

## 飞机刹车系统中 LVDT 的可靠性设计

## Reliability Design Principle of LVDT in Aircraft Braking System

中南大学粉末冶金国家重点实验室 丁晓力 王仕兵

**[摘要]** 介绍了飞机刹车系统中 LVDT 的可靠性设计原则,通过对飞机刹车系统分配给指令传感器的可靠性指标进行分析,把可靠性指标融入 LVDT 零件的设计中,从而实现了把可靠性设计应用到产品中去。最后,一系列可靠性试验证明,LVDT 的可靠性设计方法正确、实用、可行。

**关键词:** 刹车系统 LVDT 可靠性 分配

**[ABSTRACT]** The reliability design principle of LVDT in the aircraft braking system is introduced. The reliability index that aircraft braking system distributes to dictating sensor is analyzed. By means of adding reliability index into LVDT design, the reliability design of product is realized. A series of reliability tests show that reliability design of LVDT is right, practical and feasible.

**Keywords:** Braking system LVDT Reliability Distribute

在飞机刹车系统中,指令传感器是传达飞行员刹车意图的关键部件,它将飞行员的脚踏位移信号转变成电信号,防滑控制盒根据电信号的大小进行运算处理,输出与其对应的电流控制刹车压力。对于航空产品而言,既要满足飞机系统对其提出的性能和功能要求,同时也要把产品的可靠性溶于整个设计之中。

产品的可靠性是设计出来的,通俗而言就是把可靠性设计到产品中去,要把产品可靠性作为产品的一项重要设计指标,分配给产品的各个组成部分。根据所分配的可靠性指标进行分析、设计、试验和验证。

## 1 指令传感器的原理和结构

指令传感器是 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)型差动变压器位移传感器,它采用差动变压器原理设计。差动变压器是一种变压器型的电感式机电转换元件,将处于交变磁场中的磁芯位移,通过可动磁芯产生的互感变化转换成与该位移成线性函数关系的电信号。

LVDT 接受飞行员的脚踏指令。在使用中,飞机

上的脚踏与 LVDT 的推杆头相连,推杆头带动 LVDT 的推杆,推杆与铁芯同轴,而线圈初级受一定幅值和一定频率的电源激励,铁芯在线圈内作直线运动,因此在线圈次级中感应出同频率与位移成正比的交变电势。LVDT 的结构图见图 1。

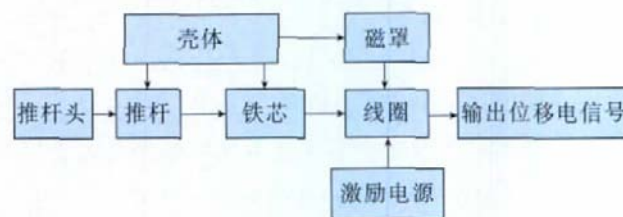


图 1 LVDT 结构图

Fig.1 Structure of LVDT

## 2 可靠性分配

产品的可靠性是设计、生产、管理出来的。单靠设计还不能保证产品的可靠性,可靠性是质量的一个重要组成部分,为了保证设计的可靠性指标得以实现,必须在元器件、材料、工艺、环境、检验、生产质量控制等各个环节采用相应的可靠性措施加以保证。

### 2.1 可靠性要求

根据飞机刹车系统所反映的基本可靠性指标:平均故障间隔时间 MTBF,成熟期规定值为 350h;产品在设计定型时最低可接受值为 280h。然后依据飞机刹车系统可靠性指标分配原则,分配给 LVDT 可靠性指标为:MTBF<sub>规定值</sub>=2 124h,MTBF<sub>最低可接受值</sub>=1 775h。

### 2.2 可靠性指标分配

根据系统分配给刹车指令传感器的 MTBF<sub>规定值</sub>=2 124h,在进行 MTBF 值分配时,仍采用工程加权,专家讨论的方式估算处理,应用公式:

$$MTBF_i = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{k_i} MTBF \quad (1)$$

式中: $n=6$ (只给 6 个零部件:推杆头、推杆、铁芯、线圈、磁罩、壳体分配可靠性指标); $MTBF_i$ :分配给第  $i$  个产品的平均故障间隔时间; $k_i$ :第  $i$  个产品总的工程

加权因子。分配过程中,一般考虑下列6个加权因子,即:

$$k_i = \prod_{j=1}^6 k_{ij} = k_{i1} \cdot k_{i2} \cdots k_{i6}, \quad (2)$$

式中, $k_{i1}$ 为复杂因子,反映零部件在整个产品中的复杂程度,推杆加工难度大,取值最大; $k_{i2}$ 为重要性因子,反映零部件在产品中的重要程度,取值越大,该零部件越重要; $k_{i3}$ 为环境因子,反映零部件工作环境的恶劣程度,刹车指令传感器装在飞机座舱内,推杆头在壳体外面,环境最恶劣,取值最大; $k_{i4}$ 为工作时间因

