

# CFD 技术在航空发动机空气系统设计中的应用

沈毅, 李云单, 吕春雁, 牟宇飞

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



**摘要:**结合航空发动机空气系统的功能和设计特点,介绍了空气系统的设计分析技术现状;以2种发动机典型结构为例,采用商用CFD软件完成了流动与换热特性分析。CFD技术是现有分析技术的有益补充,是空气系统设计分析技术精细设计的重要工具,其数值模拟结果对工程设计具有指导意义。

**关键词:**空气系统;设计技术;CFD;航空发动机

## Application of CFD in Secondary Air System Design for Aeroengine

SHEN Yi, LI Yun-dan, LV Chun-yan, MU Yu-fei

(AVIC Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** *The design technologies of secondary air system were introduced according to functions and design characteristics of the secondary air system. Take several typical aeroengine structure for example, the flow characteristic and the fluid temperature are analysed using the commercial CFD software. It shows that the CFD is beneficial supplement for the current analysis technology and important tools to the aeroengine secondary air system fine design. The simulation result is instructive for the engineering design.*

**Key words:** secondary air system; analysis technology; CFD; aeroengine

沈毅(1971),女,工学硕士,自然科学研究员,从事航空发动机空气系统设计和部件热分析工作。

收稿日期: 2010-09-30

## 0 引言

作为航空发动机主要零部件和有关系统,空气系统在整个工作包线内的内部工作环境以及热状态设计,担负着为发动机提供可靠工作环境的重任,是保证发动机以高性能安全运行的重要系统之一。空气系统设计分析技术的发展在某种程度代表着航空发动机的设计水平。

由于计算机资源的限制和及空气系统结构本身的复杂与多样性,CFD技术无法对航空发动机空气系统进行数值模拟。在工程设计与计算时,采用的1维方式简化处理,必然带来误差。在流动方面的误差不但直接影响某些关键零部件的温度预估结果,而且

也无法完成对某些结构的优化设计评估。采用商用CFD软件,可以对局部流动与换热特性进行更详细地分析,为温度预估提供高精度的边界条件,可满足结构优化的设计需要。

## 1 航空发动机空气系统

空气系统也叫2次流系统,其工作过程是从压气机适当位置抽取空气,通过发动机主通道的内侧或外侧的各种流动结构元件(孔、管路、封严环和特定结构

形成的腔道等),按照设计流路要求的流动方向流动并完成各项规定功能,最后从确定的主通道的若干部位排出,与主流汇合或直接泄漏到机体外部排入大气。

某典型发动机局部空气系统流路及组成如图1所示。图中标示了气流的流动方向及相应的功能。

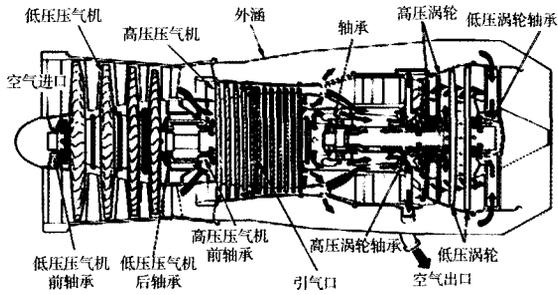


图1 航空发动机局部空气系统流路及组成

## 2 1维数值模拟技术

### 2.1 基本原理

从图1中可见,空气系统是由影响到气流沿程的压力、温度和流量变化的结构(如篦齿孔、各种旋转盘腔等流动元件)组成的。发动机元件形式多种多样,如

篦齿(seal)、盘心和轴之间的通道、机匣上的孔、预旋喷嘴等。不同结构形式的元件具有不同的流动和换热特性。在工程设计与计算时,通常采用1维方式处理各流动单元的流动与换热特性,也就是把这些元件根据几何和流动的特点典型化,将发动机空气系统模化成1个由多种类型元件(单元)串联和并联组成的网络,连接各元件的称为腔(或节点)。通过迭代求解,得到整个网络的压力和温度分布和流量分配情况。

按照上述思路,空气系统流路(图1)就可以模化成与如图2所示的类似网络。

### 2.2 1维计算结果特点分析

在网络中,每个元件的流动和换热特性是决定气体压力、温度和流量的重要数据。在1维数值模拟计算时,这些数据的精度由所采用的准则公式(经验公式)与发动机结构的吻合程度及其适用范围决定。绝大部分经验准则公式来源于试验数据,而试验对象的结构形式与发动机真实结构总是存在差异,而试验结果也不可能考虑到所有的影响参数,其适用范围一定是有限的。上述因素都直接影响1维数值模拟结果的精度。Zimmermann指出,CFD技术是提高经验公式的准确程度,或者通过数值试验方式扩大其有效范围的1种有益手段<sup>[1]</sup>。

