

低功耗小型低温流体离心泵设计与性能测试

王鸽¹, 田桂², 程诚², 黄永华¹

(1. 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 200240, 上海; 2. 上海空间推进研究所, 201112, 上海)

摘要: 为满足航天和生物医疗等应用中对低功耗小型低温液体循环泵的需求,采用数值模拟和3D打印叶轮迭代优化方法设计了叶轮和诱导轮结构,研制了一款10 L/min流量、百瓦以下功率的小体积低温离心泵。搭建了一套小型低温泵闭式回路性能测试系统,完成了以液氮为介质的低温工况泵性能测试。获得了转速在4 500~8 000 r/min范围内的低温泵外特性曲线,研究了泵前流体压力(表压140~800 kPa)对低温泵扬程的影响规律。研究表明:该小型低温离心泵在小流量小扬程下运行稳定;随着流量的增加,功率先近似线性增长,而后增长速率逐渐减小;当转速增加时,功率线性增长区域的斜率变大且效率曲线开始出现峰值;转速越大,则最佳效率工况点越向大流量区域偏移,在额定转速6 500 r/min时,最佳效率工况点为流量10 L/min,扬程为7.12 m;入口压力高于200 kPa时,低温泵扬程对压力变化不敏感。本文研究应可为小流量低温流体驱动应用的解决方案提供参考。

关键词: 离心泵;低功耗;小流量;性能测试;低温流体

中图分类号: TH311, TB655 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202206020 **文章编号:** 0253-987X(2022)06-0175-09



OSID 码

Design and Performance Testing of a Low Power Small Cryogenic Centrifugal Pump

WANG Ge¹, TIAN Gui², CHENG Cheng², HUANG Yonghua¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: To meet the demand of low power small cryogenic pump for fluid circulation in aerospace and biomedical applications, a small volume cryogenic centrifugal pump with a flow rate of 10 L/min and a power of less than one hundred watts was developed, of which the impeller and inducer structures were designed by numerical simulation and 3D printing impeller iterative optimization method. A set of closed-loop performance testing system for small cryogenic pumps was built, and the performance tests of the cryogenic pump using liquid nitrogen as the medium were completed. The external characteristic curves of the cryopump with a rotation speed of 4 500—8 000 r/min was obtained, and the influence of the fluid pressure (gauge pressure 140—800 kPa) in front of the pump on the head of the cryopump was studied. The study results showed that the small cryogenic centrifugal pump ran stably under a small flow and a small head. As the flow rate increased, the power first increased approximately linearly, and then the rate of increase gradually decreased. When the speed increased, the slope of the power linear growth area became larger

收稿日期: 2022-02-16。 作者简介: 王鸽(1997—),女,硕士生;黄永华(通信作者),男,教授。 基金项目: 上海空间推进研究所创新基金资助项目(202007);上海市科技创新行动计划项目(20S31903400)。

网络出版时间: 2022-03-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220311.1745.004.html>

and the efficiency curve began to peak. The higher the speed, the more the best efficiency operating point shifted to the large flow area. At the rated speed of 6 500 r/min, the best efficiency operating point was 10 L/min with a flow rate of 10 L/min and a head of 7.12 m. When the inlet pressure was higher than 200 kPa, the head of the cryopump was not sensitive to pressure changes. This paper can provide a reference for solutions to low flow cryogenic fluid drive applications.

Keywords: centrifugal pump; low power; small flow rate; performance testing; cryogenic fluid

符号表

b_2	叶片出口宽度	D_1	叶轮进口有效直径	D_2	叶轮外径	H	扬程	n	转速
P	输入功率	Δp	泵进出口压差	Q	流量	η	效率		

在航空航天、工业制造业以及科研院所等研究领域,低温流体的输送应用需求变得越来越广泛^[1]。例如,航天在轨热力排气系统、小型超导器件冷却系统、生物医疗液氮冷却系统等应用场合,总体上需要具有以下特征的低温流体循环泵:工作温区涵盖 20~120 K,电机功率小,结构紧凑,质量小,流量小且压头较低,气密性好,可以间歇性反复启动等。目前,国内外成熟应用的从液化天然气到液氢温区的低温泵主要用于大型低温流体加注、管道增压输送,特点为体型大、流量大、扬程高、功率大、漏热大,无法用于小型绝热管路系统内的低温流体慢速驱动。因此,低功耗小型低温离心泵的设计与研制具有必要性。

现有文献报道的小型低温泵产品主要来自美国 Barber-Nichols 公司。该公司为 NASA 低温推进剂热力排气项目定制的 BNHP-08 型液氢离心泵在马歇尔飞行中心多功能液氢试验平台(MHTB)上获得应用。该泵在液氢工况下,扬程最高达 7 m,流量为 56 L/min,额定功率约 112.5 W^[2-4]。该公司研制的超流氦传输小型低温泵长度仅约 10 cm,流量为 13.3 L/min 时压头可达 20 kPa^[5]。但是,由于应用场合中不涉及两相流,所以该泵设计中不包含抗汽蚀结构。除此之外,美国 ACD 公司的活塞式低温泵也满足小流量低扬程特征,但其功率通常在 1 kW 以上,且体型和质量大,同时活塞结构易损耗,不适合长期使用。国内研究团队近年来也开始关注小流量低温泵研制。朱圣良等^[6]参考 Barber-Nichols 公司为全超导托卡马克核聚变试验装置(EAST)提供的超临界氦循环泵实体,设计加工了部分流低温液氮泵,并测试了其汽蚀特性曲线,得到临界空化系数为 0.012 6。为了减小泵体漏热,他们采用了延长轴结构,使得泵整机尺寸偏大。邵雪

