

文章编号:1009-3486(2002)03-0080-05

系泊系统动力学特性的研究进展^①

杜 度,张纬康

(海军工程大学 船舶与海洋工程系,湖北 武汉 430033)

摘 要:综述了系泊系统动力学特性的研究现状和方法,讨论了所存在的问题及发展趋势。

关键词:系泊系统;非线性振动;分叉;混沌

中图分类号:U674.38

文献标识码:A

系泊系统包括系泊浮体与系留系统两部分。在系留系统的约束下,系泊浮体可以在一定范围内保持自身的位置。系泊系统广泛地应用于海洋生产、抵御台风等需要海洋结构物维持其位置相对固定的场合。由于海洋环境的多变和恶劣,在系泊系统的设计中,如何设计出安全性、经济性两方面都合理的系留系统是一个至关重要的问题。为此,必须正确掌握整个系泊系统的运动特性,在考虑到系统非线性特征的基础上,对它的动力学特性作全面深入的分析。

1 数学模型的建立

按系泊点的配置,系泊系统可以分为单点系泊系统(single point mooring system)与多点系泊系统(包括两点系泊系统)或扩展系泊系统(spread mooring system)。对于它们的研究,通常采用以下几种数学模型来描述其动力学行为。

1.1 Abkowitz 操纵性方程

考查系泊浮体的纵荡、横荡和首摇等3个自由度的运动,文献[1]引入 Abkowitz 整体式操纵性方程以刻画系泊系统的运动:

$$\begin{cases} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} - mrv = X(u, v, r) + T_x + F_{xWIND} + F_{xWAVE} \\ (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + mru - Y\dot{r} = Y(u, v, r) - T_y + F_{yWIND} + F_{yWAVE} \\ -N_{\dot{v}}\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} = N(u, v, r) - M_{zT} + M_{zWIND} + M_{zWAVE} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 表示系泊浮体质量; u 、 v 、 r 分别表示浮体的纵荡速度、横荡速度和首摇角速度; $X(u, v, r)$ 、 $Y(u, v, r)$ 分别表示与速度有关的水动力; $N(u, v, r)$ 为与速度有关的水动力矩; T 表示系缆张力; F_{WIND} 、 F_{WAVE} 、 M_{WIND} 、 M_{WAVE} 分别代表由风及波浪作用引起的力与力矩。

1.2 MMG 操纵性方程

文献[2]提出以 MMG 分离式操纵性方程描述系泊浮体在水平面内的纵荡、横荡、首摇运动:

$$\begin{cases} (m + m_x)\dot{u} - (m + m_y)vr = F_x + T_x \\ (m + m_y)\dot{v} + (m + m_x)ur = F_y + T_y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = M_z + M_{zT} \end{cases} \quad (2)$$

式中: m 、 m_x 、 m_y 分别表示系泊船体的质量、 x 轴及 y 轴方向的附加质量; F_x 、 F_y 、 M_z 分别表示沿 x 轴、 y 轴的外力及沿 z 轴的外力矩; T_x 、 T_y 、 M_{zT} 分别为由系缆张力引起的 x 轴、 y 轴分量及沿 z 轴方向的力矩。

① 收稿日期:2001-10-08;修订日期:2002-01-15
作者简介:杜 度(1973-)男,博士生。

1.3 单自由度运动微分方程

Gottlieb 在研究多点系泊系统时 ,仅考虑系泊船只的纵荡运动 ,提出了如下单自由度数学模型^[3] :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + R(x) = F(\ddot{x}, \dot{x}, t) \tag{3}$$

式中 : m 表示系泊浮体质量 ; c 表示结构阻尼系数 ; $R(x)$ 为非线性回复力 ; $F(\ddot{x}, \dot{x}, t)$ 表示波浪、流的非线性激励力 .

2 单点系泊系统的非线性响应

由于舰船系泊防风以及海上采油单点系泊系统的发展 ,对单点系泊船只在风浪流联合作用下的非线性动力学响应的研究有着重要的实用意义 .