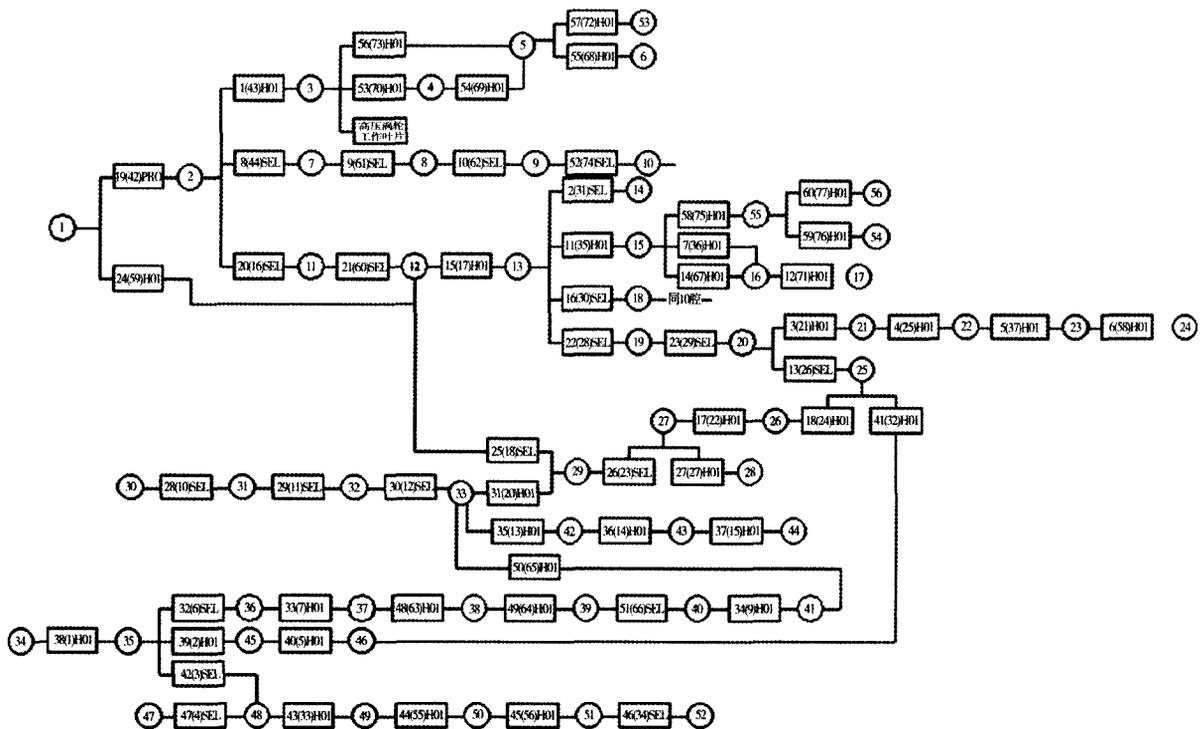


图2 航空发动机空气系统网络

此外,在工程设计中,还需要应用 CFD 技术为空气系统设计提供更详细的设计依据信息。1 维数值结果可以比较全面地反映各分支的流量分配情况、关键腔室的压力和温度数据,从大的方面判断整个空气系统的特性。但对于一些流动、换热条件比较复杂的结构而言,1 维数值结果无法反映局部气体的详细流动情况,也无法详细了解各方面因素对分析结果的影响;由于对某些结构进行了简化,也无法提供评估结构优化设计的支持数据。因此,进行局部结构的 CFD 计算非常必要。

### 3 CFD 技术的应用

商用 CFD 软件采用的流体理论和数值算法经过长期的科学论证,比较成熟,可以用于处理发动机集气腔、涡轮盘腔、管路、篦齿等局部流动比较复杂空腔的流动、传热传质问题。对于某些不考虑旋转因素的流动与换热数值模拟,其分析结果的可信度更高。本文以发动机上常见的集气腔、涡轮叶片内冷气导管为研究对象,讨论 CFD 技术在发动机空气系统设计中的应用情况。

