



装备科技译著出版基金

Autonomous Underwater Vehicles Modeling, Control Design, and Simulation

自主水下航行器 建模、控制设计与仿真

[印] Sabina A.Wadoo Pushkin Kachroo

徐博 奔粤阳 译
杨晓东 主审



国防工业出版社
National Defense Industry Press

自主水下航行器建模、 控制设计与仿真

Autonomous Underwater Vehicles Modeling,
Control Design, and Simulation

[印] Sabina A. Wadoo, Pushkin Kachroo

徐博 奔粤阳 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2013-069号

图书在版编目(CIP)数据

自主水下航行器建模、控制设计与仿真/(印)瓦杜(Wadoo, S. A.),

(印)凯奇罗(Kachroo, P.)著;徐博,奔粤阳译.

—北京:国防工业出版社,2013.7

书名原文:Autonomous underwater vehicles modeling, control design, and simulation

ISBN 978-7-118-08909-7

I. ①自... II. ①瓦... ②凯... ③徐... ④奔...

III. ①可潜器—研究 IV. ①U674.941

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第159214号

Translation from the English Language Edition:

Autonomous Underwater Vehicles: Modeling, Control Design, and Simulation

by Sabiha Wadoo, Pushkin Kachroo

ISBN 978-3-642-15493-5

Copyright © 2011.

All right reserved. This translation published by CRC Press, a part of Taylor & Francis Group LLC. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder.

本书中文简体版由 Taylor & Francis Group LLC 的 CRC 出版社授权国防工业出版社独家出版发行。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 9½ 字数 158 千字

2013年7月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 32.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

献 辞

致我的孩子们：

Saami and Shireen Sabiha Wadoo

致我的孩子们：

Axenyia and Sheen Pushkin Kachroo

译者序

本书详细介绍了自主水下航行器的建模、控制设计和仿真。重点论述了自主水下航行器的运动学和动力学非线性建模以及相应的控制设计和仿真,提出了一种可以直接解决非线性问题的新反馈控制方法,实现了系统的鲁棒控制。该技术紧密结合自主水下航行器的工程应用,充分反映了国内外该学科领域的最新研究成果,代表了自主水下航行器建模、控制设计发展中重要的技术突破,对自主水下航行器技术的发展和推广具有重要的意义。

原著于2011年出版,内容上紧跟当前自主水下航行器的发展动态和方向,解决的问题代表了该领域的技术突破,可以为我国自主水下航行器技术的研究提供有益的借鉴,在创新性、前沿性和实用性方面有较为突出的优势。此外,我国目前尚无专门介绍自主水下航行器相关技术的书籍,在该领域的研究与国外还有一定的差距。本书可作为高等院校本科生和研究生的教材,也可以为相关研究人员提供参考。因此,本书的出版无论是在理论研究还是在实践指导上都有较高的实用价值,对我国自主水下航行器技术的发展和推广具有重要意义,对增强我国军事实力产生有益影响。

本书可作为高等院校船舶与海洋工程、自动控制、探测制导与控制技术等相关专业的本科生和研究生教材,也可供从事控制理论与控制工程研究的相关技术人员作为参考书,本书中的结果还可扩展到其他非线性控制领域的相似问题。希望本书的出版能够为我国的国防事业的发展出一份微薄之力。

感谢在本译著出版过程中,史宏洋博士、池姗姗硕士、王文佳硕士、肖永平硕士等同学所做的大量工作,感谢刘志林老师在专业上的指导和帮助。

本书受到国家自然科学基金(61203225)、中国国家博士后基金(2012M510083)的资助。

前 言

自主水下航行器的控制设计是控制系统设计的一个重要领域。由于非线性动力学特性、模型的不确定性和难以测量或估计的干扰通常导致控制难以实现。本书介绍了一种新的自主水下航行器建模与控制设计方法。

本书讨论了自主水下航行器运动学与动力学非线性模型以及不同机动任务下的可控性,对运动学与动力学模型进行了反馈控制设计。在不确定因素存在的情况下仍然能够实现反馈控制,从而使控制设计更加稳定。

谨以此书献给从事相关领域的学生和研究人员,因为在这个特殊的领域还需要进一步探索研究。这本书的研究成果可以推广应用到自主水下航行器非线性控制领域以及其他类似问题的先进控制与设计方案中。

