

输气干线压缩机模型的最优化研究*

汪玉春¹ 秦新言² 郭 怡³ 余泽庆⁴ 陈进殿¹

(1. 西南石油学院 2. 中国石化管道储运分公司 3. 中国石化西南分公司川西采输处
4. 中油集团工程设计公司西南分公司)

汪玉春等. 输气干线压缩机模型的最优化研究. 天然气工业, 2005; 25(9): 113~ 115

摘 要 对于输气干线的自动化设计和管理来说, 用准确的数学模型描述离心压缩机的特性曲线至关重要。由于离心压缩机的转速调节范围宽, 要找到准确的模型来描述离心压缩机的特性是较为困难的。为此, 根据有关文献中不同折合相对转速下的压缩比—折合流量特性曲线的变化规律, 建立了离心压缩机压缩比与折合流量、折合相对转速关系的几何模型和广义多项式模型。采用快速、准确搜索非线性模型未知变量的 Levenberg-Marquardt 优化方法求解了模型中的回归参数。经算例检验, 所建立的几何模型和广义多项式模型能快速搜索到离心压缩机压缩比与折合流量、折合相对转速的变化关系的最优回归参数。对于相同的几何模型, 用 Levenberg-Marquardt 优化方法搜索模型回归参数的效果比用线性最小二乘法好, 相关指数从 0.7661 提高至 0.9503, 最大误差从 5.619% 下降至 2.513%。

主题词 输气管道 离心 压缩机 数学模型 优选法 设计 管理

一、引 言

离心式压缩机是输气干线的增压设备。对于输气干线的自动化设计和管理, 用准确的数学模型描述离心压缩机的特性曲线至关重要。由于离心式压缩机转速调节范围宽, 要找到准确的数学模型来描述它的特性是较为困难的。特别是压缩比—流量特性曲线数学模型的准确性对离心压缩机型号的优选和输气干线的优化运行显得特别重要。因此, 研究离心压缩机的压缩比—流量特性曲线的最优数学模型具有重要的意义。

离心压缩机的特性曲线一般可表示为如文献[1]中图 2.25 的形式。该图中不同折合相对转速下的压缩比—折合流量特性曲线共有 9 条, 在曲线横坐标(高效区范围)上取 5 个折合流量: 250、300、350、400、450 m³/min, 可采集到不同折合相对转速下的压缩比数据, 见表 1。

可分别采用一元多项式回归模型^[2]拟合表 1 不同折合相对转速下的压缩比—折合流量特性数据:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=0}^p a_i Q^i \quad (i = 0, 1, 2, \cdots, p) \quad (1)$$

表 1 H-300-1, 23 型离心压缩机压缩比与折合流量、折合相对转速关系的特性数据表

折合相对转速	不同折合流量下的压缩比				
	250	300	350	400	450
1.10	1.3462	1.3226	1.2943	1.2500	1.2017
1.05	1.3151	1.2925	1.2632	1.2238	1.1738
1.00	1.2802	1.2632	1.2375	1.1976	1.1571
0.95	1.2504	1.2349	1.2132	1.1787	1.1405
0.90	1.2245	1.2102	1.1913	1.1594	1.1238
0.85	1.1989	1.1857	1.1681	1.1432	1.1119
0.80	1.1734	1.1632	1.1470	1.1245	1.0988
0.75	1.1534	1.1443	1.1311	1.1113	1.0857
0.70	1.1311	1.1245	1.1121	1.0936	1.0738

式中: ε 表示压缩机的压缩比; Q 表示折合流量, m³/min; a 表示模型回归参数。

当 $p = 3$ 时, 用 MATLAB^[3] 中采用最小二乘原理的 polyfit() 函数可获得精度很高的一元回归模型 9 个, 回归参数及检验结果见表 2。例如, 当折合相对转速为 1.00 时, 压缩比与折合流量的一元回归模型为:

$$\varepsilon^2 = 1.2572 + 4.0551 \times 10^{-3} Q - 12.0047 \times 10^{-6} Q^2 + 7.5446 \times 10^{-9} Q^3 \quad (2)$$

* 本成果为四川省高校重点学科建设资助项目(SZD0416)。
作者简介: 汪玉春, 1949 年生, 副教授, 硕士研究生导师; 毕业于原华东石油学院石油天然气储运专业, 长期从事油气储运的教学、科研工作; 曾分别获省(部)、局(院)级优秀论文奖、科技进步奖和科研促进教学奖。地址: (610500) 四川省成都市新都区。电话: (028) 83033090。E-mail: wangyc3090@sian.com.cn

