

一种大量程比高精度差动变压器式位移传感器设计

刘书选 李文璋 任海燕 余 菲
(北京精密机电控制设备研究所,北京 100076)

摘 要 为了满足伺服系统反馈测量元件安装空间受限但测量范围大的需求,专门设计了一种大量程比的高精度差动变压器式位移传感器。阐述了位移传感器的原理和结构,系统的分析了现有差动变压器式位移传感器线圈绕制方法,并提出了一种新型的线圈绕制方案。与传统差动变压器式位移传感器相比,具有更大的测量范围,但外形尺寸并未相应增加,有效测量长度达测杆的 70%。经试验验证,该产品在满足大量程比测量的基础上,线性度达到 0.6%。

关键词 大量程比 差动变压器式位移传感器 线性度

A Design of the High-precision LVDT Sensor with Large Measuring Range Ratio

LIU Shu-xuan LI Wen-zhang REN Hai-yan YU Fei

(Beijing Research Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing 100076)

Abstract In order to meet the large-range requirements of the feedback measuring units in a feed-back system within a limited mounting space, a high-precision linear variable differential transformer (LVDT) sensor with large measuring range ratio was designed. The principle and structure of the LVDT sensor were illustrated and the coil winding method of the existing LVDT sensor which was systematically analyzed. And then, a new method of coil winding was proposed. Compared with the conventional LVDT sensor, this method had a greater measuring range without increasing the geometric size, which enables the effective measuring length to be 70% of the measuring rod. Finally, the test proved that this new product satisfied the measurement of large measuring range ratio with the linearity as high as 0.6%.

Key words Large measuring range ratio Linear variable differential Transformer linearity

1 引 言

位移传感器作为运载火箭伺服系统作动器控制反馈元件,参与发动机喷管摆动控制。在传统型号

中,因作动器空间有限,大量采用线性电位计式位移传感器,因为相比差动变压器式位移传感器(以下简称 LVDT 传感器),它的有效测量长度较大。但是,电位计式位移传感器为接触式位移传感器,在高

频振动下会使得线性电位计性能下降或损坏;另外,线性电位计的输出阻抗随游标位置的不同而发生变化,在较重负载时,它的线性也会受损。而 LVDT 传感器为非接触式装置,在高频振动下运动不会发生任何磨损,且其具有不变的低输出阻抗,能承受较重负载。此外, LVDT 传感器具有工作可靠、准确度高、线性度好、结构简单、灵敏度高、使用寿命长、环境适应性强等优点^[1]。本文通过提出一种新型的线圈绕制方案,使得 LVDT 传感器同样具有较大的有效测量长度,由传统测量长度占测杆的 10% ~ 40% 增加到 70%。

2 LVDT 传感器原理

LVDT 传感器基于差动螺旋管式变压器原理,主体结构由铁心、初级线圈和两个呈对称布置且按电势反向串联的次级线圈组成。根据变压器原理^[2],当给初级线圈提供一个交流信号 E_1 时,其会产生交变磁场,此交变磁场势必引起相邻两次级线圈产生感应电动势 E_{21} 、 E_{22} 。当铁芯(铁芯具有增强磁场作用)处于两次级线圈中间位置时,两次级线圈产生的感应电势大小相等,方向相反,输出电压 E_2 为零;当铁芯偏离中间位置时,两次级线圈之间的互感发生变化,两者的感应电势一增一减,不再相等,有电压信号输出,该信号经变换器变换成与铁芯移动量的大小和方向一致的直流电压,且在一定范围内成线性关系^[3],即达到铁芯的位移量转换成电压信号输出之目的,原理图如图 1 所示。

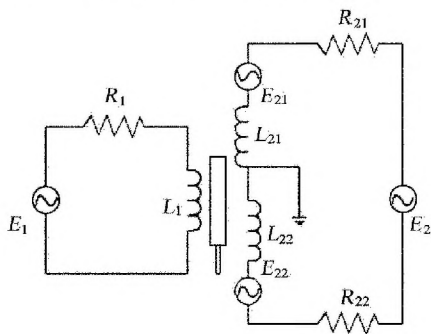
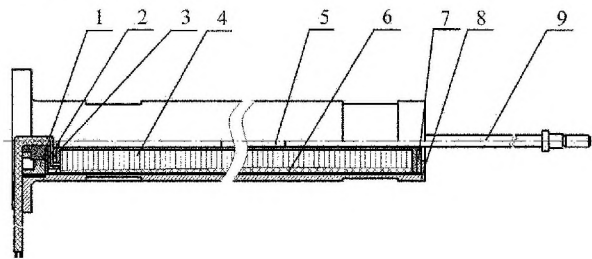


