

冗余差动变压器式位移传感器设计技术研究

余菲, 任海燕, 杨明, 胡晓萍, 朱廷伟

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

摘要: 为了满足伺服系统位移传感器安装空间小、测量范围大及高可靠性的需求, 对串联双冗余高精度差动变压器式位移传感器的设计技术进行了研究; 阐述了差动变压器式位移传感器的原理和结构, 介绍了串联双冗余差动变压器式位移传感器抗电磁耦合干扰、结构加固以及专用变换电路的设计方法; 为提高线性度, 在有限的径向安装空间, 设计阶梯式线圈绕制方法, 通过试验找出了最佳绕线参数, 使线性度达到 0.1% 以上, 满足了系统的高精度和高可靠性要求。

关键词: 冗余; 抗干扰; 高精度; 高可靠性; 差动变压器式位移传感器; 线性度

Design Technique Research of Dual Redundancy Linear Variable Differential Transformer

Yu Fei, Ren Haiyan, Yang Ming, Hu Xiaoping, Zhu Tingwei

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

Abstract: In order to meet the needs of servo system, i. e. small dimension, wide measurement range and high reliability, a dual redundancy and high-precision linear variable differential transformer (LVDT) displacement sensor was designed. The principle and structure of the LVDT was illustrated. The design philosophy of LVDT which could resist the electromagnetic interference and had inductive structure was introduced. The appropriate displacement transforming circuit was also introduced. For the sake of improving linearity, a stepped coil winding way was proposed in the radial direction. The linearity is as high as 0.1% under the condition of the best coil winding parameter by experiment, which can make the system with high-precision and high reliability.

Keywords: dual redundancy; anti-interference; high-precision; high reliability; linear variable differential transformer; linearity

0 引言

随着我国航天事业的不断发展, 伺服系统对位移传感器的需求量也不断上升, 同时要求位移传感器不断的进行技术革新, 对位移传感器产品提出了较高精度、高可靠性及耐恶劣环境条件能力要求, 以适应全弹(箭)飞行中的恶劣环境下的使用需求。差动变压器式位移传感器具有小型化、结构简单、精度高、寿命长、环境适应能力强及性能稳定可靠等优点, 在航天伺服系统中广泛使用, 将位移信号转换成对应的电压信号, 用于伺服系统闭环控制。

航天伺服系统可靠性要求比较高, 现有的差动变压器式位移传感器单点失效环节较多, 难以满足要求, 为此, 设计了一种全新的串联双冗余差动变压器式位移传感器, 以满足伺服系统高可靠性技术要求。

根据系统安装结构特点, 对位移传感器进行了串联冗余结构设计研究, 对冗余结构所带来的信号耦合解耦及线性补偿技术难题进行了技术攻关, 提高了产品精度及可靠性, 满足伺服系统使用要求。

1 差动变压器式位移传感器工作原理及结构

1.1 差动变压器式位移传感器工作原理

差动变压器式传感器是采用变压器原理, 将被测量的位移量变化转换成线圈的互感变化, 通过电路转换成电压信号输出, 传感器本身为一个变压器, 由初级线圈、两个次级线圈和

活动铁芯等组成, 由于两个次级线圈按电势反向串联方式连接, 即以差动方式输出, 故称为差动变压器式位移传感器。当忽略差动变压器的涡流损耗、磁滞损耗和分布电容的影响, 差动变压器可以看成是一个理想的模型, 其等效电路见图 1。图中 e_1 为初级线圈励磁电压, M_1 、 M_2 为初级线圈和两个次级线圈之间的互感, e_{21} 和 e_{22} 为两个次级线圈的感应电动势, L_1 、 R_1 分别为初级线圈的电感和电阻, L_{21} 、 L_{22} 分别为两个补偿线圈的电感, R_{21} 、 R_{22} 分别为两个补偿线圈的电阻。

