

压气机特性线的处理方法研究

邓 军, 张靖煊

(中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

摘 要: 轮机系统部件级模型仿真时,需要基于压气机特性曲线进行插值以获得不同工况下的性能数据。本文利用压比-流量特性曲线中每一条等相对换算转速线上的数据构建中间变量 t ,进一步通过插值方法将不同转速线的变量 t 设置成相同的分布。通过中间变量 t 和压气机转速 n 将压气机特性曲线分割,把压比、流量和效率表示为转速和参数 t 的关系,避免了传统表示方法的缺陷。最后用实例对其进行详细说明,并且验证了方法的有效性。该方法简单明确可操作性强,有一定的应用价值。

关 键 词: 压气机;特性线;插值

中图分类号: TK472

文献标志码: A

文章编号: 1009-2889(2023)04-0028-04

燃气轮机发电系统中,建立起各个部件的数学模型对于整个系统的性能评估、控制系统设计等起着重要作用。获取准确的压气机部件特性是建立燃气轮机部件级模型,以及进一步开展模型仿真的基础。压气机的特性曲线一般由 CFD 或者实验给出。在获得压气机特性曲线后,可以通过多种方式对其进行处理。王新才等^[1]提出坐标转换原理等,在压气机特性图上做出一系列等距离的平行线,获得由流量和压比组成的离散点。赵雄飞等^[2]利用拟合方程确定燃气轮机的部件特性,并提出了5个指标对拟合方程进行检验。房友龙等^[3]对压气机特性曲线进行分步拟合,利用相对误差等多个指标进行评估。谢心喻等^[4]利用三种方法对压气机性能进行预测,对三种预测结果进行了评价。党相懿等^[5]提出了样条曲线的内插算法对压气机特性曲线进行拟合。此外还有学者^[6-8]采用神经网络方法对压气机特性进行拟合。

通常情况下压气机的压比、效率表示成转速和流量的函数关系,或者将流量和效率表示成转速和压比的关系,即:

$$\pi = \pi(n, m) \quad \eta = \eta(n, m) \quad (1)$$

$$m = m(n, \pi) \quad \eta = \eta(n, \pi) \quad (2)$$

式中: π 为压比; n 为转速; m 为流量; η 为效率。常用的压气机压比-流量特性曲线包含若干条等相对换算转速线。在高转速下,当流量接近阻塞时特性线非常陡峭^[9],此时即使是流量的微小变化,也会引起压比的大幅波动,因此无法采用(1)式进行计算;在低转速时,可能出现同一压比对应两个流量的情况,因此无法采用(2)式计算。

本文提出一种压气机特性线处理方法,构造中间变量 t ,对压气机特性曲线进行分割,将压气机特性表示成转速 n 和参数 t 的关系。

1 创建中间变量 t

通常情况下,压气机特性曲线由 CFD 或者实验获得,分为压比-流量特性曲线和效率-流量特性曲线,如图1、图2所示。

图1为不同相对换算转速下压比-流量特性曲线。将某一条等相对换算转速线上从喘振点到流量堵塞点的各个数据点,分别记作 $(m_1, \pi_1), (m_2, \pi_2), \dots, (m_N, \pi_N)$ 。 N 为数据点数。将这些点依次连接起来,每相邻两点间线段的长度为 $L_i (i=1, \dots, N-1)$ 。如图1中 n_3 转速线,长度分别为 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 。可按如下步骤对特性曲线进行分割

收稿日期:2022-12-27 改稿日期:2023-02-12

基金项目:中国科学院洁净能源先导科技专项(XDA21000000)

作者简介:邓军(1989—),男,山东人,硕士,主要研究方向为叶轮机械气动计算,E-mail:dengi@sari.ac.cn;通信作者:张靖煊(1978—),男,博士,主要研究方向为闭式布雷顿循环关键技术,E-mail:zhangjx@sari.ac.cn。

