

文章编号: 1000-8055(2006)06-1098-05

弹用涡喷发动机加零级压气机 设计方法研究

刘科辉¹, 单 鹏², 李 娜¹, 郑 严¹

(1. 中国航天科工集团 31 所, 北京 100074;

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 对法国 MicroTurbo 公司 TRI60 系列中基本型 TRI60-2 向 TRI60-20 型演变过程进行了分析, 研究加零级压气机的技术特点和设计方法。本文以获得 TRI60-20 压气机部件及特性为主线, 阐述了加零级的设计流程, 并利用经过试验数据验证的 CFD 软件对所设计的压气机流场进行了全三维数值模拟和计算分析。结果表明, 本文采取的加零级方法是成功的。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 压气机; 零级; 设计方法; 数值模拟

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Study of design method for the zero stage compressor in an expendable gas turbine engine

LIU Ke hui¹, SHAN Peng², LI Na¹, ZHENG Yan¹

(1. The 31st Research Institute of CASIC, Beijing 100074, China;

2. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Analyzing the evolvement from TRI60-2 engine to TRI60-20 engine developed by France MicroTurbo Inc, the technical characteristic and design method of adding zero stage compressor were researched. Taking obtaining the compressor's structure and characteristics as the primary concern, the process of adding zero stage compressor was discussed, and using CFD software validated by test data the flow field was numerically simulated in full three dimensions and analyzed through computation. The result indicates that the method of adding zero stage compressor discussed in this paper is basically successful.

Key words: aerospace propulsion system; air compressor; zero stage; design method; numerical simulation

通过在原有压气机前增加零级压气机, 来提高涡喷发动机性能的方法, 称为加零级^[1], 这种技术在国外已经很成熟。1986 年, 美国 Teledyne CAE 公司在原带有一级离心和一级轴流压气机的 J402-CA-400 发动机前面增加零压气机, 得到

J402-CA-702 涡喷发动机^[2]。改进后压气机总压比由原来 5.8 增至 8.44, 发动机推力由 294 daN 增至 427 daN, 增幅达到 45%, 耗油率降低了 24% 左右。该发动机现在作为捕鲸叉导弹的动力装置。

收稿日期: 2005-11-29; 修订日期: 2005-05-18

作者简介: 刘科辉(1979-), 男, 湖南邵东人, 中国航天科工集团 31 所, 硕士, 主要从事航空宇航推进理论与工程的研究。

法国 MicroTurbo 公司(简称 MT 公司)自 1992 年开始,也成功地分别在 TRI60-2 和 TRI60-3 的基础上增加零级压气机,改型成 TRI60-20 和 TRI60-30 发动机,推力从 350~ 400 daN 增加到 500~ 550 daN,增幅达到 40%。耗油率降低了 5%~ 20%^[3]。目前,两改型发动机已经分别装备在美国高性能亚音速 MQM 靶机和阿帕奇导弹上。

1 加零级原理

加零级设计的基本原则是:^[1] 增加零级压气机,总压比增加,后面级压气机的压比、效率等性能保持不变。根据相似理论可知,保持原压气机性能不变的必要条件是,保证加零级后零级压气机的出口条件相似准则仍然和原来压气机进气条件相似准则完全一样,包括运动相似和动力相似两条准则。运动相似要求加零级压气机前后流场中对应的流线及点上的速度三角形相似,即流场相似,它对零级静子的设计提出了约束条件。动力相似包括流量相似和转速相似,用方程描述如下,并以此来确定加零级后新压气机的流量和转速。

$$\frac{m_a \sqrt{T_1^*}}{p_1^*} = \frac{m_a' \sqrt{T_1'^*}}{p_1'^*} \tag{1}$$

$$\frac{n}{\sqrt{T_1^*}} = \frac{n'}{\sqrt{T_1'^*}} \tag{2}$$

式中: m_a 为压气机流量, n 为压气机转速,上标“'”表示加零级压气机后的参数。方程中各变量的意义详见文献[1]。

2 TRI60-20 发动机加零级压气机设计

加零级设计与其他只改进某一或几个零部件设计相比,发动机性能可得到大幅度提高,但是需要更改相关的总体结构设计和零部件设计比较多,其过程也要复杂得多。核心和关键是压气机的改进设计,在方案研究阶段就是要得到改型的压气机部件及其特性。下面以 TRI60-20 发动机为例,展开加零级设计方法研究。TRI60-20 发动机在结构设计方面,主要是沿用原发动机结构和零件,并且保持原压气机结构不变,由于篇幅限制,本文不再展开。

