文章编号: 1002-0446(2006) 05-0519-06

7000米载人潜水器推进器故障容错控制分配研究

俞建成^{1,2},张艾群¹,王晓辉¹

(1 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016, 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:介绍了 7000米载人潜水器推进系统的组成和推进器布置,描述了潜水器控制分配问题,对推进器推 力和期望控制量进行了归一化处理.根据载人潜水器的推进器布置,建立了系统的控制分配模型,设计了推进器故 障容错处理策略,研究了基于推力最小二范数的载人潜水器控制分配求解方法.采用基于伪逆矩阵与定点 分配的混 合控制分配求解算法,在半物理仿真平台上实验验证了控制分配求解算法的正确性和有效性.

关键词:载人潜水器;水下机器人;控制分配;故障容错 中图分类号: TP24 文献标识码: B

Research on Thruster Fault Tolerant Control A llocation of a 7000m M anned Submarine

YU Jian-cheng^{1, 2}, ZHANG A i-qun¹, WANG X iao-hu¹

(1 Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
 2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract This paper introduces the propulsion system components and the thruster configuration of a manned submarine with 7000m operation depth at first Then control allocation problem of underwater vehicle is described, and thruster forces and desired control vectors are normalized in the control allocation process. Control allocation model of the manned submarine is presented considering its thruster configuration, and a thruster fault tolerant strategy is designed. Thirdly, this paper studies the solution method form anned submarine control allocation based on minimal thrust 2-norm. Finally, using a hybrid control allocation solution algorithm based on pseudo-inverse matrixes and fixed-point allocation, the validity and effective ness of the control allocation algorithm are validated by experiments on semi-physical simulation platform.

Keywords manned submarine, underwater vehicle, control allocation, fault tolerance

1 引言 (Introduction)

推进系统是载人潜水器控制系统的重要组成部 分,为潜水器运动提供驱动力,其设计性能直接影响 潜水器的总体性能.通常,推进系统设计主要包括推 进器布置、控制分配模块、推进器故障监测与诊断等 3部分.控制分配模块将控制器或操纵杆提供的期望 控制量分配到各个独立推进器上,使得实际输出控 制量尽可能与期望控制量吻合.在潜水器的推进器 配置存在冗余的条件下,控制分配可以实现某一优 化准则条件下的优化分配,可以提高系统对推进器 故障的容错能力.此外,控制分配还应该考虑各个推

进器的饱和约束限制问题.

国外学者 Johansen, Fossen, Sordalen 和 Lindegaard等对船舶的控制分配问题做了大量研究工作, 研究了固定推进器、可回转推进器以及舵等推进设 备的控制分配问题^[1~4].潜水器控制分配问题的研究 起步较晚,目前还是一个研究热点^[5].大部分潜水器 控制分配是根据系统的推进器布置,预先确定一种 分配方法,在运行过程中始终使用这种分配方法进 行推力分配.采用预先设置的分配方法进行控制分 配的主要缺点是无法实现控制分配的动态调整,对 推进器的故障无法实时调整分配策略,最终可能会 因为微小的推进器故障导致整个使命任务的失败.

^{*} 基金项目:国家 863计划资助项目(2002AA401003). 投稿日期: 2005-10-10

本文以 7000米载人潜水器为研究对象,研究潜水器 的控制分配问题,考虑了推进器饱和约束问题,设计 了推进器故障处理策略,采用了基于伪逆矩阵方法 与定点分配(fxed-point allocation)方法的混合控制 分配求解算法,通过半物理仿真平台实验验证了本 文研究的控制分配模块的正确性和有效性.

2 7000米载人潜水器推进系统(Propulsion system of 7000m manned submarine)

2.1 控制系统结构

Edin等提出了具有推进器故障诊断与容错控制 分配的 ROV 开环控制系统结构^[5].本文在 Edin等的 研究基础上给出了具有推进器故障诊断与容错控制 分配的 7000米载人潜水器闭环控制系统结构,如图 1所示.从图 1可以看出控制分配模块位于控制器与 推进器之间,实现对期望控制量的分配与优化.此 外,控制分配模块根据推进器状态监测与诊断模块 提供的故障信息动态调整分配策略,修正推进器的 约束限制条件.







