

文章编号: 1000-8055(2006)01-0025-06

定常吹/吸气控制凸包分离的数值研究

季路成¹, 林峰², Marco P Schoen³

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080;

2 Applied Research Center (ARC)

Indiana Institute of Technology, Fort Wayne, IN 46803, USA;

3 Measurement and Controls Engineering Research Center (MCERC),
College of Engineering, Idaho State University, Pocatello, ID 83209, USA)

摘要: 针对凸包流动分离主动控制开展了参数化数值研究。凸包模型为NASA设计用于流动分离主动控制的内外流通用模型。重点研究运行参数变化时定常吹/吸气影响。首先采用试验数据标定了所开发程序, 然后进行了一系列参数化数值模拟。结果显示: 定常吸气作用明显不同于定常吹气。对于所给定几何模型, 不管吸气流量增加到多大, 吸气都无法消除分离, 而吹气可以做到。详细展示流动结构并讨论了流动机理。

关键词: 航空、航天推进系统; 流动控制; 分离流动; 凸包流动; 计算流体力学

中图分类号: V 231

文献标识码: A

Numerical Investigations of Separation Control of a Hump Model with Steady Suction and Injection

JILU-cheng¹, LIN Feng², Marco P Schoen³

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2 Applied Research Center (ARC),

Indiana Institute of Technology, Fort Wayne, IN 46803, USA;

3 Measurement and Controls Engineering Research Center (MCERC),
College of Engineering, Idaho State University, Pocatello, ID 83209, USA)

Abstract: A series of numerical parametric studies on active control of separation flow over a hump model are presented. The model is a generic model for both internal and external flow, designated by NASA for CFD validation of active separation control. The focus is on the influence of steady suction and injection when a variety of operating parameters are varied. An in-house-use CFD code is first validated against experimental data and other CFD results, followed by a series of numerical simulations. Results show that the behaviors of steady suction are significantly different from that of steady injection. At the given geometry, the suction alone cannot completely eliminate the separation bubble in the flow-field of the hump model regardless of how much suction flow rate is used, but the injection can. The detailed

收稿日期: 2005-01-24; **修订日期:** 2005-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助(50376062)

作者简介: 季路成(1970-), 男, 山东蓬莱人, 中国科学院工程热物理研究所副研究员, 博士, 主要从事计算流体、能源、动力和推进装置气动设计及相关流动理论的研究

flow structure and mechanisms are also presented and discussed

Key words: aerospace propulsion system; flow control; separation flow; hump model; computational fluid dynamics

主动流动控制正成为流体工程领域的研究热点之一。国内外学者正从不同方面在这一领域开展大量研究, Kral^[1]和 Gad-el-Hak 等^[2]进行了比较全面的回顾, 其中分离流控制是个重要主题。许多学者开展了大量数值和试验研究, 获得了分离控制的规律认识, 如Huang 等^[3]关于吹吸气控制 NACA 翼型流动的规律认识。但目前为止, 针对内流的吹吸气控制研究还较少。出于采用流动控制手段继续提高叶轮机性能需求, 本文在程序校验基础上, 对绕凸包带吹/吸气流动进行了初步数值研究, 以清楚内流中定常吹气和吸气影响。

1 凸包绕流简介

凸包绕流算例来自 NASA 关于湍流分离控制的 CFD 校验工作^[4], 其几何相似于 Seifert & Pack^[5]采用的 Glauert-Goldschmied 形凸包, 试验设计保证了凸包绕流是充分发展湍流。65% 弦长处——流动倾向分离的位置, 凸包沿展长开有宽约 1.8 mm 的狭缝以用于吹/吸气。试验标准大气条件下进行, 自由流马赫数为 0.1。试验用凸包展长弦长比为 1.39, 结合凸包弦长 0.42 m, 采用二维模型是流动的很好近似。

