

# 离心机的自适应鲁棒控制系统

李 果, 张培昌, 胡剑飞, 余达太

(北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

**[摘要]** 为了改善离心机的控制性能和稳定性, 进行了离心机的自适应鲁棒控制系统研究; 基于电动机与离心机相连的结构, 设计了控制器以期得到满意的控制性能; 首先提出了一种基于自适应鲁棒控制器的离心机控制系统, 针对离心机模型设计了自适应鲁棒控制算法; 试验结果证明了该控制算法的有效性; 在环境条件不同的情况下, 离心机控制系统仍表现了满意的控制性能。

**[关键词]** 离心机; 自适应控制; 鲁棒控制

**[中图分类号]** TP273 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)09-0030-05

## 1 引言

随着航空航天工业的发展, 离心机的用途越来越广泛。离心机系统可以通过高速旋转产生几十倍重力加速度的超重环境, 可在地面模拟训练航天员和飞行员的身体承受能力, 检验仪器设备的性能指标。早期的离心机控制系统由模拟分立元件组成, 性能已不能满足如今新一代航空航天飞行器的要求。目前国内外有关离心机方面的研究报道并不多<sup>[1,2]</sup>, 文献[2]的离心机控制系统虽然是全数字式的, 但控制算法采用的仍是经典的PID控制, 设计中往往回避了系统中参数不确定性变化和外界环境带来的干扰力矩的影响因素, 因而对系统参数不确定性变化与高速运行中的振动、摇摆、负载变化和空间气流等带来的干扰力矩没有好的抑制作用。离心机控制系统所担负的是对时效性要求较高的任务, 它需要在高速旋转时能准确跟踪各种不同类型变化的加速度曲线, 以便获得期望的超重环境。离心机在高速运动过程中的环境条件不确定性变化使

得系统具有时变非线性和不确定性, 容易受到外界干扰因素影响, 例如振动摇摆、负载变化和高速旋转时空间气动力学的干扰力矩变得很大, 如何提高离心机系统的鲁棒自适应性, 成为离心机控制工程的一个重要研究课题。

笔者在离心机系统模型的基础上, 设计了一种基于自适应鲁棒控制的离心机控制系统, 它对离心机系统和电机具体参数的不确定性非线性变化与外界各种振动摇摆以及空间气动力学的干扰力矩的敏感性较低, 可以补偿非线性不确定变化量及干扰力矩的影响, 改善系统的响应特性, 提高系统自适应能力, 因此具有较好的鲁棒性。笔者提出的控制算法在离心机系统平台上进行试验, 用试验结果验证了这种方法的有效性。尽管高速旋转时外界各种环境状况和吊舱负载的变化不同, 对系统的影响很大, 但离心机控制系统仍表现出满意的控制性能。

## 2 离心机控制系统

离心机控制系统如图1所示, 由主控台、拖动

**[收稿日期]** 2005-10-30; **修回日期** 2005-12-21

**[基金项目]** “921”工程项目资助

**[作者简介]** 李 果 (1963-), 男, 四川成都市人, 北京科技大学教授, 1996年北京理工大学博士后出站, 主要研究领域: 机器人控制与规划, 智能控制, 工业过程控制和鲁棒自适应控制

台、生理监测台、可控硅功率放大器、直流电动机、减速器转台、臂架和吊舱等组成。系统工作时，直流电机带动大臂架和吊舱高速旋转，产生几十倍重力加速度的超重环境。加速度变化规律可归纳为几十条典型曲线。每一条曲线又有数值不等的变化上升率，如角速度梯形曲线上率从  $0.001 \text{ rad/s}^2$  到  $1 \text{ rad/s}^2$ ，因此曲线变化范围大。控制系统的任务就是控制吊舱旋转产生的加速度变化曲线尽可能与给定的加速度命令曲线相一致。离心机控制系统结构采用层次结构，分为三层：最顶层为监测管理级，中间层为控制级，最低层为伺服级。

