

# 跟踪微分器在航空发动机控制系统中的应用研究

杨帆<sup>1,2</sup>,樊丁<sup>1</sup>,彭凯<sup>1</sup>,傅强<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要:**对自发动机转速信号提取转速加速度信息的微分算法进行了研究,对比、分析了跟踪微分器和统一一阶差分算法的性能差异。在此基础上,提出了基于转速补偿的双跟踪微分器算法。仿真研究表明,这一双跟踪微分器的跟随性和稳定性均较为理想。

**关键词:**航空发动机;加速控制算法;跟踪微分器;转速补偿;控制仿真

**中图分类号:**V249 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-8829(2013)10-0148-04

## Application Research on Tracking Differentiator In the Aeroengine Control System

YANG Fan<sup>1,2</sup>, FAN Ding<sup>1</sup>, PENG Kai<sup>1</sup>, FU Qiang<sup>1</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** A differential algorithm for extracting acceleration information from the speed signal of engines is researched. Firstly, the difference in performance between the tracking differentiator and the traditional first-order differential algorithm is analyzed and compared, and then a dual tracking differentiator based on the speed compensation is presented. The simulation results show the proposed dual tracking differentiator is more satisfactory in the traceability and stability.

**Key words:** aeroengine; acceleration algorithm; tracking differentiator; speed compensation; control simulation

现代航空发动机控制中,基于转子转速加速度的控制方法逐渐被采用,如发动机启动和加速时采用转速变化率控制<sup>[1-5]</sup>,转速变化率控制对于同一台发动机而言,即使它已进入老龄期或性能已退化,但以转子转速、温度、压力等变量表示的加速性要求应是一致的;另外,即使存在由于制造误差和材料差异等原因引起的发动机间的差异性,对于同一型号的发动机,其加速性要求也应是一致的。

转速变化率可以采用转速加速度传感器测量,但目前国内尚无转速加速度传感器货架产品;另一方面,加装传感器将使得发动机控制系统的复杂性增大、可靠性降低。当前转速变化率是通过计算转子转速在其运行时间段内的差分而得到的,然而由于转速传感器的结构及受航空发动机工作的环境及自身工作状态的影响,被测转速信号中含有一定程度的噪声干扰,采用一般的微分方法获得加速度信息势必造成噪声信号的

放大,从而淹没了有用的、真实的微分信号。

为解决这一技术问题,笔者采用了跟踪微分算法<sup>[6-10]</sup>以从被噪声污染的转速信号中提取转子的真实加速度信号,并对所提取的转速微分信号的跟随性和稳定性进行了分析。

### 1 跟踪微分器

典型的跟踪微分器的基本结构如图1所示<sup>[6-12]</sup>。即跟踪微分器依据所输入的转速信号 $n(t)$ ,输出该信号的估计值 $n'(t)$ ,同时产生近似的微分信号 $\dot{n}(t)$ 。

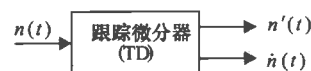


图1 跟踪微分器

跟踪微分器的离散形式如下<sup>[11-12]</sup>:

$$\begin{cases} fh = fhan(x_1(k) - n(k), x_2(k), r, h_0) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + h \times x_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + h \times fh \end{cases} \quad (1)$$

式中,

收稿日期:2012-12-05

作者简介:杨帆(1974—),男,重庆渝北人,博士研究生,讲师,主要研究方向为航空发动机控制。

$$\text{fhan}(x_1(k) - n(k), x_2(k), r, h_0) = - \begin{cases} r \times \text{sign}(a), |a| > d \\ r \times \frac{a}{d}, |a| \leq d \end{cases}$$

$$a = \begin{cases} x_2 + \frac{(a_0 - d)}{2} \text{sign}(y), |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h_0}, |y| \leq d_0 \end{cases}$$

$$d = r \times h_0, d_0 = h_0 \times d, y = x_1 - n + h_0 \times x_2,$$

$$a_0 = \sqrt{d^2 + 8 \times r \times |y|}$$

式中,  $n(k)$  为输入的实际转速信号;  $x_1(k)$  为跟踪微分器输出的转速信号估计值;  $x_2(k)$  为跟踪微分器输出的微分信号(转子加速度);  $h$  为积分步长;  $h_0$  对噪声起滤波作用, 称为滤波因子;  $r$  为速度因子, 决定跟踪的速度,  $r$  越大,  $x_1(k)$  将更快地跟随信号  $n(k)$ , 但当  $n(k)$  被噪声污染时,  $x_1(k)$  也会被噪声污染, 为了滤掉  $n(k)$  中的噪声, 应选取适当的  $h_0$ , 然而  $h_0$  越大, 会使  $n(k)$  的相位损失越大。