等^[7]以超临界氢循环泵为原型加工了长轴液氮泵,用以研究低温流体泵内流场特性。经测试,该泵流量较小,约为 8.4~12 L/min,扬程和功率分别为 46 m 和 200 W。文献[8]报道了一台自研 20 L/min 小型低温离心泵,其用途是空间低温推进剂的热力排气试验。该泵为潜液泵,工作时直接浸没于试验贮罐内,不利于管路式循环系统的使用。

综上所述,国内对低功耗小流量的小型低温流体泵设计研制只有少数几例,国内市场上尚不存在成熟的、批量生产的小型低温离心泵。但是,随着航天低温工程、低温超导、液氢以及液化天然气计量加注站等领域的发展,此类小型低温泵的需求正逐步提上日程。本文设计研制了一款小流量、低功率的小体积低温流体循环离心泵,搭建了一套用于小型低温泵性能评估的闭式回路测试系统,完成了以液氮为介质的低温离心泵低温工况性能测试。相关研究可为相关低温泵的设计及测试提供技术参考。

1 低功耗小型低温流体离心泵的设计

1.1 结构设计

从控制整机包络尺寸的需求出发,总体外观采用直角型泵体,相比直线型泵体可减小泵身长度,使结构更加小巧紧凑。同时,排液口方向与入口管垂直可以一定程度减小泵内流体的流动损失。低温泵主要包含泵壳、叶轮、连接法兰和电机,外观如图 1(a)所示,剖面如图 1(b)所示。

传统低温泵往往采用大型常温电机,导致泵质量大且需延长轴结构防漏热^[9]。为控制泵整机体型,需严格控制电机部分的体积和质量,采用自制小型三相直流无刷电机,尺寸为 $\Phi 45\text{ mm} \times 28\text{ mm}$,额定电压为 24 V,最大转速为 8 000 r/min,额定功率为 85 W。与电机配合使用的调速器调节泵在运行

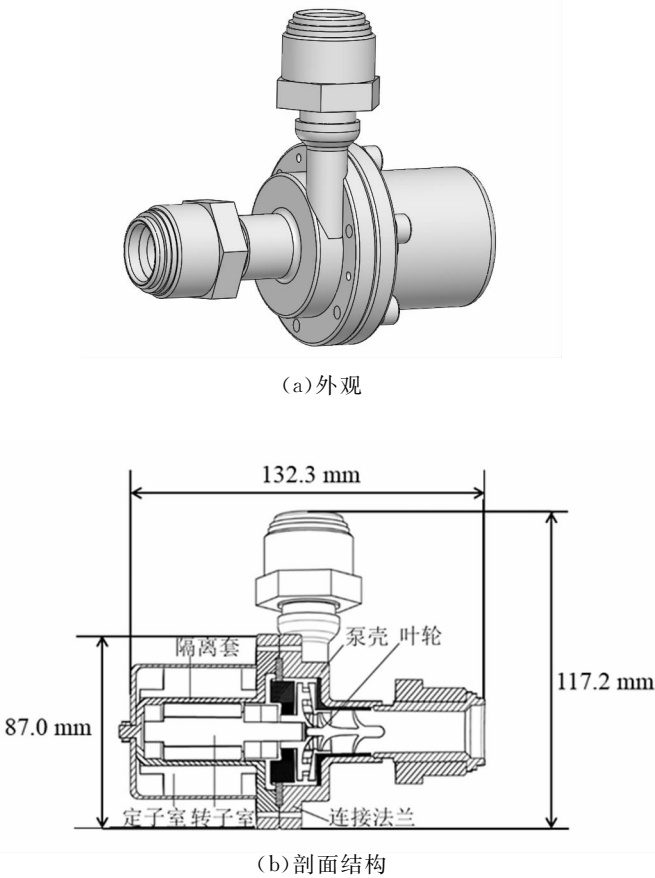


图 1 小型低温离心泵结构

Fig. 1 Structure diagram of small cryogenic centrifugal pump

时的功率及转速,使其灵活适用于多种流量场合。低温介质的泄露会很大程度减少电机的使用寿命,为实现运行时内部流动介质与泵电机间的零泄露,采用隔离套将电机转子室与定子室分隔^[10-11]。定子内包含星形绕法缠绕线圈,其产生的旋转磁场带动隔离套内的内磁转子转动,内磁转子的前端与泵转轴相连进而带动叶轮转动,即利用永磁体的磁力传动实现扭矩的无接触传递。当磁力驱动泵的隔离套为金属材料时,必然产生电涡流损失^[12],从而一定程度上降低电机性能和效率。减小隔离套的厚度和选择电阻率大的材料均可减小涡流损耗的产生^[13],因此该隔离套采用厚度为 0.3 mm 的 TC4 钛合金进行加工制作。

