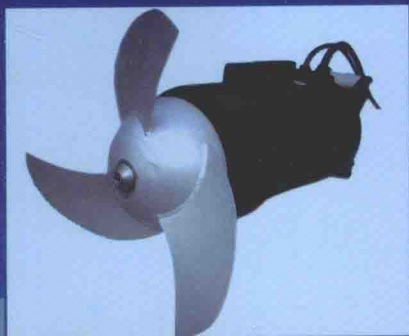




潜水搅拌机理论、 设计及工程应用

田 飞 施卫东 张德胜 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

潜水搅拌机理论、设计 及工程应用

田 飞 施卫东 张德胜 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书共分7章,包括潜水搅拌机概述,潜水搅拌机叶轮设计,潜水搅拌机流场特性,潜水搅拌机的安装及选型,潜水搅拌机实验研究,潜水搅拌机水力部件三维造型,潜水搅拌机的数值模拟等。在每个章节中都穿插了工程实例,供读者参考。第1章、第2章总结了作者和江苏大学潜水搅拌机课题组10多年来在潜水搅拌机基础理论方面的研究成果;第3章、第5章、第6章、第7章是作者近年来的主要研究成果;第4章是关于潜水搅拌机选型与安装等工程方面的问题,参阅了各个企业的大量样本遴选总结而成。

本书可供从事流体机械及工程、环境工程、化工过程机械、市政工程等行业的工程技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

潜水搅拌机理论、设计及工程应用/田飞,施卫东,张德胜著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-049617-1

I. ①潜… II. ①田… ②施… ③张… III. ①潜水泵—研究 IV. ①TH38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 199429 号

责任编辑: 惠 雪 曾佳佳 / 责任校对: 郑金红
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 10 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2016 年 10 月第一次印刷 印张: 14

字数: 280 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

放眼全球,水资源状况迅速恶化,水危机日趋严重。尤其我国水资源短缺情况更是十分突出,同时水体污染严重,水功能区水质达标率仅为 46%。从长远来看,随着我国人口以每年 600 多万的速度增长,人均水资源占有量还会逐步下降。因此,随着工业化、城镇化的深入发展,国家对水污染治理工作高度重视,积极引入市场机制,加大投资力度,大力发展污水处理产业刻不容缓。潜水搅拌机是重要的污水处理关键设备之一,广泛应用于市政、环保、工业和城镇居民生活污水处理过程中的混合、搅拌和环流,如活性污泥池、生物反应池、搅拌池、贮泥井、均衡池、污水池等。

虽然工程上对潜水搅拌机的需求量很大,但是对它的研究却几乎是空白,国内外可供查阅的书籍、论文、专利等参考文献很少,各个企业也都是按照自己的想法来组织生产,既不规范,也不统一。因此,迫切需要一部专业著作来全面介绍潜水搅拌机的基本理论、搅拌机理、设计方法、选型与安装等,给大家的学习、研究和生产等提供帮助。

本书的研究工作是在江苏高校优势学科建设工程项目、国家科技支撑计划课题(2015BAB07B06)、国家科技支撑计划项目(2011BAF14B01)、江苏省“333 高层次人才培养工程”科研项目(BRA2013188),以及江苏省科技计划项目青年基金项目“基于固液两相流的潜水搅拌机搅拌机理研究”(BK20160521)、江苏省博士后科学基金“潜水搅拌机涡旋射流耦合机制研究”(1401007B)、中国博士后科学基金“基于射流附壁理论的潜水搅拌机搅拌机理研究”(2014M561581)等资助下展开的。全书共分 7 章,包括潜水搅拌机概述,潜水搅拌机叶轮设计,潜水搅拌机流场特性,潜水搅拌机的安装、布置及选型,潜水搅拌机实验研究,潜水搅拌机水力部件三维造型,潜水搅拌机的数值模拟等。在每个章节中都穿插了工程实例,供大家参考。本书的第 1 章、第 2 章总结了作者和江苏大学潜水搅拌机课题组 10 多年来在潜水搅拌机基础理论方面的研究成果,尤其感谢李维斌博士、徐伟幸博士所作的研究以及在编写本书时对我们的帮助;本书的第 3 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章是作者近年来的主要研究成果;本书的第 4 章是关于潜水搅拌机选型与安装等工程方面的问题,参阅了各个企业的大量样本遴选总结而成,尤其是上海凯泉泵业(集团)有限公司与蓝深集团股份有限公司给予了大力支持,其中卢熙宁教授级高工、陈斌教授级高工、王怀文工程师给了作者很大的帮助和指导,谨在此向他们致以衷心的感谢。

