DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.06.054

一种机场异物探测的伺服转台设计

王丽男,陈星星,杨景岚,冯晓雄,刘赓
(南京晨光集团有限责任公司,江苏 南京 210016)

摘　要:设计一款用于机场跑道异物探测的一维伺服转台,其具有质量轻、体积小、可靠性高、定位精度高的特点。介绍转台的总体设计,包含指标要求、轻量化台体布局和驱动机构设计、负载参数计算等;进一步介绍转台关键结构件设计;基于确定的转台结构进行有限元仿真,包含极限载荷下的强度校核和模态分析。

关键词:一维伺服转台;总体设计;结构设计
中图分类号:TH122　　**文献标志码**:B　　**文章编号**:1671-5276(2024)06-0274-04

Design of Servo Turntable for Detecting Foreign Bodies in Airport

WANG Linan, CHEN Xingxing, YANG Jinglan, FENG Xiaoxiong, LIU Geng
(Nanjing Chenguang Group Co., Ltd., Nanjing 210016, China)

Abstract: Designs a one-dimensional servo turntable for detecting foreign objects on airport runway, which is light in weight, small in size and with high reliability and high positioning accuracy. The overall design of the turntable is introduced, including the index requirements, the layout of the turntable, the design of the driving Themechanism and the design of load parameter calculation etc. The design of key structure for the turntable is further introduced. The finite element simulation is carried out based on the confirmed turntable structure, which embodies the strength check and modal analysis under the ultimate load.

Keywords: one-dimensional servo turntable; overall design; structural design

0　引言

近几年我国 FOD 检测雷达系统相关研究发展迅速,成果也比较明显,然而 FOD 检测雷达系统要真正在机场中发挥作用,必须依赖高性能的转台作为载体[1]。因转台可承载 FOD 检测雷达天线在一定的角度范围内以某一角速度对机场跑道等位置的 FOD 检测,所以对转台控制系统的位置精度和速度稳定度有着比较高的要求。

针对 FOD 转台结构设计,相关学者开展了一系列研究。罗晗[2]针对一款单轴转台,重点介绍了转台在-40 ℃~+70 ℃工作温度范围内零件热变形对装配体的影响。孙久荣[3]设计一款电机通过皮带带动减速机转动、减速机输出轴与转台台面直接连接的 FOD 检测雷达转台伺服控制系统。刘双富等[4]对机场异物探测转台内部温湿度控制进行了研究。桑青华等[5]针对一种边灯式 FOD 探测转台,重点分析了其控制系统的设计。

本文针对 FOD 转台质量轻、体积小、可靠性高、定位精度高的发展需求,设计了一种可调节偏心距,提高定位精度和可靠性的一维伺服转台结构,其具备自身质量轻、带载能力强、结构紧凑的特点,开展了转台总体设计、结构设计、驱动传动设计等,基于 Proe4.0 建立了虚拟样机模型,并通过 Abaqus 对模型进行了有限元静力学、模态分析,校核了转台结构的强度、刚度、稳定性,验证了结构的可靠性。

1　转台总体设计

1.1　指标要求

转台具有方位回转功能,主要由转盘、支撑轴承、步进电机、行星减速机、齿轮传动副、角度传感器、控制电路板等机构组成。

1)工作模式

转台具备 3 种工作模式:扇扫工作模式、定位工作模式、开电自检工作模式;转台应当具备自检功能。当探测设备不能正常工作时,应当立即以 BIT 信息或者声音报警等方式上传给上位机;若自检一切正常后,通报上位机可以接收工作指令,随即处于待机工作状态。

2)转角范围

该转台要求采用齿轮传动形式,方位最大转动范围为 0°~340°。

3)定位精度

各种工作模式下的重复定位精度不超过 0.1°

第一作者简介:王丽男(1993—),女,江苏南通人,工程师,硕士,研究方向为机械装备,linanwang.anne@ foxmail.com。

(单次最大偏差)。

4)承载能力

不小于8 kg。

5)其余结构要求

转台具备自锁功能,不上电或者待机时,在134 m/s飞机尾流下不允许转动。

1.2　转台系统设计

伺服转台主要由方位回转机构、伺服控制单元、伺服驱动单元等组成。上位机发命令给伺服控制单元,控制信号传递到伺服驱动单元和用户单元,进而驱动方位回转机构,实现转台的方位运动。通过高精度角度编码器和控制逻辑实现全闭环精密定位控制,工作原理如图1所示。