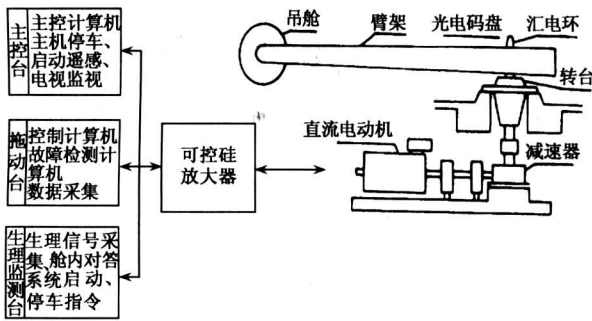


图 1 离心机控制系统

Fig.1 The centrifuge control system

1) 监测管理级 由主控计算机、故障计算机、生理监测计算机组成。各计算机以 ARCnet 方式构成局域网，完成彼此信息数据交换。主控计算机完成管理监测、发布命令、编辑计算加速度命令曲线并转化成角速度命令曲线。故障计算机监控各类关键参数，如加速度、角速度、压力、温度、噪声、大厅门关好信号、吊舱门关好信号等，有问题用声、光、电方式报警，并存储相关数据信息。生理监测计算机监控舱内人员各种生理参数，如呼吸、脑电波、心电波等，并采集存储，有异常即报警停车。

2) 控制级 由拖动计算机组成，完成将上级传来的命令值与用传感器测量的离心机实际旋转角速度和角加速度值进行比较得到误差，计算机对此误差用自适应鲁棒控制算法处理，得到控制信号  $U_a(t)$  后经可控硅功率放大控制伺服系统驱动电动机，转动大臂架和吊舱准确按照期望的角速度曲线变化。

3) 伺服级 由 540 kW 的 Z4-355-42 型直流电机、减速器、光电码盘、加速度传感器、转台、

汇电环、臂架、吊舱等组成。

为了保证舱内人员安全和万无一失，离心机控制系统具有超速保护和过失保护功能<sup>[2]</sup>。

### 3 离心机系统模型

离心机在水平面上高速旋转，旋转角  $\theta$  由直流电机伺服系统驱动。离心机主要组成部件是直流电机、减速器、大臂架和吊舱。该系统模型见图 2。其中， $U_a$  为加在直流电机电枢上的电压； $R_d$  为电枢绕组电阻； $L_d$  为电枢绕组电感； $K_m$  为电机力矩系数； $K_e$  为直流电机反电动势常数； $J_L$  为电机变速机构和负载折合到电机轴上的转动惯量； $f$  为电机变速机构和负载折合到电机轴上的粘性摩擦系数； $n$  为转速， $\theta$  为角位移； $M_{fx}$  为高速转动时等效到电机输出轴上的空间气动力学干扰力矩； $\Delta M$  为高速旋转时由于大臂架和吊舱的振动、摇摆和负载变化所带来的等效到电机输出轴上的干扰力矩。 $f, M_{fx}, \Delta M$  是非线性不确定变化干扰量，它们产生于饱和、摩擦、齿隙、非线性弹性形变振动摇摆、吊舱负载变化不确定性等等因素，直接通过参变量  $f, M_{fx}, \Delta M$  表现出复杂非线性不确定性变化，从而对离心机跟踪控制系统的稳态、动态性能产生较大的影响，使控制跟踪性能变坏。

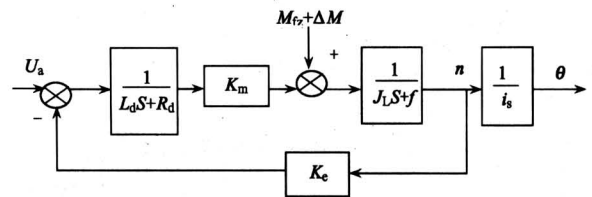


图 2 离心机模型

Fig.2 The centrifuge system models

由图 2 可得其微分方程为

$$\ddot{\theta}(t) + \frac{(J_L R_d + f L_d)}{J_L L_d} \dot{\theta}(t) + \frac{f R_d + K_m K_e}{J_L L_d} \theta(t) = \frac{K_m}{J_L L_d} U_a(t) + \frac{L_d (M_{fx} + \Delta M) + R_d (M_{fx} + \Delta M)}{J_L L_d}$$