## 2 跟踪微分器算法分析

### 2.1 算法分析背景

为了整定跟踪微分器的性能, 直接使用了某型航空发动机地面试车过程所记录的一组真实的转速数据来分析、比较, 通过简单的一阶差分 and 通过微分跟踪器后输出的转子加速度信号。跟踪微分器参数设定如下:  $h=0.1$ ,  $r=10.0$ ,  $h_0$  分别取 0.2 和 0.16, 分析的信号为该型发动机启动过程 ( $n_2=16\% \sim 72\%$ )、慢车状态 ( $n_2=72\%$ )、慢车到最大的加速过程 ( $n_2=72\% \sim 100\%$ )、最大及以上状态 ( $n_2=100\%$ ) 等 4 个阶段的发动机高压转子转速信号。

### 2.2 算法分析结果

相应算法的计算结果如图 2 ~ 图 5 所示。图中, 横轴为时间(s), 纵轴为高压转子加速度信号(%/s)。

点线为采用一阶差分法所得的转子加速度信号, 实线为  $h_0=0.2$  (跟随性较好) 的跟踪微分器输出的转子加速度信号, 虚线为  $h_0=1.6$  (稳定性较好) 的跟踪微分器输出的转子加速度信号。

从图 2 ~ 图 5 可以明显看出, 由一阶差分得到转子加速度的噪声远大于由跟踪微分器得到的转子加速度的噪声;  $h_0$  较小时, 跟踪微分器的跟随性较好; 而  $h_0$  较大时, 跟踪微分器稳定性较好。

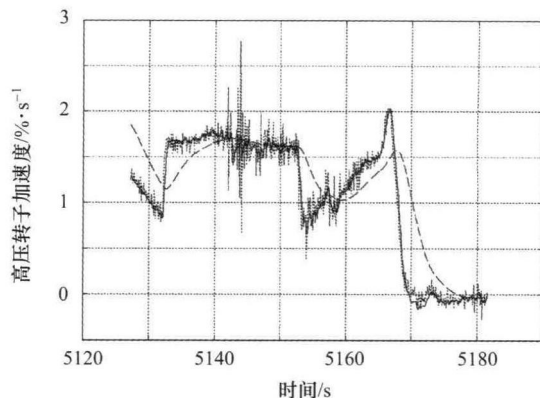


图 2 启动过程各算法对比图

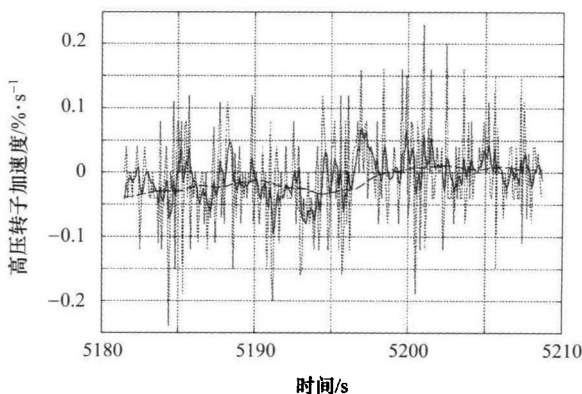


图 3 慢车状态各算法对比图

(上接第 143 页)

## 5 结束语

利用齿轮箱表面选定区域网格节点的法向振动速度, 预测了在啮合激励力作用下齿轮箱体表面辐射噪声的声压级与声功率级及其分布情况。通过实测证明了该预测方法的有效性, 利用该方法可以对齿轮箱在设计阶段进行结构优化(如增强该区域结构刚度等), 以实现齿轮箱减振降噪的目标。此外, 通过提高表面预测区域的测点分布密度, 可以进一步提高辐射噪声的预测精度。齿轮箱辐射噪声预测不需要借助实物样机, 因此在其结构设计提供优化参考的同时, 节约了时间和成本。

参考文献:

- [1] Mitchell L D, Daws J W. A basic approach to gearbox noise prediction[J]. SAE Transactions, 1991; 3366 - 3379.
- [2] Mitchell L D, David J W. Proposed solution methodology for the dynamically coupled nonlinear geared rotor mechanics equations[J]. Journal of Vibration, Acoustics Stress and Reliability in Design, 1985, 107(1): 112 - 116.
- [3] 王玉芳, 童忠钊. 圆柱撞击发声机理的研究[J]. 振动、测试与诊断, 1991, 11(1): 16 - 22.
- [4] 王玉芳, 童忠钊. 齿轮误差对齿轮加速度噪声的影响[J]. 振动、测试与诊断, 1993, 13(4): 1 - 10.
- [5] 林龙, 李红云, 陈大跃. 地铁齿轮箱振动与噪声计算分析[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(2): 37 - 39.
- [6] 李连进, 杨传民. 齿轮箱辐射噪声的预测[J]. 制造技术与机床, 2007(8): 76 - 78.

□

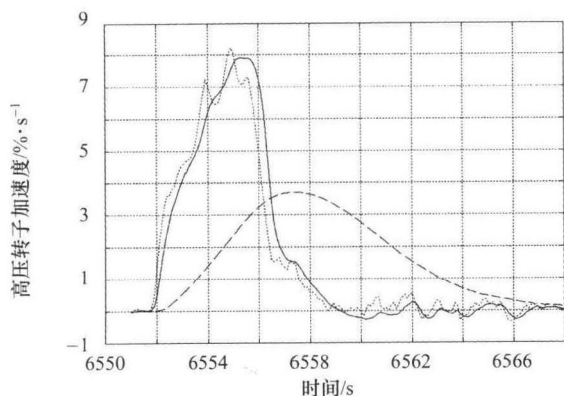


图4 慢车到最大的加速过程各算法对比图

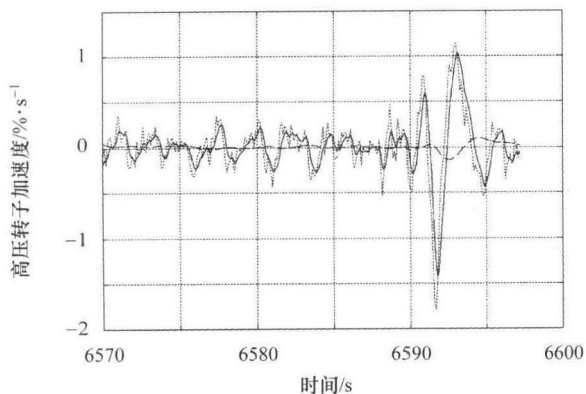


图5 最大状态各算法对比图

### 3 基于转速偏差补偿的跟踪微分器

为了兼顾转子加速度信号的跟随性与稳定性,笔者提出了利用跟踪微分器输出的转速偏差信号来补偿微分信号(转子加速度信号)滞后的方法,即基于转速偏差补偿的双跟踪微分器算法,其结构如图6所示。

由跟踪微分器算法可知,当转速偏差  $e(t)$  趋于0时,跟踪微分器0即可完全跟踪系统输入的转速信号  $n(t)$ ,此时跟踪微分器0输出的微分信号  $\dot{n}_0(t)$  即为转速的微分信号  $\dot{n}(t)$ 。

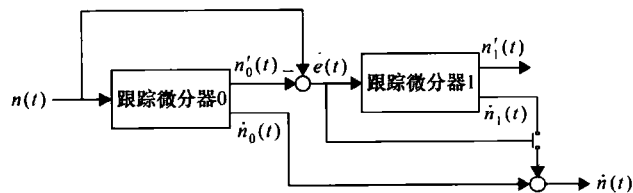


图6 基于转速偏差补偿的双跟踪微分器

当  $e(t)$  有差时,  $\dot{n}_0(t)$  并不能准确反映转速的微分信号  $\dot{n}(t)$ ,而与真实的  $\dot{n}(t)$  存在一定的偏差,通过引入跟踪微分器1,可以使得  $n'_1(t)$  趋于  $e(t)$ ,从而双跟踪微分器完全跟踪了输入的转速信号,因而  $\dot{n}_0(t) + \dot{n}_1(t)$  近似等于  $\dot{n}(t)$ ,从而得到转速的微分信号  $\dot{n}(t)$ 。

