

文章编号: 1000-8055(2009)05-1136-07

基于抛物线外推的压气机低转速特性研究

王宇¹, 刘建勋², 李应红¹, 郑铁军¹

(1. 空军工程大学 工程学院, 西安 710038;

2. 空军第一航空学院, 信阳 464000)

摘 要: 针对在建立起动过程数学模型时发动机部件低转速特性难以获取的问题, 提出了基于抛物线外推的压气机低转速特性获取方法. 给出了两种型号发动机的压气机外推实例, 结合发动机部件低转速特性外推的合理性判据可知, 所提方法具有较好的准确性和通用性.

关 键 词: 航空发动机; 低转速特性; 起动; 抛物线; 外推

中图分类号: V233.1

文献标识码: A

Research on low speed characteristics of compressor based on parabola extrapolation

WANG Yu¹, LIU Jianxun², LI Yinghong¹, ZHENG Tiejun¹

(1. The Engineering Institute,

Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. The First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang 464000, China)

Abstract: The main difficulty in aeroengine startup procedure lies in lack of component characteristics at low speed. In order to solve this problem, a method of acquiring compressor's low speed characteristics based on parabola extrapolation was studied. According to the examples for compressors of two different types of engines and the reasonable criterion, this method is characterized by exactness and universality.

Key words: aero engine; low speed characteristics; starting; parabola; extrapolation

在航空发动机起动过程数值模拟的研究中, 一个非常重要的问题是获得部件低转速的特性. 但在低转速区, 压气机和涡轮都远离设计工作状态, 作特性受外界随机因素的影响较大, 运用试验手段获取的部件低转速特性, 必须考虑二次流损失、雷诺数、流量的连续性问题等因素的影响, 并需要对试验结果加以修正^[1-3], 这样, 就会造成较大误差, 就很难获取通用的特性^[4,5]. 并且, 由于部件低转速阶段的特殊性, 数值计算也很难获取通用的特性.

目前国内外关于此问题的研究几乎都是采用外推的算法, 即根据已知的高转速部件的特性, 运

用一定的外推算法, 计算出低转速部件的特性. 文献[6]提出了运用通用特性曲线描述起动过程的压气机特性, 该方法依据从多台发动机得来的试验数据和经验关系来确定压气机内的流量、热焓增量和效率等参数. 这种方法比较简单, 但是具体实现过程中需要大量依据人的经验或实验统计结果, 没有理论上的依据. 文献[7]提出了运用逐级叠加法实现压气机特性的外推, 该方法用多项式近似表示逐级压气机的特性, 然后再通过外推这些多项式来获取压气机各级在低转速时的特性. 但分析认为, 该方法从中等流量系数区到低流量

系数区外推时可以得到级压气机特性所需得原始数据,但是极高和极低(分别对应于风车状态和启动状态)的流量系数时,该方法将不再适用.文献[8]提出了运用指数外插法来实现压气机特性的外推,该方法利用了泵类机械低转速区特性相似理论,相似理论把相似的工作特性函数作为转速比的 n 次方的函数,指数 n 的值与所描述的特性有关.但这种方法对具体的发动机实现起来有一定的困难.文献[9]提出在一系列的发动机部件特性试验的基础上,在雷诺数自动模化区内,对于压气机低转速特性,利用设计点性能参数,按照统计规律算出各转速下最大效率点的参数,沿等转速线扩展,进而计算出喘振边界和堵塞边界.该方法存在的主要问题是雷诺数自动模化的假设条件在转速很低时不能成立.本文结合上述研究成果,以压气机为例,在发动机启动过程压气机特性改进描述的基础上,分析了压气机在零转速和低转速下特性特点,提出了一种基于抛物线外推的压气机低转速特性获取方法,并以两种不同型号发动机的高、低压压气机作为实例,验证了该方法的可行性和通用性.