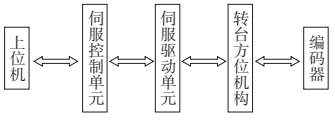

图1　转台驱动工作原理图

如图2所示,一维伺服转台主要由壳体、方位回转机构、基座和安装板等组成。

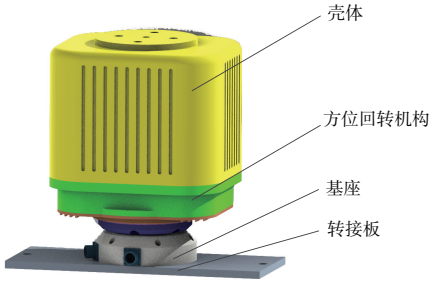

图2　转台外形图

方位回转机构可实现0°~340°方位旋转。转台的转盘上设置xy(二维)水泡仪,安装在基座上。转台初步安装时,通过该位置水泡仪由人工快速进行调平,调平结束后可将该水泡仪拆除。在适当的位置设置零位标识线。转台方位回转机构如图3所示。

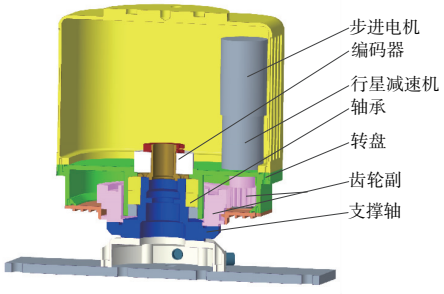

图3　转台方位回转结构图

如图3所示,转台主要由方位回转机构和控制系统组成,其中方位回转机构由转盘、轴承、齿轮副、步进电机、行星减速机、编码器、驱动控制元件(放置在转盘上方,在剖面图另一侧)等组成;控制系统由控制器和驱动器组成,安装在转台内部。电机与减速机组合将动力传输于齿轮传动副方位轴,驱动机构随转盘一起运动。

系统整体的DC24 V供电由外部提供。控制器是整个系统的核心,包括接收上位机的控制指令、向上位机反馈当前位置与状态、给驱动器发送控制指令、与相机通信。驱动器用于控制步进电机的转动和角度传感器的信息采集,根据控制器的指令和角度传感器反馈的角度信息实现对转台转动的闭环控制并将当前的位置反馈给控制器。控制器通过电缆与上位机和相机进行RS422串口通信和以太网通信,控制器与驱动器通过电缆连接主要进行CAN通信。其关系示意图如图4所示。

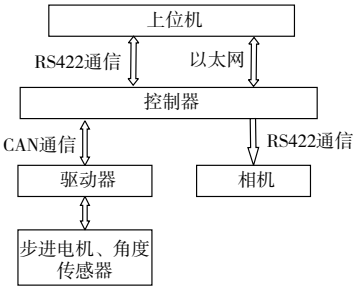

图4　伺服转台控制系统工作原理图

1.3　驱动机构设计

方位回转传动系统由电机、减速机、齿轮副、控制单元、编码器组成,系统逻辑框图如图5所示。

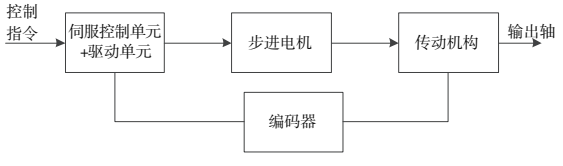

图5　方位回转机构传动系统框图

驱动机构作为传动机构可采用电机直驱和进给驱动(电机加减速机)的方式实现。从电机控制角度考虑,电机直驱为较为理想的方式,因为电机直驱的输出轴精度高、无回程间隙、结构简单。进给驱动引入了中间环节,与直驱比较,其结构相对复杂,并且齿轮传动有传动回程间隙,精度比直驱低,但进给驱动由于增大了传动机构的传动比,