2.1 发动机总体性能计算

第一阶段做好相应准备工作,主要是发动机

总体性能计算,为压气机特性初步估计提供数据依据。目前,我们不能直接获得新压气机的特性,但可以通过对 TRI60-2 压气机特性数据与 TRI60-20 发动机工作点参数用数学方法进行初步修正。关于对多级压气机非设计性能的估算,国内外许多学者提出过多种方法,本文修正方法主要根据动力相似准则来确定相应的修正系数,从而初步得到压气机转速、空气流量、增压比和等熵效率等特性。

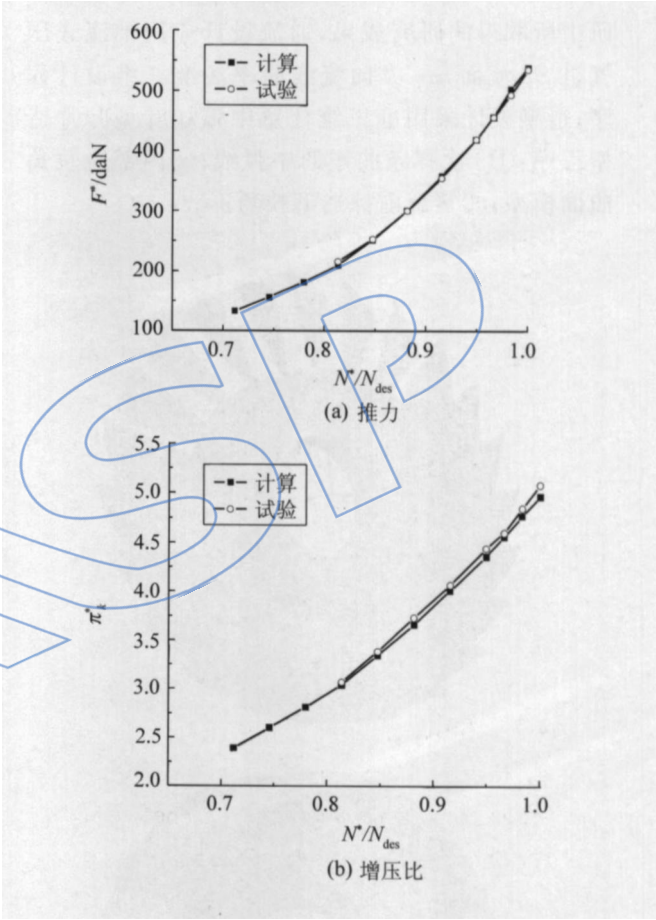


图 1 TRI60-20 发动机总体性能计算值与 MT 公司试验值比较

Fig.1 TRI60-20 engine performance comparison of calculation and experimentation

TRI60-20 发动机总体性能计算结果如图 1 所示,图中带实心点(计算)曲线是通过发动机总体性能计算得到的,带空心圆点(试验)曲线是 MT 公司的 TRI60-20 发动机试车数据。从图中各曲线可以看出,计算值与试车值相比,高转速下推力略高,而压比略低,低转速下两者曲线几乎一致;这说明本文所估计的压气机特性与 MT 公司 TRI60-20 发动机实际值比较接近。当然,最终的压气机特性还是要以压气机部件试验数据为准。

2.2 零级压气机设计

第二阶段真正进入了方案设计阶段,包括发动机总体结构设计,零级压气机通流设计和叶片造型设计,零级压气机结构设计和强度分析。

零级压气机气动设计,就是根据前阶段得到的压气机特性以及发动机特性参数,提出零级压气机设计的结构要求和气动要求,进行零级通流设计和零级转静子叶片造型设计。该设计已经完成,其设计系统是基于北航动力系在国家九五预研中所取得的研究成果,通流设计应用轴流式压气机 S2 流面 z - η 方向流线曲率法准三维设计程序;造型设计采用准三维任意中弧线叶型叶片造型程序:①3 次样条曲线的中弧线;②内部脱轨角曲面模型;③复合前掠造型技巧。

