

海洋潜器

HAIYANG QIANQI
QUANFANGWEI
TUIJINQI KONGZHI XITONG

全方位推进器控制系统

刘胜 郑秀丽 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

海洋潜器全方位推进器 控制系统

刘 胜 郑秀丽 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是作者十几年从事潜器螺距调节式全方位推进器控制系统与技术领域研究成果的总结,旨在将本人的研究成果和体会与从事这方面研究工作的同行们共享。本书主要介绍了海洋潜器螺距调节式全方位推进器控制系统的原理、系统的构成、系统的数学建模、螺距调节系统控制技术与控制策略、主轴同步电机转速控制系统、装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器的位姿控制等。

本书是国内外首部介绍海洋潜器螺距调节式全方位推进器控制系统及技术方面的学术专著,书中的许多内容都是作者本人指导的研究生的研究成果,且在国际上亦是属于本领域的前瞻性的课题,题材新颖,内容丰富。

本书可作为从事船海领域控制理论与控制工程的研究人员和技术人员的参考书籍,亦可作为相关学科领域的研究生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

海洋潜器全方位推进器控制系统/刘胜,郑秀丽著. —北京:
国防工业出版社, 2013.6
ISBN 978-7-118-08838-0

I. ①海… II. ①刘… ②郑… III. ①海洋—可潜器—推进器—
控制系统 IV. ①U674.941

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 133814 号

※

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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15½ 字数 323 千字

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 76.00 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

前 言

辽阔的海域,蕴藏着丰富的资源并极具开发潜力,因而,面对日益紧缩和枯竭的陆地资源,从前景的意义上讲,是人类社会可持续发展的重要财富。研究和合理开发海洋,对人类的经济和社会发展具有重要的意义。

在海洋开发和海洋工程中,海洋潜器(以下文中均简称为潜器)要执行各种复杂的使命,因而它应具备良好的操纵性能;同时随着海洋开发的不断深入,潜器的潜水深度不断增加,潜器的组成机构趋于大型化,总重量增加,总体规模变大,在使用方面受到的制约也增多。因此,潜器的小型化、轻量化日益变得重要。潜器的常规推进操纵装置通常由若干个推进器组成,布置在潜器的上下、左右、前后的位置上以产生上下方向、左右方向和前后方向的推力,来满足对潜器的推进和操纵性能的要求,但这样布置推进器,破坏了潜器结构的连续性,降低了潜器结构强度,推进器重量比例增大,同时也使得潜器内部的布置受到局限。螺距调节式全方位推进器则能解决上述矛盾,它仅在首尾配置推进器而能根据需要产生上下、左右、前后6个方向的推力,同时这样并不影响结构和强度条件要求以及总布置的要求,相应地却能减少推进器的数目,满足潜器的操纵性能要求,以利于潜器的小型化、轻量化。

十几年来,作者一直从事螺距调节式全方位推进器控制技术方面的研究工作,深感有必要将自己的研究成果和体会展撰写书,旨在与同行和学者共享,并为推动潜器推进控制技术领域的发展尽微薄之力。本书围绕潜器螺距调节式全方位推进器控制技术问题进行了阐述,题材新颖,内容丰富。

本书从系统整体构成的角度出发,共分为7章进行阐述。第1章介绍了潜器螺距调节式全方位推进器的发展概况及工作原理,为读者阅读本书提供了一个整体性、概括性的了解。第2章详细阐述了潜器螺距调节式全方位推进器的水动力建模问题,对潜器螺距调节式全方位推进器水动力模型的参数进行估计,并对拟合结果进行显著性检验。第3章详细讲解了潜器螺距调节式全方位推进器螺距调节控制系统的建模问题,分别针对三杆、四杆两种情况驱动的螺距调节系统进行建模研究。对螺距调节控制系统运动斜盘的运动学位置正/反解、速度、加速度及动力学进行分析,建立了运动学反解方程和正解方程。建立了潜器螺距调节式全方位推进器主轴调速系统模型,为潜器螺距调节式全方位推进器控制系统的设计奠定基础。第4章阐述了潜器螺距调节式全方位推进器螺距调节伺服系统,根据系统的要求选择了液压执行机构元器件,设计了模糊自适应PID控制器、神经网络PID控制器以及遗传算法PID控制器,并