Bernitsas 和 Papoulias 研究了单点系泊系统的稳定性与分叉问题^[14] . 他们以三阶 Abkowitz 方程为数学模型 ,研究了其平衡点的稳定性、静态和动态分叉 . 研究认为 ,在一定条件下 ,平衡点会失去其稳定性 ,此时系泊船将只发生振转运动 (鱼尾状摆动) ;当系泊系统参数变化时 ,他们还观察到鞍结分叉、叉形分叉和 Hopf 分叉现象 ,表明了单点系泊系统动力学行为的复杂性 .

宝田直之助在 MMG 方程的基础上 ,计算了单点系泊船只的系统缆张力 ,并对计算结果作了试验检验^[2] . 小保方准、佐佐木纪雄^[5 6]采用运动稳定性理论讨论了单点系泊船只的振转运动 ,分析了船形参数、风和流的夹角对于船舶动力学行为的影响 ,并运用模型试验验证了理论分析结论 . 黄国梁和藤野正隆^[7]用李亚普诺夫理论与模型试验手段相结合的方法研究了单点系泊船体在风和潮流作用下的鱼尾状摆动特性 . 他们发现 ,对于深水系泊而言 ,存在着风促进鱼尾状摆动而潮流阻止这种运动的倾向 ;当风和潮流的方向一致时 ,鱼尾状摆动最剧烈 .

Kat 和 Wichers^[8]研究了风浪流的联合作用对于单点系泊油轮动力学响应的影响 ,并对油轮的振转运动及系缆张力进行了数值仿真 . 他们发现 ,系缆长度的减少以及风和流夹角的增大都会增加平衡点的稳定性 ,而且船舶在轻载状态下更易发生振转运动 .

Aghamohammadi 和 Thompson^[9]对鱼尾状摆动做了船模试验研究 ,观察到 Hopf 分叉现象 ,并得到它的分叉图 .

佐尾邦久、沼田敏晴、菊野敏^[10 11]对单点系泊系统的运动响应和水动力进行了数值计算 ,并与试验结果作了对比 ,表明他们的计算与试验有着良好的一致性 .

Halliwell 和 Harris 采用模型试验研究了环境及系泊系统参数的变动对于系泊响应的影响^[12] . 他们分析了波长、波高、锚链长度及锚链刚度对于运动响应与系泊力的影响 ,结论如表 1 所示 .

表 1 系泊系统参数对于低频系泊响应的影响

系泊系统参数	响应周期 T	响应幅值 A	系泊力 F
波高 H	H 增大 , T 增大	无影响	H 增大 , F 增大
波浪周期 T_w	无影响	T_w 增大 , A 减小	T_w 增大 , F 减小
锚链长度 L	L 增加 , T 增大	L 增加 , A 增大	L 增加 , F 增大
锚链刚度 E	无影响	无影响	E 增大 , F 增大
船体吃水 W	W 增大 , T 增大	无影响	无影响

Jiang 和 Schellin^[13]运用时域内的数值仿真手段预报了单点系泊油轮的水平面运动 ,提出了一种数值仿真方法 ,并通过算例验证了这种方法的有效性 . 在文献 [14] 中 ,他们对 4 种不同配置形式单点系泊油轮的非线性动力学响应进行了系统的数值研究 ,着重探讨了其中所蕴含的丰富的分叉现象 .

Gerber 和 Engelbrecht^[15]研究了系泊于铰接塔台的大型油轮 ,讨论了它的系泊响应中的次谐波共振解、拟周期解 ,还分析了可能出现的混沌运动 .

此外 ,Ma Rujian 与 Li Guixi 应用非线性频谱分析方法研究了随机海浪中单点系泊系统的非线性响应^[16] . 这种方法不需要线性化 ,能够通过频域手段直接求解系泊系统中的非线性振动问题 .