谢。

此外，感谢江苏大学能源与动力工程学院和流体机械工程技术研究中心的领导和同事们的支持和鼓励。在本书撰写过程中，参考和引用了国内外相关文献，在此对这些文献作者一并表示感谢。

限于作者的能力和水平，书中难免有错误和不当之处，恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 潜水搅拌机概述	1
1.1 潜水搅拌机定义、作用及分类	1
1.2 潜水搅拌机水力学性能	9
1.3 潜水搅拌机几何特征及结构	10
1.4 国内外常见潜水搅拌机简介	14
参考文献	25
第 2 章 潜水搅拌机叶轮设计	27
2.1 叶轮设计方法	27
2.2 环流理论	30
2.3 水动力学分析	38
2.4 叶片参数的选择	50
2.5 水力设计软件	63
参考文献	72
第 3 章 潜水搅拌机流场特性	74
3.1 潜水搅拌机流态分析	74
3.2 各类速度分布规律	83
参考文献	95
第 4 章 潜水搅拌机的安装、布置及选型	97
4.1 潜水搅拌机安装	97
4.2 潜水搅拌机布置	100
4.3 潜水搅拌机选型	108
参考文献	119
第 5 章 潜水搅拌机实验研究	120
5.1 外特性测量	120
5.2 全流场测试	124
5.3 局部流场测试	136
5.4 高速摄影技术的应用	145
参考文献	147

第 6 章 潜水搅拌机水力部件三维造型	148
6.1 潜水搅拌机水力部件 Pro/E 三维造型	148
6.2 潜水搅拌机水力部件 UG 三维造型	157
参考文献	164
第 7 章 潜水搅拌机的数值模拟	165
7.1 CFD 简介	165
7.2 潜水搅拌机数值模拟基本设置	169
7.3 网格划分操作	174
7.4 FLUENT 操作	189
7.5 CFX 基本操作	199
7.6 后处理	204
参考文献	213
索引	215

第 1 章 潜水搅拌机概述

1.1 潜水搅拌机定义、作用及分类

1.1.1 潜水搅拌机定义

潜水搅拌机又称污水处理搅拌机或潜水搅拌器，是一种主要用于污水处理的搅拌机械，由潜水电机、密封机构、叶轮（又称转轮）、电气控制等组成，通常利用导杆安装在水下。潜水搅拌机叶轮在电机的驱动下旋转，搅拌液体产生旋向射流，利用沿着射流表面的剪切应力进行混合，使射流以外的液体通过摩擦产生搅拌作用，在极度混合的同时，形成体积流，应用大体积流动模式得到受控液体的搅拌推流输送，达到充分混合、防止沉淀及推流的作用。搅拌的效果取决于液体的密度和黏度、水池的体积和形状以及潜水搅拌机的功率和效率。当水池较大时，需要使用两台或两台以上的潜水搅拌机。

1.1.2 潜水搅拌机作用

潜水搅拌机主要应用于市政、工业和城镇居民生活污水处理过程中的混合、搅拌和环流，如活性污泥池、生物反应池、搅拌池、贮泥井、均衡池、污水池等；景观水环境的养护设备，创建水流；增加水中含氧量，改善水体质量；有效阻止悬浮物沉积等场合。

潜水搅拌机在污水处理工程中的应用主要有以下四个方面^[1-3]。

(1) 进行水力循环。在厌氧池、缺氧池和氧化沟等池中只须提供必要的循环流速就可以保持池内的混合液呈悬浮状态，使微生物与基质充分接触，通过搅拌器输入的能量，形成连续循环水流，这种设计不仅能有效地保持混合液悬浮，而且由于池内循环水流的流量通常高于进水流量数十倍甚至上百倍，使池内水流产生了巨大的稀释均化能力，因而这种反应器具有耐受冲击负荷的优良工艺特性。

