

一种五自由度转台设计

李难民

上海人本集团轴承技术研发有限公司 上海 201411

摘要: 随着电子技术日新月异的发展步伐,以及国防安全与工业生产等领域的迫切需求,惯性导航测试设备正日益成为焦点所在。其中,转台作为惯性导航测试的核心装置,已广泛渗透至航空、航天、国防建设及工业制造等多个领域。本文深度聚焦了一种五自由度转台的创新设计思路。

关键词: 五自由度; 计算; 转台设计

引言: 在当今科技领域,导弹与航天技术正以惊人的速度跻身高新技术前列。回溯至飞行器(涵盖导弹)研发的初期阶段,现场实验频繁上演,这一过程不仅耗费了大量的人力资源、物资与资金,而且在面对多重外界干扰及环境约束下,精确且全面的实验数据与规律获取变得尤为艰难。鉴于飞行器结构的繁复性以及高昂的制造成本,任何使用过程中的故障都可能带来不可估量的损失,乃至人员伤亡的悲剧,因此,对飞船、飞行器及导弹实施实时追踪,并对其飞行姿态进行精准模拟,其重要性不言而喻。转台为飞行器实验设计的测试平台,深深植根于控制论、相似原理、系统科学及信息技术的沃土之中,巧妙融合计算机技术与专用物理装置,成为助力飞行器研发不可或缺的高端工具。它不仅能够模拟复杂飞行环境,还为科研人员提供了一个安全、可控的实验场所,极大地推动了导弹与航天技术的创新发展。

1 转台的设计

1.1 转台方案拟定

本设计所需要设计的转台类型为大承载二轴转台,二轴分别实现回转、俯仰运动,转台根据用途可分为方针转台和刮性测试转台,根据最大角速度以及大承载特性,可归为惯性测试转台,其侧重静态或稳态性能,主要用于惯性导航系统和惯性元件如陀螺、加速度计的性能检测和标定。

1.2 转台类型

根据技术指标和设计要求,初选转台类型。按照转台台体结构分类为立式转台,按照转台回转轴数量分类为二轴转台,因此确定为立式二轴转台。则内框轴为回转轴,中框轴为俯仰轴。

1.3 转台驱动类型的选择

选择转台驱动原件类型分类,已知转台可分为电动转台和液压转台。根据经验,液压转台需要设置液压油源,一般结构较大,而且由于油液有一定压缩性,因

此不容易精确控制。参考国内外大所属的测试转台,根据标准要求转速较低,使用真空步进电机,采用电机与框架固连的直接驱动,虽然这样有利于改善和提高系统的动态性能,但是其低速性能取决于元件本身的低速性能。真空步进电机具有能力指标高控制线路精度高等优点,故在该转台的设计过程中用真空步进电机作为驱动元件,其中内框轴采用斜齿轮连接步进电机。

1.4 转台测量元件选择

转台测量元件主要有角度传感器和角速度传感器。角度传感器有光电码盘、感应同步器、旋转变压器。角速度传感器主要是测速机。

在选择传感器时,按照以下选用原则选择:

- (1) 传感器的准确度小于系统总不确定度的1/3;
- (2) 传感器的精度、分辨率比系统总的精度和分辨率好高一个数量级;
- (3) 传感器的结构尺寸满足总体安装使用要求;

有的转台只需要位置控制,测量元件只选择角度传感器就可以。有的转台除了要求位置控制外,还需要速度控制,测量元件需要选择角度、角速度传感器。

1.5 机械结构设计

在确定了转台总体方案之后,就可以根据确定的方案进行机械机构运动原理的设计和机构草图的绘制。本计的转台为二轴立式转台,因此其外框轴垂直于地面负责待测件的回转,其中框轴和内框轴则应与地面平行,负责待测件的俯仰和摆动,以此实现待测件的空间姿态的调整,达到想要的空间方位角,进而完成其测试。

综合总体方案设计的结果与上述分析,就可以确定出转台的机械机构运动草图。考虑到转台的基本外形与框架的设计有很大的相关,故先行将框架进行设计。框架是转台的关键零件,提高其力学性能对系统的精度具有重要的意义。对于多轴转台而言,各框架的设计顺序是:由内到外。内框架用于安装被测元件(或称为负

载), 因而其设计受到负载尺寸的约束, 中框架设计受到内框架约束。本转台设计中, 中框和内框均设计成中空的结构, 其断面重量轻、惯性矩大、刚度好, 适合于高精度、高动态性能的场合。框架材料选用优质铸造铝合金, 其具有强度高、比重小、加工性好的优点, 可使框架具有较高的刚度和较小的转动惯量。对长期工作在角秒级的转台来说, 必须对内应力产生的结构蠕变进行严格控制, 所以, 在框架加工过程中要经过人工时效来减小内应力, 保证框架在转台工作中不发生残余应力变形, 从而可靠地保证框架形位尺寸的稳定性, 实现框架的高精度要求^[1]。