1 压气机特性的一种改进描述

为使压气机特性图更适合于压气机低转速特性的表达和外推计算,文献[4]分析了传统的压气机特性图在效率的取值、数据的读取和特性线的插值等方面存在的问题,提出了一种改进的描述方法.经过改进的压气机特性图使用换算扭矩 T_{qCor} 代替效率 η_c ,使用压气机出口换算流量 W_{a2cor} 代替进口换算流量 W_{acor} ,即

$$\begin{cases} \pi_c = f_1(W_{a2cor}, n_{cor}) \\ T_{qCor} = f_2(W_{a2cor}, n_{cor}) \end{cases} \tag{1}$$

其中 T_{qCor} 和 W_{a2cor} 的表达式分别如下:

$$T_{qCor} = \frac{T_{qC}}{W_a \sqrt{T_{in}^*}} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{l_C/T_{in}^*}{n_{cor}} \tag{2}$$

$$W_{a2cor} = \frac{W_a \sqrt{T_{out}^*}}{p_{out}} \cdot \frac{101325}{\sqrt{288}} = W_{acor} \sqrt{\frac{T_{out}^*}{T_{in}^*}} \pi_c \tag{3}$$

以 A 型发动机的压气机为例,给出了改进前后的压气机特性图的效果对比情况,如图 1 和图 2 所示.

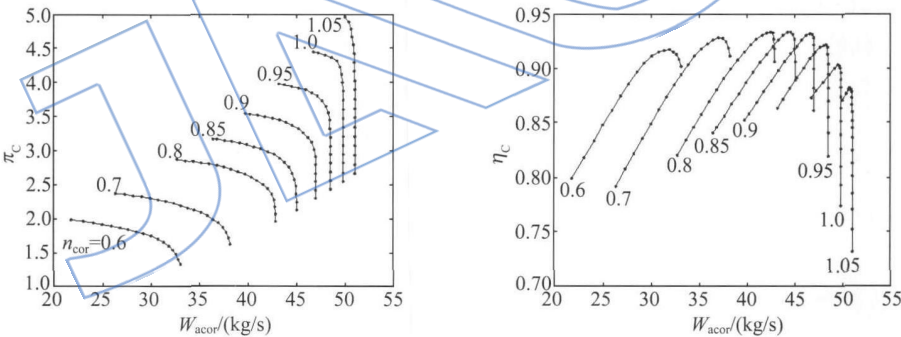


图 1 原始的 A 型发动机压气机特性图
Fig. 1 Original compressor characteristic maps of engine A

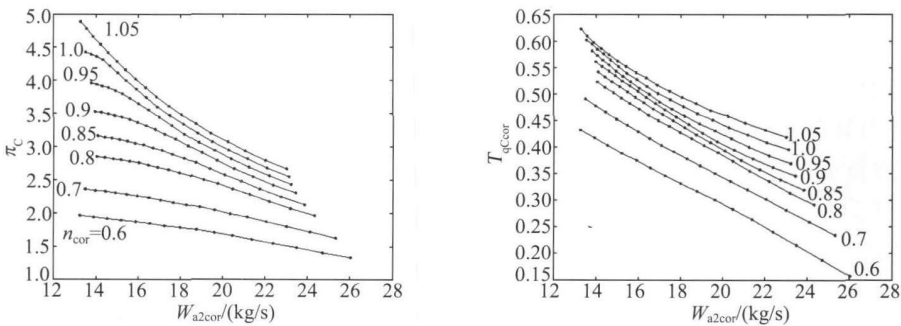


图 2 改进后的 A 型发动机压气机特性图
Fig. 2 Modified compressor characteristic maps of engine A

2 压气机零转速和低转速下特性特点分析

在分析特性特点之前,先说明几个参数的定义:①流量系数 ϕ ; ②温度系数 ϕ_t ; ③压力系数 ϕ_s . 对于压气机来说,它们分别定义如下:

$$\phi = \frac{W_a}{n} \cdot \frac{T_{in}^*}{p_{in}^*} \cdot \frac{101325}{288} = \frac{W_{acor}}{n_{cor}} \tag{4}$$

$$\phi_t = \frac{l_c}{n} = \frac{l_c}{n_{cor}} \cdot \frac{288}{T_{in}^*} \tag{5}$$

$$\phi_s = \phi \cdot \eta_c \tag{6}$$

在一些实际应用中, ϕ , ϕ_t 和 ϕ_s 这三个参数常被用于表达压气机的特性(它们分别对应换算流量、效率和压比).

