

# 基于模糊 PID 的海洋立管疲劳试验装置 控制系统设计

冯鑫, 何新霞

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:** 海洋立管作为海洋油气开发的关键设备, 在运行期间面临疲劳失效的风险, 需要对立管进行疲劳试验; 针对海洋立管共振弯曲疲劳试验法, 提出基于 S7-300 PLC 实现海洋立管共振弯曲疲劳试验装置控制系统的设计思想; 采用黄金分割法, 寻找确定试件共振频率点; 同时, 为保障系统能够在该共振频率点稳定运行, 采用 S7-300 PLC 作为核心控制器, 结合参数自调节模糊 PID 控制算法, 设计完成疲劳试验装置中转速模糊 PID 控制器, 实现对系统转速的精确控制, 使得海洋立管疲劳试验装置控制系统在具有 PLC 控制灵活、可靠性高等特点的同时, 大大提高了其自动化程度。

**关键词:** 立管; 疲劳试验装置; 共振弯曲; 黄金分割法; 模糊控制; PLC

## Design of Marine Riser Fatigue Testing Machine Control System Based on Fuzzy PID

Feng Xin, He Xinxia

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China),  
Qingdao 266580, China)

**Abstract:** During operation marine riser is susceptible to fatigue failure, so riser fatigue tests should be carried out. The design concept of realizing marine riser resonant bending fatigue testing machine control system by using S7-300 are fully described. Golden section method is used to find the resonance frequencies of the specimen. Meanwhile, in order to make the system running at resonant frequencies, the S7-300 PLC is taken as the core controller and combined with the parameters self-adjusting fuzzy PID algorithm to design Fuzzy PID controller. It is not only own the control characteristics of flexible and reliable of PLC, but also greatly improved the automation level of the marine riser testing machine control system.

**Keywords:** riser; fatigue testing machine; resonant bending; golden section; fuzzy control; PLC

## 0 引言

立管是海洋油气开发的关键装备, 在运行期间, 会因波浪、海流等因素的作用, 在立管两侧形成脱离频率与立管固有频率相同的漩涡<sup>[1]</sup>, 引起立管的强烈震动, 使得立管面临疲劳失效的风险。

为了精确地预报和提高立管疲劳寿命, 需要对立管进行疲劳试验<sup>[2]</sup>。目前, 国内外立管结构疲劳试验方法主要包括四点弯曲疲劳试验法、旋转弯曲疲劳试验法和共振弯曲疲劳试验法。本文选用的共振弯曲疲劳试验法优点在于试验频率高, 可大大减少试验时间, 在试验时只需控制立管试件在其固有频率振动。鉴于此, 本文以西门子 S7-300 PLC 为核心控制器<sup>[3]</sup>, 变频器和异步电机为执行机构建立疲劳试验平台, 首先采用黄金分割法搜寻立管共振频率, 然后利用参数自调节模糊 PID 控制算法, 实现对电机转速的精确控制, 完成对试验机控制系统的高效、精确控制。

收稿日期:2015-07-27; 修回日期:2015-09-17。

基金项目:国家科技重大专项课题(2011ZX05026-001-05)。

作者简介:冯鑫(1991-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动方向的研究。

何新霞(1966-),女,河南滑县人,副教授,硕士,主要从事油气测控技术、电力传动及控制系统方向的研究。

## 1 共振弯曲疲劳试验原理

图 1 为海洋立管共振弯曲疲劳试验机控制结构示意图。由计算机、PLC、变频器、连有旋转编码器的异步电机、偏心质量块、动载室、静载室和支撑座构成。PLC 为核心控制器, 电动机为动力源, 带动偏心质量块旋转, 动载室将偏心质量块引起的离心力传递至立管试件, 通过不断地改变电动机的转速, 测得各个转速对应的应变值, 认为应变值最大对应的频率为立管试件共振频率, 并控制电机在此共振频率点恒速稳定运行<sup>[4]</sup>。

在确定立管试件时, 需先进行模态分析, 确保试件的一阶固有频率在 20~40 Hz。若试件固有频率过低, 试验时间将会延长, 失去了该方法的优点; 若立管试件固有频率过高, 超过 50 Hz, 由于电机与试件之间没有加、减速装置, 立管共振频率即为电机转动频率, 这时对电机的转速要求就超过了 3 000 r/min, 异步电机型号难以确定。

