

吸附式低反动度轴流压气机气动设计方法 在多级轴流压气机中的应用

胡应交, 王松涛

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 发动机气体动力研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 随着对吸附式低反动度轴流压气机内部流动细节的逐步深入,进一步完善了多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想,完成了 3 级吸附式低反动度轴流压气机气动设计. 三维黏性的数值计算结果表明:在第 1 级动叶入口叶尖切线速度为 370 m/s 的前提下,通过只在首级静叶和末级静叶中进行附面层抽吸,实现了总压比为 6.1 的 3 级吸附式低反动度轴流压气机气动设计. 附面层总抽吸流量占入口流量的 11.3%. 在不考虑附面层抽吸对流动效率影响的前提下,3 级效率达到 88.1%.

关 键 词: 多级; 轴流压气机; 低反动度; 气动设计; 附面层抽吸

中图分类号: V231; TK474.7

文献标志码: A

Application of design method of low reaction and aspiration axial compressor in multistage axial compressor

HU Ying-jiao, WANG Song-tao

(Engine Aerodynamic Research Center, School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: With further understanding of the internal flow details in the low reaction and aspiration axial compressor stages, the design method of low reaction and aspiration axial compressor used in the three stages was further improved. A verification aerodynamic design of a low reaction and aspiration axial compressor with three stages was carried out. From these three-dimensional viscous numerical results, a compressor was attained with total pressure ratio 6.1 and efficiency 88.1%, without consideration of the influence of the bleed flow at inlet tip tangential speed 370 m/s. Boundary layer suction was used only in the first and third stator. The total bleed flow was around 11.3% of the inlet.

Key words: multistage; axial compressor; low reaction; aerodynamic design; boundary layer suction

在兼顾压气机效率与非设计点性能的同时,进一步提高压气机级压比对于提高航空发动机推质比具有重要意义. 针对未来高负荷压气机的发展,除了新的气动设计理念提出外^[1-3],结合流动控制技术的高负荷压气机气动设计是其主要研究方向,且主要包括如下几方面研究内容:①进一步认识各流动控制技术的作用机理. 从宏观角度出发,综合考虑流动控制技术所带来的损失与

收益,分析流动控制技术对整台压气机性能的影响;从微观角度出发,分析流动控制技术对旋涡结构、分离模式、附面层迁移以及喘振失速等的影响. ②在传统压气机气动设计体系基础之上,开展考虑流动控制技术的设计体系开发. 包括考虑流动控制技术的叶型程序开发,一维、S2 程序开发,损失模型、失速模型的重新建立等. 此外,考虑到流动控制技术能拓宽压气机设计参数的选取范

围,相较传统压气机气动设计体系,需对压气机关键气动参数,如级负荷系数、扩压因子、反动度等参数的选取范围重新标定。③除了着手于平面叶栅或单级压气机性能的研究外,还需考虑采用流动控制技术后,其在多级环境下的参数匹配问题以及对整台压气机性能的影响问题,并在此基础上,进一步考虑其对整台发动机性能的影响。

在众多流动控制技术中,附面层抽吸技术对于提升压气机性能潜力巨大。在这里需提及的是麻省理工学院在附面层抽吸技术方面做出了杰出贡献,取得了大量的开创性的研究成果^[4-9]。总结起来,其研究成果可概括为,开发出了吸附式压气机气动设计体系;结合数值计算与实验测试,完成了数台单级高负荷吸附式压气机与两级无静叶吸附式对转压气机气动设计,并取得了极好的性能。针对附面层抽吸技术,国内也进行了众多研究。国内关于附面层抽吸的研究主要存在如下问题:①重新选取设计参数,进而开展吸附式压气机设计研究的较少,大多在已有的某台压气机中进行附面层抽吸,并得到其性能的改变;②基于数值模拟计算的较多,基于实验研究的较少;③开展系统持续研究的单位较少。

哈尔滨工业大学在附面层抽吸技术方面做出了系统的、持续性的研究,取得了一定的研究成果,但也存在众多问题尚需解决。其主要的研究成果在于:从三维旋涡结构及分离模式出发,提出了附面层抽吸控制大转角扩压叶栅内部流动的作用机理,并对抽吸位置等重要参数提出了一般性的准则^[10];综合考虑附面层抽吸对于流动控制的巨大作用以及在转动部件中进行附面层抽吸所带来的强度以及结构设计等难题,提出了吸附式低反动度轴流压气机气动设计理念^[11-12];结合附面层抽吸,进行了众多大转角平面叶栅的实验研究^[13-14];开展了单级亚声速吸附式低反动度轴流压气机的实验研究^[15],可为后续吸附式压气机的整机实验提供参考。此外,在文献^[11-12]的基础之上,进一步提出了基于动叶出口轴向速度大幅提升的超、跨声速吸附式低反动度轴流压气机气动设计原理,先后完成了系列高负荷吸附式压气机气动设计:在轴向进气前提下,完成了叶尖切线速度为 360 m/s,压比为 2.3,效率为 86.5% 的超声速压气机气动设计^[16];在轴向进气前提下,完成了叶尖切线速度为 370 m/s,压比为 2.5,效率为 87.5% 的超声速压气机气动设计^[17];在轴向进气前提下,完成了叶尖切线速度为 213 m/s,压比

为 1.5,效率为 91% 的亚声速压气机气动设计^[18](考虑到其出口几何角沿整个叶高均小于零,其级特性或许不满足实际应用需求,可通过减少负荷或动叶入口增加导叶提供反预旋以矫正其级特性曲线);完成了两级压比为 5.8,效率接近 88% 的对转压气机气动设计,其中第 1 级动叶入口轴向进气,入口叶尖切线速度为 370 m/s,第 2 级动叶入口叶尖切线速度为 350 m/s^[19]。在取得上述成果的同时,针对附面层抽吸还存在如下问题:①吸附式压气机气动设计体系不完善,以下程序尚处于开发阶段,包括考虑附面层抽吸的叶型设计程序、考虑附面层抽吸的 S_1, S_2 程序、考虑附面层抽吸的参数化网格自动生成程序;②吸附式压气机在非设计工况下的数值计算问题。其中关键问题之一是,在非设计工况下抽吸槽边界条件的确定是一大难题。在真实发动机中,有关吸气控制系统的设计也极具挑战。本文目的在于结合吸附式低反动度轴流压气机气动设计原理,阐述其在多级中的应用方法,并给出 3 级吸附式低反动度轴流压气机的气动设计,流场分析与性能分析,并针对该压气机的不足,指出将来的工作方向。