2.1 压气机零转速下特性特点分析

在压气机特性图上,零转速线通过换算流量等于零压比等于 1 的点,且无论换算流量和压比有多大,压气机功应保持为零.当换算流量不为零时,为了保持压气机转子静止不动,需要给压气机提供一定大小的扭矩(不考虑静摩擦的影响).若换算流量大小适中,则压气机任何一处的气流马赫数均非常小,根据流体力学中的不可压流原理^[10],流过压气机的气流总压损失与动压大小成正比,即满足下式:

$$\Delta p^* = k_p \cdot \frac{1}{2} \rho v_a^2 \tag{7}$$

式中 k_p 为压力损失系数, ρ 为气体密度, v_a 为气流的轴向速度.

由于气流马赫数很低,气体常数 R 和密度 ρ 不变,再根据关系式 $W = \rho A v_a$ (W 为空气或燃气流量, A 为部件截面面积)、 $p = \rho R T$, 经推导出

$$\frac{p_{out}^*}{p_{in}^*} = 1 - k_p \cdot \frac{W^2 T_{in}^*}{p_{in}^{*2}} = 1 - k_p W_{cor}^2 \tag{8}$$

由上式可见,对于一个大小适度的换算流量范围,零转速特性线上的压比和换算流量将成抛物线关系,且在换算流量为零、压比为 1 的点附近抛物线的斜率为负值(流量只能大于或等于零),在此点处的切线斜率为零.另外,分析可知,在零转速状态下,气流施加给压气机动叶的力 F 也与气流的动压大小成正比,即满足 $F = \frac{k_F \cdot \rho v_a^2}{2}$, 根据式(7)和式(8),进一步推导得到

$$T_{qcor} = \frac{T_q}{W_{cor} p_{in}^*} \propto \frac{F}{W_{cor} p_{in}^*} = k_{Tq} W_{cor} \tag{9}$$

可见,在零转速下,压气机的换算扭矩与换算流量成正比关系.需要注意的是,上面的推导结果只有在压气机内部的气流马赫数比较小的情况下才严格成立.如果换算流量很大,则有可能发生流动壅塞,在零转速线上压比和换算流量的关系将逐渐趋于垂直.但在起动过程中,压气机在接近零转速时的换算流量不会很大,所以上述结果可以用来判断压气机特性在零转速或者接近于零转速时的合理性.

经分析,涡轮零转速特性特点和压气机是类似的.

2.2 压气机低转速下特性特点分析

目前对发动机部件特性的研究,几乎都是建立在流动相似理论(即几何相似、流场相似和动力相似)的基础上,但在低转速状态下,流动相似的条件将很难满足.流动相似理论中以动力相似最为严格,要满足此条件,必须保证流场中对应点上的 Ma 和 Re 都相等.在低转速区域,压气机内气流速度相对较慢, Re 较小,惯性力与粘性力之比是必须要考虑的一个因素,这是相似理论在该区域应用的一个最大困难,传统的相似参数在低转速区域不再适用.从国内外公开的研究成果看,对此问题都没有很好的解决,为简化考虑,在研究中都选择高转速区域的相似参数来表达低转速下的压气机特性^[11-12]. 本文对压气机低转速特性的研究也将不考虑雷诺数的影响.

压气机转速较低时,如果换算流量也不是很大,则压气机内部气流马赫数较小,气体流动的压缩性可以忽略.此时流量系数 ϕ 、温度系数 ϕ_t 和压力系数 ϕ_s 对于描述压气机低转速特性将是非常有用的参数.由不可压缩流体的流动相似原理,结合前面对零转速下压气机特性特点的分析,可以得到在低转速区域压气机特性将会呈现如下一些特点:

- 1) 图 $\pi_c = f(W_{acor})$ 中的等换算转速线较为平缓,且随着转速的降低,压气机等换算转速线将越来越平缓,在较大的换算流量范围内,等换算转速线上增压比的变化很小;
- 2) 沿压气机的喘振边界,压气机的换算流量较小,气流压缩性的影响几乎可以忽略,由此可知压气机功与换算转速的平方近似成正比;
- 3) 在图 $T_{qcor} = f(W_{acor})$ 中,低转速区域的各种等换算转速线几乎都是斜率为负的直线(或接近于直线),且相互之间基本上是平行的,其中零