图 1 差动变压器原理图

3 传感器结构设计

本文研制的位移传感器由后端盖、橡胶垫、短路

环 I、线圈绕组、铁芯、导磁套、短路环 II、壳体以及拉杆组成,结构如图 2 所示。其中线圈绕组由漆包线绕制在线圈骨架上,形成初级线圈和次级线圈(产生交变磁场和感应磁场)。铁芯起到强化磁场的作用,置于线圈绕组内,拉杆与其连接带动其移动,达到位移测量的目的。短路环 I、导磁套、短路环 II 形成磁场回路,保证交变磁场磁力线和感应磁力线尽量不泄露,形成良好的电磁屏蔽体。壳体采用 400 系列不锈钢,除具备高结构强度外,还具有电磁屏蔽作用,与内屏蔽体形成双屏蔽。橡胶垫和后端盖用于固定壳体内部的线圈组件、短路环 I、短路环 II。产品结构简单紧凑,结构强度高,且具有良好的电磁屏蔽功能。



1-后端盖;2-橡胶垫;3-短路环 I;4-线圈绕组;
5-铁芯;6-导磁套;7-短路环 II;8-壳体;9-拉杆

图 2 传感器结构

4 线圈绕制方案设计

对于 LVDT 传感器来说,结构尺寸、线性测量范围是选型的关键因素。因小型化的需求,结构紧凑且行程大的位移传感器越来越受青睐。在一定的结构尺寸内若想获得较大的线性测量范围,关键在于线圈的绕制方法。根据 LVDT 传感器漆包线线圈绕制方法的不同,位移传感器可分为两段式、三段式和多段式三种结构。本文主要分析两段式和三段式绕法对传感器线性测量范围的影响。

4.1 线性测量范围

根据电磁感应原理,位移传感器初级线圈在某时刻产生的磁场磁力线分布如图 3 所示。由电磁理论^[4]可知,磁力线在传感器中间部位均匀分布,在两端呈发散分布。因经过传感器内部的磁力线数量是相等的,所以在传感器中间部位轴向方向的磁力线分布均匀且较强,而在传感器的两端的磁力线轴向磁场分量逐渐减弱。正因如此,当铁芯在传感

器内部移动时,在中间小行程内,磁场变化分布较为均匀,故次级线圈感应均匀,产品线性度较好;当铁芯向一侧边缘移动时,磁场强度非线性减弱,两次级线圈感应呈非线性变化,造成输出电压信号减弱,输出非线性。铁心位置 L 与输出电压 U 之间的关系示意曲线如图 4 所示,传感器的线性测量范围为 X 处。

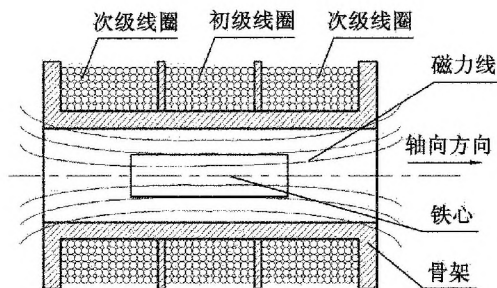


图3 磁力线分布示意图

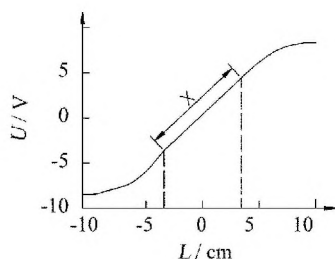


图4 LVDT线性测量范围曲线

4.2 传统线圈绕制方案

4.2.1 三段式 LVDT 传感器线圈绕制方案

三段式位移传感器初级线圈位于骨架中间位置,两次级线圈位于骨架两侧,如图 3 所示。初级线圈绕线窗口长度约占绕线骨架结构总长度的 $1/3$,所产生的均匀变化的磁场长度范围较小,且两次级线圈在两侧,感应的均匀变化磁场范围更小。因此,三段式位移传感器线性测量范围较小,约为测杆的 $10\% \sim 25\%$,但因其对称性及绕制方法简单,常用于小量程比位移测量。

4.2.2 二段式 LVDT 传感器线圈绕制方案

针对三段式的缺点,对传感器进行改进后,即为两段式位移传感器,结构示意如图 5 所示。初级线圈缠满整个骨架长度,因此中间部位产生的均匀变化磁场长度增长,两次级线圈缠绕长度也增加,占了骨架绕线窗口长度的 $1/2$,因此次级线圈线性感应范围也增加了。