1 多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想

1.1 文献[20]中多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想分析

在文献^[20]中提出了多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想,其核心思想在于利用各级静叶,为下级动叶入口气流提供正预旋。其目的在于两方面:一是上级静叶片为下级动叶提供正预旋,气流在静叶中的折转幅度减少以降低中间各级静叶片中的扩压因子,从而避免在中间各级静叶中进行附面层抽吸;其二,入口正预旋降低了中间各级的反动度,从而使得动叶中扩压因子降低,从而避免在动叶中进行附面层抽吸。文中还从一维角度出发,通过提高单级压比的措施,使得原型 11 级压气机变为 7 级;并指出该多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想的关键在于如下两方面:①前面 6 级为重复级设计,动叶大转角以实现高负荷气动设计,但静叶中的扩压因子较常规设计提升,因此中间级高负荷静叶设计是该多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计能否可行的关键之一;②最后级动叶与前 6 级相同,但考虑到末级静叶沿轴向出气,相较前 6 级静叶设计难度更大,需结合附面层抽吸以解决其内部流动问题,该

级静叶能否设计成功是多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想能否可行的关键之二。

很显然,上述气动设计理念是结合动叶入口正预旋改变提出的,即便不考虑动叶前后轴向速度等其余参数变化对反动度的影响,以文中11级改型为7级为例,说明上述理论还是存在如下几个不足之处:

1) 吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想在于,在高负荷气动设计条件下,降低反动度使得动叶高效流动,并把流动矛盾集中于静叶,结合附面层抽吸予以解决。静叶中附面层抽吸与低反动度设计两者是不可分割的,缺少任一条件都不是吸附式低反动度气动设计思想的出发点。换言之,之所以采用低反动度气动设计,源自于对附面层抽吸控制静叶流场的信心。文中改型设计使得11级减少为7级的情况下,中间级为重复级,且不进行附面层抽吸,相较改型前,各级动叶中扩压因子降低,各级静叶中扩压因子提升(详细数据可见文献[20])。其主要问题在于:静叶中扩压因子提升且其效率得不到保证(不进行附面层抽吸)的前提下,其反动度存在一最佳值,使得其级效率最高。对于中间级设计,文中给定反动度值是不是最佳值值得商榷,且按照文章设计方法,在静叶中流动问题没有解决的情况下,进行低反动度设计,这是需要改进的;且不应把中间级高负荷静叶设计看做是多级低反动度轴流压气机气动设计能否可行的关键因素之一,这也是需要改进的。

2) 文中利用多级低反动度气动设计思想将原型11级压气机级数降为7级,对于末级而言,可以说是低反动度气动设计思想提升了其级负荷;但对于中间级而言,在保证级效率前提下,其单级负荷提升若得以实现的话,与其说是采用低反动度气动设计思想,还不如说是高扩压因子下高效静叶设计得以实现的结果。反过来,若高扩压因子下高效静叶设计(不采用附面层抽吸)得以实现,同样可实现高扩压因子下高效动叶设计(同样不采用附面层抽吸前提下)以提升其反动度值与动叶中的扩压因子。

3) 由以上两点可得,若中间级为重复级设计,且动、静叶中都不进行附面层抽吸,则中间级必为常规级设计,其反动度选取范围,动、静叶之间的扩压因子都按照常规级选取。而对于文中改型方案,若只在末级静叶中抽吸的前提下,相当于只是在多级轴流压气机中的末级应用低反动度气动设计原理,因此与单级低反动度轴流压气机气

动设计原理并无不同之处。此外,为使得静叶中扩压因子不超过允许值,或许文中11级改型为7级的方案并不一定能实现。

1.2 多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想

1.2.1 单级吸附式低反动度轴流压气机极限负荷探讨

针对单级吸附式低反动度轴流压气机而言,尽管很难在特定圆周速度或相对马赫数下对其所能实现的最大级负荷给予明确划分,但可以肯定的是相较动、静叶中都进行附面层抽吸的吸附式压气机而言,其所能实现的最大压气机级压比的潜力要低些。其根本原因有二:①考虑到抽吸流量以及抽吸方案复杂程度的制约,当静叶入口角度或速度高于特定值时,即使利用附面层抽吸也不能使得静叶高效流动以满足设计需求,从而限制了吸附式低反动度轴流压气机级负荷水平的进一步提升;若需进一步提升级负荷,可适当提升反动度,使得静叶入口气流速度或气流角度降低,但此时,动叶在没有附面层抽吸的情况下,将发生附面层分离,因此,可在动叶中进行附面层抽吸以实现更高级负荷水平的压气机级设计。②依据经验所得,随着动叶转角增大,当其出口几何角沿整个叶高为负值时,其级特性曲线将会发生根本性的变化,即随着背压增加,其级压比降低,这使得压气机级的裕度下降。为保证裕度需求,可减少动叶入口气流正预旋或增加其反预旋以提高压气机级的反动度,在动叶中结合附面层抽吸以进一步提升压气机级负荷,确保中径及中径以上叶高处出口几何角为正值,以使得压气机级工作裕度得以保证(对于第2点,有待进一步验证)。

因此,对于单级吸附式低反动度轴流压气机,其所能实现的最大级负荷对应的状态受4个因素的制约:①动叶高效流动的制约。由于低反动度压气机中,动叶中不进行附面层抽吸。因此,在特定级负荷下,动叶出口轴向速度或入口正预旋的选取,需确保动叶高效流动;②静叶入口参数的制约。其入口马赫数以及气流角大小使得利用合理的附面层抽吸解决其内部流动问题;③叶片高度以及级出口参数的制约;④级的工作裕度的制约。动叶转角过大,使得其出口几何角沿整个叶高为负值时,随着背压增加,其总压比下降,其工作裕度变小。此外,对于此类型特性曲线的压气机裕度计算方法,是否还是和常规算法一样,值得探讨(本文不做说明)。

1.2.2 多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想

结合文献[20]中好的理念,即利用上级静叶出口为下级动叶入口提供正预旋,来说明多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计.对于多级吸附式低反动度轴流压气机,其以何种形式进行,主要取决于设计负荷的大小.本文将以 3 级为例,说明多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想.从 1.2.1 节中已经阐明,单级吸附式低反动度轴流压气机,其所能实现的压气机级负荷是受到动叶效率、静叶入口参数以及压气机喘振裕度等因素限制的.因此本文将从 3 级负荷逐步提升的情况说明多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计思想.