对几种控制策略进行了仿真分析比较。第 5 章阐述了潜器螺距调节式全方位推进器主轴转速控制系统,设计了自适应反推控制和鲁棒控制两种控制器。第 6 章详细阐述了装有螺距调节式全方位推进器的潜器位姿控制系统,通过首尾两个螺距调节式全方位推进器组合协调控制,可实现潜器的垂直面、水平面和空间运动位姿的控制。第 7 章详细阐述了装有螺距调节式全方位推进器的潜器位姿控制系统的仿真,分别针对水平面、垂直面及三维空间运动控制进行仿真,并对仿真结果进行分析。从仿真结果可以看出,采用智能控制策略可有效地减小抖振,降低环境干扰和系统不确定性的影响,保证系统的性能,并能够实现对系统不确定项的估计和补偿,提高了系统的鲁棒性。以上每章节内容上力求完整性与独立性,读者可以根据需求选择阅读。

本书的研究成果得到了国家自然科学基金、教育部博士点基金、黑龙江省自然科学基金等项目的资助;本书的出版获得国家自然科学技术学术著作出版基金的资助,刘胜教授主持了全书的撰写工作,并确定了全书的结构大纲,郑秀丽博士撰写了本书的第 2 章、第 6 章、第 7 章。本书在编著过程中,参考了本人指导的宋佳、徐东昊、邓志红、李高云、宋旭日等研究生学位论文及一些学者的论著,借本书出版之机,致以诚挚的谢意!

由于作者的理论水平以及研究工作的局限性,特别是潜器控制工程自身技术也处在不断发展之中,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者和专家学者批评指正。

作 者

2013 年 3 月于哈尔滨

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 潜器螺距调节式全方位推进器发展概述	1
1.1.1 潜器螺距调节式全方位推进器国内外研究概况	1
1.1.2 潜器螺距调节式全方位推进器的性能研究	2
1.2 潜器位姿控制研究发展概况	3
1.3 潜器螺距调节式全方位推进器工作原理	7
1.4 潜器螺距调节式全方位推进器控制系统原理	15
1.5 装有螺距调节式全方位推进器的潜器位姿控制系统原理	16
1.6 全书结构内容安排	17
第 2 章 潜器螺距调节式全方位推进器水动力建模	19
2.1 引言	19
2.2 螺距调节式全方位推进器的水动力计算	20
2.3 潜器螺距调节式全方位推进器校正螺距状态水动力模型建模	21
2.3.1 校正螺距状态水动力数学模型	21
2.3.2 模型参数估计	22
2.3.3 模型显著性检验	27
2.3.4 螺距调节式全方位推进器校正螺距状态的水动力性能仿真	29
2.4 潜器螺距调节式全方位推进器周期螺距状态水动力模型建模	31
2.4.1 周期螺距状态水动力数学模型	31
2.4.2 模型参数估计	31
2.4.3 模型显著性检验	35
2.4.4 螺距调节式全方位推进器周期螺距状态的水动力性能仿真	35
2.5 潜器螺距调节式全方位推进器混合螺距状态水动力模型建模	37
2.5.1 升力、阻力模型系数计算	37
2.5.2 混合周期螺距状态水动力模型建模	39
2.5.3 螺距状态水动力性能仿真	41

2.6 螺距调节式全方位推进器推进效率	42
2.7 小结	42
第3章 潜器螺距调节式全方位推进器控制系统建模	43
3.1 引言	43
3.1.1 空间机构的定义和概念	43
3.1.2 螺距调节机构的设计	46
3.1.3 螺距调节机构的驱动方式	47
3.2 三杆运动斜盘的运动学反解方程	49
3.2.1 坐标系的建立	49
3.2.2 坐标变换矩阵	51
3.2.3 平台位姿反解方程	51
3.3 三杆运动斜盘的运动学正解方程	53
3.3.1 正解方程推导	53
3.3.2 正解、反解方程验证	56
3.4 三杆运动斜盘速度、加速度分析	57
3.4.1 质心与控制点的运动规律	57
3.4.2 运动斜盘质心速度、加速度和角速度、 角加速度的计算	57
3.4.3 连接点的速度、加速度计算	58
3.5 运动斜盘动力学分析	59
3.6 斜盘运动与螺距角的关系	62
3.7 四杆运动斜盘的运动学反解方程	64
3.7.1 四杆运动斜盘坐标系建立	64
3.7.2 四杆运动斜盘运动学反解方程	65
3.8 四杆运动斜盘的运动学正解方程	65
3.8.1 四杆运动斜盘运动学正解方程	65
3.8.2 四杆运动斜盘运动学正解方程智能解法	65
3.8.3 实验结果与结论	69
3.9 四杆运动斜盘动力学及奇异位形分析	71
3.9.1 四杆运动斜盘 Lagrange 动力学模型推导	71
3.9.2 四杆运动斜盘凯恩动力学模型推导	78
3.9.3 四杆运动斜盘奇异位形分析	80
3.10 螺距调节式全方位推进器液压伺服系统数学模型	84

