

文章编号: 1000-8055(2007)08-1396-05

航空发动机数控系统中 LVDT 传感器信号处理 及在线故障检测

江 澄^{1,3}, 彭立志^{2,3}, 孙健国¹

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 北京航空航天大学 软件学院, 北京 100083;
3. 中国一航动力控制系统研究所, 无锡 214063)

摘 要: 通过对线位移差动变压器(LVDT)信号处理电路的深刻研究,给出了芯片发热、温漂、信号精度等问题的一般解决方法,提出了一种通过软、硬件结合,在不增加外围器件的情况下对 LVDT 传感器进行在线故障检测的定值判断法.发动机台架试验结果表明,所提出的方法是行之有效的.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 数控系统; AD598; 线位移差动变压器 (LVDT); 在线检测

中图分类号: TP212

文献标识码: B

Signal processing and on line failure monitoring of LVDT sensor on aero-engine control system

JIANG Cheng^{1,2}, PENG Li zhi^{2,3}, SUN Jian guo¹

- (1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Software, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083, China; 3. Aviation Motor Control System Institute, China Aviation Industry Corporation I, Wuxi 214063, China)

Abstract: After in depth study of LVDT signal processing circuit, a basic solution for problems, such as: chip fever, temperature drift and signal accuracy, were presented. Meanwhile, an on line monitoring method combining software and hardware was also proposed without addition of external components. The result of engine bench experiment proves the feasibility of this method.

Key words: aerospace propulsion system; aero engines, digital control, AD598, linear variable differential transformer (LVDT), on line monitor.

LVDT/RVDT(线性/角度位移差动变压器)主要用于对线位移/角位移进行测量,具有精度高、线性度高、重复性好等特点^[1],在航空发动机数字控制系统中,广泛用于对油门杆位置、油针位

置、导叶位置、喷口位置等线/角位移进行精确测量与控制.

在实际工程运用中,通常采用 AD 公司生产的集成 LVDT/RVDT 信号处理芯片 AD598^[2]进

收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-03-20

作者简介: 江澄(1969),男,江苏江阴人,博士生,中国一航动力控制系统研究所高工,主要从事航空动力控制研究.

行处理. AD598 自身集成了内部振荡器、电压基准, 仅需少量几个外围无源元件就能完成对 LVDT/RVDT 的激励和信号处理, 并直接输出与位移/角度成正比的直流电压, 芯片集成度高, 电路设计极为方便. 但是在使用中使用不当会影响信号精度, 另外不合理的传感器故障判断方法也直接影响 AD598 的运用范围. 本文结合 AD598 进行 LVDT/RVDT 信号处理及故障检测的工程研究, 以提高 LVDT/RVDT 信号处理的精度, 解决故障检测的难题.

1 AD598 工作原理

如图 1 所示, AD598 通过内部的低失真正弦振荡器产生一个固定频率、固定幅值的正弦波, 经放大后作为激励信号驱动 LVDT 的初级线圈, 再通过可移动的磁芯耦合到 LVDT 串联的两个次级线圈上, 产生两个同频率的正弦波 (V_A , V_B). LVDT 的磁芯与其所感应的机械位移形成一定的硬连接关系, 当磁芯发生位移时, 两个次级线圈耦合到的正弦波的幅值发生变化, 且 $(V_A - V_B)$ 正比于磁芯位移即外部机械位移. AD598 通过同步测 V_A 与 V_B 的幅值之差, 在内部进行 $\frac{(V_A - V_B)}{(V_A + V_B)}$ 的运算, 运算结果经滤波器滤波后, 通过运算放大, 输出一个与位移成正比的电压^[3].

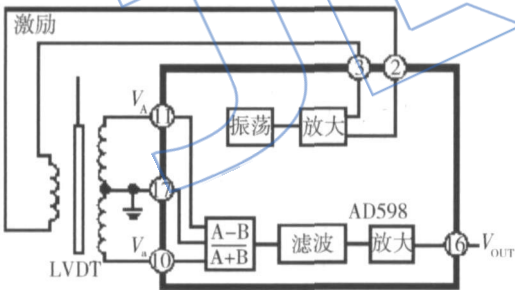


图 1 AD598 工作原理图
Fig.1 AD598 functional block diagram

2 工程中激励电压幅值、频率处理

AD 公司器件手册上 AD598 与外部 LVDT 连接关系如图 2 所示^[4].