转速线通过原点, 这一特点对图 $T_{qCor} = f(W_{2aCor})$ 和图 $\pi_e = f(W_{a2Cor})$ 同样适用, 其中图 $\pi_e = f(W_{a2Cor})$ 中的零转速线通过 $\pi_e = 1, W_{a2Cor} = 0$ 的点;

4) 不同的等换算转速线上效率最高点的连线称为效率峰值线. 在低转速区域的不可压流假设下, 最高效率值将与换算转速无关, 因此在零转速处, 效率峰值线的切线斜率为零;

5) 流量系数 ϕ 、温度系数 ϕ 和压力系数 ϕ_s 三者的关系在低转速区域受换算转速的影响很小, 尤其是在喘振边界附近, 这 3 个参数的关系几乎与换算转速无关, 即在由这 3 个参数形成的特性图中, 各条等换算转速线非常靠近;

6) 根据流量系数 ϕ 和温度系数 ϕ 的定义, 当压气机换算转速非常低(比如低于 1%) 时, 这两个参数不再适用, 它们的值在零转速时将趋于无穷大;

7) 在不可压流情况下, 若换算转速不变, 则压气机功与气流的轴向速度成线性变化. 因此, 在图 $\phi = f(\phi)$ 中, 低转速区域的等换算转速线几乎是一条直线.

经分析, 涡轮低转速特性特点和压气机是类似的.

3 压气机低转速特性抛物线外推方法

根据压气机在零转速和低转速特性特点, 提出了基于抛物线外推的压气机低转速特性获取方法.

根据流动相似原理, 对于某一单级压气机, 假设静子和转子的气流出口角恒定, 则压力系数 ϕ_s 与流量系数 ϕ 之间将成线性关系. 但在实际的压气机内部, 气流出口角不可能完全保持恒定, 因此 ϕ_s 与 ϕ 之间的关系必然是非线性的. 而在低转速区域, 当不考虑压缩性的影响时, ϕ_s 与 ϕ 的关系几乎与换算转速 n_{cor} 无关, 而且如果不考虑变几何的影响, 压气机的特性从中间转速过渡到低转速(直至零转速)必然是平滑的. 由此我们可以假设, 在 $\phi = f(n_{cor})$ 图(对于涡轮, 则为图 $1/\phi = f(n_{cor})$) 中, 对于某一固定的压力系数 ϕ_s , 从中间转速过渡到低转速的变化曲线为抛物线, 且这条抛物线满足如下关系: 抛物线分别穿过已知特性数据的最

低两条等转速线上的对应点(即两条等换算转速线上压力系数相等的点); 抛物线在零转速处的斜率为零. 根据以上假设, 可以得到抛物线的具体参数, 不同的压力系数 ϕ_s 代表了不同的抛物线. 充分利用这些抛物线, 就可以将压气机的特性从中间转速外推到低转速.

具体外推过程如下:

1) 从已知的部件特性图上选取最低的两条等转速线, 作为特性外推的基础;

2) 计算两条等转速线上不同工作点所对应的压力系数, 找出对应两条等转速线上压力系数相等的点;

3) 在 $\phi = f(n_{cor})$ (或对涡轮 $1/\phi = f(n_{cor})$) 图中绘制若干条等压力系数线(抛物线), 这些等压力系数线均应穿过对应两条等转速线上压力系数相等的两点, 且在零转速处的斜率为零;

4) 根据不同的等压力系数线, 可以计算出低转速区域各不同换算转速对应的流量系数, 由此可以进一步得到不同换算转速下压比和换算流量的关系;

5) 根据前面指出的 $T_{qCor} = f(W_{a2Cor})$ (或 $T_{qCor} = f(W_{aCor})$) 图的特点, 可知在该图中低转速区域各等转速线接近于平行直线, 且零转速线通过原点, 依此可以外推(实际上这里已相当于内插)出低转速区域各不同换算转速下换算扭矩与换算流量的关系;

6) 根据所得到的压比、换算扭矩和换算流量三者之间的关系, 可计算得到低转速区域各等转速线上的效率与换算流量的关系;

7) 以上述压气机零转速和低转速特性特点分析作为判据, 检验外推结果的合理性和准确性, 并进行修正.