式中， $M_{fx}, M_{fx}, f, \Delta M, \Delta M$  均是非线性不确定变化量，有些量值很大，不能忽略。

上式可写成状态方程形式：

$$\dot{E}(t) = AE(t) + BU_a(t) + B_0(\Psi^T \Phi + \ddot{\theta}_d) \tag{1}$$

式中  $E(t) = \begin{pmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{pmatrix}$ ;  $B = \begin{pmatrix} 0 \\ -\tau \end{pmatrix}$ ;  $B_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ ;  $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ ;  $\Phi = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{pmatrix}$ ;  $\Psi = \begin{pmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \\ -1 \end{pmatrix}$ ;  $e_1(t) = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}(t)$ ,  $e_2(t) = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}(t)$ ,  $\tau = \frac{K_m}{J_L L_d}$ ,  $B = -\tau B_0$ ,  $P_0 = (fR_d + K_m K_e)/J_L L_d$ ,  $P_1 = (J_L R_d + fL_d)/J_L L_d$ ,  $P_2 = [L_d (M_{fx} + \Delta M) + R_d (M_{fx} + \Delta M)]/J_L L_d$ ,  $\tau$ ,  $U_a(t)$ ,  $\dot{\theta}_d$ ,  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  均为实数, 是非线性不确定变化量, 无法测定;  $\dot{\theta}_d$ ,  $\ddot{\theta}_d$ ,  $\ddot{\theta}_d$ , 为期望的角速度、角加速度值和角加加速度值。这是一个非线性时变多变量系统。

### 4 自适应鲁棒控制器

从图 2 可以看出, 这是一个含有不确定性的时变不确定数学模型。其中  $M_{fx}$ ,  $M_{fx}$ ,  $f$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta M$  等均是非线性不确定变化量, 且不易测量。针对这样的控制对象采用图 3 所示的自适应鲁棒控制器, 目的就是在控制器中引入与不确定性参数对应的可调参数, 通过在线修正该参数来保证整个闭环系统的动态品质。这种设计思想不是建立在对被控对象参数的准确估计上。这种控制器的可调参数可以解释为控制器的一个状态变量, 所设计的自适应鲁棒控制器是一种动态控制器。

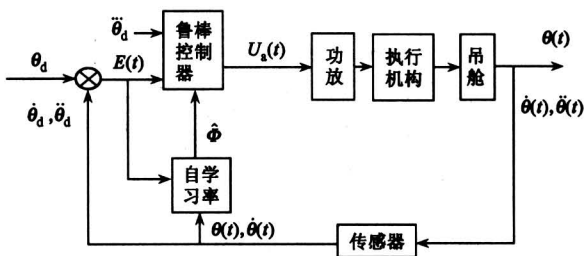


图 3 自适应鲁棒控制器

Fig.3 Adaptive robust controller

离心机控制系统的核心是自适应鲁棒控制系统的设计。首先针对式 (1), 取控制器输入为  $U_a(t) = U(t) + K^T E(t)$ , 则式 (1) 变为:

$$\dot{E}(t) = (A + BK^T)E(t) + BU(t) + B_0(\Psi^T \Phi + \ddot{\theta}_d) \quad (2)$$

其中,  $K^T$  为控制器增益行向量, 并且  $K^T \in R^{1 \times 2}$ ; 对于式 (2), 取李亚普诺夫函数, 得到:

$$V(t) = \frac{1}{2} E^T(t) P E(t) + \frac{1}{2} (\Phi - \hat{\Phi})^T R (\Phi - \hat{\Phi}) \quad (3)$$

其中  $P > 0$ ,  $R > 0$  均为正定对称矩阵;  $\hat{\Phi}$  为不确定参数列向量的估计值。  $\Phi$  为不确定参变列向量的真值,  $\bar{\Phi}$  为对应误差:  $\bar{\Phi} = \Phi - \hat{\Phi}$ 。

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{2} [\dot{E}^T(t) P E(t) + E^T(t) P \dot{E}(t)] + (-\dot{\hat{\Phi}})^T R \bar{\Phi} = \\ & \frac{1}{2} E^T(t) [(A + BK^T)^T P + P(A + BK^T)] \cdot \\ & E(t) + UB^T P E + (\Psi^T \Phi + \ddot{\theta}_d) B_0^T P E(t) + (-\dot{\hat{\Phi}})^T R \bar{\Phi} \quad (4) \end{aligned}$$