表 2 H-300-1,23 型离心压缩机压缩比与折合流量一元回归模型的回归参数及检验结果表

序号	折合相对转速	a_0	$a_1(\times 10^{-3})$	$a_2(\times 10^{-6})$	$a_3(\times 10^{-9})$	相关指数 ¹⁾	平均误差(%) ²⁾
1	1.10	1.6500	2.4294	-8.0310	3.5800	0.9994	0.0838
2	1.05	1.8589	-0.2745	0.0164	-3.9613	0.9997	0.0118
3	1.00	1.2572	4.0551	-12.0047	7.5446	0.9990	0.0756
4	0.95	1.2511	3.3097	-9.6712	5.6858	0.9996	0.0596
5	0.90	1.2883	2.2877	-6.4952	2.8517	0.9993	0.0690
6	0.85	1.4662	0.1468	-0.5373	-2.0554	0.9995	0.0156
7	0.80	1.1321	2.5606	-7.5874	5.0412	0.9997	0.0134
8	0.75	1.3177	0.2951	-0.5273	-1.8117	0.9996	0.0140
9	0.70	0.9331	3.3100	-9.4915	7.1585	0.9998	0.0208

注: 1) 见式(5); 2) 见式(7)。

由表 2 可知, 尽管一元多项式回归模型的精度很高, 但使用起来仍不方便。因为不同的折合相对转速, 需要采用不同的模型; 更重要的是, 当实际的折合相对转速不在表中给出的数值上(如 1.03), 所建模型无法使用。目前, 对于转速变化的离心压缩机, 仍采用一元回归模型^[2~4]。因此, 有必要探索、建立离心压缩机压缩比与折合流量、折合相对转速关系的二元回归模型。

二、建模与参数优化

根据表 1 压缩比与折合流量、折合相对转速关系数据的变化规律, 把离心压缩机压缩比与折合流量、折合相对转速关系写成如下二元几何模型的形式:

$$\varepsilon = a_1 Q^{a_2} n^{a_3} \tag{3}$$

式中: n 表示折合相对转速; a_1 、 a_2 、 a_3 分别表示模型回归参数; 其余符号意义同上。

几何模型式(3)是非线性模型, 可将模型线性化, 用线性最小二乘法求解回归参数。根据线性最小二乘法的算法^[5]及表 1 数据, 可获得压缩比与折合流量、折合相对转速关系的几何模型:

$$\varepsilon = 2.7481Q^{-0.1410}n^{0.1572} \tag{4}$$

利用式(4), 可得表 3 所示的拟合值。

表 3 由几何模型式(4)得到的拟合数据表

折合 相对转速	不同折合流量下的压缩比				
	250	300	350	400	450
1.10	1.2809	1.2484	1.2216	1.1988	1.1791
1.05	1.2716	1.2393	1.2127	1.1901	1.1705
1.00	1.2619	1.2299	1.2034	1.1810	1.1615
0.95	1.2517	1.2200	1.1938	1.1715	1.1522
0.90	1.2411	1.2097	1.1837	1.1616	1.1425
0.85	1.2300	1.1988	1.1731	1.1512	1.1322
0.80	1.2184	1.1875	1.1619	1.1403	1.1215
0.75	1.2061	1.1755	1.1502	1.1288	1.1102
0.70	1.1931	1.1628	1.1378	1.1166	1.0982

为了保证模型使用的可靠性, 应对几何模型式(4)进行检验。检验指标^[5]如下。

(1) 相关指数: 所建模型拟合效果的重要指标。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2}{\sum(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2} \tag{5}$$

式中: ε 表示压缩比实际值; $\bar{\varepsilon}$ 表示压缩比实际值的平均值; ε_i 表示模型的拟合值。显然, $R^2 \leq 1$, R^2 值越接近 1, 拟合效果越好。

(2) 均方误差: 其值越低, 拟合准确度越高。

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum(\varepsilon - \varepsilon_i)^2 \tag{6}$$

(3) 平均误差: 其值越低, 拟合精确度越高。

$$PW = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right| \tag{7}$$

(4) 最大误差: 其值越低, 拟合精确度越高。

$$ZW = \max \left(\left| \frac{\varepsilon - \varepsilon_i}{\varepsilon} \right| \right) \tag{8}$$

对模型式(4)的 4 项指标检验可知, 相关指数为 0.7661, 均方差为 0.0011, 平均误差为 2.207%, 最大误差为 5.619%, 表明实际值与拟合值差别较大, 模型式(4)不能用于工程计算; 也表明用线性最小二乘法拟合非线性模型的效果较差, 必须寻求其他方法来拟合非线性模型。

由于最优化方法中的 Levenberg-Marquardt 法^[6](简称 L-M 法)具有快速、准确搜索非线性模型未知变量的优势, 对模型形式要求不严, 只要能求一阶偏导数(Jacobian 矩阵), 就能迅速搜索到模型回归参数的最优值。因此, 笔者采用 L-M 方法优化式(3)中的 a_1 、 a_2 、 a_3 。