## 2 黄金分割法寻优

由于立管试件结构和材料的不同, 每根立管的固有频率也是不同的, 因此在试验时都需要先确定试件的固有频率, 为疲劳试验装置提供一个明确的控制目标。

黄金分割法是控制寻优的典型算法, 适用于区间  $[a, b]$  上的一维单谷函数求极小值问题, 该方法以寻优速度快, 算法

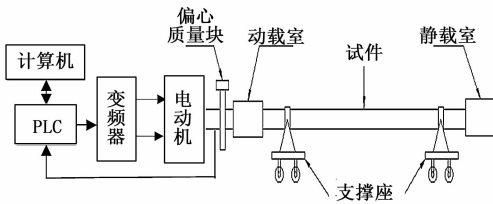


图 1 共振疲劳试验机控制结构图

简单，效果明显著称。其基本原理是：按照“去劣存优”原则、对称原则、以及等比收缩原则来逐步收缩搜索区间<sup>[5-6]</sup>。本文将其改进，运用黄金分割法寻找函数极大值，用以判断海洋立管的共振频率点。具体流程图如图 2 所示。

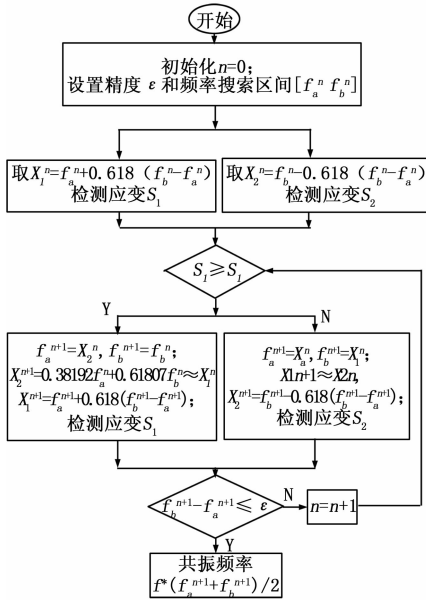


图 2 黄金分割法控制流程图

初始频率分割区间为  $[f_a^0, f_b^0]$ ，根据黄金分割法基本思想，在该区间上取两个点  $X_1^0$  和  $X_2^0$ ，使满足：

$$X_1^0 = f_a^0 + 0.618l_0$$

$$X_2^0 = f_a^0 + 0.382l_0 \quad \text{其中 } l_0 = f_b^0 - f_a^0$$

测量这两点的应变值  $S_1$  和  $S_2$ ，通过比较应变值  $S_1$  和  $S_2$  的大小确定出新的频率区间。如此反复进行，每次搜索后区间将按照黄金比例 0.618 来缩小，而应变最大值都会包含在新区

间内。这样不断的优化，直到满足预先设置好的精度，选择最后一个频率区间的中点作为最优值，即为立管的共振频率点。

### 3 疲劳试验装置模糊 PID 控制的 PLC 实现

立管试件固有频率确定后，需控制试验装置带动试件在该频率点稳定振动。由于交流电机是一个非线性时变的控制对象，很难获得准确的数学模型，常规闭环 PID 控制不能获得极佳的控制效果。

为此，本设计选用型号为 CPU314C-2DP 的西门子 PLC 为核心控制器，与模糊 PID 控制算法相结合，采用直接查表方式（即先通过 MATLAB 进行模糊 PID 控制器离线设计，获得模糊控制查询表，再利用 PLC 在线查询的方式）来实现参数自调节模糊 PID 控制器的设计。

#### 3.1 模糊 PID 控制器设计

转速参数自调节模糊 PID 控制器结构图如图 3 所示，选定的模糊控制器采用二维模糊控制器<sup>[7]</sup>，输入变量均为转速误差  $e$  和转速误差的变化率  $ec$ ，输出变量分别为 PID 控制器比例系数  $Kp$  的调节量  $\Delta Kp$ 、积分系数  $Ki$  的调节量  $\Delta Ki$  和微分系数  $Kd$  的调节量  $\Delta Kd$ 。与 PID 各参数的初值相加，得到一个控制变频器输出控制量，实现对电机的调速。

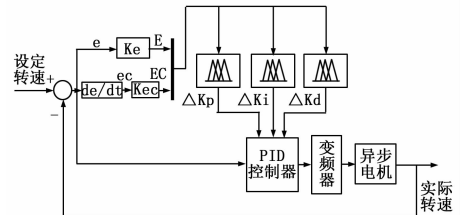


图 3 参数自调节模糊 PID 控制器结构图

设定模糊语言变量  $E$  和  $EC$  的模糊论域均为  $[-6, 6]$ ，输出模糊语言变量  $dKp$ 、 $dKi$  和  $dKd$  的模糊论域均为  $[-10, 10]$ 。考虑到实现的快速性，模糊语言的子集  $E$ 、 $EC$ 、 $dKp$ 、 $dKi$  和  $dKd$  均为 {负大 (NP)，负中 (NM)，负小 (NS)，零 (ZO)，正小 (PS)，正中 (PM)，正大 (PB)}。根据控制要求，按照上述模糊变量论域量化等级，建立模糊控制规则表<sup>[8-9]</sup>，如表 1 所示。进而可得到模糊控制查询表，如表 2 所示。