1) 假设 3 级设计负荷,各级均采用常规设计就能实现,则无需在任何级中进行附面层抽吸或低反动度气动设计.

2) 假设 3 级设计负荷提升,此时常规设计使得效率无法满足设计需求.可利用第 2 级静叶为第 3 级动叶入口提供正预旋,或提升第 3 级动叶出口轴向速度,并在第 3 级静叶中进行附面层抽吸,以实现第 3 级的低反动度气动设计,而前面两级可继续为常规级设计,但考虑到第 3 级动叶入口正预旋的需要,需对第 2 级静叶出口几何角做出调整.

3) 假设 3 级设计负荷进一步提升,在有 1 级吸附式低反动度轴流压气机设计的前提下,依旧无法满足设计压比或效率需求,则可利用第 2 级和第 3 级进行低反动度气动设计,即在第 3 级静叶和第 2 级静叶中都进行附面层抽吸,以实现 3 级总的设计负荷.

4) 假设 3 级设计负荷进一步提升,当第 2 级与第 3 级中均采用低反动度气动设计时,依旧无法满足设计压比或效率需求,则必须 3 级中都进行低反动度气动设计,在 3 级静叶中都进行附面层抽吸.

5) 假设 3 级设计负荷进一步提升,即使 3 级都进行低反动度气动设计,3 级静叶中都进行附面层抽吸,也不能实现设计负荷,则需考虑在末级动叶中也进行附面层抽吸.并随着负荷不断提升,直到需在所有叶片列中都进行附面层抽吸.当 3 级设计负荷高到一定程度时,即使所有叶栅列中都进行附面层抽吸,也无法实现给定设计指标.

此外,针对吸附式低反动度轴流压气机在多级轴流压气机中的应用,还有如下几点,值得注意:

1) 随着设计负荷提升,先是首级中采用低反

反动度气动设计思想还是在末级中采用低反动度气动设计思想,这取决于附面层抽吸气体的用途以及吸气系统的设计难度.如果抽吸气体直接排走,那么最好在前面级先应用低反动度压气机气动设计思想,因为此时气体能量低;如果抽吸气体用于涡轮冷却,往往对气体压力提出了要求,则末级静叶中气体拥有更高的压力,故在末级中进行附面层抽吸.

2) 随着级负荷提升,使得动叶中也需进行附面层抽吸的前提下,适当降低反动度,从而降低动叶中吸气系统的设计难度,并保证动叶的强度需求或许也是有必要的.

3) 低反动度气动设计思想,可通过增加动叶入口正预旋或提升动叶出口轴向速度而实现,因此各级动叶入口正预旋的选取,以及轴向速度在级间的分布,需依据实际情况而定.

2 3 级吸附式低反动度轴流压气机气动尝试设计

2.1 3 级气动设计参数选取及设计思路

3 级气动设计参数如下:入口流量为 26.5 kg/s,总压比为 6,3 级效率指标不低于 86%,失速裕度不小于 10%.此外还有如下给定参数:入口叶尖切线速度为 370 m/s,且轴向进气;入口轮毂比为 0.7;入口轴向速度为 170 m/s;入口总温为 288 K;入口总压为 101.325 kPa;末级静叶出口绝对马赫数小于 0.3;末级叶片高度不低于 20 mm.

在 3 级设计过程中,遵循如下在总的设计思路:

1) 先首级,再后两级.考虑到首级为跨声级,且第 1 级入口总温较低,因此充分利用第 1 级的做功能力对于减轻后两级级负荷是有利的.利用超、跨声速低反动度轴流压气机气动设计原理,对首级跨声速级单独设计.以第 1 级跨声速级为基础,根据第 2 级动叶入口预旋需求,决定第 1 级静叶出口的绝对气流角.为充分利用第 1 级的级负荷能力,第 1 级静叶入口沿整个叶高几乎全是超声的,为有效解决静叶激波后的附面层分离,在第 1 级静叶中进行附面层抽吸.

2) 先动叶,后静叶.动叶入口正预旋的选取,动叶出口轴向速度的选取,在实现给定设计负荷前提下,先确保动叶的效率.把流动问题集中于各级静叶.

3) 先抽吸,后不抽吸.对于第 2 级,为考虑到设计指标的可实现性,对于中间级设计,初步设计

时,为有效实现给定设计压比与效率,先对第2级静叶以及第3级静叶中均采用附面层抽吸的方案.在第1级已经给定的前提下,对第2级、第3级之间载荷分配给予优化,利用轴向速度、入口预旋调整,实现第2级中不进行附面层抽吸,只在第3级静叶中进行附面层抽吸的方案设计.

4) 先单级验证,后3级联算.在给定整体参数前提下,包括载荷分布、预旋、轴向速度等参数,先对各级进行验证计算,然后3级方案联算.初步验算时,可先忽略流量的细微差别,重点关注在给定叶尖切线速度下,动叶在高效流动前提下,能否实现给定设计负荷;动叶在高效流动并实现设计负荷前提下,静叶入口参数是否满足设计要求.对于后两级而言,初步给定静叶入口马赫数不超过0.85,入口绝对气流角不超过 65° .

2.2 总体方案确定及3级设计

总体方案确定包括负荷沿级间的分配,轴向速度沿级间的分配,子午流道方案的确定,各级反动度的确定等,而其核心在于各级中径处速度三角形的确定.考虑到第1级是跨声速级,单独设计,其级负荷已经固定.此外,为有效避免在第2

级中进行附面层抽吸,故设计过程中对第2级、第3级级负荷做了反复的调整.由于吸附式轴流压气机设计体系的空缺,在总体方案确立之初,各级设计验证是单独进行的,并以上级叶片的出口参数作为下级叶片的入口参数进行参数匹配.负荷分配的最终结果是第1级实现2.6的级压比,第2级实现1.56的级压比,第3级实现1.5的级压比.各级中径处速度三角形的设计是基于考虑附面层抽吸的一维设计得到的.在初始设计基础上,根据局部流场细节,对子午流道做出了细微调整,故图1中速度三角形是子午流道优化后三维计算周向平均的结果.图中需注意的是动叶入口前轴向速度增加,达到190 m/s;末级静叶出口轴向速度为170 m/s,在末级压气机出口到燃烧室入口段,可通过子午通流调节,进一步减速增压,以满足燃烧室入口参数需求.子午流道及静压分布如图2所示,从图2中可看出,对于末级叶片其子午流道有所扩张,结合附面层抽吸以降低出口轴向速度以实现出口绝对马赫数需求.各级叶片几何参数分别如表1至表6所示.各级叶片弦长及叶片数如表7所示.此外转速为11758 r/min,中