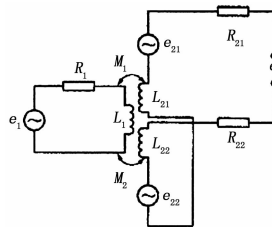


图 1 差动变压器式位移传感器等效电路图

根据变压器原理, 初级绕组接入交流电源之后, 由于互感作用, 两个次级绕组分别产生了感应电动势 e_{21} 和 e_{22} 。当两个次级线圈按电势相反的方向串联连接时, 次级线圈中就产生一个与铁芯位移量成线性函数关系的电压。当铁芯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, 两者的感应电势不再相等, 输出与位移量成比例的电压信号^[1-2], 具体分析如下:

根据变压器原理, 两个次级线圈感应电势分别为:

$$e_{21} = -j\omega M_1 I_1 \quad (1)$$

收稿日期:2017-08-01; 修回日期:2017-08-24。

作者简介:余菲(1989-),女,湖南岳阳人,工程师,主要从事伺服电子测量方向的研究。

$$\dot{e}_{22} = -j\omega M_2 \dot{I}_1 \quad (2)$$

输出电势为:

$$\dot{E} = \dot{e}_{21} - \dot{e}_{22} = -j\omega(M_1 - M_2) \dot{I}_1 \quad (3)$$

当铁芯在中间位置时, 若两个补偿线圈参数及磁路尺寸相等, 则 $M_1 = M_2 = M$, 所以 $\dot{E} = 0$ 。

当铁芯偏离中心位置时, $M_1 \neq M_2$, 由于差动作用, 所以:

$$M_1 = M + \Delta M \quad (4)$$

$$M_2 = M - \Delta M \quad (5)$$

在一定范围内, 差值 $(M_1 - M_2)$ 与铁芯位移成正比, 在负载开路情况下, 输出电势为:

$$\dot{E} = -j\omega(M_1 - M_2) \dot{I}_1 = -j2\omega \frac{e_1}{R_1 + j\omega L_1} \Delta M \quad (6)$$

位移传感器在工作时, 可通过测量输出电压的变化判断出铁芯位置的变化进而确定铁芯的位移量。

1.2 产品结构

本文研制的双冗余位移传感器主要由铁芯组件、线圈组件 I、线圈组件 II、壳体、屏蔽罩、隔环及端盖等部分组成, 如图 2 所示。为了满足电反馈伺服作动器的高可靠性要求, 同时适应作动器作动器安装位置狭小的空间限制, 位移传感器采用串联冗余方式, 通过端盖将两个线圈组件固定在壳体内成串联结构, 两个线圈组件的几何尺寸和电气参数完全相同, 通过采用阶梯补偿绕制方案, 能够保证产品在行程范围内的线性度。线圈组件、铁芯组件及屏蔽罩构成磁场回路, 两铁芯间用不导磁的导杆串联而成, 两线圈组件间采用隔环将两线圈分开, 减小两线圈间磁场的相互干扰。当铁芯组件往复运动时, 两线圈组件各自独立输出, 实现结构串联、功能并联的紧凑型双冗余高可靠的位移量测量功能。

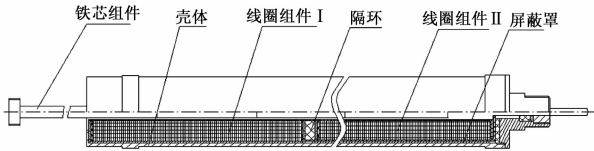


图 2 双冗余位移传感器结构图

2 产品设计技术研究

双冗余差动变压器式位移传感器采用了双线圈组件串联结构方式, 由两个功能相对独立的线圈组件、一个铁芯组件(含两个铁芯零件, 通过螺纹连接方式与无磁不锈钢材料连接)、屏蔽罩、隔环、壳体及端盖等构成。提高与改善传感器的性能的技术途径主要有结构、材料与参数的合理选择, 稳定性处理, 屏蔽、隔离与干扰抑制, 补偿与修正等。为满足伺服系统高精度及高可靠性要求, 进一步改善和提高位移传感器的性能, 对传感器进行设计技术研究主要包含以下方面:

- 1) 双冗余线圈绕制方法研究, 保证传感器高精度要求;
- 2) 防干扰解耦设计研究, 保证传感器输出精度;
- 3) 结构可靠性设计研究, 保证传感器可靠性要求。
- 4) 专用变换电路设计研究, 减小位移传感器磁路耦合干扰对输出信号造成的影响。

3 关键技术及解决措施

3.1 双冗余线圈绕制方法

为满足位移传感器的双冗余结构设计需求和全行程高精度

要求, 将位移传感器的线圈组件设计为两个线圈组件的串联方式, 并在有限的径向安装尺寸下, 采用阶梯型补偿绕制方案保证传感器在全行程范围内的高精度要求。具体实现方式为: 单个绕线窗口设计为 59 mm, 将长径比缩短为 1.78, 传感器长径比很小, 采用传统的平行绕制法, 由于线圈两端的磁场发散及内部磁场的均匀性, 即在传感器零位位置两端较小范围内磁场较为稳定, 在该区域传感器输出变化稳定, 为传感器线性区域; 在远离零位位置区域, 由于该位置磁场发散且不均匀, 故该区域为非线性区域, 一般差动变压器式位移传感器的线性工作范围约为线圈总长度的 1/4~1/5, 传感器输出特性曲线如图 3 所示, 其线性范围 X 较小, 无法满足传感器全行程高精度要求。

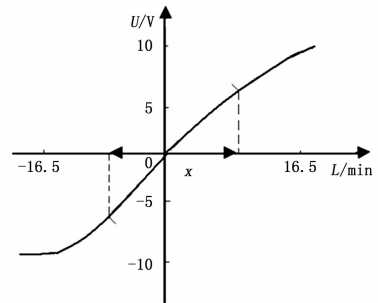


图 3 LVDT 线性测量范围曲线

为满足位移传感器线性度不高于 0.5% 的要求, 必须在有限的绕制空间中进一步扩大位移传感器的线性范围, 采用线圈阶梯补偿绕法对曲线中非线性范围内的各点进行补偿, 两次级线圈中间部位线圈缠绕较少, 两端线圈缠绕较多, 形成阶梯结构, 对传感器非线性范围进行补偿, 可以有效地增大传感器的线性范围。

利用 MAWELL 电磁仿真软件对本位移传感器进行电磁性能仿真, 基本过程主要包括以下几个步骤: 合理简化、建立几何模型, 根据实际指定材料属性, 设置边界条件, 添加激励源, 划分网格, 设置求解和后处理操作。对本次设计的位移传感器进行建模, 如图 4 所示。

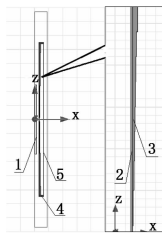


图 4 传感器二维模型结构图

在实际生产中, 需多次改变次级线圈的补偿方案来获得最好的线性度, 多次试制浪费了时间和成本, 影响了产品的交付进度。为提高设计效率, 快速优化补偿方案, 提高传感器线性度, 现利用 Maxwell 电磁仿真软件参数化扫描功能对位移传感器在不同补偿方案进行计算, 分析其电磁场的分布。但如果对每层线圈的长度都进行全程扫描, 计算结果会异常庞大。为提高计算效率, 避免不必要的计算过程、浪费资源和时间, 结合位移传感器补偿线圈的阶梯形状, 有针对性的选择补偿线圈尺寸范围进行扫描(设定次级线圈绕制层数为 6 层), 过程如图 5 所示。



图 5 对次级线圈尺寸进行参数化扫描

对模型结合图 5 中的参数化扫描功能，经仿真计算后，提取感应电压进行分析。经过一系列筛选，选取感应电压有效值与位移输出特性最好时的线圈尺寸，得到最好的补偿方案如表 1 所示。该尺寸下传感器的仿真精度为 0.075%。

