



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101827748 B

(45) 授权公告日 2013.09.18

(21) 申请号 200880107004.2

(22) 申请日 2008.08.14

(30) 优先权数据

PA200701159 2007. 08. 14 DK

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 03. 15

(86) PCT 申请的申请数据

PCT/DK2008/050199 2008.08.14

(87) PCT申请的公布数据

W02009/021522 EN 2009. 02. 19

(73) 专利权人 螺旋桨控制有限责任公司

地址 丹麦法鲁姆

(72)发明人 莫恩斯·布兰克 卢卡·皮瓦诺

(74) 专利代理机构 北京银龙知识产权代理有限公司

公司 11243

代理人 许静

(51) Int. Cl.

B63H 21/22 (2006.01)

(56) 对比文件

W0 92/06890 A1, 1992. 04. 30, 全文.

US 2003/060094 A1, 2003. 03. 27, 全文.

US 4661714 A, 1987. 04. 28, 全文.

US 5336120 A, 1994. 08. 09, 全文.

US 2002/0185046 A1, 2002. 12. 12, 全文.

CN 101462590 A, 2009. 06. 24, 全文.

CN 1137462 A, 1996. 12. 11, 全文.

审查员 李利文

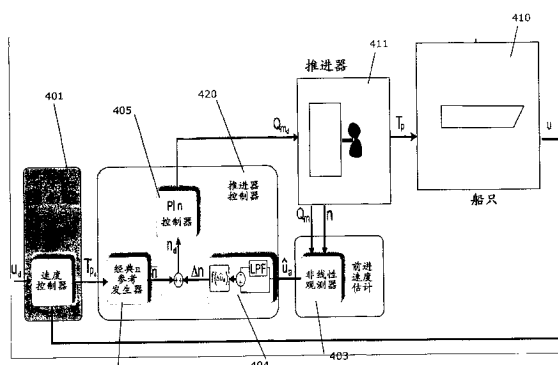
权利要求书2页 说明书13页 附图13页

(54) 发明名称

用于船舶的效率优化的推进器速度控制

(57) 摘要

本发明涉及改善船只的推进效率的方法。通过利用波浪引起的推进器流入的改变,即,朝向推进器的水流速度而获得该改进。波浪引起的水速度变化被用于计算推进器速度,使得推进器速度关于总推进效率是最优的。通过求解由公式表示为推进器传递的能量和转递给推进器的能量比率的最大化的优化问题来确定最优推进器速度。该方法可以用于具有一个或多个推进器的船只。



1. 一种通过使用计算得到的最优推进器轴速度 ($\Delta n, nd$) 控制推进器轴速度 (n) 来增加船只的推进效率的方法, 所述船只包括由引擎 (411) 驱动的推进器 (411) 以及用于控制推进器轴速度的控制器 (405), 所述方法包括:

估计推进器流入速度 (ua),

将最优推进器轴速度计算为推进器流入速度 (ua) 的函数, 其中计算最优推进器轴速度是基于最大化推进效率而进行的, 所述推进效率是传递以推动船只的功率和引擎消耗的功率的比率。

2. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 使用静态映射函数 (f_{opt}) 计算最优推进器轴速度 ($\Delta n, nd$), 所述静态映射函数将推进器流入速度 (ua) 的值映射到最优推进器轴速度的值。

3. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中, 使用静态映射函数 (f_{opt}) 计算最优推进器轴速度 ($\Delta n, nd$), 所述静态映射函数将推进器流入速度的变化 (Δua) 映射到最优推进器轴速度的变化 (Δn)。

4. 根据权利要求 2 或 3 所述的方法, 其中, 静态映射函数是基于最大化推进效率来确定的。

5. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 其中, 基于最大化推进效率计算最优推进器轴速度 ($\Delta n, nd$) 被计算为满足维持恒定船只速度的约束和 / 或限制推力波动的幅度的约束的优化问题的解。

6. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 其中, 从测量的推进器转矩 (Q_p) 计算推进器流入速度 (ua)。

7. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 其中, 从估计的推进器转矩 (Q_p) 计算推进器流入速度 (ua), 其中基于测量的马达转矩 (Q_m) 和测量的轴速度 (n) 计算估计的推进器转矩 (Q_p)。

8. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 还包括:

从推进器流入速度 (ua) 的平均值计算推进器流入速度的变化 (Δua);

从推进器流入速度的变化 (Δua) 计算轴速度的变化 (Δn), 其中

从计算得到的轴速度的变化 (Δn) 和参考轴速度 (n) 计算最优轴速度 (nd)。

9. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 其中通过波浪周期, 流入速度是具有周期的, 并且其中通过最大化传递给推进器的功率和在整数个波浪周期上平均的引擎消耗的功率的比率来计算最优推进器轴速度。

10. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 其中, 最优推进器轴速度被确定为流入速度的函数, 其中在使得推进器推进的功率效率最大化的约束下确定最优推进器轴速度。

11. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 包括向能够控制推进器轴速度 (n) 的控制器提供计算得到的最优轴速度。

12. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 其中, 确定最优推进器轴速度包括将推进器速度的变化计算为流入速度的函数并且合并推进器速度的变化和参考推进器速度以获得最优推进器轴速度。

13. 根据权利要求 1-3 中任一项所述的方法, 其中, 流入速度包括由经过推进器的波浪导致的波浪引起的流入速度 (uw) 的速度分量。

14. 一种通过使用计算得到的最优推进器轴速度 (Δn , n_d) 控制推进器轴速度 (n) 来增加船只的推进效率的系统, 所述船只包括由引擎 (411) 驱动的推进器 (411) 以及用于控制推进器轴速度的控制器 (405), 所述系统包括:

非线性观测器 (403), 用于估计推进器流入速度 (u_a),

计算装置 (420, 404), 用于将最优推进器轴速度 (n_d) 计算为推进器流入速度 (u_a) 的函数, 其中计算最优推进器轴速度是基于最大化推进效率进行的, 所述推进效率是传递以推动船只的功率和引擎消耗的功率的比率。

15. 一种船只, 包括根据权利要求 14 所述的系统。

用于船舶的效率优化的推进器速度控制

技术领域

[0001] 本发明涉及船舶的推进器控制,特别涉及通过推进器控制来改进推进效率。

背景技术

[0002] 在航道上的例如集装箱船和油轮的大型船只消耗大量燃料。由于油价上涨,燃料的大量消耗导致海运公司花费的百分比显著增长。而且从环境观点来看,通过船只运送货物而产生的燃料的大量消耗也是一个问题。由此,期望减少船只的油耗并且增加船只的推进效率。

[0003] EP0551367 公开了一种实现用于船舶推进器的引擎功率的优化利用的方法,其中在通过调节船舶引擎的输出、并且可选地调节推进器片的螺旋角以及推进器轴的旋转来连续地控制功率的调节环路中使用计算机,使得力传感器连续地监控推进器轴中的纵向净力,并且将纵向净力用作控制功率的主要参数,以这样的方式与推进器效率和经济的引擎油耗相关地在所有时间优化净力。EP0551367 的方法具有缺点,因为它需要使用装置来监控推进器轴中的纵向净力。

[0004] 但是 EP0551367 公开了目的在于改善推进器效率的方法,该方法具有通过使用其他用于推进器控制的方法来进一步改善船只效率的优点。

发明内容

[0005] 本发明优选地单独或以任何组合寻求减轻、缓和或消除一个或多个上述缺点。特别地,本发明的目的可以看做提供一种用于改善船只的推进器效率的系统。

[0006] 在本发明的第一方面通过提供一种方法获得了该目的和若干其他目的,该方法通过使用计算得到的最优推进器轴速度控制推进器轴速度来增加船只在波浪中的推进效率,所述船只包括由引擎驱动的推进器以及用于控制推进器轴速度的控制器,所述方法包括:

[0007] 估计推进器流入速度,所述流入速度包括由经过推进器的波浪导致的波浪引起的流入速度的速度分量,

[0008] 将最优推进器轴速度计算为推进器流入速度的函数,其中计算最优推进器轴速度是基于最大化推进效率进行的。

[0009] 本发明特别地但不是排他地有利于改善推进器效率。

[0010] 由此,使用增加推进器效率的轴速度控制提供了增加船舶、油轮和潜水艇的效率的方法。船只包括由一个或多个引擎驱动的一个或多个推进器。并且船只包括一个或多个控制器,例如轴速度控制器,用于控制一个或多个推进器的推进器轴速度。在现有的推进器轴速度控制器中,通过将基于推进器流入速度确定的参考输入信号提供给控制器可以利用该方法。由此,该方法可以被看做通过利用波浪引起的水速度中的变化来改善效率。可以根据该方法通过计算最优推进器轴速度来实现波浪的利用。通过最优地利用水速度中的变化引起的波浪,推进器轴速度可以被看做关于推进器效率是最优的。由此,可以通过对于推进器流入速度的给定值最大化推进效率来确定最优推进器轴速度。最大化推进效率可以被

看做表示推进器效率的能量函数的数学最大化。由此,推进器效率可以被公式化为各种能量函数,所述能量函数将例如与提供给船只引擎的功率相比的推进器的功率量化。

[0011] 获得的最优推进器轴速度可以被提供给推进器轴速度控制器作为参考输入信号。

[0012] 可以获得推进效率的最大化作为非线性优化问题的解,由此增加平均推进效率。

[0013] 通过利用推进器流入速度或者流入速度的变化,有利于优化推进效率,因为可以在船只中执行该优化而不执行船只的任何昂贵的修改。实际上可以通过修改船只的现有推进器控制器的部分来实现用于确定最优推进器速度的方法,在新式船只中该方法被实现为在计算机中执行的软件控制器。显而易见,推进器控制器执行的软件的修改,即使这样的修改不是小任务,也不需要用于控制器的现有计算机的昂贵改变。

[0014] 在本发明的实施例中,推进效率是传递以推动船只的功率和引擎消耗的功率的比率。由此,计算最优推进器轴速度可以是基于求解被公式化为传递以推动船舶的功率和引擎消耗的功率的比率的平均值的优化的优化问题。

[0015] 在一个实施例中,使用静态映射函数计算最优推进器轴速度,所述静态映射函数将推进器流入速度的值(或前进速度)映射到最优推进器轴速度的值。可以在用于改善总推进效率的推进器控制器中使用该静态映射函数,例如查找表或多项式或分段线性函数,其可以通过求解用于最大化推进效率的目的的优化问题来确定。

[0016] 在一个实施例中,使用静态映射函数计算最优推进器轴速度,所述静态映射函数将推进器流入速度的变化的值映射到最优推进器轴速度的变化。映射变化而不是绝对值是有好处的,因为变化可以提供简单控制器设计。可以使用低通滤波器或其他计算方法来获得前进速度的变化。

[0017] 在一个实施例中,静态映射函数是基于最大化推进效率来确定的,例如通过使得传递以推动船只的功率和引擎消耗的功率的比率最大化来确定的。

[0018] 在一个实施例中,基于最大化推进效率计算最优推进器轴速度被计算为满足维持恒定船只速度的约束和/或限制推力波动的幅度的约束或限制来自平均推力的偏差的约束的优化问题的解。为了减少主引擎和其他推进器驱动元件的磨损,约束船只速度变化和推力波动是有利的。

[0019] 在一个实施例中,从测量的推进器转矩计算推进器流入速度。计算(即估计)流入速度是有利的,因为很难测量流入速度或者需要昂贵的设备来测量流入速度。

[0020] 在一个实施例中,从估计的推进器转矩计算推进器流入速度,其中基于测量的马达转矩和测量的轴速度计算估计的推进器转矩。应该理解到可以使用可选的方法来估计推进器流入速度。

[0021] 一个实施例包括:

[0022] 从推进器流入速度的平均值计算推进器流入速度的变化;

[0023] 从推进器流入速度的变化计算轴速度的变化,其中

[0024] 从计算得到的轴速度的变化和参考轴速度计算最优轴速度。

[0025] 例如,可以通过将轴速度的变化加入到参考轴速度来计算最优轴速度。

[0026] 在一个实施例中,可以假设通过波浪周期,流入速度是具有周期的,并且其中通过最大化传递给推进器的功率和在整数个波浪周期上平均的引擎消耗的功率的比率来计算最优推进器轴速度。由此,在一个实施例中,假设给定的流入速度的波浪周期,优化问题可

以被公式化。

[0027] 在一个实施例中,最优推进器速度被确定为流入速度的函数,其中在使得推进器推进的功率效率最大化的约束下确定最优推进器速度。通过利用流入速度来确定最优推进器速度,优化或最大化推进效率是有利的,即,在优化推进效率上推进器速度是最优的。

[0028] 在一个实施例中,向能够控制推进器轴速度的控制器提供计算得到的最优轴速度。这样的控制器可以是简单的 PI 控制器或者已经用于推进器速度控制的其他控制器。

[0029] 在一个实施例中,最优推进器速度包括将推进器速度的变化计算为流入速度的函数并且合并推进器速度的变化和参考推进器速度以获得最优推进器速度。

[0030] 本发明的第二方面涉及一种系统,用于通过使用计算得到的最优推进器轴速度控制推进器轴速度来增加船只在波浪中的推进效率,所述船只包括由引擎驱动的推进器以及用于控制推进器轴速度的控制器,所述系统包括:

[0031] 观测器,用于估计推进器流入速度,所述流入速度包括由经过推进器的波浪导致的波浪引起的流入速度的速度分量,

[0032] 计算装置,用于将最优推进器轴速度计算为推进器流入速度的函数,其中计算最优推进器轴速度是基于最大化推进效率进行的。

[0033] 应该理解计算装置、观测器以及控制器可以是一个或多个计算机,用于执行控制指令、估计推进器流入速度以及计算最优推进器轴速度。指令可以在单个计算机或多个计算机中被执行为软件,即,计算机程序产品。由此,计算装置、观测器和控制器中的每一个可以表示单个计算机,被配置以执行用于控制、估计和计算最优推进器轴速度的计算机程序指令。可选地,计算装置、观测器和控制器中的一个或多个可以是在印刷电路板上实现的硬件或者在可编程计算机芯片上实现的固件,其中硬件或可编程芯片被设计或编程来执行控制、估计和 / 或计算轴速度。

[0034] 第三方面涉及一种船只,包括根据第二方面的系统。

[0035] 第四方面涉及一种计算机程序,能够使得处理器执行第一方面的方法。计算机程序产品可以被用于使得包括具有数据存储装置和与数据存储装置相关联的数据处理装置的至少一个计算机的计算机系统执行操作,控制推进器速度、估计推进器流入、计算最优推进器轴速度和用于执行根据本发明的实施例的方法所需的其他可能的动作。

[0036] 本发明的第一、第二、第三和第四方面中每一个可以与其他方面的任一个合并。本发明的这些和其他方面将在参考此后描述的实施例的说明中变得显而易见。

附图说明

[0037] 下面将参考附图仅以实例的方式描述本发明,其中:

[0038] 图 1 示出用于推进器控制的实验测试的设置;

[0039] 图 2a 示出测量的地表水推进器特性,它们的线性估计以及推进器效率;

[0040] 图 2b 示出推进器的推力和推进器转矩的比率;

[0041] 图 2c 示出用于说明本发明的推进器效率曲线的原理图;

[0042] 图 2d 示出用于说明本发明的当流入速度具有周期偏差并且轴速度保持不变时推进效率曲线的原理图;

[0043] 图 2e 示出用于说明本发明的当流入速度具有周期偏差并且轴速度被控制为流入速

度的函数时推进效率曲线的原理图；

[0044] 图 3 示出在恒定轴速度下执行的测试得出的数据；

[0045] 图 4 示出控制器框图；

[0046] 图 5 示出三个不同控制器的仿真结果；

[0047] 图 6a 示出流入速度和优化的推进器速度的结果；

[0048] 图 6b 示出静态映射函数；

[0049] 图 7 示出波浪振幅的统计分布；

[0050] 图 8 示出用于测量流入速度和正常的船只速度的方法；

[0051] 表 1 提供了在下面的公式中最常使用的符号的列表；

[0052] 表 2 给出了推进器几何参数；

[0053] 表 3 给出了总效率和推进器效率的平均值。

具体实施方式

[0054] 总地来说,本发明涉及在中浪中用于船舶的效率优化的推进器速度控制。

[0055] 本发明的目的涉及船舶推进、节省燃料、轴速度控制以及优化控制。

[0056] 在中浪中的船舶在它的主要动子的轴上经历时变的推力和转矩负载。原因是在波浪经过的过程中对于推进器的变化的流入速度。这个偏差已经考虑了对主要引擎控制的损害,其中在一些控制机制中抑制转矩、轴速度和功率中引起的波动,在另一些控制机制中忽略转矩、轴速度和功率中引起的波动。本发明的实施例表示如何利用流入速度中的波动来增加波浪中的平均推进效率同时不减小船只速度。提出了理论上增强推进效率的非线性控制器。模型测试确定波浪中的推进器动态特性并且应用仿真来证实新的控制机制。

[0057] 对于航道上的船舶,当波浪经过时由于对于推进器的例如速度的变化,波长产生了主动子的轴上的负载波动。当推进器以固定速度旋转时,如从推进器地表水特性中可知,流入速度的变化提高了推进器的前进数(advance number)的变化,并且由此引起了推进器效率的变化。本说明书的主题是确定是否可以积极地利用流入速度中的周期变化来对于通用推进器控制器的使用获得更高的平均推进效率。

[0058] 本发明的实施例核对了经受周期波浪引起的速度的推进器属性。重新使用具有可变流入的推进器的准稳态模型,并且关于在波浪中的总推进效率的可能增强进行主张。分析来自模型测试的经验结果并且将该经验结果用于显示准稳态模型假设对于中浪中的推进器是有效的。随后,将周期波浪引起的速度下的效率最大化表示为非线性优化问题并且表达数字解。以对于节省燃料的影响的观点和易于实现的观点讨论结果。为了证实效率优化控制器的属性执行仿真研究。

[0059] 准稳态推进模型

[0060] 表 1 提供了在下面的公式中最常使用的符号的列表。

[0061] 我们考虑推进器附接于以角速度 n 旋转的轴。轴动力学可以被写作：

[0062]
$$I\dot{n} = Q_m - (Q_p + Q_f), \text{公式 1}$$

[0063] 并且 $Q = Q_p + Q_f$ 是在主轴上的负载。当通过正轴和前进速度执行操作时,推进器推力和转矩通常表示为(见结合于此作为参考的“Carlton, J. S. (1994). Marine Propellers and Propulsion. Oxford, U. K. :Butterworth-Heinemann Ltd”)

$$[0064] \quad T_p = K_T \frac{\rho n^2 D^4}{4\pi^2}, Q_p = K_Q \frac{\rho n^2 D^5}{4\pi^2} \text{公式 2}$$

[0065] 通常在前进数 $J = 2\pi u_a / (nD)$ 上绘制 K_T 和 K_Q 。提升理论导致推进器的双线性推力和转矩关系（见结合于此作为参考的“Blanke, Mogens, Karl-Petter Lindegaard and Thor I. Fossen (2000). Dynamic model for thrust generation of marine propeller. In: Proc. IFAC Conference MCMC' 2000 (M. Blanke, Z. Vukic and M. Poursanjani, Eds.). IFAC”)：

$$[0066] \quad T_p = t_{nn}n^2 + t_{nu}nu_a \text{公式 3}$$

$$[0067] \quad Q_p = q_{nn}n^2 + q_{nu}nu_a \text{公式 4}$$

[0068] 其中 t_{nn} , t_{nu} , q_{nn} 和 q_{nu} 是常数参数。前进速度 u_a , 即对推进器的流入, 可以被写作标称前进速度 U_a 和项 u_w 的和, 表示波浪引起的流入：

$$[0069] \quad u_a = U_a + u_w \text{公式 5}$$

[0070] 标称前进速度 U_a 和船只速度 u 相关, $U_a = (1-w_f)u$, 其中 $(1-w_f)$ 项是半流系数（见结合于此作为参考的“Lewis, E. V. (1988). Principles of Naval Architecture Vol II: Resistance, Propulsion and Vibration. 3rd ed. Society of Naval Architects and Marine Engineers. New York”), 通常从船模试验水池中执行的试验获知。该表达将在随后部分中由模型试验验证。已知波浪是由较高海平面中的水的椭圆运动引起的, 即, 假象的水粒子的运动将是椭圆的。由此, 波浪引起的水速度 u_w 是由水粒子的椭圆运动引起的水速度。

[0071] 可以原则上使用速度计 (LDV) 或设置以测量推进器前面的水流的其他装置来测量前进速度 u_a 。图 8 表示装配在船舶 803 的船体 802 上的激光多普勒风速计 801。可以设置激光多普勒风速计以测量通过推进器 805 的前面的区域 804 的水流速度的平均值。由于接近于海面的水速度波动太大而不能用于传统的推进器控制, 通常使用相对于海的船只速度的其他测量。例如, 如图 8 所示可以相对与船舶下面很深处的水测量传播速度, 其中在可忽略水运动的海平面 820 以下很深的点 813 处布置超声波发射器 811 和接收器 812 以测量船舶相对于水的速度。

[0072] 推进器性能的重要测量是地表水效率, 其被定义为推进器产生的功率和消耗的功率的比率。推进器效率被计算为

$$[0073] \quad \eta_p = \frac{u_a T_p}{n Q_p} = \frac{u_a K_T}{n D K_Q} = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \text{公式 6}$$

[0074] 推进器推力和船只船体阻力 $R(u)$ 之间的平衡通过公式 7 确定浪涌速度

$$[0075] \quad m\dot{u} = R(u) + (1-t_d)T_p \text{公式 7}$$

[0076] 其中 $(1-t_d)$ 是推力扣除。

[0077] 为了分析总推进效率, 我们引入了总效率

$$[0078] \quad \eta = \frac{(1-t_d)T_p u}{Q n} \text{公式 8}$$

[0079] 使用公式 4 和公式 3

$$[0080] \quad \eta = \frac{(1-t_d)(t_{nn}n^2 + t_{nu}nu_a)u}{(q_{nn}n^2 + q_{nu}nu_a + Q_f)n} \text{公式 9}$$

[0081] 已经详细描述了在近些年由近海平台和船只的控制中的推装置的广泛使用和重要性引起的涉及轴速度、推力和转矩的推进器流入的动态效率。在“Fossen, Thor I. and M. Blanke(2000).Nonlinear output feedback control ofunderwater vehicle propeller using feedback from estimated axial flow velocity.IEEE Journal of Oceanic Engineering,25(2),241-255”中提出了用于流入速度估计的非线性观测器设计,其公开了通过使用具有来自推进器盘中的估计的轴流速的反馈的推进器轴速度控制器,补偿由于推进器轴流速(周围水速度)的量值的变化而造成的推力损失。由此,控制目的是设计推进器轴速度控制器,通过补偿轴流速来追踪期望的推进器推力。然而,该公开并没有考虑减少船只引擎的油耗。

[0082] 周期波浪干扰

[0083] 不丧失普遍性,公式 5 中波浪引起的速度可以被假设为周期的,

[0084] $u_w(t+\tau_w) = u_w(t)$ 公式 10

[0085] 在规则波浪中,波浪引起的速度可以被近似为

$$[0086] \quad u_w(t) = u_{w0} \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_w}t\right)$$