#### 3.1 涡轮冷却空气集气腔设计分析

涡轮冷却空气集气腔设计的目的是将外部管路引入的高压低温气体在此腔均压后,从下游各导叶内部通道进入涡轮盘腔,实现对盘组件的冷却。集气腔内部压力均匀,有利于进入涡轮盘腔的冷气温度、压力周向均匀,对涡轮部件的冷却是有益的。

针对 2 种集气腔结构,分别取整环的 1/4 和 1/8 作为研究对象,根据 CFD 分析的流动情况,提出了几种结构方案。方案 1、2 是根据第 1 种集气腔的结构情况做的改动,具体结构如图 3~6 所示;方案 3 是第 2 种集气腔结构的改动情况,其结构如图 7、8 所示。集气腔各出口的不均匀性分析结果如图 9 所示,各结构方案的出口流量不均匀性对比见表 1。



图 3 第 1 种集气腔模型

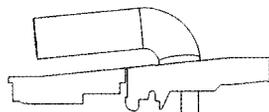


图 4 原结构

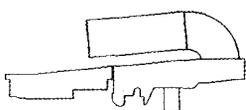


图 5 方案 1 结构

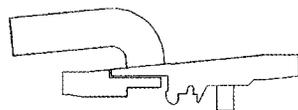


图 6 方案 2 结构

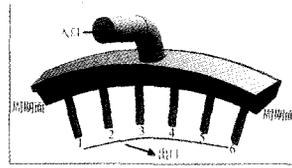


图 7 第 2 种集气腔模型

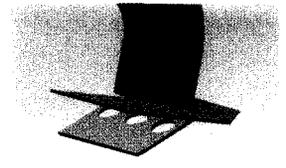


图 8 方案 3 局部结构

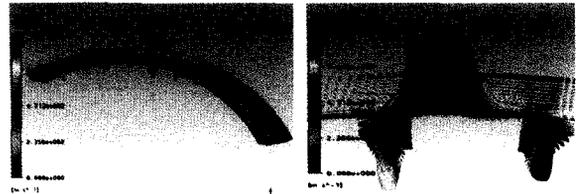


图 9 集气腔内气流速度的不均匀性

表 1 各出口流量的均匀性比较

方案	出口										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
原方案	2.178	3.156	0.711	-5.69	37.50	-20.60	-6.598	-10.90	-4.13	3.82	0.344
集气腔模型 1 方案 1	-16.89	-24.22	4.133	5.356	2.178	-1.244	9.756	10.00	-4.42	-12.00	27.60
集气腔模型 1 方案 2	-6.622	4.378	7.800	6.333	-14.93	-8.578	-0.511	5.356	3.644	4.133	-0.756
集气腔模型 2 原方案	-2.774	-6.039	4.263	9.359	-1.803	-3.006	-	-	-	-	-
集气腔模型 2 方案 3	-1.129	0.852	-1.121	-4.407	1.797	4.007	-	-	-	-	-

从分析结果可知,几种改进方案的各出口气流流量都比原方案的分布均匀如图 10 所示,其中方案 3 的效果最好。这主要是由于进入集气腔的引气管数量较少,虽然周向分布基本均匀,但 2 个引气管之间的区域压力相对较小。方案 3 在正对引气管出口的下方增加了挡板,避免了气流进入集气腔后直接从最近的出口排出,改善了各出口的均匀性。另外,第 2 种集气腔的均匀性优于第 1 种集气腔的,也是由于第 2 种集气腔的引气管数量较多,有助于提高腔内压力分布的均匀性。

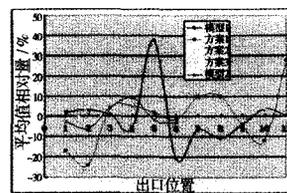
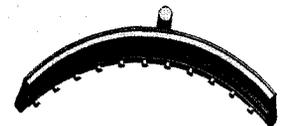


图 10 各出口流量的均匀性比较



#### 3.2 低压涡轮导向叶片冷气导管内气体沿程温度分析

航空发动机低压涡轮导向叶片通常是 1 个空心

叶片(其结构如图 11 所示),作为从发动机外部引入的涡轮盘组件冷却空气的通道。为了尽量减少叶身外表面燃气的冲刷对冷气温度的影响,在导向叶片内部安装冷气导管。



图 11 低压涡轮导向叶片结构

进行导管内冷气沿程温升数值模拟,以寻找影响冷气沿程温增的主要因素。分别模拟了带导管和不带导管 2 种情况,同时考虑了叶片表面的燃气温度水平以及通过叶片内部的冷气流量对气流沿程温增的影响。计算模型及数值模拟结果如图 12、13 所示,数据统计见表 2。

