

导引头伺服机构干扰力矩测量及精密装配工艺优化*

于乃辉, 尚建忠, 吴伟, 曹玉君

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为了在导引头伺服机构装配过程中减小干扰力矩,基于电测法搭建伺服机构驱动力矩测量系统;在精密装调过程中,通过监测驱动力矩,调整装调参数,达到减小干扰力矩的作用。对质量不平衡力矩及活动线缆力矩在驱动力矩中的特性进行实验验证,确定了伺服机构配平和布线方法;对轴承预紧力与伺服机构摩擦力矩关系进行实验验证,解决了自动跑合工艺问题,这对减小摩擦力矩波动幅值具有重要意义;测量伺服机构转轴回转误差,明确最佳轴承预紧力的工艺方法。结果表明,所提方法对传统的伺服机构装配工艺进行优化,可将依赖技师经验装配的定性方法优化为依赖力矩测量的定性方法。

关键词:导引头;伺服机构;干扰力矩;电测法;精密装配

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2017)05-192-07

Measurement of disturbance torque of seeker servo mechanism and optimization of precision assembly process

YU Naihui, SHANG Jianzhong, WU Wei, CAO Yujun

(College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to reduce the disturbance torque during the assembly of the seeker's servomechanism, a drive torque measurement system of servo-mechanism was built on the basis of electrical measurement. In the process of precise assembly and adjustment, the drive torque was measured in real time and the assembly parameters were adjusted to reduce the disturbance torque. The characteristics of the mass unbalance torque and the moving cable torque in the driving torque were experimentally verified, and the balancing and routing methods were determined. The relationship between the preload of the bearing and the friction torque of the servo mechanism was also experimentally verified. It is of great significance to solve the problem of automatic running process to reduce the fluctuation amplitude of the friction torque. The method of measuring the rotation error of the rotating shaft is determined, which can be used for determining optimum preload of bearing. Results show that the traditional assembly process of servo mechanism is optimized, and the qualitative method based on the experience of technician's experience is optimized as a quantitative method.

Key words: seeker; servo mechanism; disturbance torque; electrical measurement; precision assembly

伺服机构的多种干扰力矩是影响导弹导引头视线稳定精度和跟踪精度的主要因素^[1-2]。在伺服机构精密装调过程中,尽可能地减小干扰力矩是从根本上提高导引头性能的有效手段。然而,在实际装配过程中,由于缺乏精确的测量手段和判据,只能通过经验调整,使得伺服机构质量稳定性无法得到保证。对导弹而言,导引头的使用环境和装配环境完全不同,高过载、强振动以及高低温冲击的运行环境,使得装配过程的微量瑕疵往往在导引头运行过程中被剧烈放大,严重影响导引头的性能。虽然伺服机构的干扰力矩在大的分类上分为摩擦力矩、线缆力矩、惯量耦合力矩、质量不平衡力矩

等,但实际装配过程中,由于各个干扰力矩之间存在耦合关系且不能单独测量,无法在装配过程中精确调整^[3]。因此,在精密装调过程中对导引头综合干扰力矩进行精确测量和辨识,并优化目前的装调工艺是减小干扰力矩的重要手段。

目前用于导引头伺服机构装配的测量装置或方法大多只能测量一种干扰力矩,没有形成统一的测量方法。在质量不平衡力矩方面,Boynton^[4]等开发了一套专门针对导引头配平的系统,其测量精度达到 $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 。Yang等^[5]采用电测法对伺服机构质量不平衡力矩进行了测量,并用静平衡仪器进行了验证。Yu和Zhao^[6]采用三个重量

* 收稿日期:2016-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675527)

作者简介:于乃辉(1986—),男,山东青岛人,博士,E-mail:yunaihui@126.com;

尚建忠(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jz_shang_nudt@163.com

传感器的方式测量两轴伺服机构,但这种测量方法受限于传感器的测量精度。在摩擦力矩方面,对于直驱型伺服机构,其摩擦力矩大部分来源于轴承。现在有很多针对轴承摩擦力矩的测量设备,但专门为伺服机构摩擦力矩开发的测量设备很少^[7]。张彪^[8]基于电测法搭建了伺服机构摩擦力矩测量系统。在线缆干扰力矩方面,随着导引头向小型化、轻量化发展,活动线缆产生的非线性干扰力矩越来越明显,Wang等^[9]建立了活动线缆的理论模型,并采用力矩传感器对线缆力矩进行了测量,但受摩擦力矩影响较大。