[0087] 忽略惯性的轴力矩,在波浪引起的速度周期的一个循环中消耗的机械(引擎)功率是

$$[0088] \quad P_m = E\{Q_n\} = \frac{1}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} Q(t)n(t)dt \text{ 公式 11}$$

[0089] 同时,传递以推到船只的功率是

$$[0090] \quad P_p = E\{R(u)u\} = \frac{1-t_d}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} T_p(t)u(t)dt \text{ 公式 12}$$

[0091] 平均推进效率是

$$[0092] \quad \bar{\eta} = \frac{1}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \frac{P_p}{P_m} dt = \frac{1-t_d}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \frac{T_p(t)u(t)}{Q(t)n(t)} dt \text{ 公式 13}$$

[0093] 在波浪中的推进器

[0094] 在位于 Trondheim 的 NTNU 的实验室 MCLab 执行了在中等波浪中推进器行为的研究试验。水池装配有可以达到最大 2m/s 速度的 6DOF 牵引支架,并且装配有能够产生最大 30cm 的波浪发生器。为了避免由于通风造成的损失,标称推进器浸没 h/R 被设置为等于 2.68,其中 R 是推进器半径。在具有 25cm 直径的四片式推进器上执行测试。图 1 中示出了测试构架。

[0095] 图 1 表示提供控制信号至驱动器 112 的计算机 111,即向电子马达 113 提供功率的功率驱动器,马达 113 通过轴 115 向推进器 114 提供马达转矩 Q_m 。应该理解到可以同样地使用燃烧引擎来代替驱动器 112 和电子马达 113。表 2 中给出了推进器几何参数。

[0096] 在图 2a 中将测量的标准地表水推进器特性 K_T 和 K_Q 、它们的线性估计和推进器效率 η_p 表示为前进数 J 的函数。从公式 6 确定获得的推进器效率 η_p ,由此给出由推进器生成的功率和提供给推进器的功率之间的比率。可以从公式 2、3 和 4 确定 K_T 和 K_Q 的线性估计。由此,可以从公式 2、3、4 和 6 中近似得到推进器效率 η_p ,例如图 2a 中使用 K_T 和 K_Q 的

估计。图 2b 表示推进器推力 T_p 和推进器转矩 Q_p 的比率。

[0097] 在操作中,图 2a 所示的效率曲线 η_p 表示推进器效率如何随着前进数 $J = 2\pi u_a / (nD)$ 的变化而变化。结果,当前进速度 u_a 由于波浪增加或减少时,推进器效率 η_p 将改变。从图 2a 可知应该在效率曲线的峰值处操作推进器。然而,由于不同的原因稳态操作可以不处于效率曲线的峰值。

[0098] 图 2C 表示从图 2a 被描述为前进数 J 的函数的效率曲线 η_p 的原理图。点 P 表示期望操作推进器的工作点。当前进数 J 减少到前进数 J_P 之下,效率 η_p 降低。当前进数 J 增加到前进数 J_P 之上,效率 η_p 增加,但是与前进数 J 降低到 J_P 之下的情况相比处于较低的比率。当前进数 J 增加到前进数 J_{MAX} 之上,效率开始再次降低。曲线 211 表示对于推进器的前进数 J 的变化作为时间 t 的函数,该变化仅由对于推进器波浪引起的流入的变化引起,即,推进器速度 n 和标称前进速度 U_a 保持不变。曲线 211 的 J 的平均值是 J_p ,为当流入速度没有变化时稳态操作的值。通过将前进数 J 的正弦变化 211 投影到效率曲线并且沿着时间 t_0-t_4 的周期绘制得到结果的效率数字,得到用于推进器效率 η_p 的效率曲线 212。

[0099] 由曲线 313 所示的推进器效率 212 在从 t_0 到 t_4 的周期中的平均值小于在工作点 P 处获得的效率 η_p ,因为效率曲线 η_P 的平均斜率在 J_P 之上而不是在 J_P 之下更小。由此,在恒定速度 n 操作推进器并且标称前进速度 U_a 是常数的情况下,波浪引起平均推进器效率 η_p 的降低。

[0100] 由此,通过将推进器速度 Δn 的变化引入推进器速度 n ,例如,通过将变化 Δn 加入到 n ,并且调节 Δn 的变化,使得推进器总是在工作点 P 上操作,而不管前进速度 u_a 或波浪引起的流入 u_w 的变化,与 n 保持不变或者在非优化方式下受控的情况相比,平均推进器效率 η_p 增加。

[0101] 图 2d 表示作为前进数 J 的函数的推力和转矩之间的比率的图,并且该比率被按比例缩放使得在稳态操作点,即图 2d 所示的点 P,曲线的值等于公式 8 给出的推进效率。缩放因子包括伴流因子 $(1-t_0)$,平均船只速度 U_0 、以及平均推进器速度 n_0 。曲线 211 将对于推进器的前进数 J 的变化显示为时间 t 的函数,该变化仅由对于推进器的波浪引起的流入的变化引起,即,推进器速度 n 和标称前进速度 U_a 保持不变。 J 的变化具有 0 均值,而 J 的均值等于 J_p 。通过将前进数 J 的正弦变化 211 投影到效率曲线 230 并且沿着 t_0-t_4 的时间周期绘制得到结果效率数字,获得用于推进效率 η 的效率曲线 232。如图 2d 的曲线 235 所示,轴速度 n 保持常数。

[0102] η 的均值 (232) 在图 2d 中被示为 234,从中可以看到当在流入速度中发生零均值变化时,推进效率降低。

[0103] 图 2e 重复来自图 2d 的图,推力和转矩之间的比率作为前进数 J 的函数,并且该比率被按比例缩放使得在稳态操作点,即图 2e 所示的点 P,曲线的值等于公式 8 给出的推进效率。当如在图 2d 中改变流入速度时,但是现在如图 2e 中的 235 所示,与流入速度成比例地控制推进器轴速度 n ,推进效率 η 具有图中 236 所示的形式。在 235 中 η 的均值被示为 237。均值看起来增加到用于未干扰操作 (点 P) 的值之上以及曲线 234 之上。增加的原因是 n 以某一方式变化,使得当推进器转矩上的轴推力的比率 (T/Q) 改变时,船舶速度和推进器轴速度的比率 (u/n) 也这样变化,两个比率的积 (uT/Qn) 将得到更高的值。

[0104] 作为简单的类似,可以考虑两个正弦信号的积。该积可以获得具有两个信号之间

的正确相位的正均值。推进器效率的情况比该类似更复杂,因为要考虑非线性函数。该直观的说明和图示实际上可以通过将轴速度控制为流入速度波动的函数来增强推进效率。

[0105] 上面的说明提供了确定推进器速度 n 的改变的直观方式,下面将描述用于确定变化 Δn 的具体方法,其将优化推进效率,给定时变前进速度 u_a 。

[0106] 为了仿真真实情况,根据公式 7 依照推进器产生的测量的推力和船只动力学移动牵引支架。船体阻力 $R(u)$ 包括线性和二次项:

[0107] $R(u) = -d_1 u - d_q u |u|$ 公式 14

[0108] 通过 $m = 200\text{kg}$, $d_1 = 30$ 以及 $d_q = 20$ 来仿真船只动力学。将测量的推进器推力注入公式 7 给出的模型,并且将得到的船只速度用作牵引支架速度的参考。在我们的设置中,标称前进速度 U_a 被看做等于牵引支架速度,因为推进器外壳不产生显著的尾流。由于相同的原因,可以忽略推力减少数目 t_a 。

[0109] 图 3 表示在 4cm 峰峰振幅的规律波浪和 1.75s 周期中与以恒定轴速度 n 执行的测试相关的数据。波浪在船只速度的相同方向传播(尾随浪)。在绘制之前已经滤除了推力、转矩、轴速度和标称前进速度的测量。在图 3a 中示出了轴速度。在图 3b 中绘制了测量的推进器推力。相同的图也表示公式 3 计算的推力,其中使用前进速度 U_a 的标称值得到 J ,我们对于实际的前进速度的最好猜想。我们可能注意到从推进器特性计算的推力不能精确地再现测量,暗示 U_a 不是实际前进速度的好的量度。这也解释了图 3c 中示出的测量的推进器转矩和从推进器特性计算的转矩之间的差异。

[0110] 图 3e 表示应用转矩测量通过公式 15 计算的前进速度的标称值和实际值

[0111] $u_a = \frac{Q_p - q_{mn} n^2}{q_{nu} n}$ 公式 15

[0112] 因为该值在实际船只中通常是不可用的,使用结合于此作为参考的“Pivano, L., Ø. N. Smogeli, T. A. Johansen and T. I. Fossen (2006). Experimental Validation of a Marine Propeller Thrust Estimation Scheme. 7th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft, Lisbon”中表述的非线性观测器获得估计值 $\hat{Q}_p$ 。

[0113] Pivano L. 等人在 2006 年公开了下面的用于得到推进器转矩的估计值 $\hat{Q}_p$ 的方法。为了获得用于推进器转矩的稳定观测器,考虑下面的系统:

[0114] $J_m \dot{\omega} = Q_m - Q_p - Q_f(\omega) + \Delta_f$

[0115] $\dot{Q}_p = -\frac{1}{\tau_q} Q_p + w_q$ 公式 A1

[0116] 其中 ω 是推进器轴的角速度,推进器转矩 Q_p 被看做时变参数并且被建模为具有正时间常量 τ_q 的一阶处理并且由有边界的随机噪声 w_q 驱动。在公式 A1 中,通过 Δf 考虑了 (accounted for) Q_m 的摩擦建模误差和测量误差。下面提出具有增益 L_1 和 L_2 的观测器:

[0117] $J_m \dot{\hat{\omega}} = Q_m - \hat{Q}_p - Q_f(\hat{\omega}) + L_1(y - \hat{y})$

[0118] $\dot{\hat{Q}}_p = -\frac{1}{\tau_q} \hat{Q}_p + L_2(y - \hat{y})$ 公式 A2

[0119] 假设测量

[0120] $y = \omega + v$ 公式 A3

[0121] 要由误差 v 损坏。假设 Δf 、 v 和 w_q 是有边界的, 摩擦力的线性部分是 $Q_f(\omega) = k_{f2} \omega$ 并且摩擦力的非线性要素是有边界的, 然后选择增益 L_1, L_2 满足

[0122] $L_1 > -k_{f2}$

[0123] $|1 + J_m L_2| < 2 \sqrt{\frac{J_m}{\tau_m} (k_{f2} + L_1)}$ 公式 A4

[0124] 然后, 可以从公式 A2 确定推进器转矩的稳态估计 $\hat{Q}_p$ 。 $\hat{Q}_p$ 的估计很好地重现测量并且可以用于通过公式 15 得到 $\hat{u}_a$, 前进速度的估计。图 3e 示出了估计 $\hat{u}_a$ 。如图 3f 所示, 有趣地注意到前进速度 u_a 和推进器浸没 h 之间的关系。当推进器更接近水平面时, 前进速度的量值更大。这是由于根据传统波浪理论, 由波浪引起的水平水速度在接近于表面处较大。

