

# 柴油机调速器粘性阻尼系数的识别<sup>3</sup>

杨铁皂 方在华 周志立 张文春 常豫平  
(洛阳工学院)

摘要: 粘性阻尼系数是柴油机调速器的一个重要的动态参数。该文根据调速器的线性模型和非线性模型的运动方程介绍了粘性阻尼系数的测试和识别原理。由线性模型导出了阻尼系数的计算公式; 提出了对非线性模型作仿真计算以识别阻尼系数的方法和步骤。结合测试实践, 说明了线性模型和非线性模型识别法的应用情况以及有关调速器粘性阻尼系数的某些试验结论。

关键词: 柴油机; 调速器; 粘性阻尼系数; 识别

## 1 初始拉杆位移激励法试验方案

初始拉杆位移激励法的试验方案是: 在喷油泵试验台上, 将调速手柄置于某一位置上, 调整调速器达某一稳定转速, 此时供油拉杆位于某一平衡位置, 拉杆位移为  $z_0$ 。然后向加大或减小供油方向拉动供油拉杆使其产生一个初位移  $\Delta z_0$ , 然后在无冲击的条件下松开拉杆, 记录拉杆回到原平衡位置的位移时间历程, 如图 1 所示。采用调速器的线性模型或非

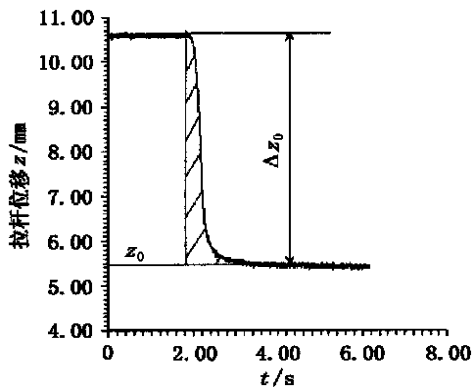


图 1 拉杆对初始位移激励的时间响应试验曲线 ( $F > 1$ )

Fig 1 Time response curve of rack to initial displacement input ( $F > 1$ )

线性模型对试验曲线进行处理即可确定调速器的粘性阻尼系数。改变调速器转速, 重复上述过程, 即可

得到不同转速下的调速器阻尼系数。

## 2 柴油机调速器运动方程

当调速手柄位置一定, 且润滑情况良好忽略摩擦力时, 调速器运动方程为:

$$m_t \ddot{z} + c \dot{z} + F_s - F_c = 0 \quad (1)$$

初始条件为  $t = 0$  时,  $z = z_0 + \Delta z_0, \dot{z} = 0$

式中  $z$ ——供油拉杆位移, 供油量最大时取  $z = 0$ ;  $m_t$ ——供油拉杆及与其有运动联系的零件换算到拉杆上的运动质量;  $c$ ——供油拉杆及与其有运动联系的零件换算到拉杆处的粘性阻尼系数;  $F_s$ ——调速器恢复力;  $F_c$ ——调速器支持力, 是角速度  $\omega$  和拉杆位移  $z$  的函数<sup>[1]</sup>。

对机械式调速器而言, 恢复力是拉杆位移  $z$  和调速弹簧初始变形  $l_0$  的函数, 即  $F_s = F_s(z, l_0)$ 。此处调速弹簧初始变形定义为拉杆位移为零(即调速器转速为零)时调速弹簧的变形, 显然一定的  $l_0$  对应一定的调速手柄位置。当  $l_0$  一定时,  $F_s$  是  $z$  的分段函数<sup>[2]</sup>。

因试验时调速器开始处于平衡状态, 也可以平衡位置作为运动起始点, 将调速器的运动方程写为增量形式:

$$m_t \ddot{\Delta z} + c \dot{\Delta z} + \Delta F_s = 0 \quad (2)$$

初始条件为  $t = 0$  时,  $\Delta z = \Delta z_0, \dot{\Delta z} = 0$

## 3 线性模型识别法

当拉杆位移激励不大且拉杆始终在调速段运动时, 近似认为调速器系统是线性的, 并考虑到实验过程中调速手柄位置不变且  $\omega$  是常数, 于是有

收稿日期: 1999208216

3 国家自然科学基金资助项目(59475028)

杨铁皂, 副教授, 洛阳市 洛阳工学院机械设计系, 471039

$$F_s = \frac{5F_s}{5z} z, \quad F_c = \frac{5F_c}{5z} z$$

式中  $\frac{5F_s}{5z}$ 、 $\frac{5F_c}{5z}$ ——平衡点处恢复力、支持力对拉杆位移的偏导数, 因而调速段,  $\frac{5F_s}{5z}$  等于调速弹簧刚度  $k_0$ 。

代入增量式(2)得

$$z'' + 2FX_0 z' + X_0^2 z = 0 \quad (3)$$

式中  $X_0 = \sqrt{\frac{S_t}{m}}$ ——平衡点处调速器固有圆频率;