子,反映零部件工作时间长短的因子,工作时间长,取值较大,推杆头和推杆在线圈内同轴运动,在一次起落中工作时间最长,故取值最大; $k_{i5}$ 为维修因子,反映维修难易程度; $k_{i6}$ 为器材质量因子,反映零部件由多少零件组成,线圈是一个组件,故它的取值较大。

表1为经验得出的6个主要零部件的工程加权因子,利用公式(1)和表1中的结果,当 $MTBF_{规定值}=2124h$ ,计算刹车指令传感器中6个零部件的 $MTBF_{规定值}$ 分配值如下:

由表1可得,

$$\text{推杆头: } MTBF_1 = \frac{107.64}{6.75} \times 2124 = 33870h,$$

$$\text{推杆: } MTBF_2 = \frac{107.64}{31.68} \times 2124 = 7217h,$$

$$\text{铁芯: } MTBF_3 = \frac{107.64}{23.76} \times 2124 = 9622h,$$

$$\text{线圈: } MTBF_4 = \frac{107.64}{19.8} \times 2124 = 11547h,$$

$$\text{磁罩: } MTBF_5 = \frac{107.64}{8.75} \times 2124 = 26129h,$$

$$\text{壳体: } MTBF_6 = \frac{107.64}{16.9} \times 2124 = 13528h.$$

当 $MTBF_{最低可接受值}=1775h$ ,同理可算出,刹车指令传感器中6个零部件的 $MTBF_{最低可接受值}$ 分配值。表2列出了飞机刹车系统、刹车指令传感器和传感器内6个零部件的可靠性指标。

表1 6个主要零部件的工程加权因子/h

加权因子	推杆头	推杆	铁芯	线圈	磁罩	壳体
$k_{i1}$	1.5	2.5	2.2	2.2	1.5	2.4
$k_{i2}$	1.5	2.2	2.5	2.5	2.0	2.0
$k_{i3}$	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.2
$k_{i4}$	2.4	2.4	1.8	1.5	1.8	2.0
$k_{i5}$	0.5	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8
$k_{i6}$	1.0	2.0	2.0	2.0	1.8	1.0
$k_i = \prod_{j=1}^6 k_{ij}$	6.75	31.68	23.76	19.8	8.75	16.9
$\sum_{i=1}^6 k_i$	107.64					

表2 飞机零部件可靠性指标/h

项目内容	飞机刹车系统	指令传感器	推杆头	推杆	铁芯	线圈	磁罩	壳体
$MTBF_{最低可接受值}$	280	1775	28305	6031	8041	9650	21836	11305
$MTBF_{规定值}$	350	2124	33870	7217	9622	11547	26129	13528

### 3 LVDT的设计原则

若要实现上述可靠性指标,仅仅规定、分配和预计可靠性是不够的,还必须制定一套有效的可靠性设计准则,并在这方面做相应的工作,使设计人员能用以实现预期的可靠性。在设计刹车指令传感器过程中,要使产品满足预定的定量可靠性要求,就要贯彻下述设计原则,并在材料选取上加以考虑,在生产工艺上加以保证,在检验和装配上严格要求。

#### 3.1 机械和结构设计

本产品结构设计的主要内容是壳体、推杆、铁芯、线圈、推杆头以及线圈架的设计。

壳体的作用是把所有零部件组装在一起,实现指令传感器与飞机的机械连接,并对产品进行保护。在设计壳体时除了考虑完成产品的功能外,还得考虑其强度、重量以及壳体与飞机的接口关系,如安装尺寸、最大外形尺寸和连接方式。为此,我们选用了航空工业中使用最广泛的硬铝合金2A12,这种合金具有良好的塑性成形能力和机械加工性能,具有较高的疲劳性能和断裂韧度,由于耐腐蚀性能较低,为此对其进行阳极化处理。

铁芯和线圈的功能是实现磁路交替变化的主要零件,它的结构形式和材料性能都会影响产品的输出性能。其结构一般采用差动变压器式,如图2所示。

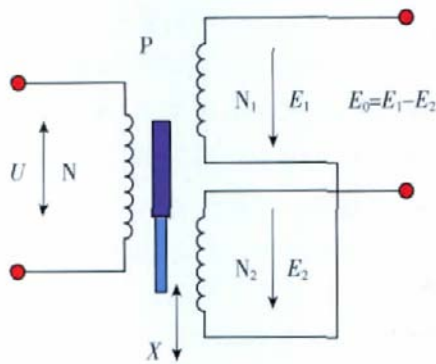


图2 差动变压器的结构示意图

Fig.2 Structure of differential transformer

根据变压器的原理，当一次侧线圈通过交流  $i_1$  时，在二次侧线圈产生感应电动势，这一电动势的表达式为  $E=M\frac{di_1}{dt}$ ，其中  $M$  为互感系数。