3 两点及扩展系泊系统的非线性响应

与单点系泊相比, 扩展系泊系统的主要特点在于系泊点的增多和系泊要素配置的复杂多样, 因此, 它具有一些与单点系泊系统不同的特性。

Chung Jin-Sug 和 Bernitsas^[1720]研究了双线拖带/系泊系统的非线性慢变水平运动, 绘出了系统的分叉图, 并分析了动力响应中的分叉与混沌问题。他们的研究表明, 在两点系泊系统中同样存在着静态分叉、动态分叉以及混沌运动等复杂的动力学现象。同时, 他们还非线性稳定性理论应用于两点系泊系统的设计作了初步探讨。

Gottlieb 和 Yim 对非线性多点系泊系统进行了系统的研究。他们的工作主要集中于以下几个方面: ① 对于强几何非线性的多点铰接系泊系统, 基于渐近解稳定性分析, 提出了一种研究方法, 并探讨了其中的分叉与混沌问题^[3]; ② 从理论和试验两方面系统研究了小型海洋系泊系统的非线性动力学问题^[2123], 检验了理论分析的适用性; ③ 研究了复杂大型浮体的系泊响应, 通过分叉研究, 找到了两条通往混沌运动的途径^[24]。

Bernitsas 和 Garza-Rios 用三阶非线性操纵性方程研究了扩展系泊系统的动力学响应, 其主要工作包括: ① 运用李亚普诺夫稳定性理论导出了扩展系泊系统平衡点稳定的充要条件^[25]; ② 在变动系泊系统参数的条件下, 讨论了扩展系泊系统中的稳定性丧失、奇异性及混沌运动等问题^[26 27], 得到了稳定性及分叉边界的解析表达式^[28]; ③ 研究了稳定性分析、分叉与混沌理论在扩展系泊系统设计上的应用, 并给出了具体的设计实例^[25 29]。

Virgin 与 Bishop 采用单自由度模型研究了张力腿平台系泊的纵荡运动^[30 31]。他们的研究表明, 张力腿平台系泊系统存在着复杂的动力学响应, 典型的包括竞争吸引子的存在、次谐波共振以及混沌运动。

伴随着理论研究上的进展, 以非线性动力学理论来分析系泊系统运动响应的方法近来已被应用于海上浮式生产系统及大型油轮系泊的设计使用实践中^[3236]。

4 讨论与结论

微动力系统理论在系泊系统动力学响应研究中的应用, 是近 20 年才逐步深入的。这也是原本只掌握在数学家手中的奇异性、分叉与混沌理论渐次为工程界所接受和使用的必然结果。从描述系泊系统运动的数学模型来看, 它本质上就是一个非线性问题。可以预料的是, 随着微动力系统理论的进一步发展, 必将为系泊系统的动力学特性研究提供更有力的工具。

在当前的研究中, 大多采用上面介绍的 3 种数学模型。这 3 种模型各有其优越性。Abkowitz 方程将系泊船只看成一个整体, 不单独考虑船-桨-舵的相互作用, 理论推导较为便利; MMG 方程物理意义明确, 便于试验资料的积累; 单自由度模型仅仅考虑了船体的纵荡运动, 必然与系泊实际有一定的偏差, 但由于单自由度微动力系统理论已经发展到相当高度, 对于单自由度数学模型的研究来说, 又是一个十分有利的条件。

船舶的实际系泊响应包含六自由度运动, 在小波浪条件下可以假定横摇、纵摇及升沉运动对于系泊响应的影响很小。然而在恶劣的海况下, 这种影响就不得不加以考察了。但限于目前微动力系统理论的发展, 对于六自由度运动微分方程的研究仍是一个相当困难的问题。

在系泊系统动力学特性的研究中, 理论分析、数值仿真以及试验研究都是十分重要的方法。根据研究现状, 理论分析与试验大多还囿于定性研究^[7 9, 13], 而且试验缺乏系统化、系列化的数据积累, 给理论研究的检验与改进带来了不便。

在今后的一段时间, 对于非线性系泊系统的研究, 预计可能在以下几个方面获得进展:

- (1) 考察系泊浮体的六自由度运动, 建立更加真实反映系泊实际的数学模型。
- (2) 发展应用于高维微动力系统研究的理论工具, 并付诸于系泊系统的研究实践。

万方数据

(3) 发展应用于系泊系统动力学响应研究的计算机仿真方法.