泵壳、叶轮等其他部件均采用 304 不锈钢加工。由于低温流体的沸点和汽化潜热极低,且离心泵内叶轮进口处压力较低^[14],因此在低温泵工作时内部容易发生空化现象。流动介质产生的空泡随液体从低压区进入高压区后,急剧收缩、凝结,其周围的液体以极高的速度冲向原气泡所占空间,由此产生的高强度冲击波将引起叶轮和泵壳振动^[15],甚至导致

泵水力机械效率下降,扬程降低,影响使用寿命。流体机械技术中在首级叶轮前添加诱导轮是防止空化或改善泵空化运行能力的主要途径之一^[16]。诱导轮具有小载荷、高稠度、小冲角的特点,能使泵适应一定程度的汽蚀条件。因此,小型低温泵叶轮前部加有三叶片的诱导轮结构,与叶轮一体加工,同心度高,运行时更加稳定。进液口和排液口均采用 VCR 接口连接,既有利于保证低温下的零泄漏,也便于连接管路拆装。泵壳与隔离套之间采用 CF 法兰和铜垫片密封连接。低温离心泵整体除不锈钢和钛合金材料的壳体外,在内部叶轮进口的间隙以及蜗壳内非流道区域分别采用黄铜材料作密封套及聚四氟乙烯材料做间隙填充,以减少死体积和穿流损失。该低温离心泵整体包络尺寸为 132.3 mm×117.2 mm×87.0 mm。

1.2 叶轮优化设计

叶轮作为离心泵内最重要的过流和做功部件,其性能很大程度上决定了离心泵的整体水力性能^[17]。从小流量低扬程的需求出发,确定设计泵的性能指标:转速 6 500 r/min,流量 10 L/min,扬程 5 m(液氮)。采用叶片泵速度系数设计方法^[18],对叶轮的基本几何尺寸进行计算。结合计算结果以及加工工艺因素的考虑,得到最终的基础几何尺寸加工值,如表 1 所示,叶轮内各尺寸示意如图 2 所示。

表 1 离心泵水力部件主要参数

Table 1 Main parameters of hydraulic components of centrifugal pump

参数	计算值	加工值
D_1 /mm	15.3	16
D_2 /mm	30.5	35
b_2 /mm	1.9	2

除基础几何尺寸外,还需确定叶轮的其他设计参数,如叶片数、叶片包角、叶片进出口安放角等,进一步提高叶轮以及泵的水力性能^[19]。目前,国内外低温离心泵叶轮叶片具体参数的选取往往直接取决于设计经验。由于低温泵部件的加工成本以及低温试验操作的复杂性,低温离心泵叶轮叶片的优化大多采用 CFD 理论仿真实现,缺乏试验验证。因此,为节省研发成本、缩短研制周期,通过 CFD 仿真分析液氮和水两种介质在小型低温离心泵内的流动相似性,并采用批量 3D 打印叶轮和常温水质测试的方法,快速迭代验证小型低温离心泵叶轮优化的设计^[20]。对于不同的叶片进口和出口安放角,测试

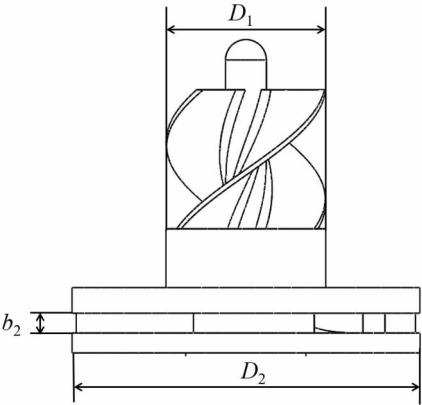


图 2 叶轮内各尺寸示意

Fig. 2 Schematic diagram of each dimension in the impeller

结果显示其对小型低温泵性能影响不明显。最终,根据叶片包角($80^{\circ}\sim110^{\circ}$)和叶片数(4~6)取值范围内的参数化仿真研究和试验测试,确定叶片包角为 90° 、叶片数为6的最优参数取值。详细介绍参见文献[20]。

2 低温离心泵性能测试与分析

2.1 低温离心泵性能测试系统

与常温流体泵性能测试相比,实现低温流体泵性能测试的装置在保温、阀门、传感器等各项内容上都具有特殊性和挑战性。除了流体管路器件和传感器必须耐受深低温外,绝热性能的好坏直接影响到管内流体是否存在气液两相。文献中报道的低温泵测试系统通常直接将测试回路浸没在低温流体内^[21-23],或者采取高真空绝热方法^[24]。前者低温流体量消耗大且装置的移动与管路拆装十分不便;后

者的高真空条件则对系统加工集成和真空设备提出了更高要求。为了克服上述缺陷,本文设计和搭建了一套适用于小型低温泵性能评估的新型闭式回路测试系统,主要构成如图 3 所示,包括测试回路、绝热保温结构 and 数据测量共 3 个单元结构。