22 推进器布置

7000米载人潜水器配置了 7个螺旋桨推进器和 1个纵倾调节装置,图 2为 7000米载人潜水器推进 器布置示意图. 艉部布置了 4个主推进器,采用十字 型布置,上下、左右对称,桨轴角度 a= 22.5°; 舯部布 置了 2个可回转推进器,左右各 1个;艏部布置一个 槽道推进器,与横轴平行布置;纵倾调节装置只提供 纵倾力矩.





3 控制分配问题描述(Formulation of the control allocation problem)

31 螺旋桨推进器模型

设推进系统中第 i个螺旋桨推进器产生推力 T^{i} 和扭矩 Q_{o}^{i} 设推力 T^{i} 在载体坐标系下的作用点为 $r^{i} = \begin{bmatrix} r_{e}^{i} r_{y}^{i} r_{z}^{i} \end{bmatrix}^{T}$, 在载体坐标系上的方向定义为单位向 量 $e^{i} = \begin{bmatrix} e_{e}^{i} e_{y}^{i} e_{z}^{i} \end{bmatrix}^{T}$. 推力 T^{i} 产生力矩 $Q_{r}^{i} = r^{i} \times T^{i} e^{i}$, 则 推进器 i产生的总力矩为 $Q^{i} = Q_{e}^{i} + Q_{v}^{i}$, 在不影响控 制分配策略通用性前提下, 可以对推进器模型作如 下假设⁽⁵⁾:

- a) 忽略推进器的控制环动力学;
- b) 忽略推进器产生的扭矩 Q_{s}^{i} :
- c) 忽略环境水流速度对推力的影响;
- d) 推进器正反向具有相同的推力特性. 则推进器模型为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}^{i} = \boldsymbol{T}^{i}\boldsymbol{e}^{i} \\ \boldsymbol{Q}^{i} = \boldsymbol{Q}^{i}_{r} = \boldsymbol{r}^{i} \times \boldsymbol{T}^{i} = \boldsymbol{T}^{i}(\boldsymbol{r}^{i} \times \boldsymbol{e}^{i}) \end{cases}$$
(1)

其中, $T^{i} = K^{i} u^{i}, K^{i}$ 为正常数, u^{i} 为推进器控制量.

32 控制分配模型

假设系统配置了 p个推进器,则第 i个推进器产 生的推力和力矩可用矩阵形式表示为^[5]:

$$\mathbf{T}^{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}^{i} \\ \mathbf{Q}^{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^{i} \mathbf{e}^{i} \\ T^{i} (\mathbf{r}^{i} \times \mathbf{e}^{i}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{x}^{i} & e_{y}^{i} & e_{z}^{i} \\ \mathbf{r}^{i} & \mathbf{e}^{i} \end{bmatrix}_{x} \left(\mathbf{r}^{i} \times \mathbf{e}^{i} \right)_{y} \left(\mathbf{r}^{i} \times \mathbf{e}^{i} \right)_{y} T^{i}$$

则 p 个推进器产生的合作用力和力矩向量 T的矩阵表示为:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{x} \\ \tau_{y} \\ \tau_{z} \\ \tau_{x} \\ \tau_{y} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{p} \tau^{i} = \sum_{i=1}^{p} \begin{bmatrix} e^{i} \\ (r^{i} \times e^{i}) \end{bmatrix} T^{i} = \begin{bmatrix} e^{i}_{x} & \cdots & e^{i}_{x} & \cdots & e^{i}_{x} \\ e^{1}_{y} & \cdots & e^{i}_{y} & \cdots & e^{i}_{y} \\ e^{1}_{z} & \cdots & e^{i}_{z} & \cdots & e^{i}_{z} \\ (r^{1} \times e^{1})_{x} & \cdots & (r^{i} \times e^{i})_{x} & \cdots & (r^{p} \times e^{p})_{x} \\ (r^{1} \times e^{1})_{y} & \cdots & (r^{i} \times e^{i})_{y} & \cdots & (r^{p} \times e^{p})_{z} \\ (r^{1} \times e^{1})_{z} & \cdots & (r^{i} \times e^{i})_{z} & \cdots & (r^{p} \times e^{p})_{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T^{1} \\ \vdots \\ T^{i} \\ \vdots \\ T^{p} \\ T^{p} \\ T \end{bmatrix}$$
(3)