本书得到纽约技术学院基金 ISRC 的资助。

作者简介

Sabiha Wadoo, 博士, 于 2001 年在印度克什米尔的工程学院获电子工程专业工学学士学位; 2003 年在弗吉尼亚理工学院获电子工程专业硕士学位; 2005 年在弗吉尼亚州立大学获数学专业硕士学位; 2007 年在布莱克斯堡大学获电子工程专业博士学位。

2007 年开始就职于纽约韦伯斯特里镇的纽约技术学院, 时任电子计算机工程系助理教授。研究领域包括非线性控制系统的反馈控制、非线性控制系统的建模和分布式参数系统的反馈控制。

Pushkin Kachroo, 博士, 于 1988 年在印度孟买的印度理工学院获土木工程专业工学学士学位; 1990 年在得克萨斯州休斯敦莱斯大学获机械工程学硕士学位; 1993 年在伯克利加利福尼亚大学获机械工程学博士学位; 2004 年在布莱克斯堡弗吉尼亚工学院获数学硕士学位; 2007 年在布莱克斯堡弗吉尼亚理工学院获数学博士学位。

他是内达华州拉斯维加斯的哈利·里德环境研究中心与运输研究中心的主任, 从事环境学研究, 同时还是内华达州立大学电子与计算机工程系教授。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 综述	1
1.2 水下航行器结构示例	4
1.2.1 螺旋桨原理	6
1.2.1.1 机翼	6
1.2.1.2 螺旋桨	8
1.2.2 商用水下航行器	9
1.3 航行器的运动学原理	10
1.3.1 载体运动坐标系的弗莱纳公式	11
1.3.2 平面上刚体运动的数学背景	15
1.3.2.1 转动矢量	16
1.3.2.2 转动坐标系下的向量表示	16
1.3.2.3 旋转坐标系的表示	17
1.3.2.4 群表示	17
1.3.2.5 齐次表示法	19
1.4 李群和李代数	20
1.4.1 矩阵群	20
1.4.2 李群	22
第 2 章 问题的数学描述和实例	25
2.1 非完整系统的运动规划	25
2.2 非完整约束	26
2.3 问题的描述	27
2.4 控制模型建模	28
2.5 可控性问题	29
2.6 稳定性	30

2.6.1	点的可控性和稳定性	30
2.6.2	关于轨迹的可控性与稳定性	31
2.6.3	近似线性化	31
2.6.4	精确反馈线性化	31
2.6.5	静态反馈线性化	32
2.6.6	动态反馈线性化	32
2.7	非完整系统的例子	33
第 3 章	数学模型和可控性分析	36
3.1	数学模型	36
3.1.1	运动学模型和非完整约束	36
3.1.2	相对全局坐标系的运动学模型	37
3.2	可控性分析	40
3.2.1	点的可控性分析	40
3.2.2	关于轨迹的可控性	42
3.3	链式模型	44
第 4 章	基于运动学模型的控制设计	48
4.1	轨迹跟踪和链式控制器设计	48
4.2	参考轨迹的生成	48
4.3	近似线性化控制	51
4.3.1	控制器仿真	54
4.3.2	近似线性化的 MATLAB 程序代码	59
4.4	基于状态和输入间转换的精确反馈线性化控制	70
4.4.1	基于静态反馈的精确反馈线性化控制	71
4.4.2	基于动态反馈的精确反馈线性化控制	72
4.4.3	控制器仿真	74
4.4.4	动态扩展 MATLAB 程序代码	79
4.5	点对点镇定	99
4.5.1	光滑时变反馈控制	99
4.5.2	幂形式	99
4.5.3	光滑时变反馈控制设计	100
4.5.4	控制器仿真	101
4.5.5	点镇定的 MATLAB 程序代码	105

第 5 章 基于动力学模型的控制设计	117
5.1 动力学建模	117
5.2 点镇定控制设计	118
5.2.1 基于反步法的状态反馈控制	118
5.2.2 光滑时变反馈控制	120
5.2.3 李雅普诺夫稳定性分析	121
5.2.4 动力学模型的控制	122
第 6 章 鲁棒反馈控制设计	125
6.1 基于运动学模型的鲁棒控制	125
6.1.1 不确定输入控制模型	126
6.1.2 基于李雅普诺夫递推设计法的鲁棒控制	127
6.2 基于动力学模型的鲁棒控制	130
6.2.1 鲁棒反步法:不匹配的不确定项	131
6.2.2 鲁棒控制:匹配的不确定项	134
6.2.3 鲁棒控制:两种不确定项同时存在	136
参考文献	138