使电机本体的启动力矩减小,进而减小了电机本体的体积。

通过比较分析,转台需采用电机加减速机的方式实现,虽然减速器传动存在传动回程间隙,结合控制驱动器传动精度要求,通过理论计算,传动回程误差可以满足控制器总体精度要求。

1.4　方位回转机构参数设计

整个转台包络尺寸为(ϕ275×330) mm,方位回转角度为 0°~340°。经过初步建模和估算,暂时按下述参数进行设计:

方位回转转动惯量 $Jz=0.25\ \mathrm{kg\cdot m^2}$;

方位轴偏心 $\Delta z=37\ \mathrm{mm}$;

方位回转负载为 8 kg;

方位回转最大角加速度为 $100°/\mathrm{s^2}$;

风载荷:28 m/s 风速下风压为 490 $\mathrm{N/m^2}$,134 m/s 风速下风压为 11 223 $\mathrm{N/m^2}$;

壳体最大迎风面面积为 79 750 $\mathrm{mm^2}$。

1)惯性力矩

转台所有转动部件的转动惯量约为 0.25 $\mathrm{kg\cdot m^2}$,最大角加速度要求为 100 $°/\mathrm{s^2}$,则惯性力矩(单位:Nm)应不小于

$$T_1=J\times\varepsilon=0.25\times100/57.3=0.44 \qquad (1)$$

2)摩擦力矩

摩擦力矩(单位:N)主要包括轴承以及旋转动密封引起的摩擦。其中轴承的摩擦包括轴向负载和倾覆力矩引起的摩擦力矩。

摩擦力矩 T 按 28 m/s 风速计算 2.19;按 134 m/s 风速计算 4.08。

3)风引起的阻力矩

134 m/s 风速引起的阻力矩(单位:Nm)为

$$T_2=F_2\times r=898\times0.275/4=61.7 \qquad (2)$$

经过初步计算 134 m/s 风速下的转矩为 61.7 Nm。28 m/s 风速引起的阻力矩为

$$T_3=61.7\times\frac{28^2}{134^2}=2.7 \qquad (3)$$

4)总力矩

通过上述计算,可以得出:

总力矩 28 m/s 风速下为 5.4 Nm;134 m/s 风速下为 66.3 Nm。

系统要求设备在 28 m/s 风速下能够动作,在 134 m/s 风速下不被破坏(尽量考虑较大风速下可以工作),因而在设计时所有器件和结构件的强度按照 134 m/s 风速下的最大力矩(66.3 Nm)计算,驱动机构的功率需要考虑短时内承受 134 m/s 风速下最大力矩(66.3 Nm)。

2　关键结构件设计设计

2.1　转盘、壳体

转台整体设计布局非常紧凑并尽可能轻量化设计。转台台面采用硬铝合金 7075 加工而成,在保证结构强度的前提下尽可能减小质量,转台整体质量约为 6 kg。

2.2　偏心套

在安装电机的壳体孔加工完成后,其相对位置就确定了,无法对齿轮侧隙进行调节。加入偏心套后,当齿轮或壳体存在加工和装配误差时,通过转动偏心套可调节两齿轮之间的侧隙,能消除齿厚偏差、中心距的偏差和公法线偏差[6]。偏心套的引入不仅降低了壳体孔系的位置精度、齿轮螺旋角精度的加工要求,还控制了回差,使得产品精度满足要求。以下对偏心套结构进行详细说明。

偏心套结构如图 6 所示,其外径为 R,内径为 r,偏心距为 e,其厚度为 m,则偏心套可调节齿隙 p 值为

$$p=R-r+e\cdot\cos\theta \quad \theta\in(0°,360°) \qquad (4)$$

式中 m 与壳体安装孔的深度有关。

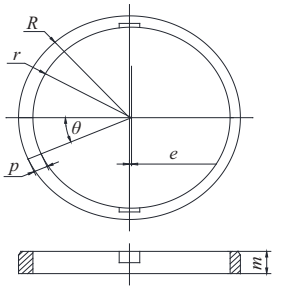

图 6　偏心套结构示意图

通过分析可知,影响齿侧间隙的参数有:壳体上的一对齿轮安装孔的间距实测值为 a,小齿轮分度圆半径实测值为 r_1,大齿轮分度圆半径实测值为 r_2,则实测齿侧间隙 t 值为 $t=a-r_1-r_2$。