 $\boldsymbol{T} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = \operatorname{diag}(\boldsymbol{K}^{1}, \boldsymbol{K}^{2}, \dots, \boldsymbol{K}^{p}) [\boldsymbol{u}^{1} \cdots \boldsymbol{u}^{i} \cdots \boldsymbol{u}^{p}]^{\mathrm{T}} \quad (4)$

其中,矩阵 B 为控制分配矩阵,由推进器的具体布置确定;向量 T 为推进器推力向量.

3 3 归一化处理

为了更直观地反映出各个推进器的推力使用情况, Lindegaard和 Ed in 提出了推进器推力归一化处理的思想^[3,5],本文在 Lindegaard和 Ed in的研究的基础上,进一步详细描述了推进器推力和推进系统输出合力的归一化处理过程.

第 i个推进器推力归一化处理为:

$$\underline{T}^{i} = \frac{1}{T_{\max}^{i}} T^{i}$$
(5)

则归一化推进器推力向量为:

$$\underline{T} = \operatorname{diag}\left[\frac{1}{T_{\max}^{1}}, \frac{1}{T_{\max}^{2}}, \dots, \frac{1}{T_{\max}^{p}}\right] T \qquad (6)$$

其中, $-T_{\max}^{i} \leq T^{i} \leq T_{\max}^{i}, T_{\max}^{i} > 0$

推进系统输出合力的归一化处理与推进器布置 有直接关系,推进系统输出第 *i*个合力分量的最大值 为:

$$T_{\max}^{i} = \sum_{i=1}^{p} |B_{ji}| T_{\max}^{i} \qquad j = 1, 2, ..., 6$$
 (7)

$$\boldsymbol{B}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \alpha & \cos \alpha \\ 0 & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ -l_{\text{Tx}} \sin \alpha - l_{\text{Tz}} \cos \alpha & 0 & l_{\text{Tx}} \sin \alpha + l_{\text{Tz}} \cos \alpha \\ 0 & -l_{\text{Tx}} \sin \alpha - l_{\text{Fy}} \cos \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

其中, $B(\beta) \in \mathbb{R}^{6 \times 8}$ 为 β 的函数; $\beta = [\beta_{b}, \beta_{2}]^{T}$ 为可 回转推进器的回转角度, 且 $\beta_{1} = \beta_{2} \in (0 \pi/2); l_{Tx},$ $l_{yx}, l_{tx}, l_{Bx}, l_{By}, l_{Hx}, l_{Hz}, \alpha$ 均为标量值, 相应的物理意 则推进系统输出合力的归一化向量为

Т

B

$$= \operatorname{diag}\left[\frac{1}{\tau_{\text{max}}^{\text{l}}}, \frac{1}{\tau_{\text{max}}^{2}}, \frac{1}{\dots, \frac{1}{\tau_{\text{max}}^{6}}}\right] \tau \qquad (8)$$

经过归一化处理,控制分配模型变为:

 $\tau = \underline{BT} \tag{9}$

$$= \Lambda \boldsymbol{B} \tag{10}$$

$$\Lambda = d \operatorname{iag} \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^{p} |B_{1i}|}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{p} |B_{2i}|}, \cdots, \frac{1}{\sum_{i=1}^{p} |B_{6i}|} \right]$$
(11)

4 7000米载人潜水器控制分配策略(Control allocation strategy of 7000m m anned subm arine)

4.1 7000米载人潜水器控制分配矩阵

定义 7000米载人潜水器推进器推力向量 *T* = $[T_{U}, T_{R}, T_{D}, T_{L}, T_{BR}, T_{BL}, T_{H}, T_{M}]^{T} \in R^{8}$, 合推力向量 $T = [T_{X}, T_{Y}, T_{Z}, T_{X}, T_{M}, T_{N}]^{T} \in R^{6}$, 其中纵倾调节装置 简化为只提供绕横轴方向力矩的推进器来考虑, 则 根据图 2所示的推进器布置示意图, 可得控制分配 矩阵为:

(12)

义如图 2所示. 可回转推进器的回转角 β 根据载人 潜水器的作业状况来调整, 当全速航行时, $\beta_1 = \beta_2 = 0$ 当低速航行或悬停作业时, $\beta_1 = \beta_2 = \pi/2$

(2)

4 2 基于二次优化的控制分配

本文采用推进器输出推力的二范数最小作为控 制分配优化准则,则控制分配问题可以描述为:

$$\underline{\boldsymbol{T}} = \arg\min_{\boldsymbol{T} \in \mathcal{A}} \|\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{u}} \underline{\boldsymbol{T}}\|_{2}$$
(13)

$$\Psi = \operatorname{argm\,in} \|\boldsymbol{B} \boldsymbol{T} - \boldsymbol{T}_{c}\|_{2} \qquad (14)$$

$$T_{\max} \leq T \leq T_{\max}$$
(15)

其中, <u>T</u>。为期望控制量; W_u 为加权矩阵, 通常为正定 对角矩阵; <u>T</u>max为推进器饱和约束条件, 且 $0 < T_m^i \le 1$ 通过加权矩阵 W_u 可以有效调整不同推进器的使 用优先等级.

43 故障适应策略

螺旋桨推进器故障可以粗略分为两种类型,一 种是部分故障,损失部分推力;另一种是完全故障, 即推进器不能产生推力.假设推进器 *i*出现故障,根 据其故障类型确定推进器最大推力减小系数 μ^i ,则 故障推进器饱和约束条件变为 $\mu^i \underline{T}_{max}^i$ 当推进器故障 为部分故障时, $0 < \mu^i < 1$;当推进器故障为完全故障 时, $\mu^i = 0$

除了调整故障推进器的最大推力外,Edin等还

提出了降低故障推进器的使用优先等级的思想^[5], 即通过增大加权矩阵 W_u中相应的加权系数 wⁱ,实 现降低故障推进器的使用优先等级.本文采用的加 权系数调整策略为:

$$w^{i} = w_{0}^{i} \left(1 + \frac{\delta}{\mu^{i}} \right)$$
(16)

其中, w₀ⁱ为初始加权系数, 可以根据推进器动态特性 设定; δ为正常数.

44 控制分配求解策略

对于求解式 (13)和 (14)的等式约束优化问题, 可以直接采用伪逆方法求解得到优化解. 伪逆方法 求得的解有可能超出推进器饱和约束条件,即不满 足式 (15)的不等式约束. 为了避免出现超出推进器 饱和约束条件的解,本文采用 Omerdic等提出的混 合分配的求解策略^{16]}. 首先,采用伪逆方法求解,如 果求出的解满足约束条件,则求解结束;如果不满足 约束条件,则采用定点控制分配策略 进一步求 解^[57],得到精确的近似解. 图 3为混合控制分配求 解算法流程图.



图 3 7000米载人潜水器混合控制分配算法流程图 Fig 3 Flow chart of hybrid control allocation algorithm for 7000m manned submarine

5 实验结果 (Experimental results)

在半物理仿真平台上对本文研究的 7000米载 人潜水器混合控制分配算法进行了实验验证,做了 两组实验.第一组实验验证混合控制分配策略对推 进器饱和限制的有效性,并与伪逆矩阵求解结果进 行比较,实验结果如图 4所示.第二组实验验证推进 器故障容错策略的有效性,并与伪逆矩阵求解结果 进行比较,实验结果如图 5所示.



(a) 期望控制量与误差

(b) 推力分配算法输出

图 5 推进器故障容错策略实验结果



第一组实验中,加权矩阵主对角线元素除了与 $T_{\rm M}$ 对应的元素设为 10外,其余均为 1,定点分配的 最大迭代次数 N = 100 $\lambda = 0.001$ Y = 10^{-5} . 从图 4 (a)可以看出,采用混合控制分配求解算法求得的解 比伪逆方法求得的解更接近期望控制量. 从图 4(b) 可以看出,混合控制分配算法求得的解都满足推进 器饱和约束条件.