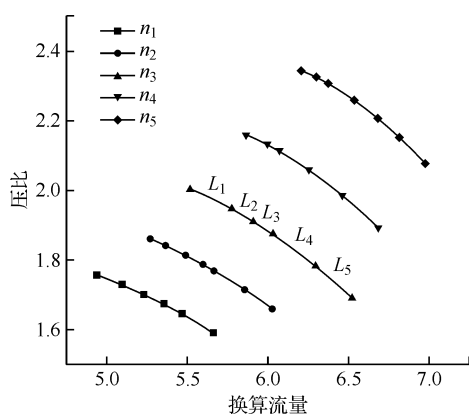


图1 压比-流量特性曲线

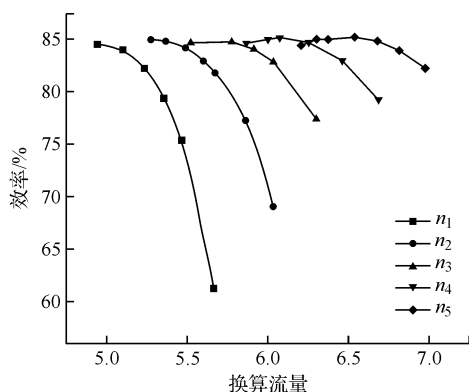


图2 效率-流量特性曲线

离散。

(1) 构建参数 t 。首先对同一条转速线依次求解出相邻两点间线段的长度 L_i , 并求出总的长度, 则参数 t 为:

$$t_j = \begin{cases} 0 & (j = 1) \\ \sum_{i=1}^{j-1} L_i / L & (i = 1, \dots, j-1; j = 2, \dots, N) \end{cases} \quad (3)$$

$$L = \sum_{i=1}^{N-1} L_i (i = 1, \dots, N-1) \quad (4)$$

式中: L 为总长度。 t 的范围是 $[0, 1]$ 。 $t = 0$ 意味着该点位于喘振点上, $t = 1$ 意味着该点位于流量堵塞点上。这样同一条转速特性线上, 流量和压比都是参数 t 的函数, 即 $m = m(t)$, $\pi = \pi(t)$ 。

(2) 对所有等相对换算转速线进行相同的处理, 便得到了参数 t 的分布, t 的取值范围都是 $[0, 1]$ 。

(3) 所有等相对换算转速下设置相同的参数 t 分布。由于各个等相对换算转速线上试验数据点的个数和距离分布不同, 造成参数 t 在各个转速特性线上的分布并不均匀一致。为获得相同的分布, 可在所有转速线上取 $t_{\text{new}} = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1$ 。此时利

用已有的数据点进行插值获取新的数据点, 即:

$$m_{\text{new}} = \text{Interp}(t, m, t_{\text{new}}) \quad (5)$$

$$\pi_{\text{new}} = \text{Interp}(t, \pi, t_{\text{new}}) \quad (6)$$

式中: Interp 代表相应的插值函数; m_{new} 、 π_{new} 为插值后新的流量和压比。这样所有的转速线都有相同的参数 t 的分布。

(4) 对于效率-流量特性线则不需要重复步骤(1)。在不同转速下, 流量、压比和效率是同时给定的。在步骤(1)中, 获得了流量、压比和参数 t 的关系后, 效率和参数 t 的关系也相应地确定了, 即 $\eta = \eta(t)$ 。同样, 对参数 t 进行相同分布设置后, 新的效率值也通过插值获取。

$$\eta_{\text{new}} = \text{Interp}(t, \eta, t_{\text{new}}) \quad (7)$$

式中: Interp 代表相应的插值函数; η_{new} 为插值后新的效率。

(5) 经过上述步骤后, 便得出了压比、流量、效率和参数 t 、转速的关系:

$$\pi_{\text{new}} = \pi(t_{\text{new}}, n) \quad (8)$$

$$m_{\text{new}} = m(t_{\text{new}}, n) \quad (9)$$

$$\eta_{\text{new}} = \eta(t_{\text{new}}, n) \quad (10)$$

2 压气机特性曲线处理实例

本文以文献[10]中的压气机特性曲线为例, 验证该方法的有效性。以等相对换算转速值为 21.82%、33.15%、52.92% 的三条等相对换算转速线作为已知数据, 进行分割离散化, 得出压比、流量、效率和参数 t 、转速的关系。然后利用该关系插值出 28.36%、42.48% 两条转速线上的数据, 并与其原始数据对比。下面仅给出 21.82% 等换算转速线上的数据点处理过程。