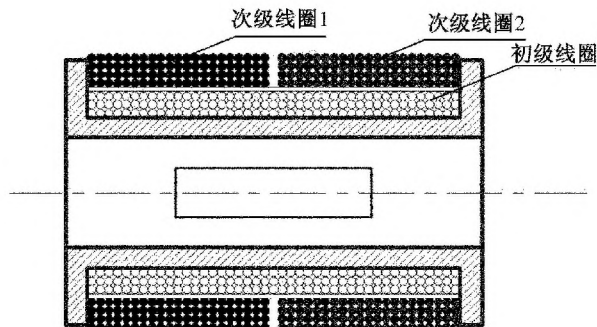


图5 两段式位移传感器原理结构示意图

为了使上述两段式位移传感器的线性测量范围进一步扩大,必须人为的提高输出曲线(图 4)中两端的输出电压值(或减小中间的输出电压值)。利用阶梯补偿方式改变次级线圈的结构,可以改变感应输出电压值,结构示意如图 6 所示。图中两次级线圈中间缠绕较少,两端缠绕较多,并从中间到两端阶梯递增,虽然两端磁场变化较弱,但其上方线圈匝数增多,因此感应电动势增大。通过试绕确定不同阶梯的次级线圈长度,可改善非线性区间,使其变成线性区间。这种绕线方式对于中小量程比的传感器使用普遍,测量范围约为测杆的 $20\% \sim 50\%$ 。为运载火箭伺服系统 LVDT 位移传感器常用绕线方式。

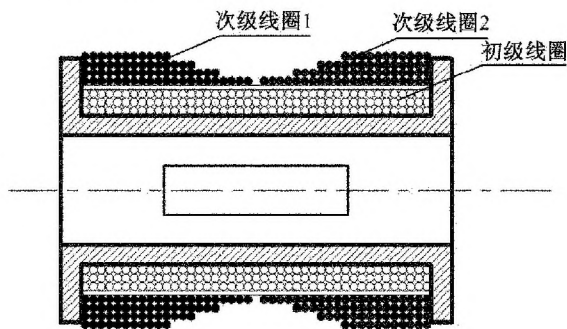


图6 改善后的两段式位移传感器

4.3 新型线圈绕线方案

如果想进一步增加传感器的测量范围,由于结构尺寸的限制,势必会造成传感器中间铁芯结构较短,如图 7 所示。当铁芯运动到传感器一端时,由于距离另一端次级线圈较远,另一端次级线圈感应磁场将会很小(或可忽略),将不形成差动式原理,与原理相驳。如果仍然沿用此结构,则必须双倍的增加两端补偿线圈层数,此时,仅一端次级线圈在感应磁场。这种结构会使得线圈层数急剧增加,使操作变得困难的同时,还增加了传感器径向方向尺寸。

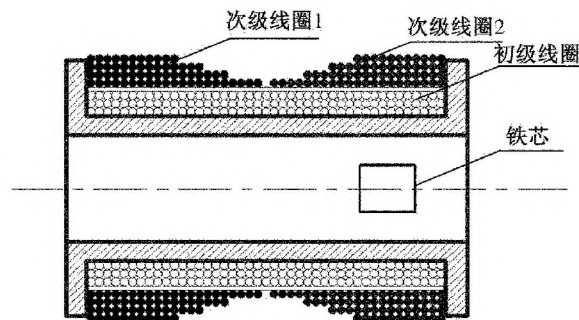


图 7 大量程比位移传感器

针对上述绕制方式产生的缺点,进一步改进,增加次级线圈绕制长度,使得短铁心移动到任何位置,两次级线圈均能感应到交变磁场,如图 8 所示。

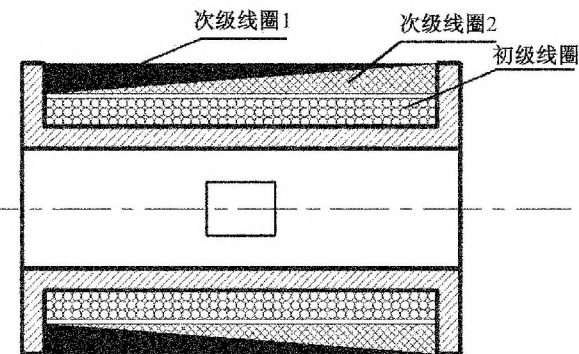


图 8 改进后大量程比传感器绕制方法

上述绕制方法虽然大大的增加了线性范围,但使用漆包线绕制次级线圈的方法有些困难,如果仍然按照阶梯插补的方式绕制此次级线圈,为了精细化控制,势必会急剧增加次级线圈的层数,造成径向尺寸较大。

