

机械工业出版社高水平著作  
出版基金资助项目

# 叶片泵的非设计工况 及其优化设计

李世煌 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



机械工业出版社高水平著作  
出版基金资助项目

# 叶片泵的非设计工况 及其优化设计

李世煌 编著



机械工业出版社

本书从泵内流体流动特点分析了叶片泵非设计工况的性能和泵内流动损失,找出水力参数与性能参数和通流部件几何参数之间的关系,采用综合迭代和优化的原则,充分利用计算机快速计算的特点设计叶片泵各通流部件的几何尺寸和形状,并同时满足高效率、优汽蚀性能和非设计工况时运转可靠的要求,提供了一整套设计理论、方法和步骤,是一种新的设计系统和方法。

本书在叶片泵设计方法上有新的突破,书中推荐的许多分析思路和设计方法在国内是首次提出,它充分总结了前人成功的经验,引用了作者在离心泵非稳定工况性能方面研究的成果,也介绍了国内外最新研究成果。

本书适用于高等学校有关专业的师生、设计研究院所及工厂有一定基础的技术人员使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

叶片泵的非设计工况及其优化设计/李世煌编著.

—北京:机械工业出版社,2005.8

ISBN 7-111-17377-5

I. 叶... II. 李... III. 叶片泵—工况 IV. TH31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 104713 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:荆宏智 王英杰 版式设计:张世琴

责任校对:刘志文 封面设计:张静

责任印制:陶湛

北京铭成印刷有限公司印刷

2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

890mm×1240mm A5·7.625 印张·224 千字

0001—4000 册

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版



## 作者简介

李世煌，中国农业大学水力机械教授，曾任硕士生、博士生导师，长期从事流体力学、叶片泵原理与设计、水泵汽蚀原理等课程的教学，在水力机械原理和应用上进行了大量的科学研究工作，其研究成果曾分别获得原机械部、农业部和山西省科技二等奖，北京市科技三等奖。1985年以后在国内外发表论文40余篇，编著有《水泵设计教程》、《潜水电泵的使用与维修》等著作。2001年至今研制的旋流式定压消防泵、离心旋流式恒压泵获得国家实用新型两项专利，并通过北京市科委主持的成果鉴定，达同类产品国内外先进水平。1989年获得中国水利学会“优秀中青年水利科技工作者”称号。1992年开始享受国务院政府津贴。

# 序

本书阐述了叶片泵中的流动分析法，给出了流动参数、性能参数与叶片泵通流部件几何参数的关系和进行整体优化计算的顺序，这是本书的第一特点；完善了对所有叶片泵（轴流式、离心式和混流式）都用叶栅升力法，都采用 NACA 翼型作叶片翼型的设计法，是本书的第二个特点；第三个特点是重视非设计工况的分析，将叶片泵性能分成 5 个区，认真分析计算回流工况，推荐了延迟叶轮内产生回流和脱流的措施。这三个特点成为本书的亮点，照亮了叶片泵非设计工况优化设计的途径。它是我从事水机教学五十多年来看到的完整美好的叶片泵设计专著。