表 1 利用参数扫描得到的线圈尺寸

补偿线圈长度/mm	29	25	21	17	13	9
层数/层	1	1	1	1	1	1

通过仿真模拟及线圈试制，确定传感器阶梯补偿位置参数，改善了传感器输出特性曲线，扩大了线性范围，保证了传感器全行程范围内高精度要求。

3.2 防干扰解耦设计

位移传感器设计有两个线圈组件、两个屏蔽罩及两个铁芯（铁芯间通过不导磁材料连接），形成了两个磁场回路，由于两线圈组件串联排布，线圈组件 I、线圈组件 II 两路电磁信号间容易发生磁路耦合干扰，使两路线圈输出信号因磁路耦合干扰而造成输出纹波增大，影响位移传感器的精度，故需对位移传感器进行防干扰解耦设计。

为降低磁路耦合干扰对传感器输出特性造成的影响，图 2 中，两个线圈外均设计有屏蔽罩和短路环，屏蔽罩和短路环的材料为 1J50 软磁合金材料，该材料具有高磁导率、高饱和磁感应强度特点，广泛应用于位移传感器设计中，两线圈的磁场在屏蔽罩和短路环的作用下相对独立的封闭在各自的空间内；通过在两串联线圈组件间设计一个非金属不导磁的隔环，来进一步隔离左右两个磁场回路，使线圈组件 I、线圈组件 II 的线圈磁场互不干扰。磁场分布示意图如图 6 所示，两路磁场回路间的磁场干扰被有效的降低，减小了传感器信号输出纹波。



图 6 磁场回路分布示意图

通过分析变换后的直流信号交流分量，由于两路变换器使用的变换器激磁信号频率总有些微小差异，其差频信号难以被变换电路的滤波器滤掉，导致输出纹波较大，故设计了两路不同激磁频率的变换电路，使其差频足够大，便于被滤波器滤掉，使输出纹波进一步被降低。具体参见 3.4 节。

3.3 结构可靠性设计

位移传感器采用两线圈组件串联而成，线圈组件 I 中引出线需通过隔环及线圈组件 II 引线槽后从端盖中心孔处引出，由于装配时线圈组件 II 受摩擦力影响发生转动，使其与线圈组件 I 之间存在相对微小的转角，可能会对线圈组件 I 的引出线造

成损伤进而出现断路情况引起传感器失效。

为避免两个串联线圈组件之间的相对转动而导致引出线出现的潜在断线故障，设计了骨架的防扭转结构，防止两串联线圈组件出现相对运动，提高了电气连接可靠性。如图 7 所示：两个骨架体前端各设计有一个凸台，在装配时互相搭接，两骨架通过此种方式相互限位，避免了两骨架间出现相对转动，保护传感器引出线。

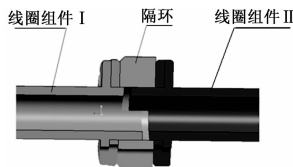


图 7 防扭转结构骨架装配图

3.4 位移变换电路设计

为保证位移传感器高精度要求，同时减小位移传感器双路线圈组件间的磁路耦合干扰对传感器输出造成的影响，设计了位移传感器专用变换电路。

为了减小激磁频率对产品性能的影响，变换电路核心芯片采用 AD698，在外围电路上设计有传感器灵敏度调整电路及二阶滤波电路，其原理为：由两路核心器件（AD698）分别为两个线圈组件提供不同频率的激磁信号，激磁信号经传感器调制后，传感器输出信号经灵敏度调节电路调整，通过 AD698 电路进行解调、滤波及放大处理，为了降低输出纹波同时满足系统动态要求，再经过有源二阶滤波电路进行滤波，最终输出一个与位移信号成比例的电压信号送伺服系统完成闭环控制。位移变换电路如图 8 所示，用双失调调整端代替单失调整端，偏置电压与电源电压无关，通过并联高精度电阻快速精确调整输出信号零位；采用全差动运放代替反向放大器，有效抑制共模干扰，提高了电路的抗干扰能力；采用两级放大倍数调节模式，实现输出信号的大范围和高精度幅值调整；通过外接无源元件确定激磁频率和幅值，激磁频率和幅值由电阻和电容分别决定，提高了激磁频率和幅值的稳定度。