所得外推结果的准确度在很大程度上也将取决于已知的特性数据的准确度. 具体的压气机低转速特性外推方法, 如图 3 所示.

需要指出的是, 按上述方法外推出的等换算转速线可能有时不能覆盖全部所需的流量范围, 此时可以根据本文给出的低转速特性在等转速线上的某些特点进行扩展即可.

通过外推算法获得压气机的低转速特性以

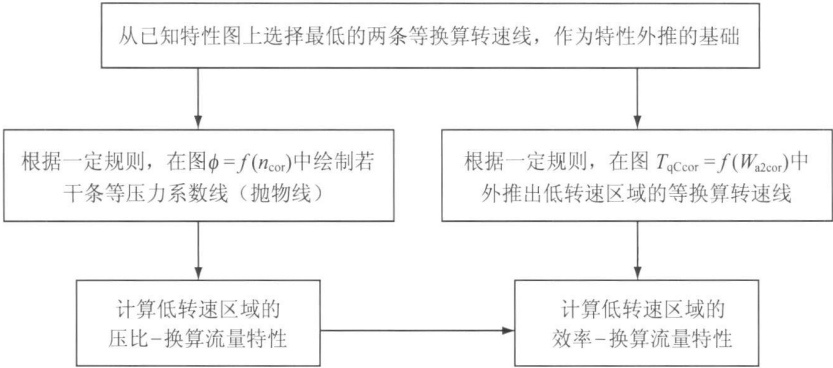


图 3 压气机低转速特性外推方法

Fig. 3 Extrapolation method of compressor low speed characteristic

后,需要检验所得结果的合理性.但由于通常没有相应的试验数据作为对比,给检验过程带来了很大的困难.根据以上的外推过程,结合低转速和零转速下部件特性的特点分析,给出了外推结果合理性的一些判据:

- 1) 在特性图中可以画出各种等值线,例如等温度系数线、等效率线等,这些线都应当是平滑的;
- 2) 随着转速的降低,各等换算转速特性线都应当与部件零转速特性线越来越相似;
- 3) 在 $\phi_s = f(\phi)$ 图中,在很低的转速下每条等换算转速线应当是重合的;
- 4) 效率峰值线在零转速附近的斜率应当非常接近于零.

4 实例验证

以 A 型发动机的压气机作为实例进行外推,验证该外推方法的合理性.首先,利用已知的转速系数为 0.8, 0.7 的性能参数预测 0.6 的情况,并利用已有的参数验证预测模型.这样做,可以结合本文所提出的判据,验证抛物线外推法的质量,结果表明这两条 0.6 转速线基本上是重合的,如图 4 所示.

仍以 A 型发动机的压气机作为实例,外推其他转速下的特性曲线.

在改进描述的基础上,取图 2 中最低的两条等转速线($n_{cor} = 0.6, 0.7$)作为低转速特性外推的基准线,按上述方法对换算转速分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 时的特性进行外推.外推过程完成以后,对各等换算转速线上明显不合理的效率值进行微调(实践表明,在低转速区域,效率的微调几乎不会对其他主要的部件特性参数产生影响),这样可以

得到更为精确的外推结果.外推过程中各等压力系数线在图 $\phi = f(n_{cor})$ 中的分布情况,如图 5(a) 所示.低转速区域的增压比-换算流量特性的外推结果,如图 5(b) 所示.换算扭矩-出口换算流量的外推结果(这一结果是根据 $n_{cor} = 0.6, 0.7, 0.8$ 和 0.85 时的等转速线,采用多项式插值方法得到的,前提是外推出的各条等转速线均假设为平行直线),如图 5(c) 所示.压气机低转速区域的效率-换算流量特性图,如图 5(d) 所示.可以看出,在 $\pi_c - W_{a2cor}$ 图中,各等换算转速线与部件零转速特性线的特点越来越接近;在 $\eta_c - W_{a2cor}$ 图中,效率峰值线在低转速下的斜率逐渐趋近于零.采用本文所提的判据对外推结果的合理性和准确性进行检验,充分表明图 5(b) 和(d) 所给出的结果是正确的,且具有较高的准确性.