选择合适的  $K^T$ , 对一任意正定对称阵  $P$ , 总有正定对称阵  $Q$ , 使得下式成立:

$$(A + BK^T)^T P + P(A + BK^T) = -Q,$$

令  $\Phi - \hat{\Phi} = \bar{\Phi}$  代入式 (4) 有:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -\frac{1}{2} E^T(t) Q E(t) + UB^T P E(t) + (\Psi^T \hat{\Phi} + \ddot{\theta}_d) B_0^T P E(t) + \Psi^T \bar{\Phi} B_0^T P E(t) - \dot{\hat{\Phi}}^T R \bar{\Phi}, \\ \text{令 } \dot{\hat{\Phi}} = & [B_0^T P E(t)] R^{-1} \Psi, U = \frac{1}{\tau} (\Psi^T \hat{\Phi} + \ddot{\theta}_d), \end{aligned}$$

$$\text{则 } \dot{V}(t) = -\frac{1}{2} E^T(t) Q E(t) < 0.$$

因此有  $\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0$ 。

故系统是一致渐近稳定的。有定理如下:

定理 对于系统式 (1), 若取自学习率:

$$\dot{\hat{\Phi}} = [B_0^T P E(t)] R^{-1} \Psi \quad (5)$$

控制输入量:

$$U_a(t) = K^T E(t) + \frac{1}{\tau} (\Psi^T \hat{\Phi} + \ddot{\theta}_d) \quad (6)$$

则系统式 (1) 是一致渐近稳定的, 且有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0.$$

### 5 试验结果

拖动计算机采用的是工控机。它将跟踪命令与用传感器测量的离心机旋转的实际角速度、角加速度量进行比较得到误差, 计算机对此数据用自适应鲁棒控制算法处理, 经 D/A 后得到控制信号  $U_a(t)$  再经可控硅功率放大控制伺服系统驱动直流电机, 转动大臂架和吊舱高速旋转, 并确保按照期望的命令曲线变化。角速度传感器采用光电码盘, 角加速度传感器采用应变式感应传感器。

试验场地分别是 80 m × 100 m 的宽广试验大厅。采用记忆存储示波器记录。试验时，让离心机跟踪不同上升率的角速度变化曲线，角速度上升变化率分别是 0.03 rad/s<sup>2</sup> 和 0.9 rad/s<sup>2</sup>，以此检验离心机控制系统的控制效果。低速时，大臂架和吊舱的振动、摇摆，以及空间气流等带来的干扰力矩作用不明显，而高速旋转时由于大臂架和吊舱的振动、摇摆以及空间气流动力学带来的等效到电动机输出轴上的干扰力矩，对离心机跟踪控制系统的稳态、动态性能影响很大，使控制跟踪性能变坏，这是必须考虑的。

离心机和直流电机的基本参数见表 1。控制器参数  $K^T$  的绝对值选取一般不过大，过大虽然增加了鲁棒性，但使系统保守性增加，动态指标变坏，超调量增大。实际整定时，采用工程方法即扩充临界比例法和试凑法，得到控制器参数  $K^T$  的  $k_1, k_2$  的数值分别为 -1.38, -3.36。 $R = 0.6I, P = 0.8I, I$  是二阶单位矩阵。自适应鲁棒控制器的控制输入计算见式 (5)、式 (6)。

表 1 离心机实验台基本参数

Table 1 Experimental devices

参数	数值
电枢绕组电感 $L_d / H$	0.003 73
电机力矩系数 $K_m / Nm \cdot A^{-1}$	0.631 3
电机输出轴等效转动惯量 $J_L / kg \cdot m^2$	$1.67 \times 10^2$
电枢绕组电阻 $R_d / \Omega$	0.052 9