3.10.1	电液伺服阀的数学模型	85
3.10.2	液压缸的数学模型	86
3.10.3	液压缸的参数计算及选择	88
3.10.4	液压伺服系统数学模型	88
3.11	潜器螺距调节式全方位推进器主轴控制系统数学建模	89
3.11.1	永磁同步电机的数学模型	90
3.11.2	主轴控制系统数学模型	93
3.12	小结	94
第 4 章	螺距调节式全方位推进器螺距调节控制系统	96
4.1	潜器螺距调节式全方位推进器单桨螺距调节控制 系统构成原理	96
4.2	螺距调节控制系统液压伺服系统的设计	98
4.2.1	液压控制回路的设计及工作原理	98
4.2.2	能源装置的选择	99
4.2.3	液压系统参数及主要元件的选择	100
4.2.4	运动斜盘控制系统结构	103
4.2.5	静态特性分析	103
4.2.6	动态特性分析	109
4.3	潜器螺距调节式全方位推进器螺距调节伺服控制系统 PID 控制策略	110
4.4	潜器螺距调节式全方位推进器螺距调节伺服控制系统 神经网络控制策略	111
4.5	潜器螺距调节式全方位推进器螺距调节伺服控制系统 模糊自适应控制策略	115
4.6	潜器螺距调节式全方位推进器螺距调节伺服控制系统 遗传算法控制策略	118
4.7	螺距调节控制系统液压伺服控制系统数字仿真	121
4.7.1	螺距调节液压伺服系控制系统 PID 控制算法仿真结果	121
4.7.2	螺距调节液压伺服系控制系统神经网络控制算法仿真结果	122
4.7.3	螺距调节液压伺服系控制系统模糊自适应控制算法仿真结果	124
4.7.4	螺距调节液压伺服系控制系统遗传算法控制方法仿真结果	126
4.8	小结	128

第 5 章 螺距调节式全方位推进器主轴转速控制系统	129
5.1 引言	129
5.2 潜器螺距调节式全方位推进器主轴控制系统构成原理	129
5.3 潜器螺距调节式全方位推进器主轴 PI 控制策略	130
5.3.1 电流环控制器设计	130
5.3.2 速度环控制器设计	131
5.4 潜器螺距调节式全方位推进器主轴自适应反推控制	134
5.4.1 稳定性理论与自适应反推设计方法	134
5.4.2 主轴控制系统自适应反推控制器设计	140
5.4.3 系统稳定性证明	144
5.5 潜器螺距调节式全方位推进器主轴鲁棒控制	145
5.5.1 永磁同步电机反馈线性化	145
5.5.2 主轴转矩扰动估计	153
5.5.3 螺距调节式全方位推进器主轴控制系统鲁棒性能分析	154
5.5.4 螺距调节式全方位推进器主轴控制系统鲁棒控制器设计	159
5.6 潜器螺距调节式全方位推进器主轴控制系统仿真	162
5.6.1 螺距调节式全方位推进器负载仿真模型	162
5.6.2 螺距调节式全方位推进器主轴 PI 控制系统仿真及结果分析	163
5.6.3 螺距调节式全方位推进器主轴自适应反推控制系统仿真及 结果分析	164
5.6.4 螺距调节式全方位推进器主轴鲁棒控制系统仿真及结果分析	166
5.6.5 螺距调节式全方位推进器主轴控制系统 3 种仿真 结果比较分析	167
5.7 小结	169
第 6 章 装有螺距调节式全方位推进器的潜器位姿控制系统	170
6.1 引言	170
6.2 装有螺距调节式全方位推进器的潜器位姿控制系统构成原理	171
6.3 潜器运动方程	173
6.3.1 参考坐标系	173
6.3.2 潜器空间运动方程	174
6.3.3 水平面运动方程	177
6.3.4 垂直面运动方程	178