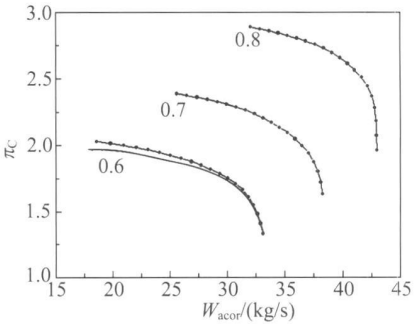


图 4 外推得到的 0.6 转速线和原来的 0.6 转速线对比
Fig. 4 Comparing of maps between extrapolated speed line of 0.6 and original speed line of 0.6

用此方法对 B 型发动机的压气机低转速特性进行了外推,取最低的两条等转速线($n_{cor} = 0.65, 0.7$)作为低转速特性外推的基准线,外推换算转速分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 时的特性,也得到了满意的结果.受篇幅所限,本文仅给

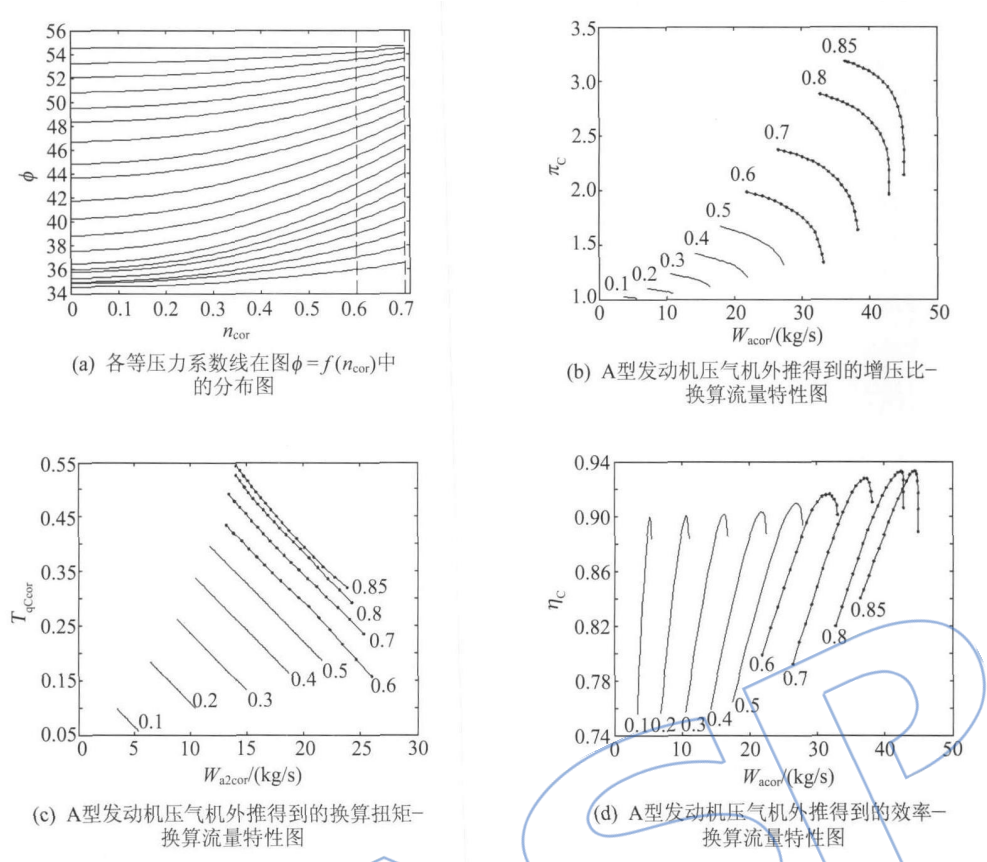
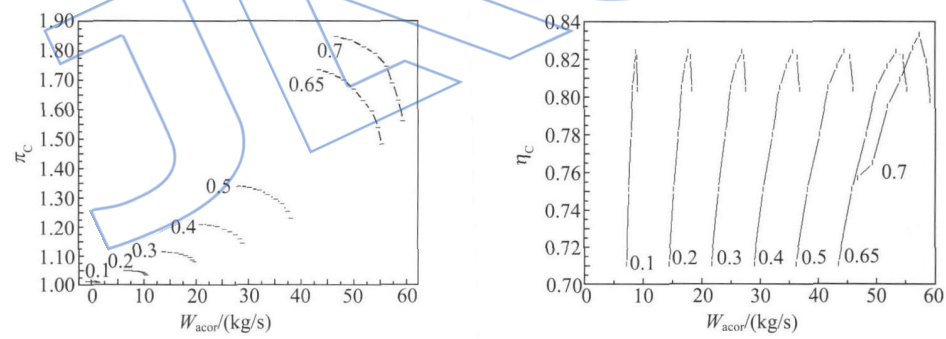


