

叶轮冲角变化对叶轮效率的影响

邢世凯^{1,2}, 马朝臣¹, 吕伟¹, 陈山¹

1. 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081

2. 河北师范大学职业技术学院, 石家庄 050024

摘要 可调喷嘴涡轮通过调节喷嘴环的转角, 改变涡轮的流通面积, 使涡轮的流量特性和效率特性发生变化, 从而使涡轮与发动机在较宽广的工况范围内保持良好的匹配。叶轮冲角发生变化时, 对叶轮效率影响很大。运用三维数值模拟技术, 对 JK90S 可调喷嘴涡轮叶轮冲角进行了数值计算和流场分析, 研究叶轮冲角变化对叶轮效率的影响。结果表明, 在不同的油门和不同的发动机转速下, 叶轮的最佳效率对应的叶轮入口冲角不同。在发动机 100% 油门开度时, 叶轮的最佳效率冲角约为 -45° ; 在发动机 50% 油门开度时, 叶轮的最佳效率冲角约为 -35° 。小于最佳效率冲角时, 叶轮效率迅速下降; 大于最佳效率冲角时, 在一个较宽广的冲角范围内叶轮能维持高效率, 随着发动机转速的提高, 叶轮高效区的冲角范围逐渐变窄。

关键词 叶轮冲角; 叶轮效率; 涡轮增压器; 试验测量

中图分类号 TK421.8

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.33.004

Effect of Incidence of Impeller on Impeller Efficiency

XING Shikai^{1,2}, MA Chaochen¹, LU Wei¹, CHEN Shan¹

1. School of Mechanical and Vehicular Engineer, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. School of Vocational and Technical, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China

Abstract Variable Nozzle Turbine (VNT) could change the flow area by adjusting the angle of nozzle blade and the mass flow rate and efficiency characteristic to match turbine and engine well in a extensive operating range. By the use of 3D numeric simulation technique, the numerical calculation and flow field analysis on incidence of impeller of JK90S variable nozzle turbine were carried out. As for impeller incidence, the incidence corresponding to best efficiency is different under different throttling and engine speed. At 100% throttling of engine, the incidence of best efficiency is about -45° ; at 50% throttling of engine, the incidence is about -35° . The efficiency of impeller decreases rapidly when the incidence is less than optimum; when incidence is larger than best efficiency incidence, it could maintain high impeller efficiency during an extensive range. With the engine speed increases, the incidence range that corresponding to high efficiency of impeller eventually reduces.

Keywords incidence of impeller; impeller efficiency; turbine supercharger; experimental measurement

0 引言

随着车用发动机朝着高功率密度、高效率和低耗油率等方面的发展, 要求增压器涡轮也向高效率的方向发展^[1-3]。当叶轮的入口气流冲角改变时, 叶轮中的流动损失将发生改变^[3-4]。因此有必要研究配机工况时, 涡轮叶轮的冲角值以及涡轮叶轮能够获得最佳的叶轮效率的冲角值。

从目前公开发表的文献来看, 涡轮叶轮取得最佳效率的冲角值各不相同。朱大鑫^[5]和王延生等^[6]认为直叶片叶轮冲角

在 -12° — $+5^\circ$ 范围内比较好, 这是因为在叶轮通道中, 有哥氏力抑制叶片工作面上的附面层的发展, 使叶片工作面上的气流更不容易产生脱离的缘故。朱梅林^[7]认为径向直叶片的向心涡轮中, 一般应控制冲角在 -10° — $+5^\circ$ 范围内, 最大范围也不要超过 -20° — $+10^\circ$ 。杨策等^[8]认为叶轮最佳效率并非发生在零攻角工况, 而是在 -20° — -30° 之间。

Spence 等^[9]提到 1950 年 Hiatt 和 Palmer 注意到叶轮的效率在宽广的范围内, 效率不会迅速恶化; 并且, 冲角在 -60°

收稿日期: 2012-05-14; 修回日期: 2012-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51006011); 河北省科学技术厅科技支撑基金项目 (11213913D)

作者简介: 邢世凯, 副教授, 研究方向为内燃机增压技术与排放控制技术, 电子信箱: hbsdxsk@163.com; 马朝臣 (通信作者), 教授, 研究方向为内燃机增压技术及排放颗粒控制技术, 电子信箱: mcc1900@bit.edu.cn