(1) 构建参数 t 。利用 21.82% 转换转速线的压比和流量数据, 构造出的参数 t 如表 1 所示。

(2) 设置相同分布的参数 t 。可设置参数 t 的分布为 $t = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1$ 。依据表 1 中的数据点, 利用插值函数获得相应的数据点, 如表 2 所示。

(3) 对 33.15%、52.92% 两条转速线做相同处理。

最终三条转速特性线经过参数 t 的分割后如图 3 所示。利用这三条曲线的压比、流量、效率和参数 t 、转速的关系, 插值得到 28.36%、42.48% 转速特性线。插值得到的数据与原始数据的对比如图 4、图 5 所示。从图中可以看出, 28.36% 转速线插值得到的数据与原始数据基本吻合。42.48% 转速线插值的

表 1 21.82% 转换转速线上参数 t 的分布

点序号	t
NO. 1	0.000 0
NO. 2	0.256 9
NO. 3	0.426 1
NO. 4	0.595 6
NO. 5	0.719 2
NO. 6	0.834 0
NO. 7	0.903 8
NO. 8	0.949 6
NO. 9	0.973 5
NO. 10	1.000 0

表 2 插值数据点

t	π	m	η
0.0	0.536 9	0.147 4	0.650 8
0.1	0.534 3	0.162 4	0.658 3
0.2	0.531 6	0.177 3	0.664 8
0.3	0.528 8	0.192 2	0.670 7
0.4	0.525 8	0.207 1	0.675 7
0.5	0.522 4	0.221 9	0.667 8
0.6	0.518 7	0.236 7	0.648 4
0.7	0.515 0	0.251 4	0.635 5
0.8	0.511 4	0.266 2	0.607 8
0.9	0.506 2	0.280 4	0.529 4
1.0	0.501 0	0.294 6	0.360 4

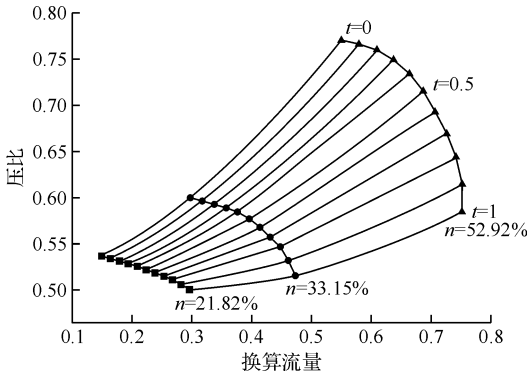


图 3 分割离散化后的特性曲线

压比曲线与原始数据略有偏差,主要是因为已知给定的转速线从 33.15% 变到 52.92%,插值范围较大。

3 结论

通过引入参数 t ,将压气机特性曲线表示成转速和参数 t 的关系,避免了采用转速和流量或者转速

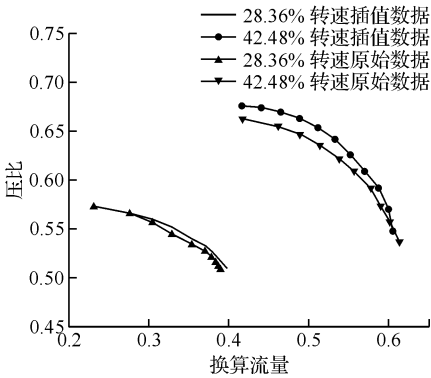


图 4 插值得到的压比与原始数据对比

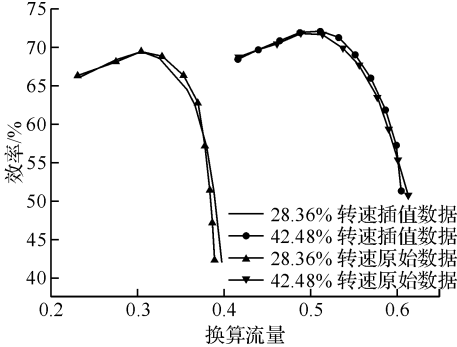


图 5 插值得到的效率与原始数据对比

和压比描述压气机特性曲线时遇到的一些问题。通过一个实例,对该方法进行了详细的阐述。以其中三条特性线作为已知数据,插值出另外两条特性线。把结果与原始数据相比,误差不大,证明了方法的有效性。

参考文献:

[1] 王新才,布占民. 增压柴油机模拟计算中压气特性曲线处理的新方法[J]. 北京交通大学学报, 1984,(02):62-66.

