

毛刺和加工精度对涡轮流量影响的数值模拟

Numerical Simulation of the Turbine Mass-Flow Rate by the Affect of Burr and Machining Precision

顾玲燕 孙华伟 李爽 / 南京机电液压工程研究中心航空机电系统综合航空科技重点实验室

摘要: 为了研究喷嘴内壁毛刺和内壁尺寸加工精度对涡轮流量的具体影响,采用数值计算方法对液动涡轮泵喷嘴机构的单喷嘴内部流动进行数值模拟。通过对比计算结果与试验结果,以及分析计算所得流场细节,表明各工况点计算值与试验值的变化趋势基本一致;毛刺和加工精度对涡轮流量都会产生影响,但相对于加工精度,毛刺是影响涡轮流量的主要因素。

Abstract: In order to study the detailed impact of the burr and the machining precision on turbine mass-flow rate in jet nozzle, numerical computational method is used to simulate the internal flow in single jet nozzle of the hydraulic operated turbopump. Through comparison of the computational and the experiment results, and the flow area, the results indicate that in each status point, the trend of the calculated and experiment values is substantial consistent. Both burr and machining precision can affect the turbine mass-flow rate. Relative to the machining precision, burr is the major factor in affecting the turbine mass-flow rate.

关键词: 数值模拟; 喷嘴; 毛刺; 加工精度; 涡轮流量

Keywords: numerical simulation; jet nozzle; burr; machining precision; turbine mass-flow rate

0 引言

液动涡轮泵由高压燃油驱动,其优点是外廓尺寸小、重量轻、输油流量大,因此,在现代战斗机的燃油供输油系统中被广泛采用。其工作原理是,由发动机燃油泵引出的燃油在压力作用下进入喷嘴机构,通过喷嘴机构的喷嘴冲向涡轮的工作叶轮,涡轮工作叶轮和液动涡轮泵的轴流工作叶轮联成一体;在喷嘴中,依靠流道截面面积的变化,燃油的压力势能转变为速度动能;燃油通过涡轮工作叶轮特型设计的叶片间流道流动时,依靠液流方向和速度的变化,其动能转变为机械功,使涡轮的工作叶轮旋转;涡轮工作叶轮后的燃油进入出口流道,其中部分燃油沿流道进入两轴承之间的空腔,润滑和冷却轴承;最后,

叶轮旋转,用特型设计的叶片吸入进口处的燃油,使其获得速度动能和压力势能;液动涡轮泵工作叶轮后的燃油进入导向器的叶片,在叶片中整流,速度部分滞止,而压力增加,导向器后的燃油进入高压的供油总管。

在对液动涡轮泵多台产品进行性能试验时,发现试验结果达不到泵要求的增压值,涡轮流量偏小,这表明其动力源不足。经过仔细检查,发现涡轮喷嘴中存在细小毛刺,剔除毛刺后的液动涡轮泵性能试验结果满足要求。通过分析发现,对涡轮流量的影响因素主要是毛刺和加工精度。由于现实条件中测量这两种要素对涡轮流量的具体影响,其过程比较繁琐,因此本文采用数值模拟方法,对喷嘴内壁有无毛刺时的三维流

场进行计算,对比试验结果,分析毛刺对涡轮流量的影响;不带毛刺喷嘴模型考虑公差因素选择其设计时的最小值和最大值分别进行计算,通过数值模拟分析喷嘴内壁加工精度对涡轮流量的影响。

1 几何建模和计算设置

喷嘴机构上有涡轮工作的喷嘴和泵工作的导流器。喷嘴是影响冲击涡轮性能的主要部件,对其结构、尺寸和表面光洁度的要求非常严格。该型号液动涡轮泵的喷嘴机构沿圆周分布有五个喷嘴,如图1a)所示,喷嘴柱段直径为3.1mm,锥段锥角为 15° ,喷嘴中心线与叶轮Z-Z轴线的倾斜角为 75.23° ,与叶轮Y-Y轴线的倾斜角为 80° ,作用的液

