

电感式接近传感器在飞机上的应用及关键技术

Application of Inductive Proximity Sensor in Aircraft and Key Technology

中航工业第一飞机设计研究院 常 凯 李胜军 李振水

[摘要] 介绍了电感式接近传感器的工作原理、分类和信号处理等,对电感式接近传感器在国内外飞机上的应用情况及发展趋势进行了分析,分析了接近传感器应用的关键技术,最后对接近传感器在国内飞机上的应用前景进行了展望。

关键词: 电感式接近传感器 接近开关 智能检测

[ABSTRACT] Operation theory, classification, signal processing of inductive proximity sensor are introduced. The application of inductive proximity sensor in aircraft and the development tendency are described. The key technology about the application of inductive proximity sensor is analysed. At last, the future of the application of inductive proximity sensor in aircraft is prospected.

Keywords: Inductive proximity sensor Proximity switch Intelligent detection

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.20.076

传统的微动开关为机械按压式,存在触点老化、机械寿命低以及环境适应能力差等缺点。自从1965年开始,电感式接近开关就开始用于飞机的起落架控制和指示。电感式接近传感器采用全金属封闭,对金属物体进行非接触检测,具有寿命长、可靠性高以及环境适应能力强等优点。其工作温度可达到 $-65^{\circ}\text{C} \sim +135^{\circ}\text{C}$,经过特殊设计可达到 $-200^{\circ}\text{C} \sim +400^{\circ}\text{C}$ ^[1]。目前,国外军、民用飞机上广泛应用接近传感器作为起落架及舱门位置检测装置。电感式接近传感器的应用对于飞机起落架及舱门等系统的位置检测具有重要意义:

(1)非接触式检测,大大提高位置检测装置的可靠性和寿命。

(2)工况健康状态可实时检测,容易实现余度设计。

(3)更换后无需调整,减少维修工作量。

1 电感式接近传感器分类及工作原理

电感式接近传感器根据不同的安装形式可分为圆柱式和法兰式,见图1。

目前,飞机上所用到的电感式接近传感器按照激励信号的不同,工作原理可分为可变磁阻式和涡流损耗

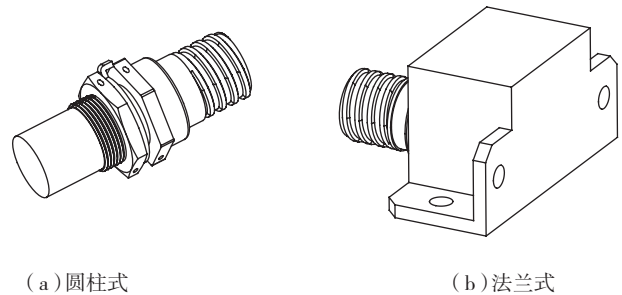


图1 接近传感器外形

Fig.1 Forms of proximity sensor

式。利用可变磁阻原理的电感式接近传感器信号由远程信号处理单元处理为离散信号,习惯上称为接近传感器;利用涡流损耗原理的电感式接近传感器内部自带信号处理电路,输出为离散电平信号,习惯上称为接近开关。

1.1 接近传感器

接近传感器激励信号为直流信号,利用可变磁阻技术对金属目标物进行检测,由线圈和磁芯组成,检测对象为软磁材料的金属靶标,其检测原理如图2所示。

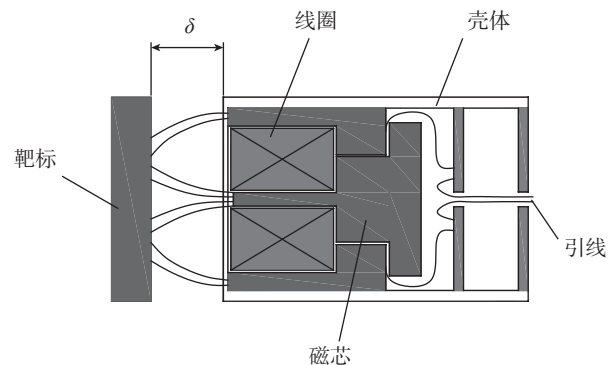


图2 接近传感器工作原理

Fig.2 Proximity sensor operating principle

在靶标向接近传感器移动时,气隙厚度的改变导致接近传感器线圈回路的磁阻发生变化。线圈的电感值 L 可按下式计算:

$$L = \frac{W^2}{R_M} = \frac{W^2}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}}, \quad (1)$$