6.3.5	潜器运动状态方程	180
6.4	海流干扰建模	181
6.5	潜器首尾螺距调节式全方位推进器的协调运动控制	183
6.5.1	潜器使用首尾两个螺距调节式全方位推进器的原因	183
6.5.2	首尾螺距调节式全方位推进器协调控制原理	184
6.6	首尾螺距调节式全方位推进器推力分配	186
6.6.1	螺距调节式全方位推进器推力分配单元构成	186
6.6.2	螺距调节式全方位推进器推力分配算法	187
6.6.3	螺距调节式全方位推进器推力分配算法仿真	188
6.7	潜器螺距调节式全方位推进器特征参数的求解算法	188
6.7.1	潜器螺距调节式全方位推进器特征参数求解模型	188
6.7.2	潜器螺距调节式全方位推进器特征参数求解	189
6.7.3	潜器全方位推进特征参数最小二乘支持矢量机算法实现	193
6.8	潜器垂直面运动控制策略	195
6.8.1	潜器垂直面运动方程简化	195
6.8.2	潜器垂直面运动控制策略	197
6.9	潜器水平面运动控制策略	200
6.9.1	潜器水平面运动方程简化	201
6.9.2	潜器水平面运动控制策略	202
6.10	潜器三维空间运动控制策略	208
6.10.1	潜器三维空间运动控制系统构成	208
6.10.2	潜器三维空间运动控制策略	209
6.11	小结	216
第 7 章	装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器位姿控制系统仿真	217
7.1	装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器垂直面运动 控制系统数字仿真	217
7.1.1	装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器 垂直面运动控制系统仿真	217
7.1.2	装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器 垂直面运动控制系统仿真结果分析	219
7.2	装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器水平面 运动控制系统数字仿真	219
7.2.1	装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器	

水平面运动控制系统仿真 219

7.2.2 装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器
水平面运动控制系统仿真结果分析 223

7.3 装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器空间运动
控制系统数字仿真 223

7.3.1 装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器空间
运动控制系统仿真 223

7.3.2 装有首尾螺距调节式全方位推进器的潜器空间
运动控制系统仿真结果分析 232

7.4 小结 232

参考文献 233

第1章 绪 论

1.1 潜器螺距调节式全方位推进器发展概述

1.1.1 潜器螺距调节式全方位推进器国内外研究概况

1. 潜器螺距调节式全方位推进器国外研究概况

最早的螺距调节式全方位推进器是由美国的 F. R. Haselton 于 1961 年发明的用于潜器的 TPS (Tandem Propeller System), 该推进系统由在潜器前后方串联的两个螺距调节式全方位推进器构成, 通过反向旋转可以发出任何方向的推力和转矩。

Joosen 等于 1963 年在荷兰的瓦格宁根实验水池对在圆柱形回转体上安装的螺距调节式全方位推进器进行了性能试验, 测量了作用于回转体的推力、力矩及横向作用力, 得到了和普通螺旋桨同等程度的推进效率。

其后美国海军以核动力潜器、潜器救生艇 (DSRV) 为对象进行了研究, 制作 1:20 的模型进行了水池试验, 但由于其构造复杂和受到当时的设计和控制水平所限并未达到实用化。西屋公司为 DS-2000 潜器设计了螺距调节式全方位推进器也未建造出来。1987 年美国的 ROV 制造商 (AMETEK Straza Division) 发表了采用螺距调节式全方位推进器的载人潜器的报道引起了人们的关注, G. M. Stenovec 等发表了将 F. R. Haselton 发明的用于潜器的应用的文章。

在日本潜器采用螺距调节式全方位推进器的研究比较深入, 最早的是 1985 年日本三井造船在 20 世纪 80 年代末开发了在水深 50m~200m, 潮流速度在 2 节以下进行海底石油设施的维护、检修等作业潜器的研究, 该潜器配备了 3 只螺距调节式全方位推进器来提高海底运动的机动性。1989 年, 日本通产省工业技术院在“极限作业潜器的研究开发”项目中进行了螺距调节式全方位推进器的试验研究并形成报告。1988 年、1989 年,《川崎重工技报》发表了渡边和夫等为极限环境作业潜器开发的螺距调节式全方位推进器的研究成果。1988 年, 三菱重工的难波直爱等在《关西造船协会志》上发表了关于螺距调节式全方位推进器开发的研究论文, 阐述了螺距调节式全方位推进器的概要、工作原理、准定常理论计算方法及水池试验的结果。1989 年, 日本深海技术学会“关于无人海中作业技术的将来”调查报告书介绍装备了螺距调节式全方位推进器的构筑海底基准构架潜器和海底石油生产设施支援潜器的研究情况。1990 年, 三菱重工将螺距调节式全方位推进器应用到无缆无人潜器上。1991 年, 星野徹二和田村兼吉均发表了关于螺距调节式全方位推进器研究的论文。