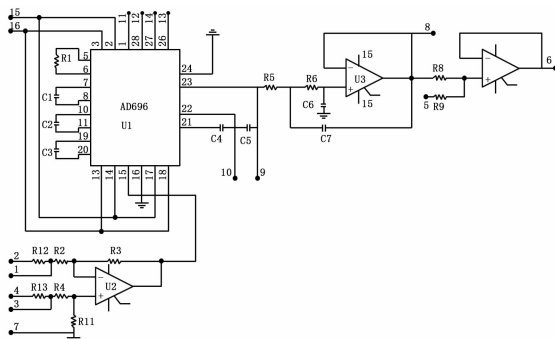


图 8 位移变换电路

图中，U2 及 U3 运算放大器及外围电路构成传感器灵敏度调节电路及二阶滤波电路。为减小位移传感器双路线圈组件间的磁路耦合干扰对传感器输出造成的影响，通过理论分析及试验验证，将两路位移变换电路的激磁频率设计为不同频率信号。经计算确定了二阶滤波电路电容参数，使传感器输出纹波满足伺服系统使用要求。

同时，AD698 芯片采用 ±15 V 供电，系统提供的 ±15 V 电源为二次变换电源，具有一定干扰抑制能力，电源电压相对

比较稳定, 考虑到传感器输出纹波要求较小, 故电路上设计了 LC 电源滤波电路, 如图 9 所示。

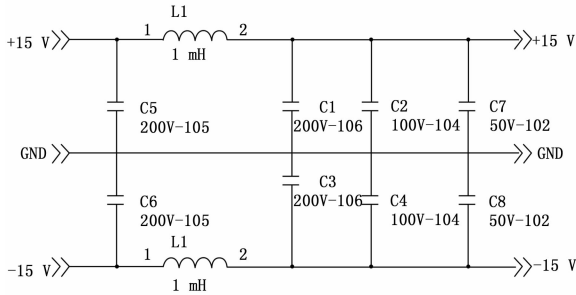


图 9 电源滤波电路

行程/mm	传感器Ⅲ输出/V		传感器Ⅳ输出/V		传感器Ⅴ输出/V	
	线圈 I	线圈 II	线圈 I	线圈 II	线圈 I	线圈 II
-16.5	-9.000	-9.000	-9.000	-9.000	-9.000	-9.000
-13.5	-7.394	-7.370	-7.414	-7.370	-7.388	-7.406
-10.5	-5.678	-5.657	-5.690	-5.644	-5.666	-5.689
-7.5	-3.980	-3.965	-3.983	-3.945	-3.968	-3.988
-4.5	-2.346	-2.339	-2.346	-2.324	-2.340	-2.351
-1.5	-0.773	-0.772	-0.773	-0.767	-0.772	-0.774
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5	0.777	0.772	0.774	0.770	0.773	0.773
4.5	2.365	2.343	2.344	2.341	2.349	2.346
7.5	3.741	3.980	3.698	3.974	3.991	3.981
10.5	5.737	5.678	5.678	5.676	5.702	5.685
13.5	7.451	7.408	7.399	7.397	7.422	7.407
16.5	9.000	9.004	9.000	9.000	9.000	9.000
线性度	0.064%	0.069%	0.061%	0.059%	0.057%	0.051%
输出交流纹波/mV	20	23	23	22	20	21

图 10 产品测试结果图

由图 9 所示, 系统提供的 ±15 V 电源经过 LCπ 型滤波电路, 滤波电容由大到小, 分别对输入电源的高频、中频及低频干扰进行抑制。输入端电容采用了 200 V 的高耐压电容, 提高位移变换电路的抗电压脉冲冲击能力。

(上接第 283 页)

4 结论

本文采用马尔科夫链的方法, 将飞行平台的生存和任务看作是随机过程, 并分别对生存和任务来建立模型, 然后有效统一生存模型和任务模型。在生存任务模型的基础上, 对计算航路代价, 并以此代价有效地衡量了航路有关生存和任务两方面的好坏。基于马尔科夫链的方法能直观地展现了状态和航路代价随时间的变化, 也展现了不同航路上能完成任务且无伤害返回的概率变化, 并对航路进行有效评估。状态概率、航路代价都可为飞行平台在生存和任务两方面提供决策支持。