(2) 提高传氧效率。曝气是维持好氧微生物正常代谢的基本手段，水下曝气系统的传氧效率又与水深有着直接的关系。在曝气池中采用潜水搅拌机将曝气池设计成上述连续循环流池型，就会在循环流速的作用下，改变由曝气头释放“气泡”的路径，增大“传氧水深”，提高传氧效率。采用这种设计通常可使曝气系统的传氧效率提高 15% 左右，污水处理的能耗与运行费用也随之节省。

(3) 方便分格、分段处理。当单格池容积较小时，可将每格设计成正方形平面或圆形平面，并在每格中设置一台污水处理搅拌机。

(4) 改善水体水质。在许多受到污染的水体和污水处理所用的深度处理塘中, 往往会遇到水深较大、水流滞缓、水体表面复氧不能保证深水区溶氧要求等情况, 可以设置搅拌机进行“人工呼吸”为深水区复氧, 改善整个水体的水质。这种“人工呼吸”技术是一种简单有效的水质改善手段。

1.1.3 潜水搅拌机分类

潜水搅拌机的分类尚没有严格而明确的标准, 但不同产品本身的技术指标与特性决定了其用途与应用条件, 大致可以将潜水搅拌机分为以下几类^[1-5]。

1. 混合型潜水搅拌机

混合型潜水搅拌机属于高转速、小叶轮产品, 其作用偏重于混合搅拌。转速一般为 $200\sim 1500\text{r/min}$; 叶轮直径小, 通常在 900mm 以下, 一般在 $200\sim 900\text{mm}$ 。图 1.1 所示为较常见的两类混合型潜水搅拌机, 其中图 (b) 为带导流罩 (导流圈) 的混合型潜水搅拌机。

其特点是: 流速高, 紊流强烈, 流场的流速梯度大, 但作用范围小。这类产品适用于池体空间小或对 GT 值有一定要求, 以混合搅拌为主的处理单元中。如物化处理工艺中的混合池、反应池, 生化处理系统中的选择池、厌氧池等。

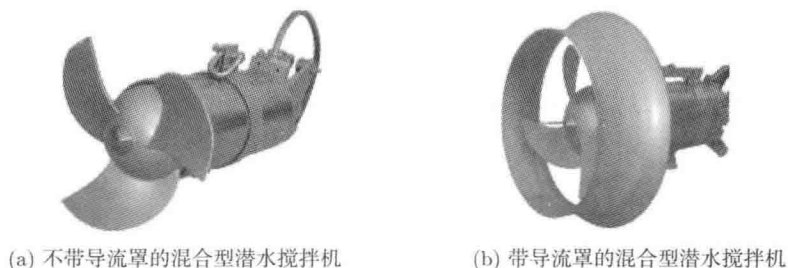


图 1.1 混合型潜水搅拌机

2. 推流型潜水搅拌机

推流型潜水搅拌机是一种低转速、大叶轮产品, 主要用于水力循环。转速一般低于 60r/min , 通常在 $15\sim 200\text{r/min}$; 叶轮直径大, 通常在 $1000\sim 2500\text{mm}$, 直径大于 1800mm 的最为常用。图 1.2 所示为推流型潜水搅拌机。

其特点是: 流场分布较为均匀, 流速低缓, 但作用范围大。这类产品适用于对 GT 值没有要求, 且池体空间较大, 以水力循环、保持流速为目的的处理构筑物中。这类潜水搅拌机广泛应用于工业和城市污水处理厂厌氧池搅拌和氧化沟推流, 产生低速切向流, 为脱氮和除磷工艺创建水流条件。