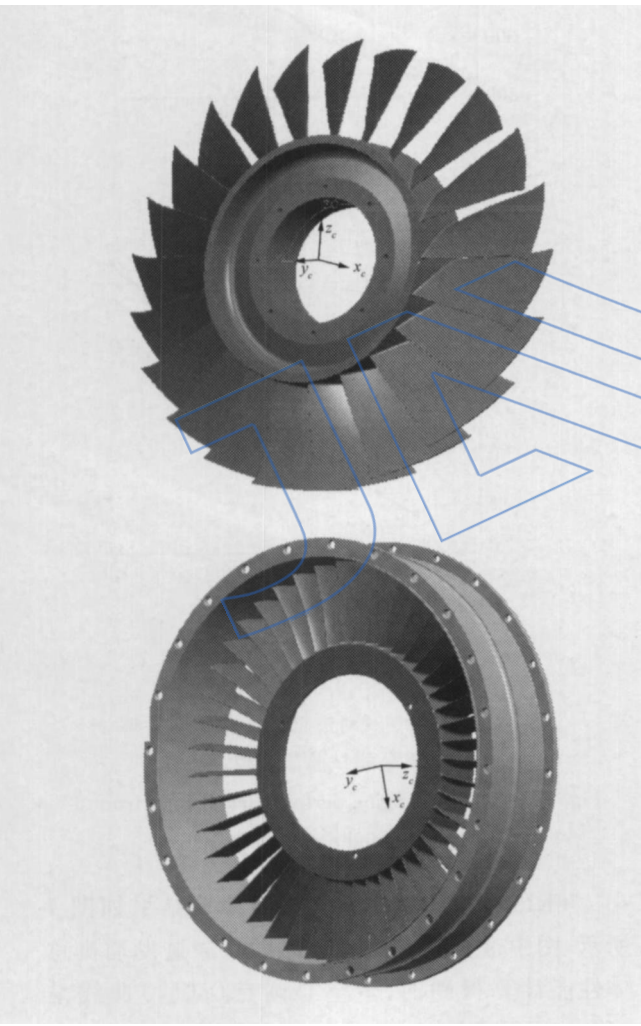


图 2 零级转、静子的三维造型

Fig. 2 Model of zero σ stage rotor and stator

由于 TRI60-2 压气机是 MT 公司 70 年代设计的产品,在设计工况下第一级转子进口沿叶高方向有 80% 的区域为超音速流动。加零级后流量增

大,但仍保持转子外径不变,这就使得零级进口单位环面流量过大,达到了 $225\text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$,加大了零级通流设计的难度,故采取了蜂腰形进口环面设计,这样可使零级转子前缘 12.5% 叶高具有亚音速区,而成为跨音速级。本次通流设计和叶片造型之间经过 3 次迭代,精度较高,设计结果基本满足了要求。

零级压气机结构设计,包括转、静子零件结构设计和 UG 三维造型设计。根据总体结构方案和叶片造型的数据,零级转、静子三维造型如图 2 所示。随后,就要进行强度校核和流场计算。在满足强度校核和下一步进行的流场计算分析后,就可以展开整体式转子数控加工研究,得到转子零件,进行部件试验,获得零级压气机试验特性。

2.3 压气机流场的数值计算及分析

本阶段就要对所设计的零级和四级压气机利用商业软件 NUMECA 进行全三维数值模拟,得到压气机的特性和设计点下的流动图谱。计算选用 Spalart-Allmaras1 湍流模型,对流项离散格式为二阶迎风格式,时间推进方法为四阶显式 Runge-Kutta 法, CFL 数为 3;计算网格拓扑结构为 HOH 型,每列网格数在 16 万左右,转子叶尖间隙取 0.3 mm ;计算进口给定总温、总压和气流角,出口给定静压。在每个转速下,逐步提高背压,计算了从堵塞工况到近失速工况之间的多个状态流场。

