

文章编号:1001-5078(2023)11-1719-05

· 光电技术与系统 ·

某光电系统消像旋组件谐振频率分析

杨彬¹, 温庆荣², 于昊钲², 蔡荣²

(1. 中国电子科技集团有限公司, 北京 100846; 2. 中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:消像旋组件作为周视光电系统的重要组成部分,机电伺服控制的稳定性和精度是消像旋组件的关键指标。本文基于多体动力学的理论,对轴系的谐振频率进行了详细的公式推导,并借助动力学仿真软件辅助计算,同时对实物进行实际扫频验证,结果基本满足理论计算要求。本文的分析能够为伺服控制的机电设计提供可靠的依据,能够有效的缩短产品的研制周期。

关键词:消像旋;多体动力学;谐振频率

中图分类号:TH133.33 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.015

The resonant frequency analysis of the elimination image rotation subassembly working on one electro-optic systems

YANG Bin¹, WEN Qing-rong², YU Hao-zheng², CAI Rong²

(1. China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100846;

2. The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015)

Abstract: Elimination image rotation subassembly is an important part of panorama electro-optic systems, the stability and accuracy is an key index of the servo control systems. This paper described the formula derivation of the shafting resonant frequency based on the multi-body dynamics theory, and got the calculating result by dint of the ADAMS soft. The sweep frequency result indicated that the theory is correct. This result would help to offer the credible basis for the servo control systems design, and availably shorten the development periods.

Keywords: elimination image rotation; multi-body dynamics; resonant frequency

1 引言

周视光学系统广泛应用于光电观瞄系统中,既可以用于装甲车辆的潜望式光电观瞄系统,又可以作为机载设备的光电雷达前端,实现对目标的精确瞄准、跟踪和打击。由于周视光学系统的反射镜在进行方位扫描时,会带来影像的旋转,严重影响视觉观察效果。因此必须在光路中增加消像旋组件,通过保证消像旋棱镜的光轴与其机械回转轴及光学系统的视轴三轴重合,既消除了图像的旋转,也确保图像在视场中稳定不跳动。

由于消像旋轴的运动必须严格匹配反射镜组件的伺服运动规律,其轴系刚度应能足够响应伺服系统的控制带宽,避免图像消旋的不同步,影响使用性能,而如何合理而正确的获得轴系的机械固有频率,是消像旋组件伺服控制设计的关键。

因此,本文在多体动力学理论的基础上,针对某消像旋轴系刚度进行理论计算的推导,并结合 Adams 软件的仿真,实现了对轴系刚度的分析,同时通过实际伺服控制操作验证了分析的可行性和正确性。

2 理论分析

消像旋轴系作为一种高精度快速响应的机电跟踪系统,误差小、响应快、稳定性好的闭环伺服系统设计是关键。为了达到这一目的,必须尽可能削减伺服控制系统中产生的滞后偏差,其主要的解决措施是扩充系统开环的放大量及增加闭环系统的带宽^[1]。不过当速度闭环伺服系统环带宽和系统本身存在的固有频率想接近时,又或者出现伺服控制系统带宽包含了机械结构自身的固有频率时,各种噪声的激发将使得伺服系统的信号造成机械结构产生谐振,以至于造成整个系统出现不可控的振动,使系统不能稳定运行,甚至会出现机械系统的毁坏。因此,系统的固有频率必须远远大于闭环带宽才能避免谐振的发生,但过大的固有频率有可能带来结构尺寸过大或者重量超重等负面影响。因此,设计阶段正确量化的计算轴系组件的固有频率,在论证分析与运用仿真模拟的过程中查找提升整机系统动态刚度和削减动态误差的因子^[2]。

一般的机电伺服系统可以看作是一个繁杂的弹性控制系统,机械转轴在传递扭矩时,在微观领域,每个细微的结构单元都会产生弹性微小变形,这个过程可以用质量弹簧系统物理模型来解释,着重探求机械轴的扭转刚度及各每个结构单元所产生转动惯量。以往的工程设计中,通常采用霍尔兹法来推算轴系的动态刚度。此法是根据能量守恒定理及相似原理得出,可以将等效系统组成分解为等效惯量与等效刚度两个部分,此模型可用于计算自激振荡频率和产生振型^[3]。但由于机械结构系统非常复杂,不容易准确地求解等效惯量与刚度,并且无法定量描述其结果,造成的误差无法有效指导伺服控制系统的优化设计。