测试回路单元为允许带压的封闭回路,主要包括加压气罐、高压液氮储罐、过滤器、待测低温泵、低温涡轮流量计、翅片盘管换热器、常压液氮储罐、低温流量调节阀。为了实现泵入口流体的压力调节,在泵入口上游的高压液氮储罐上连接一加压气罐。通过与气罐连通的压力表及气罐进气阀门、排气阀门调节气罐内压力,进而控制高压液氮罐内的压力。此配置可使高压罐内的液氮在温度基本不变的情况下迅速实现过冷状态,从而让过冷液氮流经泵体实现全液工况测试。借助该装置可方便地实现不同压力水平的泵性能测试。由高压储罐输出的过冷介质在经过低温泵测试段后,由于泵的自身发热以及管路的漏热,通常会产生一定的温升至少量气化。因此,本文系统在泵出口下游设有常压液氮罐及翅片盘管换热器。管内的高压热流体与管外的常压 77 K 液氮充分换热,被回归到过冷状态,流回高压液氮罐,维持高压罐内介质的过冷状态。这一换热过程会消耗常压储罐内的液氮介质,因此其内部设有液位计,在该常压罐进液管路上安置低温电磁阀,两者组合根据液位情况实现自动补加。在闭式循环运行过程中,当循环流量较大时,回流液体可能会以较大流速冲入高压储罐,导致泵入口流体的压力波动。因此,在高压罐内顶部空间设置类似静压室的稳流孔板结构,实现稳流效果。

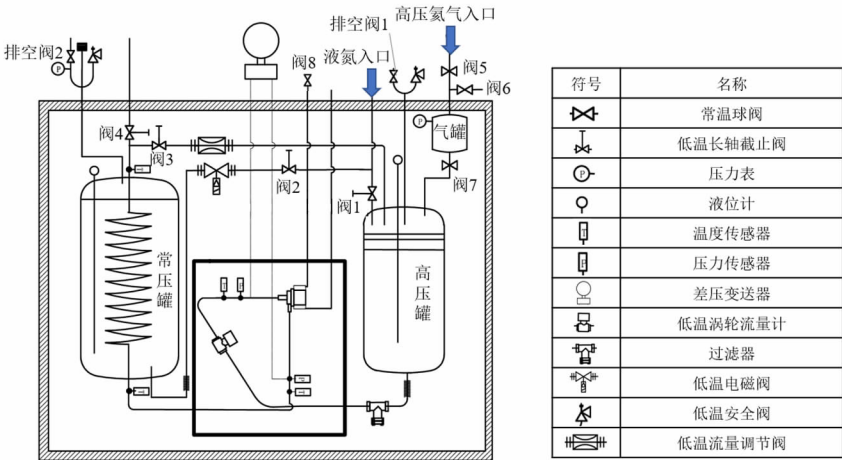


图 3 低温试验系统流程及说明

Fig. 3 Cryogenic test system flow and description

整个测试回路由环氧吊杆悬挂于撬装绝热箱体的上盖板内侧,阀门及仪表均从上盖板引出并固定。此外,由于被测低温泵需经常拆装,因此再设置一隔离内箱。撬装绝热箱体与隔离内箱之间填充导热系数约为 0.02 W/(m·K)的珠光砂保温。内箱侧塞由 200 mm 厚的聚氨酯泡沫材料制成。

数据测量系统单元包括压力传感器、温度传感器、差压变送器、低温涡轮流量计、液位计。系统中共安装有 6 支温度计,布点如图 3 所示,均为已标定

的 4 线制 PT100 铂电阻温度计,精度 0.1 K。压力测量采用从测压点经引压管引至室温环境测量的方法^[25]。为使测压点满足流动稳定性的要求,测压点位置取在泵进出口 7 倍管径处。两个测压点之间设置有差压变送器,用于更加精准地测量泵前后压力差值。采用低温涡轮流量计测量回路中的体积流量,流量量程范围为 0~60.6 L/min,精度为±0.5%,测量误差为 0.3 L/min。测量仪器量程及精度如表 2 所示。

表 2 测量仪器量程及精度

Table 2 Measuring instrument range and accuracy

名称	型号	量程	精度	测量误差
泵前压力传感器	PPM-T330A-G0.8M1A1T-196D3M1W	0~800 kPa	±0.5%	4 kPa
泵后压力传感器	MIK-P300	0~1 000 kPa	±0.5%	5 kPa
差压变送器	MDM3051S-DP	0~120 kPa	±0.075%	0.09 kPa
温度计	Pt100	77~303 K	±0.1 K	0.1 K
流量计	H03/4×5/8A-1.75-16-BP-1M-MS	0~60.6 L/min	±0.5%	0.3 L/min

