

某发动机动力涡轮转速信号采集优化研究

吴兴浪, 颜鹏程, 曾夏青, 黄欢, 徐滔

中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

摘 要 : 本文分析了某发动机动力涡轮转速信号采集原理, 对影响动力涡轮转速信号采集的因素进行分析, 得到传感器输出极性、电缆分布电容大小及传感器与音轮之间的间隙等均会影响动力涡轮转速信号的采集, 控制其可以优化动力涡轮转速信号采集, 并通过某发动机动力涡轮转速采集异常现象进一步进行分析。

关 键 词 : 动力涡轮转速; 采集原理; 优化

Study On Optimization Of Speed Signal Acquisition For Power Turbine Of An Engine

Wu Xinglang, Yan Pengcheng, Zeng Xiaqing, Huang Huan, Xu Tao

Avic Hunan Power Machinery Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002

Abstract : This paper analyzes the principle of speed signal acquisition for power turbine of an engine, and analyzes the factors that affect speed signal acquisition for power turbine. It is concluded that sensor output polarity, cable distribution capacitance and gap between sensor and sound wheel will all affect speed signal acquisition for power turbine, and controlling it can optimize speed signal acquisition for power turbine. The abnormal phenomenon of speed acquisition of power turbine of an engine is further analyzed.

Keywords : power turbine speed; acquisition principle; optimize

引言

动力涡轮转速信号是反映涡轴发动机状态的一个重要参数^[1]。发动机空中慢车及以上状态, 当发动机状态发生变化时, 发动机数字电子控制器控制动力涡轮转速恒 100% 来调节发动机的燃油流量^{[2][3]}。动力涡轮转速信号采集准确与否极大影响了控制的精度, 在提高控制系统控制精度上动力涡轮转速信号扮演着重要角色。

一、动力涡轮转速信号采集原理

(一) 传感器工作原理

动力涡轮转速传感器为磁电式传感器, 主要由壳体、线圈组件、磁芯、磁钢、密封圈及插座组成^[4]。根据法拉第电磁感应定律, 音轮转动时, 音轮的齿顶和齿槽不断经过转速传感器的探头, 导致磁阻周期性变化, N 匝线圈所在磁场的磁通发生变化, 线圈中所产生的感应电动势 E 的大小决定于穿过线圈的磁通量的变化率^[5]。

(二) 数字电子控制器采集原理

当发动机音轮转动时, 音轮的齿顶和齿槽不断经过动力涡轮转速传感器的探头部位, 导致传感器内部线圈感受到的磁阻发生变化, 传感器输出周期性的类似正弦波信号^[6]。

外部动力涡轮转速传感器信号经过发动机电缆到数字电子控制器后, 首先进行原始波形的低通滤波, 其次经过放大电路对波形进行放大, 再经过迟滞比较器将正弦波转换为方波信号, 方波

信号进入 FPGA 计数电路进行计数, 可得到动力涡轮转速信号的频率值^[7]。

二、动力涡轮转速信号采集影响分析

根据动力涡轮转速传感器采集原理, 对影响动力涡轮转速采集的因素进行分析, 具体如下。

(一) 传感器与电缆之间分布电容影响

信号传输电缆普遍存在分布电容的现象, 电缆分布电容与电缆长度、电缆中导体间的绝缘形式、电缆的屏蔽形式以及电缆的结构形式等因素有关, 分布电容的大小是上述因素共同决定的一个复杂结果^[8]。

动力涡轮转速传感器内部线圈存在电阻和电感, 与电缆分布电容组成一个等效的 LCR 模型。由于动力涡轮转速传感器音轮形状的特性, 动力涡轮转速传感器根据磁阻变化而感应产生的原始波形并非标准正弦波。在感应产生的波形中, 除了一个与理论频