多体系统是由多个不同或相同物体通过几种或多种运动副连接而产生系统,通过使用计算机技术对复杂机电结构系统的动力学进行解析与仿真,建立便于计算机进行求解的数学模型,从中探寻出一种高效率及高稳定性求解方法。消像旋光机的机械轴系系统是由轴承、电机、编码器、光学系统及其他结构件组成,力矩电机直接驱动轴系旋转实现消像旋动作。因此,该轴系可以等效于一维多体系统,通过已知的系统构型、外力和初始运动条件,在构建几何模型装配的基础上,建立微

分方程或者微分方程和代数方程混合的数学模型,最终借助计算机辅助计算,得出速度、加速度、力和力矩之间的数值关系,包括本文所关注的轴系等效刚度的数值^[4]。

3 消像旋组件分析

本文中描述的消像旋组件运用于某机载平台的光电系统,采用光学棱镜消像旋的方案,如图 1 所示,位于平行光路中,光线在棱镜内部经过一次反射后出射。

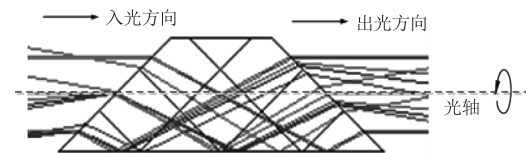


图 1 消像旋组件光路图

Fig. 1 The light path of the elimination image rotation subassembly

光学棱镜相对于轴系反向绕光轴旋转,并保持光学棱镜的旋转速度和轴系转速匹配,保证经光学棱镜的转速和方位转台、俯仰转台的转速满足以下公式:

$$\omega = (\alpha + \beta) / 2$$

其中, ω 为光学棱镜的转速; α 为方位轴系的转速; β 为俯仰轴系的转速。

消像旋组件的结构组成如图 2 所示:主要由光学棱镜结构、一体化轴承主轴、轴承压盖、外框架、无刷伺服电机、光电检测结构构成。旋转轴系结构使用了一组角接触球轴承背对背安装方式,在主轴上直接安装钢珠保持架和轴承外圈,减小径向尺寸的同时还增加结构自身的刚度。主轴上的轴承通过过盈配合的连接方式安装在外框架上,使用轴承压盖调整轴承间隙至适合的预紧力。棱镜采用胶接与机械压紧相结合的方式固定在棱镜座内,并最终刚性连接到主轴上。为了提高组件的轴系刚度,主轴采用了高强度的 GCr15 轴承钢,外框架等其余零件采用 7075 超硬铝。

基于产品的实际使用环境,本文消像旋组件的驱动方式采用交流无刷力矩电机直接驱动,减少了中间传动环节,可提升传动效率和刚度;使用光电编码器进行反馈检测,可以保证棱镜结构组件具有较高的回转精度和较快的响应速度。电机的驱动力矩作用在主轴上,经过一系列的传递,实现棱镜的角度快速变换。

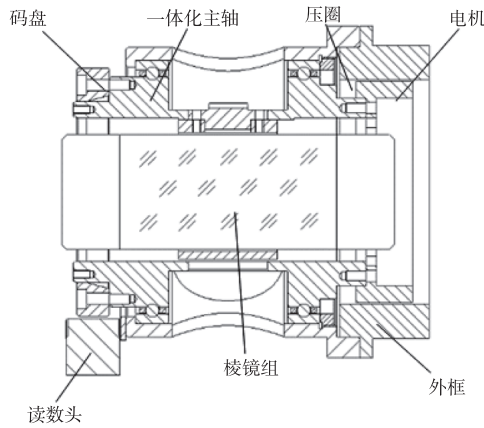


图2 消像旋组件结构图

Fig.2 The structural of the elimination image rotation subassembly

4 消像旋组件分析

消像旋轴系可以简化为一维旋转运动体系,假设作用在轴系上的扭矩为 T ,轴系的转动惯量为 J ,轴系的扭转刚度为 K ,轴系的阻尼系数为 C ,则轴系的角度运动微分方程可表示为:

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = T$$

式中, J 通过三维软件直接可以计算得出,而其他三个参数则无法直接求解。为此,本文假设通过给轴系的定子加入脉冲扭矩,得出一系列离散点对应的等式,运用数值算法寻求刚度的最优值。

假设离散点的时间间隔为 Δ ,因此可以得到轴系加速度和角加速度的近似表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= \dot{\theta}(t_i) = \frac{\theta(t_i) - \theta(t_{i-\Delta})}{\Delta} \\ &= \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_i &= \ddot{\theta}(t_i) = \frac{\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{i-1}}{\Delta} \\ &= \frac{\frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{\Delta} - \frac{\theta_{i-1} - \theta_{i-2}}{\Delta}}{\Delta} \\ &= \frac{\theta_i - 2\theta_{i-1} + \theta_{i-2}}{\Delta^2} \\ &= \frac{\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}}{\Delta^2} \end{aligned}$$

将表达式代入运动微分方程,可以得到轴系转角的离散方程:

$$\theta_i = \left(2 - \frac{C\Delta}{J} - \frac{K\Delta^2}{J}\right)\theta_{i-1} + \left(\frac{C\Delta}{J} - 1\right)\theta_{i-2} + \frac{\Delta^2}{J}T_{i-1}$$

写成差分方程的形式为:

$$\theta_i = x\theta_{i-1} + y\theta_{i-2} + zT_{i-1}$$

其中:

$$x = 2 - \frac{C\Delta}{J} - \frac{K\Delta^2}{J}, y = \left(\frac{C\Delta}{J} - 1\right), z = \frac{\Delta^2}{J}$$

按离散时间点进行取值,可以得到如下的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_0 & T_1 \\ \theta_2 & \theta_1 & T_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{n-1} & \theta_{n-2} & T_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

假设:

$$A = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_0 & T_1 \\ \theta_2 & \theta_1 & T_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_{n-1} & \theta_{n-2} & T_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

写成矩阵方程如下:

$$C = BA$$

为了选取最合适的解,引入残差平方和函数 S :

$$S(A) = \|BA - C\|^2$$

对 $S(A)$ 求导运算:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(A)}{\partial A} &= \frac{\partial (\|BA - C\|^2)}{\partial A} \\ &= \frac{\partial [(BA - C)^T(BA - C)]}{\partial A} \end{aligned}$$

由于:

$$\begin{aligned} &(BA - C)^T(BA - C) \\ &= [(BA)^T - C^T](BA - C) \\ &= (A^T B^T - C^T)(BA - C) \\ &= A^T B^T BA - A^T B^T C - C^T BA + C^T C \\ &= A^T B^T BA - 2A^T B^T C + C^T C \end{aligned}$$

代入上式,得到:

$$\frac{\partial S(A)}{\partial A} = \frac{\partial [A^T B^T BA - 2A^T B^T C + C^T C]}{\partial A}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\partial(A^T B^T B A - 2A^T B^T C)}{\partial A} \\
 &= \frac{\partial(A^T B^T B A)}{\partial A} - 2B^T C \\
 &= 2B^T B A - 2B^T C \\
 &= 2(B^T B A - B^T C)
 \end{aligned}$$

令 $\frac{\partial S(A)}{\partial A} = 0$, 即得到 $B^T B A - B^T C = 0$

从而得到 $A = (B^T B)^{-1} B^T C$

根据式可知,通过 n 个 θ 值和 $n-1$ 个 T 值,可以得出 $n-1$ 个 A 值。由于该数值计算中引入了其他工程误差,最终的 A 值函数将呈现非线性关系,很难得到简单易解的解析函数式^[5]。因此,本文采用最小二乘法的方法,利用误差的平方和最小,得到一个线性方程组,再利用线性方程组的求解方法获得拟合曲线,进而解出相关的数值。