[0125] 图 3g 表示 J_n 和 J_m , 分别表示前进数 J 的标称值和测量值。 J_n 是使用 U_a 获得的, 而不是使用用于计算 J_m 的实际前进速度 u_a 获得的。图 3h 表示标称和测量的推进器效率 η_{pn} 和 η_{pm} , 以及标称和测量总效率 η_n 和 η_m 。总效率小于推进器效率, 因为它考虑了轴摩擦转矩, 这在我们的系统中非常显著。从结合图 2a 中的效率曲线的 J 的对应值计算推进器效率。通过公式 9 使用 U_a 计算总标称功率 η_n , 同时通过 u_a 的实际值计算 η_m 。获知关于前进速度的 η_m 和 η_{pm} 的相反行为很重要。当 u_a 降低时, 由于轴速度是常量, J 减少产生推进器效率的降低。同时如图 2b 所示, 由于 J 的值的减少推力转矩比率增加。这导致公式 8 给出的总效率的增加, 因为船只速度不会显著改变。为了增加 u_a 的值, 观察到相反的行为。

[0126] 效率优化

[0127] 如下所述, 可以使用总效率中经历的震荡以减少功耗而不降低船只速度。

[0128] 问题 1. 优化控制问题可以被公式化为

[0129] $\max_{n(t)} \bar{\eta} = \max_{n(t)} \frac{1-t_d}{T} \int_0^T \frac{T_p(t)u(t)}{Q(t)n(t)} dt$ 公式 16

[0130] 其中 $t \in [0, T]$, $T = k \tau_w$, 对于公式 17 和 18, k 是整数, 满足

[0131] $\frac{1}{T} \int_0^T T_p(\tau) d\tau = T_0$ 公式 17

[0132] $|T_p(t) - T_0| \leq T_M$ 公式 18

[0133] 在公式 17 中的第一约束是需要保持恒定的平均船只速度。公式 18 中的第二约束用于限制推力震荡以减少引擎和其他机械部件的损耗。

[0134] 由此, 在公式 16 中的积分表示通过最大化推进效率用于将最优推进器轴速度 nd 确定为推进器流入速度 u_a 的函数的条件。推进效率可以如公式 16 所示被给定为传递以推动船只的平均功率和主动子消耗的平均功率的比率。然而, 推进效率也可以被确定为其他功率比率, 例如如公式 6 给出的推进器产生的功率和推进器消耗的功率的比率。

[0135] 对于不同前进速度 u_a 通过得出使得推进效率最大化的推进器速度 n 的值, 即, 积分来求解公式 16。公式 16 依赖于根据公式 3 和公式 4 得到的推进器推力 T_p 和轴负载转矩 Q 的前进速度 u_a 。因为公式 16 对于求解推进器的实时控制来说计算负载太大, 可以通过例如包含前进速度值 u_a 和对应的所需推进器速度值 n 的查找表的静态映射来建立公式

16 的近似解。可选地,例如多项式或分段线性函数的函数可以适用于从公式 17 得到的前进速度值 u_a 和推进器速度值 n 。

[0136] 优化问题的数值解

[0137] 为了评估关于应用传统轴速度和转矩控制器的总效率的可能增加,计算被定义为离线 η 优化器控制器的优化问题的数值解(见结合于此作为参考的“Smogeli, Ø. N., E. Ruth 和 A. J. Sorensen(2005). Experimental validation of power and torque thruster control. Proceedings of the IEEE 12th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED' 05), Cyprus. Pp. 1506-1511”)。考虑由公式 7 给出的船只动力学,平均船只速度被设置为等于 0.86m/s。波浪引起的流入速度 u_w 是 0.2m/s 的振幅和 3s 周期的正弦信号。在这个阶段省略了惯性的轴力矩,由此考虑推进器能够以速度 n 即时旋转。摩擦力矩被建模为 Coulomb 加上线性粘滞项。船只的速度被假设为可用的。使用与试验中相同的船只动力学参数,平均推进器推力 T_0 等于 45N 并且平均轴速度等于 37.7rad/s。 T_M 的值被选定为等于 $\pm 7N$,从而获得比使用传统轴速度控制器获得的推力震荡更小的推力震荡。在 Matlab 环境下在三个波浪周期 τ_w 中通过公式 17 和 18 给出的约束条件求解公式 16 中的问题(参见例如结合于此作为参考的“Becerra, V. M. (2004). Solving optimal control problems with state constraints using nonlinear programming and simulation tools. IEEE Transactions on Education 47(3), 377-384”)。

[0138] 图 5 表示优化根据本发明的实施例的控制器(表示为 η 控制器)、传统轴速度控制器(表示为 n 控制器)和转矩控制器(表示为 Q_p 控制器)的三种情况的仿真结果。子图(a)中描述了在这种情况下等于标称前进速度的船只速度。如子图(c)所示,由于推进器推力围绕其均值的最小的变化,转矩控制器产生最小的震荡船只速度。通过优化控制器和传统轴速度控制器而获得的船只速度表示围绕均值的近似相同变化。在子图(d)中示出轴速度。优化控制器产生了更大的轴速度变化,但是推力示出与传统的轴速度控制器相比较小的震荡。在子图(e)和(f)中分别示出了推进器和负载转矩。在子图(g)和(h)中分别示出了总效率和推进器效率。有兴趣地获知当推进器效率更大时作为优化问题的解而获得的轴速度表示最大值,反之亦然。图 5 的结果可以在图 2C 的视图中被解释。例如,考虑在图 5 中子图(b)中的最小前进速度 u_{a_min} 。根据图 2A 和图 2C 中的推进器效率的图形以及 $J = 2\pi u_a / (nD)$,应该减少推进器速度 n 用于减少前进速度 u_a 的值以在效率曲线 η_p 中停留在工作点 P。实际上,图 5 的子图(d)中示出了公式 16 的解得到推进器速度 n ,该推进器速度 n 比于转矩控制器的推进器速度小由 612 指示的量。得到的优化控制器的推进器速度导致推进器效率 η_p ,该推进器效率 η_p 比转矩控制器和传统轴速度控制器的效率大图 6 的子图(h)中 613 指示的量。

[0139] 当海面状态没有改变时,即,当波浪引起的流入在时间上保持相同的幅度时,优化解的离线计算提供高的性能。随着波浪模式变化,可以执行重新开始的优化或者预计算的函数的表被存储用于在效率优化控制器中的离线使用。

[0140] 可选地,可以调节推进器速度的优化解,例如,以预定间隔或当波浪特性(波浪的幅度频谱或波浪方向)显示的足够的变化。例如,可以从不同的波浪特性(即,对于前进速度 u_a 的不同频率和幅度)得出优化推进器轴速度的不同解,并且可以对向实际波浪特性提供最佳匹配的优化解采用推进器速度的优化解的调节。清楚地,可以连续执行或间隔执行

优化解的采用。

[0141] 可选地,波浪幅度(见图7)和波浪频率的统计分布可以被用于获得推进器速度的优化解的统计解。这可以通过使用公式17和18的约束条件的公式16的优化来实现。结果是优化轴速度需求,这是前进速度的波动的函数, $\Delta n = f_{\text{opt}}(\Delta u_a)$ 。

[0142] 用于实际实施,从前进速度 u_a 到轴速度 n 识别静态匹配。以 Δu_a 和 Δn 来定义它们的平均值周围的 u_a 和 n ,我们具有

[0143] $\Delta n = f_{\text{opt}}(\Delta u_a)$ 公式19

[0144] 由此,推进器速度的最优解可以被表示为静态映射 f_{opt} 。在一个实施例中,可能结合公式17和18给出的约束条件或其他约束条件,从公式16给出的优化问题的数值解中确定静态匹配函数 f_{opt} 。可选地,替代将前进速度的变化映射到推进器速度变化,静态映射可以直接将前进速度的实际值映射到推进器速度值。

[0145] 如上所述,可以对于不同波浪特性可以确定不同的最优解 f_{opt} 。由此,可以从 n 个不同的波浪特性得到一组映射函数 $f_1, f_2, \dots, f_n$,使得对实际波浪特性采用最优解意味着选择对实际波浪特性提供最优匹配的映射函数。

[0146] n 的平均值对应于传统轴速度控制器需要的轴速度参考。通过将 Δn 加入到参考轴速度,我们可以获得最优解。从公式19计算 Δn 的值,其中 Δu_a 是从 u_a 的估计减去它的平均值得到的(使用例如低通滤波器计算的)。图6b表示被识别为一系列 tansig 函数的静态映射 f_{opt} (见结合于此作为参考的“Narendra, K. S. 和 K. Parthasarathy (1990). Identification and control of dynamical systems using neural networks. IEEE Transaction on Neural Network 1(1), 4-27”)。图6a表示通过公式19获得的 $\Delta u_a, \Delta n$ 和它的近似值 Δn_m 。

[0147] 图4表示控制器框图。推进器和引擎被集成到引擎单元411中。速度控制器401提供有来自船只410的期望的船只速度 u_d 和测量的船只速度 u ,从这些输入,控制器401生成期望的推进器的推力 T_{pd} 的值。期望的推进器推力 T_{pd} 被应用至传统的轴速度控制器402,轴速度控制器402生成获得接近或等于 u_d 的船只速度 u 必须的参考推进器速度 $\bar{n}$ 。从引擎单元411,非线性观测器403可以提供有推进器速度 n 和马达转矩 Q_m 的测量值。非线性观测器403可以例如通过使用公式15结合从公式A3和A4获得的推进器转矩 $\hat{Q}_p$ 的估计值来估计前进速度 $\hat{u}_a$ 的值。将估计的前进速度 $\hat{u}_a$ 提供给计算单元404,从估计的前进速度 $\hat{u}_a$ 中减去通过使用低通滤波器LPF获得的估计的前进速度 $\hat{u}_a$ 的平均值来获得前进速度的变化 $\Delta \hat{u}_a$ 。从静态匹配函数 f 获得推进器速度的变化 Δn 。通过将推进器速度的变化 Δn 加入到参考推进器速度 $\bar{n}$,获得最优推进器速度 n_d ,其中最优推进器速度 n_d 在优化或最大化传递以推动船只的平均功率和公式16公开的由主动子消耗的平均功率的比率中是最优的。将最优推进器速度 n_d 提供给反馈控制器405,例如使用测量的推进器速度 n 作为反馈的PI控制器,其产生对引擎单元411指令的马达转矩 Q_{mc} 的值,即, Q_{mc} 值可以控制引擎的燃油摄入。

[0148] 本领域普通技术人员将知道图4所示的控制机制仅是用于控制推进器速度的控制系统的一个例子。闭环控制方法可以包括轴速度的闭环控制、轴转矩的闭环控制以及轴功率控制。控制环路也可以包括防止引擎负载过重的功能。

[0149] 由此,例如图4所示,利用各种控制机制使用计算的最优推进器轴速度 u_a 来控制推进器轴速度的控制器可以包括以或多个控制器,例如PI控制器。特别地,控制器405可

以被看做使用计算的最优推进器轴速度来控制推进器轴速度的控制器。然而,由于可以利用不同的控制机制来实现推进器轴控制,图 5 所示的控制机制,包括速度控制器 401、参考发生器 402 和 PI 控制器 405,也可以被看做用于控制推进器轴速度的控制器。由此,用于控制推进器轴速度的控制器可以被广义地理解为利用任何类型的控制器的任何适合的控制机制,任何类型的控制器例如为 PID 控制器、自适应控制器和最优控制器。

[0150] 由于推进器轴速度和推进器转矩和推力之间的非线性关系,控制器在包括非线性项的推进器轴速度动力学项中是非线性的。基本地,推进器模型是非线性的。这导致使用非线性观测器来估计前进速度(以及推进器转矩)。传统的用于块“PI n 控制器”的工业解决方案使用成比例和积分动作(线性控制器)。更复杂的控制法则可以包括非线性前馈(以补偿非线性摩擦力转矩)和非线性反馈项来确保关于线性控制器的更快收敛。这个所谓的“经典 n 参考发生器”还包括用于计算传统轴速度参考信号的非线性函数。最后,来自估计的前进速度和 δn 的映射是非线性的,并且由此图 4 中的控制器是非线性的。