图 1.2 推流型潜水搅拌机

3. 双曲面型潜水搅拌机

随着污水处理行业的发展，目前，市面上又出现了一种新型潜水搅拌机——双曲面型潜水搅拌机。

双曲面型潜水搅拌机叶轮结构由导流体、搅拌部件及传动部分等组成，如图 1.3 所示。叶轮体上表面为双曲线母线绕叶轮体轴线旋转形成的双曲面结构，这种独特的叶轮结构设计，最大限度地使流体特性与机械运动相结合。不同的设计要求，双曲面方程不同。这里简单介绍一种双曲面型潜水搅拌机，其叶轮双曲线的方程为 $xy=b$ ，曲线沿 y 轴旋转而构成曲面体；为了迎合水体流动，设计从叶轮的圆心进水，这一方面减少了进水紊流；另一方面保证了液体对叶轮表面的压力均匀，从而保证整机在运动状态下的平衡。在渐开双弧面上均布有八条导流筋，借助液体自重压力作补充进水获得的势能与叶轮旋转时产生的离心力形成动能，液体在重力加速度的作用下经双曲面结构过渡沿叶轮圆周方向做切线运动，在池壁的反射作用下，形成立体螺旋状的循环水流，故可获得在轴向 (y) 和径向 (x) 方向的交叉水流。正是由于双曲面型搅拌机叶轮的结构特性和适当的安装位置等特点，决定了它对悬浮物的防沉降均匀混合作用，在工作中可获得理想的搅拌效果，能有效地消除搅拌死角。同时，由于其大比表面积叶轮可获得大面积的水体交换。

双曲面型潜水搅拌机作为一种高效、搅拌与曝气于一体的混合设备，可以单一搅拌，也适用于各种低黏度的液体之间、固液之间、气液之间的混合搅拌；适用于圆形池、方形池，在长方形水池中分单元布置使用也比较常见。叶轮由 PE 复合材料或玻璃钢、钢质材料等制成，加强了设备的防腐性能，使用寿命长。在我国现有各种污水处理工艺中，双曲面型潜水搅拌机主要可以克服传统叶片（桨）式搅拌易出现死角，生化池混合效果不佳的问题，发挥其搅拌均匀、流态柔和且分布均匀的优势，尤其是在厌氧区及缺氧区的搅拌混合，更能发挥其独特的流态特性。主要特点表现在以下几个方面：①可替代现有液体搅拌设备，实现三维立体、螺旋状的水体混合，使搅拌更均匀，提高搅拌效率；②大比表面积叶轮，功率配备小，循环

水流大, 能耗低, 在常规市政污水搅拌中比传统搅拌方式节能 30%~50%; ③整机结构紧凑, 运行可靠, 安装维护便捷; ④叶轮由增强纤维复合材料或钢制材料制作而成, 能适应不同的工况要求, 使用寿命长。

双曲面型潜水搅拌机适用于环保、化工、能源、轻工等行业需要对液体与液体、液体与固体、液体与气体的搅拌、混合的场合, 尤其适用于污水处理工程、净水工程中的搅拌。

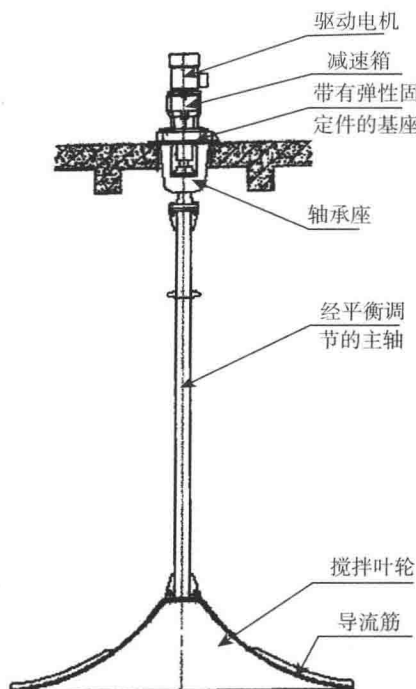


图 1.3 双曲面型潜水搅拌机

目前, 我国南京贝特环保通用设备制造有限公司与蓝深集团股份有限公司对这种产品的研究比较多, 还相继申请了专利。

1.1.4 一些具有特殊功能的潜水搅拌机

随着污水处理工艺的深化和应用领域的拓展, 特别是潜水搅拌机在工矿企业和农业环保上的应用, 潜水搅拌机的工作环境越来越复杂, 搅拌的污水所含杂质及污物越来越多, 潜水搅拌机面临着巨大挑战。主要存在以下不足或缺陷: ①污物特别是纤维状污物易缠绕, 导致电机过载; ②颗粒杂质易进入机械密封室, 导致机械密封损坏。针对以上情况, 研究人员研究了一些具有特殊功能的潜水搅拌机, 除具有搅拌推流功能外, 还包括了切割、拦污、曝气等功能。