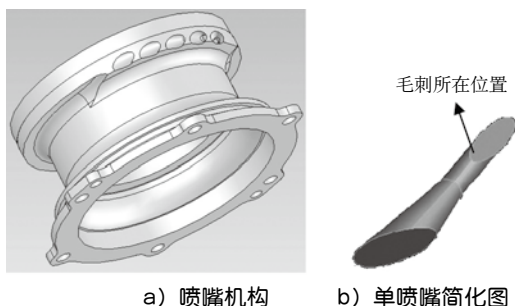


图1 喷嘴机构

流量均布,因此计算时只需计算单个喷嘴内壁毛刺和加工精度对涡轮流量的影响,并以此结果计算五个喷嘴对涡轮流量产生的影响。喷嘴内壁毛刺所在位置如图1b)所示。

对不带毛刺和带毛刺喷嘴,分别计算了同一台产品的5个工况点,对不带毛刺喷嘴,计算时还考虑了圆柱段公差值,喷嘴柱段直径的设计值为 $\Phi 3.1_0^{+0.025}$ mm,分别取其最大直径 $d_{\max}=\Phi 3.125$ mm和最小直径 $d_{\min}=\Phi 3.1$ mm进行计算,观察加工精度对涡轮流量的影响。

带毛刺和不带毛刺喷嘴的网格划分方法完全一致。对比不同网格数下的计算结果和计算所需时间后,最终确定计算网格数约为16000,全局采用非结构化网格,如图2所示。

边界条件完全参照试验条件进行

设置,锥段大口为压力入口,柱段为压力出口,如图2 b)所示,喷嘴孔壁和毛刺设置为固壁。湍流模型为标准 $k-\epsilon$ 模型。温度会影响流体的粘性和密度,试验中不同工况点的燃油温差很小,因此计算时可忽略燃油的温度影响。

实际情况中,燃油冲击叶片主要损失的是动能,因此忽略燃油冲击叶片损失的压能,将泵出口压力即涡轮出口压力作为喷嘴出口压力值进行计算。计算中所有压力值为绝对压力。

2 计算结果与试验结果的对比分析

2.1 不带毛刺喷嘴的情况

1) 柱段直径取 $d_{\max}$

不带毛刺喷嘴柱段取最大直径时的计算结果如表1所示。从表1中数据可以看出,5个工况条件下计算所得的涡轮流量和试验测得值相差不大,其绝对误差不超过3%。

2) 柱段直径取 $d_{\min}$

不带毛刺喷嘴柱段取最小直径时的计算结果如表2所示。与表1计算结果相比,其计算所得涡轮流量明显小于柱段直径取最大直径时的结果,且与试验值相比相差也较大。

2.2 带毛刺喷嘴的情况

带毛刺喷嘴的计算结果如表3所示,可以发现其与试验结果非常接近,二者间的绝对误差很小。

表4给出了毛刺和加工精度对涡轮流量的影响。发现喷嘴柱段取 $d_{\max}$ 时,计算结果中毛刺所造成的涡轮流量和试验结果基本一致,而喷嘴柱段取 $d_{\min}$ 时,计算结果中的毛刺对涡轮流量的影响比试验结果要小很多,这说明加工精度对产品的性能指标也有较大