图 5 A 型发动机压气机外推得到的特性图

Fig. 5 Compressor characteristic maps with extrapolated speed lines of engine A



出最后的外推结果, 如图 6 所示.

5 结 论

- 1) 在发动机起动过程压气机特性改进描述的基础上, 提出了一种基于抛物线外推的压气机低转速特性获取方法. 实例结果显示, 所提出的抛物线外推方法是可行的, 结果具有较好的准确性和通用性. 外推结果能够满足建立发动机起动过程数学模型的需要.
- 2) 提出了压气机低转速特性外推结果的合

理性判据, 为外推结果的检验提供了依据.

3) 本文所提出的方法, 也是基于对问题的简化和假设下进行的, 另外本方法外推出的等换算转速线可能有时不能覆盖全部所需的流量范围, 这些问题的都没有很好的解决, 有待进一步研究.

参考文献:

[1] Emery J C, Herring L J, Erwin J R. Systematic two dimensional cascade tests of NACA 65 series compressor blades at low speeds[R]. NACA TR1368, 1958

[2] Westphal W R, Godwin W R. Comparison of NACA 65

- series compressor blade pressure distributions and perform in a rotor and in cascade [R]. NACA TR 3806, 1957
- [3] 常建忠, 丰镇平, 沈祖达. 大负冲角下叶栅二次流特性的可视化试验研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(3): 103-108
- CHANG Jianzhong, FENG Zhenping, SHEN Zuda. Flow visualization study on secondary flow in turbine cascade under large negative incidence [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(3): 103-108 (in Chinese)
- [4] 刘建勋, 李应红, 张东方. 发动机起动过程部件特性的一种改进描述[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(1): 13-16
- LIU Jianxun, LI Yinghong, ZHANG Dongfang. A modified description method for components characteristics of engine starting [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(1): 13-16 (in Chinese)
- [5] 刘建勋. 涡扇发动机起动过程的学习机模型与动态控制研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2005
- LIU Jianxun. Mathematical model of turbofan engine starting based on learning machines and dynamical control research [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2005. (in Chinese)
- [6] Agrawal R K, Yunis M. A generalized mathematical model to estimate gas turbine starting characteristics [J]. Journal of Engineering of Power, January, 1982, 104: 194-201
- [7] De You Y, Zhong Fan M. A dynamic model of turbojet in starting at high altitude [R]. AIAA 83-7045, Sixth International Symposium on Air Breathing Engines, 1983
- [8] Sexton W R. A method to control turbofan engine starting by varying compressor surge valve bleed [D]. Blacksburg V. A.: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001: 14-66
- [9] 聂加耶夫, 费多罗夫. 航空燃气涡轮发动机原理(上册) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984
- [10] 陈延楠. 应用流体力学 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000
- [11] Kurzke J. Preparing compressor maps for gas turbine performance modeling with smooth C8, user's manual [M]. Germany: [s. n.], 2002
- [12] Kurzke J. Preparing turbine maps for gas turbine performance modeling with smooth C8, user's manual [M]. Germany: [s. n.], 2002