首先进行 TRI60-2 压气机部件特性和全流场的计算流体力学核算,分析三级压气机流场状况。通过 CFD 计算结果与试验数据的比较,发现流量计算值比试验值高 0.4%~0.8%,总压比、效率计算值偏低 1%~3%,总的说来计算值与试验基本吻合,计算得到的流动图谱可以反映实际流动状态。四级计算的网格和设置参数与三级一致,其误差可以认为和三级处于同一量级。

进行零级压气机单级特性和流场的计算流体力学探查。检验零级压气机的设计点和非设计点的性能,了解零级压气机的增压比、等熵效率、喘振效率(参考)三大性能指标达标情况,见表 1,其中空气流量参数的单位: kg/s 。

从表 1 看出,零级压气机设计点参数均达到了设计要求值,且工作点的喘振裕度比较大,能满足其作为多级压气机进口级的裕度要求。由于采取了先进的叶片设计技术,压气机效率比期望值要高。另外,零级压气机压比设计指标比较保守,而其 CFD 计算值比设计值又要大一些,作为进口

级,可能会对新压气机的后三级压气机的性能带来一定影响。

表 1 零级压气机设计结果达标情况

Table 1 Design result of zero stage

	设计 指标	通流设计值 (无间隙)	CFD 核算值 (带间隙)
空气流量/(kg/ s)	8 015	8 015	8 008
级增压比	1. 285	1. 361	1. 423
等熵效率	0. 800	0. 856	0. 814
喘振裕度/ %	14	15	25

由流量- 压比特性曲线图 3 可以看出: 在高转速下, 工作点左侧等转速线比较平稳, 右侧则比较陡, 当流量增至某一数值时, 压气机流量不再变化, 在唯一攻角下工作, 属于典型的跨音速级压气机特性; 在低转速下, 压气机中气流基本为亚音速流动, 压比降低, 流量工作范围变大, 等转速线比较平稳。满足零级压气机的非设计点要求。

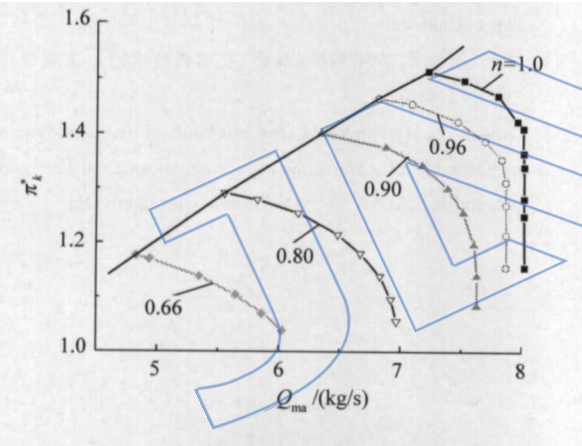


图 3 零级压气机 CFD 特性曲线

Fig. 3 CFD characteristic of zero stage compressor

TRI60 20 压气机设计转速下特性和流场状况探查:

① 检验 TRI60- 20 压气机设计点和非设计点的性能。

② 检验零级压气机、原型三级压气机在四级压气机中性能配合情况。

③ 分析各部分流场的细节工作状态, 对于发现的问题提出解决方案。

表 2 是联算和单算在设计转速下压气机的计算结果。总的来说, 原三级压气机基本保持了其压比和效率等特性, 符合加零级原则的设计结果。TRI60 20 压气机性能计算值比设计值偏低, 后三

级压气机的增压比、效率也较 TRI60 2 压气机下降, 可能是由于零级与后三级的级间干扰而引起的, 这个问题可以在压气机调试中去解决。图 4 是 CFD 计算得到的 TRI60- 20 压气机流量- 压比特性, 图中显示通过 CFD 计算得到等转速线(计算) 与前面预估的等转速线(试验) 比较逼近, 这进一步说明了所预测特性的有效性。但前者比较陡峭, 后者相对平稳, 对于四级压气机来说, 前者曲线更为接近实际情况。