在导引头伺服机构的生产制造过程中,精密装配是影响干扰力矩的关键步骤,也是确定导引头性能的最后环节。如轴承装配预紧力会影响轴承摩擦力,线缆的弯折方向会改变线缆干扰力矩,转轴动、静平衡的精度会产生偏心力矩等,这些都是整机装调中确定的参数。为了对影响干扰力矩的装配参数进行定量调整,必须采用必要的测量装置对主要的干扰力矩进行测量。由于测量设备和方法的缺乏,国内导引头生产部门对伺服机构的装配主要依赖于技师经验,这严重制约了伺服机构的装配质量和装配效率。本文采用电测法对伺服机构电机的驱动力矩进行实时测量,通过辨识不同干扰力矩的曲线特征,调整装配参数,达到干扰力矩削减的作用。

1 干扰力矩测量系统硬件选型及软件设计

根据力矩平衡原理,在伺服机构匀速转动的情况下,其电机的驱动力矩是所有干扰力矩反力矩。如果没有传动系统,这些干扰力矩包含摩擦力矩、活动线缆干扰力矩、质量不平衡力矩等。而每一种干扰力矩都有独特性,通过对电机驱动力矩的测量和辨识,就可以对影响每一种干扰力矩的装配工艺参数进行定量调整。因此,首先需要设计一套伺服机构驱动力矩测量系统,该系统的主要目标是控制伺服机构匀速旋转,并测量其电机的驱动力矩。

1.1 硬件构成

研究的对象为两轴导引头伺服机构,其完整装配体的机械部分包含:俯仰轴、方位轴及支撑底座。俯仰轴和方位轴通过力矩电机直接驱动,通过高精度旋转变压器测量位置。为了对伺服机构进行控制,使其在测量时处于相应的运动状态,需要配套相应的电机驱动器、多轴运动卡、旋变解码卡,从而使电机和旋变组成闭环控制系统。

1) 驱动器。该伺服机构的力矩电机峰值堵

转电压为 24 V,峰值堵转电流小于 10 A。故选用美国 Copley Controls 公司的 ACJ-055-09-R 驱动器。该驱动器峰值电流为 9 A,连续电流为 3 A,电压范围为 20~55 V。编码器 A/B 相反接口。可以通过串口方式灵活改变为电流环、速度环等不同的工作模式,也可以通过串口实时读取输出电流值。

2) 多轴运动卡。选用美国 DELTA TAU 数据系统公司的 Clipper + ACC-8ES 多轴运动卡。该卡提供 4 轴伺服控制以及 32 个通用数字 I/O 点,可读取反馈信号作为位置反馈。ACC-8ES 是 Clipper 卡附件,4 通道模拟量伺服接口,将 Clipper 卡的 ± 10 V 模拟输出 12 位精度提高到 16 位。具有 A/D 接口,可以用于读取力矩传感器的数据。

3) 旋变解码卡。旋变解码芯片选用 ANALOG DEVICES 公司生产的 AD2S83 旋转变压器-数字转换器,对旋转变压器输出的含有正余弦的模拟信号解算成数字信号;然后将解算出的并行数据中变换速率最快的最低两位经过逻辑电路转换成相差 90°的 A/B 脉冲信号;最后经过单端转差分电路转换成 A+、A-、B+、B- 的差分脉冲信号接入到驱动器中,实现机构的闭环控制。

1.2 系统软件

测量系统的软件由上位软件和下位软件组成。上位软件运行于工控机中,采用 Labview 开发。下位软件开发后下载和运行于多轴控制卡中,采用 Dliphi 开发。

上位软件实现功能包括:完成对多轴卡和驱动器的相应参数设定;运动信息实时显示;用于电机驱动力矩的电流采集、数据存储、数据处理分析、电机标定;对多轴卡发出相应控制指令等,软件界面如图 1 所示。

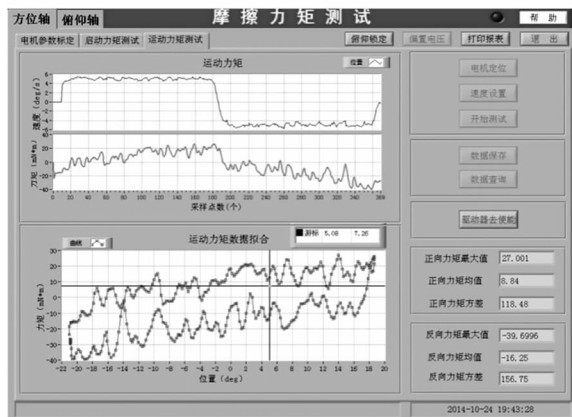


图 1 伺服机构驱动力矩测量系统软件界面

Fig. 1 Software interface of servo-mechanism drive torque measuring system

下位软件实现功能包括:进行多轴伺服联动控制;接收旋变解码卡的旋变信号,用于位置数据处理分析;完成位置环的 PID 等控制算法;结合运动模式,对驱动器发出各类测试信号;通过上下位通信,完成与上位机之间的数据交换。