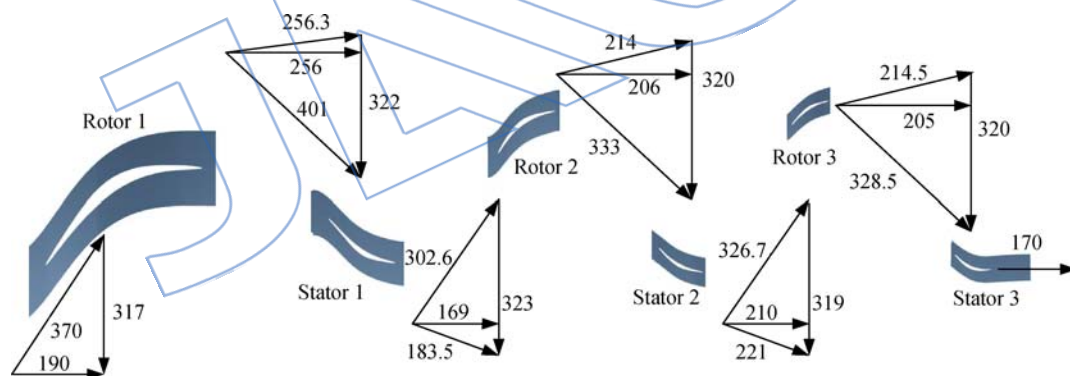


图1 各级中径处的速度三角形(单位:m/s)

Fig. 1 Velocity triangle at mid span of each stage (unit:m/s)

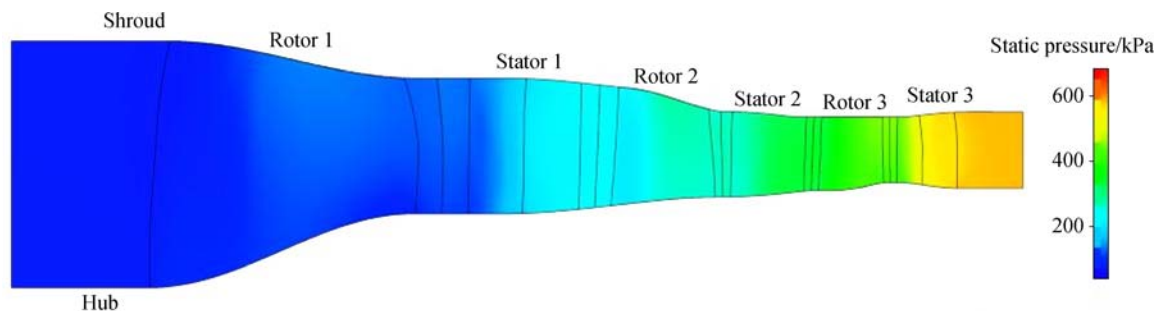


图2 子午流道及静压分布云图

Fig. 2 Meridional channel and contour of static pressure distribution

径处截面叶型如图 1 所示. 三维叶片几何造型及 y^+ 分布如图 3 所示. 第 1 级静叶与第 3 级静叶中抽吸方案示意图如图 4 所示, 每级静叶中都有 3 个抽吸位置, 分别如图中槽 3 所示, 即在轮缘上靠近吸力面处沿流向开抽吸槽; 如图中槽 2 所示, 在叶片吸力面侧, 沿展向开抽吸槽, 并贯穿整个叶高; 如图中槽 1 所示, 在轮毂上靠近吸力面侧沿流向开抽吸槽. 此外, 第 1 级静叶与第 3 级静叶中开抽吸槽位置略有差别, 主要体现在轴向弦长位置处. 各抽吸槽详细抽吸位置及边界条件给定分别如表 8、表 9 所示. 此外表 8、表 9 中抽吸流量是在给定背压下, 在设计点处(此时背压值为 580 kPa)三维计算所得结果. 其中抽吸的宽度在 1.5~2 mm 之间.

表 1 第 1 级动叶出入口几何角、安装角沿叶高分布
Table 1 Distribution of inlet, outlet geometric and stagger angle along blade height of the first rotor

半径/m	入口几何角/ (°)	出口几何角/ (°)	安装角/ (°)
0.210	50.2	−10.6	24.8
0.233	53.0	−9.0	27.0
0.255	55.0	−5.8	29.9
0.278	57.7	−1.0	33.4
0.301	59.7	5.4	37.5

表 2 第 1 级静叶出入口几何角、安装角沿叶高分布
Table 2 Distribution of inlet, outlet geometric and stagger angle along blade height of the first stator

半径/m	入口几何角/ (°)	出口几何角/ (°)	安装角/ (°)
0.237	−48.8	−12	−35.4
0.290	−48.4	−12	−35.2
0.262	−47.9	−12	−34.9
0.275	−47.6	−12	−34.8
0.287	−47.0	−12	−34.5

表 3 第 2 级动叶出入口几何角、安装角沿叶高分布
Table 3 Distribution of inlet, outlet geometric and stagger angle along blade height of the second rotor

半径/m	入口几何角/ (°)	出口几何角/ (°)	安装角/ (°)
0.240	55.1	2.7	28.9
0.251	58.0	6.6	32.3
0.262	59.0	13.3	36.1
0.273	57.3	21.7	39.5
0.284	56.9	24.9	40.9

表 4 第 2 级静叶出入口几何角、安装角沿叶高分布
Table 4 Distribution of inlet, outlet geometric and stagger angle along blade height of the second stator

半径/m	入口几何角/ (°)	出口几何角/ (°)	安装角/ (°)
0.244	−50.3	−10	30.2
0.251	−51.4	−10	30.7
0.259	−50.1	−10	30.0
0.267	−48.8	−10	29.4
0.275	−47.5	−10	28.7

表 5 第 3 级动叶出入口几何角、安装角沿叶高分布
Table 5 Distribution of inlet, outlet geometric and stagger angle along blade height of the third rotor