-+30°之间变化时,叶轮效率不低于 80%;美国国家航空和宇宙航局(NASA)^[9]设计的叶轮的冲角范围在-23°—+14°之间,他们认为在此范围内叶轮能够获得最佳的效率;文献[9]得出的结论为,冲角在-40°—+40°之间变化时,涡轮叶轮的效率对冲角变化不敏感,效率的峰值出现在-40°—-20°之间,不同的叶轮转速下,对应的最佳冲角值不同。

本文采用三维数值模拟技术对 JK90S 可调喷嘴涡轮叶轮的冲角特性进行研究,发现在发动机大负荷、高转速工况下,涡轮叶轮效率对叶轮入口冲角较为敏感,随发动机工况的不同存在不同的最佳叶轮冲角。小于最佳效率冲角时,叶轮效率迅速下降;大于最佳效率冲角时,叶轮效率下降平缓。

1 数值方法

1.1 网格生成

在对试验所采用的 JK90S 可调喷嘴涡轮进行三维数值模拟时,首先建立三维模型。图 1 为 JK90S 涡轮三维模型,表 1 为 JK90S 涡轮建模基本参数。

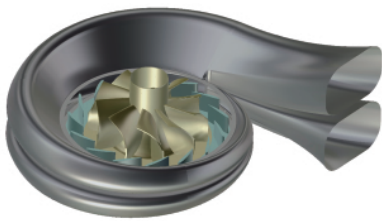


图 1 JK90S 涡轮三维模型
Fig. 1 3D model of JK90S turbine

表 1 JK90S 涡轮建模基本参数
Table 1 Basic specifications of JK90S turbine

参数	数值	参数	数值
轮毂半径 R_1/mm	13.5	蜗壳形式	双通道梨形
蜗壳出口半径 R_2/mm	37.25	叶轮叶片数/个	10
蜗壳出口管路 半径 R_3/mm	40	喷嘴叶片数/个	15
叶轮入口半径 R_4/mm	41.75	叶轮入口角	直叶片
喷嘴叶片转轴 中心半径 R_5/mm	50.5	喷嘴叶片上下 端面间隙/mm	0.2
梨形出口半径 R_6/mm	61.5	叶轮叶顶 间隙/mm	0.6
转静子交接面 1 半径 R_{a1}/mm	58	叶轮轮背 间隙/mm	1
转静子交接面 2 半径 R_{a2}/mm	44.35		

模拟计算的区域为单叶轮,计算网格如图 2 所示。把第 2

个转静子交接面 R_{a2} 设置为入口,叶轮轮毂端面对应的流道位置设置为出口,如图 2(a)所示,生成的叶轮固壁网格如图 2(b)所示。总网格数 394681,共分成 9 块,最小正交性 22.61,最大网格长宽比 307.42,最大网格延展比 2.60。

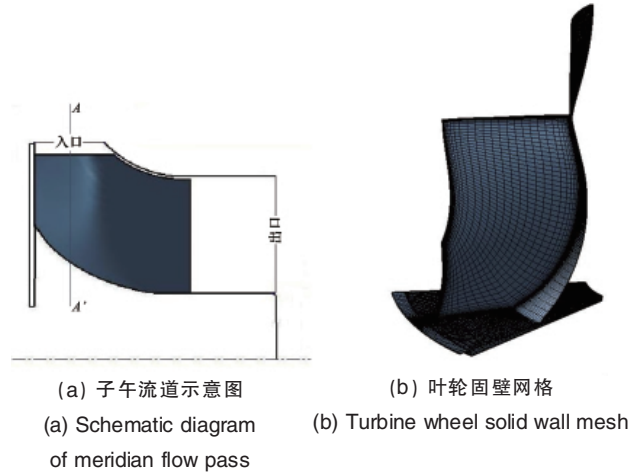


图 2 叶轮网格

Fig. 2 Turbine wheel mesh

1.2 求解程序

数值计算采用 NUMECA 软件包,求解三维定常 Navier-Stokes 方程。应用格子中心式有限体积法,空间差分采用中心差分格式,时间项为 4 阶 Runge-Kutta 法迭代求解,柯朗数 (CFL)取 1。湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型。计算中采用隐式残差光滑方法和完全多重网格技术以加快收敛速度。

