

文章编号: 2095-2163(2022)01-0172-04

中图分类号: TP273

文献标志码: A

基于PID的高速气浮电主轴转子动态控制算法

陈运胜, 孙令真

(广州华立科技职业学院, 广州 511325)

摘要: 为了提高高速气浮电主轴转子动态控制能力,降低喘振,提出基于PID的高速气浮电主轴转子动态控制算法。采用姿态传感器感知的方法,实现对高速气浮电主轴转子物理参数采集,以气动载荷、离心力载荷以及叶片转动的气动力分量等为约束参数;利用姿态误差补偿和喘振自适应控制的方法,进行高速气浮电主轴转子的输出稳定性参数调节;通过PID变结构控制的方法,建立气浮电主轴转子的动力传动系统扭振补偿控制模型,在动力传动系统减振过程中进行姿态及位姿参数的稳定性调节和实时补偿控制,提高高速气浮电主轴转子动态参数调节能力和可靠性控制能力。仿真结果表明,采用该方法进行高速气浮电主轴转子动态控制,输出稳定性较高,振动抑制能力较强,提高了传动系统的动态输出稳定性。

关键词: PID; 高速气浮电主轴; 转子; 动态控制; 稳定性

Dynamic control algorithm of high-speed air-floating motorized spindle rotor based on PID

CHEN Yunsheng, SUN Lingzhen

(Guangzhou Huali Vocational College of Science and Technology, Guangzhou 511325, China)

[Abstract] In order to improve the dynamic control ability of high-speed air-floating motorized spindle rotor and reduce surge, a PID-based dynamic control algorithm for high-speed air-floating motorized spindle rotor is proposed. The method of attitude sensor sensing is adopted to collect the physical parameters of the high-speed air-floating motorized spindle rotor. The aerodynamic load, centrifugal force load and aerodynamic component of blade rotation are taken as constraint parameters, and the attitude error compensation and surge adaptive control method are adopted to adjust the output stability parameters of the high-speed air-floating motorized spindle rotor. The torsional vibration compensation control model of the power transmission system of the air-floating motorized spindle rotor is established by PID variable structure control method. Stability adjustment and real-time compensation control of attitude and pose parameters are carried out during vibration reduction of power transmission system, so as to improve the dynamic parameter adjustment ability and reliability control ability of high-speed air-floating motorized spindle rotor. The simulation results show that the dynamic control of high-speed air-floating motorized spindle rotor with this method has high output stability and strong vibration suppression ability, which improves the dynamic output stability of the transmission system.

[Key words] PID; high-speed air floating motorized spindle; rotor; dynamic control; stability

0 引言

高速气浮电主轴转子是车辆动力传动系统以及大型船舶动力系统的重要部件,在高速气浮电主轴转子运行中,受发动机波动及转矩误差参数的影响,导致减振稳定性、整个机械装置输出稳定性控制能力欠佳。因此,需要构建优化的高速气浮电主轴转子控制模型,结合动态控制和参数补偿调节的方法,实现高速气浮电主轴转子的动态控制,改善车辆动态特性。采用人工智能控制和参数稳态跟踪测量方法,进行高速气浮电主轴转子的动态控制^[1]。研究高速气浮电主轴转子的动态控制方法,在提高机械装置特别是车辆及船舶动力系统装置稳定性方面具

有重要意义^[2]。

传统方法中,对高速气浮电主轴转子动态控制方法主要有反馈跟踪方法、反演积分方法、自适应特征测量方法等。构建高速气浮电主轴转子误差参数识别模型,结合参数自适应调节,可实现动态控制和参数稳定性跟踪,但传统方法进行高速气浮电主轴转子动态控制的输出稳定性不好,自适应控制能力不强^[3]。针对上述问题,本文提出基于PID的高速气浮电主轴转子动态控制算法。首先建立了控制参数分析和控制对象模型,然后进行气浮电主轴转子动态控制律的优化设计。最后的仿真测试结果,展示了本文方法在提高高速气浮电主轴转子动态控制能力和稳定性方面的优越性能。