2.2 测试方案

离心泵的外特性性能试验是通过测量泵的扬程、功率与流量的变化关系,进而绘制离心泵的扬程-流量、功率-流量以及效率-流量曲线。泵的测试调节操作主要分为两类:一是在恒定转速下通过改变流通管路阀门开度调节流量;二是通过改变泵的转速调节输入功率。测试转速为 4 500、5 000、5 500、6 000、6 500、7 000、7 500、8 000 r/min。流量调节选取 8 个流量点,均匀分布在全工况可测量的流量范围内。当研究不同入口压力下低温泵的工作性能时,转速均控制在额定转速 6 500 r/min,流量为 12 L/min,入口压力从表压 800 kPa 逐渐降至常压。结合图 3,给出具体测试步骤如下。

(1)打开低温阀 1、2、3 和常温阀 5、7,确保排放阀 1、2 全开,打开电磁阀。高压气体进口外接氮气瓶,将氮气瓶上的调压阀调至 200 kPa 后对系统进行置换气吹扫,排净系统内的空气,防止低温液氮进入后使空气中的水蒸气等杂质气体冷凝进而产生杂质堵塞管道。

(2)置换气体完毕后,关闭低温阀 3,其余阀门状态保持不变。将高压气体进口外接氮气瓶。液氮进口接头外接一带压液氮杜瓦,向储罐 1、2 加注液氮。当储罐 2 加满后关闭电磁阀,当储罐 1 加满后关闭排放阀 1 和低温阀 1。

(3)观察泵前温度示数是否为液氮温度,若未达到液氮温度则开启低温阀 4 且注意控制其处于较小

开度状态。当泵前温度达到液氮温度后,关闭低温阀 4,打开低温阀 3,将流量调节阀开度调至最大。打开常温阀 5 增压,当气罐压力表示数达到待测工况设定压力后,关闭常温阀 5,开启常温阀 7,待泵前后压力表读数上升至设定压力后,关闭常温阀 7。开启低温泵。

(4)通过调速器控制低温泵转速达到待测工况,待泵前后压力及差压计读数稳定后记录数据,逐渐减小低温流量调节阀开度,流动稳定后记录数据。

2.3 测试结果与分析

2.3.1 重复性测试

为了获得稳定可靠的试验数据,首先对设计转速 6 500 r/min 下的压差-流量曲线进行 3 次重复性测量。在系统中,低温流量调节阀通过输入 4~20 mA 的电流对应控制阀门 0~100%的开度。将低温流量调节阀的输入电流分别设置为 20、18、16、14、12、10、8、6 mA,试验结果如图 4 所示。可以看出,本文系统得到的数据可重复性高。

2.3.2 低温泵外特性测试

在额定转速 6 500 r/min 下,通过改变阀门开度调节流量得到低温泵扬程-流量特性曲线,如图 5 所示。可以看出,随着从系统可测得的最大流量 12 L/min 逐渐减小到约 9 L/min,低温泵的扬程逐渐增加,在设计流量点 10 L/min 时达到 7.12 m。同时,该区间内扬程变化最大,约 7%,但仍可以较好地稳定在 6.5 m 以上。需要指出的是,当流量低于

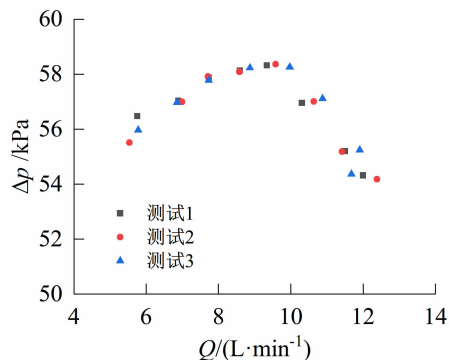


图4 3次压差-流量数据重复性试验结果

Fig. 4 Repeatability test of differential pressure-flow data

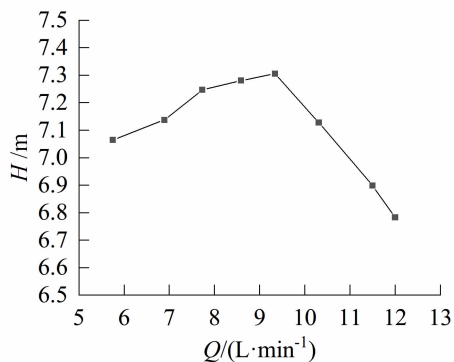


图5 额定工况下的低温泵扬程-流量曲线

Fig. 5 Cryogenic pump head-flow curve under rated condition

约 9 L/min 时,扬程并没有随流量的减小继续增加或保持恒定。

转速为 5 500 r/min 时,介质为水和液氮下的扬程-流量曲线如图 6 所示。可以发现,在小流量区域内,扬程下降问题在水为介质的试验中并未出现,因此可以排除泵内水力结构设计缺陷原因。水和液氮两种介质的最大区别为低温流体更易发生气化,因此有理由相信,当流量较小时液氮的流动换热不够充分,泵电机的产热导致了局部液氮的气化,轻微的空化导致了扬程损失。随着流量的增大,过冷的液氮能够更加充分地带走电机热量,且自身未达到压力所对应的饱和温度,因此得以避免气液两相流动。

将低温泵转速从 4 500 r/min 逐渐提升到 8 000 r/min,在每个转速点通过改变阀门开度得到扬程-流量、功率-流量以及效率-流量曲线,分别如图 7~图 9 所示。

