

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.002

# 机械离心式转速敏感元件的迟滞特性建模仿真研究

白 晓<sup>1</sup>, 负 超<sup>2\*</sup>, 白靖华<sup>3</sup>

(1. 青岛农业大学 海都学院, 山东 莱阳 265200; 2. 北京航空航天大学 机器人研究所, 北京 100191;  
3. 中国人民解放军 91206 部队 教务科, 山东 青岛 266108)

**摘要:**针对机械离心式转速敏感元件的迟滞问题,对影响其迟滞特性的因素和减少迟滞的控制方法进行了研究,首先阐述了机械离心式转速敏感元件的工作原理,构建了某航空发动机用转速敏感元件的数学模型,随后利用 AMESim 软件对元件迟滞特性进行了仿真,对比分析了活门摩擦力和调准弹簧刚度差两个因素对迟滞特性的影响,最后通过选取不同加工状态的活门以及不同迟滞量的弹簧进行了试验验证。研究结果表明,活门摩擦力和调准弹簧刚度差是影响元件迟滞的重要因素,通过修整活门控油孔尖边和降低调准弹簧刚度差两个方面的措施,控制元件迟滞量可满足元件迟滞性能要求。

**关键词:**机械离心式转速敏感元件;离心飞重;调准弹簧;迟滞特性;AMESim;数学模型

中图分类号:TH137.5;V23

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1156-05

## Hysteresis characteristic modeling and simulation of mechanical centrifugal speed sensitive element

BAI Xiao<sup>1</sup>, YUN Chao<sup>2</sup>, BAI Jing-hua<sup>3</sup>

(1. Haidu College Qingdao Agricultural University, Laiyang 265200, China; 2. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Senate Branch, The Chinese People's Liberation Army in 91206 Military, Qingdao 266108, China)

**Abstract:** Aiming at the hysteresis of the mechanical centrifugal speed sensitive element, the influencing factors to the element hysteresis and the controlling method which can reduce hysteresis were investigated, and firstly, the working principle of the mechanical centrifugal speed sensitive element was expounded and the mathematical model of aero engine centrifugal speed sensor element was established, and the simulation model was developed based on AMESim. The effect of valve friction force and adjusting spring stiffness difference on the model's hysteresis characteristic were computed to make comparisons. Finally, test was carried out through choosing valves of different manufactured condition and springs of different hysteresis characteristic. The results indicate that valve friction force and adjusting spring stiffness are important factors that influence the element hysteresis, and the element's hysteresis characteristic requirement can be met by finishing the sharp edge of accusing oil hole and reducing adjusting spring stiffness.

**Key words:** mechanical centrifugal speed sensitive element; centrifugal flyweight; alignment spring; hysteresis characteristic; AMESim; mathematical model

## 0 引 言

机械离心式转速敏感元件(以下简称“离心式敏感元件”)是在航空发动机控制系统中应用十分广泛

的一种调节装置。该装置通过感受输入转速的变化,把转速的变化量转换成机械位移输出,推动调节器工作,以消除实际转速对给定值所产生的偏离。

机械离心式敏感元件是发动机自动控制的重要组

收稿日期:2015-03-31

作者简介:白 晓(1984-),女,河北衡水人,主要从事机械系统动力学方面的研究. E-mail:bxiao.2007@163.com

通信联系人:负 超,男,教授,博士生导师. E-mail:cyun18@vip.sina.com

成,同时也是故障高发区,影响发动机控制部件的性能参数和稳定性<sup>[1-2]</sup>。西北工业大学的傅强等人<sup>[3-4]</sup>建立了离心式敏感元件基本性能的AMESim仿真模型,仿真所得转速-位移曲线与试验曲线基本一致。北京航空航天大学的王曦教授<sup>[5]</sup>采用了考虑离心飞重块工作在燃油中的浮力效应和液体离心效应对离心飞重块换算轴向离心力的修正方法,精确地计算了离心式敏感元件的转速-弹簧位移关系的输入输出特性。但转速的增加或减小是按两条不同的静态特性变化的,这种现象称为离心式敏感元件的迟滞特性<sup>[6]</sup>。迟滞是航空发动机控制系统中常有的故障现象<sup>[7]</sup>。离心式敏感元件的迟滞特性决定系统的响应速度,目前对该方面的研究成果较少。