1. 切割功能

切割功能主要是在现有的潜水搅拌机上添加切割装置。目前较为常见的带切割功能的潜水搅拌机有两种,一种是切割装置由间隙配合的固定刀与旋转刀组成,固定刀设于机械密封座上,旋转刀设于叶轮上,切割区域位于叶轮进口处;另一种是切割装置安装在叶轮轮毂的腔体内,由若干个均匀分布的切割刀具组成,与轮毂腔体为一个整体,在轮毂腔体上开有若干相同规格的排泄孔^[6-8]。

2. 拦污功能

拦污功能主要是用于拦阻水流挟带的杂木、杂草、颗粒杂质等污物,保证水工建筑物和电机安全运行。通常在潜水搅拌机结构上加拦污栅来实现这个功能。此类产品较多,以图 1.4 所示为例简单介绍一种带有拦污功能的潜水搅拌机。在叶轮外面安装导向筒,导向筒出水端为导流器,拦污栅安装在导向筒与潜水电机之间。当潜水电机运转时,主轴带动叶轮旋转,叶轮旋转时使拦污栅周围产生负压,将大量的污水从拦污栅的缝隙吸入,再通过导向筒、环流分配器(出水口)排出。从环流分配器不断出来的污水由于具备一定的流速,带动周边的活性污泥运动,从而使池中的活性污泥始终处于翻动状态,确保了良好的厌氧处理效果^[9]。

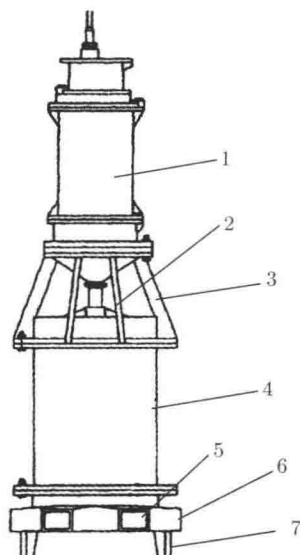


图 1.4 带有拦污功能的潜水搅拌机

1. 潜水电机; 2. 叶轮; 3. 拦污栅; 4. 导向筒; 5. 环流分配器; 6. 导流器; 7. 固定脚

3. 曝气功能

许多污水生化池内的微生物需要气体参与发生化学反应,这就需要在潜水搅

拌机的基础上,再增设曝气机,这大大增加了成本和安装难度。为了解决这个问题,研究人员巧妙地将曝气与搅拌相结合,研制出新型的具有曝气功能的潜水搅拌机,具体实施方案有以下几种^[7,10-17]。

(1) 曝气机与潜水搅拌机相连接。曝气机的顶部安装有浮筒,底部连接潜水搅拌机,在曝气机和搅拌机之间设置环流通道。环流通道上的固定导向槽与曝气机连接设置,固定法兰与搅拌机连接设置,这样利用搅拌机在底部旋转产生的水力搅拌,使得水域底部的污泥被搅拌后上升,并达到上层水面,而曝气机吸入的氧气从环流通道处出来,与上层的污泥进行充分的接触,这样就解决了曝气机出流口以下部分的充氧问题。

(2) 增设布气管。叶轮外部安装上下开口的导流筒,叶轮下方设置与鼓风机相通的布气管。工作时,叶轮旋转,使得液体产生激烈径向和轴向运动,叶轮下方布气管周围产生一个低压区域,使布气管内的气体进入搅拌液内,鼓风机通过布气孔鼓入的气体进入该低压区,并溶于其中。通过改变气体的供应量,即可调整气体溶解量,同时不影响其搅拌混合功能。

(3) 装置导流罩。这是针对立式潜水搅拌机而进行的改进措施。如图 1.5 所示,将潜水电机通过三脚座竖向立式固定在导流罩上,潜水电机的伸出轴头朝下,叶轮固定在潜水电机的伸出轴头上;导流罩固定在带支撑脚的混合室上,混合室内固定有进气罩,混合室周边均布有多个斜向流道孔,混合室底部设有进气孔,通过进气孔可以连接罗茨鼓风机或空压机。