此时引入偏心套可调节齿隙 p 值,则调整后的齿侧间隙 t' 值为 $t'=a-r_1-r_2-p$,即

$$t'=a-r_1-r_2-(R-r+e\cdot\cos\theta),\theta\in(0°,360°) \qquad (5)$$

因此,根据上述理论计算,在齿轮副、壳体安装完成后,对其齿侧间隙进行测量和计算,若与设计要求齿隙 0.026 mm 有出入,再对偏心套方向进行旋转来调节齿侧间隙。

3　有限元仿真分析

3.1　基于 Abawus 的有限元静力分析

基于 Proe 建立的高精度、高映射三维几何模型涉及很多模型细节特征,主要包括倒角、圆角、螺栓孔、斜边、复杂齿轮外形等,而这些模型细节并不是本次分析所关注的重点,且如果加上这些细节分析会大大增加仿真计算量。因此,对一些零部件的几何模型进行适当简化。将简化后的三维模型导出为 step 格式,导入 Abawus 中建立有限元静力分析模型,对云台结构各个零件进行材料赋值,对模型采用自由划分技术划分十结点二次四面体单元,控制全局网格尺寸大小为 5 mm。

在进行受力分析时,对方位回转机构进行受力分析,整个机构能够承受负载 8 kg,作用力在回转中心工况下不发生损坏。

转台在承受负载 8 kg,作用力在回转中心工况下的应力情况如图 7 所示。可以观察到,其整体结构的应力主要分布在 0~6 MPa 范围内,最大值为 5.8 MPa,最大应力集中在施加作用力的位置,其中转盘结构材料为 7075 铝合金,其屈服强度为 455 MPa,取 4 倍安全系数,113.75 MPa > 7.7 MPa,故转台在该工况下满足强度要求。

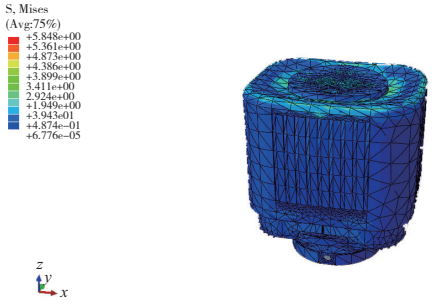

图 7　负载偏心作用下应力云图

整个机构能够承受负载 8 kg、作用力在回转中心工况下的变形分布情况如图 8 所示。可以观察到,其整体结构的变形主要分布在 0~0.001 8 mm 范围内,最大值为 0.001 9 mm,最大变形集中在施加作用力处,故转台在工作风载下满足刚度使用要求。

3.2　基于 Abawus 的有限元模态分析

伺服转台动力学分析主要是模态分析,基于 Abawus 建立有限元模态分析模型。网格划分、固定约束情况与静力分析相同。经过模态分析,得到了转台的 6 阶模态云图和对应的模态频率值分别如图 9 所示和表 1 所示。

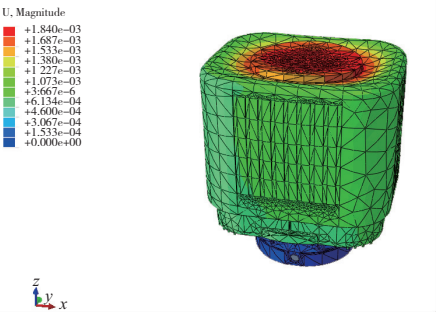

图 8　负载偏心作用下位移云图

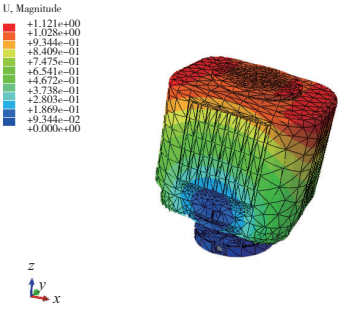

图 9　模态分析 1 阶模态

表 1　转台固有频率表　　单位:Hz

阶次	频率
1	602.7
2	716.6
3	1 699.9
4	2 279.0
5	3 373.9
6	3 532.2

振动模态是弹性结构固有的、整体的特性。通过模态分析方法明确了结构物在某一易受影响的频率范围内各阶主要模态的特性,就能预测结构在此频段内在外部或内部各种振源作用下产生的实际振动响应。因此,模态分析是结构动态设计及设备故障诊断的重要方法。