2 数值方法

控制方程为二维雷诺平均 N-S 方程, 采用 Wilcox 低雷诺数 $k-\omega$ 湍流模型。

由于本文算例流动极近不可压流动, 为此采用两步 R-K 方法, 系数 α_1 和 α_2 分别为 1.2 和 1.0。采用隐式残值光顺增加数值稳定性, 并用当地时间步长加速收敛。在近壁区线性减小数值粘性以降低数值误差对解的污染。 $k-\omega$ 方程采用一阶迎风 ADI 格式^[6]求解。

进口给定总压、总温和气流角, 出口给定背压。为与试验对比, 调节背压直到自由流马赫为 0.1, 此时雷诺数约为 2.23×10^7 。上壁面取为无粘固壁, 一是由于直接采用 Rumsey^[4]的网格, 该网格在上壁面区是为无粘计算准备的; 另一方面, Rumsey 研究表明, 上壁面取为无粘或有粘条件对结果影响并不大^[4]。安装凸包的下壁面使用无滑移壁面条件, 吹/吸气区与主流区交界面为内部

边界条件。吹吸气区最下端边界条件则视情况而定:

(1) 无吹/吸气时: 按无滑移固壁处理;

(2) 有吹/吸气时: $u = 0, v = c\rho_\infty u_\infty / \rho, c > 0$ 为吹气流量系数, $c < 0$ 为吸气流量系数。

由于网格较密, 尤其吹吸气缝相比凸包尺寸异常狭小导致整场网格尺寸差异大, 再加上基于密度格式求解近不可压流动的困难, 使得求解过程对初场有些敏感。

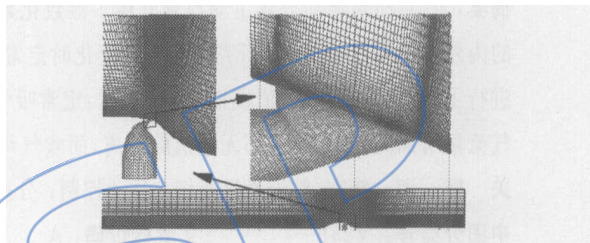


图1 凸包模型和计算网格

Fig. 1 Hump model and grid

计算网格直接取用 NASA 网站公布数据, 主流区网格为 421×109 , 吹吸气区网格为 113×61 。Rumsey^[4]研究表明, 该网格足以给出不依赖网格的解。图1展示了凸包和网格细节。

3 程序校验

对有试验结果两种情形进行数值计算: 一是主流马赫数 0.1 无吹/吸气; 另一是马赫数 0.1、

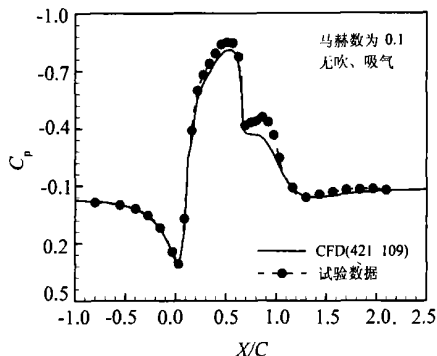


图2 无吸气时压力系数对比

Fig. 2 C_p Comparison (No suction or injection)

整个狭缝吸气流量约为 0.0152 kg/s 。对比参数主要集中在凸包表面压力系数分布和分离, 再附

位置。图2和图3对比了计算和试验结果,可以看出,除前缘驻点附近外,在凸包分离点前半段,计算与试验结果符合较好,而分离点后误差较大。文

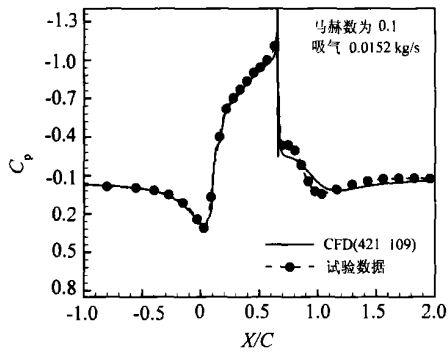


图3 吸气时压力系数对比

Fig 3 C_p Comparison (With suction)