[0151] 应该理解到计算单元 404、观测器 403 以及控制器 401、402、405 中任一个可以实现为单个计算机或者多个计算机中的软件。由此,计算单元 404、观测器 403 以及任一控制器中的每一个可以被实现为单个计算机上的计算机程序或者这个程序可以在单个计算机上运行。可选地,一个或多个计算装置、观测器和控制器可以是在印刷电路板上实现的硬件或者在可编程计算机芯片中实现的固件。例如,控制器和计算单元 404 中任一个可以被实现为在单个计算机上的推进器控制器 420。清楚地,也可以在推进器控制器 420 中实现观测器 403,或者在连接至推进器控制器 420 的分离计算机中实现观测器 403。

[0152] 在前进速度中的快速变化导致轴速度中的快速变化,这可以增加系统的机械部件的磨损。可以通过减小推进器转矩观测器增益(即公式 A2 中的增益 L1 和 L2)、降低在前进速度估计中的高频内容来避免上述磨损。此外,对于柴油机引擎,由于马达转矩限制不允许轴速度上的快速变化,因此可能降低性能,即,最优轴速度不仅是估计的前进速度的函数,而且是例如马达转矩、燃料需求和排除废气气压等参数的函数。

[0153] 表 3 表示总效率和推进器效率的平均值。离线 η 优化器控制器关于传统轴速度控制器在今天工业标准下对于固定节距(pitch)控制器产生了大约 2.9% 的总效率的增长(见结合于此作为参考的“Blanke, M. and P. Busk Nielsen(1990). The marine engine governor. In: Proceedings Second International Conference on Maritime Communications and Control. Society of Marine Engineer. London, UK. pp. 11-20”)。与转矩控制器相比,总效率增长了大约 1.7%。这个改进可能看起来不大,但是对于在航路中的船舶来说,推进效率的增加可以导致本质的节省。此外,燃料消耗的降低可以导致二氧化碳和其他排放的降低。外推至航道

[0154] 这些结果是在具有波浪幅度 $\xi_w^{\text{exp}} = 2 \text{ cm}$ 以及推进器直径 $D^{\text{exp}} = 25 \text{ cm}$ 的实验室条件下获得的。这等效于具有 $D = 6 \text{ m}$ 直径推进器的货柜船的波浪幅度 $\xi_w^{\text{ocean}} = 0.48 \text{ cm}$ 。这个波浪幅度等效于显著的波浪高度 $h_{1/3} = 16/5 \xi_w = 1.53 \text{ m}$ 。随后进行的试验表明在本文中描述的现象对于多达至少三倍于在此使用的波浪高度是有效的,即,多达 4.6 m 的显著的波浪高度。与图 7 所示的来自北大西洋的波浪统计相比,82% 的波浪处于该限制内,并且在该组中的平均显著波浪高度是 2.2 m。这意味着对于在应用常数轴速度控制的在航道中的船舶来说,总油耗的总可能节省增加至最多 3.4%,以及对于在常数转矩控制模式下的船只来说总

油耗的总可能节省增加至最多 2.0%。

[0155] 总之，公开了用于在中浪中运行的海洋推进器的新的控制机制，相对于传统推进器控制情况该控制机制可以增加平均推进效率。主要观点是使用由于波浪引起的前进速度的变化来增加平均推进效率而不降低船只速度。轴速度参考被计算为具有考虑了规律波浪的限制的非线性优化问题的解。在仿真中表示结果，其中使用的模型是从试验测试中得到的。外推至航道对于航道中的船只预测了多达 3.4% 的潜在燃油节省，而不损失速度。

[0156] 尽管结合具体实施例描述了本发明，但是本发明并不局限于在此设置的特定形式。而是，本发明的范围仅由附带的权利要求限制。在权利要求中，术语“包括”并不排除其他步骤和元素的存在。此外，尽管在不同权利要求中包括了各个特征，这些特征也可以被有利地合并，并且不同权利要求中的包括并不意味着特征的和合并是不可行的和 / 或没有利的。此外，单数表示并不排除多个。由此，“一”、“一个”、“第一”、“第二”等的表示并不排除多个。此外，权利要求中的附图标记并不用于限制本发明的范围。

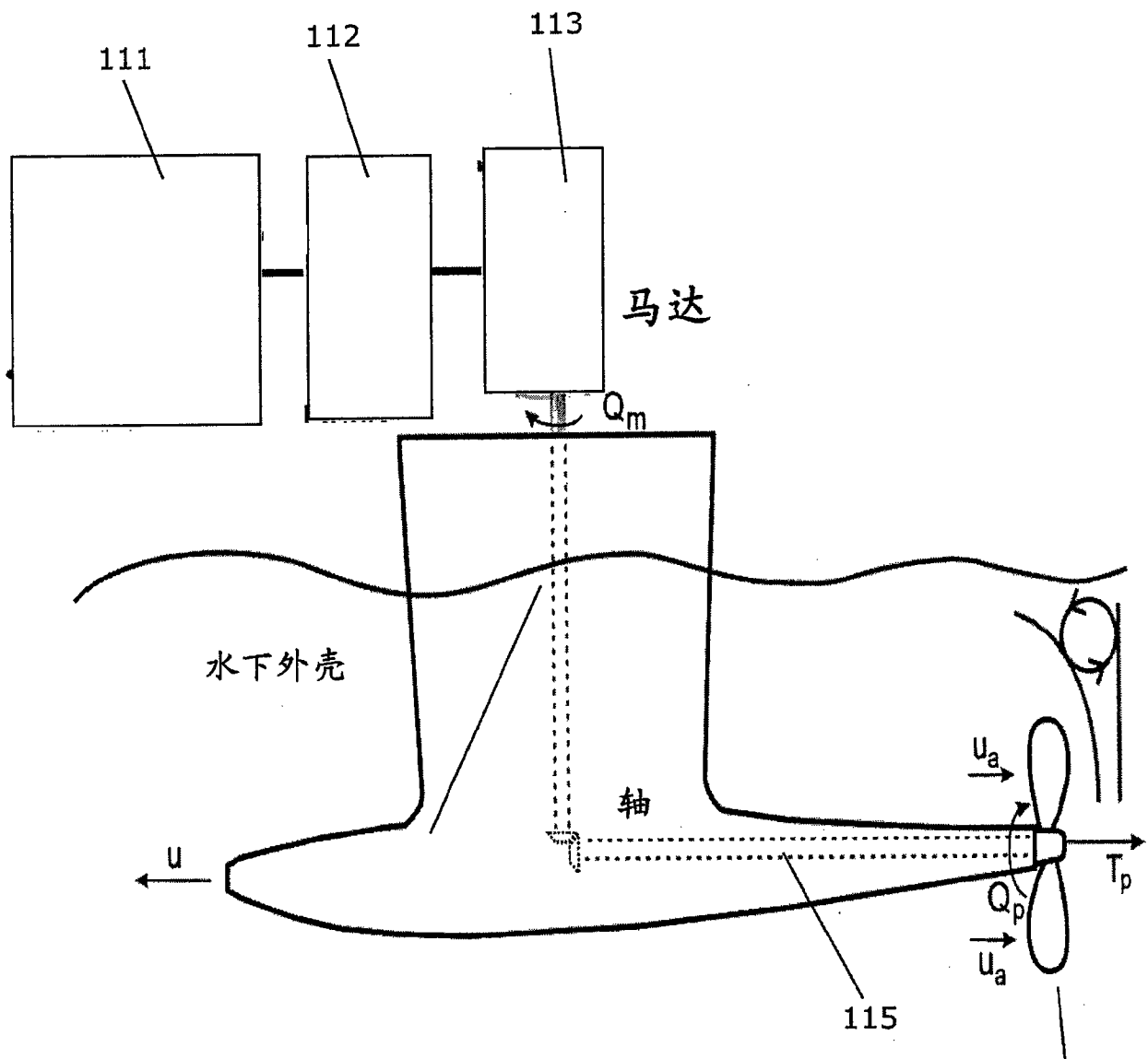


图 1

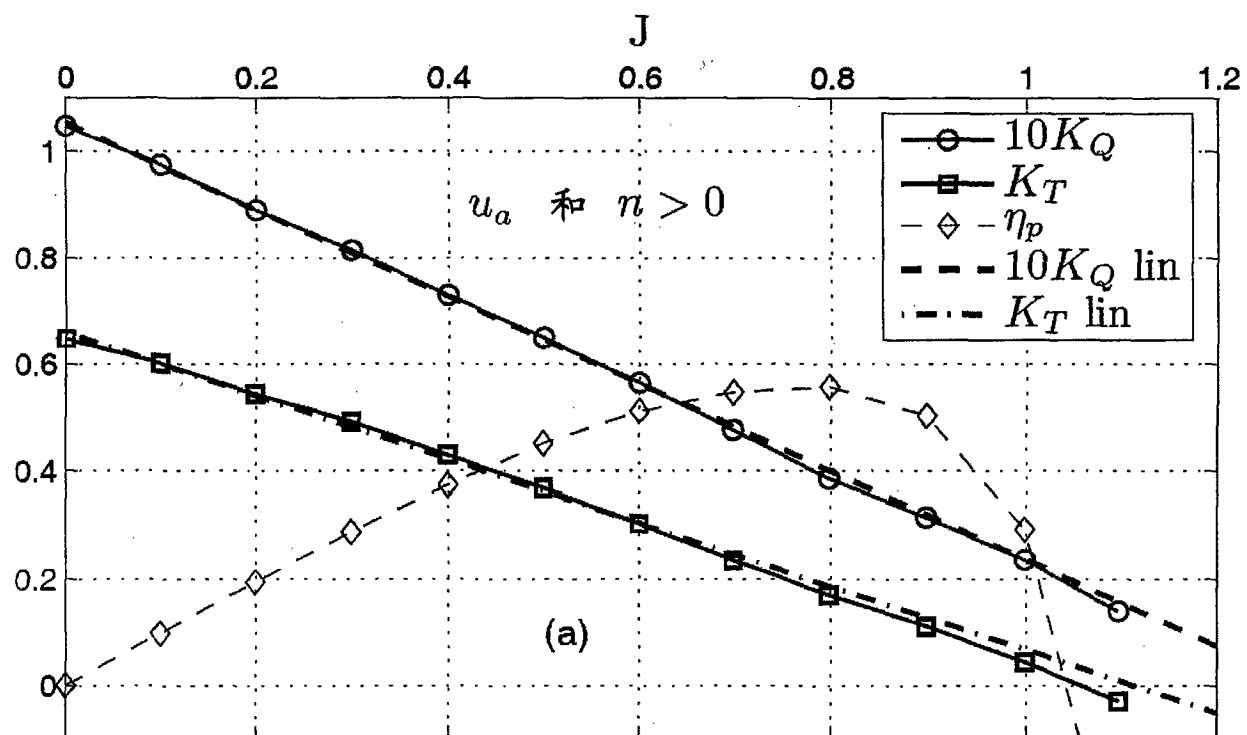
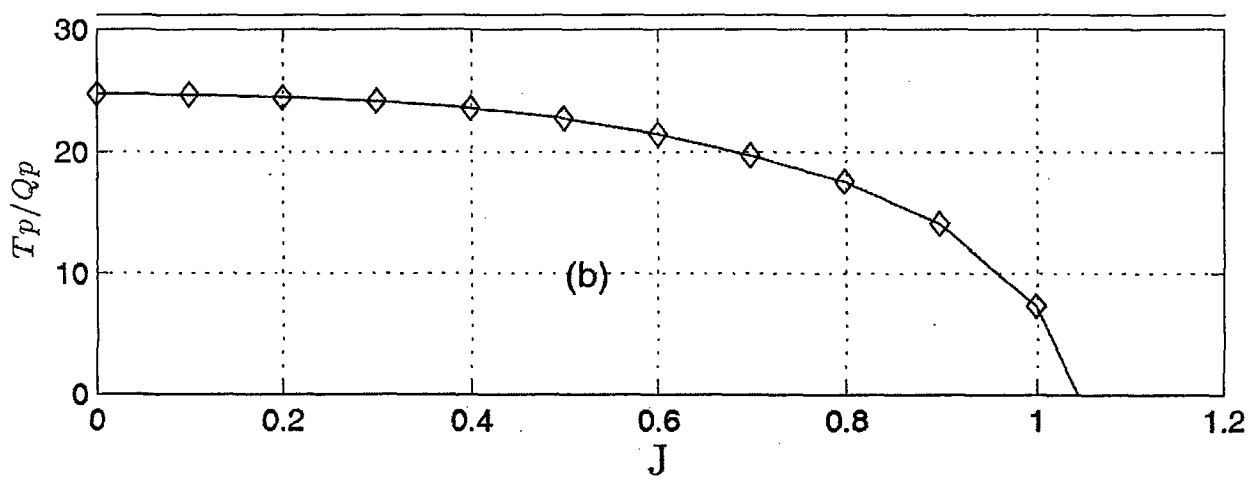