半径/m	入口几何角/ (°)	出口几何角/ (°)	安装角/ (°)
0.246	46.5	9.6	28.0
0.253	47.3	11.9	29.6
0.260	49.9	14.8	32.4
0.266	50.4	15.3	32.8
0.273	51.9	17.7	34.8

表 6 第 3 级静叶出入口几何角、安装角沿叶高分布
Table 6 Distribution of inlet, outlet geometric and stagger angle along blade height of the third stator

半径/m	入口几何角/ (°)	出口几何角/ (°)	安装角/ (°)
0.249	50.9	5	22.9
0.255	51.4	5	23.2
0.261	51.2	5	23.1
0.267	55.1	5	25.1
0.273	56.9	5	25.9

表 7 叶片数及弦长
Table 7 Blade number and chord length

参数	动叶 1	静叶 1	动叶 2	静叶 2	动叶 3	静叶 3
叶片数	36	60	65	90	100	100
弦长/m	0.113	0.050	0.044	0.031	0.027	0.024

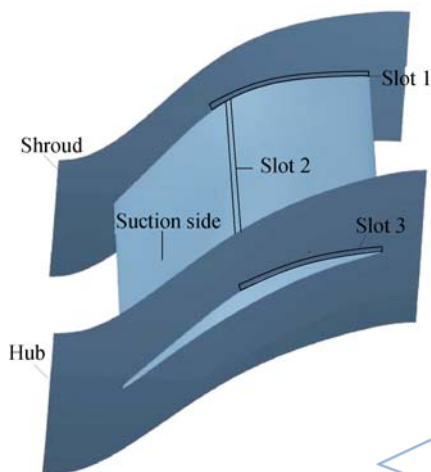
图 3 三维叶片几何造型及 y^+ 分布Fig. 3 Geometry of three-dimensional blade and distribution of y^+ 

图 4 静叶中抽吸方案

Fig. 4 Bleed configuration of stators

表 8 第 1 级静叶中抽吸方案

Table 8 Bleed configuration in the first stator

抽吸槽	各抽吸槽位置	抽吸槽背压/kPa	设计点时抽吸流量/(kg/s)
槽 1	50%~100%轴向弦长	130	0.68
槽 2	70%轴向弦长	115	0.42
槽 3	50%~100%轴向弦长	130	0.61

表 9 第 3 级静叶中抽吸方案

Table 9 Bleed configuration in the third stator

抽吸槽	各抽吸槽位置	抽吸槽背压/kPa	设计点时抽吸流量/(kg/s)
槽 1	50%~100%轴向弦长	500	0.57
槽 2	50%轴向弦长	420	0.27
槽 3	50%~100%轴向弦长	500	0.52

此外,尽管文献[10]中给出抽吸位置确定的一般准则,但本文并没有参考.抽吸位置的确定存

在一定的规律性,即包括在吸力面侧展向开抽吸槽;在轮缘轮毂面上靠近吸力面侧沿流向开抽吸槽,此外,若有必要的话,可沿圆周方向开抽吸槽,但抽吸槽详细位置的确定是值得探讨的.本文并没有做详细的研究,但可以肯定的是抽吸位置以及抽吸流量是与喘振裕度需求以及工况点选取息息相关的.利用非工况点分离起始点位置,从而对工况点抽吸位置以及抽吸流量做出预估,且不考虑吸附式压气机工作裕度的需求,这或许是不合理的.本文中抽吸方案确定是反复调整抽吸位置得到的,且不排除有进一步优化的空间.需进一步指出的是针对超、跨声速压气机的超声速截面,通常观点是在激波位置或激波后紧邻激波位置处进行附面层抽吸.本文作者在研究过程中发现,针对来流马赫数较高的超声速截面而言,上述结论有一定的参考性;但是对于入口马赫数较低的超声速气流,考虑到激波强度相对较弱,激波过后气流动量尚能实现一定程度的气流折转并确保附面层不分离,因此其最佳抽吸位置应该距离入口激波后的某段位置处,而不是在激波位置处或在激波后紧邻激波位置处.

3 3 级数值计算

3.1 3 级数值计算方法

采用 NUMECA 软件的 Fine/Turbo 模块,通过求解 N-S 方程,进行定常流场的数值模拟.利用 AutoGrid5 模块生成网格,拓扑结构采用默认的 4HO 结构形式.3 级总网格数约为 731 万.3 级壁面网格如图 5 所示.相较代数方程 Baldwin-Lomax 模型和双方程 $k-\epsilon$ 模型,Spalart-Allmaras 模型对于激波的描述与实验更为贴近,对总性能参数预估更好,因此 Spalart-Allmaras 模型更适合于超、跨声速压气机计算^[21].故本文湍流模型采用 Spalart-Allmaras 方程模型,差分格式采用中心差分格式,全多重网格法加速收敛.为保证计算精度需求以及湍流模型对 y^+ 值的需求,各级叶栅第 1 层壁面网格厚度为 $1\mu\text{m}$,使得 y^+ 值在 10 以内,如图 3 所示, y^+ 值最大不超过 8.动叶入口边界条件总温为 288 K,总压为 101.325 kPa,入口轴向进气,转速为 11 759 r/min,按照径向平衡方程给定背压出口条件.各抽吸槽位置处给定背压出口边界条件,其背压值如表 8、表 9 所示.按照 Turbomachinery 模式给定初场,初场值对于流动计算能否收敛存在一定的影响.初场给定如下,第 1 级动叶入口背压值为 80 kPa,第 1 级

动叶与第 1 级静叶之间背压初始值为 125 kPa, 第 1 级静叶与第 2 级动叶之间背压初始值为 223 kPa, 第 2 级动叶与第 2 级静叶之间背压为 270 kPa, 第 2 级静叶与第 3 级动叶之间背压为 345 kPa, 第 3 级动叶与第 3 级静叶之间背压给定为 435 kPa.



图 5 3 级壁面网格

Fig. 5 Wall mesh of the three stages

3.2 3 级流场分析

本文重点从宏观角度分析 3 级吸附式低反动度轴流压气机的如下几方面内容: 在最大效率点位置处的各截面相对马赫数云图; 在设计点处(背压为 580 kPa)分析各级反动度、各级效率; 3 级出口总压分布; 周向平均后压比沿叶高分布; 级特性曲线.