AD598 可以产生频率从 20 Hz 到 20 kHz, 幅值为 2V_{rms}(均方根值)到 24 V_{rms}的正弦波激励信号, 而 LVDT 正常工作需要激励电压频率一般为 LVDT 测量子系统机械带宽的 10 倍, 一般选为 3 000 Hz, 则图 2 中的 C_1 值由下式求出: $C_1 = 35 \text{ Hz} / 3\,000 \text{ Hz} (\mu\text{F})$. AD598 的 V_{EXC} 由外围电阻

R_1 调节, 对应关系见图 3^[5].

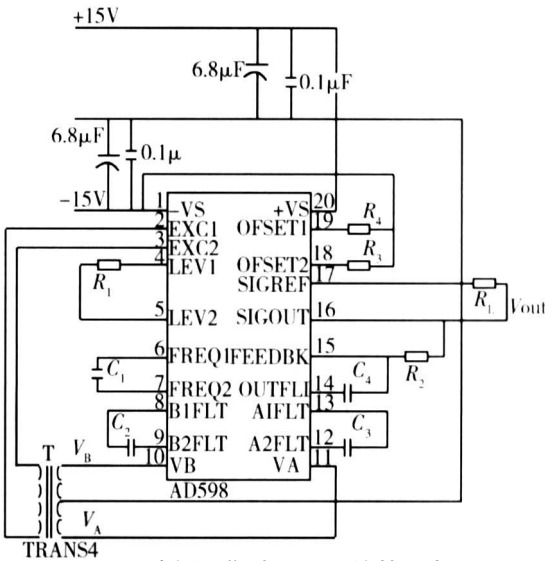


图 2 双电源工作时 AD598 连接示意图

Fig. 2 Interconnection diagram for dual supply operation

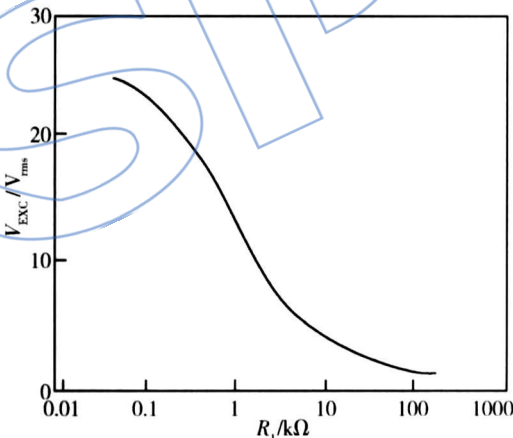


图 3 AD598 的 V_{EXC} 与 R_1 对应关系图

Fig. 3 Excitation voltage V_{EXC} vs. R_1

2.1 激励电压幅值的选择

LVDT 使用手册提供特性参数为激励幅值 $(12 \pm 0.1) \text{ V}_{\text{rms}}$ 时测得, 因此系统常常要求 AD598 激励幅值为 $(12 \pm 0.1) \text{ V}_{\text{rms}}$. 在工程应用中, 发现 AD598 芯片发热严重, 经常损坏. 其原因就在于 AD598 激励输出到 LVDT 上, 输出的 V_{EXC} 越大, 其本身耗散功率也越大, AD598 发热情况就越严重, 故障率就越高. 根据图 3 所示曲线调整 R_1 , 将 V_{EXC} 降到 3V, AD598 发热明显好转, 长时间工作未出现故障.

由此, AD598 的激励电压 V_{EXC} 应根据 LVDT 的特性选定. 在保证铁芯磁感应强度的工作点处在磁化曲线的线性段的前提下^[6], V_{EXC} 应在 2 V_{rms} 到 $3.5 \text{ V}_{\text{rms}}$ 的范围内, 较低的 V_{EXC} , 将有利于提高

信号处理电路的可靠性;尤其是在系统体积要求严格,又需要同时处理多路 LVDT/RVDT 时,适当降低 V_{exc} 有着积极意义.