本研究首先介绍离心式敏感元件的组成和工作原理,而后提出离心式敏感元件迟滞特性的数学模型,并通过仿真分析和性能试验指出离心式敏感元件迟滞性能的控制方法。

## 1 离心式敏感元件的工作原理

离心式敏感元件由支架、飞重块、导杆、活门和调准弹簧等组成,原理框图如图1所示。

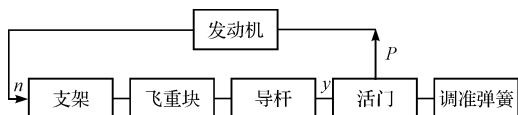


图1 离心式转速敏感元件原理框图

发动机通过传动机构带动支架以转速 $n$ 旋转,飞重块在离心力作用下产生绕支点向外的摆动,使导杆产生轴向作用力,推动活门压缩调准弹簧产生位移以控制活门控油孔油压 $P$ 。

稳态时,飞重块产生的轴向换算力与调准弹簧力相平衡。当发动机转速发生变化时,这一平衡被打破,使导杆产生向上或向下的移动,从而使导杆控制的活门开度发生变化,此时导杆的位移和活门的输出控油压力达到与发动机转速相对应的状态。转速增加和降低到活门控油压力相同时,降低时的转速值低于增加时的转速值,转速差即为离心式转速敏感元件的迟滞量,反映发动机超转后回复原状态的速度。

某航空发动机用离心式敏感元件的迟滞性能要求为:在转速考核范围内,增加1.2%额定转速前后,达到相同活门控油压力时的转速差不大于1.6%额定转速。

## 2 迟滞特性的数学模型

假定活门控油压力相同时导杆输出位移相同,则

离心式敏感元件的迟滞特性即指转速增加和降低时导杆的位移 $y$ 和输入转速 $n$ 之间的关系。导杆的位移与活门阀芯相同,活门阀芯受到飞重块离心力的轴向换算力、调准弹簧的弹簧力和与阀套间摩擦力的共同作用,由此可得导杆的位移 $y$ 和转速 $n$ 的函数关系,即为离心式敏感元件迟滞特性的数学模型。

假设飞重块质量集中于一点 $A$ ( $A$ 的坐标由其 $UG$ 三维模型得出),忽略连接销处摩擦力,则单个飞重块受力如图2所示。

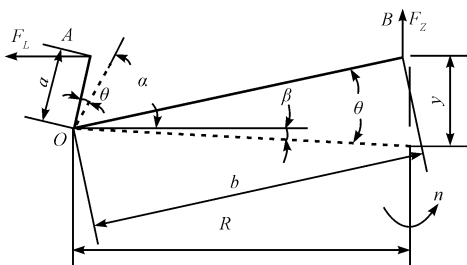


图2 单个飞重块受力分析图

点 $O$ —旋转中心;虚线—初始位置; $a, b$ —飞重块力臂长度; $\alpha, \beta$ —初始时飞重块短长臂与旋转轴垂直方向的夹角; $R$ —飞重块旋转中心到支架转轴的距离

离心飞重轴向换算力:

$$F_z = Zm \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 [R - a \cos(\theta + \alpha)] \frac{a \sin(\theta + \alpha)}{b \cos(\theta - \beta)} \quad (1)$$

式中: $Z$ —飞重块的数量; $m$ —曲臂、飞重块等旋转机件换算到重心 $A$ 处的质量; $n$ —转速; $R, a, b, \alpha, \beta$ —飞重块结构参数; $\theta$ —输出位移 $y$ 时飞重块的旋转角度, $\theta \approx 180y/\pi b$ 。

由上式可以看出:

离心式敏感元件结构确定后,轴向换算力是转速 $n$ 和位移 $y$ 的函数:当位移 $y$ 确定时,轴向换算力和转速的平方成正比。但在实际工作时,随着转速 $n$ 的增加,位移 $y$ 也相应增大,调准弹簧随之压缩,活门阀芯在受到离心飞重轴向换算力和调准弹簧力之外,还受到与运动方向相反的摩擦力的作用。由于弹簧自身存在迟滞,压缩时的弹簧刚度大于回弹时的刚度<sup>[8-9]</sup>,在转速增加和降低时须加以区分。

假设活门匀速运动:

(1) 转速增加时:

$$f + K_1(h + y_1) = Cn^2 \quad (2)$$

式中: $f$ —摩擦力; $K_1$ —弹簧压缩时的刚度; $h$ —弹簧的预压缩量; $y_1$ —转速增加至 $n$ 时的导杆位移; $C$ —轴向换算力系数, $C = Zm(\pi/30)^2 [R - a \cos(\theta + \alpha)] \cdot [a \sin(\theta + \alpha)/b \cos(\theta - \beta)]$ 。

(2) 转速减小时:

$$K_2(h + y_2) = Cn^2 + f \quad (3)$$

式中： $K_2$ —弹簧回弹时的刚度； $0 < K_2 < K_1$ ； $y_2$ —转速减小至  $n$  时的导杆位移。

由式(2,3)可得：

$$y_2 - y_1 = Cn^2 \left( \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \right) + 2f \left( \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_1} \right) > 0 \quad (4)$$

可见：

相同转速下转速减小时的导杆位移  $y_2$  大于转速增加时的导杆位移  $y_1$ ，即转速回降至原转速值时导杆未回到原转速值对应的位置，活门未关闭至原位置，控油压力仍低于原转速值对应的压力。转速增加和降低时，活门所受摩擦力反向和调准弹簧刚度变小，是迟滞特性存在的主要原因，而迟滞量的大小与摩擦力大小以及弹簧刚度削弱程度有关。

### 3 仿真分析

AMESim 是一款多学科领域复杂系统建模仿真软件，适合对复杂液压机械控制系统进行建模仿真<sup>[10]</sup>，是对航空发动机机械液压系统进行性能分析、排故改进的重要研究方法<sup>[11-16]</sup>。

笔者利用该软件对上述数学模型建立仿真模型，该模型如图 3 所示。

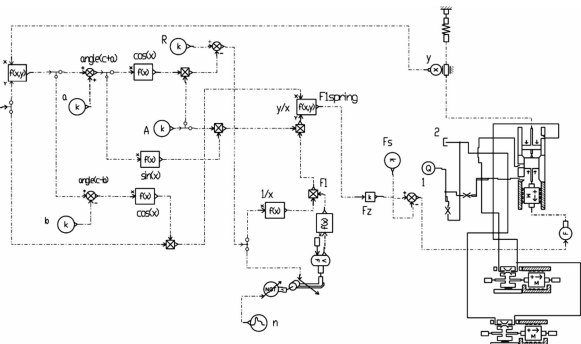


图 3 离心式敏感元件 AMESim 仿真模型

#### 3.1 迟滞特性曲线

本研究根据离心式敏感元件的调试数据和结构尺寸对 AMESim 模型中的相应参数进行设置，包括飞重块数量、换算质量、结构参数，以及弹簧刚度和预压缩量等。

依照调试数据中的转速进行相应设置，笔者得到转速增加和降低时离心式敏感元件 AMESim 模型的压力曲线：转速增加和减小呈现两条不同静态特性曲线，在油压考核点 6.1 bar 处形成一定的迟滞量，迟滞特性仿真曲线如图 4 所示。