图 2

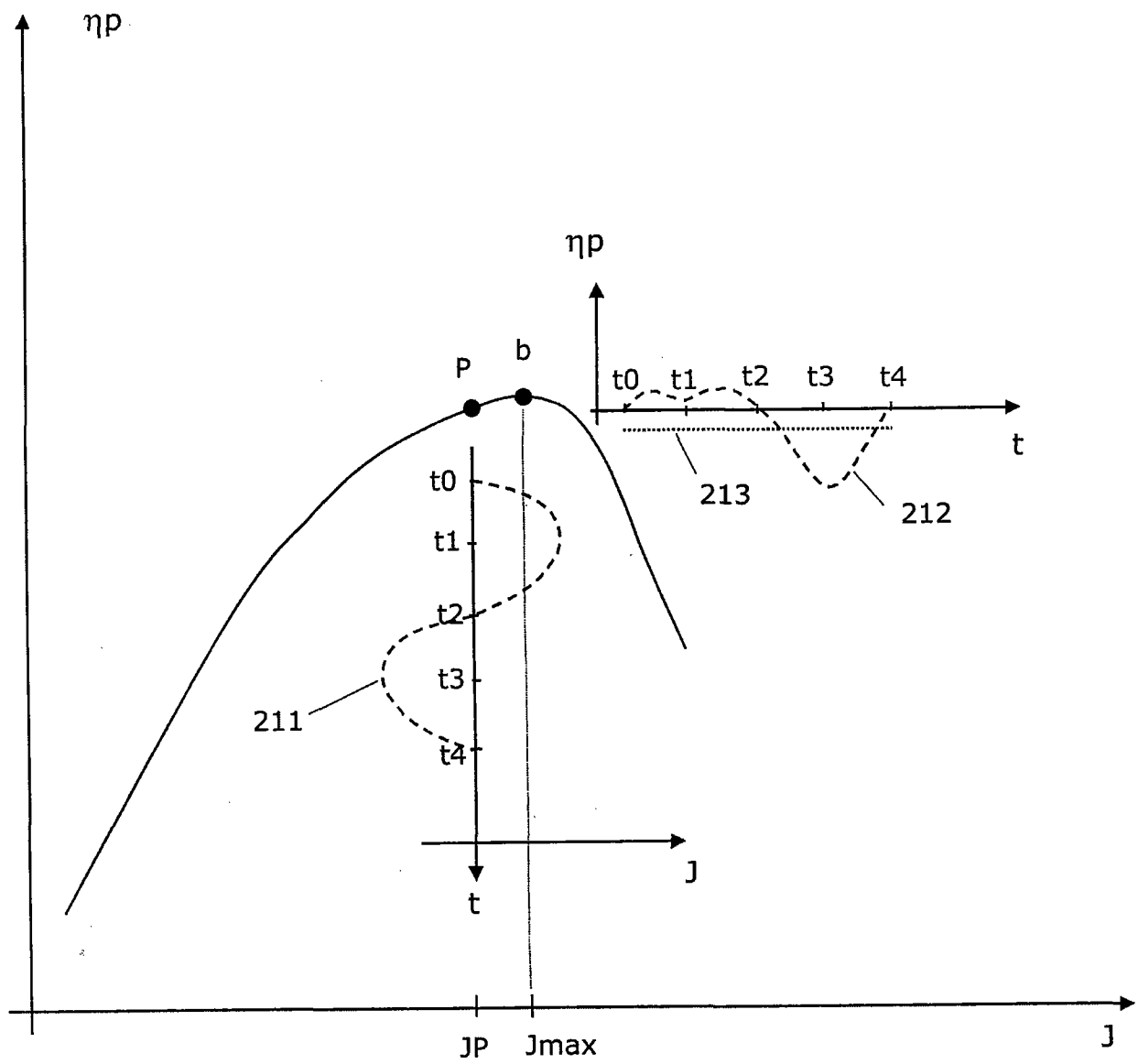


图 2c

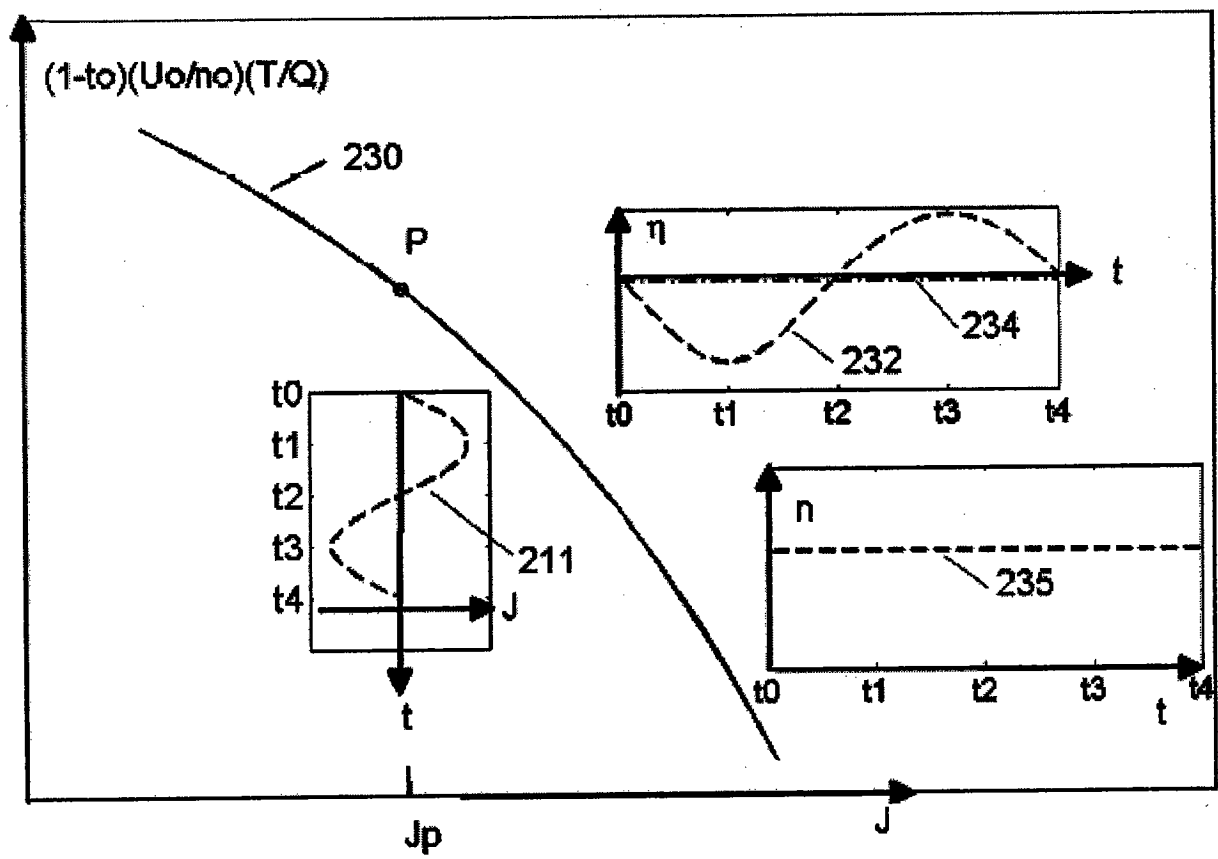


图 2d

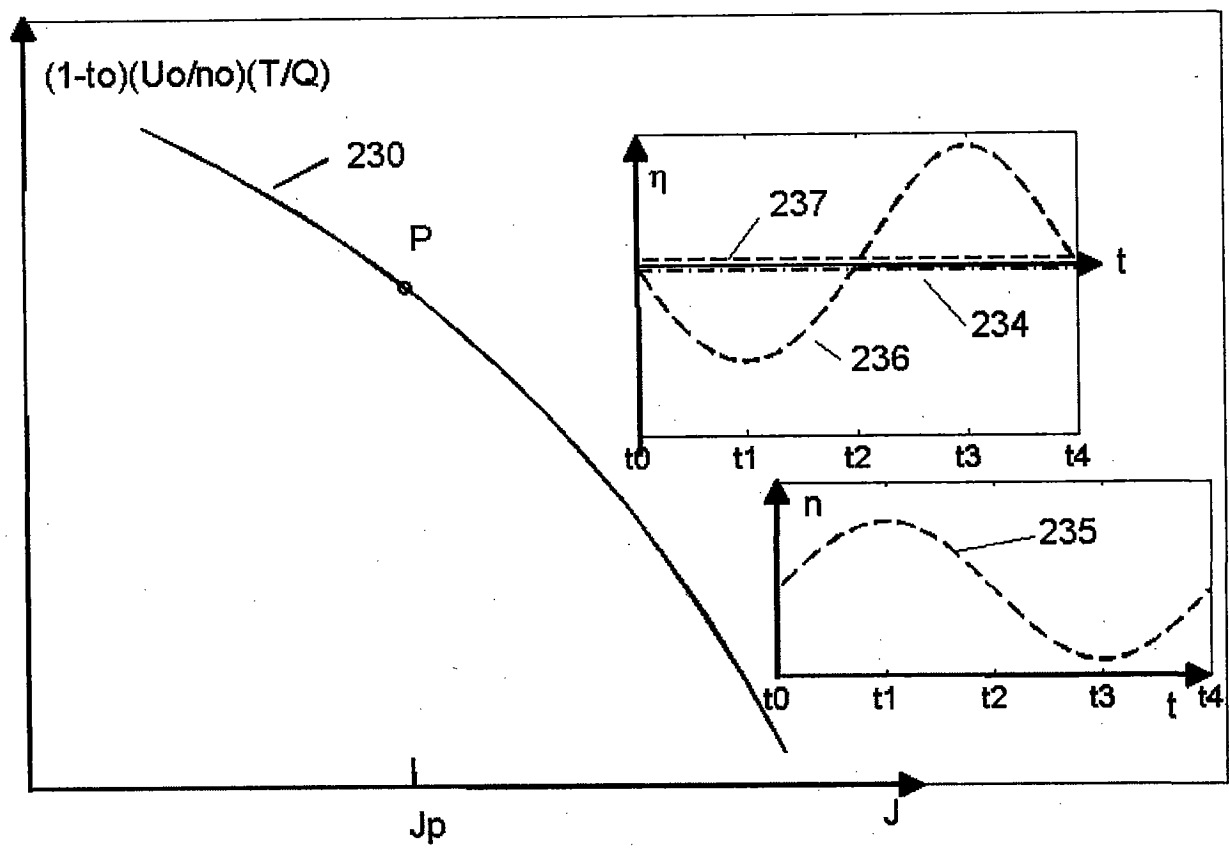


图 2e

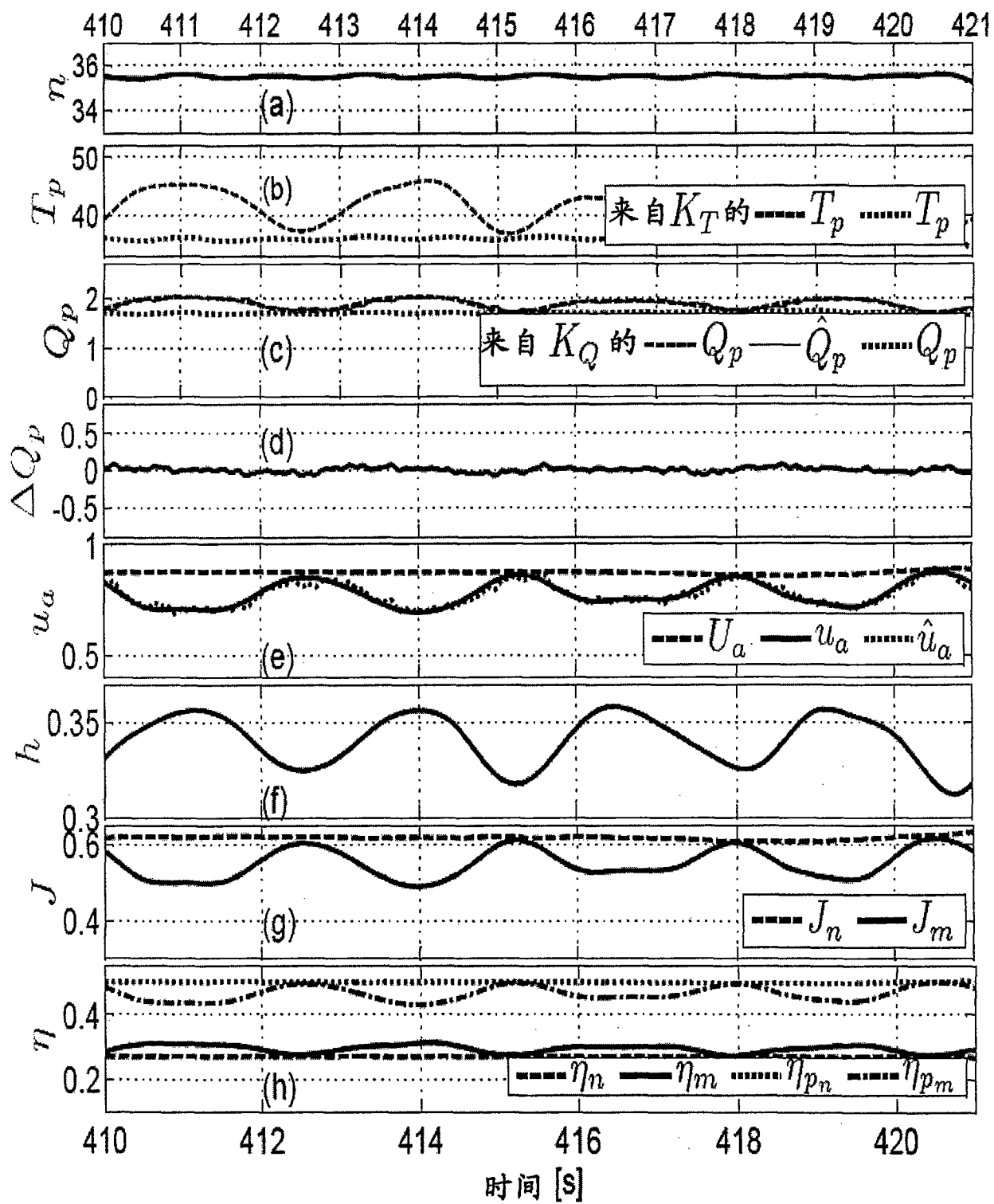


图 3

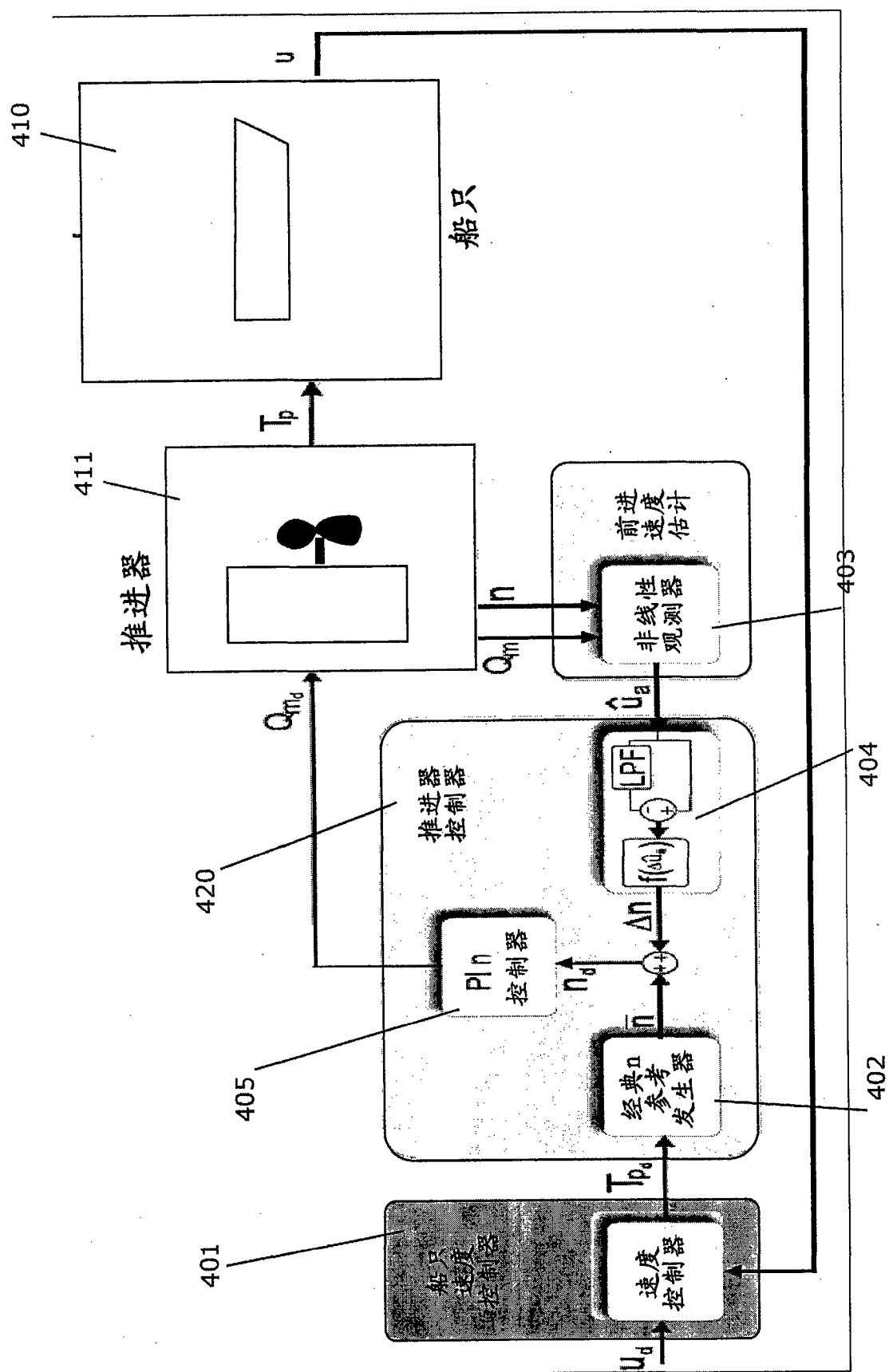


图 4

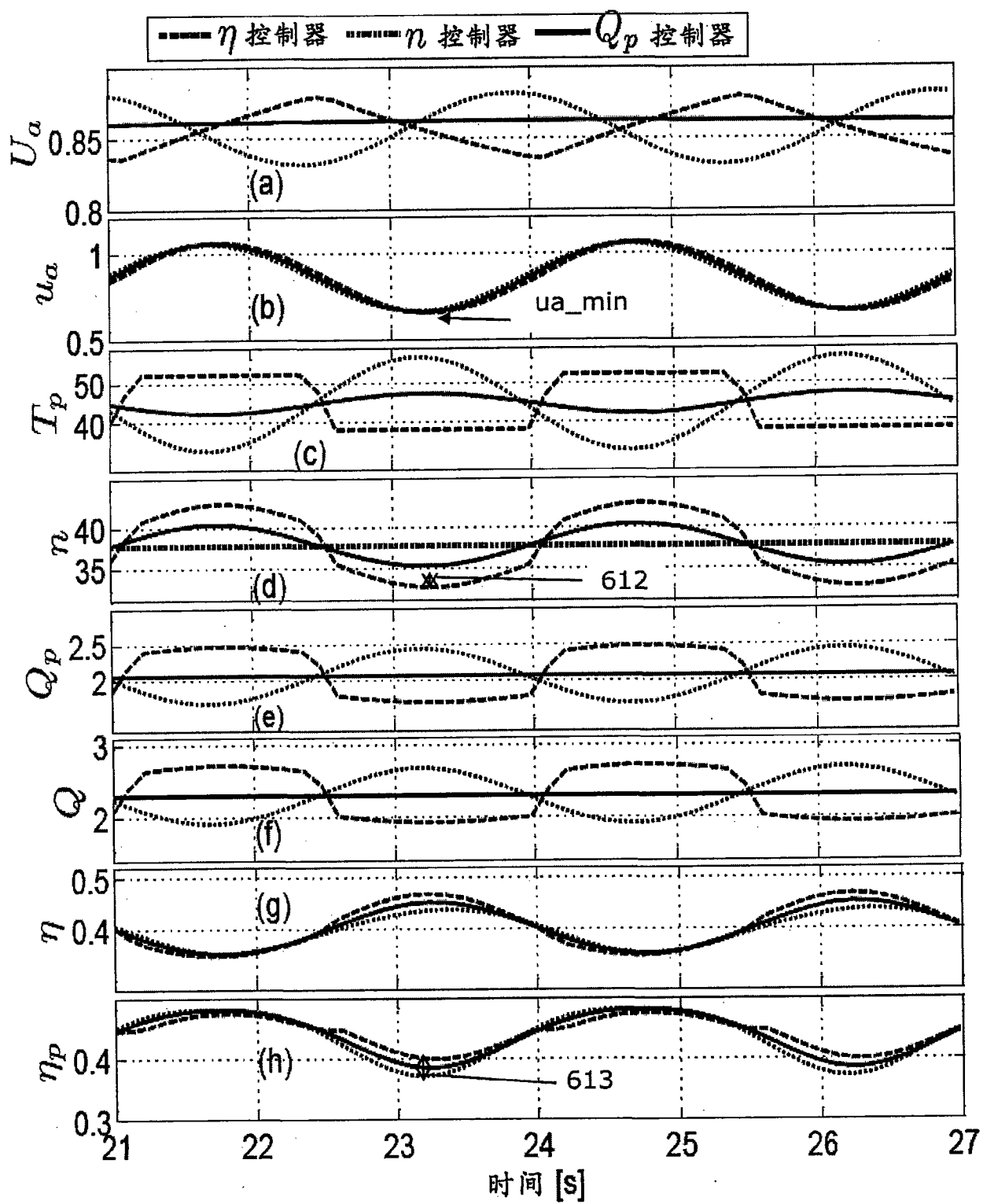


图 5

