

液氧/煤油发动机煤油预压涡轮泵技术

李向阳, 王晓锋, 宣 统, 苗旭升
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 液氧/煤油发动机采用独立的预压涡轮泵装置可减小推进剂组元贮箱的增压和提高主泵的转速, 从而提高主泵的效率并降低其结构质量。以煤油预压涡轮泵为例, 阐述了预压泵结构特点、轴承冷却系统及轴向力平衡装置。为提高预压泵的抗汽蚀性能和扬程, 提出了变螺距变轮毂诱导轮方案, 分析了流量系数、螺距及轮毂形状, 并对诱导轮内流场进行了数值模拟, 获得了其内部流场结构。水力试验结果表明, 煤油预压泵性能稳定, 在预压泵额定流量下, 可使煤油主泵的入口压力提高约 0.4MPa, 与设计值相符。

关键词: 液氧/煤油发动机; 煤油预压涡轮泵; 诱导轮; 数值模拟

中图分类号: V434.2

文献标识码: A

文章编号: (2009) 01-0016-05

Techniques of kerosene booster turbopump for LOX/kerosene staged combustion cycle engine

Li Xiangyang, Wang Xiaofeng, Xuan Tong, Miao Xusheng
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: High efficiency and mass performance of the fuel main pump for LOX/kerosene engine can be obtained by the use of the individual booster turbopump (BTP) assembly, which also be good to reduce the propellant pressurization requirement and increase the main pump shaft speed. As a example for kerosene BTP, the technique approach, bearing cooling system and axial balancing system were presented. The booster pump inducer design with variable screw-pitch and hub was suggested to improve the cavitation performance and head rise characteristics. The influence of flow coefficient, pitch and hub shape was analyzed with the inner flow field of the inducer by the numerical simulation. The hydraulic test results indicated that the kerosene BTP has stable performance maps with pressure head 0.4MPa increment for the main pump inlet pressure and also agree well with the design.

Key words: LOX/kerosene engine; booster turbopump; inducer; numerical simulation

收稿日期: 2009-01-03; 修回日期: 2009-01-20。

作者简介: 李向阳 (1968—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵技术。

0 引言

高性能补燃循环液体火箭发动机,对涡轮泵组件的整体性能提出了更高的要求^[1],在主泵前设置预压涡轮泵可减小发动机对推进剂组元贮箱的增压要求,可提高主泵转速从而达到提高主泵效率并降低结构质量的目的。国外于20世纪60年代开始研究预增压装置,初期在离心泵前设置诱导轮^[2],并先后采用引射式预压泵以及叶片式预压涡轮泵。相对于引射式预压泵,叶片式预压涡轮泵有更高的扬程和效率,因此它广泛应用于大推力、高性能液体火箭发动机中,1977年开始在推进剂供应系统中采用,典型例子是“联盟-2号”火箭RD-0124液氧/煤油发动机^[2,3]。这类叶片式预压泵还应用于俄罗斯的RD-120、RD-170、RD-191、RD-0120及美国的SSME等发动机上。

国内学者对氢泵诱导轮进行了初步的探讨,对高抗汽蚀性能变螺距诱导轮设计理论进行了分析和试验对比研究^[4],但目前国内在役的大推力液体火箭发动机没有采用叶片式预压涡轮泵装置,在发动机研制中没有成熟的设计方法和经验。液氧/煤油发动机首次采用了叶片式预压涡轮泵装置,为提高预压泵的抗汽蚀性能和扬程,针对煤油预压涡轮泵,提出了一种变螺距变轮轂诱导轮方案,对诱导轮内流场开展数值模拟,并进行了试验研究。

1 预压涡轮泵的作用

为了提高液体火箭发动机供应系统的抗汽蚀性能,常采用辅助泵,即预压泵。预增压装置一般可分为诱导轮-离心式、引射式及叶片式三种型式。

早期在开式循环发动机上,采用在离心轮前增加诱导轮的设计方案,但抗汽蚀性能低。引射泵的优点是结构简单,抗汽蚀性能好;缺点是增压能力小,效率明显偏低。引射式预压泵应用的典型例子是1962年研制的多喷嘴引射泵,它至今仍用于“质子号”运载火箭发动机上。引射式

预压泵适用于小推力高空发动机,而在大推力发动机中极少采用。当代先进的大推力、高性能发动机大都采用了叶片式预压涡轮泵方案。

为了简化预压泵的结构和主泵的结构,预压泵常采用前置式独立组件。预压泵安装在主涡轮泵(带诱导轮的离心泵)前面。对于一二级发动机,常将预压泵安装在主泵的近旁,这样可充分利用较大的惯性压头与在贮箱和发动机之间的长管路内的推进剂。对于上面级发动机,由于输送管道的长度和惯性压头都不大,可将预压泵装在贮箱出口处。