1.3 边界条件

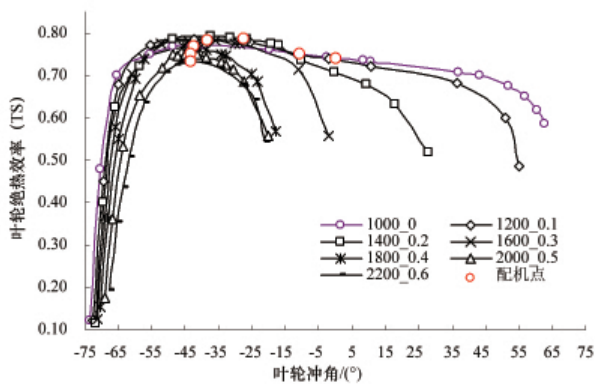
由于研究的是配机工况下叶轮入口冲角对其效率的影响,因此,喷嘴环的入口条件按计算收敛后的配机工况点,导出其 R_{a2} 交接面上的参数来给定。入口给定气流方向、总温和总压;出口给定与配机工况相同质量流量,初始静压。在此基础上,以配机工况点的叶轮气流角为中心,按正负两个方向分别给定不同的气流角,同时保持入口总温、总压和出口质量流量不变进行计算,以此来研究叶轮入口的不同来流冲角对单叶轮效率的影响。

2 计算结果及分析

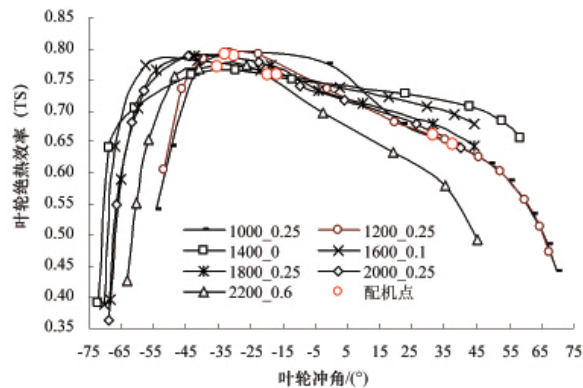
2.1 叶轮效率随叶轮冲角的变化

图 3(a)为发动机 100%油门开度时,叶轮效率随叶轮冲角的变化,结果见表 2。可以看出,在 100%油门开度的配机工况下,叶轮的最佳效率冲角在-45°附近。随着发动机转速逐渐降低(喷嘴开度逐渐变小),叶轮的高效区对应的冲角范围逐渐变大;同时最佳效率随发动机转速的降低,先升高,到 1400r/min 时,最佳效率达到最大值,然后随转速的继续降低,效率开始下降。

在 100%油门开度时,可以看出当前配机的工况点,叶轮效率均比较高(与各自最佳效率差别很小)。



(a) 100%油门开度
(a) 100% throttling of engine



(b) 50%油门开度
(b) 50% throttling of engine

图 3 不同发动机转速工况叶轮冲角对其效率的影响
Fig. 3 Effects of incidence on efficiency under different engine speeds

表 2 发动机 100%油门开度不同转速下叶轮冲角特性

Table 2 Characteristic of incidence under different speeds at 100% engine throttle

发动机转速/(r·min ⁻¹)	最佳效率大约冲角/(°)	最佳效率/%	冲角范围/(°)	冲角区间/(°)	效率波动/%
2200	-44.50	73.12	-48—-34	14	1.26
2000	-44.98	75.06	-48—-33	15	2.50
1800	-45.71	76.80	-57—-33	24	2.85
1600	-44.05	78.38	-53—-29	24	0.98
1400	-45.00	79.20	-49—-19	30	1.86
1200	-45.00	78.68	-56—-26	30	1.45
1000	-45.00	77.20	-55—+8	63	3.90

图 3(b)为发动机 50%油门开度时,叶轮效率随叶轮冲角的变化,可以看出 50%油门开度的配机工况下叶轮的最佳冲角在-35°附近。在配机工况下运行时,配机点(叶轮冲角 30°和 40°附近)叶轮冲角远离最佳冲角位置,叶轮效率较低。

不同的发动机转速下,叶轮的最佳效率对应的叶轮冲角均为负值;不同油门时,最佳效率对应的负冲角值也各不相同。

2.2 流场分析

(1) 相同转速,不同的叶轮入口冲角

选择发动机 50%油门开度,转速 1200r/min,叶轮冲角分别为-32°(叶轮效率 0.794)、-1°(叶轮效率 0.736)和 65°(叶轮效率 0.513)工况的流场进行分析。