由模态分析可知,转台系统在前 6 阶振型中的固有频率范围为 602.7~3 532.2 Hz,外部激励频率小于 300 Hz。因此转台设计满足指标要求,可保证其在工作时的可靠性和稳定性。

4　结语

1)本文设计了一种高负载自重比的一维伺服

(下转第 282 页)

术,2021,63(4):303-305.
[5] 乔石,刘阔,都书博,等. 基于功率信息的航空发动机叶片铣削刀具监测试验研究[J]. 航空制造技术,2021,64(16):87-92,110.
[6] 牛一捷,李花,邓武,等. 基于 TQWT 和稀疏表示的滚动轴承故障诊断方法[J]. 交通运输工程学报,2021,21(6):237-246.
[7] 张泽宇,石泽,惠记庄,等. 强噪声下工程装备轴承信号的稀疏重构研究[J]. 机械科学与技术,2021,40(9):1361-1369.
[8] 张成,黄伟国,马玉强,等. 自适应学习字典的信号稀疏表示方法及其在轴承故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报,2022,35(5):1278-1288.
[9] 巩晓赟,李超,赵志伟,等. 轴承耦合故障的多步网格搜索优化稀疏诊断方法[J]. 机械传动,2022,46(10):149-155,176.
[10] 刘新厂,林建辉,陈春俊,等. 基于稀疏表示以及图谱理论的故障诊断方法[J]. 振动·测试与诊断,2022,42(3):139-145,210.
[11] CANDÈS E J, WAKIN M B, BOYD S P. Enhancing sparsity by reweighted ℓ1 minimization[J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2008, 14(5): 877-905.
[12] DONG WS, ZHANG L, SHI G M, et al. Image deblurring and super-resolution by adaptive sparse domain selection and adaptive regularization[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2011, 20(7): 1838-1857.
[13] 林慧斌,邓立发. 滚动轴承压缩故障信号的特征代理与凸优化重构算法[J]. 振动工程学报,2022,35(2):434-445.
[14] 殷逸冰,文振华. 基于模态分量优化重构和稀疏表达的静电信号联合降噪方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(2):196-204.

收稿日期:2023-04-10

(上接第 277 页)

转台,具备轻量化、带载能力强、高集成化等特点。方位机构采用回转支撑的布局方式,增加了结构的紧凑性。主体结构采用高强度铝合金材料,结构采用薄壁结构加局部加筋设计,实现结构轻量化。

2)综合考虑风载荷力矩、惯性力矩、偏心力矩、摩擦力矩等因素影响,对转台的方位驱动传动系统进行详细参数设计计算,为电机、减速机配比选型提供指导。

3) 基于 Abawus,对转台整体结构进行有限元静力分析和模态分析,结果表明:所设计的转台结构强度、刚度满足使用要求,不会发生共振现象。

4)该转台在工程中实现应用,使用激光跟踪仪测出位置精度误差最大为 0.06°,优于 0.1°的技术要求。

参考文献:

[1] 孙久荣,王大明,李寒. 基于 STM32 的 FOD 雷达转台控制系统的设计[J]. 计算机与数字工程,2015,43(12):2288-2290.
[2] 罗晗. 单轴 FOD 伺服转台设计[J]. 机械,2021,48(12):36-42.
[3] 孙久荣. FOD 检测雷达转台伺服控制系统的设计[D]. 西安:西安工业大学,2016.
[4] 刘双富,余南阳. 机场跑道异物探测系统光学探测转台温度控制实验研究[J]. 制冷与空调(四川),2019,33(1):98-102.
[5] 桑青华,朱伟林. 一种边灯式 FOD 探测设备伺服控制系统设计[J]. 现代信息科技,2021,5(8):42-44,47.
[6] 解晓辉. NGW 行星齿轮减速器回差分析[D]. 北京:机械科学研究院,2004.

收稿日期:2023-03-08