为了使此绕制方式具有工程化,采用如图 9 所示的次级线圈绕制方式可进一步细化阶梯,同时减少绕线层数。图中,次级线圈 1 为浅色部分,次级线圈 2 为深色部分,中间的空白处为漆包线绕制空隙。这种方法采用磁场感应面积法,使得两线圈之间的阶梯插补方式更加细化。



图 9 本方案中大量程比传感器绕制方法

5 实施难点

本方案中的线圈绕制方法相比传统线圈绕制方式,次级线圈 1 和次级线圈 2 之间存在叠压情况,且两次级线圈之间均存在绕制空隙。因此按照传统的绕制方式,势必会造成绕制过程中漆包线断线或层间塌陷问题,使得可靠性降低。

为了避免此问题的发生,本方案采取缠绕一层漆包线,刷一层绝缘漆的方法,固定每层已经绕制好的漆包线,防止其移动,解决可能发生的断线问题;通过缠绕一层漆包线就包一层聚亚胺薄膜的方法,解决空隙塌陷问题。

另外,为了进一步增加产品可靠性,漆包线绕制完成后,对线圈绕组进行真空浸漆。

6 试验验证

本方案中,产品测杆的长度(即壳体长度)为 310mm,线性测量范围为 220mm,测量范围占到测杆长度的 71%。利用试验室现有的变换器对传感器进行信号变换,利用高精度测长仪对传感器进行测量,得到产品线性度数据如表 1 所示,利用最小二乘法获得的产品线性度为 0.6%,产品测量范围及线性度指标满足使用要求。

表 1 产品测试数据表

序号	行程(mm)	理论值(V)	实测值(V)	备注
1	110	5	4.999	
2	100	4.545	4.547	
3	90	4.091	4.154	
4	80	3.636	3.683	
5	70	3.182	3.187	
6	60	2.727	2.780	
7	50	2.273	2.359	
8	40	1.818	1.873	
9	30	1.364	1.383	
10	20	0.909	0.898	
11	10	0.455	0.444	
12	0	0.000	0.000	
13	-10	-0.455	-0.451	

续表 1

序号	行程(mm)	理论值(V)	实测值(V)	备注
14	-20	-0.909	-0.936	
15	-30	-1.364	-1.432	
16	-40	-1.818	-1.928	
17	-50	-2.273	-2.397	
18	-60	-2.727	-2.857	
19	-70	-3.182	-3.292	
20	-80	-3.636	-3.723	
21	-90	-4.091	-4.174	
22	-100	-4.545	-4.645	
23	-110	-5.000	-5.007	
(最小二乘法)线性度		0.6%		

7 结束语

采用一种新型的线圈绕制方案,扩大了传统

LVDT 传感器的测量范围,克服了该类传感器在使用上的缺陷,使得测量范围达到了测杆长度的 70%,拓宽了 LVDT 传感器的应用领域。同时对实施难点采取了应对措施,保证了产品的可靠性。经试验验证,产品线性度达到 0.6%,性能满足使用要求,具有大量程比高精度的特点。

参考文献

[1] 黄小刚,滕霖,刘元度.差动变压器式传感器专家设计系统的研究[J].航空精密制造技术,2008,44(3):19~21.

[2] 严钟豪,谭祖根.非电量电测技术,机械工业出版社,1999.

[3] Mohiuddin,Jaffer,King.Typical Linear Variable Differential Transformer (LVDT) [J].Sensors,2006,235:149~153.

[4] 杨儒贵.电磁定理和原理及其应用,西南交通大学出版社,2002.

安全提示

近期,不断有作者打来电话询问关于向 yhjcsbj@163.com 邮箱的投稿情况,有的作者还被收取了审稿费(经调查,收款账户为私人账号)。经上百度网查询,发现了所谓的“宇航计测技术官网”,网址为:www.yhjcs.cn。为避免给广大作者造成损失,《宇航计测技术》编辑部特别发出安全提示:本刊投稿邮箱为: yhj_c_102@spacechina.com 与 kyb@casic203.com,本刊不收取审稿费,审稿结果为盖有本编辑部公章的纸质通知,并通过中国邮政挂号信寄给作者,请各位作者注意鉴别真伪,避免上当受骗。

本刊联系电话:010-68383695,010-68386651。

《宇航计测技术》编辑部

声 明

为适应我国信息化建设需要,扩大本刊及作者学术交流渠道,本刊已被《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国学术期刊网络出版总库》、《万方数据——数字化期刊群》、《中文科技期刊数据库》及《CNKI 系列数据库》收录,其作者著作权使用费与本刊稿酬一起一次性给付作者,不再另行发放。作者如不同意文章被收录上述数据库,请在来稿时声明,本刊将作适当处理。

《宇航计测技术》编辑部