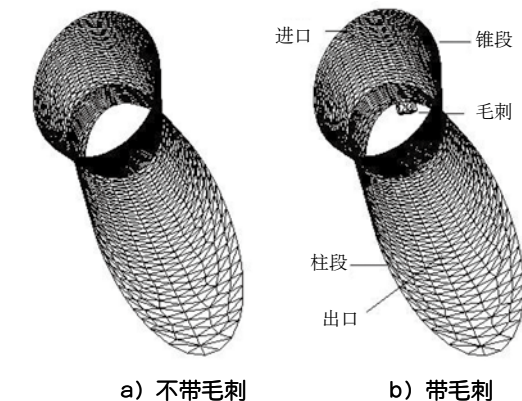


图2 喷嘴网格分布图

流在喷射时有相同的相位。采用数值方法计算涡轮流量时,对喷嘴机构的结构进行了简化,五个喷嘴之间相互独立且

表1 不带毛刺喷嘴最大直径时计算与试验结果比较

工况点	进口压力 (kPa)	出口压力 (kPa)	试验测得的涡轮流量 (L/h)	计算测得的涡轮流量 (L/h)	计算和试验结果绝对差值
1	1003.325	151.955	6078	5955.225	2.02%
2	1303.325	164.915	6955	6905.595	0.71%
3	1634.325	171.425	7831	7850.089	0.24%
4	1682.325	170.935	7931	7981.506	0.64%
5	2305.325	185.745	9251	9477.561	2.45%

表2 不带毛刺喷嘴最小直径时计算与试验结果比较

工况点	进口压力 (kPa)	出口压力 (kPa)	试验测得的涡轮流量 (L/h)	计算测得的涡轮流量 (L/h)	计算和试验结果绝对差值
1	1003.325	151.955	6078	5863.929	3.52%
2	1303.325	164.915	6955	6797.919	2.26%
3	1634.325	171.425	7831	7722.031	1.39%
4	1682.325	170.935	7931	7850.933	1.01%
5	2305.325	185.745	9251	9321.509	0.76%

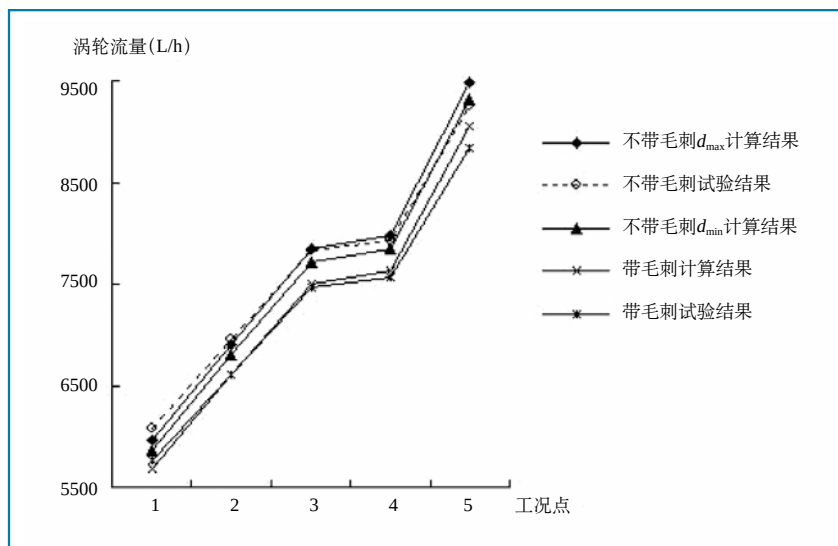


图3 不同工况点计算与实验所得涡轮流量图

表3 带毛刺喷嘴计算与试验结果比较

工况点	进口压力 (kPa)	出口压力 (kPa)	试验测得的涡轮流量 (L/h)	计算测得的涡轮流量 (L/h)	计算和试验结果绝对差值
1	1001.325	152.295	5768	5682.017	1.49%
2	1303.325	160.005	6600	6615.015	0.23%
3	1626.325	164.645	7465	7496.565	0.42%
4	1682.325	167.305	7574	7637.306	0.84%
5	2298.325	178.915	8840	9046.521	2.34%

表4 试验与计算时毛刺造成的涡轮流量差

工况点	试验中毛刺对涡轮流量的影响 (L/h)	计算中毛刺对涡轮流量的影响 (L/h)		计算中加工精度对涡轮流量的影响 (L/h)
		$d_{\max}$	$d_{\min}$	
1	-310	-273.21	-181.91	-91.30
2	-355	-290.58	-182.90	-107.68
3	-366	-353.53	-225.47	-128.06
4	-357	-344.20	-213.63	-130.57
5	-411	-431.04	-274.99	-156.05

