

航空与航天工程中的小流量泵

〔苏〕 M. B. 克拉耶夫 B. A. 卢金

Б. В. 奥夫洋尼科夫 著

于龙淮 周德山 译

宇航出版社

31504003

V245.1

04

航空与航天工程中的小流量泵

〔苏〕 M.B.克拉耶夫 B.A.卢金

B.B.奥夫祥尼科夫 著

于龙淮 周德山 译

HK47/08



C0088100

宇航出版社

V245.1

04

31504003

(京)新登字181号

内 容 简 介

本书介绍了在航天工程和各种航空液压系统的动力装置中用于输送工质的小流量泵(流量小于 $300\text{cm}^3/\text{s}$ 、比转速小于50)的原理、研究成果、计算方法和设计方法。书中研讨了各种不同类型的泵:离心泵、部分式离心泵、盘式泵、旋涡泵及叶轮泵等。

本书可供从事航空与航天工程的设计与测试工作的工程师们参考。

Малорасходные насосы авиационных и космических систем

Краев М.В., Лукин В.А., Овсянников Б.В.

М.: Машиностроение, 1985

航空与航天工程中的小流量泵

〔苏〕 М.В. 克拉耶夫 В.А. 卢金

Б.В. 奥夫祥尼科夫

于龙淮 周德山 译

责任编辑: 潘 毅

*

宇航出版社出版发行

(北京和平里滨河路1号 邮政编码100013)

各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 6.25 字数: 146千字

1993年4月第1版第1次印刷 印数: 1~1500册

ISBN 7-80034-502-5/V·107 定价: 6.80元

目 录

序言	(1)
符号	(4)
第一章 关于小流量泵的一般知识	(6)
1.1 泵系统的主要参数和组成	(6)
1.2 小流量泵及其传动装置的分类和应用范围	(11)
1.3 电力传动小流量泵的结构形式	(21)
1.4 涡轮传动的泵装置结构形式	(27)
第二章 低转速离心式小流量泵	(32)
2.1 泵的主要准则关系和效率	(32)
2.2 液体在小流量泵通道中的流动特点	(39)
2.3 小流量泵的能量损失和效率	(46)
2.4 低转速小流量泵的实验研究结果和设计计算用的主 要参数关系	(49)
2.5 电力传动的低转速小流量泵主要部件的计算和选择	(57)
第三章 高转速离心式小流量泵	(69)
3.1 泵的平衡试验	(69)
3.2 泵的特性与转子转速的关系	(72)
3.3 工作叶轮参数对泵特性的影响	(74)
3.4 出口通道参数对泵特性的影响	(81)
3.5 压头特性的计算	(84)
3.6 汽蚀特性	(85)

3.7	高转速小流量泵的计算举例·····	(88)
3.8	小流量部分式离心泵·····	(95)
3.9	带有“冲动式”工作叶轮的小流量泵·····	(99)
3.10	叶轮泵的结构特点和流体动力学·····	(101)
第四章	高转速盘式小流量泵·····	(108)
4.1	工作过程和结构特点·····	(108)
4.2	盘式泵的计算·····	(119)
第五章	旋涡式小流量泵·····	(123)
5.1	概述·····	(123)
5.2	旋涡泵的结构特点及其对特性的影响·····	(127)
5.3	旋涡式小流量泵的计算步骤和算例·····	(134)
第六章	小流量泵的密封与支承·····	(138)
6.1	小流量泵的密封·····	(138)
6.2	小流量泵的支承·····	(145)
6.3	轴向力及径向力的平衡补偿·····	(148)
第七章	有前途的高寿命小流量泵的改进与研究·····	(158)
7.1	离心式小流量泵动力特性的改进·····	(158)
7.2	小流量泵腔内压力的脉动·····	(164)
7.3	提高支承的寿命和工作能力·····	(169)
7.4	特殊形式的小流量泵·····	(178)
参考文献	·····	(195)