献[4]汇总的其它CFD结果与本文预测一致。因此,现有湍流模型局限下,本文CFD计算能够获得较好的模拟质量。

4 关于绕凸包流动的参数化研究

4.1 开缝吸气情况

对主流速度为0.1和0.25时由零吸气流量至相应于整个缝隙0.08 kg/s的吸气量共17个算例(前者10个,后者7个)进行了数值模拟,最大吸气量分别占主流流量0.83%和0.32%,该参数化研究体现为不同主流速度和吸气量。计算的分离点和再附点位置随马赫数及吸气流量变化示于图4和图5。其中分离点和再附点根据流线图

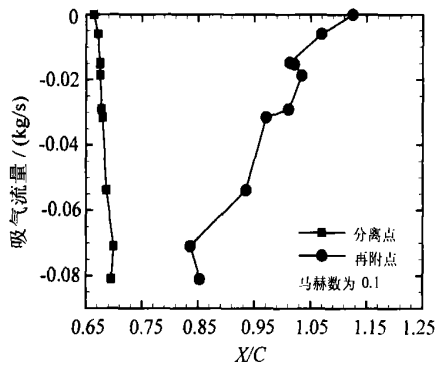


图4 分离、再附位置随吸气量变化

Fig 4 Separation/reattachment positions vs suction rate

判读,判读误差在±0.001内。总趋势上看:随马赫数增加,相同吸气流量下,分离包增大,原因在

于主流速度越大,平稳扩散所需的距离就越长;随抽吸流量越大,分离包越小,但对具有特定缝隙的该凸包而言,当抽气量达到极限时,分离包大小趋于不变;当吸气量增大时,分离包减小速率变小。

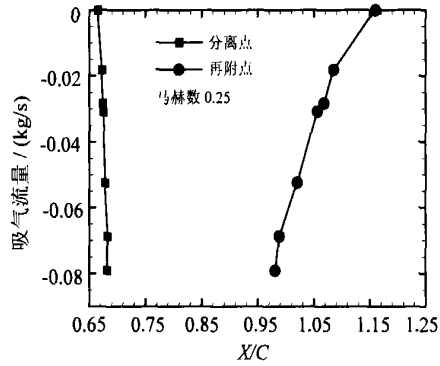


图5 分离、再附位置随吸气量变化

Fig 5 Separation/reattachment positions vs suction rate

4.2 开缝吹气情况

对主流速度为0.1和0.25时由零吹气流量至相应于整个缝隙0.05 kg/s($Ma=0.1$)和0.1 kg/s($Ma=0.25$)的吹气量共41个算例(前者26个,后者15个)进行了数值模拟,最大吸气量均占主流流量0.5%。结果整理示于图6和图7,其中图6两套结果分别是以小吹气流量收敛解作为初场的A情况和以大吹气流量收敛解为初场的B情况,猜测出现这种情况的可能原因是非线性系统滞回现象。由于具有一定相似性,以下仅讨论B

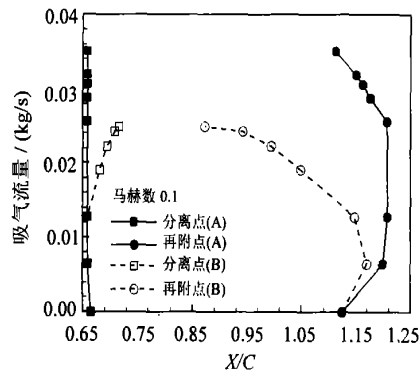


图6 分离、再附位置随吹气量变化

Fig 6 Separation/reattachment positions vs injection rate

情况。图6和图7表明,吹气时分离、再附点位置分布图形式与吸气时大不相同:首先,吹气时,分离点由零吹气量时的0.664变为0.6584处,即分离

点恰在缝隙后边,在吹气量增加到一定值前,分离点几乎维持在此处;流量再继续增加,吹气气流开始折转为物面方向,分离点开始向后移动。关于再附点,其位置则先经历随吹气流量增大而迅速增大,再经在一段吹气流量区域内,再附点位置变化缓慢,最后随吹气量增大,再附点位置减小,