5 基于 ADAMS 软件的分析

为了对式(1)进行求解,需要有大量的离散点参数进行计算。为此,本文通过多体动力学软件 ADAMS 进行辅助求解,通过在轴系的定子中加入脉冲扭矩,得到棱镜上的转角,从而得出扭矩和转角的离散点合集,并通过该数据合集采用最小二乘法的方法求解出轴系刚度数值^[6]。

5.1 模型的处理

将 CREO 软件中数模的装配体导出为 ADAMS 仿软件可识别的格式,在 ADAMS 中对组件结构进行前处理:赋予质量属性,使用连接副连接相关结构等,为后面更准确的系统仿真及计算做准备。将外框架与大地进行固定约束;一对角接触球轴承和另一端的深沟球轴承设置为旋转副,编辑旋转副增加驱动功能并编写驱动函数。处理后的虚拟样机如图 3 所示,并针对不同的零件进行材料属性的赋值^[7]。

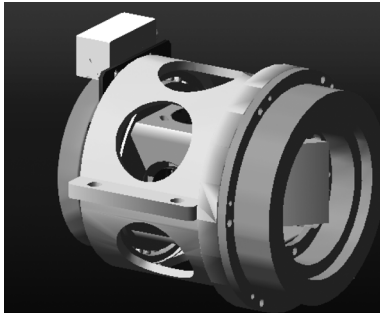


图 3 Adams 模型图

Fig. 3 The Adams model diagram

表 1 材料属性表

Tab. 1 The material properties matrix

| 序号 | 名称 | 材料 |
|----|-------|-------|
| 1 | 框架 | 7075 |
| 2 | 主轴及轴承 | GCr15 |
| 3 | 棱镜 | ZnSe |
| 4 | 棱镜座 | 7075 |

结合实际工况,分别为模型各部件添加运动副和接触对,结果如下:

1) 对框架施加固定约束,使用固定副,使其与地面相对静止。

2) 对轴承内圈、主轴以及电机转子施加相对于框架的旋转约束,利用旋转副功能,主动件为轴承与电机转子,被动件为外框架。

3) 对棱镜座施加固定约束,利用固定副,将棱镜座固定在主轴上。

4) 对棱镜施加固定约束,利用固定副,使其相对于棱镜座固定。

5.2 驱动参数仿真

设置仿真运行时间为 5 s,求解步为 50 步,施加脉冲驱动力矩,提取棱镜转角数据,假设 $T_1 = 0.05 \text{ N} \cdot \text{m}$, $\Delta = 0.02 \text{ s}$,从而得到转角 θ 值与时间的关系如图 4 所示。

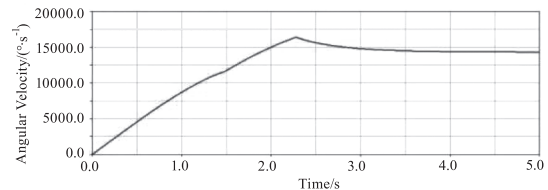


图 4 转角和时间关系曲线图

Fig. 4 The relationship curve between corner and time

5.3 轴系刚度计算

根据式 $A = (B^T B)^{-1} B^T C$, 系统的扭转刚度可以计算得到 $K = 3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。

6 轴系固有频率的计算

由电机驱动的旋转轴系理论上会有两种固有频率,一个是在锁定电机转子的情况下系统的固有频率;一个是电机转子未锁定的系统固有频率,也称为自由转子谐振频率。一般情况下前者的值高于后者的值,因此在结构设计选择控制指标时,通常选择锁定电机转子的固有频率,实际自由转子谐振频率才是有效参数^[8]。锁定电机转子的轴系固有频率计

算公式如下:

$$W = \sqrt{\frac{K}{J}}$$

其中, K 为轴系的扭转刚度, 计算得到 $K = 3.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; J 为轴系的旋转转动惯量, $J = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 由三维模型直接计算得到; 将 K 和 J 值代入式中, 可以得到轴系的固有频率计算如下:

$$W = \sqrt{\frac{K}{J}} = \sqrt{\frac{3.6}{0.001}} = 60 \text{ Hz}$$

7 扫频验证实验

为了对上述理论计算的旋转轴系固有频率作进一步验证, 本文采用常规的扫频(连续变更激励源的频率)的方法进行频率特性的测试, 通过逐点测试正弦输入下的稳态输出, 将输出的幅值、相位与输入的幅值、相位相比较得到系统频率特性^[9]。