由于扬程特性曲线定义为未发生空化现象时的泵性能曲线,因此图 7 中扬程曲线仅保留了扬程曲线斜率为负的区间。可以看出,在所有转速工况下,总体上随着流量的减小,低温泵的扬程增大。低转

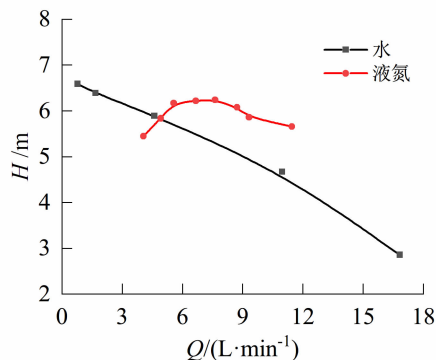


图6 转速为 5 500 r/min、水和液氮为工质时的泵扬程-流量测试曲线

Fig. 6 Pump head-flow test curve with water and liquid nitrogen as working fluid at 5 500 r/min

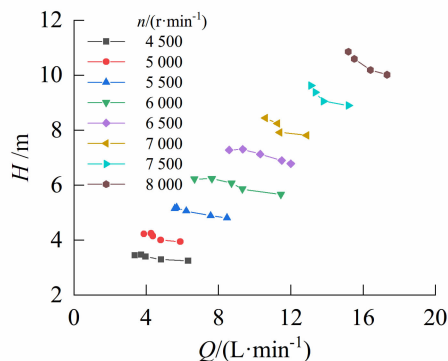


图7 不同转速下低温泵的扬程-流量曲线

Fig. 7 Head-flow curves of cryopumps at different speeds

速时的曲线比高转速时的曲线更加平缓,且扬程和适用流量均处于较小值。当转速达到 6 000 r/min 时,低温泵的扬程可以达到 5 m 以上,满足大部分相关应用要求。另一方面,在所测试的转速区间内,该低温泵均可以在较宽的流量范围内保持扬程变化不高于 5%,说明泵运行具备较好稳定性。随着转速进一步增加至 7 000 r/min 以上,实测最高扬程可达 10 m,但扬程对流量的依变关系更加敏感。这是由于转速较大时,增加流量导致流体在蜗壳出口处的能量回收不完全现象更加明显,造成更显著的流动损失。

图 8 给出了该低温泵的功率-流量曲线,其中功率为泵外接转速器的显示电流乘以电源电压得到,为泵的总输入功率。可以看到,随着流量的增加,功率先以近似线性关系增长,而后增长速率逐渐减小,曲线变得平缓。同时,当转速增加时,功率线性增长区域的斜率总体上变大。当转速为 7 500 r/min、流量超过 14 L/min 时,泵的输入功率超过 100 W。

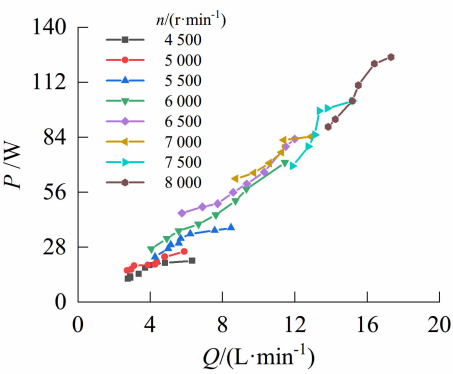


图 8 不同转速下低温泵的功率-流量曲线
Fig. 8 Power-flow curves of cryopumps at different speeds

根据实际测量,自制电机效率约为 50%,基于此得到低温泵水力效率-流量曲线,如图 9 所示。可以看出,低转速小流量区域内低温泵效率较低,但效率在全流量范围内随电机转速呈上升趋势。对于每一个转速,存在最佳工况点,即当流量处于某一值时,效率达到峰值。该最佳流量位置点随着转速的增大而向大流量方向推移。设计转速 6 500 r/min 时的最佳效率工况点的流量为 10 L/min,与设计参数吻合,此时低温泵的水力效率为 32%。当转速进一步增加并超过额定转速后,虽然泵效率仍有所提升,但可以看到当转速增加至 7 500 r/min 以上后,外特性效率曲线的峰值平坦区迅速减小,效率曲线随着流量的增加会在某一流量的点骤降。这是由于离心泵是按设计工况进行相应计算设计的,当工作点偏离设计工况点较大时,内部流动产生的冲击损失和流动损失变大,导致泵效率减小且泵维持高性能的稳定性受到破坏,不推荐在该状态下工作。

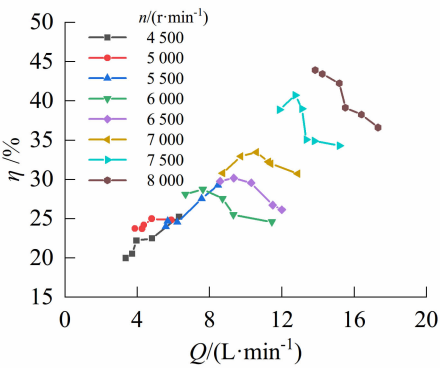


图 9 不同转速下低温泵的效率-流量曲线
Fig. 9 Efficiency-flow curves of cryopumps at different speeds