驱动力矩测量采用“正 - 反测试”,在测试的姿态角范围内,多轴卡对驱动器从低到高发出不同的转速指令(线性增加电压),对力矩电机进行转速控制。电机在某一转速指令后经一定的加速时间后进入匀速速度稳定时间,这时测量记录下匀速运动过程中的速度值和力矩值,并实时显示出变化过程。运动程序停止运行后,上位机会对记录的数据进行数据处理包括滤波去噪、删除随机误差等计算并自动显示速度与力矩之间的最小二乘拟合曲线。

2 质量不平衡力矩和活动线缆干扰力矩测量及其抑制方法

在伺服机构装配过程中,一般通过增、减配重使旋转轴在每个角位置都能达到静平衡。由于轴承摩擦力的存在,静平衡总会存在一定的误差,这也是装配过程中不可避免的干扰力矩耦合问题。另外,这种配平方法只能确定偏心方向而不能确定偏心量,配重块的选择只能通过不断尝试的方法实现,配平工作效率低下。因此,寻求更高精度、更高效的配平方法极为必要。

首先,采用驱动力矩测量系统驱动并控制伺服机构电机匀速运动,同时测量其正向和逆向运动的电机驱动力矩。如图 2 所示,在活动线缆处于自由状态下,正向和逆向驱动力矩(图 2 的实曲线)同时向同一个方向偏移。正向驱动力矩的均值为 $8.6172 \text{ N} \cdot \text{mm}$,逆向驱动力矩的均值为 $-2.7142 \text{ N} \cdot \text{mm}$,因此其力矩偏移量为 $2.9515 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 。为了消除这个干扰力矩,将一个重量为 10 g 的配重块安装于俯仰轴偏移量为 30 mm

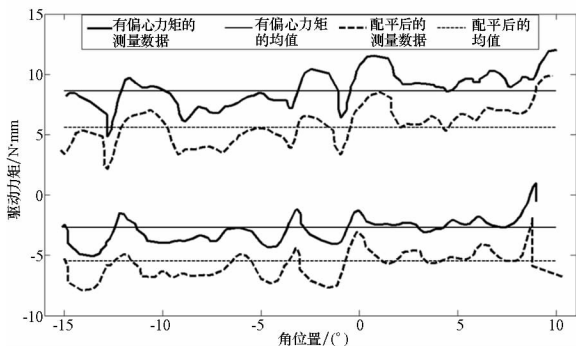


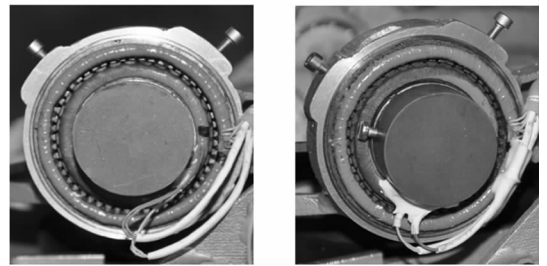
图 2 不平衡力矩测量数据

Fig. 2 Measurement data of unbalanced torque

的安装位置,也就是说增加 $3 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 的静平衡力矩。重新测量,正向和逆向的驱动力矩均值分别为 $5.5961 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 和 $-5.5070 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (图 2 的虚曲线),可以看出残余不平衡力矩已经非常小了。

由上述实验可以看出,采用电测法消除不平衡力矩非常方便。驱动力矩中包含的摩擦力矩波动具有一定的随机性和不确定性,但通过取均值的方法,可以有效地削弱摩擦力矩波动对配平精度的影响。相比于其他高精度的专用配平设备,该配平方法精度并不高,但最终目标是通过装配工艺参数的迭代调整,尽量减小驱动力矩的波动量、偏移量、偏转量和绝对值,初始配平精度在可以接受的范围之内。

图 3 分别为线缆的自由状态(如图 3(a)所示)