2.2 电容和布线方式对激励频率的影响

由于普通陶瓷电容的电容值存在较大误差,选用体积较大的低温漂精密电容并根据输出频率进行电容筛选,满足了激励频率要求.但由于低温漂精密电容体积大,不利于布局、走线,电容只能放置于 AD598 芯片旁边,通过较长的印制线与调整激励频率的 6, 7 脚相连.由于回路中耦合了部分干扰信号,输出的激励信号上叠加了高频扰动,最终处理信号随时间、温度变化出现漂移.一般从消除地平面高频干扰信号形成的耦合方面来解决这个问题,具体的实现方法有两种: (1) 在布线时将电容的引脚与 AD598 的 6, 7 引脚不经过印制板走线而直接连在一起; (2) 在电路设计时选用贴片电容,布线时将贴片电容放在 AD598 器件的背面,尽量缩短电容与 AD598 之间的印制板走线.第 1 种方法在实际应用中工艺上比较难于实现,而第 2 种方法虽然由于电容容值随温度漂移造成激励频率发生变化,但由于 AD598 对信号处理不受激励频率的低频波动影响,最终处理信号不随时间、温度漂移,完全满足系统要求.

AD598 激励电源的频率偏差对最终测量位移并不会带来明显的误差.因此,在设计中可以设定一个较大范围的激励频率要求,如: $3\,000\text{ Hz} \pm 500\text{ Hz}$,再根据这个频率在温度系数较小的电容中对电容值进行筛选,使得最终激励频率较接近 $3\,000\text{ Hz}$ 即可.电容应选用表贴电容,贴装在 AD598 背面的 6 脚和 7 脚之间,这样能最大限度地减少耦合回路,同时 AD598 芯片下应禁止走高频数字信号,这样才能防止激励信号受到干扰.

3 电源输出对信号精度的影响

为了获得最大的测量精度,AD598 的输出值应尽量与 A/D 转换芯片的输入范围接近,AD598 的输出值增益是由图 2 中 R_2 调节的. R_2 的阻值可由以下方法求得

对于一个灵敏度为 S , 满度位移为 d 的 LVDT, AD598 的输出电压计算公式如下:

$$V_{\text{OUT}} = S \times \frac{V_{\text{PRI}}}{(V_A + V_B)} \times 500 \times R_2 \times d$$

解出 R_2

$$R_2 = \frac{V_{\text{OUT}} \times (V_A + V_B)}{S \times V_{\text{PRI}} \times 500 \times d}$$

图 2 中 R_3, R_4 用于设定 AD598 输出的偏置电压 V_{os}

$$V_{\text{os}} = 1.2 \times R_2 \times \left(\frac{1}{R_3 + 5} - \frac{1}{R_4 + 5} \right)$$

在不需要偏置的情况下, R_3, R_4 开路.

由文献[5]可知 AD598 采用了计算 LVDT 输出信号差和之比的方法对温漂进行了很好的补偿,但在研究中发现,当采用图 2 接线对 LVDT/RVDT 信号进行采集时,在 $-55 \sim 125\text{ }^\circ\text{C}$ 的工作温度范围,信号最大温漂能达到量程的 2%,对整个数控系统的控制功能和精度都可能产生影响.经过大量试验后,发现 AD598 和 LVDT/RVDT 传感器如图 2 连线时,由于 AD598 利用 R_3, R_4 , 从 -15 V 进行分压,对 AD598 输出进行偏置,而二次电源的稳定性较差,其电压值随负载、温度变化较大,电源输出的温漂直接造成了 AD598 的温度漂移.因此,在工程运用中,电源的输出精度、稳定性应满足信号的要求,或将 R_3, R_4 开路,而在外围通过运放,从精密电压采样实现 AD598 输出偏置,从而保证信号采集的精度要求.

4 传感器断线检测

航空发动机数字控制要求对重要传感器进行在线检测及故障诊断,对 LVDT 传感器,现有的方法是在传感器的各个线圈上加激励信号,通过对其采样来判断传感器的各个线圈是否完好.这种检测方法可直接判断传感器及连线的状态,但占用大量硬件资源,且增加的检测电路如发生故障,将直接影响采集电路的工作,因此降低了控制器的可靠性.本文结合发动机工作状态,通过大量实践,总结出一套实用的 LVDT/RVDT 断线检测方法,并进行了验证.