序 言

所谓小流量泵就是工作液体流量小于 $300\text{cm}^3/\text{s}$ 的泵,当其出口压力以很宽的范围变化时($0.1\sim 5\text{MPa}$),它的功率一般小于 5kW 。

小流量泵在航空与航天技术、动力工程、无线电技术和计算技术的各种装置中,都得到了广泛的应用。无论是在产生冲量和功率的装置中,还是在冷却系统、热力调节系统、试验台设备以及自动装置中,都可以用它作为输送液态工质的部件。

本书就航空与航天技术中应用的小流量泵的工作特点、结构和计算方法等问题,介绍了一些基本知识。当然,书中的材料也可应用于其他技术领域。

对于输送小流量的液体来说,可以应用各种类型的泵,诸如离心泵、盘式泵、铲式泵以及容积泵等。就其在水力学系统中的工作要求和工作条件而言,所有这些类型的泵都各有某些方面的优点;而对用于航空与航天系统的泵的要求(如对泵工作条件的要求),却是各种各样的。关于容积式泵——活塞泵、柱塞泵等的內容,在有关技术文献中已介绍得相当充分了,因此本书不作详细讨论。

小流量泵与普通泵有很大区别,这不仅在于尺寸方面,而且还在于主要组件的结构上。小流量泵转子的转速取决于

传动装置的形式，并与其连续工作的寿命有关；它的连续工作寿命可在数十分钟到几年之间，而且勿需检查与维修。

作为传动装置，可以应用电动机或者涡轮机，这是由其很宽的转速范围决定的，当泵与传动装置的轴直接联结时，转速将在 $3000 \sim 80000 \text{ r/min}$ 范围内。利用电力传动时，小流量泵装置常常与传动装置一起密闭在一共用的外罩内，这既可避免工作液体外溢到周围介质中，又不影响泵的工作寿命。以燃气涡轮作为传动装置的泵，由于装有各种组合的密封装置系统，工作寿命通常是比较低的。

按转子角速度的大小对小流量泵进行分类，是有条件的。本书中将它们分成三大类：

1. 直接由涡轮带动的高转速小流量泵，当流量 $\dot{V} \leq 300 \text{ cm}^3/\text{s}$ 时，角速度 $\omega \geq 1000 \text{ rad/s}$ ；

2. 直接由高频电流电动机带动的低转速小流量泵，当 $\dot{V} \leq 300 \text{ cm}^3/\text{s}$ 时，角速度 $\omega = 400 \sim 1000 \text{ rad/s}$ ；

3. 没有运动部分而流量 $\dot{V} \leq 20 \text{ cm}^3/\text{s}$ 的小流量泵——这就是各种电动力学泵、电脉冲泵、磁流体动力学泵、热电式泵、转子泵、蠕动式泵及带有压电元件的压电泵等等。小流量泵的工作过程有某些特点，这些特点与其通道横截面的极小尺寸(不大于 0.1 mm)、大的相对表面粗糙度、大的相对间隙及其对密封装置参数特性的显著影响等，是密切相关的。

小流量泵的这些特点，给设计、制造与使用带来了很大困难。由于小流量、小转矩、小的轴向力及径向力、压力值、小尺寸通道中的速度(这种小尺寸通道使得传感器无法置于液流中)等等的测量问题，也使对小流量泵的工作过程研究变得复杂化了。由于尺寸小，工艺误差的影响便尤为显著。当

工作液体流动时,由于雷诺数较低及表面的相对粗糙度较大,就决定了它有很高的摩擦损失分量值。

本书介绍的内容主要是作者的研究成果,为便于综合和比较,也采用了一些早期发表的资料,近几年的文献资料则列于书末的参考文献中。计算例题多属于方法性的,而不针对某个具体样件。