第二组实验中,假设推进器 $T_{\rm U}$ 出现部分故障, 其最大推力系数 μ = 0.5 根据式 (16)计算与之对应 的加权系数为 3 实验中其它参数与第一组实验相 同. 从图 5(a)可以看出, 在有推进器出现故障情况 下, 采用混合控制分配求解算法同样可以得到精确 的解, 而采用伪逆方法求得的解有较大的误差. 从图 5(b)可以看出, 混合控制分配算法求得的解都满足 推进器饱和约束条件, 有故障的推进器的使用率要 比无故障推进器的使用率低.

6 结论 (Conclusion)

本文研究了推进器冗余配置的 7000米载人潜 水器控制分配问题,建立了载人潜水器的控制分配 模型,设计了推进器故障容错处理策略,研究基于伪 逆矩阵与定点分配的混合控制分配求解算法,通过 半物理仿真平台实验验证了控制分配求解算法的正 确性和有效性.根据实验结果可以得出如下结论:

(1) 归一化处理后的推进器推力更加直观地反映出推进器的使用状况;

(2) 混合控制分配求解算法可以求得精确解, 所有解都满足推进器饱和约束条件;

(3)可以根据实际系统的计算能力,设置算法的最大迭代次数,便于工程实现;

(4) 推进器故障处理策略可以有效地提高载人 潜水器对推进器故障的容错能力.

参考文献 (References)

 Johansen T A, Fossen T J Berge S P. Constrained nonlinear control allocation with singularity avoid ance using sequential quadratic pregramm ing[J]. EEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(1): 211–216

- [2] Johan sen T A, Fug keh T P, Tondel P, et al Optimal constrained control allocation in marine surface vessels with rudders[A]. IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft[C]. http //citeseer ist psu. edu/596411 html 2003
- [3] Lindegaard K P, Fossen T I Fuel-efficient rudder and propeller control albeation formarine craft experiments with a model ship
 [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11 (6): 850-862
- [4] Sordalen O J Optim al thrust allocation form arine vessels[J]. Contro lEng ineering Practice 1997, 5(9): 1223-1231
- [5] O h H. Backstepping and Control Allocation with Applications to Flight Control [D]. Linkoping Sweden Linkoping University, 2003.
- [6] Om erdic E, Roberts G N, Toal D. Extension of feasible region of control allocation for open-frame underwater vehicles [A]. IFAC Conference on ControlApplications in Marine Systems[C]. http:// rhw.staff.ul.ie/om.erdic.My% 20Papers/CAM S2004 pdf 2004
- [7] Ed in O, Geoff R. Thruster fault diagnosis and accommodation for open-frame underwater vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(12): 1575-1598.

作者简介:

- 俞建成 (1976-), 男, 博士生, 助理研究员.研究领域:水下 机器人导航、控制.载体设计.
- 张艾群 (1959-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 水下 机器人技术.
- **王晓辉** (1968-), 男, 研究员, 博士生导师. 研究领域: 水下 机器人控制及相关技术.

(上接第 518页)

- [10] Asakawa N, Takeu di Y. Teachingless spray-painting of sculptured surface by an industrial robot[A]. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Piscataway, USA: IEEE, 1997. 1875 – 1879
- [11] Chen H, Sheng W, XiN, et al Automated robot trajectory planning for spray painting of free-Form surfaces in automotive manufacturing [A]. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, USA: IEEE 2002 450-455
- [12] Sheng W, Xi N, Song M, et al. Autmated CAD-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces [A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway USA: IEEE, 2000 1918 –

1923.

[13] Jones PDA, Duncan SR, Rayment T, et al. Control of temperature profile for a spray deposition process [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(5): 89–95

作者简介:

- 韩光超 (1974-), 男, 博士后. 研究领域:快速模具制造, 机器人加工及应用.
- 张海鸥 (1955-),男,博士,教授,博士生导师.研究领域: 快速成形与制模,新材料成形技术,成形过程模拟.
- 王桂兰 (1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域: 快速成形与制模, 成形过程模拟.