第1章 绪论

1.1 综述

本书主要涉及水下航行器运动规划与反馈控制设计的建模。从根本上讲,动力学本质上是非线性的,因为流体力学系数往往很难获得,并且气流的存在会产生多种不可量测干扰。因此自主水下航行器的动力学问题提出了一个传统线性设计方法难以解决的控制系统设计难题。航行器的动态控制需要保证其稳定性和执行的连续性,要使自主水下航行器成为现实还有很多问题需要解决。目前水下航行器控制系统设计面临的主要困难有非线性动力学特性、模型的不确定性和难以测量或估计的干扰。

本书提出一种新的反馈控制方法来实现水下航行器的精确轨迹控制和点镇定控制。这种反馈控制是在有、无不确定项两种情况下提出的,它可以直接解决非线性动力学问题,并且在有干扰存在的情况下让系统能达到稳定状态,从而使控制具有更强的鲁棒性。

本书第一部分介绍基于运动学模型进行水下航行器控制的适用性研究,给出对单个水下航行器运动学模型的运动规划和反馈控制方法。水下航行器的运动学模型属于一种典型的非完整系统,该系统的特点是有非完整约束的广义速度。本书将这种带有速度约束系统的运动规划问题,转换成输入数目少于自由度数目的控制问题。这一部分还对这种非线性系统的能控性进行了研究。为了设计反馈控制器,将系统转换成链式形式和幂形式,并且论述了将系统运动学模型转换成这些形式的方法。微分几何控制理论、非线性系统分析、控制设计技术和关于非完整系统的运动规划问题的最新调查研究结果,均被作为这项研究的理论支撑。

本书提出自主水下航行器的运动学模型,详细地介绍了其反馈控制器的设计并进行了仿真验证,同时对可控性、控制设计和系统建模中涉及的概念进行了简要的数学分析。

这种基于运动学模型的控制器能够解决水下航行器的运动规划问题。此运

动力学模型属于非完整系统,这种系统的控制模型是无漂移、非线性和欠驱动的,可以表示成:

$$\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{g}_1(\boldsymbol{q})\boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{g}_2(\boldsymbol{q})\boldsymbol{v}_2 + \cdots + \boldsymbol{g}_m(\boldsymbol{q})\boldsymbol{v}_m \quad (1.1)$$

其中, $\boldsymbol{q} \in \boldsymbol{M}$ 是系统的状态向量, \boldsymbol{M} 是状态空间并且 $\boldsymbol{M} \subset \boldsymbol{R}^n$, n 是 \boldsymbol{M} 的维数且向量 \boldsymbol{q} 也是 n 维的; 向量 $\boldsymbol{v} \in \boldsymbol{R}^m$ 是 m 维输入控制向量; 向量 $\boldsymbol{g}_i(\boldsymbol{q}) \in \boldsymbol{R}^n$; $i = 1, 2, \dots, m$ 为 \boldsymbol{M} 的向量场, 并假设向量 $\boldsymbol{g}_i(\boldsymbol{q})$ 为光滑线性时不变的。由于在零输入条件下状态向量不发生改变, 因此系统是无漂移的。同时, 因为通过控制向量张成的空间的维数小于配置空间的维数, 所以这样的系统是欠驱动的。

文献[1]介绍了式(1.1)有两个输入时的情况, 定义了一个车型机器人的运动规划任务, 并且对反馈控制进行了研究。该控制对每种任务采用了不同的控制策略。基于运动学模型的水下航行器控制是对文献[1]所提问题的一个扩展, 是有四个输入的更高维问题。本书讨论了系统的可控性, 并验证了它与运动规划有关, 提出了航行器在期望轨迹和某一点周围全局稳定的反馈控制定理(它是通过将运动学模型转换为标准链式形式和幂形式来实现的), 还给出了通过状态反馈和坐标系变换将运动学模型转换成链式形式和幂形式的方法。

对于水下航行器的轨迹跟踪问题, 文献[23]提出了一种基于李雅普诺夫方程的稳定跟踪控制方法。在文献[22]和[23]中用近似李雅普诺夫方程进行非线性反馈控制设计, 这样可以在期望轨迹上全局稳定, 但是不满足点镇定条件。在本书中, 将利用全状态反馈(近似线性化)方法进行轨迹跟踪, 这种方法仅在局部渐进稳定, 而精确非线性控制(全状态线性化)设计用于实现全局稳定。此时, 静态反馈无法满足要求, 而动态反馈却可以达到这一目的。这里使用链式形式进行系统的控制设计。