其中, W 为线圈匝数, R_M 为磁路总磁阻, l_1 为磁通通过

磁芯的长度, μ_1 为磁芯的磁导率, S_1 为磁芯面积, l_2 为磁通过靶标的长度, μ_2 为靶标的磁导率, S_2 为磁芯面积, S_0 为气隙截面积, μ_0 磁芯的磁导率。

由于气隙磁阻 $\frac{2\delta}{\mu_0 S_0}$ 远大于磁芯及靶标磁阻 $\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2}$, 磁芯及靶标磁阻可以忽略不计, 此时:

$$L = \frac{W^2 \mu_0 S_0}{2\delta}, \quad (2)$$

因此, 变磁阻式传感器的 L 值及磁路总磁阻 R_M 与 δ 、 S_0 和 μ_0 参数有关^[2]。

接近传感器大多为双线输出, 即线圈的两个接线端。部分采用三线输出, 带有温度补偿元件。远程电子接口单元提供接近传感器激励信号, 并将接近和远离状态处理为离散电平信号。由于电子接口单元位于飞机内部的封闭区域, 运行环境较好、可靠性高, 国外军、民用飞机大多采用该类型的接近传感器。

1.2 接近开关

接近开关利用的是涡流损耗原理, 在内部集成了信号处理电路, 激励信号为交变信号, 对外输出离散电平信号, 从而不必增加单独的电子处理单元。

接近开关工作原理见图 3。

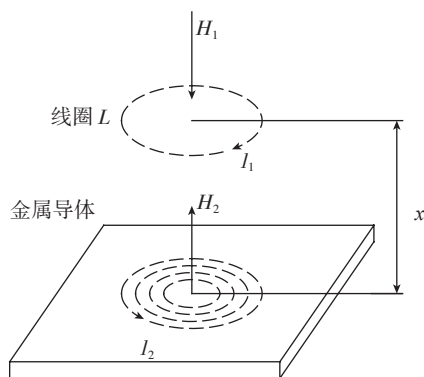


图3 接近开关工作原理

Fig.3 Proximity switch operating principle

把被测金属导体上形成的电涡流等效成一个短路环中的电流, 这样就可以得到如图 4 所示的等效电路。

图 4 中, R_1 、 L_1 为接近开关线圈的电阻和电感; R_2 、 L_2 为被测导体的电阻和电感, 接近开关线圈和导体之间存在一个互感 M , 它随线圈与导体间距离的减小而增大; U_1 为激励电压。

可以求得接近开关线圈的等效阻抗^[3]为:

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{I_1} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j[\omega L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2], \quad (3)$$

通过上式可见: 涡流的影响使得线圈阻抗发生了变化。

接近开关内部信号电路原理如图 5 所示。传感器线圈 L 和电容器 C 并联组成谐振回路。当金属导体远离或被去掉时, L 、 C 并联谐振回路谐振频率即为石英振荡频率 f_0 , 回路呈现的阻抗最大, 谐振回路上的输出电压也最大; 当金属导体靠近传感器线圈时, 线圈的等效电感发生变化, 导致回路失谐, 从而使输出电压降低。

因此, 接近开关内部电路工作在谐振和失谐两种状态, 可直接将金属靶标接近和远离状态输出为离散电平信号。但是, 由于接近开关多安装在起落架舱等暴露部位, 自然环境较差, 而且内部集成了电子电路, 容易出现老化等现象。接近开关价格低廉, 应用方便, 多用于小型飞机。