全书体现了作者李世煌教授博览群书、推陈出新、细致深入的为学之道，求真务实、谦虚谨慎的为人之本。读其著作成果，有如桃之味鲜，李之味熟，使我情不自禁地作诗为序。

抽水当年靠桔槔，而今叶片泵称豪。

回流工况认真算，稳定性能仔细操。

按理分区为五处，著书特点有三条。

桃鲜李熟根深远，盛世辉煌学德高。

程良骏

2005 年 9 月 18 日于

华中科技大学能源与动力工程学院

# 前 言

叶片泵是广泛应用在国民经济各个领域的通用机械之一，其品种繁多，数量很大。我国是世界上生产和应用叶片泵最多的国家，全国生产叶片泵的大小企业超过 1500 家。尽管我国叶片泵生产和应用量增加很快，但叶片泵的设计理论和设计方法没有相应的提高。我国叶片泵的设计方法是 20 世纪 50 年代从苏联引进的，基本上是以斯捷潘诺夫 (Stepanoff) 的速度系数法为基础的经验统计法，这种方法主要依靠试验和经验，设计中的盲目成分很大。近 20 年来，随着计算机技术的广泛应用，我国也开发了一些叶片泵计算机辅助设计 (CAD) 软件，但是它们仍然是以速度系数法为基础，只是将原来的计算器用计算机代替，提高了运算速度，并没有根本性突破，也没有形成系统的设计方法。本书是在参考了 20 世纪 90 年代欧洲出版的著作，特别是纽曼 (Neumann) 所著《离心泵几何形状与性能的相互关系》一书的基础上，整理了国内同行们的经验和成果，并结合作者本人的研究成果撰写而成的。

本书以计算机为主要计算工具，从分析叶片泵内部流动和内部损失出发，找出流动参数和损失与叶片泵通流部件几何形状和尺寸之间的关系，进行整体优化，书中还给出了优化计算的顺序。这是本

书的第一个特点。

柯瓦兹(Kovats)1964年就提出将离心泵、轴流泵和混流泵用环列叶栅升力法设计,但是并不成功。本书给出了叶片泵基本方程式——欧拉方程式的第三种形式,还提出了叶片负荷准则,实现了离心泵、轴流泵和混流泵都用叶栅升力法设计的设想,完善了这种叶片泵的设计方法,书中推荐叶片泵设计中采用NACA翼型作为叶片翼型。这是本书的第二个特点。

现有的叶片泵设计方法几乎只满足设计工况,非设计工况(或者说偏离设计工况的性能)很少在设计中予以重视。但是,叶片泵在实际应用中并不一定运转在设计工况,甚至根本就不运转在设计工况,而故障和可靠性的问题却常发生在非设计工况。本书首先定义叶片泵非设计工况为叶片进口 $C_{u1} \neq 0$ 的所有工况,并根据叶轮内部流动的特点,将一台叶片泵的性能分成5个区。书中分析叶片泵内部流动后,认为叶片泵非设计工况的主要特点是叶轮内部流动中存在回流和脱体涡。因此,为了提高叶片泵的可靠性和扩大叶片泵的高效工作区,应延迟叶轮内回流和脱流的产生。书中推荐了叶轮内延迟产生回流和脱流的措施。这也是本书的第三个重要特点。

本书中推荐的叶片泵设计方法,可能是国内首次系统的介绍,有些公式和计算步骤,作者也没有实践过,因此不免会有一些错误和不妥之处,请读者指正。作者希望本书能推进我国叶片泵设计理论和方法的提高,或者作为叶片泵设计理论和方法研究讨论的基础。书中叶片泵内部流动的分析仍然是

二维或准二维的，希望与我国同业专家、学者共同努力，提高到三维或准三维，最后形成我国自己完整的叶片泵设计软件。

本书初稿承蒙清华大学梅祖彦教授全面审阅，并提出了修改意见，在此表示衷心感谢。北京华夏旋龙流体力学研究院和中航嘉业(北京)科技有限公司，以及程良骏教授、窦以松教授、王立祥教授和张新高级工程师都对本书的出版给予了有力的支持；本书出版前曾在清华大学、凯泉给水设备公司等单位系统讲授过，学员们提出了一些宝贵意见，在此也表示衷心的感谢。

编著者



# 符号说明

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| $A$        | 面积或常数                            |
| $A_0$      | 叶轮吸入口面积                          |
| $A_S$      | 泵体吸入口面积                          |
| $A_{cl}$   | 密封径向间隙面积                         |
| $A_4$      | 蜗壳喉部面积                           |
| $a$        | 常数或幂指数                           |
| $a_0$      | 扩散段喉部尺寸                          |
| $a/a_0$    | 维尼克(Weinig)叶栅修正系数                |
| $B$        | 常数                               |
| BEF        | 最高效率点(the best efficiency point) |
| $b$        | 方形蜗壳喉部尺寸; 叶轮流槽轴面宽度; 叶片宽度         |
| $b_{1(2)}$ | 叶槽进口宽度(出口宽度)                     |
| $b_3$      | 无叶扩散室宽度                          |
| $b_a$      | 有效流动区叶槽宽度                        |
| $b_\theta$ | 在中心角 $\theta$ 的蜗壳段断面可变宽度         |
| $b_{BF}$   | 回流产生时有效流动区的叶槽宽度                  |
| $C$        | 常数; 空化比转速(汽蚀比转速); 液流绝对速度         |
| $C_D$      | 翼型阻力系数                           |
| $C_{Dmin}$ | 阻力系数最小值                          |
| $C_{Dt}$   | 蜗壳隔舌阻力系数                         |
| $C_L$      | 升力系数                             |
| $C_{l0}$   | 单个翼型升力系数                         |
| $C_{LA}$   | 水动力压力系数                          |
| $C_{LC}$   | 离心力的压力系数                         |