非完整系统不存在任何光滑(甚至连续)静态反馈控制律^[2], 即不能通过连续的状态反馈将系统镇定到平衡点, 从而使得非完整系统全局渐进稳定控制器的设计具有挑战性。为此, 人们采用了不同的方案来处理这个问题。

一种方案是使用光滑时变控制器, 这种方法已经在文献[3]和[4]中得到深入研究。文献[3]提出无漂移系统的时变光滑控制必然具有代数(非指数)收敛性。文献[4]证明了使用时变光滑反馈控制的水下航行器能够渐进稳定。

另一种方案是使用指数收敛的非光滑反馈控制器。这些方案已在文献[5]、[6]中进行了讨论。文献[25]提出了一种不连续分段光滑控制方法, 并实现了指数收敛。文献[15]提出了一种非光滑时不变控制器来实现稳定指数收敛, 这种控制器通过链式转换实现。

本书采用前一种方案(光滑时变反馈控制),并借鉴文献[7]中的稳定控制设计方法。最后,给出了运动学模型转换到幂形式的推导过程。这种控制器能够实现水下航行器全局稳定。

本书的后半部分介绍了水下航行器运动学模型的反馈控制设计与鲁棒控制设计。水下航行器的运动包括运动学模型和动力学模型,航行器的三维运动可以用12个非线性系统方程来描述:

$$\begin{cases} M \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = f(\mathbf{v}, \mathbf{q}) + g(\mathbf{v}, \mathbf{q})\mathbf{u}(t) \\ \frac{d\mathbf{q}(t)}{dt} = h(\mathbf{v}, \mathbf{q}) \end{cases} \quad (1.2)$$

第一个方程是系统的动力学模型,第二个方程是运动学模型。向量 $\mathbf{v}(t)$ 和 $\mathbf{q}(t)$ 分别是固定坐标系下的速度矢量和位置矢量。为了设计动力学模型的点镇定反馈控制,可采用基于反步法的非线性系统反馈线性化控制方法。同时,本书还讨论了这些模型存在不确定因素时的反馈控制,其目标是设计出使不确定因素最小化的控制器。这种控制可以用不确定性模型的李雅普诺夫函数递推设计法和鲁棒反步法实现。两种方法都是先进行运动学模型的控制,然后用它来完成动力学模型的全局控制设计。其他章节的要点总结如下。

第2章介绍了水下航行器运动规划问题,解释了非完整、欠驱动系统的概念和非完整系统的运动学模型,然后阐述了非完整系统运动规划问题及其相关应用。

第3章针对自主水下航行器的运动规划任务,详细推导了系统的运动学模型,并讨论了系统非线性可控性的相关问题。最后,为了控制设计将系统转换成链式系统,并对多输入非完整系统转换为链式形式的方法进行了讨论。

第4章在第3章的基础上给出了基于运动学模型的水下航行器模型的控制设计,得到了不同控制方法设计的控制器,并且针对不同运动规划任务对系统性能进行了评估,例如轨迹跟踪、点镇定和路径跟随。同时还给出了从不同控制器得到的仿真结果,用于比较和评估不同控制器在路径跟随任务中的性能。

第5章介绍了基于动力学模型的水下航行器控制设计,针对点镇定系统的运动规划任务完成了控制设计和评估。动力学模型控制设计基于反步法的反馈线性化方法,同时系统地阐述了所设计控制器的稳定性问题,推导了其满足李雅普诺夫稳定性的充分条件。

第6章针对水下航行器动力学模型进行了非线性反馈鲁棒控制器设计。采

用李雅普诺夫函数递推设计法和鲁棒反步法来设计鲁棒控制器,以实现点镇定控制,使得不确定因素对系统性能的影响最小。

1.2 水下航行器结构示例

本节给出了关于水下航行器结构的概述。有兴趣的读者可从文献[33]和[34]获得更详细的介绍。

如何保证航行器的水下悬停以及机动性是水下航行器需要考虑的两大主要问题。航行器要实现能悬浮在水中,其重力要等于水的浮力,或者能用驱动设备使其在水中悬停。它们还需要驱动使其可以从水面潜入水下,在水下机动并返回到水面。

潜艇可以分为动力型和静力型两种,动力型潜艇通常浮在水面,并通过螺旋桨提供推力潜入水下。而静力型潜艇向潜艇舱室(称为压载舱)注水来增加重量以实现下沉;当需要上浮时,向压载舱注入压缩空气,将海水排出,从而减轻重量。