图 6~图 8 是该级处于最大效率点(出口背压为 620 kPa)时, 3 级吸附式低反动度轴流压气机各截面处的相对马赫数云图. 结合图 1, 以及各截面相对马赫数云图, 可得到如下结论:

1) 在不进行附面层抽吸前提下, 通过基于动叶出口轴向速度提升的单级低反动度轴流压气机气动设计原理^[22], 通过提高第 1 级动叶出口轴向速度, 确保了第 1 级动叶在大转角前提下的效率. 与此同时, 为实现第 1 级动叶高负荷设计以及确保第 1 级动叶高效流动的前提下, 轴向速度提升使得第 1 级静叶沿整个叶高都超声.

2) 考虑到第 1 级静叶中, 入口马赫数超声, 与此同时需为第 2 级动叶提供正预旋, 为有效控制第 1 级静叶中的附面层分离流动, 实现气流的高效折转与轴向速度的下降, 在第 1 级静叶中进行了附面层抽吸. 从各截面相对马赫数云图看来, 附面层抽吸使得第 1 级静叶中附面层附着良好, 流动得到了有效控制.

3) 结合图 1, 为确保第 2 级动叶中高效流动, 采用了两方面的控制措施. 其一是第 1 级静叶为第 2 级静叶提供了正预旋; 其二是第 2 级动叶出口轴向速度大幅提升, 确保了第 2 级动叶中的效率.

4) 为有效避免在第 2 级静叶中进行附面层抽吸, 同样基于两方面考虑的. 其一, 第 2 级静叶

出口并没有实现轴向出气, 以降低第 2 级静叶中扩压因子; 其二, 同时从图 1 中可看出, 利用子午收缩, 使得第 2 级静叶出口轴向速度相较第 1 级静叶而言, 并没有显著下降. 把降低轴向速度的任务交给第 3 级完成. 这在一定程度上也降低了第 2 级中的扩压因子.

5) 对于末级静叶, 为有效降低轴向速度, 对其轮缘轮毂曲线采取了局部的扩张, 见图 2. 从各叶高相对马赫数云图可看出在末级静叶中, 结合附面层抽吸使得其内部流动良好.

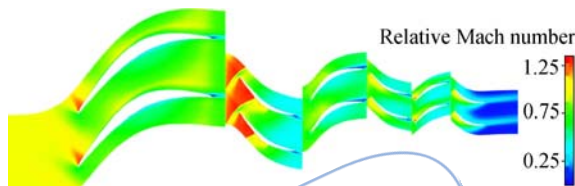


图 6 10% 叶高处的相对马赫数云图

Fig. 6 Relative Mach number contour at 10% relative blade height

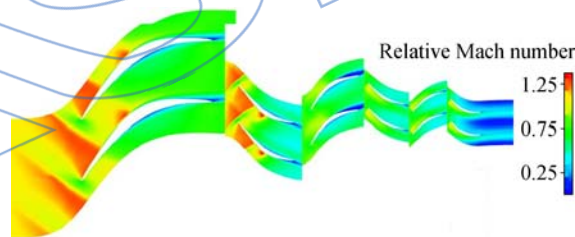


图 7 50% 叶高处的相对马赫数云图

Fig. 7 Relative Mach number contour at 50% relative blade height

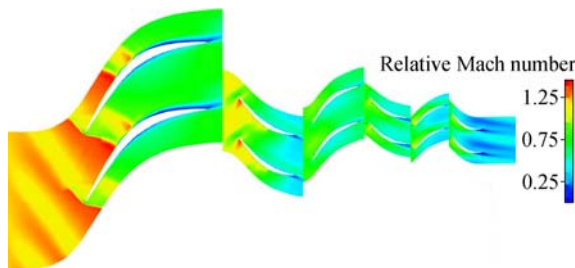


图 8 90% 叶高处的相对马赫数云图

Fig. 8 Relative Mach number contour at 90% relative blade height

本文中效率计算公式如式(1)所示

$$\eta = \frac{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\tau^* - 1} \quad (1)$$

式中 π^* 为出、入口截面总压比; τ^* 为出入、口截面总温比; $\kappa=1.4$, 为等熵指数; η 为效率. 此外, 其中总压比、总温比计算均没有考虑附面层抽吸对级性能的影响, 直接选择各级出口截面上的质量平均总温和总压进行总压比与总温比计算.

本文中喘振裕度的计算公式如式(2)所示

$$S = \left[\frac{\pi_s^* / \dot{m}_s}{\pi_0^* / \dot{m}_0} - 1 \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中 S 是喘振裕度; π_s^* 和 $\dot{m}_s$ 分别为喘振边界上的总压比和流量; π_0^* 和 $\dot{m}_0$ 分别为工作点上的总压比和流量. 考虑到吸附式压气机出入口流量的差别, 本文中计算工作裕度时, 选取的流量为压气机入口流量.

本文中静叶中总压恢复系数计算公式如式(3)所示

$$\sigma = \frac{p_{\text{out}}}{p_{\text{in}}} \quad (3)$$

其中 σ 是总压恢复系数; p_{out} 是静叶出口总压; p_{in} 是静叶入口总压. 本文反动度计算公式如式(4)所示

$$\Omega = \frac{\Delta p_{\text{rotor}}}{\Delta p_{\text{stage}}} \quad (4)$$

式中 Ω 是反动度; Δp_{rotor} 是动叶中静压升; Δp_{stage} 是级中静压升.

在出口背压为 580 kPa 时, 第 1 级动叶压比为 2.669, 级效率达到 92.36%, 第 1 级静叶总压恢复系数为 0.97, 第 1 级级压比为 2.60, 级效率为 90%; 第 2 级动叶压比为 1.61, 级效率达到 93.53%, 第 2 级静叶总压恢复系数为 0.974, 第 2

级级压比为 1.57, 级效率为 88.9%; 第 3 级动叶压比为 1.55, 级效率达到 94.78%, 第 3 级静叶总压恢复系数为 0.97, 第 3 级级压比为 1.5, 级效率为 89.61%. 第 1 级、第 2 级、第 3 级反动度分别为 0.28, 0.34, 0.41. 从上述分析可看出, 对于第 2 级而言, 尽管其动叶效率较第 1 级高, 静叶总压恢复系数也较第 1 级高, 但其总效率却比第 1 级低, 其根本原因在于对第 1 级进行效率计算时, 并没有考虑附面层抽吸的影响.