率一致的基波外，还包含二次谐波、三次谐波等高次谐波，且高次谐波的频率为基波频率的相应倍数，高次谐波分量越小，原始波形越接近于正弦波波形。当电缆存在分布电容时，传感器内部线圈和外部电缆分布电容组成 LCR 模型，当音轮转速逐渐升高时，基波和高次谐波的频率也随着音轮转速增加也在逐渐增大。当传感器原始输出信号中高次谐波分量较大时，会导致波形经过电缆传输后发生畸变，畸变后在正常波形上叠加出“凸台”现象，当产生的“凸台”波形幅值大于控制器内部迟滞比较器比较窗口的阈值时，会使得控制器动力涡轮转速信号采集异常^[9]。

（二）传感器与音轮之间间隙大小影响

动力涡轮转速传感器与发动机音轮之间的间隙大小一般为毫米级别，该间隙由传感器安装法兰距探头距离尺寸、机匣上产品安装端面距齿轮轴线距离尺寸及齿轮外径尺寸的尺寸链计算得出，与上述零件加工公差有关，存在设计上的最小间隙和最大间隙。当间隙大小不同时，且受分布电容大小的影响，会导致动力涡轮转速信号采集异常^[10]。

通过试验验证，当间隙越小时，由电缆分布电容造成的波形畸变对电子控制器的动力涡轮转速信号采集影响越严重。

（三）齿轮形状影响

根据磁电类转速传感器工作原理，齿轮转动时，齿轮的齿顶和齿槽不断经过转速传感器的探头，导致磁阻周期性变化，使得传感器输出周期性变化信号。

齿轮形状将直接影响传感器输出原始波形，即影响原始波形中高次谐波分量大小。齿顶和齿槽经过传感器探头时，磁阻周期性变化趋势不同，使得传感器原始输出波形不同。不同的原始波形经过电缆传输，因高次谐波分量不同，受电缆分布电容影响后，产生的畸变程度不同，从而影响转速信号的采集。

（四）传感器输出极性影响

动力涡轮转速传感器的线圈组件的接线方式以及磁钢的安装方向均会影响波形输出特性。当受电缆分布电容影响时，传感器输出“凸台”波形会落在控制器迟滞比较器的阈值范围内，从而导致动力涡轮转速信号采集异常。

控制传感器的线圈组件的接线方式以及磁钢的安装方向，即控制传感器输出极性，可使得传感器输出“凸台”波形不落在控制器迟滞比较器的阈值范围内，使得动力涡轮转速信号采集正常。

（五）小结

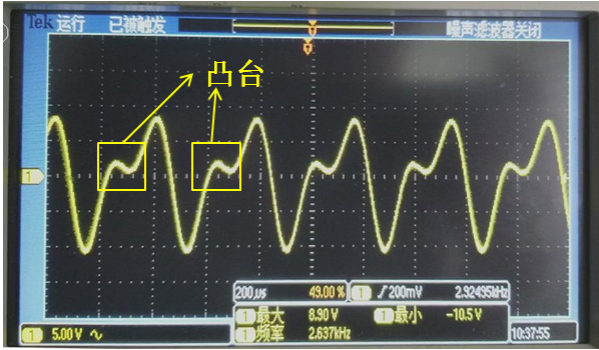
通过上文分析可知，传感器与电缆之间分布电容的大小、传感器与音轮之间间隙的大小、齿轮的形状影响以及传感器输出极性的特性等因素均会影响动力涡轮转速信号的采集。

三、某发动机动力涡轮转速信号异常现象分析

某涡轴发动机在试验的停车过程中，数字电子控制器报动力涡轮转速信号双通道交叉对比故障，其中 B 通道动力涡轮转速信号由 40% 左右向上跳变到 70% 左右，A 通道动力涡轮转速信号采集正常。由于双通道动力涡轮转速信号之间的差异值大于交叉对