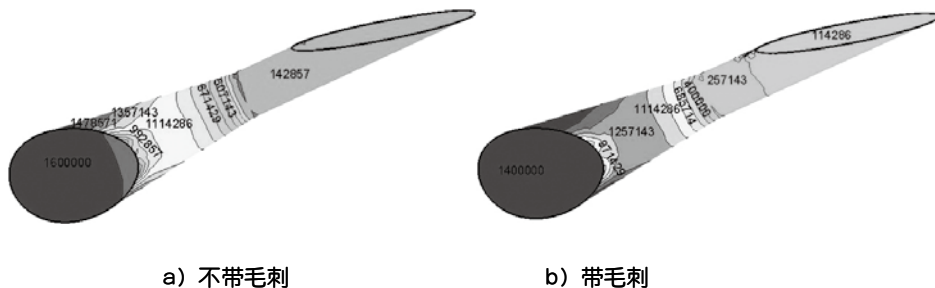


图4 喷嘴固壁压力分布云图(单位为Pa)

的影响。表4还说明毛刺对涡轮流量的影响比较大,而加工精度的影响则相对小很多。

为了更形象地说明计算与试验结果之间的差别,图3给出了不带毛刺和带毛刺喷嘴不同工况时计算与试验所得涡轮流量图。

从图3中可以发现,带不带毛刺其计算结果与试验结果都比较吻合,不带毛刺的喷嘴其涡轮流量都大于相同工况条件下带毛刺喷嘴的涡轮流量,这说明毛刺确实影响了涡轮流量,且是影响涡轮流量的主要因素。不带毛刺喷嘴的计算结果显示,喷嘴的加工精度对涡轮流量有一定影响,在满足泵所需增压值时,涡轮流量越小越好,即在加工精度范围内喷嘴孔加工得越小越好。

通过以上分析,可以发现毛刺和加工精度都是影响涡轮流量的因素,但毛刺的影响更大一些,且毛刺是产品加工不允许存在的,而加工精度则是现实生产中允许存在的。不论带不带毛刺喷嘴,其计算结果和试验结果之间都有一定的误差,这由以下几个主要因素引起。

a. 计算时通过计算单个喷嘴的流量换算得到涡轮流量,试验测得的涡轮流量是五个喷嘴的总流量;

b. 计算时假设五个喷嘴完全一致,而在实际生产中,这是不可能实现的;

c. 计算时喷嘴口是自由出流,而试验时喷嘴口有叶片阻挡,并非自由出流;