[2] 赵雄飞,刘永葆,贺星. 燃气轮机部件特性方程的拟合研究[J]. 燃气轮机技术,2011,24(3):50-55.

[3] 房友龙,刘东风,贺星,等. 压气机特性曲线精确分步拟合方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019,32(2):21-27.

[4] 谢心喻,鲁业明,王晓放,等. 基于不同压气机特性曲线预测方法的单轴燃气轮机动态性能仿真研究[J]. 热能动力工程, 2021,36(3):26-34.

[5] 党相懿,杨文广,蒋东翔. 基于样条曲线的压气机特性内插算法研究[J]. 航空发动机,2015,41(1):22-26.

[6] 黄伟,常俊,孙智滨. 基于 MEA-BP 神经网络的压气机特性曲线预测[J]. 重庆理工大学学报:自然科学,2019,33(2):67-74.

[7] 梁超,吴新跃. 基于 BP 训练数据选取的压气机特性曲线计算[J]. 计算机与数字工程, 2013,41(10):1593-1595.

[8] 王志涛,李淑英,谭智勇. 基于 BP 和 RBF 神经网络压气机特性曲线拟合方法的研究[J]. 汽轮机技术, 2009,51(2):94-99.

[9] 周桥. 微小型回热循环燃气轮机性能仿真及控制规律优化研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究

所),2020.

京:国防工业出版社,2007.

[10] 骆广琦,桑增产.航空燃气轮机涡轮发动机数值仿真[M].北

Investigation on Processing Compressor Performance Curve

Deng Jun, Zhang Jingxuan

(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: When simulating turbine system by component-level model, we need to process compressor performance curve to obtain performance data at other operating condition by interpolating. A middle parameter t was constructed by using data points on the pressure ratio-mass flow curve and the same distribution of parameter t on different speed curve can be got by using interpolating. Compressor performance curve can be divided by parameter t and compressor rotation speed n , so compressor ratio, mass flow and efficiency can be expressed by the rotation speed and the parameter t . This method avoids some defects of traditional method. An example was used to illustrate the method in detail and verify the validation of the method. This method is very simple and valuable to be carried out.

Keywords: compressor; performance curve; interpolating

.....
(上接第 27 页)

Experimental Investigations of the Performance of Lateral Facing Air-intake System in a Marine Gas Turbine

Li Qingfeng, Hu Juanjuan, Niu Maosheng, Sui Pingyang

(China Ship Development and Design Center, Shanghai 201108, China)

Abstract: Compared to traditional structure, lateral facing air-intake system is much more sensitive to the environmental conditions, such as air-intake velocity or directions, which have significantly impact on overall performance. This paper investigated experimentally the influence of air-intake direction on lateral facing air-intake system in a large marine gas turbine. A scale model of the whole intake system was built, loss parts were also included, such as filter, plenum chamber and silencer. Five different air-intake directions were simulated with corresponding intake guide device. Detailed flow field measurements were made on seven critical planes in all the cases. The results indicate that air-intake direction significantly affects the overall performance of air-intake system. The total pressure loss is minimum when the air-intake direction is vertical to the shutter. Front parts of the system, such as shutter, filter and plenum chamber, are much more influenced by air-intake direction than the back parts. Meanwhile, flow distortion on the outlet plane of the system is also influenced by air-intake direction, but the variation tendency is almost opposite to that of total pressure loss. Based on the experimental results, it can be concluded that all the total pressure loss, the distortion and the engine power loss can meet the design requirement under different air-intake directions.

Keywords: lateral facing air-intake system; air-intake direction; experimental investigation; total pressure losses; flow distortion