本书第一、二、六、七章及第3.10节系由M.B.克拉耶夫编写(Б.В.奥夫祥尼科夫参加),第三、四、五章则由B.A.卢金和Б.В.奥夫祥尼科夫完成。

符 号

B ——工作轮子午截面的宽度;	Q ——热量;
c ——液体运动的绝对速度;	q ——流量参数;
C ——汽蚀比转速;	$\dot{V}$ ——液体的容积流量;
D, d ——直径;	R, r ——半径;
F, f ——面积;	T ——温度;
g ——重力加速度;	t ——叶栅间距; 时间;
H ——泵的压头;	u ——圆周速度;
$\bar{H}$ ——压头系数;	v ——液流速度;
h ——液体的比能量; 高度;	w ——液体的相对速度;
i ——攻角;	z ——叶片数; 轮盘数;
k ——截面的收缩系数;	δ ——叶片厚度; 附面层厚度;
k_z ——考虑到有限叶片数影响的 系数;	间隙;
L ——能量损失; 线尺寸;	ϵ ——泵工作叶轮的部分度;
l ——线尺寸;	Δ ——增量;
M ——力矩;	η ——效率;
$\dot{m}$ ——液体的质量流量;	φ ——液流的预旋系数;
N ——功率;	ν ——运动粘度;
n ——转速;	λ ——摩擦系数;
n_s ——比转速;	μ ——动力粘度;
P ——力;	ξ ——局部流阻系数;
p ——压力;	ρ ——液体的密度;
	ω ——角速度;

ζ ——损失系数。

脚标：

вн——内部的；

вт——轮毂；轮毂的；

вх——入口的；

вых——出口的；

г——水力的；

д——轮盘的；

ж——液体；

кав——汽蚀的；

кр——临界的；

л——叶片的；

н——泵；

п——外缘的；

р——设计的；流量的；

ср——平均的；

срв——断裂的；

т——理论的；

тр——摩擦；

упл——密封装置；

ут——渗漏；

щ——螺旋；

м——速度与截面的子午方向
投影；

г——径向投影；

u——圆周方向投影；

z——轴向投影；

∞ ——叶片数为无限多个时的
参数。

第一章 关于小流量泵的一般知识

1.1 泵系统的主要参数和组成

小流量泵可能需要有很高的工作寿命(几年以上),例如,各种航天器热力调节系统的泵就是如此。也可能是短时间工作的,如在航空工程的机上系统中,泵的工作寿命以小时计,而在航天工程的发动机装置中为产生推力冲量而工作的泵,寿命仅为几分钟。选择何种类型与结构的泵,这要取决于系统的参数,即在泵设计时所给定的工质流量 $\dot{V}$ 和压头 H 。

这里以航天技术中广泛应用的系统为例,来讨论泵在系统中的工作情况。热力调节系统便属于这种系统,它的工作原理是利用液态的热载体带走热量。图1.1为其中的一个系统原理图。整个密封舱用隔热层(“皮大衣”)6覆盖着。风扇1产生的气流将仪器舱7散发的热量带走,并流向换热器2,这个换热器由一组导管组成,热载体便借助于小流量泵3沿此导管流动。气流通过这些导管时,便把自身的热量传递给这些热载体,然后热载体沿着流体主管路流向辐射面4,该辐射面安装在航天器的某一部分上,但需用某种方式使之与密封舱壳体隔离。在沿管系和辐射面流过时,热载体放出其自身的热量,然后这些热量便辐射到宇宙空间中去。如果由于冷却

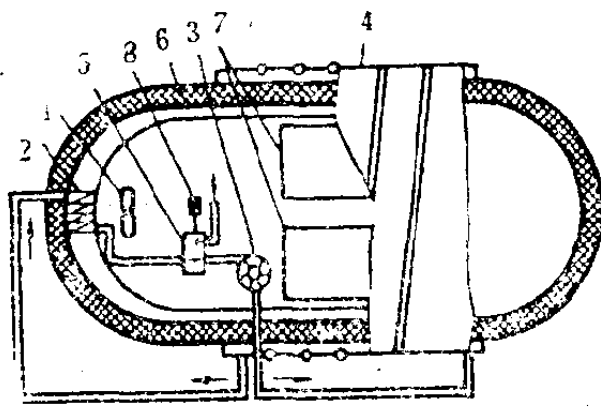


图1.1 航天器热力调节系统原理图

1—风扇；2—换热器；3—泵；4—辐射
面流体主管路；5—回路活门；6—隔热
层；7—仪器舱；8—温度传感器

而使密封舱内的温度变低，专用传感器8便给回路活门5发出信号，它便开始将热载体导入换热器的绕行道。当仪器的温度升高到一定值时，回路活门便按同一传感器的信号而将热载体导向换热器，于是又开始由密封舱向外放热。