$F = \frac{c}{2\sqrt{mS_t}}$ ——平衡点处调速器阻尼比;

$S_t = \frac{5F_s}{5X} - \frac{5F_c}{5X}$ ——平衡点处调速器的稳定性因素。

这是二阶常系数齐次方程, 其解分过阻尼和小阻尼两种情况(临界阻尼在实际系统中不可能发生)。对这两种情况, 分别采用面积拟合法和反应时间拟合法确定  $c$  和  $E$

1) 面积拟合法 过阻尼 ( $F > 1$ ) 情况, 微分方程的解为

$$z = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} \quad (4)$$

式中  $s_{1,2} = -FX_0 \pm X_0 \sqrt{F^2 - 1}$ ;  $C_1 = \frac{-z_0 s_2}{s_1 - s_2}$ ,

$$C_2 = \frac{z_0 s_1}{s_1 - s_2}$$

拉杆位移响应曲线如图 1 所示, 为一单调衰减过程。设曲线下(图中阴影部分)的面积为  $S$ , 则

$$S = \int_0^{\infty} z dt = \left| \frac{2FSz_0}{X_0} \right| \quad (5)$$

由此得

$$F = \left| \frac{X_0 S}{2S z_0} \right| = \left| \frac{S}{2S z_0} \sqrt{\frac{S_t}{m}} \right| \quad (6)$$

$$c = 2m X_0 F = \left| \frac{S S_t}{S z_0} \right| \quad (7)$$

2) 反应时间拟合法 小阻尼 ( $F < 1$ ) 情况, 微分方程的解为

$$z = e^{-FX_0 t} \left[ C_1 \sin(X_0 \sqrt{1-F^2} t) + C_2 \cos(X_0 \sqrt{1-F^2} t) \right] \quad (8)$$

式中  $s_{1,2} = -FX_0 \pm X_0 \sqrt{1-F^2}$ ;  $C_1 = \frac{FSz_0}{\sqrt{1-F^2}}$ ,

$$C_2 = z_0$$

拉杆位移时间响应曲线如图 2 所示, 为振荡衰减过程。第一次达到平衡位置的时间  $S$  称为反应时

间。根据  $t = S$  时,  $z = 0$ , 可由式(8)求得

$$S = \frac{P - \arctg(\sqrt{1-F^2})}{X_0 \sqrt{1-F^2}} \quad (9)$$

因此当采用线性模型处理试验曲线识别粘性阻尼系数时, 具体步骤为

由试验曲线确定原始平衡位置时拉杆位移  $z_0$ , 初始位移激励  $\Delta z_0$ , 曲线下的面积  $S$  或时间  $S$

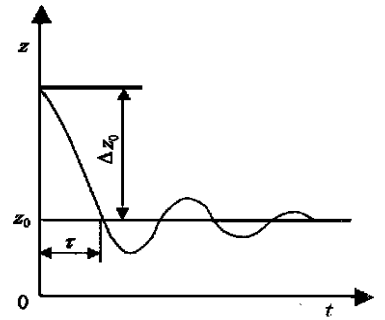


图 2 拉杆对初始位移状态激励的时间响应 ( $F < 1$ )

已知调速弹簧刚度  $k_0$ ; 同时

由  $z_0$  或  $X_0$  可确定支持力对拉杆位移的偏导数<sup>[1]</sup>, 于是可确定原始平衡点的调速器稳定性因素  $S_t$  和固有频率  $X_0$ 。

由式(6)、(7) (当试验曲线单调衰减时) 或(9)、(7) (当试验曲线振荡衰减时) 计算  $F$  和  $c_0$ 。

### 4 非线性模型识别法

上述线性模型法的应用是有局限的。在一般情况下, 即使转速一定, 调速器的运动方程也是非线性的, 这是因为 如果拉杆位移越出了调速段, 则在调速段和非调速段内恢复力对拉杆位移的导数不等, 而在两个区段的临界拉杆位移上, 恢复力导数成为无穷大<sup>[2]</sup>; 支持力对拉杆位移是非线性的<sup>[1]</sup>。

采用非线性模型处理试验曲线以识别粘性阻尼系数的关键是利用非线性模型对调速器进行动态过程仿真, 为此需将方程(1)作降阶处理化为一阶微分方程组如下:

$$\begin{cases} x'' = (-cx - F_s + F_c) \ddot{\theta}_n \\ x = z^a \end{cases} \quad (10)$$

初始条件为  $t = 0$  时,  $z = z_0 + \Delta z_0, x = 0$

解此方程组识别调速器粘性阻尼系数的具体步骤如下:

由试验拉杆位移曲线确定原始位置时的拉杆位移  $z_0$ , 初始拉杆位移激励  $\Delta z_0$ , 曲线下面积  $S$  或调速器反应时间  $S$