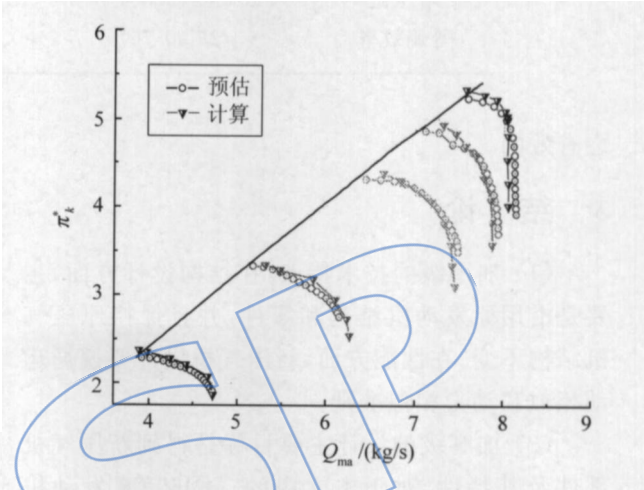


图 4 TRI60 20 压气机流量- 压比特性

Fig. 4 Mass flow pressure ratio characteristic of TRI60 20 compressor

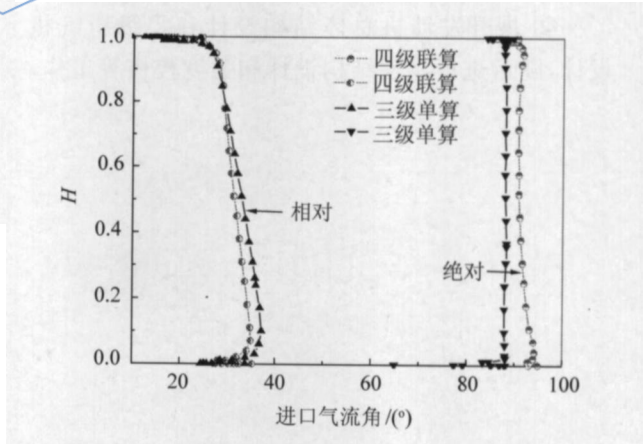


图 5 I 级动叶进口气流角沿叶高分布

Fig. 5 Inlet flow angle distributions along the span of I stage rotor

多级轴流压气机进口级的性能对后面级影响比较大^[1, 4], 零级静子出口流场与原压气机的进口流场是否保持相似, 是评价零级压气机设计好坏的标准之一。图 5 是四级联算和三级单算 I 级动叶的进口绝对、相对气流角沿叶高分布曲线。加零级前后对应气流角的变化很小, 表明零级压

气机出口条件与原进气条件基本一致, 满足运动相似准则, 这是保证后三级压气机正常工作的重

要条件。综上所述, 本文采取的加零级方法是行

表 2 设计转速下零级与原三级压气机性能配合情况

Table 2 Matching design result of zero stage and original 3 stages compressor

	四级联算			单独计算	
	四级 (设计值)	零级	后三级	零级	原三级
空气流量/ (kg/ s)	8 014 (8. 015)	8 014	8 015	8 008	6. 468
增压比	5 030 (5. 08)	1. 416	3. 569	1. 423	3. 681
等熵效率	0. 729 (0. 76)	0. 804	0. 733	0. 814	0. 742

之有效的。

3 结 论

(1) 加零级的技术特点: 在结构设计方面, 主要是沿用原发动机结构和零件, 并且保持原压气机结构不变; 在性能方面, 新压气机设计要遵循运动相似和动力相似准则。

(2) 加零级的设计主要目标是得到新压气机部件及其特性, 对于本文中的 TRI60-20 发动机加零级设计, 方法归纳如下:

① 预估新压气机特性, 并通过总体性能计算加以验证。

② 展开发动机总体结构设计和零级压气机设计, 随后进行零件结构设计和强度校核等工作。

③ 压气机三维粘性流场计算, 检验 TRI60-20 压气机性能的达标情况和各部分流场配合情况。

参考文献:

[1] 彭泽琰, 刘刚. 航空燃气轮机原理(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.

[2] Due H F, Teledyne CAE, Toledo OH. Development of the model 373 turbojet engine[R]. AIAA-87-1908, 1987/ San Diego, California.

[3] 郑严, 庞重义. 弹用涡喷(涡扇) 发动机技术[J]. 飞航导弹, 2001, 12: 43-52.

[4] Katoh Y, Hamatake H. Investigation of the aerodynamic performance of a transonic inlet stage of an axial flow compressor[R]. AIAA 98- 3415, 1998/ Cleveland, OH.