图 4 为不同叶轮入口冲角下叶轮进口流线分布,入口截面位置如图 2(a)中的 A-A 截面(喷嘴环叶轮展中截面位置),图 5 为不同叶轮入口冲角下叶轮叶展中截面流线分布,图中箭头方

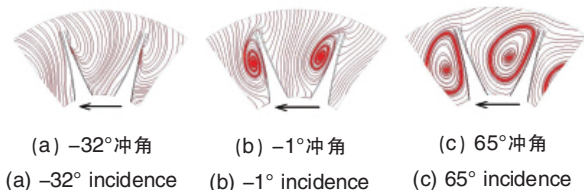


图 4 不同叶轮入口冲角下叶轮进口流线分布
Fig. 4 Streamline distribution at turbine inlet under different incidence

向为叶轮的旋转方向。从图中可以看出,当叶轮入口冲角为 65°时,在叶轮的截面流道中形成了很大的漩涡;在冲角-1°(接近 0°)时,漩涡变小;当叶轮入口冲角为-32°时(接近最佳效率冲角-35°),截面流道中未出现明显漩涡,从而导致 3 种冲角下叶轮效率存在较大差别。图 6 为不同叶轮入口冲角下叶轮叶展中截面熵分布图,从图中可以看出,冲角为 65°时叶轮流道中损失最大,冲角-32°时,损失最小。

文献[8]中采用“逆向涡”来描述此现象,并进行了详细的解释,并说明涡轮叶轮的最佳效率将出现在叶轮冲角为负值的工况。

(2) 不同转速,相同的叶轮入口冲角

在图 3(a)中,可以看出,发动机的转速越高,叶轮的高效

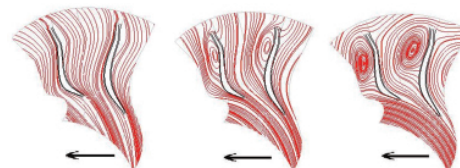


图 5 不同叶轮入口冲角下叶轮叶展中截面流线分布
Fig. 5 Streamline distribution at turbine wheel middle span under different incidence

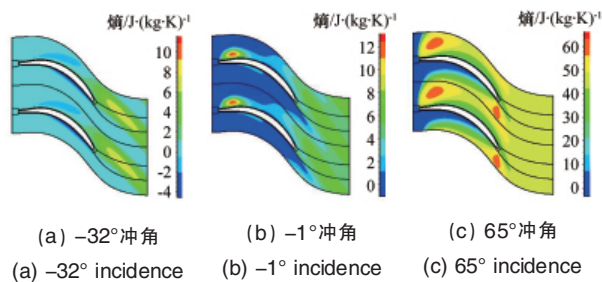


图 6 不同叶轮入口冲角下叶轮叶展中截面熵分布
Fig. 6 Entropy distribution at turbine wheel middle span under different incidence

率区越窄。选择冲角基本相同,发动机转速不同的工况进行分析。所选的两个工况点为:发动机转速 2200r/min,叶轮入口冲角为 -24.3° ,叶轮效率为 0.641;发动机转速 1400r/min,叶轮入口冲角为 -26.4° ,叶轮效率为 0.785,对其流场进行分析。

图 7 为不同发动机转速下叶轮进口流线分布,图 8 为不同发动机转速下叶轮叶展中截面流线分布,由于叶轮的入口冲角基本相同,可以看出在叶轮流道中流线基本相同;图 9 为不同发动机转速下叶轮叶展中截面熵分布图,从图中可以看出,在叶轮的前缘附近,因叶轮入口冲角相同,熵分布基本相同。但在叶轮的尾缘附近,2200r/min 的工况熵增比 1400r/min 时大很多,说明其通道损失更大。

同时,由于涡轮效率的计算采用总对静效率,发动机高转速工况下,流经叶轮的气体质量流量大于发动机低转速时的流量,从而造成发动机高速时叶轮出口的余速损失比低速时大很多。最终造成了叶轮入口冲角基本相同时,两工况点叶轮效率相差 14.4%。