作者简介: 陈运胜(1982-),男,学士,副教授,主要研究方向:机械工程、自动控制。

通讯作者: 陈运胜 Email: chen.ys1982@163.com

收稿日期: 2021-09-27

1 控制参数模型和结构对象分析

1.1 控制参数模型

采用姿态传感器感知的方法,实现对高速气浮电主轴转子物理参数采集。以气动载荷、离心力载荷以及叶片转动的气动力分量等为约束参数,构建高速气浮电主轴转子的控制参数模型,得到传动系统的扭转振动误差补偿函数^[4],采用三阶自相关特征分析,得到高速气浮电主轴转子物理参数表达模型可表示为:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_a = -(b_1 + \Delta b_1)\dot{\varphi}_a - (b_2 + \Delta b_2)\varphi_a - \\ (b_3 + \Delta b_3)\delta_\varphi + fd_1 \\ \ddot{\psi}_a = -(b_1 + \Delta b_1)\dot{\psi}_a - (b_2 + \Delta b_2)\psi_a - \\ (b_3 + \Delta b_3)\delta_\psi + fd_2 \\ \ddot{\gamma} = -(d_3 + \Delta d_3)\delta_\gamma + fd_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中, φ_a 、 ψ_a 、 γ 为减振弹簧和油液连接的动态特征量; $\dot{\varphi}_a$ 、 $\dot{\psi}_a$ 、 $\dot{\gamma}$ 为转矩激励及特征分布频率; $\ddot{\varphi}_a$ 、 $\ddot{\psi}_a$ 、 $\ddot{\gamma}$ 为燃气压力及干扰力矩; b_1 、 b_2 、 b_3 、 d_3 为系统的扭转振动误差; Δb_1 、 Δb_2 、 Δb_3 、 Δd_3 为曲柄半径 R 与连杆长度 L 之比; fd_1 、 fd_2 、 fd_3 为高速气浮电主轴转子的动态结构参数分布特性; δ_φ 、 δ_ψ 、 δ_γ 为发动机单缸综合转矩及输入动态特征量。

考虑磁浮迎风气流,通过计算高速运行时受到的气动升力,得到磁浮系统二级悬挂动态补偿模型表示为:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}_a = -b_1\dot{\varphi}_a - b_2\varphi_a - b_3\delta_\varphi + \rho_1 \\ \ddot{\psi}_a = -b_1\dot{\psi}_a - b_2\psi_a - b_3\delta_\psi + \rho_2 \\ \ddot{\gamma} = -d_3\delta_\gamma + \rho_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\rho_1 = -\Delta b_1\dot{\varphi}_a - \Delta b_2\varphi_a - \Delta b_3\delta_\varphi + fd_1$, 表示周期扰动下的磁浮系统二级悬挂定常水平直线运动的扰动运动参数, $\rho_2 = -\Delta b_1\dot{\psi}_a - \Delta b_2\psi_a - \Delta b_3\delta_\psi + fd_2$, 表示电磁力相对于平衡状态的基准运动状态系数, $\rho_3 = -\Delta d_3\delta_\gamma + fd_3$ 为不确定项。

采用PID变结构神经网络结构模型,构建高速气浮电主轴转子动态稳定性参数融合模型,得到磁浮系统非线性响应扰动输出稳态特征量:

$$\begin{cases} net_{s1}(k) = r_s(k) \\ net_{s2}(k) = y_s(k) \end{cases} \quad (3)$$

用增量谐波平衡法,得到磁浮系统非线性响应的拟合分量为:

$$u_{si}(k) = net_{si}(k) \quad (4)$$

设稳定悬浮的平衡位置参数,通过定常和非定常气动参数分析,构建高速气浮电主轴转子动态扰动控制模型,得到参数自适应调节输出分量为:

$$x_{si}(k) = \begin{cases} 1, & u_{si}(k) > 1 \\ u_{si}(k), & -1 \leq u_{si}(k) \leq 1 \\ -1, & u_{si}(k) < -1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $r_s(k)$ 为稳定悬浮间隙输出的给定值; $y_s(k)$ 为系统被控量; s 为气动升力条件下的磁浮控制序列序号 ($s = 1, 2, \dots, n$); i 为PID神经网络输入层序号 ($i = 1, 2$)。

根据上述控制参数模型设计,结合二系悬挂刚度参数分析,进行控制方法优化设计^[5]。

1.2 控制对象模型分析

采用姿态误差补偿和喘振自适应控制的方法,进行高速气浮电主轴转子的输出稳定性参数调节^[6],计算电磁铁悬浮间隙,采用比例微分控制器,得到垂向运动方程式为:

$$w_{sj}(n_0 + 1) = w_{sj}(n_0) + \eta_{sj} \sum_{p=1}^n \sum_{h=1}^m \sum_{k=1}^l \delta_{sjh}(k)x_{si}(k) \quad (6)$$