根据调速器在原始平衡位置的静平衡条件, 由已知  $z_0$  和  $X_0$  确定调速弹簧初始变形  $l_0$ , 方法是

由  $z_0$  和  $X$  计算  $F_c$ , 搜索  $l_0$  使  $F_s = F_c$  [13]。

初取一个粘性阻尼系数, 利用数值解法解微分方程组 (10), 即对拉杆初始位移激励的动态响应过程作仿真计算, 得出拉杆位移的时间历程, 再通过数值积分求出拉杆位移时间历程曲线下的面积 (当  $F > 1$  时), 或求出反应时间 ( $F < 1$  时), 再与实测的曲线下的面积  $S$  或反应时间  $S$  作比较, 若不满足精度要求, 则按一定的寻优方法重新确定一个阻尼系数, 重复以上步骤, 直到满足给定精度时所选的阻尼系数数值即为实测值。

实际试验时, 往往控制拉杆位移始终在调速段, 此时, 因恢复力对于拉杆位移的导数等于调速弹簧的刚度, 故调速器运动方程可以采用增量形式, 将式 (2) 改写为

$$m \dot{z} + c z + k z - F_c(z_0 + z) + F_c(z_0) = 0 \quad (11)$$

解此方程, 不需求解调速弹簧初始变形  $l_0$ , 分析过程可以简化。

## 5 测试实例与主要结论

利用以上试验方案在高精度喷油泵试验台上某拖拉机发动机的调速器测取了 130 多条拉杆位移对初态激励的响应曲线。试验分别在不同的调速器转速, 不同的拉杆原始平衡位置, 不同方向和不同大小的拉杆初始位移, 喷油泵喷油或不喷油状态等情况下进行; 并分别以线性模型和非线性模型对该调速器的粘性阻尼系数作了识别。图 3 给出了在不同转速下拉杆初始位移在减小供油方向, 喷油泵在供油状态下测试并分别以线性模型和非线性模型识别所得的结果。通过这些测试实例和理论分析, 可得如下主要结论: 1) 由线性模型识别法的原理可知, 该法仅适用于拉杆位移始终在调速段的情况, 且拉杆初

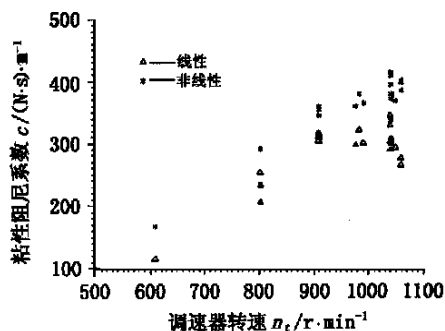


图 3 两种模型的识别结果

Fig 3 Identification results by two models

始位移的取值对测试精度有一定影响: 若初始位移激励小则较符合线性模型, 但响应曲线下的面积的测量误差相对增大; 初始位移激励大则情况相反。2) 非线性模型识别法可适用于调速器的任何工作点和初始拉杆位移激励, 但最好还是将拉杆位移控制在调速段, 而将初始位移量尽可能取大一些, 以利于提高测试和识别精度。3) 测试结果表明, 线性模型较非线性模型的识别结果粘性阻尼系数较小且离散度略大, 尤其是高转速时。4) 拉杆初始位移激励往减小供油方向比往增大供油方向时调速器粘性阻尼系数总体略有偏大。5) 在 600~ 1 075 r/min 范围内, 所试调速器的粘性阻尼系数是随转速的提高而增大的。

### [参 考 文 献]

- [1] 杨铁皂, 方在华等. 泰山 225 拖拉机发动机调速器支持力特性的分析. 洛阳工学院学报, 1997, 18(4): 37~ 42
- [2] 方在华, 杨铁皂等. 机械式调速器恢复力/拉杆位移特性的分析. 洛阳工学院学报, 1996, 17(1): 26~ 31
- [3] 常豫平. 拖拉机发动机动态参数辨识和调速器性能仿真. [硕士学位论文]. 洛阳: 洛阳工学院, 1997

## Identification of Viscosity Damping Coefficient of Governor in Diesel Engine

Yang Tiezao Fang Zaihua Zhou Zhili Zhang Wenchun Chang Yuping

(Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471039)

**Abstract:** Viscosity damping coefficient is an important dynamic parameter of diesel engine. In this paper the test and identification theory of viscosity damping coefficient were introduced from the linear and nonlinear model of governor. From the linear model the calculating formula and process for the damping coefficient were derived. The method and step to identify damping coefficient by simulating calculation of nonlinear model were developed. Combining the test result and the practical conditions of the linear and nonlinear model identification, some testing conclusions concerning the viscosity damping coefficient of governor were described.

**Key words:** diesel engine; governor; viscosity damping coefficient; identification