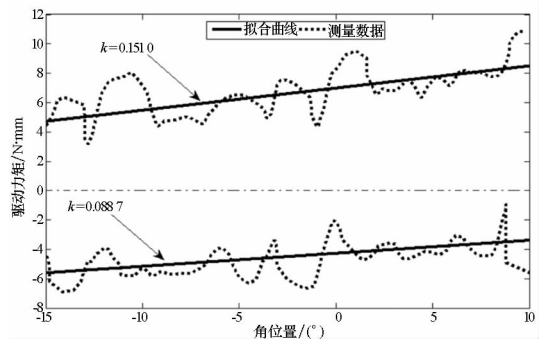


(a) 自由线缆状态

(b) 固定线缆状态

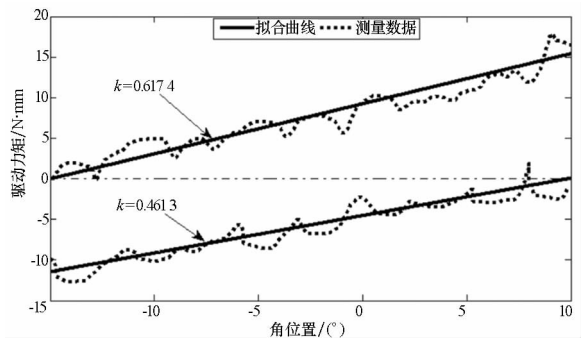
(a) Moving cable

(b) Fixed cable



(c) 自由线缆测量结果

(c) Measurement result of moving cable



(d) 固定线缆测量结果

(d) Measurement result of fixed cable

图 3 活动线缆干扰力矩实验及测量数据

Fig. 3 Experiment and measurement data of disturbance torque of moving cable

和固定状态(如图3(b)所示)及其测量结果。活动线缆在伺服机构中极为普遍,如图3(a)所示,旋转变压器的内环信号输出线是与旋转轴一起运动的,其产生的干扰力矩为活动线缆干扰力矩。由于该力矩较小,在大部分的伺服机构中往往被忽略。但对于轻载导引头,活动线缆产生的弹性干扰力矩会对伺服控制产生较为明显的影响。为了尽量减小该干扰力矩,需要对活动线缆布局路径、自由端长度及固定点位置进行优化。活动线缆的柔性决定了其建立准确数学模型的难度,因此很难在设计阶段进行优化,只能在装配阶段通过测量进行调整。

如图3(a)所示,在线缆自由的情况下,采用驱动力矩测量系统对其力矩进行测量,并采用最小二乘法对测量数据进行一阶拟合(如图3(c)所示),其正反转测量数据拟合线的斜率分别为0.151 0和0.088 7。如图3(d)所示,在线缆固定状态下,其正反转测量数据拟合线的斜率分别为0.617 4和0.461 3。由以上实验可以看出,不合理的活动线缆固定和布局方式导致电机驱动力矩的严重偏转。

为了探究线缆合理的布局方式,本文进行了大量的实验研究。实验中,采用固溶胶对线缆进行固定,通过改变线缆自由端长度、固定点位置及固定点数量形成不同的线缆布局方式,对比实验数据如图4所示。通过实验结果可以看出,不同的线缆布局方式对驱动力矩影响非常大。合理的布线方式使驱动力矩的拟合直线斜率尽量小。

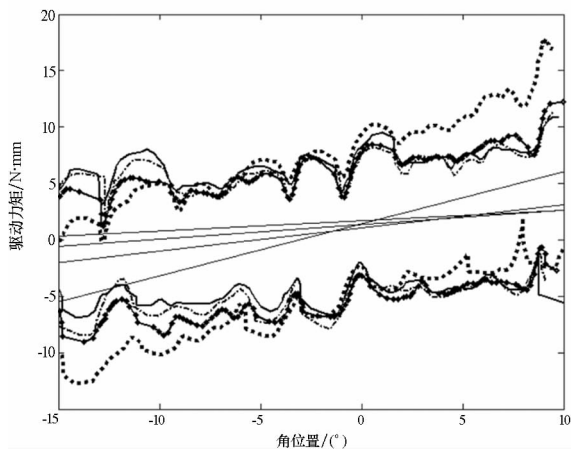


图4 不同线缆布局测试数据及拟合结果

Fig. 4 Test data and fitting results of different cable layout

3 摩擦力矩测量及其波动性抑制方法

在轴承参数及伺服机构几何参数确定的情况下,伺服机构轴向预紧力对摩擦力矩的大小有决

定性的影响。如图5所示,该型伺服机构通过预紧螺母调整轴承轴向预紧力。仅仅对于摩擦力矩而言,轴向预紧力必然是越小越好。但预紧力越小,轴承的跳动越大,转轴的旋转精度越差。而转轴的旋转精度是决定伺服机构指向精度的核心指标,必须予以严格控制^[10]。因此,轴承预紧力必须是控制摩擦力矩和旋转精度的合理折中。

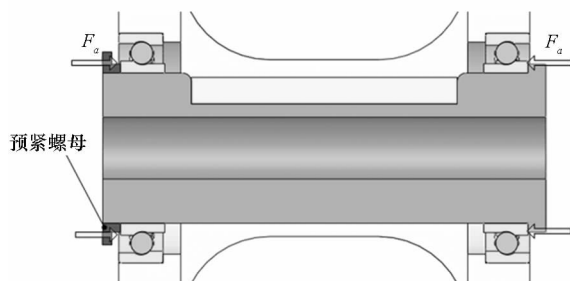


图5 伺服机构轴承预紧原理图

Fig. 5 Principle diagram of bearing preload of servo mechanism

在接下来的实验中,采用数显式力矩扳手定量调整伺服机构的轴向预紧力,运用驱动力矩测量系统测量电机驱动力矩的变化情况。该数显式力矩扳手的测量范围为 $\pm 2000 \text{ N} \cdot \text{mm}$,测量精度为1%。