应用IHB法计算磁浮控制稳定性参数,得到稳态的周期解:

$$\delta_{sjh}(k) = \delta'_{hp}(k)w'_{sjh} \operatorname{sgn} \frac{u'_{sj}(k) - u'_{sj}(k-1)}{net'_{sj}(k) - net'_{sj}(k-1)} \quad (7)$$

式中, η_{sj} 为固定气动力振幅下的学习步长。

根据姿态误差的输出差异性,进行稳定性补偿。结合喘振的传感跟踪识别,建立自适应控制对象模型,进行高速气浮电主轴转子的输出稳定性参数调节,参数稳定修正误差为:

$$\theta = \arcsin(-T_{31})$$

$$\begin{cases} \arctan\left(\frac{T_{32}}{T_{33}}\right), & T_{33} > 0 \\ \pi \cdot \sin T_{32} + \arctan\left(\frac{T_{32}}{T_{33}}\right), & T_{33} < 0 \end{cases} \quad (8)$$

系统发动机输出后端姿态角为:

$$\theta_a^k = \theta_T^k + \varepsilon_a^k \quad (9)$$

根据上述分析,采用姿态误差补偿和频带输出稳定性控制,实现控制对象优化设计^[7]。

2 气浮电主轴转子动态控制算法

2.1 PID变结构控制模型

在构建高速气浮电主轴转子控制对象模型的基础上,进一步采用PID变结构控制的方法进行算法

设计,建立稳态控制律,提高控制稳定性。在此,引入六缸发动机谐波次^[8],得到气浮电主轴转子动态控制的PID隐含层至输出层权重值:

$$w'_{sjh}(n_0 + 1) = w'_{sjh}(n_0) + \eta'_{sjh} \frac{1}{l} \sum_{p=1}^n \sum_{k=1}^l \delta'_{hp}(k) x'_{sj}(k) \quad (10)$$

其中:

$$\delta'_{hp}(k) = \frac{2}{l} [r_p(k) - y_p(k)] \operatorname{sgn} \frac{y_p(k+1) - y_p(k)}{v_h(k) - v_h(k-1)} \quad (11)$$

给出外部激励主导频率约束下的自稳定条件: $f(x_0, u_0) = 0$ 。在扭转隔振器参数调节下,得到高速气浮电主轴转子的状态参数估计值为: $x = [\varphi_0 + \Delta\varphi, \dot{\varphi}_0 + \Delta\dot{\varphi}, \theta_0 + \Delta\theta]^T, \delta_\varphi = \Delta\delta_\varphi$ 。计算最佳阻尼参数,得到外部激励的主导参数估计方程为:

$$\begin{cases} mV\Delta\dot{\theta} = (c_y^\alpha qS_M + P)\Delta\alpha + mg\sin\theta\Delta\theta + P\Delta\delta_\varphi + m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + F_{gr} \\ J_{z1}\Delta\ddot{\varphi} = -c_{y1}^\alpha qS_M(x_g - x_T)\Delta\alpha - qS_M m_{dz} l_k^2 \Delta\dot{\varphi}/V - P(x_R - x_T)\Delta\delta_\varphi - m_R \dot{W}_{x1} l_R \Delta\delta_\varphi - m_R l_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi(x_R - x_T) - J_R \Delta\ddot{\delta}_\varphi + M_{gr} \end{cases} \quad (12)$$

利用拉格朗日方程,隔振器系统的振动测量方程表示为:

$$\begin{cases} -mV\dot{\sigma} = F_z \\ J_y \omega_{y1} + (J_x - J_z)\omega_{z1}\omega_{x1} = M_{y1} \\ \varphi = \sigma + \beta \end{cases} \quad (13)$$

根据振动测量结果,采用修正的PID控制算法,得到各个惯量的角位移,引入位移补偿函数,实现气浮电主轴转子动态控制的参数修正^[9]。

2.2 控制律优化设计

结合控制律的反馈补偿方法,在PID控制器的输入端,采用自适应学习方法进行反馈跟踪及模糊PID神经网络控制,得到气浮电主轴转子的振动响应自适应控制模型为:

$$\begin{cases} m\dot{V} = -mg\sin\theta - c_x qS_M + P \\ mV\dot{\theta} = -mg\cos\theta + c_y^\alpha qS_M \alpha + P(\alpha + \delta_\varphi) + m_R l_R \ddot{\delta}_\varphi \\ J_{z1}\ddot{\varphi} = -c_{y1}^\alpha qS_M(x_g - x_T)\alpha - qS_M m_{dz} l_k^2 \dot{\varphi}/V \\ -P(x_R - x_T)\delta_\varphi - m_R \dot{W}_{x1} l_R \delta_\varphi - m_R l_R \ddot{\delta}_\varphi(x_R - x_T) - J_R \ddot{\delta}_\varphi \end{cases} \quad (14)$$