|                  |                          |
|------------------|--------------------------|
| $C_{Li}$         | 零冲角时的升力系数                |
| $C_{Lmax}$       | 最大升力系数                   |
| $C_{Lopt}$       | 最小阻升比( $C_D/C_L$ )时的升力系数 |
| $\Delta C_{LAO}$ | 单个翼型水动力升力系数增量            |
| $C_{l(2,4)}$     | 叶片进口(出口,过4断面)的流体绝对速度     |
| $C_m$            | 流体绝对速度的轴面(子午向)分速度        |
| $C_{m1(2)}$      | 叶片进口(出口)流体绝对速度的轴面分速度     |
| $C_{max}$        | 沿流道平均轴面分速度               |
| $\bar{C}_m$      | 过断面轴面分速度的平均值             |
| $(C_m)_\perp$    | 设计工况(垂直进口)的轴面分速度         |
| $(C_m)_{H(M,T)}$ | 轮毂处[中间流线,前冠(末梢)]轴面分速度    |
| $cd$             | 密封环与叶轮之间的径向间隙            |
| $C_f$            | 损失系数;蜗壳形集水室中速度           |
| $C_u$            | 绝对速度的周向分速度               |
| $C_{u1(2)}$      | 叶片进口(出口)绝对速度的周向分速度       |
| $C_{u2}^*$       | 无滑移时叶片出口绝对速度的周向分速度       |
| $C_{u2A}$        | 叶片出口液流绝对速度的实际周向分速度       |
| $C_{u2R}$        | 叶片出口液流需要的绝对速度的周向分速度      |
| $\bar{C}_{u2}$   | 流道中 $C_{u2}$ 的平均值        |
| $D$              | 常数或直径                    |
| $D_1$            | 叶片进口直径                   |
| $D_2$            | 叶轮(叶片)出口直径               |
| $D_3$            | 蜗壳基圆直径                   |
| $D_0$            | 叶轮进口直径                   |
| $D_F$            | 扩散率                      |
| $D_H$            | 流道的水力直径                  |
| $\bar{D}_H$      | 流道平均水力直径                 |
| $D_M$            | 中间流线处平均直径                |
| $D_m$            | 叶片平均直径                   |

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| $D_x$           | 流线上某一点的直径                 |
| $D_e$           | 叶轮进口当量直径                  |
| $D_f$           | 轮盘摩擦损失                    |
| $D_h$           | 叶轮轮毂直径                    |
| $D_i$           | 叶轮与密封环处间隙直径               |
| $D_{HEQ}$       | 流道水力当量直径                  |
| $D_{0opt}$      | 最高效率点时的叶轮进口直径             |
| $D_{0s.opt}$    | 最优吸入性能的叶轮进口直径             |
| $D_{es.opt}$    | 最优吸入性能的叶轮进口当量直径           |
| $D_s$           | 泵体吸入口直径                   |
| $d_{1(2,3)}$    | 常数                        |
| $d$             | 直径                        |
| $d_{s.QP}$      | 叶片泵尺寸                     |
| $E$             | 常数; 能量                    |
| $e$             | 指数幂; 效率; 叶片末梢间隙相对叶片高度的百分数 |
| $F$             | 系数; 力                     |
| $F_r$           | 径向力                       |
| $f$             | 函数; 摩擦损失系数                |
| $G$             | 常数                        |
| $g$             | 重力加速度                     |
| $H$             | 总水头; 总扬程                  |
| $\bar{H}$       | 无因次扬程系数                   |
| $H_{1(2,3)}$    | 1 (2,3)点的总扬程              |
| $H_{th}$        | 理论扬程(欧拉式计算的扬程)            |
| $H_{thav}$      | 平均理论扬程                    |
| $H_{th\infty}$  | 叶片无穷多无限薄时的理论扬程(理论无穷扬程)    |
| $H_A$           | 水动力扬程                     |
| $H_C$           | 离心力产生的扬程                  |
| $\Delta H_{cl}$ | 过密封间隙的压力降或过密封间隙的损失水头      |