预压泵将供应系统入口处的低压提高到主泵无汽蚀工作必需的压力。由于预压涡轮泵转速比主泵转速小得多,故其不汽蚀断裂工作所需的发动机入口压力就较低。因而它可以降低供应系统入口压力,从而降低发动机贮箱压力。在采用预压泵时,主泵转速可以选取的很大,这样可以提高经济性,降低涡轮泵的质量,提高泵性能。

2 煤油预压涡轮泵布局

2.1 预压泵与预压涡轮配置

对于预压涡轮泵来说,从结构简单、工作可靠和维护方便出发,一般采用一个涡轮带一个泵的配置方案。就涡轮动叶栅和泵诱导轮的配置方式,预压涡轮和预压泵的布局方式主要有两种:一种是涡轮动叶栅与泵诱导轮置于同一轴上(同轴式),涡轮发出的功率通过花键传给泵;另一种是涡轮动叶栅布置在泵诱导轮的叶尖上(围带式),通过焊接方式把涡轮动叶栅轮轂和诱导轮叶片连成一体,把涡轮发出的功率传给泵。

因涡轮的 U/C 可设计成最优值,所以同轴式配置的最大优点是效率高。当工质不相容时,则必须在涡轮和泵之间配置复杂的动密封组件把两种介质完全隔开,同时涡轮的零件要独立设置,这种配置的缺点是结构复杂,而且,因涡轮工质在作完功后排入外界,发动机的比冲受损失。因工质相容,不需配置复杂的动密封组件把两种介质完全隔开,因此,围带式配置的优点是结构简单,工作可靠性高,另外,因涡轮工质不排入外

界,发动机的比冲不受损失。

液氧/煤油发动机煤油预压涡轮泵可采用围带式涡轮配置方案,如图1所示。

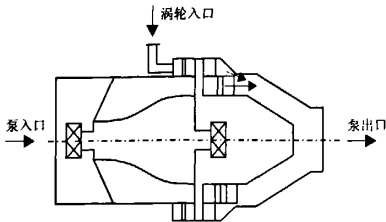


图1 预压涡轮泵总体配置示意图

Fig.1 Configuration of booster turbopump

2.2 轴承冷却系统

煤油预压泵前轴承安装座布置在进口管中心锥上,它通过数个肋和壳体相连,后轴承的安装座布置在出口管中心锥上,轴承座和外壳之间依次是泵压出室导向器和涡轮导向器。

为使轴承正常工作,采用煤油作为轴承的冷却润滑液。对于前轴承,冷却润滑液从主泵后引出,高压煤油通过中心孔流至轴承腔;对于后轴承,在转子出口部位连接一个辅助叶轮,它随诱导轮同速转动产生一定的扬程,轴承腔液体在抽吸作用下,形成定向流动,从而提供冷却润滑液。

2.3 轴向力平衡装置

诱导轮在液流内旋转时,沿每个叶片的两边产生压力差,诱导轮和液流会产生力的相互作用。诱导轮入口及出口流体的压力不同,在转子上作用有轴向力,另外为冷却轴承提供冷却液的辅助叶轮也会对诱导轮产生轴向力。如果转子轴向力超过轴承的承载能力,那么在预压泵总体设计时,必须设置一个工作可靠的轴向力自动平衡系统。平衡活塞式轴向力自动平衡系统主要包括高压源、低压源和节流元件。最简便的办法是把平衡活塞式轴向力自动平衡系统设置在前轴承座上。

3 预压涡轮泵过流部件

预压泵过流组件主要有吸入室、压出室和诱导轮;预压涡轮过流组件包括喷嘴、动叶栅及出口管。预压涡轮采用普通冲击式涡轮,不予详述。

3.1 吸入室与压出室

预压涡轮泵为独立组件,进口的空间方位不受限制,其吸入室可设计成水力性能最好的直锥形。入口直径可按入口液流速度 $3\sim 6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 来确定。吸入室与诱导轮之间的相对径向间隙,一般为 $0.002\sim 0.005$ 。在吸入室的末端,涡轮集合器、喷嘴通过焊接方式和其连接。

采用围带式涡轮配置方案,压出室的外侧布置涡轮的导向器,内侧布置泵的导向器,这样可形成涡轮通道在外,泵通道在内的两个同轴通道,在压出室的末端,涡轮导向器和泵导向器由周向均匀的小孔相连通。涡轮工质作完功后,通过周向小孔直接排到预压泵后主流中,然后随同主流进入下游的主泵。