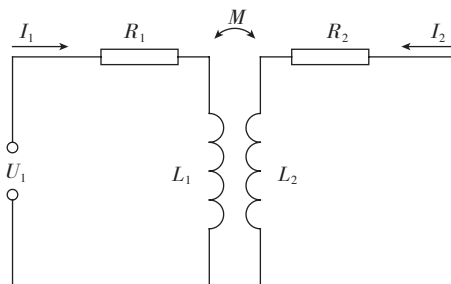


图4 工作等效电路

Fig.4 Operation equivalent circuit

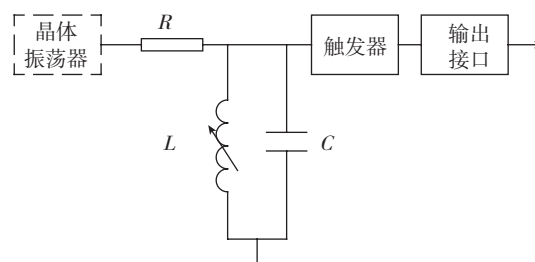


图5 接近开关内部信号处理电路原理

Fig.5 Proximity switch inner signal processing circuit principle

2 接近传感器在飞机上的应用

2.1 应用范围

接近传感器多使用在对机构进行到位检测的部位, 主要应用于以下领域:

- (1) 起落架系统: 检测起落架收上 / 放下上锁、机轮承载及起落架舱门位置。
- (2) 舱门系统: 检测货舱门、登机门等机身舱门的关闭状态。
- (3) 发动机系统: 检测发动机油门反推杆的状态。
- (4) 飞控系统: 检测地面扰流板、缝翼等位置。

2.2 国外应用现状

- (1) 应用范围广、用量大。

接近传感器在国外军、民用飞机上应用非常广泛, 民用飞机如空客、波音、庞巴迪、湾流等系列, 军用飞机

如 A400M、F22、F35、B-1、B-2 等飞机。应用系统包括起落架系统、舱门(货舱门、登机舱门等)系统、反推系统、飞行控制系统等,应用数量几十到几百个。国外大型飞机和支线客机的起落架和舱门位置多配置双余度甚至多余度接近传感器,在位置指示要求较高的位置,还设置三余度,如 A340 飞机起落架下位锁单独设置第三余度用于起落架放下位置指示。接近传感器在国外飞机上的应用情况见表 1。

表1 接近传感器在国外飞机上的应用情况

飞机型号	起落架	舱门	油门反推杆	飞控
A300	√	√		
A320	√	√	√	√
A330	√	√		√
A380	√	√	√	
波音 737	√	√	√	√
波音 747	√		√	√
波音 757	√	√		√
波音 767	√	√	√	√
波音 777	√	√		√
ARJ21-700	√	√	√	√
ERJ-190	√	√		√

(2) 系统设计经验丰富,规范化。

在国外飞机设计中接近传感器作为通用位置检测装置得到大量应用。特别是起落架系统、舱门系统以及运输机的货运系统等用量较大,接近传感器信号的采集和处理采用双余度电子接口单元,两个电子接口单元之间进行交叉通讯,对接近传感器信号进行综合处理,用于系统控制和指示。在不断应用的过程中,国外航空企业积累了丰富的接近传感器使用经验,包括接近传感器的安装、接口电路设计、控制及指示逻辑设计、系统集成试验等,形成了指导接近传感器系统设计的相关指导性文档,如美国汽车工程师协会编制的 SAE AIR 1810 等。

(3) 产品系列化、配套能力强。

目前,接近传感器产品的供应商很多,但主要集中在工业领域。在机载设备领域,供应商则主要集中在国外几家公司,如美国的克瑞、霍尼韦尔、古德里奇和法国的高诺斯等,而且接近传感器产品形成系列化,可研制抗电磁干扰能力强、工作温度范围广的接近传感器产品。同时,配套的电子接口电路实现集成化,并且提供的接口丰富,使接近传感器的应用更为简便。各供应商不仅提供接近传感器产品,还提供系统集成产品。在接近传感器系统集成方面有美国克瑞公司、英国奥创电子等公司。并且这两家公司作为一级或二级供应商承担了波音、空客和其他飞机的绝大多数接近传感器系统的集成业务。