实验共进行了9次,施加的轴向预紧力为 $100 \sim 500 \text{ N} \cdot \text{mm}$,间隔为 $50 \text{ N} \cdot \text{mm}$,动态力矩测量结果如图6所示。由图6可以看出,摩擦力矩大小随着预紧力的增加明显增大。另外,从这些曲线中也可以看出其他现象,即不同预紧力下动态力矩曲线中的大部分波峰和波谷在同一旋转角度时是重复出现的,也就是说摩擦力矩的波动并不是完全随机的,大部分的波动量由轴承跑道的初始制造瑕疵或者润滑脂的不均匀分布决定,这也为接下来如何消除这些波动指明了方向。

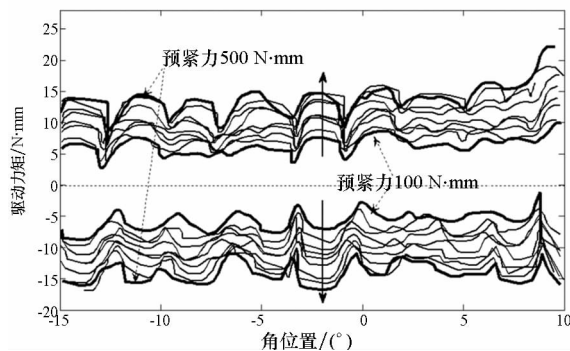


图6 不同预紧力下的驱动力矩曲线

Fig. 6 Driving torque curves under different bearing preload

对上述曲线进行统计分析,其均值如图7所

示,均方根值如图 8 所示。

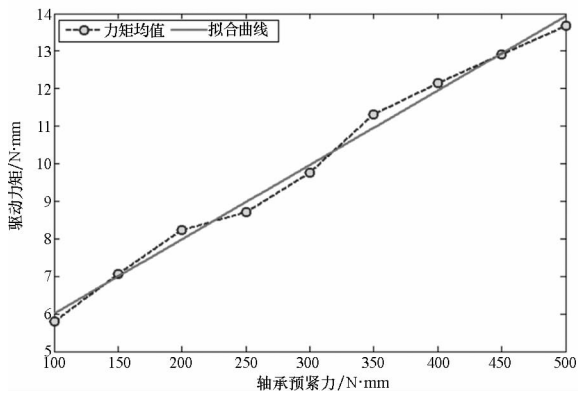


图 7 不同预紧力下的驱动力矩均值及拟合结果

Fig. 7 Mean values of driving torque under different preload and its fitting result

由图 7 可以看出,摩擦力矩均值是随着预紧力的增加呈线性增长的。为了更好地分析其关系,采用最小二乘法对统计值进行拟合,其斜率为 0.019 81,也就是说轴向预紧力每增加 100 N·mm,摩擦力矩均值增加 1.981 N·mm。如图 8 所示,摩擦力矩均方根值基本随着轴向预紧力而增加,但并不是线性的,因此轴向预紧力的增加会大大增强摩擦力矩的波动性。

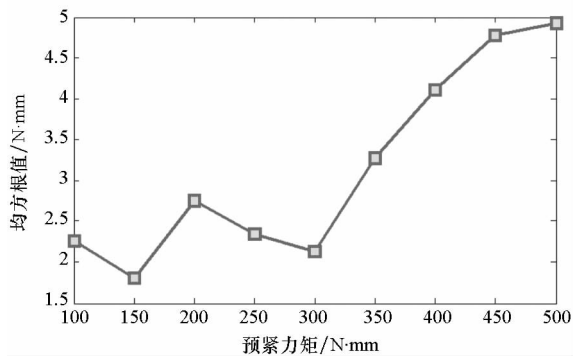


图 8 不同预紧力下的驱动力矩均方根值

Fig. 8 Root mean square values of driving torque under different preload

摩擦力矩在不同角位置的波动量对伺服机构控制及导引头的视线稳定具有重要的影响。在现实的装配过程中,装配技师一般采用手动反复正反转的方法消除这些波动。手动跑合主要作用包括研磨轴承的初始制导瑕疵,让轴承润滑脂分布更加均匀,释放部分的装配应力等,这些都有利于减小摩擦力矩的波动。但对于跑合时间和强度,一般由技师的经验确定。为了对跑合过程进行定量验证,采用驱动力矩测量装置驱动伺服机构自动进行正反转,并实时记录驱动力矩的变化情况。部分测量结果如图 9 所示。