2.3.3 泵入口压力对泵扬程的影响

为探究入口流体压力对泵扬程的影响,将泵前

高压罐压力从表压 800 kPa 逐渐减小至常压。为了排除小流量试验时发生的空化现象对扬程测量值的干扰,将流量控制为 12 L/min。额定转速 6 500 r/min 时,不同入口流体压力下泵的扬程变化曲线如图 10 所示,图中压力为表压。可以看出,当入口压力在 200~800 kPa 范围内变化时,泵的扬程基本不变,符合离心泵的工作特征。但是,当入口压力低于 150 kPa 时,扬程开始迅速下降。如前所述,此时泵入口流体过冷度小,流量也小,电机产热导致较严重的流体气化,气化区域从诱导轮流道向叶轮轮流道逐步发展,由于径向叶轮离心力的作用使气泡无法排出叶轮,进而使得泵性能迅速恶化。因此,低温流体离心泵在工作时应避免入口压力过低。

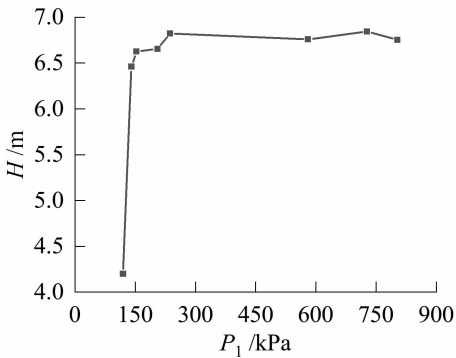


图 10 不同入口流体压力下低温泵的扬程
Fig. 10 Cryopump headflow curve at different inlet fluid pressures

3 结 论

本文设计和研制了一款包络尺寸 132.3 mm×117.2 mm×87.0 mm、额定功率 85 W 的小流量低温流体离心泵。采用磁力驱动结构设计实现内部介质的零泄露,采用 3D 打印叶轮优化迭代方法完成叶轮设计,通过数值模拟验证叶轮前诱导轮对低温泵抗汽蚀性能的改善作用。搭建了一套撬装式小型低温泵性能闭式回路测试系统,以液氮为介质,测量得到多转速下低温泵的扬程-流量曲线、功率-流量曲线和效率-流量曲线。本文结论如下。

(1)基于 3D 打印叶轮优化迭代+水工况试验验证的方法适用于小型低温液氮泵的设计,实测的性能曲线符合额定设计工况特征。

(2)小型低温泵在低转速时的扬程-流量曲线比高转速时的更加平缓。在百瓦以下输入功率、额定转速为 6 500 r/min 时,小流量区域的扬程可以稳定维持在 6 m 以上,满足大部分低温流体循环流动相

关应用需求。

(3)小型低温离心泵的效率-流量曲线存在最佳工况点。当电机转速增大时,该点位置向流量增大方向偏移。但是,当转速明显高于额定转速后,泵无法在一个较宽的流量区间维持高效率,运行稳定性受到破坏。

(4)小型低温离心的扬程总体上与泵入口流体压力弱相关,但当低于某一阈值后,泵的扬程急剧恶化,建议最低进口压力应不低于 150 kPa。

参考文献:

- [1] PENGOR R, JUNKER S, PASSARDI G, et al. Test results of a 1.2 kg/s centrifugal liquid helium pump for the atlas superconducting toroid magnet system [C]// 19th International Cryogenic Engineering Conference. [S. l.]: [s. n.], 2002: 71-74.
- [2] HEDAYAT A, BAILEY J W, HASTINGS L J, et al. Test data analysis of a spray bar zero-gravity liquid hydrogen vent system for upper stages [C]// AIP Conference Proceedings. Bristol, UK: IOP Publishing, 2004: 1171-1178.
- [3] HEDAYAT A, NELSON S L, HASTINGS L J, et al. Liquid nitrogen (oxygen simulant) thermodynamic vent system test data analysis [C]// AIP Conference Proceedings. Bristol, UK: IOP Publishing, 2006: 232-239.
- [4] HASTINGS L J, BOLSHINSKIY L G, HEDAYAT A, et al. Liquid methane testing with a large-scale spray bar thermodynamic vent system [EB/OL]. [2022-01-16]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140011201>.
- [5] KITTEL P. Liquid helium pumps for in-orbit transfer [J]. Cryogenics, 1987, 27(2): 81-87.
- [6] 朱圣良, 袁春燕, 庄明, 等. 部分流式液氮泵水力特性测试 [J]. 低温工程, 2012(4): 34-37.
ZHU Shengliang, YUAN Chunyan, ZHUANG Ming, et al. Hydraulic characterization of partial emission cryogenic nitrogen pump [J]. Cryogenics, 2012(4): 34-37.
- [7] 邵雪, 伍继浩, 谢秀娟, 等. 高压头小流量低温流体泵的设计与试验 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 14-19.
SHAO Xue, WU Jihao, XIE Xiujuan, et al. Design and experiment of high head and small flow cryogenic liquid pump [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2016, 44(7): 14-19.