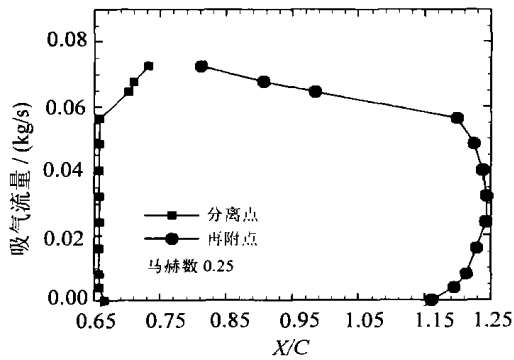


图 7 分离、再附位置随吹气量变化

Fig 7 Separation/reattachment positions vs injection rate

至吹气量大于一定值后,分离包不再存在,这是吹气与吸气的最大不同,吸气时分离无法消除。

5 绕凸包流动吹/吸气影响分离机理的分析

5.1 吸气影响分离的机理分析

以主流马赫数0.1为例,吸气能减小分离,但对这种情况却不能完全消除分离,可由无吹吸气和吸气0.015 2 kg/s的几个图对比对其机理进行分析如下:

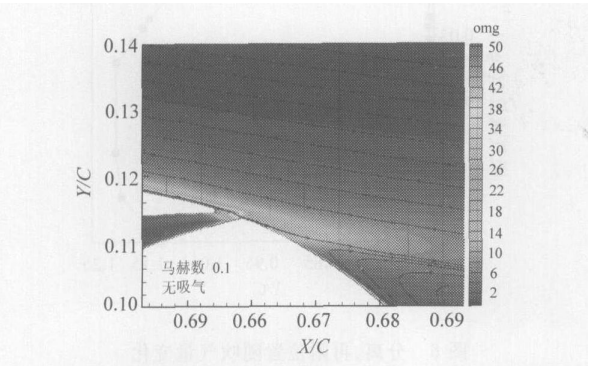


图 8 无吹吸气时等涡量线和流线

Fig 8 Vorticity contour and stream line at zero suction

(1) 图8和图9流线对比表明,有吸气时流线在缝隙附近发生向物面的偏折,这有利于推迟分

离。就涡量而言,可看到,由于吸气,原开缝区高涡量区被吸入孔隙,而开缝区后重新出现高涡量区,说明原来动量已经非常低的附面层低能流团被吸除,而在缝隙后高动量的附面层重新生成,附面层也明显变薄,抵御分离能力得到加强。