现选择跟踪微分器0的  $h_0 = 0.16$ ,跟踪微分器1的  $h_0 = 0.2$ ,两个微分器的  $h$  和  $r$  分别为0.1和10.0,跟踪微分器1的接通条件为慢车状态  $|e(t)| \geq 0.1$ ,最大状态  $|e(t)| \geq 0.2$ ;断开条件为慢车状态  $|e(t)| \leq 0.08$ ,最大状态  $|e(t)| \leq 0.16$ ;慢车和最大状态之间的接通断开条件按这两个状态线性插值,重新计算2.2节的启动、慢车、慢车到最大、最大状态,得到图7~图10。图中,横轴为时间(s),纵轴为高压转子加速度信号(%/s),点线为采用一阶差分法所得的转子加速度信号,实线为双跟踪微分器输出的转子加速度信号。

从图7~图10可以看出,基于转速偏差补偿的双跟踪微分器的跟随性和稳定性均较为理想。图10中

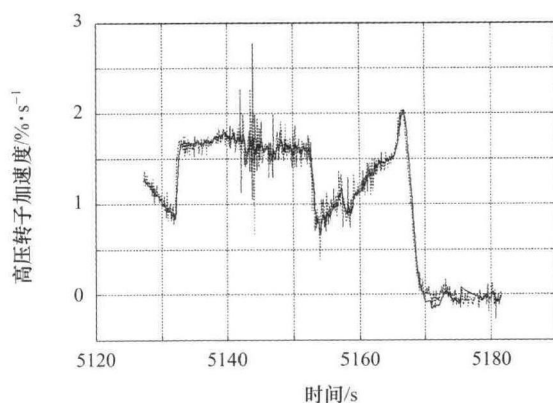


图7 启动过程

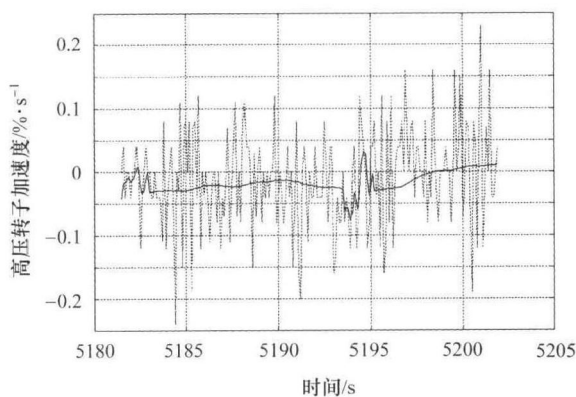


图8 慢车状态

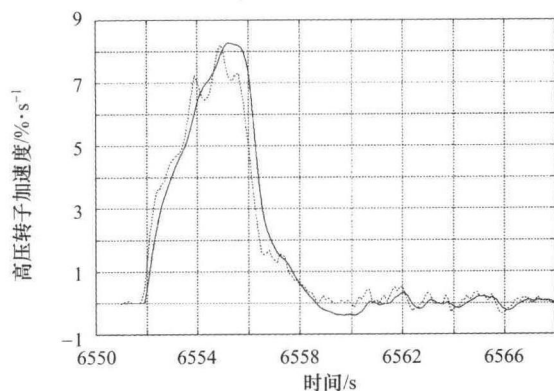


图9 慢车到最大

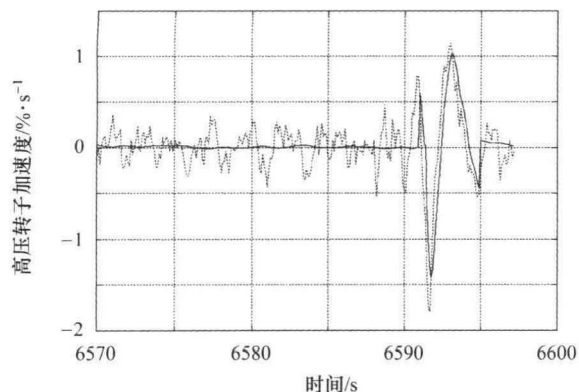


图10 最大状态

发动机最大状态时,在 6590 ~ 6595 s 间,转子的加速度有明显的、较大幅度的波动,经查该发动机试车记录信息,在这段时间发动机处于加力接通的过程,从而导致转速有约 1% 的波动,这也恰恰反映了基于转速补偿的双跟踪微分器能灵敏地跟踪发动机转子加速度的变化。