1.6 轴承选择

轴系, 作为联结转台各组件的灵魂纽带, 巧妙地将各个框架通过精密的轴系结构紧密相连, 确保力矩的高效传递与回转运动的精准实现。通常而言, 轴系架构囊括了轴体、轴承以及连接装置等核心要件。轴系设计的过程, 无疑是一场对刚度、强度、材料选型及结构形态的深度考量。刚度与强度, 作为轴系设计的两大基石, 普遍受到设计师们的密切关注。轴系的刚度, 直观体现了其在面对静态与动态载荷时的抗变形能力。在转台轴系中, 所承受的载荷主要为弯矩与扭矩, 相应的形变则表现为挠曲与扭转角度, 而其刚度特性则具体细化为抗弯刚度与抗扭刚度两大方面。

交叉滚子轴承有着良好的旋转精度, 操作安装简化, 而且不需要成对安装, 即能够成州较大的轴向和径向负荷, 同时还能够大幅节省安装空间从而减少轴长度, 减小工作台内框所需工作空间。因此选用交叉滚子轴承。由于是内环转动因此选用XRB系列轴承。

1.7 测角元件的选择与计算

转台角位置测量系统的精度主要由传感器的精度及测角线路决定, 角位置传感器有许多种, 如圆光栅、光电码盘、磁码盘、感应同步器及旋转变压器等。转台常用的是旋转变压器、感应同步器、光电码盘。其中, 光电码盘输出数字信号, 响应快, 易实现小型化。考虑到转台的结构特点以及相应的精度技术参数, 以及选用的电机类型与轴系结构, 最终确定内框采用圆光栅进行测角^[2]。

1.8 限位锁紧机构设计

本转台转动角度范围是有限的, 为了防止转过范围, 造成线路缠绕甚至扯断, 要有限位装置, 起保护作用。转台在运输过程中, 为防止转台转动, 需要锁紧装置。

本状态的限位装置包括两个部分——机械限位和电气限位, 其中当转角接近极限时, 首先由电气限位装置发出相应的信号以使电机进行减速, 而当转角范围达到设定极限时, 外框与支座上的机械限位挡块装置接触在

一起, 从而起到限制转角范围的作用。在限位装置上常安装橡胶套, 可起到缓冲撞击力的作用, 避免损坏限位装置。本转台的锁紧装置则通过带有锥度的手柄插入相应的框架中, 从而起到锁定框架的作用。

1.9 电机选择与计算

根据算出各个框架的载荷, 可以得到电机需要的转矩以及功率, 以此为基础就可以进行电机型号的选取。

中框, 为减小轴向和轴向尺寸, 可以选用两端驱动的方式, 可以选用稀土力矩电机360ZLW30-1, 其最大转矩100N.m, 满足转台要求。

内框选用步进电机电机VGPL120, 其转矩为1250N.m, 满足要求。

2 平动的设计

2.1 运动总体方案

该工作台机械系统部件主要包括导轨副、丝杠螺母副、减速装置、伺服电动机和检测装置等, X向和Y向机械结构基本相同, 故只绘制X向机械系统部分的结构简图, 运动方案如图1。

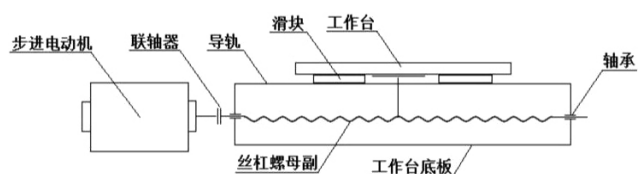


图1 运动方案

2.2 机械系统组成

(1) 导轨副的选择

该设计课题中所要求的二维工作台, 定位精度高, 因此, 决定选用直线滚动导轨副。它具有摩擦系数小、不易爬行、传动效率高、结构紧凑、安装预紧方便等优点。

(2) 丝杠螺母的选择

电动机的旋转运动需要通过丝杠螺母副转换成直线运动, 选用滚珠丝杠副。滚珠丝杠副的传动精度高、动态响应快、运转平稳、寿命长、效率高。

(3) 电机的选择

选用性能较好的步进电动机, 故在本设计中选用混合式步进电动机, 以降低成本, 提高性价比。

(4) 检测装置的选择

选用步进电动机作为伺服电动机后, 后面将计算选开环控制是否可选闭环控制以达到控制精度, 如果不能则选用检测装置。检测装置拟电动机的尾部转轴上安装增量式旋转编码器, 用以检测电动机的转角与转速。增量式旋转编码器的分辨率应与步进电动机的步距角相匹配。

