



船舶双缸汽轮推进系统人字齿轮动力学特性研究

徐江海¹, 焦春晓¹, 邹冬林¹, 塔娜¹, 饶柱石^{1,2*}

1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

* E-mail: zsrhao@sjtu.edu.cn

doi: 10.1360/SST-2021-0386

动力推进系统是舰船的心脏, 其运行稳定性和可靠性直接关系到舰船的战斗力和生命力和高效机动航行的能力. 为适应不同航行工况和高机动性要求, 在较大转速范围内均能保证系统稳定运行并提供所需推力是舰船动力推进系统的一个重要特征, 也是系统设计时的一个关键技术指标. 如图1(a)所示, 双缸汽轮(double-cylinder turbines, DCT)推进系统以其功率密度大、寿命长、结构紧凑、工作可靠、调速方便等优点, 被多国作为大型、超大型舰船动力主机的主要选择^[1].

当舰船低速航行时, 桨-轴系统的动力主要来自高压缸, 低压缸因蒸汽做功能力不足而动力较弱, 低压缸转子处于随动状态; 当舰船进入加速阶段, 在减速器的带动下低压缸转子将处于随动耗功和主动做功的过渡状态; 当舰船高速巡航时, 低压缸的动力不断提高并逐渐接近高压缸, 此时高、低压双缸便通过减速齿轮共同驱动桨-轴系统高速运转. 实船实验表明, 非对称的动力输入对于系统的稳定性有着至关重要的影响, 轮齿碰撞、噪声已成为制约该类推进系统高效、可靠运行的关键技术瓶颈. 一方面, 随着双缸之间载荷比的提升, 低压缸功率传递链上的齿轮副将由随动耗功向主动做功转变, 失稳现象随之发生; 另一方面, 对于复杂的推进系统, 多种非线性因素的耦合, 使系统运动状态的可预测性降低, 正齿啮合、脱啮、背齿啮合状态交替出现.

目前针对齿轮系统动力学的研究通常集中于一般的齿轮传动结构, 而对于非对称载荷输入下的人字齿轮及其非线性失稳机理的研究很少出现. 因此, 本研究聚焦双缸推进系统失稳的工程实际, 基于齿轮传动原理和非牛顿流体的弹流润滑理论(electrohydrodynamic lubrication, EHL)^[2], 考虑非线性齿面摩擦、非线性齿侧间隙^[3]、时变啮合刚度^[4,5]等因素的影响, 建立二级人字齿轮系统纯扭转动力学模型(如图1(b)所示), 进而求解非对称载荷输入下, 系统的失稳机理以及系统动态特性随参数的演化规律.

通过理论建模和数值仿真研究了非对称输入载荷对系统动态特性的影响, 并针对性地提出了三个评价指标: 稳定性指标LE、振幅指标 A_m 以及碰撞时间指标 ζ , 如图1(c)所示. 结果表明, 非对称输入的载荷比和载荷值对系统的综合影响, 可以分为三个控制区域: (1) 在控制区域 I, 低载端的齿轮副以背啮为主, 运动过程呈现明显的周期性, 且振幅较小, 振动平缓; (2) 在控制区域 II, 系统运动状态发生突变, 呈现明显的混沌特征, 且振动位移远大于正常值, 但由于低载荷侧载荷的提升, 背啮时间比例相对控制区域 I 而言有所降低; (3) 在控制区域 III, 各齿轮副振动的Lyapunov指数、振幅和碰撞情况再次发生突变, 且不再随着控制参数的增大而发生明显变化. 上述研究表明, 随着双输入之间载荷比和载荷值的变化, 系统的运动状态存

英文全文见: Xu J H, Jiao C X, Zou D L, et al. Study on the dynamic behavior of herringbone gear structure of marine propulsion system powered by double-cylinder turbines. *Sci China Tech Sci*, 2022, 65: 611–630, <https://doi.org/10.1007/s11431-021-1916-x>