3.2 变螺距变轮毂诱导轮

预压泵诱导轮需在很低的入口压力下无扬程汽蚀断裂工作,还要能产生足够的扬程。诱导轮实际上是一个叶片负荷很低的轴流式叶轮,它与通常轴流泵叶轮有以下明显不同点:轮毂比小、叶片安放角小、叶片数少及叶栅稠度大。这些特点使它具有很高的吸入性能。诱导轮结构设计时需重点分析流量系数、叶尖直径、螺距及轮毂形状的选择。

(1) 进口平均直径流量系数

В.И.Петров 和 В.Ф.Чебаевский 给出了下列经验公式来计算叶型汽蚀系数^[6]

$$\lambda_{\Pi} = a_0 + 0.115 \bar{c}_{1m} \quad (1)$$

式中, a_0 为综合系数,考虑了叶片数、叶片通道相对平均长度、进口边相对厚度以及叶片进口边削尖相对长度的影响; \bar{c}_{1m} 为相对入口轴面速度。

在综合系数、轮毂比为常数时,求导数 $d(\Delta h_{\Pi}/n^{4/3} V^{2/3})/d\varphi_{1m}$, 取导数等于零,便可得出最佳的平均直径流量系数。

平均直径流量系数最佳值仅取决于综合系数。很显然,增大综合系数会导致最佳相对平均直径流量系数的增大。

(2) 叶尖直径

当变化叶尖直径时,动压降有最小值。当增大叶尖直径时,动压降和轴面速度减小,而圆周

速度增加。可利用综合系数、轮毂比、转速及流量来确定诱导轮最佳叶尖直径⁷。

(3) 螺距

煤油预压泵诱导轮采用变螺距诱导轮, 既可提高抗汽蚀性能, 又可提高扬程。进口螺距由最佳平均直径流量系数、进口叶尖直径及进口攻角确定; 出口螺距由转速、出口轮毂比及叶尖外径确定。参考文献 [8] 简单给出了螺距变化的几种规律: ①线性变化; ②非线性变化; ③折线变化; ④分段等螺距串联。

提出了一种螺距变化规律:

$$S=S_1+(S_2-S_1)(\theta/\Psi)^n \tag{2}$$

式中, θ 和 Ψ 分别为叶片圆周角和总包角; n 为幂指数, 可取 $n=1\sim3$ 。选取大的 n 值, 诱导轮叶型进口部分螺距变化缓慢, 这时诱导轮具有高的抗汽蚀性能。

(4) 轮毂形状

诱导轮最佳效率主要取决于诱导轮直径系数⁷。存在这种可能性: 诱导轮既有高的抗汽蚀性能, 又有高的效率, 为此, 诱导轮轴截面通道的通流面积应是变化的, 或者是轮毂变化, 或者是叶尖变化。诱导轮进口直径系数根据所需的抗汽蚀性能来确定, 出口直径系数根据所需的效率来确定。从预压泵的结构布局来看, 更适合把诱导轮的轮毂设计成变化的。

诱导轮轮毂形状可分为三种: 圆柱形、圆锥形及抛物线形。产生同样的扬程, 圆柱形轮毂诱导轮的轴向尺寸和径向尺寸要比其他型式的大一些, 这就意味着预压泵的结构质量要大, 一般不采用圆柱形轮毂。圆锥形轮毂按线性规律变化, 即从进口轮毂半径线性变化到出口轮毂半径。抛物线形轮毂, 其进口段和出口段的轮毂直径沿轴向保持不变, 只有扬程段的轮毂直径沿轴向是变化的, 抛物线形轮毂应按某种三次方关系变化, 即系数满足一定条件。

4 预压涡轮泵内流场的计算及分析

在其他结构参数相同的情况下, 设计了两种

轮毂形状: 抛物线形和锥形的诱导轮 (轮毂形状为抛物线形简称为诱导轮 1, 圆锥形简称为诱导轮 2)。利用 NUMECA 流体计算软件, 对诱导轮进行内流场数值模拟和分析。

4.1 周向平均速度、静压分布

诱导轮周向平均速度和静压分布如图 2 所示。由图可知, 叶片进口顶部区域有明显的回流区, 诱导轮 1 的回流区稍小, 诱导轮 1 进口顶部的低压区亦较诱导轮 2 稍小。诱导轮 1 的静压普遍稍高于诱导轮 2, 除此以外, 静压分布规律大致相同, 在前半段压力沿轴向增长, 在后半段压力沿径向增加。