利用 MATLAB 建立系统仿真模型，常规 PID 控制与参数自调节模糊 PID 控制进行对比仿真研究。电机转速设定为 1 000 r/min， $t=2.5$  s 系统受到扰动。转速仿真波形如图 4 所示。

表 1 模糊控制规则表

$dKp/dKi/dKd$		EC						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E	NB	PB/ZO/PB	PB/ZO/PB	PM/ZO/PM	PM/ZO/PM	PS/ZO/PS	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO
	NM	PB/ZO/PB	PB/ZO/PB	PM/ZO/PM	PS/ZO/PS	PS/ZO/PS	ZO/ZO/ZO	NS/ZO/NS
	NS	PM/NB/PM	PM/MN/PM	PM/MS/PS	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/NS	NS/PS/NM
	ZO	PM/NM/PM	PM/NM/PS	PS/NM/ZO	ZO/NS/ZO	NS/PS/NS	NM/PM/NM	NM/PM/NB
	PS	PB/NM/PS	PB/NS/ZO	PM/ZO/ZO	PM/PS/NS	PM/PS/NM	PM/PM/NM	PM/PB/NB
	PM	PB/ZO/ZO	PM/ZO/ZO	PS/ZO/NS	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NB	NS/ZO/NB
	PB	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/NS	NM/ZO/NM	NM/ZO/NM	NM/ZO/NB	NB/ZO/NB	NB/ZO/NB

表 2 模糊控制查询表

$dKp/dKi/dKd$		EC						
		-6	-4	-2	0	2	4	6
E	-6	9.2/0/9.2	9.2/0/9.2	6.6/0/6.6	6.6/0/6.6	3.4/0/3.4	0/0/0	0/0/0
	-4	9.2/0/9.2	9.2/0/9.2	6.6/0/6.6	3.4/0/3.4	3.4/0/3.4	0/0/0	-3.4/0/-3.4
	-2	6.6/-9.2/6.6	6.6/-6.6/7	6.6/-3.4/3	3.4/-3.4/0	0/0/0	-3.4/3.4/-3	-3.4/3.4/-6.6
	0	6.6/-6.6/6.6	6.6/-6.6/3	3.4/-3.4/0	0/-6.6/0	-3.4/3.4/-3	-6.6/6.6/-7	-6.6/6.6/-9.2
	2	9.2/-6.6/3.4	9.2/-3.4/0	6.6/0/0	6.6/3.4/-3	6.6/3.4/-7	6.6/6.6/-7	6.6/9.2/-9.2
	4	9.2/0/0	6.6/0/0	3.4/0/-3.4	0/0/-6.6	0/0/-6.6	0/0/-9.2	-3.4/0/-9.2
	6	0/0/0	0/0/-3.4	-6.6/0/-6.6	-6.6/0/-7	-6.6/0/-9.2	-9.2/0/-9	-9.2/0/-9.2