某型发动机数控系统在油针上装有 LVDT 传感器,测量范围 $0 \sim 20\text{ mm}$,经 AD598 处理后转化成 $0 \sim 5\text{ V}$: 当 LVDT 为 0 mm 时, CPU 采集读数为 0; 当 LVDT 为 20 mm 时, CPU 采集读数为 5. LVDT 传感器使用量程为 $0.5 \sim 19.5\text{ mm}$, 对应 CPU 读数为 $0.125 \sim 4.875\text{ V}$.

当 LVDT 发生断线故障时,AD598 输出值会根据不同的断线情况发生相应的变化.当 AD598 激励信号的正端“激励+”或负端“激励-”断线, LVDT 初级线圈无激励,次级线圈也无信号输出, V_A, V_B 近似为 0, $(V_A + V_B)$ 也近似为 0, AD598 输出极值.但由于两个线圈上会耦合一些外部干扰信号, V_A, V_B 不完全为 0, 在 LVDT 处

于不同位置, 两个线圈耦合量会有不同, $(V_A - V_B)$ 会出现符号差, 因此经偏置后输出值可为 5 或 0. 当次级线圈 A 返回端的信号正端 V_A 线断, 则 V_A 为 0, $\frac{(V_A - V_B)}{(V_A + V_B)}$ 为 -1, 最终输出为 0; 同理, 当次级线圈 B 返回端的信号正端 V_B 线断, 则 V_B 为 0, $\frac{(V_A - V_B)}{(V_A + V_B)}$ 为 1, 最终输出为 5. 当 V_A, V_B 同时断线, 则 V_A, V_B 为 0, $\frac{(V_A - V_B)}{(V_A + V_B)}$ 为 0 (除法错误), 最终输出为中间值 2.5. 当次级线圈返回端的信号负端(地线)断线时, 结果同 V_A, V_B 同时断线. 0, 2.5, 5 作为极值和中间值, 可作为 LVDT 断线故障的判断依据.

在某型发动机数控系统对油针位置传感器故障检测方案中, 我们通过对 LVDT 传感器的 5 根输入、输出线进行各种人为断线组合测试, 记录各种情况下 CPU 读数变化如表 1 所示.

表 1 不同断线组合下 CPU 读数

Table 1 Display data of CPU on different broken line condition

V_B	V_A	激励+	激励	地	V_{OUT}
/	—	—	—	—	5
—	/	—	—	—	0
/	/	—	—	—	2.5
—	—	/	—	—	5
—	—	—	/	—	5
—	—	/	/	—	0
/	—	/	/	—	5
/	—	/	—	—	5
—	/	/	—	—	0
/	—	—	/	—	5
—	/	—	/	—	0
—	—	—	—	/	2.5
/	—	—	—	/	2.5
/	/	—	—	/	2.5
/	/	/	—	/	0

注: (PC 机显示为 0~ 5V) (“/” 表示断开, “—” 表示正常输入)

从表中可以看出, 各种组合下的断线与前面的计算是吻合的. 根据表 1, 我们制定了如下的故障检测方案.

在发动机起动前, 油针处于最小位置, CPU 采集读数为 0.125; 此时, 如发生断线, CPU 采集读数将变为 0, 2.5, 5 这 3 个值之一, BIT (Build In Test) 软件可判断断线故障. 这种方案可满足

系统飞行前 BIT 的要求.

起动后, 如在油针处于运动时发生断线, 采集数据变化同表 1, 软件的在线 BIT 功能可通过斜率和极值判断法诊断出传感器信号斜率过大, 会超过极值, 据此判为传感器故障, 并进入故障处理程序.

当油针正好停在 10mm 时(此时 CPU 读数正好为 2.5), 如发生表 1 中所有读数不为 2.5 的断线情况, 可同样通过在线 BIT 诊断出来, 进入故障程序; 如发生所有读数为 2.5 的断线情况, 由于故障值与正确值相同, 且保持不变, 控制程序保持原模拟量输出值为 0, 油针位置不变. 此时, 液压系统会将油针缓慢推向一边, 由于控制软件无法采集油针位置漂移, 不会对油针位置变化作出反映, 因此造成转速变化. 但此时控制程序已进入转速大闭环, 以转速为控制量, 能够自动改变模拟量输出值以改变油针位置, 最终达到恒定转速的控制目的. 若此时需要改变转速, 则 CPU 改变模拟输出以改变油针位置, 既改变供油量, 发动机转速随之变化, 但 LVDT 反馈值不随之变化, 则可直接判定油针位置反馈故障.