(4) 开展系列化试验研究,为系泊系统动力学特性的理论分析提供必要的试验基础.

参考文献:

- [1] Bernitsas M M , Papoulias F A . Stability of single point mooring systems[J]. Applied Ocean Research , 1986 , 8(1) : 49 – 58 .
- [2] 宝田直之助 , 小保方 . 船舶の 留について[J]. 日本造船学会誌 , 1979 , 595 : 20 – 28 .
- [3] Gottlieb O , Yim C S . Nonlinear oscillations , bifurcations and chaos in a multi-point mooring system with a geometric nonlinearity[J]. Applied Ocean Research , 1992 , 14 : 241 – 257 .
- [4] Papoulias F A , Bernitsas M M . Autonomous oscillations , bifurcations , and chaotic response of moored vessels[J]. Journal of Ship Research , 1988 , 33(3) : 220 – 228 .
- [5] 小保方 , 佐佐木纪雄 . 一点 留 の船体振れまわり運 とその安定性について(第 1) [J]. 関西造船協会誌 , 1982 , 186 : 87 – 93 .
- [6] 小保方 , 佐佐木纪雄 . 一点 留 の船体振れまわり運 とその安定性について(第 2) [J]. 関西造船協会誌 , 1983 , 190 : 25 – 33 .
- [7] 黄国梁 , 藤野正隆 . 关于风和潮流作用下单点系泊船体的鱼尾状摆动研究[J]. 海洋工程 , 1987 , 5(3) : 1 – 13 .
- [8] Lin H , Yim C S , Gottlieb O . Experimental investigation of response stability and transition behaviour of a nonli-near ocean structural system[J]. Ocean Engng . , 1998 , 25(4-5) : 323 – 343 .
- [9] Aghamommadi F , Thompson J M T . An experimental study of the large amplitude fish-tailing instabilities of a tanker at a single point mooring[J]. Applied Ocean Research , 1990 , 12(1) : 25 – 33 .
- [10] 佐尾邦久 , 沼田敏晴 , 菊野敏 . 一点 留システムの解析法(その1) [基础方程式とSALMプログラムの運] [J]. 日本造船学会 文集 , 1987 , 162 : 257 – 266 .
- [11] 佐尾邦久 , 沼田敏晴 , 菊野敏 . 一点 留システムの解析法(その2) —周波数領域でのA 答特性[J]. 日本造船学会 文集 , 1988 , 163 : 244 – 251 .
- [12] Halliwell A R , Harris R E . A parametric experimental study of low-frequency motions of single point mooring systems in waves[J]. Applied Ocean Research , 1988 , 10(2) : 74 – 86 .
- [13] Jiang T , Schellin T E . Motion prediction of a single-point moored tanker subjected to current , wind and waves[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering , 1990 , 112(2) : 83 – 90 .
- [14] Jiang T , Schellin T E , Sharma S D . Horizontal motions of an SPM tanker under alternative mooring configurations[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering , 1995 , 117(4) : 223 – 231 .
- [15] Gerber M , Engelbrecht L . The bilinear oscillator : the response of an articulated mooring tower driven by irregular seas[J]. Ocean Engng . , 1993 , 20(2) : 113 – 133 .
- [16] Ma R J , Li G X . Surge and pitch coupled nonlinear response of a single point mooring system[A]. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering[C]. Copenhagen : ASME , 1995 .
- [17] Chung J S , Bernitsas M M . Dynamics of two-line ship towing/mooring systems : bifurcations , singularities of stability boundaries , chaos[J]. Journal of Ship Research , 1992 , 36(2) : 123 – 140 .
- [18] Bernitsas M M , Chung J S . Nonlinear stability and simulation of two-line ship towing and mooring[J]. Applied Ocean Research , 1990 , 12(2) : 77 – 92 .
- [19] Chung J S . Stability based design of two-point mooring systems with hydrodynamic memory[A]. Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering[C]. Copenhagen : ASME , 1995 .
- [20] Chung J S , Bernitsas M M . Hydrodynamic memory effect on stability , bifurcation , and chaos of two-point mooring systems[J]. Journal of Ship Research , 1997 , 41(1) : 26 – 44 .
- [21] Gottlieb O , Yim C S . Nonlinear dynamics of a coupled surge-heave small body ocean mooring system[J]. Ocean Engng . , 1997 , 24(5) : 479 – 495 .
- [22] Gottlieb O , Feldman M . Application of a Hilbert transform-based algorithm for parameter estimation of a nonli-near ocean system roll model[J]. Journal of OMAE , 1997 , 119 : 239 – 243 .