2. 潜器螺距调节式全方位推进器国内研究概况

在国内, 哈尔滨工程大学一直关注着潜器螺距调节式全方位推进器的研究与开发。近 10 年来, 黄胜教授及团队成员对螺距调节式全方位推进器的工作原理和水动力性能预报方法进行了研究, 基于螺旋桨生力线理论, 在忽略桨毂影响、尾涡的非定常性和非线性情况下对螺距调节式全方位推进器的水动力性能进行了有关的理论计算, 计算结果良好; 对螺距调节式全方位推进器水动力性能的升力面预报方法和桨毂对螺距调节式全方位推进器水动力性能的影响计算方法进行了研究, 基于常规螺旋桨生力面理论、势流理论和格林定理建立了螺距调节式全方位推进器定常和非定常水动力性能的计算模型, 利用了有限基本解法和非定常涡格法分别对螺距调节式全方位推进器的定常和非定常水动力性能进行了计算, 其计算结果与日本的实验结果比较, 吻合良好; 进行了全方位推进器的桨叶螺距控制机构形式新的设计, 提出了一种偏心盘连杆式的新型螺距调节式全方位推进器, 并与贡毅敏继续进行了试验的模型设计和试验准备工作。

哈尔滨工程大学刘胜教授及其团队成员对螺距调节式全方位推进器控制系统的构成原理及实现机理进行了研究, 提出了控制系统的结构, 并对三自由度运动斜盘的位置正解和反解进行了研究, 并给出了数学模型; 进行了遗传算法神经网络在运动学正解和奇异位行分析中应用的研究; 对螺距调节式全方位推进器螺距调节系统中的液压伺服系统控制算法及主轴控制系统的控制算法进行了卓有成效的研究; 对装有螺距调节式全方位推进器的潜器的位姿控制进行了研究。

1.1.2 潜器螺距调节式全方位推进器的性能研究

1. 潜器螺距调节式全方位推进器的操纵性能研究

潜器的推进和操纵系统主要包括螺旋桨、舵和横向/竖向槽道推进器。潜器上除了装备水面舰艇那样的水平轴螺旋桨和控制运动方向的垂直舵以外, 还装备可以改变潜器在水下的深度以及使潜器在水下保持一定深度的横向、垂向槽道桨及首舰水平舵。这增加了潜器的重量, 消耗了大量的能量, 破坏了潜器结构的连续性, 使得潜器为了满足强度等要求相应要增加结构尺度(如耐压壳厚度), 同时也使得潜器内部的布置受到局限。

潜器在安装了一个螺距调节式全方向推进器后, 为了保证推进性能, 使螺距调节式全方位推进器的桨叶直径与该潜器主推进器直径相同, 通过计算, 螺距调节式全方位推进器的轴向推力比该潜器的主推进器推力要略小一些, 但考虑到使用螺距调节式全方位推进器后, 可以省掉横向和垂向的槽道推进器和舵以及主推进器后面的垂直舵, 同时, 由于保持了潜器整体结构的连续性, 不需要增加结构尺度, 这样就可以减轻潜器的总重量, 所以, 尽管螺距调节式全方位推进器的轴向推力比该潜器的主推进器推力要略小一些, 但是换成螺距调节式全方位推进器后, 潜器的轴向运动速度反而有所提高。

但是使用一个螺距调节式全方位推进器时, 潜器不能直接横移和上升下潜, 如果对纵性要求不高, 这样做是可以的。如果对操纵性要求比较高, 就需要多安装一个螺距调

节式全方位推进器，这样就可以实现水平横移和上升、下潜等战术动作。两个螺距调节式全方位推进器可以在前后各布置一个，也可以布置在潜器的后下方电池组的面。

使用螺距调节式全方向推进器可以同时提供轴向力和侧向力，但是要获得比较好的横向和垂向运动性能，就要求叶片的纵倾角比较大，最好是 45° ，这样，就相当的牺牲了轴向推进性能，使得轴向推进性能难以满足要求，要同时满足轴向推进性能和侧向推进性能，需要增大桨叶直径或者增加推进器的数量，这在一定程度上限制了螺距调节式全方位推进器作为主推进器装置在潜器上的应用。