比故障比较阈值，控制器报动力涡轮转速双通道交叉对比故障，依据故障处置对策，取双通道较大值进行重构 A 通道的动力涡轮转速信号值。

对故障发生时经过电缆传输后的动力涡轮转速波形进行观察，如图 1 所示，从图中可以看出，经过电缆传输后的动力涡轮转速传感器波形发生畸变现象，畸变出“凸台”。根据电子控制器动力涡轮转速信号采集电路的工作原理，当畸变“凸台”幅值位于波形正半周期零点以上位置，且幅值超过采集电路迟滞比较器比较窗口时，畸变“凸台”将被额外转化为一个输出信号来处理，导致动力涡轮转速信号采集结果异常偏大。



> 图 1 故障发生时 Np 波形经过电缆传输后波形

该发动机每台份装配 2 支动力涡轮转速传感器，其中传感器 1 的 A 通道进入数字电子控制器 A 通道采集，传感器 2 的 A 通道进入数字电子控制器 B 通道采集，传感器 2 的 A 通道经过电缆分线给发动机台架，用于台架测量发动机动力涡轮的转速。

（一）分析

将台架电缆输出端动力涡轮转速传感器波形畸变出影响测量的“凸台”进行问题分析，具体如下。

a) 信号电气回路受干扰

若动力涡轮转速传感器信号电气回路受到干扰，则动力涡轮转速信号异常在相同的台架试车条件下均会出现。但动力涡轮转速信号异常仅出现在发动机起动和停车过程中，且发生异常和未发生异常条件下，电气环境的技术状态相同，因此该因素可排除。

b) 传感器原始输出波形出现“凸台”

当传感器原始输出波形出现“凸台”时，波形会传输到电缆输出端，导致电缆输出端波形同样出现“凸台”。

在转速试验台上对动力涡轮转速传感器的原始输出波形进行示波器测试观察，直接接动力涡轮转速传感器插座针脚端信号进行测试。将动力涡轮转速由 0 升高到 100%，观察动力涡轮转速传感器原始输出波形，观察发现动力涡轮转速传感器输出波形无异常，可排除该因素影响。

c) 电缆分布电容影响

根据上文分析可知，电缆分布电容的大小可能会影响动力涡轮转速信号的采集。使用 LCR 测试仪对车台电缆进行分布电容测试，断开电缆动力涡轮转速传感器 A 插头与传感器插座的连接，同时断开电缆控制器插头与控制器的连接，测得台架电缆中动力涡轮转速传感器的 A 通道分布电容约为 3.2nF，电缆中动力涡轮转

速传感器的 B 通道分布电容约为 8.5nF, B 通道电缆分布电容较大的原因为该通道并接一路电缆至台架操作间用于台架动力涡轮转速传感器信号测量。

为了模拟电缆分布电容的影响,通过转速试验台进行了音轮、传感器、电缆及电子控制器的联合测试。测试时使用转速试验台施加转速,将可调电容箱与动力涡轮转速传感器并联模拟台架电缆分布电容的影响。测试时将间隙调至最小间隙。通过并联电容箱电容调至 3.2nF,以模拟台架电缆 A 通道分布电容。将动力涡轮转速从 0 升高到 120%,使用三支传感器测试结果表明畸变都只会出现在波形的零点以下,不会导致控制器采集异常。将并联电容箱电容调至 8.5nF,以模拟台架电缆 B 通道分布电容,使用三支传感器进行测试,将动力涡轮转速从 0 升高到 120%,三支传感器实测结果表明畸变在零点以上开始出现,并随转速升高逐渐下移,实测会导致控制器采集异常,与台架试验结果相符。

通过分析,可知原始动力涡轮转速波形经过电缆后,由于电缆分布电容的影响,波形发生畸变。当分布电容足够大时,畸变会出现在零点以上,导致电子控制器动力涡轮转速采集跳变,因此不能排除电缆分布电容的影响。

d) 传感器与齿轮间隙过小

根据上文可知,传感器与音轮之间设计上存在最小和最大间隙,且间隙越小时,由电缆分布电容造成的波形畸变对电子控制器的动力涡轮转速信号采集影响越严重,因此不能排除传感器与齿轮之间间隙的影响。