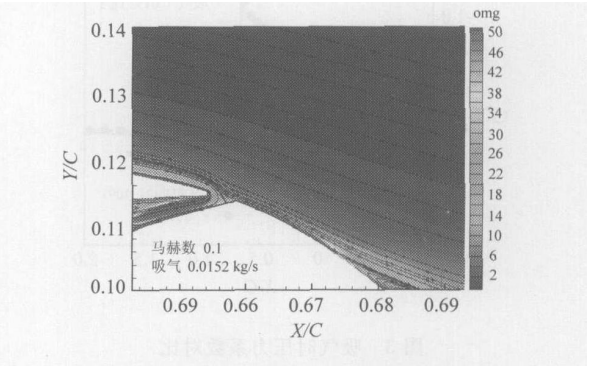


图 9 吸气0.015 2 kg/s时等涡量线和流线

Fig 9 Vorticity contour and stream line at suction rate of 0.015 2 kg/s

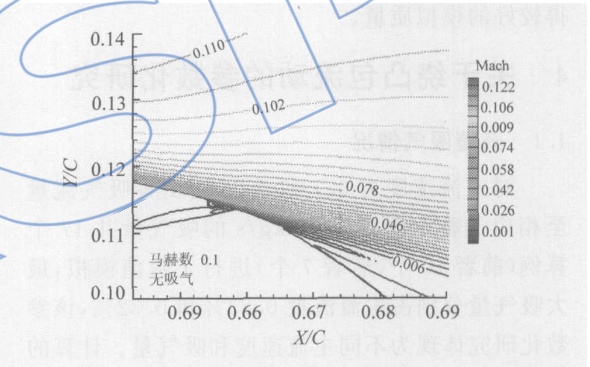


图 10 无吹吸气时等马赫线

Fig 10 Mach contour at zero suction

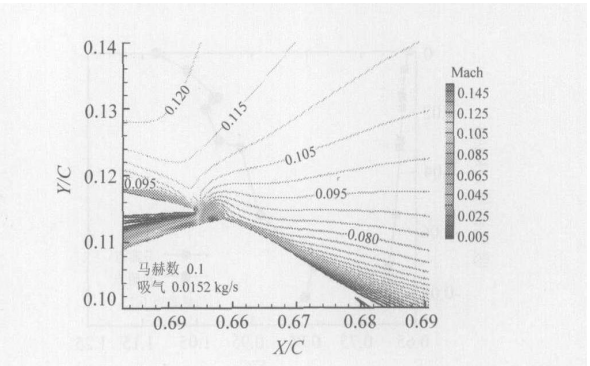


图 11 吸气0.0152 kg/s时等马赫线

Fig 11 Mach contour at suction rate of 0.015 2 kg/s

(2) 图10和图11马赫线对比表明:吸气时,缝隙后附面层确实明显变薄,而且缝隙附近主流速度明显增加,主流发生了有利于抗分离的气流

折转, 增强了抗分离能力。

一般, 对于给定主流速度, 分离包长/高比是一定的, 那么, 凸包流动分离包长度应正比于分离点高度 y , 因此, 分离越晚(y 越小), 分离包越小, 这正应了前文关于吸气量影响分离包尺寸的叙述: 吸气量越大, 分离越晚, 分离包越小。但分离包减小有个限度, 抛开缝隙尺寸限制不谈, 吸气的负堵塞效应不能忽略(注: 本文将由于吹/吸气导致的原流道面积受到等效压缩/扩张称之为气动堵塞)。当从主流吸取越来越多气流以减小分离的时候, 另一方面, 负的流动堵塞使得流动在缝隙后要经历更严峻的局部扩压过程, 这使得流动仍有分离的趋势。二者的平衡最终决定了, 对于本凸包流动, 吸气不能完全消除分离。

5.2 吹气影响分离的机理分析

以主流马赫数 0.1 为例, 吹气影响分离有些复杂: 有分离时, 分离点几乎在缝隙后边界上, 分离包开始随吹气量加大而加大, 然后一定吹气量范围内, 分离大小变化很小, 最后随吹气量加大而迅速减小, 直至消除分离。图 12~ 图 16 展示了吹气影响, 机理认识如下:

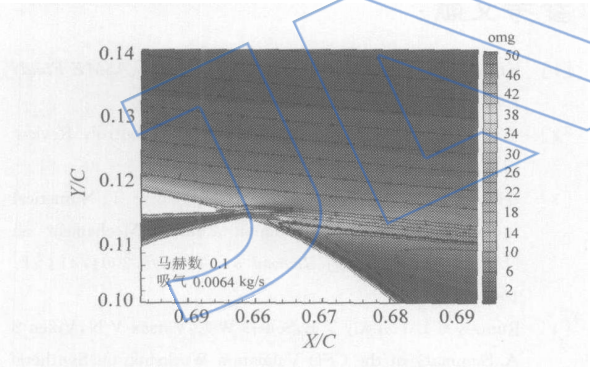


图 12 吹气 0.006 4 kg/s 时等涡量线和流线
Fig 12 Vorticity contour and stream line at injection rate of 0.006 4 kg/s

(1) 对比图 8、图 12 流线表明, 小吹气量时, 流线在缝隙附近发生离开物面的偏折, 促使分离直接发生在缝隙后边界, 使得小吹气量时相对零吹气分离点 y 值更大, 分离包也较大。对比图 12 和图 13 小吹气量范围内两种吹气量下流线和涡量图看出, 大吹气量下, 起始于缝隙的流线比小流量下更偏离物面, 致使分离包更大。同时, 吹气射流速度大小影响射流深入主流的深度, 涡量对比也说明大吹气量时, 射流有更大的动能使它深入主流, 其通过影响分离包高度而影响分离包大小, 致使小吹气量时, 分离包随吹气量增大而增大。但另一