## X 叶片泵的非设计工况及其优化设计

|                 |                              |
|-----------------|------------------------------|
| $h$             | 水头损失或扬程损失; 盖板厚度              |
| $h_0$           | 波塞曼(Busemann)滑移系数            |
| $h_{1(2,3)}$    | 1(2,3)点的水头损失或扬程损失            |
| $h_{c(r)}$      | 蜗壳型集水室损失(回流引起的水力损失)          |
| $h_d$           | 无叶扩散室损失                      |
| $h_{dD}$        | 翼型阻力损失                       |
| $h_{dw}$        | 尾流损失                         |
| $h_{dv(c,d,t)}$ | 无叶扩散室(蜗壳型集水室,出口扩散段,蜗壳隔舌)扩散损失 |
| $h_F$           | 出口扩散段损失                      |
| $h_f$           | 摩擦水头损失                       |
| $h_{fv(d)}$     | 无叶扩散室(出口扩散段)摩擦损失             |
| $h_{fc}$        | 蜗壳形集水室水力摩擦阻力损失               |
| $h_{se}$        | 无叶扩散室突然扩大损失                  |
| $h_{0-2}$       | 叶片投影到轴截面上0点至2点轴面流线长度         |
| $I$             | 迭代指数                         |
| $i$             | 相对翼弦的流动冲角(入流角), 级数           |
| $K$             | 系数或常数                        |
| $K_0$           | 考虑空化时的叶轮进口系数                 |
| $K_{1,2}$       | 损失系数                         |
| $K_a$           | 密封环形修正系数                     |
| $K_e$           | 叶轮进口尺寸当量系数                   |
| $K_{e,opt}$     | 最小损失时叶轮进口尺寸当量系数              |
| $K_{es,opt}$    | 最优吸入性能时叶轮进口尺寸当量系数            |
| $K_r$           | 径向力系数                        |
| $K_s$           | 扬程滑移系数; 水力摩擦系数修正系数           |
| $K_{u2}$        | 扬程速度系数                       |
| $k$             | 波塞曼滑移修正因子                    |
| $k_F$           | 普弗兰德内尔(Pfleiderer)滑移因子       |

|                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| $L$                            | 长度; 能量损失; 总升力                  |
| $L_A$                          | 叶轮轴向长度                         |
| $L_{cl}$                       | 叶轮与密封环之间的间隙长度                  |
| $L_D$                          | 出口扩散段长度                        |
| $L_{IMP}$                      | 叶轮内总损失                         |
| $L_t$                          | 最优扩散长度                         |
| $L_v$                          | 水泵蜗壳总损失                        |
| $L_x$                          | 高比转速泵附加损失                      |
| $l$                            | 叶片的实际长度, 叶片弦长                  |
| $l_c$                          | 间隙长度                           |
| $l_h$                          | 叶片水平长度                         |
| $l_k$                          | 临界距离                           |
| $m$                            | 叶片拱度值                          |
| $m'$                           | 叶片拱度百分数                        |
| $N$                            | 常数                             |
| $N_S$                          | 英制比转速                          |
| $n$                            | 转速(r/min)                      |
| $n_q$                          | 无因次比转速                         |
| $n_S$                          | 比转速                            |
| $n_{SD}$                       | 动力比转速                          |
| $n_{SP}$                       | 能量比转速                          |
| $NPSH(\Delta h)$               | 吸入特性参数[空化裕余, 净正吸入水头(汽蚀余量)]     |
| $NPSH_{r(a)}[\Delta h_{r(a)}]$ | 吸入特性参数{必需(有效)空化裕余[必需(有效)汽蚀余量]} |
| $P$                            | 功率                             |
| $P_a$                          | 轴功率                            |
| $P_{th}$                       | 理论功率                           |
| $P_D$                          | 轮盘摩擦损失功率                       |
| $P_{WHP}$                      | 水功率                            |