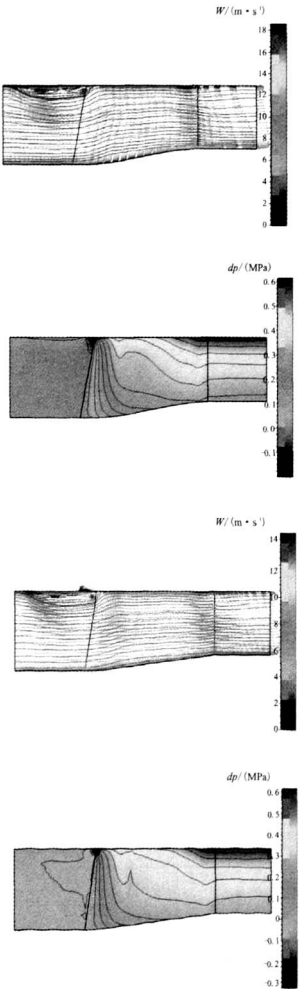


图 2 诱导轮周向平均速度、静压分布
Fig.2 Distribution of mean pressure and circumferential velocity in inducer

4.2 周向平均相对速度随流量的变化

计算表明,在60%流量工况,两种诱导轮出口轮毂处出现较大范围的回流区域,从叶轮流出的液体一部分又重新回到叶轮中再次接受能量。从计算中还可以得知,随着流量的增加,进口回流区域变小,在120%流量工况下,回流区几乎消失。这与参考文献[6,7]的实验结果一致:当无量纲流量参数 $q_1 < 0.5 \sim 0.6$ 时,在诱导轮入口会出现回流区,对于计算的诱导轮,额定流量工况下流量参数 $q_1 = 0.55$ 。

5 煤油预压涡轮泵水力试验

对煤油预压涡轮泵进行了水力试验,获得了工作性能,验证了结构方案的可行性。

煤油预压涡轮泵采用了抛物线形轮毂的诱导轮。水力试验工况和设计工况一致,性能曲线见图3(H 为扬程,MPa; q 为流量, l/s)。从图中可以看出,诱导轮的流量扬程特性符合一般的线性变化规律。额定流量下预压泵扬程约为0.4 MPa,满足设计要求。

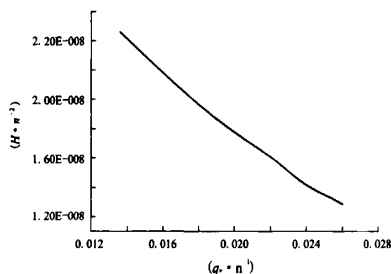


图3 预压泵流量扬程特性

Fig.3 BTP characteristics of head rise vs flow rate

6 结论

(1) 液氧/煤油补燃发动机独立配置的预压涡轮泵宜采用围带式涡轮配置方案,在预压涡轮泵上设置轴向力平衡系统和轴承冷却系统,可兼顾

结构简单和工作可靠性。

(2) 数值模拟表明,叶片进口顶部区域有明显的回流区,抛物线形诱导轮的回流区比锥形诱导轮稍小。随着流量的增加,进口回流区域变小,在120%流量工况下,回流区几乎消失。在其他结构参数相同的情况下,抛物线形轮毂诱导轮的性能要优于锥形轮毂的性能。

(3) 煤油预压涡轮泵的水力试验结果表明,预压涡轮泵性能稳定,参数协调。额定流量下预压泵扬程达到0.4 MPa。

参考文献:

- [1] 张贵田. 液氧/煤油液体火箭发动机的应用与发展前景[J]. 中国航天, 1994, 16(8): 39-41.
- [2] Demiyanko Yu V, Dmitrenko A I, Kalitin I I, et al. Experience of Developing Liquid Propellant Rocket Engine Assembly Feed Systems Using Boost Turbopump Assemblies [R]. AIAA 2003-5072.
- [3] Demiyanko Yu V, Dmitrenko A I, Dmitrenko V K, Pershin. Boost Turbopump Assemblies for Hydrogen - Oxygen Liquid Propellant Rocket Engines [R]. AIAA 2004-3685.
- [4] 颜子初. 高性能螺旋轮设计的探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 1998, 235(5): 12-20.
- [5] 朱祖超, 王乐勤, 汪希莹. 高速泵变螺距诱导轮的设计分析[J]. 农业机械学报, 1997, 28(4): 102-106.
- [6] Петров В И, Чебаевский В Ф. Кавитация в высокооборотных лопастных насосах [M]. Москва: Машиностроение, 1982.
- [7] Овсянникова Б В, Чебаевского В Ф. Высоко-оборотные лопастные насосы [M]. Москва: Машиностроение, 1975.
- [8] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [9] 白东安. 涡轮泵超低工况性能研究 [J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 13-16.
- [10] 南向谊, 王拴虎, 李平. 空气涡轮火箭发动机研究的进展及展望[J]. 火箭推进, 2008, 34(6): 31-35.

(编辑: 马 杰)