使用特定工装将消像旋轴系结构与之固定连接, 通过伺服控制向无刷电机下发正弦扫频信号, 通过光电编码器读出转速值, 固定扫频时间为 200 s, 通过施加每秒递增 1 Hz 的线性扫频信号激励, 并通过编码器读取转速参数。将采集到的离散信号进行快速傅里叶变换, 通过后处理的数据图表发现: 在系统工作运行 95 s 时出现小幅振动, 在 100 s 左右时出现大幅振动, 此时振动区域相对应的频率约为 55 Hz, 与理论数学计算分析的固有频率 60 Hz 相近。

8 结论

为了求解消像旋轴系的谐振频率, 以便为提高其刚度设计提供指导意见, 本文通过理论分析推导出了计算公式, 并借助 ADAMS 动力学仿真软件提供数据支持, 得到谐振频率计算结果; 为了进一步验证理论分析的可靠性, 本文通过扫频实验实际测试轴系的谐振频率, 从而印证了计算公式的正确率。当然, 要想提高轴系的固有频率, 在开展理论设计分析的同时, 也需要着重在机械结构设计两个方面入手。一是提高系统刚度, 尽量减少刚度薄弱环节, 避免多级传动, 优先考虑力矩电机直驱方案并加大主轴直径; 二是降低转动惯量, 将电机尽量靠近大负载, 采用紧凑型结构布局, 优先选用轻型材料。

参考文献:

- [1] Lu E. Analysis of dynamic characteristics of photoelectric theodolite[J]. Optical Machinery, 1989, (3): 25 - 34. (in Chinese)
卢镔. 光电经纬仪动态特性分析[J]. 光学机械, 1989, (3): 25 - 34.
- [2] Erkaya S. Investigation of joint clearance effects on welding robot manipulators[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(4): 449 - 457.
- [3] Frisoli A, Solazzi M, Pellegrietti D. A new screw theory method for the estimation of position accuracy in spatial parallel manipulators with revolute joint clearances[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(12): 1929 - 1949.
- [4] Paddan Gurmail-singh, Griffin Michael. Evaluation of whole-body vibration in vehicle[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(1): 195 - 213.
- [5] Wang Xiaojie, Liu Hui, Li Wen-ping, et al. Stiffness and load bearing characteristics of a parallel torsional damper[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, (5): 63 - 66. (in Chinese)
王晓杰, 刘辉, 酃文平, 等. 并联扭转减振器刚度与承载特性研究. 机械设计与制造, 2018, (5): 63 - 66.
- [6] Wu Xiaoxia, Zhang Jingxu, Wang Zhi. Rigidity analysis and error correction for alt-alt telescope shafts[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(1): 34 - 38. (in Chinese)
吴小霞, 张景旭, 王志. 水平式望远镜轴系刚度分析及轴系误差的修正[J]. 光电工程, 2011, 38(1): 34 - 38.
- [7] Zhao Yongzhi, Zhang Jingxu, Wu Xiaoxia. Modification of altitude axis errors for 1 m aperture telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10): 2401 - 2405. (in Chinese)
赵勇志, 张景旭, 吴小霞. 1 m 望远镜俯仰轴系精度检测误差的修正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2401 - 2405.
- [8] Gao Che, Qiao Yanfen. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(6): 846 - 851. (in Chinese)
高策, 乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 846 - 851.
- [9] Wang Hui, Zheng Shikun, Zhu Jialong, et al. Stiffness calculation and simulation analysis of shafting of space-borne antenna scanning mechanism[J]. Space Electronics Technology, 2018, 15(1): 70 - 73. (in Chinese)
王辉, 郑士昆, 朱佳龙等. 星载天线扫描机构轴系刚度计算与仿真分析[J]. 空间电子技术, 2018, 15(1): 70 - 73.