2.3 国外发展趋势

接近传感器的开发朝着检测距离更远、环境适应能力更强的方向发展。国外某公司接近传感器壳体采用钛合金,最大检测距离达到 25mm。同时,接近传感器采用更先进的密封工艺,避免潮气及液体的侵入。检测体采用全金属,使接近传感器能在更加严酷的环境正常工作。

接近传感器的电子接口电路也朝着集成度更高、处理能力更强的方向发展。同时,接口电路带有丰富的接口,为接近传感器的分布式采集和传输以及系统的分布式控制提供了便利。

2.4 国内应用现状

目前,国内绝大多数型号的飞机起落架、舱门等系统普遍采用微动开关。接近传感器的应用还处于初步阶段,主要是我国对接近传感器在飞机上的应用研究过少,缺乏应用经验,也没有相应的设计规范作为依据。近几年,我国的一些飞机设计单位也逐渐开始对接近传感器在飞机上的应用进行了研究和尝试,如我国拥有自主知识产权的新支线客机 ARJ21-700 在起落架、舱门、反推及飞控系统中采用了接近传感器,位置指示与作动系统(PIAS)供应商是德国的利勃海尔公司,而接近传感器供应商是法国的高诺斯公司。西飞公司生产的新舟 600 飞机采用的是美国克瑞公司的接近传感器。

近几年,国内少数机载设备供应商也开始加强接近传感器的应用研究,已突破和掌握了全金属接近传感器应用的关键技术,并成功应用到国内某飞机起落架系统中,用于起落架和舱门位置及轮载状态检测。但是,国内相关生产商的接近传感器研制能力较弱,产品较为单一,没有形成系列化,同时系统集成能力较为薄弱。

3 接近传感器在飞机上应用的关键技术

3.1 接近机构设计技术

接近传感器和靶标运动机构设计及其安装的是否合理将直接影响到位置指示和控制,从而影响飞机安全。因此接近传感器及靶标运动机构设计是一个关键环节。接近传感器和靶标安装包括:安装位置选取、运动机构设计及运动测试等环节。(1)接近传感器及靶标安装应选择结构变形和振动较小并且能直接检测到被测物体到位的位置,如结构转轴、起落架锁的锁键等位置。同时,结构变形引起的接近传感器和靶标的相对位移应低于接近传感器标准检测距离的 15% 及以下^[1]。(2)接近传感器的安装一般采用接近传感器固定、靶标运动的方式,同时应和相应的结构进行集成设计,这样既能减少支架连接,又能保证机构运动的准确性,减少误指示的概率。靶标的安装应留出调整余量,在靶标和

接近传感器相对位置不满足要求的情况下进行调整。(3) 在安装设计完成之后,应进行运动测试,检查接近传感器的接近特性是否满足设计要求。

3.2 智能检测技术

接近传感器信号需要经过处理为代表上锁、开锁或到位、不到位的离散信号才能用于系统控制并向其他系统提供。信号处理关系到系统控制及信号可靠性,对于起落架系统,负责向全机很多系统发送轮载及起落架位置信号。如果信号的可靠性差,将严重影响飞机系统的正常工作。目前,接近传感器有多种检测方法,如相位检测法、电桥检测法等。在实现上,接近传感器信号处理电路优先采用纯硬件解算,具有通道故障检查功能。根据国外应用情况,每个接近传感器都应有独立的信号处理硬件通道。为方便应用,国外供应商将接近传感器的处理电路集成在独立的芯片上,将机构的到位和远离状态(如锁的上锁和开锁状态等)处理为高低电平的输出信号,并带有接近传感器通道的故障检测功能。而且,集成电路也在不断发展,处理能力也从处理单个接近传感器发展到同时处理多个通道接近传感器信号。采用集成电路处理不仅可以减少器件数量,而且大大提高了整个接近传感器通道的可靠性。目前,国内在接近传感器接口集成电路方面的产品较少,亟待开展相关的研制和生产工作。