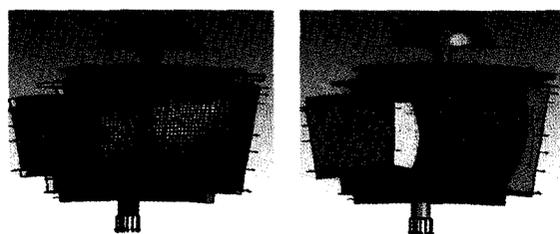


图 12 计算网格

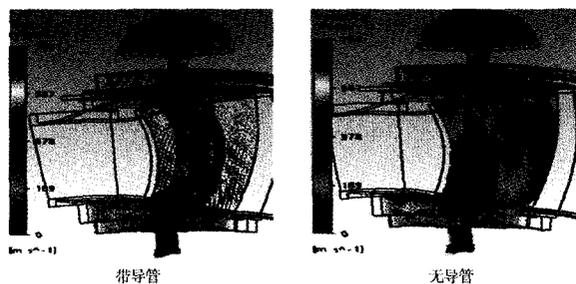


图 13 低压涡轮导向叶片内冷气流线

表 2 计算结果对比

状态	模型结构	温增 /K	通过导管的冷气流量 / (kg/s)
CFD	带导管	53.3	0.013
	不带导管	94.4	0.018
CFD 考虑 燃气超温	带导管	63.0	—
	不带导管	115.0	—
整机试车 测试	带导管	60.0	0.013
	不带导管	110.0	0.018

由此可见,去掉冷气导管虽然对提高导叶的流通能力起到一定作用,但对控制冷气的沿程温增来说,却有些得不偿失。虽然冷气导管与叶身的接触面积很小,但燃气温度依然是影响气体沿程温增的最主要因素。

#### 4 结束语

在进行涡轮冷却空气集气腔结构设计时,要考虑到由于引气管布置的影响,必然会导致集气腔内压力分布不均匀,从而导致集气腔各出口的流量不均,是下游流路冷却设计的不利因素。通过结构调整,如在引气管的出口部位增加挡板,改善局部的不均匀性,在一定程度上消除了该不利因素。

低压涡轮导向叶片内冷气沿程温增的试车测试结果高于设计预期。通过 CFD 分析,综合考虑各方面的影响,认为燃气温度的水平、冷气流量是影响该温增的最主要因素。此分析结果可以通过部件试验进行验证。

尽管 CFD 技术已经应用于航空发动机静子件的流动分析,是空气系统设计的有益补充。但在应用过程中,以下因素影响了 CFD 技术发挥更大的作用。

(1)商用 CFD 软件界面友好,上手快。但数值模型的网格质量、分析结果的收敛性对分析结果的正确性影响很大。这对使用者的技术水平要求较高,只有经验丰富的使用者的分析结果才具有参考价值。

(2)商用 CFD 软件模拟流动与换热现象的数学模型很丰富,具有很强的通用型,但在处理发动机某些复杂结构时,模型的针对性则不足。此时 CFD 分析结果只能作为设计工作的参考。为了提供准确度较高的定量分析结果,还需要大量试验验证的数据支持。

(3)对发动机的热端部件尤其是转子件的温度预估十分重要。目前 CFD 技术对于转动系、转转系的流动分析,尤其是换热特性分析仍有较大误差,需通过更多试验研究来完善。

综上所述,在整机空气系统设计时,只能将局部流动比较复杂的结构作为 1 个或几个元件进行处理,对元件内部的流动组织情况、各因素对温度的影响程度无法给出定量结果,这种处理方法可以满足发动机初步设计阶段的要求,但无法对发动机冷却结构的细节设计提供更高精度的指导。CFD 应用使得流动与换热的细节分析成为可能,为结构改进设计、部件试验验证和整机试车参数的测试结果分析(下转第 25 页)