#### 3.2 活门摩擦力对迟滞特性的影响

笔者设置转速增加和降低时调准弹簧刚度差为 0.15 N/mm，改变活门摩擦力，仿真得到迟滞特性曲

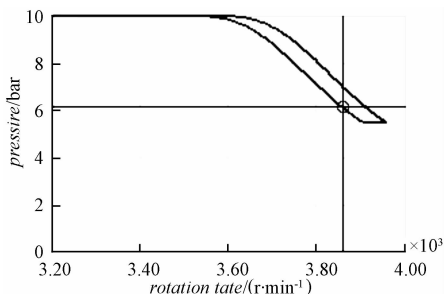


图 4 迟滞特性仿真曲线

线，摩擦力影响对比如图 5 所示。

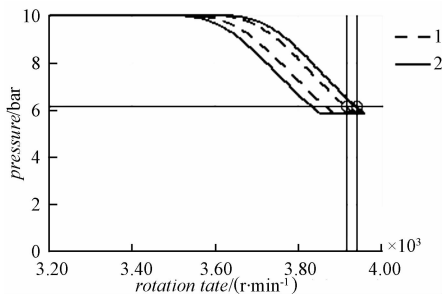


图 5 摩擦力影响对比

曲线 1、2—对应活门摩擦力为 0.2 N、0.4 N

从图 5 中可以看出，随着活门摩擦力的增大，离心式敏感元件的迟滞量增大，活门摩擦力是影响离心式敏感元件迟滞特性的重要因素。通过仿真可以得到，满足某航空发动机用离心式敏感元件的迟滞性能要求的理论活门摩擦力值最大为 0.25 N。

#### 3.3 调准弹簧刚度对迟滞特性的影响

本研究设置活门摩擦力为 0.2 N，改变转速增加和降低时调准弹簧刚度差，仿真得到迟滞特性曲线如图 6 所示。

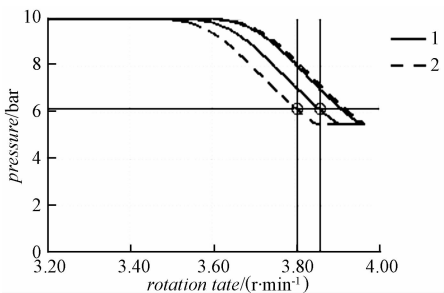


图 6 弹簧刚度差影响对比

曲线 1、2—对应调准弹簧刚度差为 0.15 N/mm、0.3 N/mm

从图 6 中曲线可以看出，随着调准弹簧刚度差的增大，离心式敏感元件的迟滞量增大，调准弹簧刚度差是影响离心式敏感元件迟滞特性的另一重要因素。通过仿真可以得到，满足某航空发动机用离心式敏感元件的迟滞性能要求的调准弹簧刚度差值最大为 0.22 N/mm。

## 4 试验验证

本研究通过选取不同加工状态的活门以及不同迟滞量的弹簧对离心式敏感元件迟滞特性进行试验验证。

### 4.1 活门

设计中,为保证活门灵敏性,均有保持尖边要求(通常 $R0.025\max$ )。由于工作状态下,活门不连续转动,其尖边的一致性(大小、轴向跳动、毛刺去除状况)影响活门无轴向位移时的油压大小。另外,如果活门尖边留存毛刺,则会加剧活门相对摩擦。

活门控油孔状态对比如图7所示。笔者在试验前先用内窥镜检查活门控油孔尖边状态(如图7(a)所示),尖边边缘不规则且有毛刺。装配后笔者通过迟滞特性试验测得迟滞量为1.9%额定转速,迟滞性能不合格;随后分解元件返修活门尖边,内窥镜检查返修后尖边状态(如图7(b)所示)一致性较好,装配元件再次进行迟滞特性试验测得迟滞量为1.3%额定转速,迟滞性能合格。