|                 |                      |
|-----------------|----------------------|
| $P_w$           | 湿周                   |
| $\bar{P}_w$     | 平均湿周                 |
| $p$             | 压力                   |
| $p_c$           | 从头部开始测量的叶片最大拱度位置     |
| $P_F$           | 普弗兰德内尔“滑移”系数         |
| $p_v$           | 汽化压力                 |
| $\Delta p$      | 压力增量的降低值             |
| $\Delta p_{cr}$ | 临界压力降低值              |
| $Q$             | 体积流量, 流量             |
| $Q_{cr}$        | 临界流量                 |
| $Q_{crL}$       | 性能曲线上小流量的临界流量(下临界流量) |
| $Q_{crH}$       | 性能曲线上大流量的临界流量(上临界流量) |
| $Q_{\perp}$     | 设计工况(流体垂直进入叶片时)的流量   |
| $Q_{BF}$        | 初生回流时的流量(回流点流量)      |
| $Q_S$           | 泄漏流量                 |
| $Q_{ST}$        | 翼型初生失速时的流量(失速点流量)    |
| $Q_{th}$        | 理论流量                 |
| $q$             | 指数                   |
| $R$             | 半径                   |
| $R_{1(2)}$      | 叶片的进口(出口)半径          |
| $R_0$           | 叶轮进口半径               |
| $R_a$           | 叶轮内有效流动区半径           |
| $Re$            | 雷诺数                  |
| $\overline{Re}$ | 雷诺数的平均值              |
| $R_H$           | 水力半径                 |
| $R_i$           | 叶轮密封环处与密封环之间间隙半径     |
| $R_j$           | 某段蜗壳体的半径             |
| $R_M$           | 叶轮进口中间流线转角曲率半径       |
| $R_T$           | 叶轮轴面流道转弯半径           |

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| $R_\theta$           | 中心角 $\theta$ 处蜗壳体半径     |
| $\Delta R_w$         | 尾流消散的半径增量               |
| $r$                  | 轮毂比                     |
| $\bar{r}$            | 半径的相对值                  |
| $r_c$                | 蜗壳可变圆弧段半径               |
| $S$                  | 表面积; 叶轮盖板厚度; 系数         |
| $S_c$                | 蜗壳壁表面积                  |
| $S_{eINN(EXT, TOT)}$ | 蜗壳内表面(蜗壳外表面, 蜗壳段总的)表面面积 |
| $S_D$                | 叶轮盖板与泵壳壁之间空腔的间隙         |
| $S_T$                | 流体流线静矩                  |
| $\Delta S_{ep}$      | 蜗壳表面积的周向增量              |
| $T$                  | 时间; 系数; 温度; 转矩          |
| $T_\perp$            | 设计工况点的转矩                |
| $T_{BF}$             | 回流吸收的转矩                 |
| $t$                  | 叶片厚度; 叶片节距              |
| $t_c$                | 水泵产品的叶片厚度函数             |
| $t_m$                | 叶片平均节距                  |
| $t_s$                | 叶片的最大厚度                 |
| $t_x$                | 沿叶片长度的叶片厚度值             |
| $U$                  | 液流周向速度                  |
| $U_{1(2)}$           | 叶片进口(叶片出口)液流周向速度        |
| $V$                  | 液流速度                    |
| $V_{cl}$             | 间隙泄漏液流的速度               |
| $V_{cla}$            | 间隙泄漏液流的轴向分速度            |
| $V_{clt}$            | 间隙泄漏液流的切向分速度            |
| $V_S$                | 滑移速度                    |
| $W$                  | 液流相对速度; 功               |
| $W_{1(2)}$           | 叶片进口(出口)液流相对速度          |
| $W_\infty$           | 液流平均相对速度                |