所要保持的温度值及其精度，对选择热力调节系统、热载体的类型及泵的参数影响很大。例如，对于所讨论的系统，当用水作为热载体时，水便在辐射器中由 50°C 冷却到 15°C ，并沿其通路以 $c = 1\text{m/s}$ 的速度流动，泵的流量不大于 $200\text{cm}^3/\text{s}$ ，泵的压头应能保证热载体以最小的能量消耗沿主管路流动。一般情况下，应以保障系统有最小的外廓尺寸和最小的质量为条件（通常要考虑到辐射器），来解决泵参数的选择问题。

对于航天器的热力调节系统来说，泵出口的压力值可根据由于流阻而产生的压力降之总和来确定，其中有：活门5（见图1.1）的流阻 $\Delta p_{\text{кл}}$ 、辐射表面流体主管路4的流阻 $\Delta p_{\text{р.л}}$ 、换热器2的流阻 $\Delta p_{\text{т}}$ 和连接系统诸元件的导管流阻 $\Delta p_{\text{тpуб}}$ 。于是

$$\begin{aligned}
 p_2 &= \sum_{i=1}^n \Delta p_i + p_1 \\
 &= \Delta p_{\text{кл}} + \Delta p_{\text{р.п}} + \Delta p_{\text{т}} + \Delta p_{\text{тр}} + p_1
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

应尽量使 $\sum_{i=1}^n \Delta p_i$ 为最小值，为此，应保证工质能以较小的损失沿通路流动，并将调节元件设计成具有最小的流阻。对于实践中常见的热力调节系统，其值一般在 $0.03 \sim 0.2 \text{ MPa}$ 范围内变化。

泵的压头决定于输送系统及其流阻，它是单位质量的工质通过泵之后的机械能的增量

$$H = h_2 - h_1 \tag{1.2}$$

式中 h_2 ——泵出口的液体总比能；

h_1 ——泵入口的液体总比能。

方程式(1.2)可以压头的静压分量 $(p_2 - p_1)/\rho$ 和动压分量 $(c_2^2 - c_1^2)/2$ 的形式给出

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} \tag{1.3}$$

泵入口的压力值可根据无汽蚀工作条件选择

$$p_1 = \Delta h_{\text{изб}} \rho + p_{\text{п}} - \rho \frac{c_1^2}{2} = \Delta p_{\text{изб}} + p_{\text{п}} - \rho \frac{c_1^2}{2} \geq p_{\text{кав}} \tag{1.4}$$

式中，必需的汽蚀裕量 $\Delta h_{\text{изб}}$ ，可以在系统参数的规定偏差内，根据泵的无汽蚀工作条件予以选择；汽蚀裕量就是泵进

口处的液体比能需要在该液体饱和蒸气压力 p_{π} 所对应的液体比能之上而增加的量。

可以用汽蚀比转速代表泵的汽蚀性能

$$C_{\text{кав}} = 298 \frac{\omega \sqrt{\dot{V}}}{\Delta h_{\text{кав}}^{3/4}} \quad (1.5)$$

式中 ω ——角速度, rad/s;

$\dot{V}$ ——流量, m^3/s ;

$\Delta h_{\text{кав}}$ ——发生汽蚀时泵入口处的比能值, J/kg。

$$\Delta h_{\text{кав}} = \frac{p_{\text{кав}} - p_{\pi}}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} \quad (1.6)$$

如果容许泵在初生汽蚀状态下工作, 那么所确定的将是断裂汽蚀状态, 相应的有 $\Delta h_{\text{срв}}$ 和 $C_{\text{срв}}$ 。