经过上文分析可知,引起动力涡轮转速信号异常跳变的原因如下:由于电缆分布电容的影响,导致动力涡轮转速传感器输出波形经过电缆传输后,波形畸变出“凸台”。当传感器与齿轮间隙太小时,随着转速变化,畸变出的“凸台”幅值达到电子控制器采集门限值,引起电子控制器动力涡轮转速信号采集异常。

(二) 纠正措施

当传感器与齿轮间隙增大到一定范围内时,由于电缆分布电

容造成的波形畸变将仅限于在零点以下出现,不会导致动力涡轮转速信号采集异常。针对上述动力涡轮转速信号采集异常的纠正措施为:通过控制传感器探头与音轮齿之间的间隙,将“凸台”控制在不影响电子控制器采集的电压范围内。根据已有的内控指标控制要求,对传感器与音轮进行选配,保证间隙满足内控指标要求,可消除台架电缆分布电容较大的影响。

(三) 验证情况

选取三支转速传感器,分别在 0.3mm、0.7mm 及 1.4mm 间隙下,测试电缆分布电容对动力涡轮转速信号采集结果的影响。测试时,将电容箱并联在传感器输出端模拟电缆分布电容,不断增大电容,直到电子控制器动力涡轮转速信号采集信号出现异常,此时所加电容即为该间隙下,电子控制器能够接受的最大电缆分布电容。

通过试验结果得知,在当前最小 0.3mm 间隙下,当电缆分布电容大于 5nF 时,将导致电子控制器动力涡轮转速信号采集异常。台架电缆 A 通道分布电容实测为 3.2nF,小于 5nF,故试验时 A 通道没有发生过动力涡轮转速信号采集异常问题。在 0.7mm ~ 1.4mm 间隙下,不断加大电容,都不会导致电子控制器动力涡轮转速信号采集异常。可见控制传感器探头与音轮齿之间的间隙,能够消除外部电容对动力涡轮转速信号采集造成的影响。

总结

通过对动力涡轮转速采集影响分析及某发动机动力涡轮转速信号采集异常分析可知,通过控制传感器与电缆之间分布电容的大小、传感器与发动机音轮之间间隙的大小以及传感器输出极性的特性等可以优化动力涡轮转速传感器的采集。

参考文献:

[1] 樊思齐,李华聪,樊丁等. 航空发动机控制(上册、下册)[M]. 西安:西北工业大学出版社,2008.
[2] 孙健国. 现代航空动力装置控制[M]. 北京:航空工业出版社,2009.
[3] 曾英俊. 航空动力装置控制[M]. 北京:航空工业出版社,1995.
[4] 程世扬;程春尧;邓春珍. 民用涡轴发动机典型件制造技术概述[J]. 航空动力,2022(06):43-47.
[5] 冯浩,师毓,黄新阳. 基于 DSP+CPLD 架构的某型直升机旋翼转速信号采集设计[J]. 微电机,2023,56(01).
[6] 彭晔榕. 倾转旋翼机飞/发综合建模及控制方法研究[D]. 南京航空航天大学,2022.
[7] 陈昊洋,杜紫岩. 涡轴发动机动力涡轮转速传感器容错控制方法研究[J]. 电气应用,2021,40(06).
[8] 李康乐,邢林. 航空发动机转速变周期采集方法研究[C]//中国航空学会制导,导航与控制分会,飞行器控制一体化技术重点实验室,IEEE 控制系统协会南京分会. Proceedingsof2016IEEEChineseGuidance,NavigationandControlConference(IEEECGNCC2016). 中航工业航空动力控制系统研究所;,2016:5.
[9] 高颖,李兵强,常晨晨,等. 航空发动机转速传感器频率信号采集方法[J]. 电子技术与软件工程,2015,(11).
[10] 张弛,毛宁,常博博,等. 发动机转速信号采集[J]. 自动化应用,2014,(04).