遥控(RC)潜艇目前在很多商场都能购买到,它装有电机,可以驱动尾部的螺旋桨推动潜艇前进,并且方向舵和尾稳定翼(和航行翼)能使潜艇完成偏航和纵摇运动。方向舵通过自身旋转使潜艇转向,同时尾稳定翼就像遥控飞机上的升降舵一样产生纵摇运动。图 1.1 给出了这些驱动器的示意图,图 1.2 给出了方向舵和尾稳定翼的详细示意图。

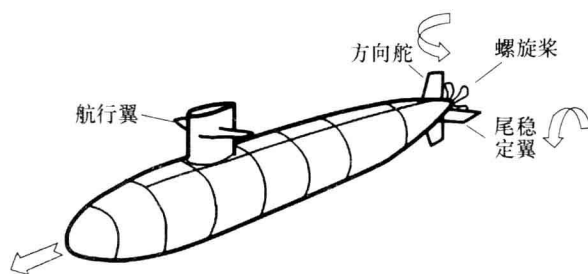


图 1.1 潜艇制动器

重量分布通过将重心保持在潜艇底部而非顶部来使潜艇保持正确的姿态。带有尾稳定翼的方向翼保持潜艇平衡,电力设备被放在密封舱(WTC)中,包括两套伺服系统和一台直流电机。两套伺服系统分别控制航向角和船艏。密封舱的位置和重量分布如图 1.3 所示。

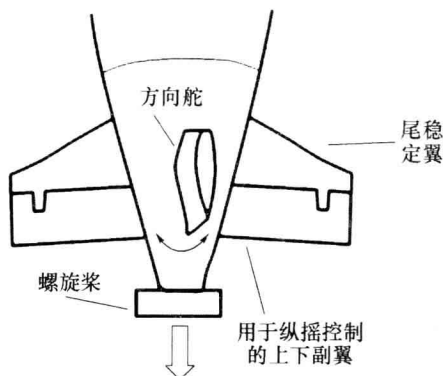


图 1.2 潜艇方向舵和尾稳定翼

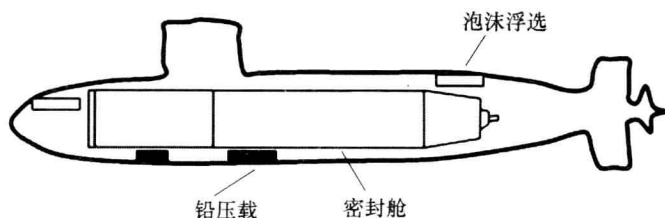


图 1.3 密封舱位置和重量分布

密封舱通常由三部分组成:第一部分包括电池和速度控制器,第二部分是压载系统,第三部分是伺服系统。典型的压载系统包含装压缩空气的容器和阀门,阀门的作用是在潜艇需要下潜时,将水放入以增加潜艇重量;在潜艇需要上浮时,向舱内注入压缩空气将水排出以减轻潜艇重量。另一个经常提及的电子元件是连接无线电信号接收器的速度控制器,无线电接收器用来接收远程信号以控制电机和伺服系统;纵摇控制通过加速度计控制纵摇角;若无线电信号在某时刻丢失,微型安全装置使压载系统关闭,使潜艇浮出水面以防止无线信号丢失。

潜艇水下通信使用的是音频声纳信号,同时也使用 GPS 进行导航,但是这些信号在水下容易丢失。因此潜艇通过使用由加速度计和陀螺仪组成的惯性导航系统(INS)可以获取自身的姿态和航向信息。

动力型潜艇没有压载系统,因此必须提供动力才能使其保持在水下,否则就会浮到水面。很多廉价的动力型遥控潜艇装配两台电机用于下潜、上浮和转向等。在潜艇下水前,可以通过改变螺旋桨的角度从而使潜艇做不同的运动,图 1.4 给出潜艇的示意图。

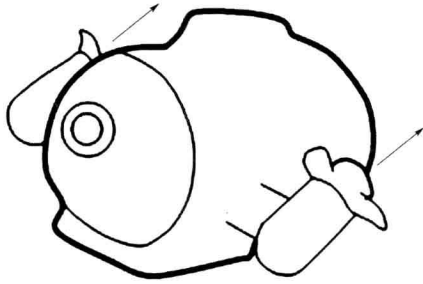


图 1.4 基于双螺旋推进器的动力 RC 潜艇

1.2.1 螺旋桨原理

因为水下航行器有螺旋推进器,本节将对螺旋桨工作原理进行简单的介绍。由于螺旋桨的推力是由机翼产生的,因此本节首先介绍机翼产生力的基本原理,在此基础上介绍螺旋桨产生推力的原理。