- [23] Gottlieb O. Bifurcations of a nonlinear small-body-ocean-mooring system excited by finite amplitude waves[J]. Journal of OMAE , 1997 ,119 :224 – 238 .
- [24] Yim C S , Lin H , Gottlieb O. Organized transitions and routs to chaos in a moored ocean structural system[A]. Proceedings of the ASME 15th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering[C]. Florence :ASME ,1996 .
- [25] Bernitsas M M , Garza-Rios L O. Mooring systems design based on analytical expressions of catastrophes of slow motion dynamics [A]. Proceedings of the ASME 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering[C]. Copenhagen : ASME ,1995 .
- [26] Garza-Rios L O , Bernitsas M M. Analytical expressions of the bifurcation boundaries for symmetric spread mooring systems[J]. Applied Ocean Research , 1995 , 17 :325 – 341 .
- [27] Bernitsas M M , Garza-Rios L O. Effect of mooring line arrangement on the dynamics of spread mooring systems[J]. Journal of OMAE , 1996 ,118 (1) :7 – 20 .
- [28] Garza-Rios L O , Bernitsas M M. Analytical expressions of the stability and bifurcation boundaries for general spread mooring systems[J]. Journal of Ship Research , 1996 ,40 (4) :337 – 350 .
- [29] Bernitsas M M , Garza-Rios L O. Mooring system design based on analytical expresions of catastrophes of slow motion dynamics [J]. Journal of OMAE , 1997 ,119 :86 – 95 .
- [30] Bishop S R , Virgin L N. The onset of chaotic motions of a moored semi-submersible[J]. Journal of OMAE ,1988 ,110 :205 – 209 .
- [31] Vergin L N , Bishop S R. Complex dynamics and chaotic responses in the time domain simulations of a floating structure[J]. Ocean Engng. , 1988 ,15 (1) :71 – 90 .
- [32] Brinati L H , Nishimoto K , Fucatu H C , *et al* . The effects of mooring line damping and wave drift damping on moored tanker dynamics[J]. Offshore Engineering , 1999 (1) :47 – 62 .
- [33] Garza-Rios L O , Bernitsas M M , Nishimoto K. Slow motion dynamics of DICAS mooring systems under steady current , wind and steady drift excitation[J]. Offshore Engineering , 1999 (1) :47 – 62 .
- [34] Wichers J E W. Progress in computer simulation of SPM moored vessels[A]. OTC5175 [C]. Houston :ASME ,1986 .
- [35] Hamilton J , Mercier A J. Design and hydrodynamic performance analyses of a large simple barge[A]. Proceedings of the ASME 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering[C]. Copenhagen :ASME ,1995 .
- [36] Garza-Rios L O , Bernitsas M M , Nishimoto K. Preliminary design of a DICAS mooring system for the Brazilian CAMPOS basin [A]. Proceedings of the ASME 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering[C]. Yokohama : ASME ,1997 .

Development of research on dynamics characteristics of mooring systems

DU Du , ZHANG Wei-kang

(Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng. , Naval Univ. of Engineering , Wuhan 430033 , China)

Abstract : The recent research situation and research methods for dynamics characteristics of mooring systems are summarized. The recent problems and the tendency of development of these nonlinear dynamical systems are presented.

Key words : mooring system ; nonlinear oscillations ; bifurcations ; chaos