将被测位移量的变化转换成互感系数  $M$  的变化。一次侧线圈匝数为  $N$ ，二次侧线圈匝数为  $N_1、N_2$ ，且两次侧线圈结构参数完全相同， $N_1、N_2$  反极性串接。

线圈中心插入导磁性极好的铁芯  $P$ ，在一次侧线圈  $N$  通入幅值为  $U$ 、频率为  $f$  的电压激励，则二次侧线圈  $N_1、N_2$  分别产生感应电压  $E_1$  和  $E_2$ ，随着位移的变化，互感也在不断的变化，从而达到将位移变化换成电信号的目的。

$$E_1 = -M_1 \frac{di_1}{dt} ,$$

$$E_2 = -M_2 \frac{di_1}{dt} ,$$

$$\text{总输出量为 } E_0 = E_1 - E_2 = (M_1 - M_2) \frac{di_1}{dt} .$$

当铁芯处于中间对称位置时， $M_1=M_2$ ，则  $E_1=E_2$ ，故  $E_0=0$ ，此为铁芯的原始平衡位置—零位。若铁芯偏离零位向上移动，即  $M_1>M_2$ ， $E_1>E_2$ ，此时  $E_0 \neq 0$ ，其输出电压  $E_0$  与  $E_1$  同相位，大小与铁芯位移成线性关系；若铁芯偏离零位向下移动，即  $M_2>M_1$ ， $E_2>E_1$ ， $E_0 \neq 0$ ，且  $E_0$  与  $E_2$  同相位，其大小与铁芯位移成线性关系。铁芯偏离零位上、下移动的距离和方向的信息，反映在二次侧线圈输出电势  $E_0$  的幅值和相位之中。

磁罩一方面为线圈提供机械保护，另一方面为线圈提供闭合的磁路，达到磁屏蔽的目的，以减小外界电磁场的干扰，其磁性能决定了磁路的特性，在设计铁芯和磁罩时，材料的选择很重要，所以一般选择高磁导率和低的矫顽力的材料。常用的有铁镍软磁合金

如 1J50、1J79 等材料。由于 1J79 比 1J50 更脆一些，我们选用 1J50 加工铁芯和磁罩。

推杆直接与推杆头连接，在设计时还应该考虑其结构强度。铁镍软磁材料比较软，铁芯直接套在推杆上，因此，为了提高其机械性能，我们采用 1Cr18Ni9 来加工推杆，这种不锈钢耐均匀腐蚀性能、冷加工成形性均较好，在设计上，从同轴度和直线性上提出了严格的要求，使加工出来的产品满足推杆与线圈骨架的同轴运动。

推杆头是实现产品与飞机连接的零件。它的设计除了考虑功能外，还得考虑零件本身的强度和寿命。开始我们选用轴承钢 GCr15，这种材料具有高而均匀的硬度、良好的耐磨性、高的接触疲劳性能，但经过环境试验后，发现在湿热的环境中表面生锈，不符合设计要求，所以我们改用了高硬度不锈钢 9Cr18Mo。这种材料淬火后具有较高的硬度和耐磨性，在大气、水以及某些酸类和盐类的水溶液中具有优良的耐蚀性。这样，使推杆头在强度上满足要求，同时也能在恶劣的环境中正常使用。

### 3.2 线圈组件

线圈组件的设计主要是线圈骨架和线圈的设计。

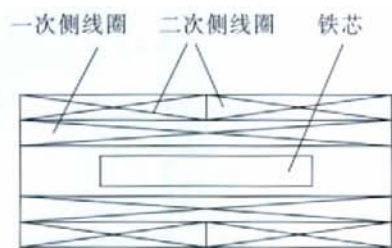
骨架的结构决定了线圈的基本形式。骨架的设计有 2 个方面，一是结构形式，另一个是选材。结构形式在很大程度上决定了产品的整体结构，材料的选择原则是保证其结构强度、对环境的适应、同时又不影响磁路。螺管型线圈骨架采用 1Cr18Ni9 制成，这样，推杆在骨架内作直线运动，铁芯与骨架内的薄壁仅仅只有轻微的摩擦接触，因此强度满足产品的要求。

线圈设计的好坏决定了传感器的各种参数，如零位电压的大小、灵敏度的高低和传感器的重复性、线性特性等。线圈采用能耐高温的 QZ 系列漆包线绕制。线圈在骨架上排列形式直接影响传感器的线性、输出幅值、灵敏度等，通常线圈排列形式有二节式、三节式、四节式、五节式，线圈二节式、三节式排列形式，见图 3。由于传感器的行程较小，我们分别采用二节式和三节式绕制线圈。