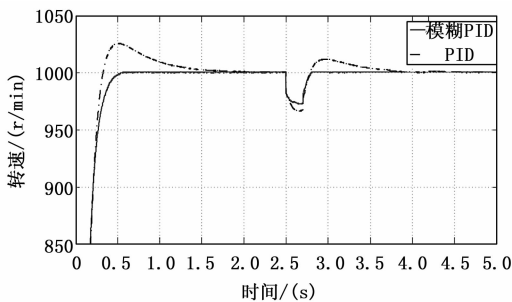


图 4 系统仿真模型图

结果表明, 采用参数自调节模糊 PID 控制比常规 PID 控制超调小, 到达稳态时间短, 且鲁棒性得到明显增强。

### 3.2 PLC 程序设计

在整个控制系统设计中, PLC 模糊控制器程序的设计是整个系统的核心。其控制程序流程图如图 5 所示。

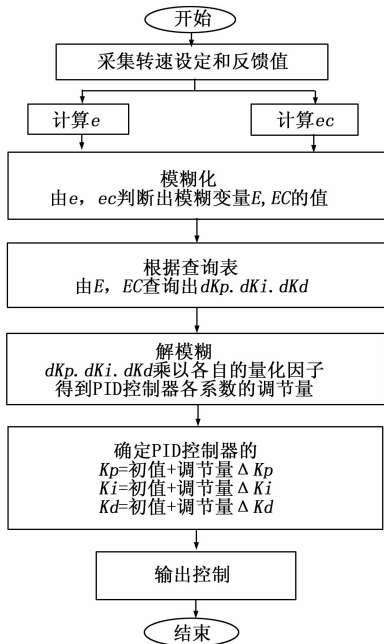


图 5 模糊控制器程序设计流程图

可以看出模糊控制器程序设计<sup>[10]</sup>包含以下 5 个步骤: ①编码器测量部件将转速反馈值和设定值传给 PLC, PLC 定时的计算出误差  $e$  和误差变化率  $ec$ 。②将误差  $e$  和误差变化

率  $ec$  分段模糊化为 E 和 EC。③根据 MATLAB 仿真得到输出模糊语言变量  $dKp$ 、 $dKi$  和  $dKd$  的查询表, 建立共享数据块存储模糊数据。④由 E 和 EC 查询共享数据块中的数据, 确定当前的输出模糊语言变量  $dKp$ 、 $dKi$  和  $dKd$  的值, 并乘以各自的量化因子得到 PID 控制器各参数的调节量。⑤最后通过西门子 S7-300 的 PID 控制模块输出控制值, 实现对疲劳试验装置的控制。

### 3.3 试验结果与分析

调试过程中, PLC 分别采用常规 PID 控制算法和模糊 PID 控制算法对电机转速进行对比控制。模糊控制器的误差量化因子  $Ke=6/1410$ , 误差变化率量化因子  $Kec=6/30$ , 输出的比例量化因子  $KU1=0.03$ , 输出的积分量化因子  $KU2=50$ , 输出的微分量化因子  $KU3=10$ ; PID 控制器的各初始值分别为  $p=0.7$ ,  $i=2000$ ,  $d=200$ 。利用 WINCC 监控, 其试验结果如图 6 所示, 其中图 (a) 采用了常规 PID 控制算法, 图 (b) 采用了模糊 PID 控制算法。

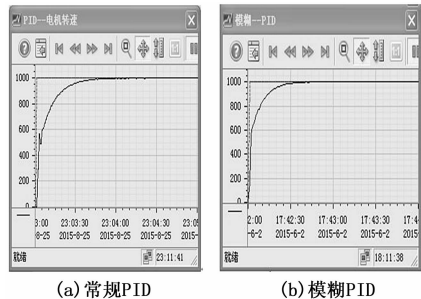


图 6 WINCC 监控图

从图 6 可以看出: (1) 采用常规 PID 控制算法的电机需要 1 分钟的时间到达设定转速; 而在模糊 PID 控制下的电机只需 40 多秒就能达到设定值, 响应速度明显比常规 PID 控制的快。(2) 在电机刚启动时, 转速直线上升, 这个过程模糊 PID 控制算法和常规 PID 控制算法的控制效果基本一致。(3) 在 4~10 s 时, 采用常规 PID 控制的电机, 转速存在微弱的波动; 而模糊 PID 算法控制下的电机不存在这种现象。(4) 在 10 s 之后的时间段, 采用模糊 PID 控制的电机转速上升速度明显比常规 PID 控制的快。综其原因在于模糊 PID 控制的系统可以在线实时修改参数, 根据现场需要对 PID 各参数进行微调, 使得系统控制更加灵活高效, 更好地满足了共振弯曲疲劳试验机稳定, 快速的性能要求。

(下转第 125 页)

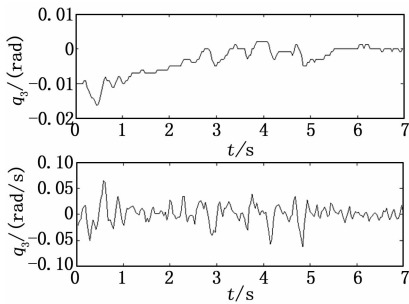


图 7 俯仰角和俯仰角速度

由图 7 可知, 独轮车在初始时刻具有一定的俯仰偏角, 但在控制器的调节作用下能够快速地恢复至平衡点位置附近, 并保持稳定。

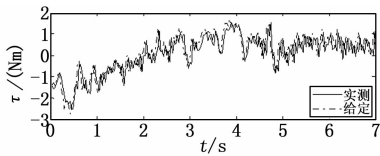


图 8 电机的给定力矩和实测力矩

从图 8 可以看出, 独轮车测控系统测得的电机力矩与实际给定的力矩基本吻合, 一方面表明该硬件控制系统可以有效地跟踪给定的驱动力矩, 另一方面进一步证明控制器 (17) 给定的驱动力矩可以实现独轮车俯仰平衡运动。