采用上述 LVDT/RVDT 断线检测方法, 没有增加任何外围检测电路, 仅通过软、硬件配合就判出了 LVDT/RVDT 断线. 下面以一实例说明断线检测方法.

在某型发动机的地面台架试车过程中, 由于发动机工作时振动较大, 数控系统正常工作一段时间后, 通过上述算法, 控制软件发现油针位置读数为 0, 判断 LVDT 传感器断线故障. 断开控制器航空插头, 在插头处测量 LVDT 传感器各线圈内阻, 发现次级线圈 A 内阻为 ∞ , 而其他线圈内阻正常. 对电缆进一步检查发现连接 LVDT 传感器的航插有一根导线从插针内脱出. 更换插针后 CPU 读数为 0.126 V, 故障现象消失, 证明通过与硬件电路特性相结合的 LVDT/RVDT 断线检测软件是有效和可靠的.

5 结 论

本文针对 LVDT/RVDT 信号处理电路进行了大量工程运用研究, 阐明了 AD598 运用中的参数选取与布线方法对温漂、信号精度的影响并给出了消除这些影响的一些设计方法, 提出了一种软、硬件结合对 LVDT/RVDT 传感器的断线故障进行在线检测的方法, 并通过台架试验验证了此种方法的有效性.

参考文献:

- [1] 强锡富主编. 传感器[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 贾静科. 基于 AD598 的差动变压器式位移传感器[J]. 传感器世界(Sensor World), 2000(9): 21-23.
- [3] 单成祥编著. 传感器的理论与设计基础及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] Analog Devices Inc. Design Reference Manual[DB/OL]. 1994.
- [5] Analog Devices Inc. Data Sheet, LVDT Signal Conditioner AD598[DB/OL]. 2002.
- [6] 余瑞芬主编. 传感器原理[M]. 2 版. 北京: 航空工业出版社, 1995.

CALL FOR PAPER

The 2nd International Symposium on
Jet Propulsion and Power Engineering

September 22-26, 2008

Guilin, China

General information

The 2nd International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering (ISJPPE) is jointly organized by Beihang University (Beijing University of Aeronautics and Astronautics, BUAA) of China and RWTH Aachen University of Germany. The main goal of the ISJPPE is to review recent progress achieved in jet propulsion and power engineering to facilitate the exchange of results and hold discussions among scientists and engineers in this field. A broad cooperation and exchange of new ideas between specialists would like to be promoted in order to consolidate recent advances in the knowledge of jet propulsion and power engineering. The official language for the Symposium is English.

Topics include, but are not limited to

- Air Breathing Engine, Thermodynamics, Intake and Nozzle
- Heat and Mass Transfer, Cooling and Leakage
- Structural Dynamics, Fault Diagnosis and Reliability, and Rotor Dynamics
- Turbomachinery and Microturbomachinery
- Noise and Acoustics
- Unsteady Flows, Vortex Flows and Turbulent Flows
- Multiphase Flows, Reacting Flows and Combustion
- High Temperature Materials and Coating
- and other topics related to jet propulsion and power engineering

Important dates to remember

Sep. 30, 2007	Deadline for Abstract Submission and/or Pre Registration
Oct. 31, 2007	Acceptance Notice
Dec. 31, 2007	Deadline for Draft Paper Submission
May 31, 2008	Deadline for Full Length Paper Submission
Sep. 22, 2008	Registration of all attendees, Guilin, Guangxi Province, China
Sep. 23~ 25, 2008	Symposium
Sep. 26, 2008	Post Tour: visiting Guilin or Yangshuo, two beautiful resorts in south China
	Other sight seeing tours can be arranged on demand

Point of Contact

Prof. Hongwei Ma and Dr. Rong Peng
School of Jet Propulsion, Beihang University
Xue Yuan Road No. 37, Haidian District, Beijing, China 100083
Tel: 86 10 82317413, 86 10 82317403; Fax: 86 10 82317432
E mail: mahw2006@163.com pengrong@buaa.edu.cn
Http://WWW.ISJPPE.ORG/

The Organizing Committee of the 2nd ISJPPE
Beihang University and RWTH Aachen University