3.3 控制及指示逻辑设计

位置指示特别是起落架放下、机身舱门等位置指示的准确性直接影响到飞机安全和任务执行,这不仅与接近传感器的安装有关,也和位置指示逻辑的设计息息相关。基于双/多余度接近传感器的逻辑设计,需有效利用接近传感器正常信息,编制具有覆盖各种状态,信息提取完整,具备容错能力和安全保护能力,高度可靠的控制与指示逻辑,保证位置指示的可靠性。接近传感器接口电路在输出“目标近”和“目标远”信号的同时,还输出接近传感器的正常状态,即接近传感器通道的“正常”和“故障”信息。在进行控制和指示逻辑设计时,应利用接近传感器正常判断该通道信号是否有效的情况下进行综合逻辑判断,同时实现逻辑中对故障通道进行隔离。同时,还应考虑系统中可能出现的各种状态,使系统的控制和指示逻辑具有更好的适应性。

4 结束语

电感式接近传感器以其高可靠性、长寿命和较强的环境适应能力正逐步得到国内飞机设计领域的重视。同时,从接近传感器及相关产业发展来看,国内各生产商也应加大对电感式接近传感器及其处理电路研究的投入力度,丰富接近传感器的产品系列,增强系统集成研发能

力。可以预见,电感式接近传感器在国内后续各型号军民飞机的研制中会得到越来越广泛的应用。

参考文献

- [1] Development and test criteria -solid state proximity switches/systems for landing gear applications. SAE AIR 1810,2003.
- [2] 郁有文,常健.传感器原理及工程应用.西安:西安电子科技大学出版社,2000:46-52.
- [3] 黄继昌,徐巧鱼,张海贵,等.传感器工作原理与应用实例.北京:人民邮电出版社,1998:269-273.

(责编 叶枫)

(上接第75页)

个弹壳,试加工时间(冷冻、加工、加热)为33min。分析是对产品测量得 $L=14.01\text{mm}$,圆柱度公差为0.050,表面粗糙度 R_a 为 $0.6\mu\text{m}$,平端面 $t=19.8\text{s/个}$,符合要求。

6 结论

本文研究设计了一套无痕自动装夹系统,实现了薄壁工件的批量装夹;从金属切削理论角度分析了选用高速铣削工艺的必要性;介绍了弹壳余量加工工装设计参数和铣削参数的选取,可为同类工件加工提供借鉴;冷冻液滤去切屑可重复利用,加工成本低,对设备进行少量改装即可对同类工件进行加工,工艺适应范围广。其不足之处有:工件的装夹及定位靠手工操作,人为因素影响较大,装夹自动化方面需要深入研究;加工效率受环境温度和工件尺寸影响,数值波动较大;致冷器各级制冷参数与高速铣削参数互相制约,在装夹系统与高速铣床配套方面需要深入研究。

参考文献

- [1] 柯映林,金成柱,刘刚. NOMEX 蜂窝芯高速铣削加工工艺的优化.中国机械工程,2006(12):93-96.
- [2] 贾广杰.薄壁壳体石蜡填充高速加工法.新技术新工艺,2009(3):4-6.
- [3] Kug W K, Hyo-Chol S. The element method and thermoviscoplastic cutting model in manufacturing systems. New York: CRC Press,2001:24-30.
- [4] 武凯,何宁,姜澄宇,等.立铣空间力学模型分析研究.南京航空航天大学学报,2002,34(6):553-556.
- [5] 李尚政,刘宏,张日升.弱刚度件精密加工技术研究.机械制造,2002(11):33-35.
- [6] 孔金星,雷大江,岳晓斌,等.高速铣削参数对工件表面质量的影响.机床与液压,2007(2):80-82,85.
- [7] 张雷.高速铣削力学模型.煤矿机械,2002(11):39-41.
- [8] 周泽华.金属切削原理.上海:上海科学技术出版社,1993.
- [9] 周照宣,周起钊,殷金生.理论力学.北京:北京大学出版社,1982.
- [10] 李文彬.电子冷冻切削加工.北京:兵器工业出版社,1987.

(责编 亦非 叶枫)