因此可根据管段流量向量 $\boldsymbol{M}$,求出各节点的压力向量 $\boldsymbol{P}$;同样也可以根据流量的波动 $\Delta \boldsymbol{M}$,求出各节点的压力波动 $\Delta \boldsymbol{P}$. 这种计算结果可以有两方面的应用:①可以根据用气点流量的波动情况,计算出各管段中的流量波动,同时也能够计算出各节点可能的压力波动,这对用气预测非常重要;②能够计算出管网的能效状况.

3　管网能效

由文献[15]知,在不考虑温度影响时压缩空气的气动功率为

$$P_i = p_i q_{vi} \ln\left(\frac{p_i}{p_{\mathrm{a}}}\right) = p_{\mathrm{a}} q_{vai} \ln\left(\frac{p_i}{q_{\mathrm{a}}}\right) \tag{17}$$

式中,P_i 为某节点压缩空气的气动功率,W;p_i 为某节点压缩状态的压力,Pa;p_{a} 为大气状态的压力,Pa;q_{vi} 为压缩状态的体积流量,$\mathrm{m^3/s}$;q_{vai} 为大气状态的体积流量,$\mathrm{m^3/s}$.

管网的能效值:

$$\eta = P_{\mathrm{O}} / P_{\mathrm{I}} \tag{18}$$

式中,P_{O} 为管网节点中流出的气动功率和,$P_{\mathrm{O}} = \sum_{i=1}^{16} P_i$;$P_{\mathrm{I}}$ 为管网节点中流入的气动功率和,$P_{\mathrm{I}} = \sum_{i=1}^{16} P_i$. 即计算管网能效状况时,首先需要计算管网各入口处压缩空气的气动功率和,然后计算管网各出口处的压缩空气气动功率和,二者的比值即压缩空气管网的能效状况.

因此,压缩空气流经管网后,能量损失程度可以准确计算出来.

4　结 束 语

本文用矩阵模型,表示出了管网中压缩空气的压力、流量之间的关系,既能根据用气点的流量变化,计算出管道中压力变化的规律,也可根据用气点压力的变化,计算出管道中流量的变化规律. 该方法可根据管网中某几处的流量或压力变化,快速地预测出管网其它地方的可能的压力或流量波动. 该快速预测能力,对压缩空气系统供气量的精确控制有重要意义. 管网中的压力和流量确定后,可以对管网进行精确的能效分析,该分析结果可以作为管路设计及优化时的一个重要的依据.

参考文献(References)

[1] Beals C, Ghislain J, Kemp H, et al. Improving compressed air system performance[M]. Washington: US Department of Energy, 2003: 31-33

[2] Kaya D, Phelan P, Chau D, et al. Energy conservation in compressed-air systems[J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26(9): 837-849

[3] Cai Maolin, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa. Power assessment of flowing compressed air[J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, 2006, 128(2): 402-405

[4] 李建藩. 气动系统的节能[M]. 北京:机械工业出版社,1997
Li Jianpan. Energy-saving of pneumatic system[M]. Beijing: China Machine Press, 1997(in Chinese)

[5] 曾志海,安爱伟,韩立平,等. 压缩空气系统联网技术改造方案[J]. 玻璃,2006(5):53-54
Zeng Zhihai, An Aiwei, Han Liping, et al. Interconnection reconstruction scheme for compressed air system[J]. Glass, 2006(5): 53-54(in Chinese)

[6] 张培培,周伟国,潘新新. 城市天然气管网遗传算法优化设计[J]. 天然气工业,2006,26(10):124-126
Zhang Peipei, Zhou Weiguo, Pan Xinxin. The optimal design of gas networks in cities with genetic algorithm[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(10): 124-126(in Chinese)

[7] 刘恩宾,彭善碧,李长俊,等. 仿真技术研究及其在气田管网改造中的应用[J]. 天然气工业,2005,25(1):135-137
Liu Enbin, Peng Shanbi, Li Changjun, et al. The research of simulation technology & application in the transforming of networks in gas field[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 135-137(in Chinese)

[8] 秦导,王建红. 管道网络拓扑模型与分析计算[J]. 北京化工大学学报,2002,29(2):24-28
Qin Dao, Wang Jianhong. Topology modeling and analysis calculation of pipe networks[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2002, 29(2): 24-28(in Chinese)