出口背压为 580 kPa 时, 各级叶片出口总压分布云图如图 9 所示, 图中 PS, SS 分别代表叶片表面压力面侧与吸力面侧; S1, S2, S3 分别代表第 1 级, 第 2 级, 第 3 级静叶; R1, R2, R3 分别代表第 2 级, 第 2 级, 第 3 级动叶; outlet 表示出口. 从图中可看出, 在末级静叶中, 靠近吸力面侧存在附面层分离, 其根本原因在于并没有实现轴向出气, 大约存在 10° 左右的落后角, 当在 3 级最大效率点位置处, 背压为 620 kPa 时, 吸力面侧分离减少, 出口气流接近轴向.

图 10 是在该背压下各级出口总压与入口总压比沿叶高的分布曲线. 除根部与顶部小区域范围内, 在各级出口处大部分叶高内, 总压比分布比较均匀. 从第 3 级出口截面可看出, 除端壁区域内, 各叶高处总压比均在 6 以上; 其出口轴向速度沿叶高的分布如图 11 所示, 出口绝对马赫数为 0.296.

3 级吸附式低反动度轴流压气机特性曲线如图 12 所示, 从图中可看出, 为保证喘振裕度需求,

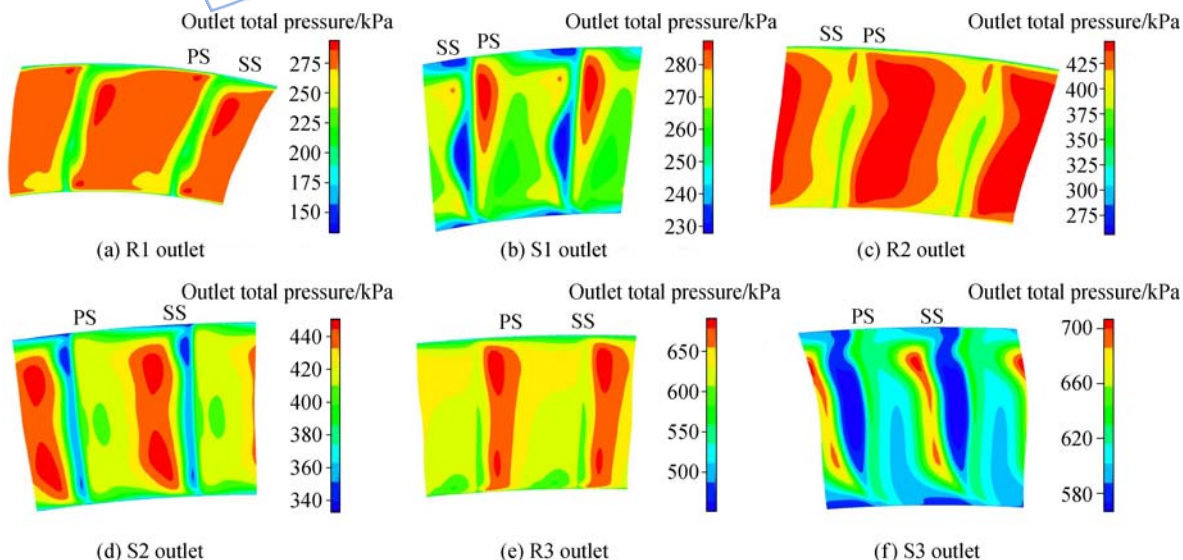


图 9 第 3 级叶片出口总压沿叶高的分布

Fig. 9 Distribution of outlet total pressure along blade height

若选取图中堵塞边界处压比为 6.1045 左右的点作为设计点,此时背压为 580 kPa,喘振裕度可达 9.5%,效率 88.1%。从图中可看出,3 级最大压比可达 6.55,最高效率可达 89.1%。前面给定设计流量为 26.5 kg/s。在设计点处,压气机流量为

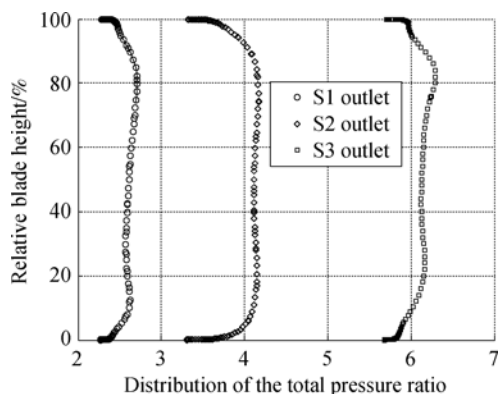


图 10 各级出口与压气机入口总压比沿叶高分布
Fig. 10 Distribution of total pressure ratio of each stage outlet and compressor inlet along blade height

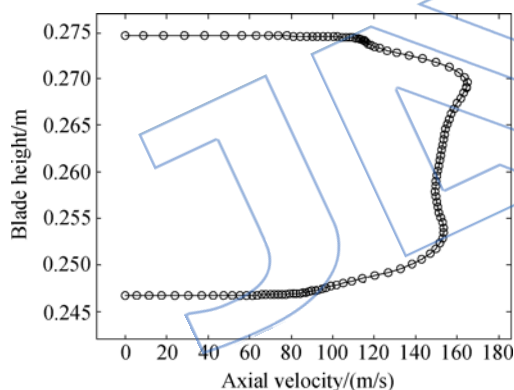


图 11 第 3 级静叶出口轴向速度沿叶高的分布
Fig. 11 Distribution of axial velocity along blade height at outlet of the third stator

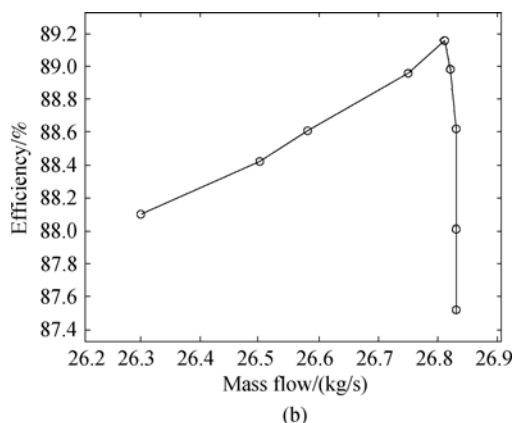
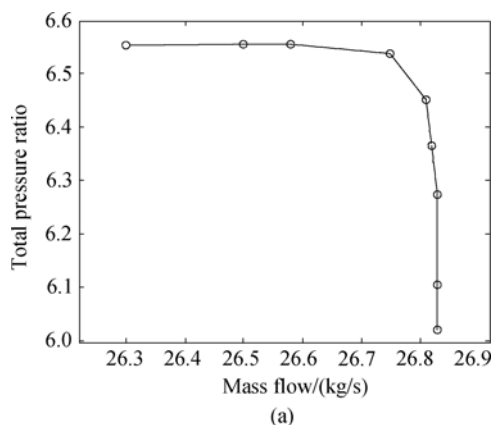