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| $W_u$            | 液流相对速度的圆周分速度            |
| $W_{uav}$        | 液流相对速度的平均圆周分速度          |
| $X$              | 阻力系数的可变函数; 修正系数         |
| $Y$              | 叶片拱度坐标; 独立变量; 系数        |
| $Z$              | 回流的轴向长度; 叶片数            |
| $\bar{Z}$        | 回流轴向长度的相对值              |
| $\alpha$         | 绝对速度流动角; 冲角             |
| $\alpha^*$       | 扩散导叶安装角                 |
| $\alpha_d$       | 扩散角                     |
| $\alpha_v$       | 蜗壳螺旋角                   |
| $\alpha_{av}$    | 绝对速度平均流动角               |
| $\alpha_{ST}$    | 叶片产生失速的水流入射角            |
| $\alpha'$        | 理论冲角                    |
| $\alpha_0$       | 入射角                     |
| $\Delta\alpha$   | 叶片厚度对入射角的修正值            |
| $\beta$          | 液流相对速度对圆周方向的夹角; 零升力角    |
| $\beta_{1(2)}$   | 液体流入叶片(流出叶片)时相对圆周方向的流动角 |
| $\beta_\infty$   | 液流过叶片的平均流动方向角           |
| $\beta^*$        | 叶片安装角                   |
| $\beta_{1(2)}^*$ | 叶片进口(出口)安装角             |
| $\beta_{CH}$     | 叶片骨线的弦线角                |
| $\gamma$         | 重率, 重度; 角度; 当量扩散角; 叶片角  |
| $\Delta$         | 绝对表面粗糙度                 |
| $\bar{\Delta}$   | 相对表面粗糙度                 |
| $\delta$         | 厚度; 流动偏离角               |
| $\delta'_i$      | 损失(叶轮总损失)               |
| $\delta_{1,2}$   | 叶片弦角与叶片角之间的差值           |
| $\delta_C$       | 计算的损失                   |
| $\delta_D$       | 轮盘摩擦损失                  |



|                 |   |
|-----------------|---|
| $\delta_v$      | 容积损失                                      |
| $\delta_m$      | 机械损失                                      |
| $\delta_h$      | 水力损失                                      |
| $\delta_T$      | 试验测量得到的损失                                 |
| $\epsilon$      | 零升力线与流动方向之间的夹角                            |
| $\eta$          | 效率  |
| $\eta_{h(m,v)}$ | 水力效率(机械效率、容积效率)                           |
| $\eta_D$        | 轮盘摩擦效率                                    |
| $\Delta\eta$    | 效率的增量                                     |
| $\lambda$       | 水力摩擦阻力系数; 损失系数                            |
| $\lambda_f$     | 可变的水力摩擦阻力系数                               |
| $\lambda_{BF}$  | 回流损失系数                                    |
| $\nu$           | 动力粘滞性系数                                   |
| $\mu$           | 泄漏间隙损失系数                                  |
| $\xi_{fr}$      | 水力摩擦系数                                    |
| $\xi_D$         | 扩散损失系数                                    |
| $\xi_{1,2}$     | 排挤系数                                      |
| $\rho$          | 密度  |
| $\sigma$        | 空化系数(汽蚀系数); 叶栅稠密度系数                       |
| $\sigma_F$      | 普弗兰德内尔冲击损失系数                              |
| $\tau$          | 切应力                                       |
| $\theta$        | 蜗壳或吸入室断面中心角; 叶片拱度角; 中间轴面<br>流线相对水泵轴中心线的夹角 |
| $\theta_R^*$    | 需要的叶片拱度                                   |
| $\Delta\theta$  | 蜗壳断面中心角增量                                 |
| $\Phi$          | 流量系数                                      |
| $\Phi_{SH}$     | 撞击损失系数                                    |
| $\Psi$          | 扬程系数                                      |
| $\omega$        | 角速度                                       |
| $\omega_v$      | 叶轮盖板与泵壳内壁空腔间隙中液体的角速度                      |