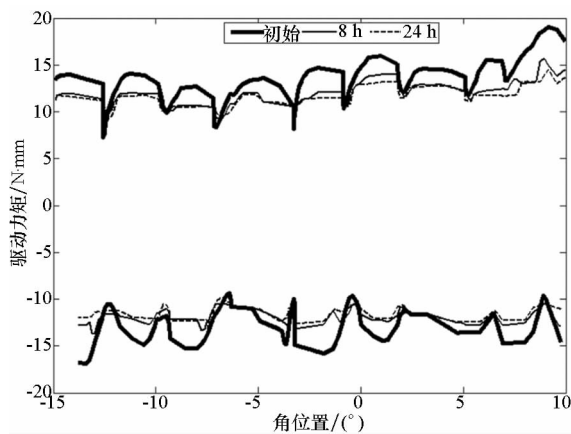


图 9 跑合工艺中摩擦力矩波动变化

Fig. 9 Fluctuation of friction torque in the running-in process

如图 9 所示,初始的摩擦力矩(粗实线)均值为 12.91 N·mm、均方根值为 2.19 N·mm。经过连续 8 个小时的跑合,其均值和均方根值(细实线)分别为 11.80 N·mm、1.17 N·mm,可以看出跑合工艺对摩擦力矩波动的削弱作用巨大。24 个小时后,其均值和均方根值(虚线)为 11.51 N·mm、0.93 N·mm,随着时间的推移,跑合工艺对摩擦力矩波动的削弱逐渐减小。由于跑合工艺是一件非常费时的工艺步骤,这种自动的且能实时监控的跑合方法可以有效地提高跑合效率和效果。

4 转轴回转精度测量及调整

由上一节可知,不同的轴承预紧力不但会影响摩擦力矩,也会对转轴回转误差产生影响。为了对其进行测量和分析,搭建单轴回转测量系统,包括自准直仪、反射镜、高精度两轴转台、伺服机构控制器、数显式力矩扳手等。

测量过程的原理如图 10 所示,将反射镜贴在回转轴的轴端,驱动伺服机构稳定于某一角度,通过自准直仪测量伺服机构单轴在回转过程的跳动,再通过转台使自准直仪的十字靶标回至原点,读取转台数值即为转轴的跳动量。通过数显式力矩扳手改变轴承预紧力,以得到不同预紧力下的转轴回转误差。

图 10 可以看出,随着回转轴的转动,可以测出转轴的倾角跳动误差 Δw 和 Δx (相对于 k 轴和 j 轴)。但由于结构的限制,反射镜是贴于轴端的,无法多次调整,因此必然引入反射镜与回转轴的垂直度误差 Δy 和 Δz (相对于 k 轴和 j 轴)。另外一个误差是反射镜与自准直仪的径向偏移误差 Δu 和 Δv (相对于 k 轴和 j 轴)。从而,伺服机构俯仰和方位回转误差 Δj 及 Δk 分别为:

$$\Delta j = \Delta u + (\Delta w + \Delta y) \cos\phi + (\Delta x + \Delta z) \sin\phi$$

$$\Delta k = -\Delta v - (\Delta w + \Delta y) \sin\phi + (\Delta x + \Delta z) \cos\phi$$

径向偏移误差 Δu 和 Δv 是恒定的,由上式可知,测出的误差是一个以径向偏移误差 Δu 和 Δv 为中心,以 $\sqrt{(\Delta w + \Delta y)^2 + (\Delta x + \Delta z)^2}$ 为半径的圆。

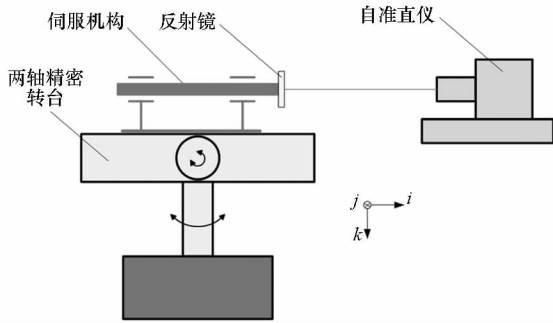


图 10 伺服机构回转精度测量原理图

Fig. 10 Schematic diagram of rotation accuracy measurement for servo mechanism

表 1 数据为预紧力 $100 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 时跳动量测量结果。以俯仰方向误差为横坐标,以方位方向误差为纵坐标,采用非线性最小二乘拟合,并根据测量角度 (20°) 给予半径约束,拟合结果如图 11 所示。回转轴的最大倾角跳动误差为 $5.26''$ 。

表 1 预紧力 $100 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 时跳动量测量结果

Tab. 1 Measurement results of jump as bearing preload is $100 \text{ N} \cdot \text{mm}$