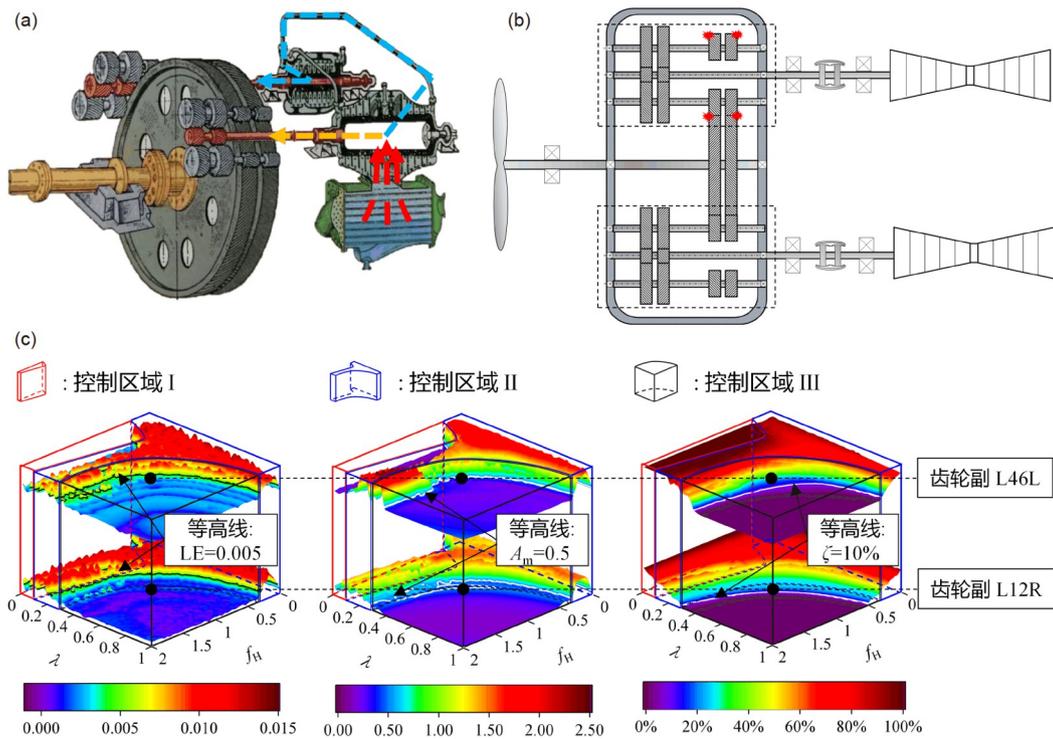


图 1 (网络版彩图) (a) 双缸推进系统物理模型; (b) 系统动力学模型简图; (c) 三个评价指标的计算结果

Figure 1 (Color online) (a) Physical model of DCT propulsion system; (b) schematic diagram of the dynamic model; (c) results of three evaluations indexes.

在明显的边界, 在进行系统动力参数的设计、优化的过程中, 在条件允许的前提下, 有必要在控制区

域 I 或 III 中选取合适的匹配值, 使系统避开失稳区间, 保障运行的安全可靠。

参考文献

- 1 Xu J H, Jiao C X, Zou D L, et al. Dynamic evolution laws of the di-so helical gear system with unsymmetrical load inputs. *J Vib Eng Technol*, 2021, 9: 1317–1334
- 2 Xu H, Kahraman A, Anderson N E, et al. Prediction of mechanical efficiency of parallel-axis gear pairs. *J Mech Des*, 2007, 129: 58
- 3 Margielewicz J, Gaska D, Litak G. Modelling of the gear backlash. *Nonlinear Dyn*, 2019, 97: 355–368
- 4 Wan Z G, Cao H R, Zi Y Y, et al. Mesh stiffness calculation using an accumulated integral potential energy method and dynamic analysis of helical gears. *Mech Mach Theor*, 2015, 92: 447–463
- 5 Chen Z G, Zhai W M, Shao Y M, et al. Mesh stiffness evaluation of an internal spur gear pair with tooth profile shift. *Sci China Tech Sci*, 2016, 59: 1328–1339