实验时离心机先以角加速度  $a_0 = 0.03 \text{ rad/s}^2$  提高角速度。在低速情况下，调整好后的自适应鲁棒控制和 PID 控制都能使离心机实现较好的跟踪。但当角速度上升变化率提高为  $0.9 \text{ rad/s}^2$ ，控制器所有控制器参数又都不做任何改动时，情况就不同了。图 4 是用自适应鲁棒控制算法控制离心机跟踪的角速度  $\omega_0$  和角加速度  $a_0$  变化实测曲线。可以看出跟踪性能较好。这时角速度误差  $e_1(t)$  变化很小，见图 5 曲线①，性能满足要求。将结果用记忆存储示波器记录下来。尔后，用 PID 算法控制的离心机控制系统的水平角速度跟踪误差  $e_1(t)$  变化的实测曲线见曲线②，可以看出这时的实测曲线摆动较大，最大误差达到  $0.3 \text{ rad/s}$ ，不满足性能指标的要求。由此可见，基于自适应鲁棒控制的离心机控制系统，提高了离心机系统对各种外界环境干扰和

负载变化的适应能力。

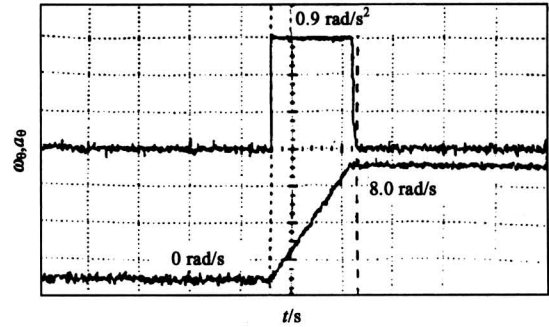


图 4 角速度和角加速度变化实测曲线

Fig.4 Experimental results of the angle speed and angle acceleration

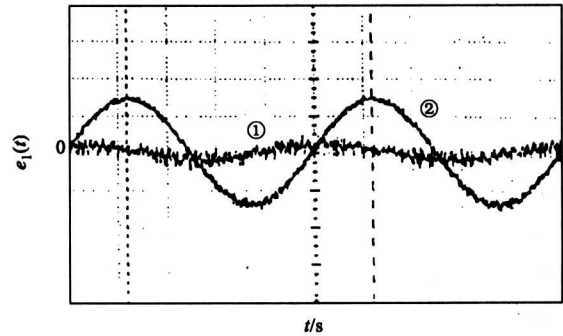


图 5 角速度误差变化实测曲线

Fig.5 Experimental results of the errors

## 6 结论

笔者针对离心机系统高速旋转，设计自适应鲁棒控制算法。它对离心机 and 电机具体参数的不确定性非线性变化与外界各种振动摇摆及空间气流干扰力矩的敏感性较低，可以补偿非线性不确定变化量及干扰力矩的影响，因此具有较好的鲁棒性。它可以改善系统的响应特性，提高系统对外界各种环境干扰力矩的适应能力。试验结果验证了这种方法的有效性。尽管外界环境干扰力矩与负载变化不同，离心机控制系统仍表现出满意的控制性能。

### 参考文献

- [ 1 ] Ackermann J. Robust flight control: a design example [J]. Journal of Guide Control, 1981, 6(4): 597 ~ 605
- [ 2 ] 李 果, 等. 离心机控制系统设计[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (7): 119 ~ 122

## The Adaptive Robust Controller of the Centrifuge

Li Guo, Zhang Peichang, Hu Jianfei, Yu Datai

(*Information Engineering Institute, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China*)

[**Abstract**] This paper investigates the use of the adaptive robust controller for improving control performance and stability of the centrifuge. Based on its structural merit that the electric motor is connected to the centrifuge, the implementation of a control system is expected to achieve satisfactory control performance. An adaptive robust control algorithm of the centrifuge is presented in the paper, and the adaptive robust controller is designed according to the centrifuge model. The effectiveness of the algorithm is verified by the experimental results. It is clarified that the control performance and stability of the centrifuge is improved and the control system still maintains satisfactory control performance despite the change of environment conditions.

[**Key words**] centrifuge; adaptive control; robust control

---

(cont. from p.29)

shear, the conditions of generating contraction and expansion of volume, the fact that the dependence of stress path is a comprehensive performance form of the interaction between the plastic volume strain and shear and its verification, and the fact that the critical state is a pure shearing process, in which the plastic and elastic volume strains remain constant, were demonstrated. In addition, according to this principle, it was theoretically proved that the space critical state line exists and is unique and independent of the stress history.

[**Key words**] principle of interaction between plastic volume strain and shear strain for rock and soil; constitutive relation of rock and soil; pressure-sensitivity; dilatancy