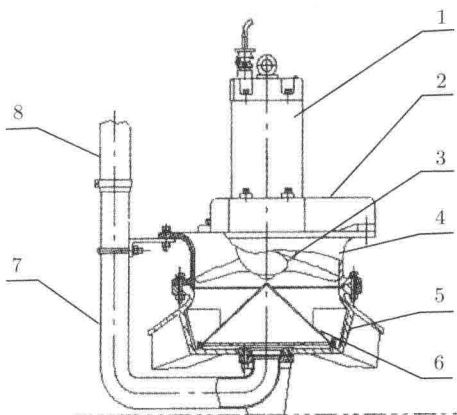


图 1.5 带导流罩的潜水搅拌机

1. 潜水电机; 2. 三脚座; 3. 叶轮; 4. 导流罩; 5. 混合室; 6. 进气罩; 7. 进气管; 8. 进气软管

4. 曝气功能与切割功能相结合

一般在潜水搅拌机上增设空气雾化器、破碎刀片,采用混合叶轮。搅拌轴为中

空,外罩开有进气口,气泵通过进气口与中空搅拌轴相连通,空气雾化器安装在潜水搅拌机的底部,中空搅拌轴与其连通。搅拌叶轮高速旋转,在水下形成负压,在负压和气泵形成正压的共同作用下,将空气由外罩、中空搅拌轴进入剪切螺旋桨,空气被位于头部的空气雾化器进行雾化,又被破碎刀片破碎切割成极细微的气泡。同时由搅拌叶轮和剪切叶轮组成的混合叶轮对水体具有超强推流作用,气泡裹挟在水流中的时间也大大延长,混合叶轮推动这些气泡到更深、更远的区域,从而充氧动力效率得到大幅度的提高。

将曝气与搅拌两个功能相结合,不仅大大提高了效率,并增加了潜水搅拌机的功能,使得气泡能与池底污水充分混合,气泡在水中移动的距离增长,在水中扩散的速度快,在水中相互碰撞合并的概率少,最后从水底释放出水面,大大提高了污水充氧效率,增加了服务面积;而且结构紧凑,一机两用,设备上无土建费用,安装检修方便。本机安装、提升、检修时不用排水;同时运行可靠,无堵塞、无缠绕,工作噪声小,除电机需要维护外,其余部件使用寿命长,长期无需更换、维护。

5. 潜水搅拌系统

有时水池较大,一个潜水搅拌机单独工作时,只有一部分量的液体被循环,池内其他部分的活性污泥或固体悬浮物会沉淀。为了使所有的固体物质悬浮起来,需要换大尺寸的潜水搅拌机,这样就涉及到庞大的开支。一种新型的潜水搅拌系统提出了一种新的方法,很好地解决了这个问题。

如图 1.6 所示,三个独立的潜水搅拌机通过连接器连接起来,成为一个潜水搅拌系统^[18]。图 1.6 中,两个潜水搅拌机机轴相互平行,机轴与池底等高,其中每个搅拌机叶轮均具有独立的动力源,可以有不同的转速,另一个潜水搅拌机垂直成一