对方程组进行线性化处理,计算系统的各阶固有频率^[10],得到输出惯性参数状态变量 $x = [\varphi, \dot{\varphi}, \theta]^T$ 、外部激励主导频率修正结果 $\dot{x} = f(x, u)$,及高速气浮电主轴转子的状态量 $x_0(x_0 = [\varphi_0, \dot{\varphi}_0, \theta_0]^T)$ 。调整学习步长 η_{sj} ,使高速气浮电主轴转子的动态输出频率满足以下条件:

$$0 < \eta_{sj} < \frac{1}{\varepsilon_{sj}^2} \quad (15)$$

式中:

$$\varepsilon_{sj} = - \frac{\sum_{p=1}^n \sum_{h=1}^m \sum_{k=1}^l \delta_{sjh}(k) x_{si}(k)}{2 \sqrt{l \sum_{p=1}^n \sum_{k=1}^l [r_p(k) - y_p(k)]^2}} \quad (16)$$

综上所述,实现高速气浮电主轴转子动态控制算法和控制律的优化设计。在动力传动系统减振过程中进行姿态及位姿参数的稳定性调节和实时补偿控制,提高高速气浮电主轴转子动态参数调节能力和可靠性控制能力^[11]。

3 实验测试

为了验证本文方法在实现高速气浮电主轴转子动态控制中的性能,采用Matlab仿真方法进行仿真测试,采用MPU6050姿态传感器进行数据采集,采集样本长度为1024,固有频率为102 KHz,控制器的中央处理器为STM32F103RCT6^[12],仿真参数设定见表1。

表1 仿真参数设定

Tab. 1 Simulation parameter setting

测试组	传感节点	采样频率/KHz	临界阈值	测试时长/s
测试组1	446	1.550	0.546	65.754
测试组2	471	1.635	0.531	64.031
测试组3	441	1.530	0.525	63.231
测试组4	480	1.665	0.536	64.554
测试组5	429	1.490	0.556	67.015
测试组6	435	1.510	0.551	66.369
测试组7	413	1.435	0.559	67.354
测试组8	425	1.475	0.539	64.923

根据表1的参数设定,进行高速气浮电主轴转子动态传感信息采集,其结果如图1所示。

以图1的数据为研究对象,测试稳态控制性能,控制稳定性输出结果如图2所示。

分析图2得知,本文方法进行高速气浮电主轴转子动态控制的输出稳定性和收敛性较好。对比控制精度,结果见表2,分析表2得知,本文方法进行

高速气浮电主轴转子动态控制的收敛精度更高。

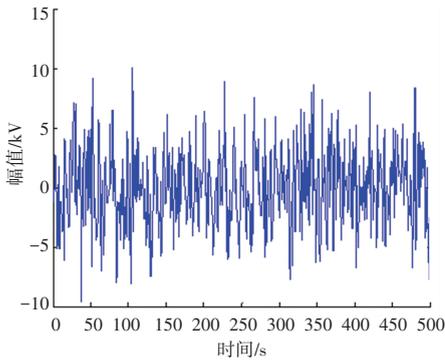


图 1 数据采集时域波形

Fig. 1 Time domain waveform of data acquisition

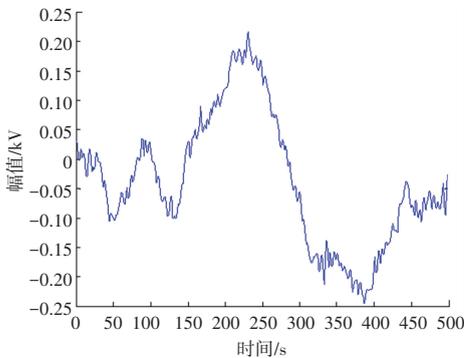


图 2 控制稳定性输出

Fig. 2 Control stability output

表 2 控制精度对比测试

Tab. 2 Comparative test of control accuracy

迭代次数	本文方法	BP	MVD
100	98.846 2	76.571 4	74.705 9
200	100.153 8	78.028 6	77.705 9
300	98.538 5	76.228 6	74.000 0
400	97.461 5	78.542 9	78.764 7
500	97.923 1	75.542 9	72.588 2
600	98.230 8	75.885 7	73.294 1
700	97.076 9	74.600 0	70.647 1
800	97.692 3	75.285 7	72.058 8
900	98.461 5	76.142 9	73.823 5
1 000	97.000 0	74.514 3	70.470 6
1 100	96.384 6	73.828 6	69.058 8
1 200	95.923 1	73.314 3	68.000 0