俯仰方向		方位方向	
位置/ $(^\circ)$	误差/s	位置/ $(^\circ)$	误差/s
-10	0	-10	0
-8	95	-8	27
-6	177	-6	45
-4	280	-4	63
-2	378	-2	71
0	462	0	87
2	568	2	96
4	676	4	100
6	764	6	101
8	870	8	101
10	963	10	96

不同预紧力下的最大回转倾角误差如图 12 所示,由该图可以看出,随着预紧力的增加转轴回转误差并不是线性下降的,而是在预紧力增加到一定量时逐渐稳定。同时将第 3 节中摩擦力矩均值与回转误差进行对比,在预紧力达到 $200 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 时,摩擦力矩和回转误差交叉,也就是说该预紧力为轴承最佳预紧力。当然,即使是同一型号伺服机构,由于零部件制造误差、装配条件

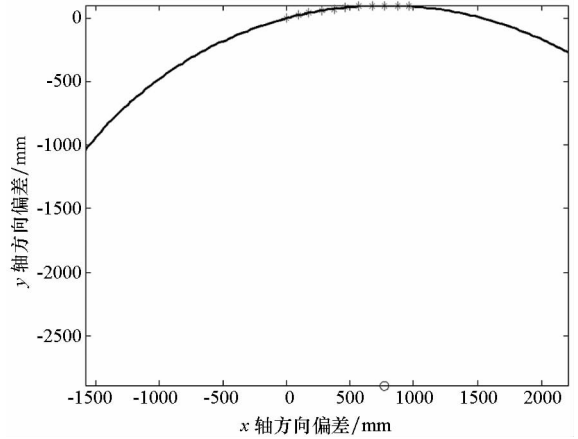


图 11 预紧力为 $100 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 时转轴回转误差拟合结果
Fig. 11 Fitting results of rotation error of shaft when the preload is $100 \text{ N} \cdot \text{mm}$

及环境因素影响,最佳预紧力并不是固定的,这就需要在每一套伺服机构装配中采用同样的方法找到最佳预紧力。基于驱动力矩测量系统,搭建如图 13 所示的轴承预紧力调整系统是必需的。

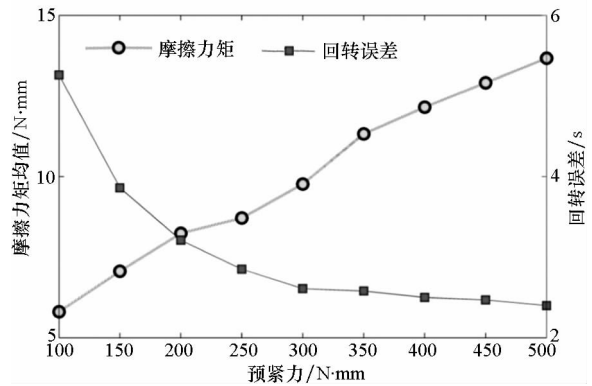


图 12 不同预紧力下回转误差与摩擦力矩对比
Fig. 12 Comparison of rotation errors and friction torque under different preload

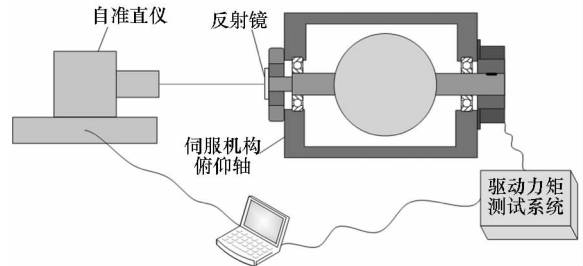


图 13 轴承预紧力调整系统

Fig. 13 Adjustment system for bearing preload

5 基于驱动力矩测量系统的伺服机构装调方法优化

由前 3 节的大量实验结果可以得出,通过对伺服机构驱动力矩的测量和监控可以对大部分的装调参数进行调整。驱动力矩的波动意味着摩擦

力矩不均匀,这可以通过自动跑合工艺进行削弱;驱动力矩的非对称意味着质量偏心,可以通过定量配平得到解决;驱动力矩的偏斜意味着线缆干扰力矩可以通过线缆路径优化进行补偿;驱动力矩的幅值与轴承预紧力相关,这需要与转轴回转精度进行综合考虑。

传统的伺服机构装调工艺大部分依赖技师的装调经验,存在反复调整和测试的现象,这对装配质量稳定性极为不利。基于驱动力矩测量系统可以对现有的伺服机构装调工艺进行优化,如图 14 所示。