根据 L-M 方法优化步骤及表 1 数据, 可获得压缩比与折合流量、折合相对转速关系的几何模型:

$$\varepsilon = 2.849Q^{-0.1423}n^{0.3267} \tag{9}$$

利用几何模型式(9), 可得表 4 所示之拟合值。

表 4 由几何模型式(9)得到的拟合数据表

折合 相对转速	不同折合流量下的压缩比				
	250	300	350	400	450
1. 10	1. 3283	1. 2943	1. 2662	1. 2424	1. 2217
1. 05	1. 3083	1. 2748	1. 2471	1. 2236	1. 2033
1. 00	1. 2876	1. 2546	1. 2274	1. 2043	1. 1843
0. 95	1. 2662	1. 2338	1. 2070	1. 1843	1. 1646
0. 90	1. 2440	1. 2122	1. 1859	1. 1635	1. 1442
0. 85	1. 2210	1. 1897	1. 1639	1. 1420	1. 1230
0. 80	1. 1971	1. 1664	1. 1411	1. 1196	1. 1010
0. 75	1. 1721	1. 1421	1. 1173	1. 0963	1. 0780
0. 70	1. 1460	1. 1166	1. 0924	1. 0718	1. 0540

从模型式(9)的检验结果可知,用 L-M 优化方法搜索几何模型式(3)回归参数的效果明显改善,相关指数为 0. 9503,均方差为 0. 0002,平均误差为 1. 050%,最大误差为 2. 513%;表明用 L-M 优化方法搜索回归参数的效果比用线性最小二乘法好,能准确地描述压缩比与折合流量、折合相对转速关系的变化规律。

据表 1 压缩比与折合流量、折合相对转速关系数据的变化规律,还可把离心压缩机压缩比与折合流量、折合相对转速的关系写成如下广义多项式模型:

$$\varepsilon^2 = a^1 + a^2Q^{a^3} + a^4n^{a^5}$$

(10)

根据 L-M 方法的优化步骤及表 1 数据,可获得压缩比与折合流量、折合相对转速关系的广义多项式模型:

$$\varepsilon^2 = 1. 2226 - 7. 1802 \times 10^{-9}Q^{2. 8712} + 0. 4487n^{2. 730}$$

(11)

利用广义多项式模型式(11),可得表 5 所示拟合值。

从检验结果可知,广义多项式模型式(11)的相关指数为 0. 9662,均方差为 0. 0002,平均误差为 0. 811%,最大误差为 2. 701%;表明广义多项式模型式(11)也能准确地描述压缩比与折合流量、折合相对转速关系的变化规律。

三、结 论

(1)经检验后可知,本文建立的几何模型、广义多项式模型用 L-M 优化方法能快速、准确搜索到离

表 5 广义多项式模型式(11)得到的拟合数据表

折合 相对转速	不同折合流量下的压缩比				
	250	300	350	400	450
1. 10	1. 3236	1. 3092	1. 2893	1. 2628	1. 2285
1. 05	1. 2966	1. 2819	1. 2616	1. 2345	1. 1993
1. 00	1. 2713	1. 2563	1. 2355	1. 2078	1. 1719
0. 95	1. 2477	1. 2324	1. 2112	1. 1830	1. 1463
0. 90	1. 2258	1. 2102	1. 1886	1. 1598	1. 1224
0. 85	1. 2056	1. 1898	1. 1678	1. 1385	1. 1003
0. 80	1. 1871	1. 1710	1. 1487	1. 1189	1. 0800
0. 75	1. 1703	1. 1540	1. 1313	1. 1010	1. 0615
0. 70	1. 1552	1. 1386	1. 1157	1. 0849	1. 0448

心压缩机压缩比与折合流量、折合相对转速变化关系的最优回归参数;实现了离心压缩机不同折合流量、折合相对转速下压缩比的准确计算,这为输气干线的自动化设计和运行管理提供了建模方法和更准确、可靠的压缩机数学模型。

(2)对于相同的几何模型,用 L-M 优化方法搜索模型回归参数的效果比用线性最小二乘法好,相关指数从 0. 7661 提高至 0. 9503,最大误差从 5. 619% 下降至 2. 513%。

(3)本文建模和优化方法能将离心压缩机多个不同折合相对转速下压缩比-折合流量的一元多项式回归模型综合成一个二元回归模型,使计算更为简捷、方便。

参 考 文 献

1 苗承武等编译. 干线输气管道设计和管理. 北京:石油工业出版社,2003

2 [前苏联] CA 博布罗夫斯基等著,陈祖泽译. 天然气管路输送. 北京:石油工业出版社,1985

3 姚东等编著. MATLAB 命令大全. 北京:人民邮电出版社,2000

4 姚春东. 离心式压缩机调速运行的节能率计算及优化. 压缩机技术,2003; 23(6)