[9] 马光富,王司. 可压缩流体网络一种改进的建模方法[J]. 控制与决策,1996,11(1):93-96
Ma Guangfu, Wang Si. An improved modeling method for compressible fluid networks[J]. Control and Decision, 1996, 11(1): 93-96(in Chinese)

[10] 王建刚,刘三阳. 城市天然气输配管网的数学模型及优化

[D]. 西安: 西安电子科技大学数学与统计学院,2008
Wang Jiangang, Liu Sanyang. Math model and optimize for gas transmission and distribution network in cities [D]. Xi'an: School of Mathematics and Statistics, Xi Dian University, 2008 (in Chinese)

[11] Milani A E, Haghifam M R. A new probabilistic approach for distribution network reconfiguration: applicability to real networks[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 57: 169-179

[12] Liu C C, Lee S J, Venkata S S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution system [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1988, 3: 619-629

[13] Sandercock W G. Union gas applies expert system to optimize pipe line [J]. Pipeline Industry, 1994: 37-40

[14] Chebouba A, Yalaoui F, Smati A, et al. Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization [J]. Computer & Operations Research, 2009, 36: 1916-1923

[15] 蔡茂林,香川利春. 气动系统能量消耗评价体系及能量损失分析[J]. 机械工程学报,2007,43(9):69-74
Cai Maolin, Toshiharu Kagawa. Energy consumption analysis and evaluation system for pneumatic system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 69-74 (in Chinese)

[16] 石兆玉. 流体网络的分析与综合[M]. 北京:清华大学热能研究所,1993:16-22
Shi Zhaoyu. Analysis and synthesis of fluid network[M]. Beijing: Thermal Energy Research Institute of Tsinghua University, 1993: 16-22 (in Chinese)

[17] 向延海. 城镇燃气管网的水力计算[J]. 重庆建筑,2000(4):37-41
Xiang Yanhai. Hydraulic calculation of urban gas pipeline network[J]. Iron & Steel Technology, 2000(4): 37-41 (in Chinese)

[18] SMC(中国)有限公司. 现代实用气动技术[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社,2008
SMC (China) Co Ltd. Modern practical pneumatic technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2008 (in Chinese)

[19] Fried E, Idelchik I E. Flow resistance: a design guide for engineers [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989: 219, 230

[20] 邓敦夏,贺礼清. 流体流动手册[M]. 北京:中国石化出版社,2004
Deng Dunxia, He Liqing. Fluid flow handbook [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004 (in Chinese)

(编 辑:赵海容)

(上接第 1242 页)

参考文献 (References)

[1] Smith Jack. Basics of industrial ethernet[J]. Plant Engineering, 2004, 58(8): 65-71

[2] 刘喆,郇极,刘艳强. 基于 XML 的 EtherCAT 工业以太网协议解析技术[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(9):1086-1090
Liu Zhe, Huan Ji, Liu Yanqiang. Parser of industrial Ethernet EtherCAT based on XML[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(9): 1086-1090 (in Chinese)

[3] Wang Z, Song Y Q, Chen J M, et a1. Real-time characteristics of Ethernet and its improvement [C]//Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 1311-1318

[4] 胡国传,沈杰,刘彬,等. 基于 PROFINET IO 的延迟和抖动研究[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):2153-2160
Hu Guochuan, Shen Jie, Liu Bin, et al. Study on delay and jitter based on PROFINET IO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 2153-2160 (in Chinese)

[5] hilscher. netANALYZER NANL-C500-RE and NANL-B500-RE and software installation, operation and hardware description [EB/OL]. 2010-03[2012-05-18]. http://www.hilscher.com/files_manuals/netANALYZER_usermanual_en.pdf.

[6] Liu Zhe, Huan Ji, Hu Xing. Multi-channel probe for industrial Ethernet measurement[C]//The Proceedings of 2012 International Conference on Frontiers of Manufacturing Science and Measuring Technology. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 2012: 1476-1479

[7] 郇极,刘艳强. 工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:3-4
Huan Ji, Liu Yanqiang. The driver development and application of industrial Ethernet fieldbus EtherCAT[M]. Beingjing: BUAA Press, 2010: 3-4 (in Chinese)

(编 辑:文丽芳)