## 4 结束语

主要研究了如何利用跟踪微分器实时、高精度地从转速信号中提取出加速度信息的方法。并将跟踪微分器跟踪的结果与传统的一阶差分法所获得的加速度信息进行了比较分析,结果表明:当发动机平稳运行时,跟踪微分器输出的加速度比一阶差分法获得的加速度信号能更好地反映转速加速度真值的变化情况;但是当转速有较大变化时,虽然跟踪微分器输出的转速加速度对噪声有明显的抑制效果,但同时会造成转速加速度信号的滞后。所提出的根据转速偏差修正转速加速度的方法,可以满足实际使用的要求。

### 参考文献:

- [1] (美)赵连春,杰克·马西利. 飞机发动机控制——设计、系统分析和健康监视[M]. 张新国,译. 北京:航空工业出版社,2011.
- [2] Jaw L C, Garg S. Propulsion control technology development in the United States—a historical perspective[R]. NASA-TM-2005-213978, 2005.
- [3] 杨征山,李胜泉,章霖官. 涡轴发动机动力涡轮转速控制回路方案研究[J]. 航空发动机,2005,31(2):46-50.
- [4] 陈小磊,郭迎清,陆军. 基于修改加速控制规律的航空发动机寿命延长控制[J]. 航空动力学报,2011,26(9).
- [5] 张绍基. 航空发动机控制系统的研发与展望[J]. 航空动力学报,2004,19(3):375-382.
- [6] 刘伟,朱斌,樊键,等. 跟踪微分算法在半捷联稳定平台中的应用研究[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(2):35-38.
- [7] Wang X H, Chen Z Q, Yuan Z Z. Design and analysis for new discrete tracking-differentiators[J]. Applied Mathematics - A Journal of Chinese University, 2003, 18(2): 214-222.
- [8] 张海波,孙健国,孙立国. 一种涡轴发动机转速抗扰控制器设计及应用[J]. 航空动力学报,2010,25(4).
- [9] 成研,秦永元,周琪. 跟踪微分器在里程仪数据处理中的应用研究[J]. 弹箭与制导学报,2010,30(3):52-54.
- [10] 李志刚,杜振辉,王宝光. 跟踪—微分器在自主巡航系统中的设计与应用[J]. 系统仿真学报,2006,18(2).
- [11] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 科学前沿,2007,1(1).
- [12] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策,1998,13(1):19-23.
- [13] Desevaux P, Lanzetta F. Computational fluid dynamic modeling of pseudo-shock inside a zero-secondary flow ejector[J]. AIAA Journal, 2004, 42(7): 1480-1483.
- [14] Singer R A. Estimating optimal tracking filter performance for manned maneuvering target[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1970, 6(4): 473-483.
- [15] Daeipour E, Bar-Shalom Y. IMM tracking of maneuvering target in the presence of glint[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 1998, 34(3).
- [16] Chen C T. Linear System Theory and Design[M]. New York: Oxford University Press, 1998.

□

(上接第 147 页)

## 5 结束语

通过声波测温技术来测量炉膛内的温度,其安全性、可靠性和稳定性都胜于其他测温方法。提出的一种非侵入式声波测温系统,其测量误差小,范围大(0 ~ 2000 ℃),操作更换简单方便,且提供了可视化的图形界面,能直观地展示温度的变化,如等温线的动态分布图、区块温度随时间的变化分析、独立路径显示等,并可根据用户的需要显示其他信息,是一款极具人性化的测温系统。

### 参考文献:

- [1] 杨永军,蔡静. 特殊条件下的温度测量[M]. 北京:中国计量出版社,2009.
- [2] 王魁汉. 温度测量技术的现状及展望(上)[J]. 基础自动化,1997(1):1-6.
- [3] 王魁汉,李友,王柏忠. 温度测量技术的最新动态及特殊与实用测温技术[J]. 自动化仪表,2001,22(8):1-7.
- [4] 马文蔚,周雨青. 物理学教程(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [5] 周世勋. 量子力学教程[M]. 北京:高等教育出版社,1979.
- [6] 邓明德,尹京苑,刘西垣,等. 黑体辐射公式的积分分解及应用[J]. 遥感信息,2002(1).
- [7] 田丰,邵富群,王福利. 声波法工业炉温度场检测技术综述[J]. 仪表技术与传感器,2002(4):52-54.

□