2. 潜器螺距调节式全方位推进器的其他优势

(1) 使用螺距调节式全方位推进器作为潜器的推进操纵装置可以减轻潜器的总重量，而且可以省掉带动横向、垂向槽道桨及首舵水平舵的动力装置，因此，从节能的角度来看是有利的。

(2) 由于使用螺距调节式全方位推进器作为潜器的推进操纵装置可以省掉带动横向、垂向槽道桨，不需要在艇体上开孔，因此，艇体结构和内部空间到保持了连续性，这有利于结构强度和内部总布置。

3. 潜器螺距调节式全方位推进器的不足

目前，螺距调节式全方位推进器的叶片调距机构比较复杂，制造加工难度比较大，精度要求也比较高，叶片在非定常运动中周期性旋转，对调距机构结构强度和可靠性要求很高，而且不方便维护，这部分限制了螺距调节式全方位推进器的使用。

综上所述，螺距调节式全方位推进器作为一种可以提供三维推力的新型推进操纵装置，其应用前景还是比较广泛的，就目前的研究结果来看，将其应用到潜器，作为潜器的主推进器操纵装置在节能、操纵、阻力等方面有一定的优势，但是还存在一些不足使得螺距调节式全方位推进器在潜器上的应用还有一定的局限性，因此从现阶段的技术水平和技术成果来看，螺距调节式全方位推进器还难以作为潜器的主推进器操纵装置，但是可以作为一种新型的推进装置进行研究探索。

1.2 潜器位姿控制研究发展概况

近几十年来，在各国大大加强了对潜器的设计和研究的情况下，潜器总体性能水平有了很大提高，使其朝着大潜深、高速化、低噪声及高度自动化等方向发展。对潜器技术及战术性能要求的不断提高，必然给潜器操纵运动的研究提出新的问题和挑战。因而，当今对潜器操纵性的设计，已不能仅仅停留在以往的一些单项经典评价指标上，而是要扩大到空间大攻角机动性及特殊战斗动作的要求，其研究范围也不仅仅局限于线性和流体动力，而要包括环境干扰和操艇装置。

潜器的工作环境都是在浅至几米、深至几千米的水下，为了完成各种复杂的作业和安全航行，就必须按要求做出运动姿态和运动状态，因而运动控制就成为潜器能否完成预定任务的一项关键性技术，是其完成指定任务的前提和保障。随着潜器应用范围的增加，对其自主性的要求也随之增加，而增加潜器自主性的关键之一就是提高其

控制系统的性能。潜器的控制问题是潜器技术的一个重要方面,近年来引起了许多控制领域专家、学者的注意。

潜器运动控制指潜器在水下环境(由海流、海浪、潮汐、海底地貌等因素组成的外部环境)中,根据自身运动的情况,在某种控制规律作用下,控制各种翼面和桨的运动,自动地沿某一规定的路线以规定的姿态进行运动。潜器作为一个被控对象,它是在复杂的海洋环境中运动,而控制系统则是要对在海洋环境扰动产生的运动干扰后对潜器的运动姿态进行控制。于是,可以这样认为,潜器的控制实质上是被控对象在随机扰动作用下的控制方法的研究。

现代潜器控制主要的五大总体性能包括操纵性、稳定性、快速性、低噪声、大深度。在潜器航行过程中,潜器在运动上对操艇者的操纵所做出的响应能力称为潜器的操纵性,也就是潜器借助其操纵装置来改变或保持艇的运动速度、姿态、方向和深度的性能。操纵的意图有两大类:保持潜器既有的航行状态或者改变潜器的航行状态。因此,潜器的操纵性有两大重要性能:运动稳定性和机动性。不言而喻,良好的操纵性对于战斗潜器和深潜航行器的战斗力、工作效能、安全性、经济性都有非常重要的意义。一般来说,潜器操纵运动的研究内容主要包括开环操纵运动、闭环操纵运动和操纵面的设计等3方面。潜器的开环响应能明确揭示出艇体运动的固有特性,目前基于小扰动假设的线性操纵理论已广泛应用于潜器开环操纵性的设计与研究中。潜器闭环操纵运动的研究,主要考虑控制方法的特点、控制系统的组成、系统摄动和外干扰对运动的影响等诸多方面。