油门位置一定时,随着发动机转速的升高,流经叶轮的气体质量流量逐渐增大,因叶轮入口冲角的变化造成的叶轮通道损失变化加剧,从而使叶轮的高效率区随冲角变化的范围

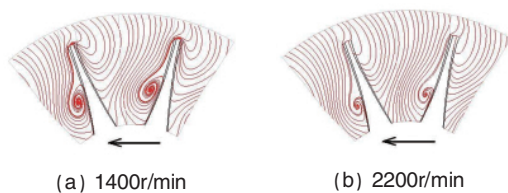


图 7 不同发动机转速下叶轮进口流线分布
Fig. 7 Streamline distribution at turbine inlet under different engine speeds

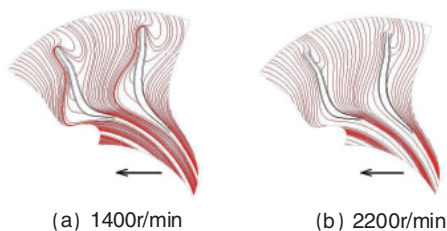


图 8 不同发动机转速下叶轮叶展中截面流线分布
Fig. 8 Streamline distribution at turbine wheel middle span under different engine speeds

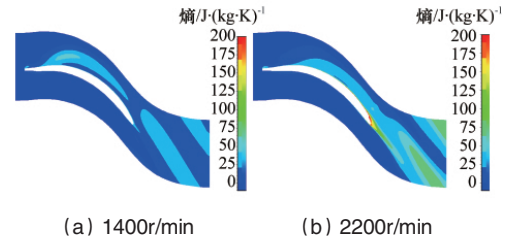


图 9 不同发动机转速下叶轮叶展中截面熵分布
Fig. 9 Entropy distribution at turbine wheel middle span under different engine speeds

变窄。可见,对喷嘴环设计时,需要认真选择设计工况点,可以把设计点选择在发动机大油门高转速工况,并选择合适的喷嘴出口角,使喷嘴环的出口气流满足此时叶轮最佳效率冲角。

3 结论

(1) 不同的油门和不同的发动机转速下,叶轮的最佳效率对应的叶轮入口冲角不相同。在发动机 100%油门开度时,叶轮的最佳效率冲角约为 -45° ;在发动机 50%油门开度时,叶轮的最佳效率冲角约为 -35° 。

(2) 小于最佳效率冲角时,叶轮效率迅速下降;大于最佳效率冲角时,在一个较宽广的冲角范围内叶轮能维持较高效率。随着发动机转速的提高,叶轮高效区的冲角范围逐渐变窄。

参考文献 (References)

- [1] Wallace F J, Howard D, Roberts E W. Variable geometry turbocharging-optimization and control under steady state conditions [C]//The Third International Conference on Turbocharging and Turbochargers, London: ImechE Conference Publications, 1986: 215-226.
- [2] van Nieuwstadt M J, Kolmanovsky I V, Moraal P E, et al. EGR-VGT control schemes: Experimental comparison for a high-speed diesel engine [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2000, 20(3): 63-79.
- [3] 吕伟, 马朝臣, 祁明旭, 等. 内燃机增压器可调涡轮喷嘴环叶片受力状态研究[J]. *内燃机学报*, 2009, 27(6): 546-551. Lu Wei, Ma Chaochen, Qi Mingxu, et al. *Transactions of CSICE*, 2009, 27(6): 546-551.
- [4] 施新, 马朝臣, 鲍捷. JK90S 可变喷嘴涡轮增压器试验研究[J]. *车用发动机*, 2005(6): 56-58. Shi Xin, Ma Chaochen, Bao Jie. *Vehicle Engine*, 2005(6): 56-58.
- [5] 朱大鑫. 涡轮增压与涡轮增压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992. Zhu Daxin. *Turbine supercharging and turbine supercharger*[M]. Beijing: China Machine Press, 1992.
- [6] 王延生, 黄佑生. 车用发动机废气涡轮增压 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. Wang Yansheng, Huang Yousheng. *Turbine supercharging of vehicle engine*[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1984.
- [7] 朱梅林. 涡轮增压器原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982. Zhu Meilin. *Principle of turbine supercharger* [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1982.
- [8] 杨策, 施新. 径流式叶轮机械理论及设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. Yang Ce, Shi Xin. *Theory and design of diameter flow impeller mechanism*[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2004.
- [9] Spence S W T, Artt D W. An experimental assessment of incidence losses in a radial inflow turbine rotor [J]. *Journal of Power and Energy*, 1998, 212(A1): 43-53.

(责任编辑 岳臣)