4 结束语

结合动态控制和参数补偿调节的方法,实现高速气浮电主轴转子的动态控制,改善车辆动态特性。本文提出基于 PID 的高速气浮电主轴转子动态控制算法。构建高速气浮电主轴转子的控制参数模型,采用姿态误差补偿和喘振自适应控制的方法,进行高速气浮电主轴转子的输出稳定性参数调节,在动力传动系统减振过程中进行姿态及位姿参数的稳定性调节和实时补偿控制。分析得知,本文方法进行高速气浮电主轴转子控制的动态稳定性较好,精度较高。

参考文献

[1] 赵文涛, 俞建成, 张艾群. 海洋中尺度涡旋观测任务中的水下滑翔机协同控制策略[J]. 机器人, 2018, 40(2): 206-215.

[2] 何大阔, 高飞雪, 杨乐, 等. 一类未知 MIMO 非线性离散系统的改进自适应准滑模解耦控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 783-789.

[3] 刘倩, 谭文, 李东海. 一种多变量自抗扰控制结构的设计研究[J]. 华北电力大学学报, 2014, 41(6): 97-103.

[4] 翁永鹏, 高宪文, 刘听明. 非仿射非线性离散系统的数据驱动二阶滑模解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(3): 309-318.

[5] 栾小丽, 王志强, 刘飞. 多变量非方系统集中式 PI 控制器设计[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 811-816.

[6] 刘潇潇, 车军, 赵娜, 等. 3D 打印控制系统 G 代码解释器的设计与实现[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(3): 37-40, 45.

[7] 高琴, 王哲龙, 胡卫建, 等. 基于振荡器模型的蛇形机器人的步态仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1374-1380.

[8] 李俊国, 严荣国, 王佳玉, 等. 基于三轴加速度计的中老年足部训练系统[J]. 生物医学工程研究, 2018, 37(3): 346-350.

[9] 司媛媛, 何斌. 基于 CPG 和小脑模型的双足机器人行走控制[J]. 系统仿真技术, 2017, 13(1): 6-10.

[10] 汪明, 喻俊志, 谭民, 等. 机器海豚多模态游动 CPG 控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1933-1941.

[11] 郑振, 甘新年, 王丽媛. 基于自适应波束形成的鱼雷对潜目标识别技术[J]. 智能计算机与应用, 2016, 6(2): 31-33.

[12] 马雪. 基于 FPGA 嵌入式设计的水声信号采集系统[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(3): 135-139.

(上接第 171 页)

参考文献

[1] SICILIANO B, KHATIB O. Springer Handbook of Robotics[M]. Springer-Verlag New York, Inc. 2008: 58-61.

[2] PARKER L E. Current State of the Art in Distributed Autonomous Mobile Robotics[C]// Springer Japan. Springer Japan, 2000: 13-22.

[3] MARJOVI A, MARQUES L. Multi-Robot Topological Exploration Using Olfactory Cues[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 23-31.

[4] FOX D, JONATHAN K O, KONOLIGE K, et al. Distributed Multirobot Exploration and Mapping[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(7): 1325-1339.

[5] CARPIN S. Fast and accurate map merging for multi-robot systems[J]. Auton Robots 2008; 25(3): 305-316.

[6] FERRAO V T, VINHAL C, CRUZ G D. An Occupancy Grid Map Merging Algorithm Invariant to Scale, Rotation and Translation[J]. IEEE Computer Society, 2017: 246-251.

[7] 王桐, 高光涛, 高山. 基于启发式的多机器人 SLAM 地图融合方法研究[J/OL]. 系统仿真学报: 1-10 [2021-12-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3092.V.20210413.1310.004.html>.

[8] 周凤余, 庄文密, 万方, 等. 基于路标与云架构的多机器人建图及融合方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 30-36.

[9] Thrun, Sebastian. Probabilistic robotics[J]. Communications of the Acm, 2005, 45(3): 52-57.