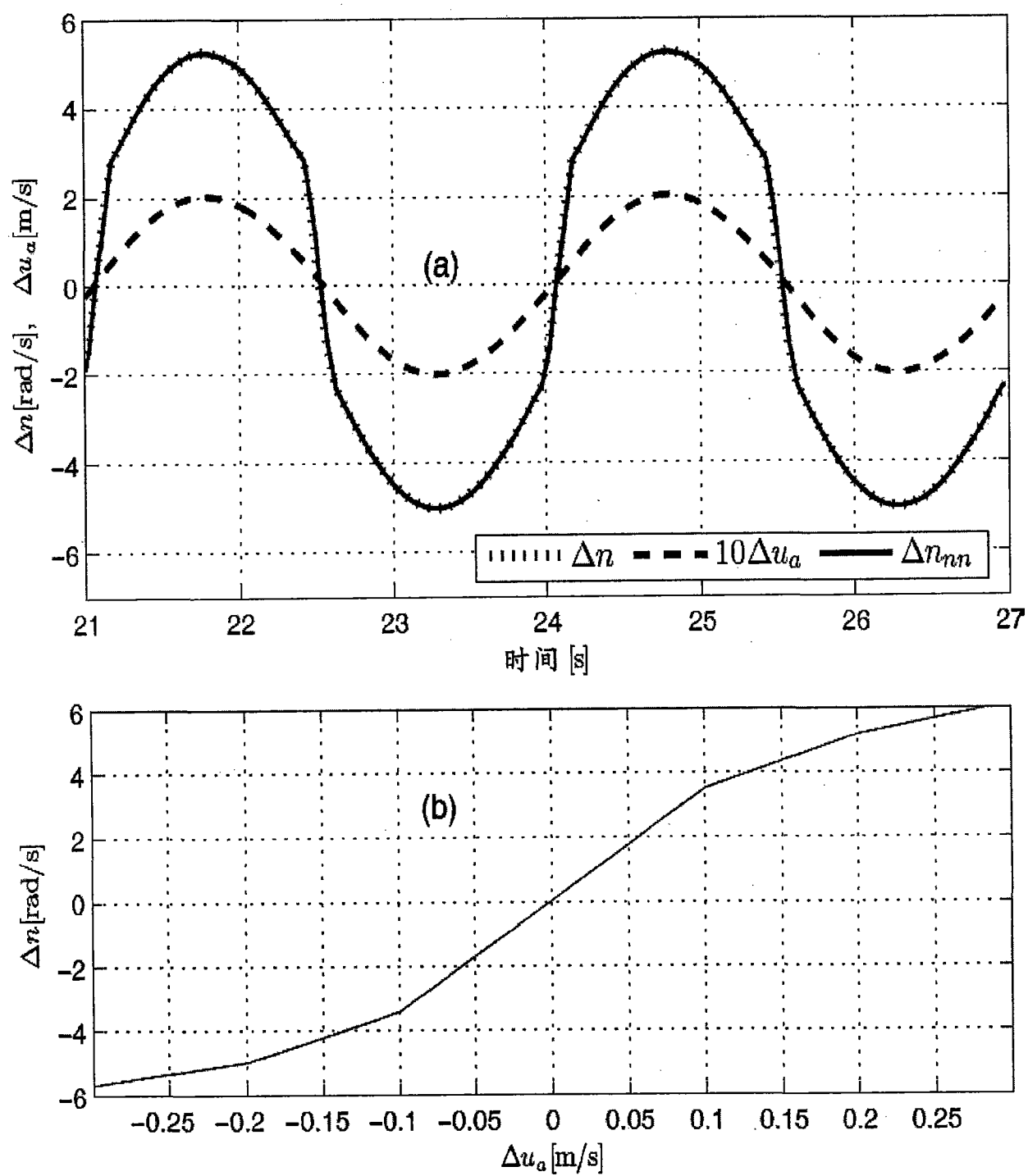


图 6

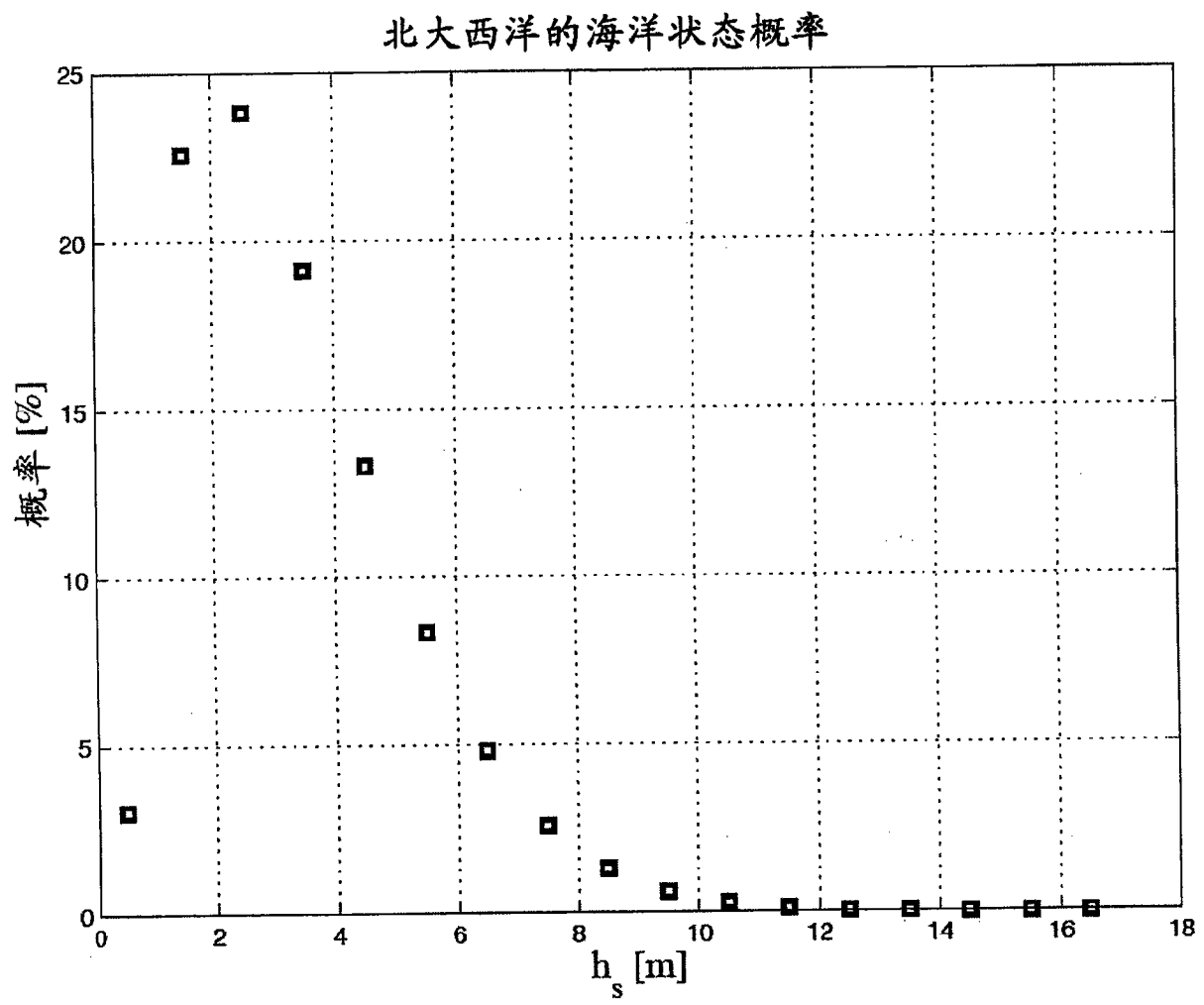


图 7

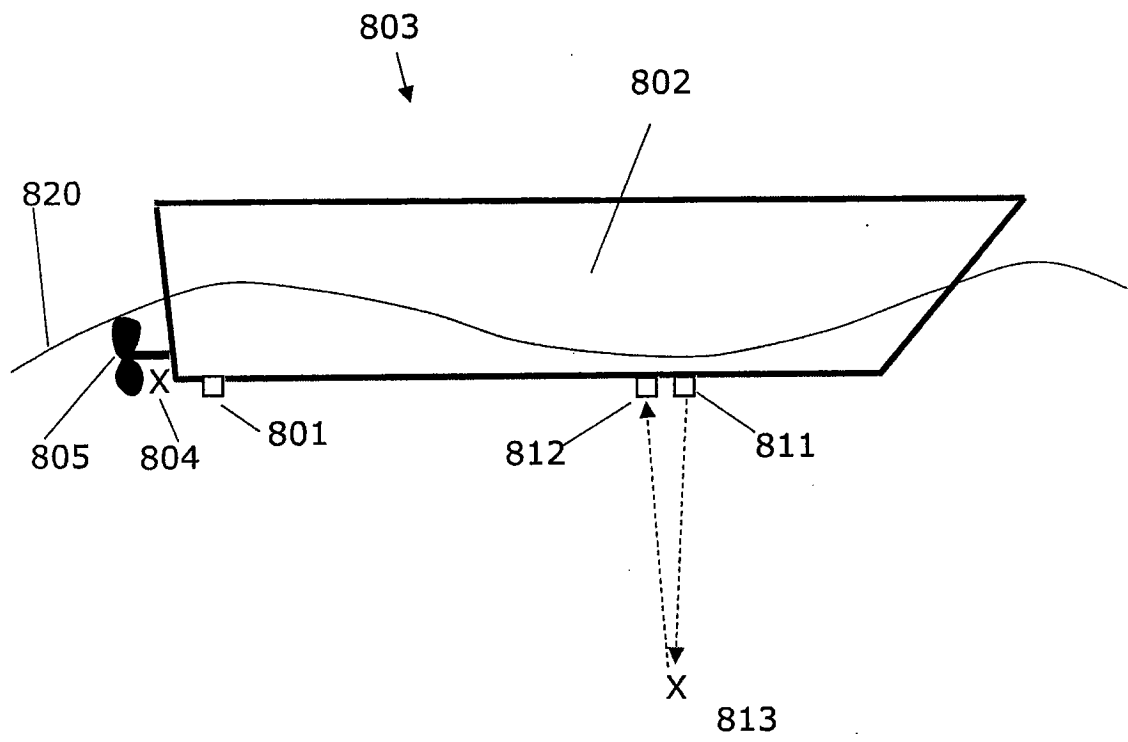


图 8

符号	描述	单位
D	推进器直径	m
I	惯性的轴力矩	kgm^2
J	前进数	-
K_T	地表水推力系数	-
K_Q	地表水转矩系数	-
m	船舶的质量加上增加的质量	kg
n	推进器轴速度	rad/s
$R(u)$	船体阻力	N
Q	轴负载转矩	Nm
Q_p	推进器转矩	Nm
Q_f	摩擦力转矩	Nm
Q_m	马达转矩	Nm
T_p	推进器推力	N
t_d	推力扣除数	-
u	船舶速度	m/s
u_a	前进速度	m/s
u_w	引起的水速度	m/s
U_a	标称前进速度	m/s
u_{w0}	引起的水速度幅度	m/s
w_f	伴流系数	-
h	推进器浸没	m
ζ	波浪幅度	m
η	总效率	%
η_p	推进器效率	%
ρ	水密度	kg/m^3
τ_w	波浪周期	s

表 1

参数	值	描述
D	$0.25m$	推进器直径
Z	4	叶片数
P/D	1	节距比率 P/D
A_e/A_0	0.55	展开的叶片面积比率

表 2

控制器	η	η_p
轴速度	0.3942	0.429
转矩	0.3988	0.435
离线 η 优化	0.4055	0.445

表 3