d. 计算参数的选择,温度等因素的忽略都可能造成结果之间的

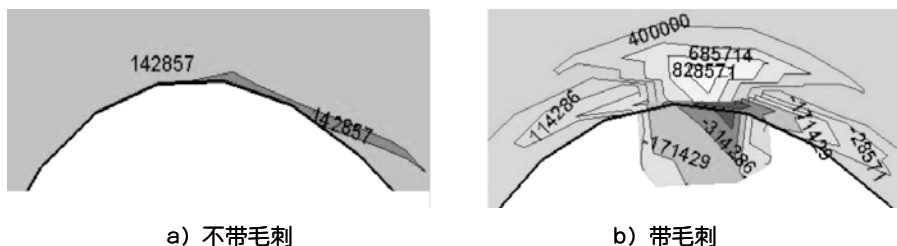


图5 毛刺对场流压力分布影响放大图

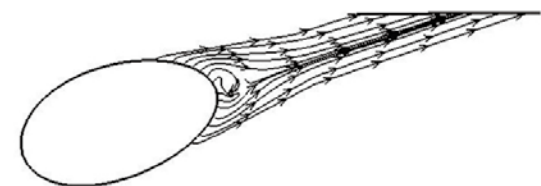


图6 带毛刺喷嘴固壁附近流线分布图

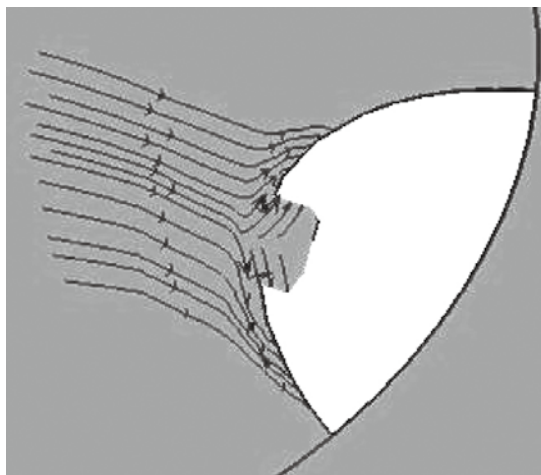


图7 喷嘴内壁毛刺附近流线分布图

误差。

2.3 三维场分析

1) 压力分布图

最大直径 $d_{\max}=\Phi 3.125\text{mm}$ 和最小直径 $d_{\min}=\Phi 3.1\text{mm}$ 计算所得到的喷嘴固壁压力分布基本一致。图4是喷嘴不带毛刺和带毛刺时的固壁压力分布云图。从图中可以看出,对于带毛刺和不带毛刺喷嘴,其锥段也就是进口段的压力分布趋势比较一致,进口处为高压区,随着截流面积的减小,液体流速越来越快,压力越来越低;由于进口不是一个平面而是一个圆弧面,流体进入喷嘴锥段口时不是同步撞击固壁,进口左端固

壁凹向流体流动方向,有个顺流的作用,而进口右端固壁凸向流体流动方向,对流体会有有一部分撞击作用,因此进口右端对场流分布有影响,在这里出现了相对低压区。

不带毛刺喷嘴的柱段出口处压力分布均匀,而带毛刺喷嘴的柱段出口压力分布则受到毛刺的影响,在毛刺前后产生了压差,且部分区域出现了负压,如图5所示。这是因为流体流动时突然遇到毛刺,相当于是一个钝体绕流,在绕流体后部出现负压区,该流动机理在很多绕流文献中都有说明。

2) 速度分布图

图6是带毛刺喷嘴固壁附近的流线分布图。可以发现,在进口锥段固壁处有一小部分回流出现,这与前面压力场分布的结果吻合。不带毛刺喷嘴固壁附近速度场分布和带毛刺的结果基本一致,只是带毛刺喷嘴在毛刺附近还存在一个小的漩涡绕流区,如图7所示,这与图5压力场结果相对应,该漩涡绕流区也就是带毛刺喷嘴涡轮流量损失的主要原因。

3 结论

本文通过数值方法计算了毛刺和

加工精度对涡轮流量的影响,通过和试验结果对比分析,可得出以下结论。

1) 毛刺对产品性能指标有很大影响。在没剔除毛刺前,液动涡轮泵的性能试验达不到要求,剔除毛刺后可满足产品所需性能。

2) 加工精度对涡轮流量也有一定影响。在满足产品所需性能指标时,在加工精度范围内喷嘴孔加工得越小,涡轮流量就越小,所需原动力越小,因而可以降低成本。

3) 毛刺相对于加工精度对产品性能指标的影响要大得多。毛刺是加工所不允许存在的,而加工精度是允许存在的,毛刺是不利因素,而加工精度是有利因素。

因此,工艺人员在加工产品时要注意这些小细节,以保证产品的质量符合设计要求。

AST

参考文献

- [1] 徐灏.机械设计手册[M].第4卷.北京:机械工业出版社,1991.
- [2] 赫尔姆特·舒尔茨.泵原理、计算与结构[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [3] 王焕德.流体力学和流体机械[M].北京:中国农业机械出版社,1980.
- [4] 生井武文.粘性流体力学[M].北京:海洋出版社,1984.
- [5] 宁纯利.现代战斗机燃油系统泵输网络的计算模型[D].北京:北京航空航天大学,2000.

作者简介

顾玲燕,工程师,主要从事航空燃油泵的设计和流体仿真工作。