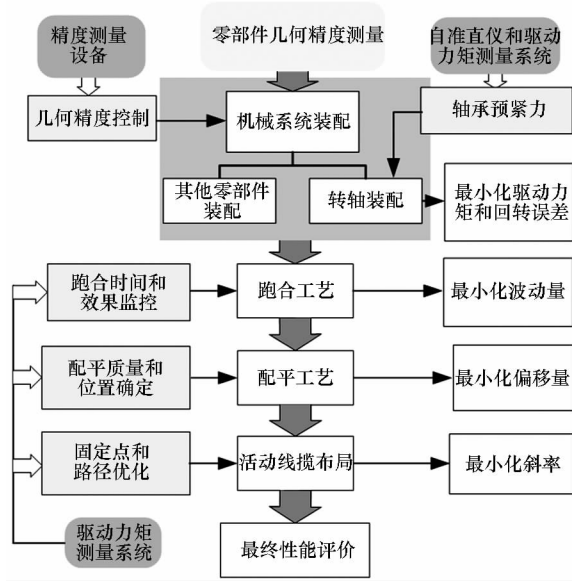


图 14 优化后的伺服机构装配工艺

Fig. 14 Optimized assembly process for servo mechanism

1) 首先进行装配前的零部件准备和精度检测,必要时进行选配,以保证装配的精度需求。

2) 然后进行伺服机构装配,在单轴的装配过程中,采用自准直仪及伺服机构驱动力矩测试系统,并通过数显式力矩扳手控制预紧力,使摩擦力矩及波动较小,且回转误差较小。在整个装配过程中,需要精度测量工具控制伺服机构的装配精度。

3) 完成装配后,采用驱动力矩系统控制伺服机构的俯仰轴和方位轴,使其在运动范围内反复地正反转,并同时检测其摩擦力矩大小,目标是使摩擦力矩的波动最小化。

4) 再进行静平衡,仍然采用驱动力矩系统测量其驱动力矩,得到偏移量,并进行配平,直至力矩偏移量最小。

5) 最后是活动功能线缆的布局 and 固定,通过提前实验,确定线缆的最佳走向和固定点,并进行驱动力矩测量,目标是使驱动力矩的斜率较小。

完成上述步骤后,就可以进行伺服机构的性

能测试和电调。

6 结论

随着导引头向高精度、小型化、轻量化方向发展,传统的基于经验的装调方法已经无法满足伺服机构的性能需求。本文在大量实验的基础上,提出了基于驱动力矩测量的伺服机构精密装调方法。该方法的核心是使力矩电机的驱动力矩平稳并最小化,这也是伺服机构稳定控制的基础。活动线缆干扰力矩和摩擦力矩具有很强的非线性并且影响因素复杂,数学建模方法很难精确地反映力矩特性,采用监测驱动力矩并调整相应参数的方法可以有效解决该问题。本文提出的轴承预紧力控制方法,可以实现预紧力的定量控制。运用驱动力矩测量方法优化后的伺服机构装配工艺,解决了定性装配带来的质量不稳定、依赖技师经验等一系列问题。

参考文献 (References)

- [1] Hilkert J M, Pautler B. A reduced-order disturbance observer applied to inertially stabilized line-of-sight control [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8052: 1-12.
- [2] Lin C L, Hsiao Y H. Adaptive feedforward control for disturbance torque rejection in seeker stabilizing loop [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(1): 108-121.
- [3] Hilkert J M. Inertially stabilized platform technology [J]. IEEE Control Systems, 2008, 28(1): 26-46.
- [4] Boynton R, Wiener K, Kennedy P, et al. Static balancing a device with two or more degrees of freedom [C]//Proceedings of the 62nd Annual Conference of Society of Allied Weight Engineers, 2003 (3320): 3-43.
- [5] Yang H, Zhao Y, Li M, et al. The static unbalance analysis and its measurement system for gimbals axes of an inertial stabilization platform [J]. Metrology and Measurement Systems, 2015, 22(1): 51-68.
- [6] Yu S, Zhao Y Z. A new measurement method for unbalanced moments in a two-axis gimballed seeker [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(1): 117-122.
- [7] 马小梅, 邓四二, 梁波, 等. 航天轴承摩擦力矩的试验分析 [J]. 轴承, 2005, 10: 22-24. MA Xiaomei, DENG Sier, LIANG Bo, et al. Test analysis on friction moment of space bearings [J]. Bearing, 2005, 10: 22-24. (in Chinese)
- [8] 张彪. 特种机电系统摩擦力矩测试方法研究和应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013. ZHANG Biao. Research and application of friction torque measurement methods for a special electromechanical system [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [9] Wang C S, Ning R X, Liu J H, et al. Dynamic simulation and disturbance torque analyzing of motional cable harness based on kirchhoff rod model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(2): 346-354.
- [10] 李岩. 光电稳定跟踪装置误差建模与评价问题研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008. LI Yan. A study on error modeling & evaluation of electro-optical stabilization/tracking equipment [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)