## 5 结束语

1) 基于多体力学原理建立了一种独轮车机器人简化的俯仰平衡运动的动力学模型, 有效地揭示了独轮车机器人的行走

轮的运动激励与车体俯仰角的动力学耦合关系。

2) 以力学模型为基础, 采用部分反馈线性化的控制方法, 选择车体的俯仰角和行走轮的转动角为输出, 可以设计出俯仰平衡运动的控制器。

3) 数值仿真控制与物理样机实验验证了所建立力学模型和控制器设计的有效性。

## 参考文献:

- [1] 庄 未, 黄 渭, 黄用华, 等. 独轮车机器人的欠驱动力学特性与平衡控制策略 [J]. 机械设计, 2013, 30 (6): 18-23.
- [2] Schoonwinkel A. Design and test of a computer stabilized unicycle [D]. Stanford University, 1987.
- [3] Vos D W. Nonlinear control of an autonomous unicycle robot: practical issues [D]. MIT, Department of Aeronautics and Astronautics, 1992.
- [4] Zaiquan Sheng, Kazuo Yamafuji. Postural stability of a human riding a unicycle and its emulation by a robot [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13: 709-720.
- [5] 丛秋波. 村田制造所: “村田顽童” 携手 “村田婉童” 展示高新技术 [J]. 电子设计技术, 2008 (12): 124-125.
- [6] 朱晓庆, 阮晓钢, 魏若岩. 基于惯性飞轮的独轮自平衡机器人侧向动力学分析 [J]. 应用力学学报, 2013, 30 (3): 395-400.
- [7] 阮晓钢, 胡敬敏, 王启源, 等. 一种独轮车机器人的滑模控制 [J]. 控制工程, 2011, 18 (1): 128-132.
- [8] 朱晓庆, 阮晓钢, 魏若岩, 等. 独轮机器人侧向通道建模与控制 [J]. 北京工业大学学报, 2013, 39 (10): 1474-1480.
- [9] 王启源, 阮晓钢. 独轮自平衡机器人双闭环非线性 PID 控制 [J]. 控制与决策, 2013, 27 (04): 593-597.

(上接第 121 页)

## 4 结论

本文结合海洋立管共振弯曲疲劳试验法, 采用黄金分割法快速寻找到试件共振频率点, 有效的提高了试验装置的效率。同时, 将模糊控制与 PLC 技术相结合, 采用 MATLAB 离线设计和 PLC 在线查询的方法实现模糊 PID 控制器的设计, 使得立管共振弯曲疲劳试验装置控制系统既具有了 PLC 控制灵活、可靠、抗干扰能力强等特点, 又大大提高系统自动化程度。

## 参考文献:

- [1] 胡 勇, 代峰燕, 周灿丰, 等. 海洋深水立管涡激振动实验研究的发展状况 [J]. 北京石油化工学院学报, 2014 (2): 50-55.
- [2] 刘秀全, 陈国明, 畅元江, 等. 海洋油气立管疲劳试验方法 [A]. 第十三届中国科协年会第 13 分会场—海洋工程装备发展论坛论文集 [C]. 2011.
- [3] 瞿 枫, 徐中宏, 孙 冀. 基于西门子 S7-300 PLC 的模糊控制实

现 [J]. 南京师范大学学报. 2007, 7 (4): 23-27.

- [4] 孙友义, 鞠少栋, 蒋世全, 等. 超深水钻井隔水管—井口系统涡激振动疲劳分析 [J]. 石油学报, 2011, 32 (6): 1050-1054.
- [5] 宋永东, 张玉强, 张建华. 黄金分割法用于 PID 参数优化整定技术的研究 [J]. 西安工程科技学院学报, 2007, 21 (2): 262-266.
- [6] 韩 伟, 王宏华, 贾艳刚. 改进黄金分割法在光伏发电 MPPT 中的应用 [J]. 电源技术, 2014 (2): 282-285.
- [7] 杨 璐, 雷菊阳. 基于 MATLAB 的参数自整定模糊 PID 控制器的两种设计方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1212-1214.
- [8] 李敬兆, 张崇巍. 基于 PLC 直接查表方式实现的模糊控制器研究 [J]. 电气应用, 2001 (9): 18-21.
- [9] 朱 斌, 罗益民, 袁启昌, 等. 基于模糊 PID 控制的循环水自动加药与监测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (6): 796-798.
- [10] 李 剑, 刘渭苗, 徐长安, 等. 模糊 PID 方法用于液压比例阀的高精度定位控制 [J]. 重型机械, 2012, (1): 14-16.