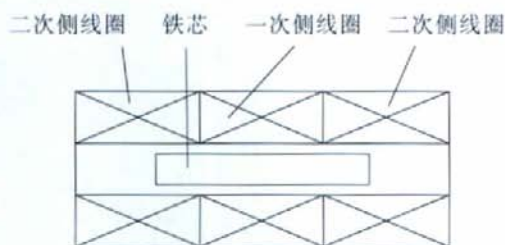
#### 3.2.1 二节式排列

一次侧线圈每层均匀满绕，二次侧线圈以中心线为界，绕向一致，且在空间梯形对称，见图 3(a)，线圈的两个尾端相连，两个首端作为传感器的输出，但由于梯形对称较难保证，我们绕制出来的线圈效果不够理想，尽管输出幅值满足设计要求，但传感器的线性度非常差，零位电压过大，严重影响了系统控制。输入

输出特性见图 4。



(a)二节式



(b)三节式

图 3 差动变压器线圈的排列形式

Fig.3 Arranging form of coils in differential transformer

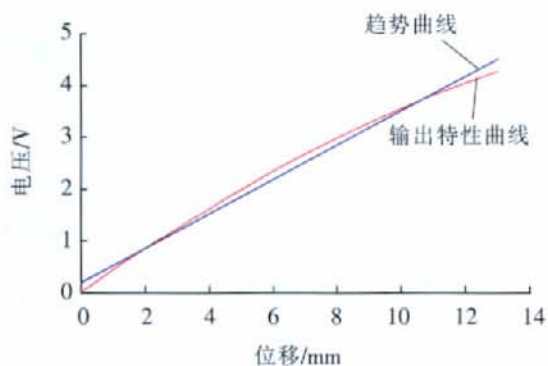


图 4 二节式线圈输入输出特性

Fig.4 Input and output characteristics of the second knuckle coil

### 3.2.2 三节式排列

在同一骨架上,三节式排列与二节式排列相比,线圈绕制难度降低,将骨架的长度三等分,见图 3 (b),一次侧线圈位于中间部分,两边绕制二次侧线圈,且依托骨架两边在空间对称,这样,使梯形对称难度降低了 1/3,输出幅值、线性度、重复性、零位电压均满足设计要求。并且如图 5 所示,经过环境、机械冲击、振动、加速度、电磁兼容等试验后,其输入输出特

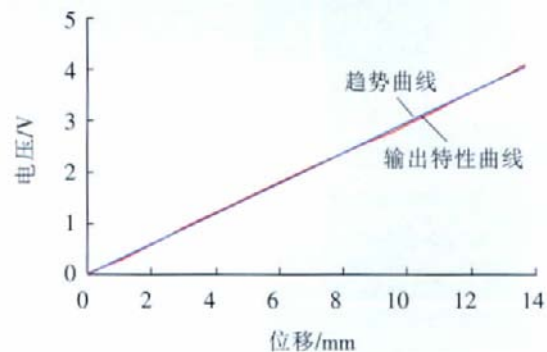


图 5 三节式线圈输入输出特性

Fig.5 Input and output characteristics of the third knuckle coil

性依然没变。

### 3.3 可靠性设计

进行可靠性设计首先要分析产品的主要故障模式和可靠性预计。根据实际使用故障统计和分析,该产品的主要故障是线圈(含信号引出线)的断路和短路,而其他故障相对来说比较少。所以在进行可靠性设计时主要考虑线圈绕制和信号引出线的可靠性。线圈采用高强度漆包线绕制而成,漆包线与氟塑料引出线可靠连接,线圈引出线按照有关标准压接,从固定在壳体上的插座引出。这样从选材、绕制、引出线的连接等方面保证线圈组件的可靠性。

## 4 结论

根据以上分析和设计,将生产出来的零部件进行组装,组装好的产品按照试验要求进行可靠性验证,可靠性试验包含:常温下的性能试验、高、低温试验,耐久性试验,机械冲击、振动、加速度、电磁兼容试验等。其目的在于:

- (1)发现产品设计、材料和工艺方面的缺陷;
- (2)为改善产品的完好性、提高任务成功率、减少维修费用及保障费用提供信息;
- (3)确认是否符合可靠性定量要求。

经过一系列严格的试验,LVDT 的输入输出性能和其他性能指标与试验前相比没有漂移,产品的外观、灵活性、以及弹力与试验前相比没有变化,从而说明这些零部件的可靠性指标是完全可以实现的,也就是说我们设计的刹车指令传感器从材料、性能等方面完全满足可靠性要求,能够保证飞机刹车系统的可靠使用。

(责编 微凉)