图 12 3 级压气机特性曲线

Fig. 12 Characteristic line of three stage compressor

26.83 kg/s,这可以通过适当增大第 1 级动叶叶栅入口几何角而使得流量达到 26.5 kg/s 设计值。此外,总抽吸流量占到入口流量的 11.3%。

4 结 论

本文对多级吸附式低反动度轴流压气机气动设计原理进行了进一步阐述,并完成了 3 级吸附式低反动度轴流压气机气动设计。从三维黏性定常计算结果看来,3 级总压比达到 6.1,效率为 88.1%,喘振裕度为 9.5%,附面层总抽吸流量占入口流量的 11.3%。将来的工作重点主要在于三方面:一方面在于通过参数优化;以进一步提高 3 级吸附式低反动度轴流压气机的喘振裕度;另一方面,从二维叶栅、单级实验入手,开展吸附式跨/超声速压气机级的实验研究;最后,逐步完善吸附式压气机气动设计体系,包括吸附式压气机数值研究体系,吸附式压气机实验研究体系,这是一个长期也是极具挑战的任务。

参考文献:

- [1] Grosvenor A D, Brown P M, Lawlor S P. Design methodology and predicted performance for a supersonic compressor stage[R]. ASME Paper GT2006-90409, 2006.
- [2] Lawlor S P, Hinkey J B, Mackin S G, et al. Supersonic compression stage design & test results[R]. ASME IMECE 2004-59914, 2004.
- [3] 肖翔. 对转冲压压气机冲压叶轮内部流动分析[D]. 北京:中国科学院, 2007.
XIAO Xiang. The aerodynamic design and analysis of counter-rotating compressor's shock-in impeller[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese)
- [4] Merchant A, Kerrebrock J L, Adamczyk J J, et al. Experimental investigation of a high pressure ratio aspirated fan stage[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 43-45.

- [5] Merchant A, Epstein A H, Kerrebrock J L. Compressors with aspirated flow control and counter-rotation [R]. AIAA-2004-2514, 2004.
- [6] Schuler B J, Kerrebrock J L, Merchant A. Experimental investigation of an aspirated fan stage[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(2): 340-348.
- [7] Kerrebrock J L, Drela M, Merchant A A. A family of designs for aspirated compressors[R]. ASME Paper 98-GT-196, 1998.
- [8] Merchant A. Aerodynamic design and analysis of a high pressure ratio aspirated compressor stage[R]. ASME Paper GT-2000-619, 2000.
- [9] Kerrebrock J L, Epstein A H, Merchant A A, et al. Design and test of an aspirated counter-rotating fan[R]. ASME Paper GT2006-90582, 2006.
- [10] 张华良. 采用叶片弯/掠及附面层抽吸控制扩压叶栅内涡结构的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- ZHANG Hualiang. Investigation on application of dihedral/swept blade and boundary layer suction to control vortex configurations in compressor cascades[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] 王松涛, 羌晓青. 低反动度附面层抽吸式压气机及其内部流动控制[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(1): 35-40.
- WANG Songtao, QIANG Xiaoqing. Study of low reaction boundary layer suction axial compressor and its internal flow control[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(1): 35-40. (in Chinese)
- [12] QIANG Xiaoqing, WANG Songtao. Aerodynamic design and analysis of a low-reaction axial compressor stage[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21(1): 1-7.
- [13] 宋彦萍, 陈浮, 赵桂杰, 等. 附面层吸除对大转角压气机叶栅气动性能影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 561-566.
- SONG Yanping, CHEN Fu, ZHAO Guijie, et al. Numerical investigation of boundary layer suction in compressor cascade with large turning angels[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 561-566. (in Chinese)
- [14] 陈浮, 宋彦萍, 赵桂杰, 等. 附面层吸除对压气机叶栅稠度特性影响[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 211-215.
- CHEN Fu, SONG Yanping, ZHAO Guijie, et al. Effects of boundary layer suction on the performance of compressor cascade with different solidities[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(2): 211-215. (in Chinese)
- [15] 羌晓青. 低反动度附面层抽吸式压气机流动控制及设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- QIANG Xiaoqing. Study of flow control and design methods in low-reaction boundary layer suction compressors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [16] 王松涛, 胡应交. 低反动度高负荷超声速轴流压气机气动设计方法[J]. 航空动力学报, 2013, 28(6): 1322-1332.
- WANG Songtao, HU Yingjiao. Aerodynamic design method of high loaded supersonic axial-compressor with low reaction[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1322-1332. (in Chinese)
- [17] 胡应交, 王松涛, 王仲奇. 基于动叶出口轴向速度提升的吸附式低反动度超、跨声速轴流压气机气动设计原理及其验证[J]. 推进技术, 2013, 34(9): 1179-1187.
- HU Yingjiao, WANG Songtao, WANG Zhongqi. Analysis and verification of aerodynamic design principle of the low-reaction and aspirated supersonic or transonic compressors [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(9): 1179-1187. (in Chinese)
- [18] 胡应交, 王松涛. 基于动叶出口轴向速度提升的亚声速吸附式低反动度轴流压气机气动设计原理及其验证[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 708-718.
- HU Yingjiao, WANG Songtao. Aerodynamic design principle and verification for subsonic axial-flow compressor with low reaction based on enhanced axial velocity at rotor outlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(3): 708-718. (in Chinese)
- [19] 胡应交, 王松涛. 一种对转压气机气动设计方法及其验证[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1135-1144.
- HU Yingjiao, WANG Songtao. An aerodynamic design method and verification for counter-rotating compressor [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5): 1135-1144. (in Chinese)
- [20] WANG Songtao, QIANG Xiaoqing, LIN Weichun, et al. A study of parameter selection principle and internal flow mechanism in a multi-stage low-reaction axial flow compressor[R]. ASME Paper GT2008-50554, 2008.
- [21] 王松涛, 胡应交, 王仲奇. 吸附式低反动度轴流压气机气动设计原理分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 350-362.
- WANG Songtao, HU Yingjiao, WANG Zhongqi. Aerodynamic design principle of aspirated and low-reaction axial-compressors[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 350-362. (in Chinese)