种趋势值得注意, 即吹气增加了局部气动堵塞, 这是个抑制分离的因素。图 4 和图 5 表明, 在吹气射流达到一定流率时, 流动分离点开始向下

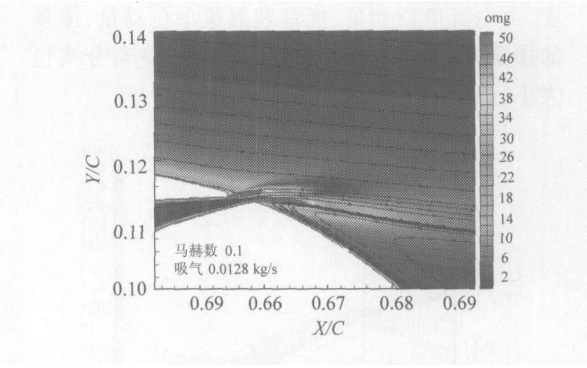


图 13 吹气 0.012 8 kg/s 时等涡量线和流线
Fig 13 Vorticity contour and stream line at injection rate of 0.012 8 kg/s

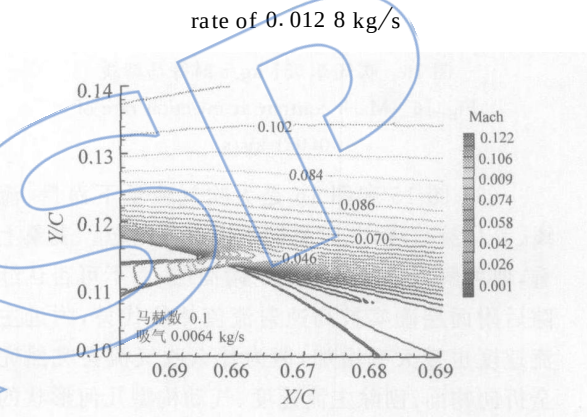


图 14 吹气 0.006 4 kg/s 时等马赫线
Fig 14 Mach contour at injection rate of 0.006 4 kg/s

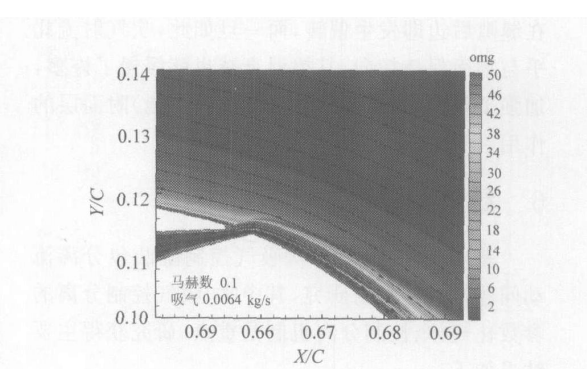


图 15 吹气 0.051 kg/s 时等涡量线和流线
Fig 15 Vorticity contour and stream line at injection rate of 0.051 kg/s

游移动, 即此时射流刚出缝隙就发生了紧贴物面的折转, 这实际是局部气动堵塞影响开始占优。因此, 吹气射流掺混速度和增加的气动堵塞二者共同决定了本凸包流场结构。

(2) 图 10 和图 14 的马赫线对比再次表明小流量吹气对分离的影响: 吹气射流不仅阻断了即将发生分离的附面层, 而更重要在于吹气射流深度(由主流单位动量、能量和射流单位动量、能量的掺混决定)与气动堵塞效应同时决定着分离包大小、形状。