试验证明通过改善活门尖边状态,可以改善离心式敏感元件的迟滞特性。

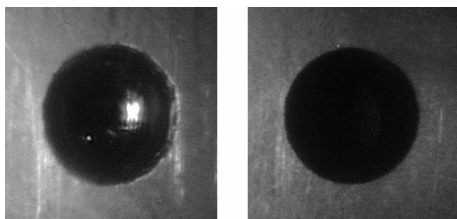


图7 活门控油孔状态对比

### 4.2 调准弹簧

本研究将3个自身迟滞量不同的弹簧分别装配到同一敏感元件进行对比试验,并按照弹簧自身迟滞量分别进行AMESim软件仿真,试验数据如表1所示。

表1 调准弹簧对比试验数据

调准弹簧	1#	2#	3#
自身迟滞量/( $N \cdot mm^{-1}$ )	0.154	0.17	0.304
装配后试验迟滞量/%	1.2~1.5	1.2~1.5	2.9
AMESim 仿真迟滞量/%	1.2	1.3	2.7

弹簧迟滞量为0.304 N/mm时离心式敏感元件迟滞量为2.9%转速,大于许用值1.6%额定转速,仿真数据与试验数据基本一致。

试验证明,通过减少弹簧刚度差,可以改善离心式

敏感元件的迟滞特性。

## 5 结束语

本研究推导了机械离心式转速敏感元件迟滞特性的数学模型,找出影响元件迟滞特性的影响因素,进而采用AMESim软件对模型进行仿真,并通过对不同加工状态的活门尖边和不同刚度差的调准弹簧进行了对比试验。

研究表明:活门摩擦力和调准弹簧刚度差是影响元件迟滞特性的重要因素,仿真得到二者满足某航空发动机用敏感元件迟滞性能要求的临界值,试验证明通过修整活门控油孔尖边和降低调准弹簧刚度差两个方面可满足元件迟滞性能要求。本研究结果对提高某航空发动机用离心式敏感元件迟滞性能合格率有一定的实践价值。

### 参考文献(References):

- [1] 谢小平,张学军,贺孝涛,等.某型航空发动机燃油流量调节器建模与故障仿真[J].航空发动机,2011,37(4):15-19.
- [2] 张玉龙,李胜男,刘金鹏,等.燃油流量调节器流量不稳故障分析与改进[J].失效分析与预防,2014,9(3):189-192.
- [3] 傅强.基于AMESim的某型涡轴发动机燃油调节器建模仿真[J].机械设计与制造,2013(4):252-255.
- [4] 傅强,樊丁.某型涡轴发动机离心飞重伺服组件工作原理与建模仿真研究[J].计算机测量与控制,2013,21(2):509-512.
- [5] 王曦.1种满足控制计划要求的凸轮型面设计方法[J].航空发动机,2013,39(1):1-5.
- [6] 《航空喷气发动机自动控制设计手册》编写组.航空喷气发动机自动控制设计手册(下册)[M].北京:国防工业出版社,1984.
- [7] 苏志善,王大迪.某型航空发动机落压比调节器性能及故障分析[J].航空发动机,2011,37(4):37-39.
- [8] 杨三序,谢煜,王业正.圆柱螺旋弹簧迟滞的检测和补偿[J].大学物理,2007,26(4):38-40.
- [9] 张天哲,董有尔.近代物理实验[M].北京:科学出版社,2004.
- [10] KALLAFETIS P, COSTOPOULOS T. Modeling and simulation of an axial piston variable displacement pump with pressure control[J]. Mechanism and Machine Theory, 1995,30(4):599-612.
- [11] 吴文斐,郭迎清,李睿,等.涡扇发动机液压机械主控制系统建模与仿真分析[J].航空发动机,2011,37(1):16-19.
- [12] PAOLI F,傅耀,王彤,等.发动机入口粒子分离器流场数值模拟及流道改进[J].流体机械,2011(4):10-16, 53.

(下转第1165页)

本文引用格式:

白晓,俞超,白靖华.机械离心式转速敏感元件的迟滞特性建模仿真研究[J].机电工程,2015,32(9):1156-1159,1165.

BAI Xiao, YUN Chao, BAI Jing-hua. Hysteresis characteristic modeling and simulation of mechanical centrifugal speed sensitive element[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(9):1156-1159,1165.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>