- [8] 刘明辉, 刘易, 张金玲, 等. LNG 低温潜液泵设计优化研究 [J]. 中国化工装备, 2018, 20(3): 15-20.
LIU Minghui, LIU Yi, ZHANG Jinling, et al. Research of design optimization of LNG cryogenic submersible pump [J]. China Chemical Industry Equipment, 2018, 20(3): 15-20.
- [9] 张小伟, 盛林海, 白红宇. 超临界氦循环泵的设计方法 [J]. 低温工程, 2006(4): 42-46.
ZHANG Xiaowei, SHENG Linhai, BAI Hongyu. Design method of supercritical helium circulating pump [J]. Cryogenics, 2006(4): 42-46.
- [10] 蒋生发, 杨超君. 磁力驱动泵中隔离套的设计 [J]. 排灌机械, 1993(2): 11-12.
JIANG Shengfa, YANG Chaojun. Design of isolation sleeve in magnetic drive pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1993(2): 11-12.
- [11] 蒋生发. 磁力驱动泵 [J]. 排灌机械, 1993(1): 9-10.
JIANG Shengfa. Magnetic drive pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1993(1): 9-10.
- [12] 李金蔚. 磁力驱动离心泵能量损失分析 [J]. 流体机械, 2009, 37(12): 39-42.
LI Jinwei. Energy loss analysis on magnetic driving centrifugal pump [J]. Fluid Machinery, 2009, 37(12): 39-42.
- [13] 于华宇, 萧建邦. 对屏蔽套磁涡流的探究 [J]. 通用机械, 2004(11): 71-72.
YU Huayu, XIAO Jianbang. Study at magnetic turbulence of shielding sleeve [J]. General Machinery, 2004(11): 71-72.
- [14] 崔宝玲, 许文静, 朱祖超, 等. 低比转速复合叶轮离心泵内的非定常流动特性 [J]. 化工学报, 2011, 62(11): 3093-3100.
CUI Baoling, XU Wenjing, ZHU Zuchao, et al. Unsteady flow characteristics in low-specific-speed centrifugal pump with complex impeller [J]. CIESC Journal, 2011, 62(11): 3093-3100.
- [15] 王秀礼, 袁寿其, 朱荣生, 等. 离心泵汽蚀过渡过程瞬态特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 38-43.
WANG Xiuli, YUAN Shouqi, ZHU Rongsheng, et al. Analysis on transient hydraulic characteristics of cavitation process in centrifugal pumps [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 38-43.
- [16] VALENTINI D, PASINI A, PACE G, et al. Experimental validation of a reduced order for radial turbopump design [C]// 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2013: AIAA 2013-4065.

- [17] 王承禄, 孙铁, 张丹. 非设计工况下离心泵叶轮改造与流场分析 [J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(1): 89-92.
WANG Chenglu, SUN Tie, ZHANG Dan. Centrifugal pump impeller transformation and flow field analysis in non-design conditions [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2015, 28(1): 89-92.
- [18] 沈阳水泵研究所, 中国农业机械化科学研究院. 叶片泵设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983: 166-171.
- [19] 席光, 周莉, 王志恒, 等. 进口导叶与叶片扩压器匹配的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 993-995, 1108.
XI Guang, ZHOU Li, WANG Zhiheng, et al. Experimental investigation to combination of simultaneous adjustment to inlet guide vanes and diffuser [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(9): 993-995, 1108.
- [20] 王鸽, 田桂, 程诚, 等. 微型低温离心泵叶轮优化设计方法及初步测试验证 [J]. 真空与低温, 2021, 27(6): 520-527.
WANG Ge, TIAN Gui, CHENG Cheng, et al. Optimal design method and preliminary testing verification of miniature cryogenic centrifugal pump impeller [J]. Vacuum and Cryogenics, 2021, 27(6): 520-527.
- [21] 朱圣良, 袁春燕, 庄明, 等. 低温液体泵设计及模拟分析 [C]//第十届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网 2011 年度学术交流会论文集. 北京: 中国制冷学会, 2011: 27-32.
- [22] 祝勇仁, 张炜, 王循明. LNG 汽车加气站用潜液泵研制 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(1): 163-166, 172.
ZHU Yongren, ZHANG Wei, WANG Xunming. Research and development of lng submerged pump for LNG car gas station [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(1): 163-166, 172.
- [23] 邵雪. 高压头小流量部分流低温流体循环泵的理论数值与试验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [24] 贾荣林, 吴静怡. 空气源热泵热水器中 R417A 与 R22 的性能对比 [J]. 化工学报, 2008, 59(S2): 93-98.
JIA Ronglin, WU Jingyi. Comparison of performance between R417A and R22 in air source heat pump water heater [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, 59(S2): 93-98.
- [25] 于松涛, 李德刚. 一种测量低温液体压力的安装方法 [J]. 山东化工, 2019, 48(21): 141-144.
YU Songtao, LI Degang. An installation method for measuring low temperature liquid pressure [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(21): 141-144.

(编辑 陶晴 杜秀杰)