5 费业泰主编. 误差理论与数据处理(第 5 版). 北京:机械工业出版社,2004

6 袁亚湘,孙文瑜著. 最优化理论与方法. 北京:科学出版社,1997

(收稿日期 2002-07-30 编辑 居维清)

Power, Pressure, Pulsation flowing, Control, Measure

Tan Ping (*Doctor*) was born in 1965. Add: Nanjing, Jiangsu (210096), China Tel: (025) 83792525-8322 E-mail: tanping@seu.edu.cn

APPLICATION OF VISUALIZED DISPATCH TECHNOLOGY FOR PIPELINE SYSTEM IN WEST SICHUAN GAS FIELD¹⁾

Tan Yongsheng, Deng Yiping, Li Changjun (West Sichuan Production/Transmission Department of Southwest Oil and Gas Branch, Sinopec). *NATURAL GAS IND.* v. 25, no. 9, pp. 110–112, 9/25/2005. (ISSN 1000–0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: The pipeline emulation technology is the key to improve the scientific level of gas gathering/transmission dispatch, and the economy and safety of pipeline system operation. Here introduced pipeline emulation dispatch is a set of practical techniques developed for design, reformation, and running analysis and dispatch management of pipeline system according to the characteristics of the pipeline system in West Sichuan gas field. Combining with the visualized technology of geographic data, the visualized dispatch technology of pipeline system with pipeline analysis function is developed, which makes the plan, management and operation of pipeline system scientific, visible and efficient. The technology plays important role for gas gathering/transmission/distribution dispatch, maintenance and reformation of pipeline system, boosting program optimization, and line design of new wells etc. in West Sichuan gas field, and guarantees safe operation of gathering/transmission pipeline system in the area.

SUBJECT HEADINGS: Gas transmission pipeline, Visualization, Emulation, Dispatch, Gas field, Application, Result, Sichuan basin, West

Tan Yongsheng (*engineer*) was born in 1970. Add: No. 318, Section 3, North Taishan Rd., Deyang, Sichuan (618000), China Tel: (0838) 8260196 Cell: 13508000587 E-mail: dyp_dy@sina.com.cn

OPTIMIZATION STUDY ON COMPRESSOR MODELS OF GAS TRANSMISSION TRUNK LINE¹⁾

Wang Yuchun, Chen Jindian (Southwest Petroleum Institute), Qin Xinyan (Storage/transmission Pipeline Com., Sinopec), Guo Yi, (South-

west Branch, Sinopec) and Yu Zeqing, (Engineering Design Com., CNPC). *NATURAL GAS IND.* v. 25, no. 9, pp. 113–115, 9/25/2005. (ISSN 1000–0976; **In Chinese**)

ABSTRACT: It is very important to describe the performance curves of centrifugal compressor by mathematical model accurately for the automatization design and management of gas transmission trunk line. It is difficult to describe the performance of centrifugal compressors by models accurately since the adjustable range of rotary speed is wide for centrifugal compressors. Therefore, according to the changing rule of the performance curves of compression ratio/reduced flow rate under the corresponding different rotary speed obtained from the related documents, the geometrical model and the generalized multinomial model is developed for the relationship between the compression ratio and the reduced flow rate and corresponding reduced rotary speed of centrifugal compressors. With Levenberg-Marquardt optimization method to search the unknown variables of non-linear models quickly and accurately, the two models are solved respectively for the recursive parameters. With calculation verification, the optimal recursive parameters of the changing relationship between the compression ratio and the reduced flow rate and corresponding reduced rotary speed of centrifugal compressors can be searched out quickly by the geometrical model and the generalized multinomial model. As for the same geometrical model, the results to search the recursive parameters of the model by Levenberg-Marquardt optimization method are better than that by the linear least square method. The correlative index is improved from 0.7661 to 0.9503 and the maximum error is descended from 5.619% to 2.513%.

SUBJECT HEADINGS: Gas transmission pipeline, Centrifugation, Compressor, Mathematical model, Optimization method, Design, Management

Wang Yuchun (*associate professor, instructor of master candidates*) was born in 1949. Add: Xindu District, Chengdu, Sichuan (610500), China Tel: (028) 83033090 E-mail: wangyc3090@sina.com.cn

INTELLIGENT PIGGING TECHNOLOGY AND APPLICATION FOR GAS PIPELINES¹⁾

Liu Nianzhong, Chen Kaiming (Chongqing Gas Mine of Southwest Oil and Gas Branch, PCL) and Fu Jianhua (Southwest Oil and Gas Branch, PCL). *NATURAL GAS IND.* v. 25, no. 9, pp. 116–118, 9/25/2005. (ISSN 1000–0976; **In Chi-**