导致潜器控制难的因素主要包括以下几点:

- ① 潜器的非线性和时变的水动力学性能;
- ② 难以获得精确的水动力系数;
- ③ 海流、海浪的干扰;
- ④ 负载的变化引起重心和浮心的改变;
- ⑤ 机械手的运动影响潜器本体的运动。

这些因素使得潜器力学模型难以准确,而且具有强耦合和非线性的特点。由于在水下很好地调整控制增益是很困难的,因此当潜器因其力学性能变化和所处的环境发生改变而引起控制性能下降时,要求潜器的控制系统具有自调节能力。

到目前为止,按照时间顺序划分,潜器运动控制发展阶段大致可分为:经典控制理论主导阶段,现代控制理论主导阶段,自适应控制、鲁棒控制及变结构控制理论主导阶段,智能控制理论主导阶段。在古典控制理论和现代控制理论跟不上现代控制应用时,另辟蹊径,其他控制方法应运而生,各种主导理论各有优、缺点,方法之间没有笼统意义上的高低之分。随着相应数学工具的不断完善与创新,上述各种控制理论会不断完善,也会不断有新的控制理论诞生。

潜器的主要机动任务是垂直面的深度机动和水平面内的航向机动。因此,潜器运动控制系统一般涉及深度和航向的控制。同时,潜器的均衡是潜器控制的重要组成部分。

对于潜器的运动控制,国内外很多学者都对其进行了深入的研究和探索,也采用

了很多的方法,如PID控制、现代控制、非线性控制、模糊控制、滑模控制、自适应控制、神经网络控制、逆系统控制和递阶控制等。但因潜器模型的不确定性与试验的复杂性,一方面要求航行控制算法具有较高的鲁棒性,另一方面控制算法必须足够简单,参数意义明确,否则很难运用于实际,因此很多人不单纯地采用一种方法进行控制,而是针对不同情况,采用复合控制的方法来实现对潜器运动的控制。例如,针对无舵翼、无人、无缆、矢量推进等特殊潜器的运动控制,针对特殊要求的潜器运动控制等都采用的是多种方法叠加的复合控制。潜器在水下航行时有可能出现一些不可避免的故障问题,因此对潜器的容错控制也进行了广泛的研究。

因此,潜器控制策略根据发展过程,大致可分为4个阶段。

1. 经典控制理论在潜器运动控制中的应用

潜器操纵自动化的广泛研究从20世纪50年代开始,美国在其实施的“潜艇集中控制”(SUBIC)计划中,主要一项就是运动控制系统。1959年在乔治·华盛顿级(SSBN598)核潜艇上装备的“潜艇航向和深度自动保持系统”是美国潜器自动控制系统的第一代,它可以同时或分别自动保持潜器航向和深度,但改变潜器航向和深度则要人工控制。1961年,K. J. Kerkenberg等用经典的比例—积分—微分(以下简称PID)控制理论对108级潜艇的自动舵进行了系统研究,包括了航向、深度控制,横摇校正,侧洗流补偿,纵倾限制和横倾限制等许多方面,具有重要的参考价值。在此基础上,美国后来的SSN594艇和SSN639鳐鱼号等潜艇改进了自动控制系统,提高了大浪中近水面低速航行时的深度保持能力。PID控制系统的参数随环境变量变化的整定优化是比较麻烦的,不易确定,这是由早期PID控制方法的缺点决定的。