参考文献:

[1] Helldin T, Erlandsson T. Automation guidelines for introducing survivability analysis in future fighter aircraft [A]. Proceedings 28th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences [C]. Brisbane, Australia; ICAS, 2012: 1-10.
 [2] 郭凤娟, 张安, 张耀中, 等. 高空无人侦察机生存力仿真研究

4 产品测试结果

通过对产品双冗余线圈绕制方法、防干扰解耦设计、结构可靠性及位移电路变换装置设计技术进行攻关, 试制了 3 套产品与适配变换电路进行了测试, 试验数据如图 10 所示, 产品线性度均小于 1%, 输出纹波为 20 mV 左右, 性能指标能够满足伺服系统使用要求。

5 结论

本文论述了一种串联双冗余差动变压器式位移传感器, 用于测量伺服作动器位移并参与系统闭环控制。位移传感器采用两个线圈组件串联排布, 两路位移信号独立输出, 通过对产品进行双冗余线圈绕制方法、防干扰解耦设计、结构可靠性设计及专用变换电路设计, 使产品在有限的安装空间下, 满足了高精度及高可靠性要求, 同时解决了线圈组件间的干扰问题, 满足了伺服系统使用要求。

参考文献:

[1] 袁希光. 传感器技术手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
 [2] 赵燕. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2010
 [3] Mohiuddin, Jaffer, King. Typical Linear Variable Differential Transformer (LVDT) [J]. Sensors, 2006, 235: 149-153.
 [4] Spiezia G, Losito R, Martino M, et al. automatic test bench for measurement of magnetic interference on LVDTs [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, 2011 (60): 1802-1810.
 [5] 金超武, 徐龙祥, 丁嵩. 非导磁金属隔层对差动变压器式位移传感器的影响 [J]. 传感技术学报, 2011, 24 (1): 30-35.
 [6] 陈贞, 李晓虹, 张键. 差动变压器式位移传感器的设计与实现 [J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2011, 23 (4): 34-36, 68.
 [7] 李飞, 张勇, 陈慧琴. 交流差动变压器式位移传感器数字调理方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2011 (1): 84-85.
 [8] 柏受军, 王鸣, 郎朗, 等. LVDT 位移传感器电压电流转换电路的设计 [J]. 传感器与微系统, 2012, 31 (4): 113-115, 126.
 [9] 王敬亭, 廖力清, 凌玉华. AD698 型 LVDT 信号调理电路的原理与应用 [J]. 国外电子元器件, 2005 (9): 63-64.
 [10] 李寿安, 宋笔锋, 李东霞. 飞机在单个射弹打击下的生存概率分析 [J]. 西北工业大学学报, 2009, 27 (6): 827-832.
 [11] 李寿安, 宋笔锋, 李东霞. 飞机在单个射弹打击下的生存概率分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41 (3): 121-124.
 [12] 蔡凌峰, 傅爱萍, 成海东. 无人机任务动态重规划方法 [J]. 指挥信息系统与技术, 2013, 4 (6): 31-36, 79.
 [13] 罗贺, 秦英祥, 王国强, 等. 一种无人机侦察能力评估模型 [J]. 火力与控制指挥, 2016, 41 (2): 7-12.
 [14] Erlandsson T, Niklasson L. An air-to-ground combat survivability model [J]. Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2015, 12 (3): 273-287.
 [15] Erlandsson T, Niklasson L. Comparing Air Mission Routes from a Combat Survival Perspective [A]. Proceedings of the 26th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference [C]. Palo Alto, California; AAAI Press, 2013: 58-63.
 [16] Erlandsson T, Niklasson L. Automatic evaluation of air mission routes with respect to combat survival [J]. Information Fusion, 2014, 20 (11): 88-98.