1.2.1.1 机翼

图 1.5 显示了机翼截面四周的气流,能够帮助我们更好地理解机翼截面四周的气流如何产生升力。左边流线以箭头结束的地方(用切线表示每点气流方向的线)为到达机翼表面上的驻点,这意味着在驻点之上的流体在机翼上方流动,在驻点之下的流体在机翼下方流动。图中显示从机翼上方和下方通过的流体在后缘有相同的数量和方向。在这种条件下(Kutta 条件^[33]),机翼周围的气流在某些攻角下能产生升力。如果将机翼放在气流下,能够预测出其流线如图 1.6 所示,然而由于这个流体没有环流,因此不会产生升力。事实上,机翼上的升力与机翼周围的气体环流是成比例的(Kutta - Joukowski 定理^[34])。

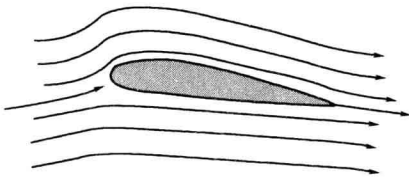


图 1.5 机翼截面四周的气流(Kutta 条件)

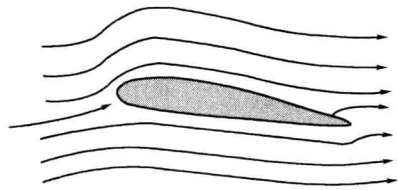


图 1.6 机翼截面四周的无环流

根据 Kutta - Joukowski 定律,给出机翼单位长度上的升力:

$$\text{升力} = \text{气流速度} \times \text{气体环流} \times \text{气体密度}$$

按照 Kutta 条件(后缘边界条件),气流可以通过在非循环流体上叠加循环

气流获得,如图 1.7 所示。

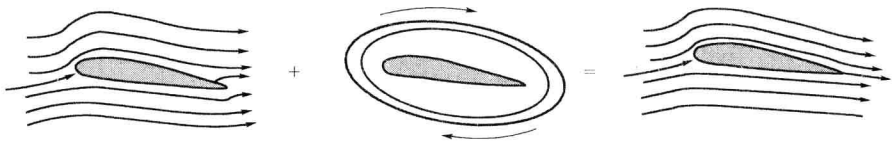


图 1.7 机翼截面四周的完整流动气流

由凯尔文环流定理^[33]可知,在由相同流体材料组成的封闭曲线周围的环流变化率为零。当一个运载器(如飞机)开始加速时,它并不符合 Kutta 条件,因此没有环流;在进一步加速后,满足了 Kutta 条件(桨叶周围产生环流)并且总环流为零,另一个循环气流在机翼后方产生(称为尾流),如图 1.8 所示。

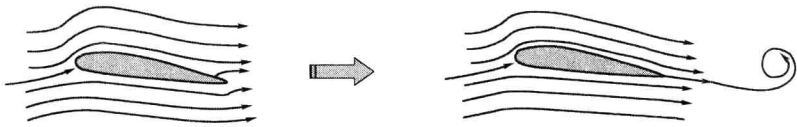


图 1.8 机翼截面四周的完整循环气流

由于与常规气流方向一致的顺时针环流的加入,使得机翼上方的气流速度比下方的气流速度快。由伯努利定理可知,气流速度越快,气压越低;反之,气流速度越慢,气压越高^[34]。由于机翼底部的气压高于顶部气压,在机翼上就产生了一个向上的力(升力),如图 1.9 所示。

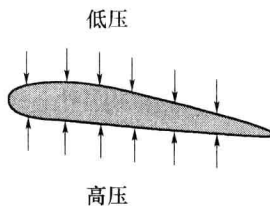


图 1.9 机翼截面上由于压力不同而产生升力示意图

现在让我们看一个有限翼展的机翼,比如水下航行器上的稳定翼,由于机翼上方的压力低,下方的气流开始向上流动,然后整个环流向机体后方运动,如图 1.10 所示。

机翼产生的升力与攻角(即在机翼前方一段距离的流体速度与机翼弦线所成的角度)有关。当攻角为零度时,升力为零;随着攻角增加,升力逐渐增大;在攻角达到某个角度之后,若继续增大,则升力反而减小,如图 1.11 所示。