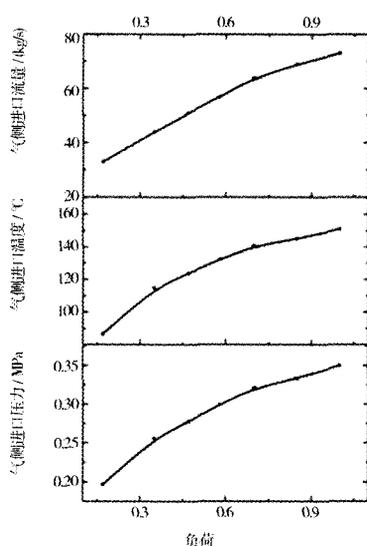
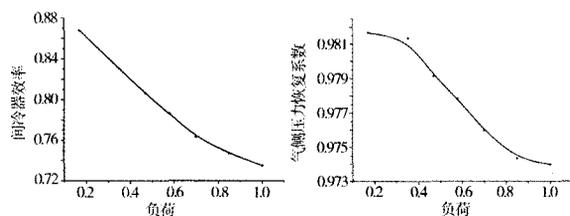


图7 非设计工况气侧流动参数

图8 非设计工况下  
间冷器效率图9 非设计工况下间冷器  
气侧总压恢复系数

## 4 结论

本文借助板翅式换热器内部流动通道的换热和压降计算方法,针对舰船燃气轮机低压压气机和高压压气机流道的结构特点,设计了合理的间冷器结构形式,并研究了间冷器的结构参数变化对间冷器性能的影响。文中给出的间冷器结构形式考虑了舰船燃气轮机的流道形式,对开展舰船燃气轮机间冷器设计与优化提供了有益参考。从间冷器效率随液侧流量变化的分析可知,间冷器效率随着液侧流量的增加而逐渐提高。液侧流量较低时,间冷器效率随着液侧流量增大而提高得很快,但是当液侧流量增加到一定程度后继续增加,间冷器效率的提高趋于平缓。考虑到由于液侧流

量增大所带来的液侧阻力损失对燃气轮机总体性能没有影响,可以通过增加液侧流量来提高间冷器的效率,但在确定间冷器液侧流量时应该考虑过大的液侧流量使间冷器效率提高趋缓,也使得间冷器液侧管路布置困难,需合理确定间冷器的液侧流量。在燃气轮机非设计工况下,流量成为影响间冷器性能的主要因素,因此,在燃气轮机部分负荷时,间冷器的效率和总压恢复系数都有所增加,所以在设计间冷器时只需针对设计点工况优化设计,同时给出非设计点间冷器的性能参数,以便于燃气轮机总体性能计算分析。

## 参考文献:

- [1]梁春华.间冷回热循环舰船用燃气轮机 WR-21 的技术特点[J]. 航空发动机,2006,33(1):55-58.
- [2]张方伟,张会生,苏明.中冷回热循环燃气轮机技术[J]. 船舶工程,2004(2):7-9.
- [3]Romero-Mendez R, Sen M, Yang K T, et al. Effect of fin spacing on convection in a plate fin and tube heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000,43 (1): 39-51.
- [4]Traverso A, Aristide F. Optimal design of compact recuperators for microturbine application [J]. Applied Thermal Engineering, 2005(25): 2054-2071.
- [5]文超柱,董威.舰载燃气轮机间冷器传热与流动的数值模拟[J]. 航空动力学报,2010,25(3):654-658.
- [6]Steven L. Integration of the WR-21 intercooled recuperated gas turbine into the Royal Navy type 45 destroyer. [R].ASME 2001-GT-0531.
- [7]Shepard S B. Design and development of the WR-21 intercooled and recuperated (ICR) marine gas turbine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,1995 (117):557-561.
- [8]文超柱.舰载燃气轮机间冷器的设计与研究[D].上海:上海交通大学,2009.
- [9]董威,文超柱,郑培英.船用燃气轮机间冷器优化设计分析[C].中国航空学会第六届轻型燃气轮机学术交流会论文集.沈阳:沈阳发动机设计研究所,2009.

(上接第 37 页)等工程研制工作提供了数据支持。但为了在空气系统设计时更好地应用 CFD 技术,还需要进行大量针对性试验研究,实现对湍流模型等主要影响因素的修正,提高应用于航空发动机空气系统设计分析的成熟度。这也是航空发动机空气系统设计技术进一步深化研究的方向之一。

## 参考文献:

- [1]Zimmermann H. Some aerodynamic aspects of engine secondary air systems [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power. 1990,112:223-228.
- [2]航空发动机设计手册总编委会.航空发动机设计手册(第 16 册)[M].北京:航空工业出版社,2001.