2.3 X方向滑块导轨

2.3.1 选择条件

根据台湾银泰PMI直线导轨的要求,选择条件如下

- (1) 计算载荷为 $300+160=460\text{N}$
 - (2) 静力矩可以忽略
 - (3) 安全系数:根据台湾银泰产品介绍,安全系数为1.3
- 基本额定负载计算

$$C_0 = f_s P$$

其中:为基本额定负载

为安全系数

为计算负载

得

$$C_0 = 1.3 \times 2300 = 2990\text{N}$$

2.3.2 滑块形式

根据分析选择滑块形式,选择中负荷MSB-TE型,至此,将运动和动力输出至中心轴。

2.3.3 滑轨形式

根据设计选择R型,导轨滑块型号MSB 30TE,(M+2倍标注)

2.3.4 导轨校验

这个行走距离称为滚动导轨的距离额定寿命,它可根据滚动导轨的额定动载荷用下列公式进行计算

$$L = 50 \left(\frac{C_a f_H f_T f_C}{F f_w} \right)^3$$

其中:L为滚动导轨副的距离寿命(km)

F为每个滑块上的工作载荷(N),取 $F = \frac{C_0}{4} = \frac{598}{4} = 149.5\text{N}$

f_H 为硬度系数,导轨面的硬度为58~64HRC时,取 $f_H = 1.0$

f_T 为温度系数,当工作温度不超过100℃时,取 $f_T = 1$

f_C 为接触系数,每根导轨条上装两个滑块时,取 $f_C = 0.81$

f_w 为载荷/速度系数,无冲出振动或 $v \leq 15\text{m/min}$ 时 $f_w = 1 \sim 1.5$,取 $f_w = 1.5$

则滚动导轨副的距离寿命L

$$L = 50 \left(\frac{C_a f_H f_T f_C}{F f_w} \right)^3 = 242\text{km}$$

满足条件。

2.3.5 导程

- (1) 根据精度设计导程

$$l_0 \leq 360\delta / (\theta_b - \delta_p)$$

其中: l_0 为丝杠导程

θ_b 为步进电机步距角, $\theta_b = 0.9^\circ$ 、 3° 、 3.6° 、 0.045° 、 0.15° 、 0.18° ,取 $\theta_b = 0.9^\circ$

δ_p 为步距角精度, $\delta_p = \pm 0.09^\circ/\text{step}$,取 $\delta_p = -0.09^\circ/\text{step}$

δ 工作台要求定位精度,取 $\delta_p = 5\text{mm}$

- (2) 根据最大转速设计

$$l_0 \geq v_{\max} / n_{\max}$$

其中: $v_{\max}$ 为工作台最大移动速度,取 $v_{\max} = 6000\text{mm/min}$

$n_{\max}$ 为步进电机最大工作转速1000r/min—1500r/min,

取 $n_{\max} = 1200\text{r/min}$

确定 $l_0 = 20\text{mm}$

2.3.6 精度等级

精度等级,一般选用4级~7级,数控机床及精密机械可选用2级~3级,这里选择C5级。

精度校验算

$$\Phi = l_0 \delta_p / 360 + 0.023$$

其中:实际定位精度为 Φ

其他参数见滚珠丝杠主要参数

则 $\Phi = 0.3008 < 0.5$

所以选择精度等级满足,同时发现步进电机对精度的影响很小。

2.3.7 滚珠丝杠计算分析

轴向力计算

$$F_m = KF_L + f(F_V + G)$$

其中: F_L 为工作台纵向进给方向载荷

F_V 为工作台垂直进给方向载荷

G为移动部件的重力,G=2400N

K考虑颠覆力距影响的实验系数,综合导轨取K=1.1

f为导轨摩擦系数,滚动导轨 $f = 0.0015 \sim 0.0040$,取 $f = 0.003$

则

$$F_m = KF_L + f(F_V + G) = 337.2\text{N}$$

结束语

本文通过查阅文献资料和计算分析建立了一种五自由度转台机械结构基础。根据运动功能的考虑以及对于承载能力的计算进行了轴承的选择,设计了采用以交叉滚子轴承为轴系轴承,承受轴向力以及径向力。并通过计算进行了校核与验证,保证设计选型可以满足需求,完成了五自由度转台的机械结构设计。

参考文献

[1]李钺.五自由度串联机器人控制系统设计与仿真[D].天津:天津科技大学,2017.

[2]吴玉华.惯性测试转台的发展状况[J].中国科技信息,2005(8):109.