这一时期潜器控制策略的特点是:分别运用经典控制理论独立设计出潜器深度自动操舵仪和航向自动操舵仪,它们都是单输入—单输出控制器。航向自动操舵仪是根据航向角偏差,确定一个方向舵舵角 δ_r ,来控制航向角 ψ 。而深度自动操舵仪则是利用首尾升降舵操纵面的偏转角 δ_b 、 δ_s 来实现控制的。所设计的深度操舵仪也属于单输入—单输出控制器,通过运算机构输出舵角 δ ,让该舵角通过艇首尾升降舵动作协调机构,给出 δ_b 、 δ_s 参数去控制潜器的深度机动。这样的深度操舵仪和航向操舵仪由于处理过于简单,存在较大的局限性。首先,航向机动和深度机动独自处理。这只有在纵倾角和横倾角为零或很小时才是正确的,当存在纵倾和横摇时,必须考虑两者之间的相互影响,也就是说垂直面和水平面间的强耦合必须考虑。其次,垂直面内的机动只是孤立地控制深度本身。这也是只有纵倾角很小时,可以忽略。一般情况下,潜器纵倾姿态会影响潜器的深度机动。加之,在某些特定条件下,需要潜器保持某一纵倾角姿态。因此,深度控制须和纵倾控制同时考虑。第三,设计中未考虑横向(侧移)速度及艇体坐标轴偏转的影响,即侧洗流效应。同时,潜器的横倾影响未加考虑。这只有在横向速度以及保持航向不变和坐标轴偏转很小时,方能精确控制深度和纵倾;当侧洗流大时,必须予以考虑。因此,这一阶段研制的潜器深度和航向自动操舵控制系统,具有控制航向和深度的基本功能。但在使用时有较大的局限性,必须针对其局限性采取相应的措施。

2. 现代控制理论在潜器运动控制中的应用

以状态空间形式为分析手段的现代控制理论从 20 世纪 50 年代末至 60 年代初发展起来以后,为潜器控制的研究提供了新的方法和手段。进入 20 世纪 80 年代后国外许多学者用现代控制理论研究了潜器近水面波浪干扰下的定深问题。例如, R. J. Richard 等用随机最优控制方法研究了某一潜艇模型在波浪干扰下的定深控制,书中波浪干扰力被近似表示为波高的线性函数,从而可以将波浪干扰作为一种新的状态变量放置于线性化的增广控制方程中。1989 年, G. F. Gueller 用同样的控制方法研究了某一实艇在波浪干扰下的定深控制和斜流干扰下的浮潜运动航迹控制。瑞典的 L. Bisterlong 采用自适应卡尔曼滤波器和线性二次型控制器,研究了潜艇在波浪中通气管状态的自适应控制,书中假定了二阶波浪力与波型包络线的平方成正比,并指出在通气管状态下有效地操纵潜器的问题,实际是一个滤波器的设计问题。英国的 T. B. Booth 以及剑桥大学工程系控制分部的全体成员,针对潜艇在大浪中做低速浅潜航行时难以保持精确的深度这一问题,经过共同研究,提出了一种将该问题线性化的方法,并设计了一种以卡尔曼滤波器和最优控制器为基本组件的自动舵。该方法已在 Haslar 上应用,做出了一系列设计方案。

利用现代控制理论设计潜艇自动操舵系统已经提出的方法大致有以下几种。

(1) 应用线性二次型高斯分布(以下简称 LQG)方法,设计双输入—双输出的深度纵倾最优控制器。

(2) 应用线性二次型高斯分布/线性调节器(以下简称 LQG/LTR)设计三输入—三输出潜艇多变量控制器。

(3) 应用 LQG/LTR 设计四输入—四输出潜艇多变量控制器。

不管是 PID 控制还是最优控制(主要是 LQG),其控制机理都是基于控制对象的精确数学模型的。而众所周知,潜器的精确数学模型难以获得,且潜器这一控制对象本身是严重非线性的。PID 控制或是最优控制基于控制对象线性化的控制策略,使其误差较大,且适应性和鲁棒性较差,这主要是由于潜器在各个自由度之间的强耦合作用使其工作点范围变化大,线性化处理比较困难。

3. 自适应控制、鲁棒控制及变结构控制在潜器运动控制中的应用

为了进一步提高控制系统的适应性,进入 20 世纪 70 年代后,自适应控制方法、鲁棒控制方法以及变结构控制方法等相继被用于潜器自动舵的研究。1989 年,赵国良等研究了潜器垂直面机动的多变量控制,提出调节器和模型跟踪控制器两种设计方案。1991 年, W. B. Mashfield 用哥氏理论研究了潜器在通气管状态下的鲁棒定深控制。1994 年赵国良、季鲁慧等用滑模控制方法设计了一种潜器空间运动的集中操舵系统,仿真表明具有较强的鲁棒性。1995 年英国的 E. L. Castro 等用 O'Reilly 和 W. E. Leithead 提出的独立通道设计方法,将经典的波特(Bode)图奈奎斯特(Nyquist)分析方法成功用于潜器多变量深度控制系统的设计中。

国内对变结构控制在理论上也进行了广泛深入的研究,将 VSC 方法用于船舶自动驾驶的研究工作也已经展开。