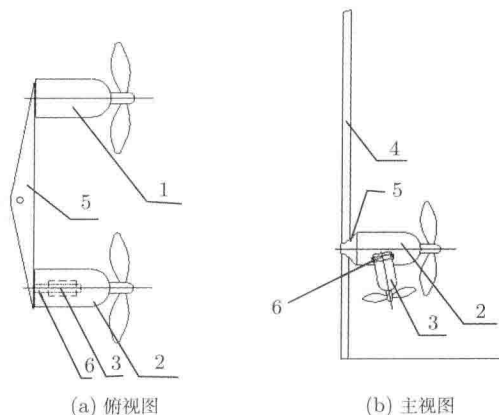


图 1.6 一种潜水搅拌系统

1. 潜水搅拌机 A; 2. 潜水搅拌机 B; 3. 潜水搅拌机 C; 4. 导杆; 5. 连接器 A; 6. 连接器 B

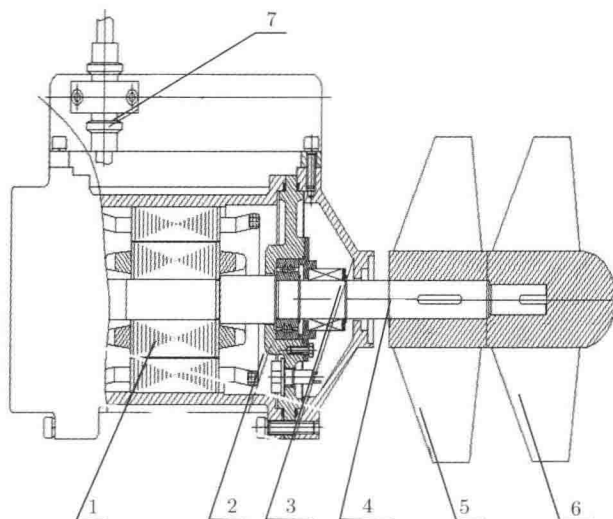


图 1.9 新型潜水搅拌机系列结构简图

1. 电机; 2. 轴承座; 3. 机械密封装置; 4. 转动轴; 5. 叶轮 A; 6. 叶轮 B; 7. 导杆

以上提到的这些措施, 很好地克服了常用潜水搅拌机的缺点, 在一些污水处理场合逐步得到应用。

1.1.5 潜水搅拌机运行环境要求^[4]

潜水搅拌机不仅能够全部浸没在污水条件中每天 24 小时连续、不间断运行; 还能够在长期停运状态下, 随时恢复正常运行。因此要满足以下运行条件:

- (1) 搅拌介质温度一般为 $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (2) 搅拌介质 pH 为 $5\sim 9$;
- (3) 搅拌介质的密度不超过 1150kg/m^3 ;
- (4) 最大潜入水深不大于 20m ;
- (5) 使用电压 (交流) $380\text{V}\pm 20\text{V}$, 50Hz 。

1.2 潜水搅拌机水力学性能

对于潜水搅拌机来说, 必须保证水池内水体推流搅拌的工作有效区内的流速应在 0.3m/s 左右^[4]。同时, 潜水搅拌机的轴向有效推进距离与潜水搅拌机的水体截面有效扰动半径也是两个重要的参数。

潜水搅拌机的轴向有效推进距离是指在水体推流搅拌的工作有效区域内 (保持流速 $\geq 0.3\text{m/s}$ 的条件下), 潜水搅拌机沿轴向对水体推动的有效距离, 以 L_y 表示。

潜水搅拌机的水体截面有效扰动半径是指在水体推流搅拌的工作有效区域内(保持流速 $\geq 0.3\text{m/s}$ 的条件下),潜水搅拌机对水体截面产生扰动的有效半径,以 R_y 表示。

如表 1.1 与表 1.2 所示,中华人民共和国城镇建设行业标准(《潜水搅拌机》(CJ/T 109—2007))中对潜水搅拌机的轴向有效推进距离与潜水搅拌机的水体截面有效扰动半径这两个参数给出了明确的规定,潜水搅拌机必须满足这两个参数^[4]要求才能出厂。

表 1.1 推流型潜水搅拌机的水力学性能

电机功率/kW	最小截面有效扰动半径 R_y/m	最小轴向有效推进距离 L_y/m
1.1	4.0	16
1.5	5.0	25
2.2	2.3	25
3	2.5	25
4	3.5	35
5.5	4.0	40
7.5	4.5	55
11	5.0	60
15	5.5	65
18.5	6.0	70

表 1.2 混合型潜水搅拌机的水力学性能

电机功率/kW	最小截面有效扰动半径 R_y/m	最小轴向有效推进距离 L_y/m
0.75	0.5	5
1.1	0.8	7.5
1.5	1.0	10
2.2	1.2	12
3	1.5	15
4	2.0	25
5.5	2.5	30
7.5	2.5	35
11	4.5	50
15	5.5	60

1.3 潜水搅拌机几何特征及结构

1.3.1 叶片的几何特征

潜水搅拌机的叶轮固定在轮毂上,如图 1.10 所示,叶轮一般有 2~4 个叶片,叶片数(Z)越多,叶轮的振动越小。

当潜水搅拌机旋转时,叶片推力的那一面(即压力较大的那面)称为叶片工作面,相反的另一面称为叶片背面。与轮毂连接的叶片下端称为叶根,此处的叶片剖面最厚;叶片的最外端称为轮缘,此处的叶片剖面最薄。