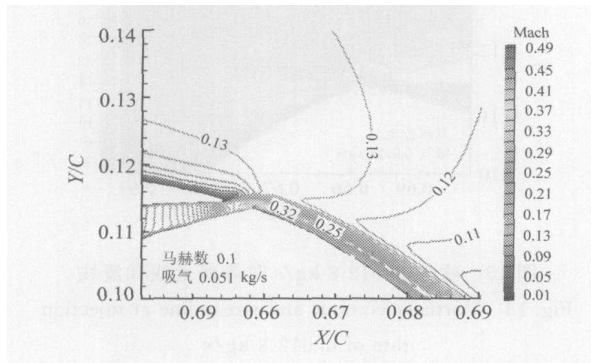


图 16 吹气 0.051 kg/s 时等马赫线

Fig. 16 Mach contour at injection rate of 0.051 kg/s

(3) 图 15 和图 16 是大吹气流量下涡量、流线、等马赫数线, 此时流动不再有分离包。表象上看, 似可解释为吹气吹走了附面层, 而不可否认缝隙后附面层确实被高速射流流体所代替, 附近主流速度也被大幅增加, 但为什么吹气流会突然完全折向物面? 刨除主流速度、气动构型几何形状的影响, 原因只能归结为吹气射流掺混速度和气动堵塞二者的平衡过程: 吹气射流流率足达到一定值时, 其出口即引起足够大的气动堵塞, 使气流在缝隙后边即发生偏转, 而一旦如此, 吹气射流几乎与物面保持切向, 其掺混衰减也就缓慢了许多, 加强了随后一段距离内继续吹除(增能)附面层的作用。

6 结束语

基于程序校验, 对吹吸气控制绕凸包分离流动问题进行了数值研究, 其中吹/吸气控制分离的参数化规律、控制分离机制是重点。研究获得主要结果如下:

(1) 随马赫数增加, 相同吸气量下, 分离包增大, 因主流速度越大, 平稳扩散所需的距离就越长; 抽吸流量越大, 分离包越小。对具有特定缝隙的该凸包, 吸气无法消除分离。

(2) 吹气时分离、再附点位置分布形式与吸气大不相同: 随吹气量增加, 分离点恰在缝隙后边, 继续增加吹气量, 分离点向后移动; 再附点位置则先经历随吹气流量增大而增大, 再经在一段吹气流量区域内, 再附点位置变化很小, 最后随吹气流量增大, 再附点位置减小, 至吹气流量大于一定量后, 流动不再存在分离包。

(3) 吸气影响分离分析中, 吸气抽断原附面层、下游附面层重新发展, 吸气加速局部流动降低附面层厚度与吸气的负气流堵塞效应因素是关键。主流速度影响其间相互作用。

(4) 吹气影响分离的状况仍决定于吹气射流掺混速度和气动堵塞效应二者的平衡。

鉴于 CFD 和湍流模型的发展现状, 尽管我们还不能据此进行准确主动控制, 但至少为主动控制提供了定性指导, 甚至是大容差的定量依据。

参考文献

- [1] Kral L D. Active Flow Control technology[J]. *ASME Fluids Engineering Division Newsletter*, 1999: 3~6
- [2] Gad-el-Hak M, Bushnell D M. Separation Control: Review[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 1991, 113: 5~30
- [3] Huang L, Huang P G, LeBeau R P, Hauser T. Numerical Study of Blowing and Suction Control Mechanism on NACA 0012 Airfoil[J]. *Journal of Aircraft*, 2004, 41(5): 1005~1013
- [4] Rumsey C L, Gatskiy T B, Sellers W L, Vatsas V N, Vinken S A. Summary of the CFD Validation Workshop on Synthetic Jets and Turbulent Separation Control[R]. *IAA 2004-2217, 2nd AIAA Flow Control Conference, June 28 to July 1, Portland, OR*.
- [5] Seifert A, Pack L G. Active Flow Separation Control on Wall-Mounted Hump at High Reynolds Numbers[J]. *IAA Journal*, 2002, 40(7): 1364~1372
- [6] Chima R V. A $k-\omega$ Turbulence Model for Quasi-Three-Dimensional Turbomachinery Flows[R]. *NASA TM-107051, Jan. 1996*