在系统的整个工作期间内, 泵入口处的压力不总是一常值, 而是随着飞行时的过载、工作介质的温度以及封闭系统密封程度的不同而发生变化。考虑到表达式(1.4), 当工作液体在泵入口和出口处的速度相等($c_1 = c_2$)时, 泵压头的方程式(1.3)可写成

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{\rho} - \frac{\Delta p_{\text{изб}}}{\rho} - \frac{p_{\pi}}{\rho} \quad (1.7)$$

泵入口压力的裕量 $\Delta p_{\text{изб}}$, 应考虑系统的工作寿命、系统的密封性、工质的理化性能等诸因素来确定, 而在整个工作寿命期内, 它的量值变化可能在0.1MPa以上, 这一点必须估计到。因此, 不仅在系统中, 而且在泵的入口处, 压力

裕量事实上必须比保证泵的无汽蚀工作条件的相应值还要大一些。

在所讨论的系统中，泵的压头较低(50~200J/kg)，流量较小 $[(5\sim150)\times10^{-6}\text{m}^3/\text{s}]$ ，因而所需要的功率也小

$$N_H = \frac{mH}{\eta_H} = \frac{\rho\dot{V}H}{\eta_H} \quad (1.8)$$

式中 η_H ——系的效率。

泵的效率越高，则所需要的功率也越小。通常，小流量泵的效率为 $\eta_H = 0.3\sim0.5$ 。因而，该系统中泵的需用功率为10~50W。

飞机上为了冷却仪器舱及无线电设备，通常要应用特殊的冷却系统。其中，冷却剂的循环流动就是利用泵装置来实现的。此外，泵在飞机上还应用于燃料输送系统、空气冷却和调节系统，以保证在不高的压降 Δp 及小的进口压力下有一定的流量。

在航空系统中，广泛地应用着压头比较低(不大于200~250J/kg)、工质流量为 $[(50\sim150)\times10^{-6}\text{m}^3/\text{s}]$ 的泵，它入口处压力的汽蚀裕量较小，工作寿命为数十小时或上百小时。

根据不同的使用条件，还要对小流量泵提出其他一些具体要求，这些要求决定着泵的结构和特性。例如，为了控制飞行器，动力装置需产生推力冲量，为此，工质输送系统的泵应保证流量为 $\dot{V}\leq(0.5\sim3)\times10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$ ，压力可达5MPa。

对航空和航天系统附件的一般要求，也完全适用于泵。比如，输送系统中的泵，应当在最高的效率、规定的寿命及最低的造价情况下，保证达到规定的压头和流量。然而，对小流量泵还要提出一些特殊的要求。

1) 在规定的连续工作期限内, 可靠性要高, 并尽可能在零部件方面留有余地;

2) 泵和整个系统要完全密封, 特别是在要求工作寿命比较长的情况下;

3) 水力参数及动力参数应当最理想;

4) 要有最小的外廓尺寸(包括轴向尺寸和径向尺寸);

5) 质量尽可能要最小;

6) 要有良好的工艺性和最低的价格, 当然这需要对所设计的整个系统进行综合评定。

为保证产生较宽范围的压头和规定的流量, 在实践中应用了各种类型的泵, 它们的工作原理和结构特点可能是各不相同的。在每一个新设计的系统中, 究竟采用哪种类型的泵, 应当根据对系统所提出的具体要求, 尤其是连续工作寿命方面的要求来加以选择。

1.2 小流量泵及其传动装置的分 类和应用范围

根据航空与航天系统所提出的要求, 这里讨论几种有可能应用的机械式小流量泵。

按照工作原理, 它们可分为四种基本类型: 叶片式泵、容积式泵、摩擦泵和射流泵。

在叶片式泵中, 液体在工作叶轮中的流线可以处在垂直于轴线的平面内——离心泵, 也可以处在锥面上——混流泵, 或者在柱面上——轴流泵(图1.2)。