

# 改善光电跟踪测量系统机械谐振频率 方法探讨

卢 镔

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 13002)

**摘要** 本文阐述了光电跟踪测量系统机械谐振频率对系统动态特性的影响, 导致机械谐振频率低下的影响因素, 在设计阶段系统机械谐振频率的估算及改善的途径。

**关键词:** 谐振频率; 固有频率; 阻尼

## 1 引言

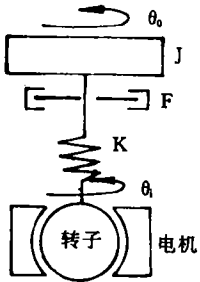
早期的光电跟踪测量系统口径较小、跟踪座架的结构固有频率较高, 对系统的精度和动态性能的要求较低, 且伺服系统带宽也比较窄, 因此机械谐振问题不突出。七十年代后期以来, 随着科学技术的飞速发展, 各种高精度、高速度飞行器竞相研制, 对于靶场光电跟踪测量系统的要求也越来越高, 一方面, 为了能灵活地适应各种不同试验场区并对各种不同的飞行器进行测量, 要求光电跟踪测量系统不仅具有“一机多用”的功能, 而且应具备高精度、高稳定性及快速响应等性能。这种集多功能及高性能于一身的光电跟踪测量系统往往装备有激光、红外、电视及高速摄影等多种跟踪与测量手段, 致使身上背的装置增多, 跟踪座架头部体积增大; 此外, 为了提高作用距离及分辨率等光学性能, 光学系统的相对孔径、焦距或视场角呈现加大趋势, 也导致光学系统器件质量增加。根据相似原理, 跟踪座架头部质量越大, 系统整机结构的固有频率越低; 另一方面, 由于对光电跟踪测量系统的跟踪精度的要求日益提高, 提高跟踪精度就必须增加伺服系统的带宽, 因为频带宽, 动态误差小, 响应速度就快。伺服带宽的增加和结构固有频率的降低, 使二者带宽逐渐靠近, 甚至有可能发生跟踪座架固有频率落入伺服系统带宽之内, 在这种情况下, 伺服系统中的噪声很容易激起系统整机结构的谐振, 而反馈又会使谐振持续下去, 造成系统不稳定, 从而使系统无法正常工作。为此, 设计工作者致力于提高系统整机结构的谐振频率, 使其尽量远离伺服系统带宽, 确保系统的稳定性、快速性及精确性, 即成为人们越来越关注的问题。

收稿日期: 1994年4月8日

## 2 整机谐振频率对系统动态特性的影响

整机谐振频率对系统动态特性起着至关重要的作用,不仅影响系统的频率响应、系统动态过程等品质,而且直接关系到系统的稳定性、快速性及系统的精度,是光电跟踪测量系统重要的技术指标之一。

为了说明谐振频率对系统动态特性的影响,将光电跟踪测量系统的整机结构简化为一个二阶的电机—弹簧—质量系统,其中弹簧—质量构成一振子系统。如图 1 所示:



$J$ —转台负载惯量; $K$ —弹性连接体扭转刚度; $F$ —阻尼系数;

$\theta_i$ —电机转子输入转角信号;

$\theta_o$ —转台输出转角

由图 2,如果在电机转子上输入一阶跃转角  $\theta_i$ ,则不难得出负载的动力学方程式:

$$J \frac{d^2\theta_o}{dt^2} + F \frac{d\theta_o}{dt} = K(\theta_i - \theta_o) \quad (1)$$

$$\text{令 } \omega_n = \sqrt{\frac{K}{J}} \quad (2)$$

图 1 整机结构力学模型

$$\zeta = \frac{F}{2\sqrt{KJ}} \quad (3)$$

代入 (1) 式并进行拉氏变换,则可得出:

$$(S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2)\theta_o(s) = \omega_n^2\theta_i(s) \quad (4)$$

其对应的传递函数为:

$$H(s) = \frac{\theta_o(s)}{\theta_i(s)} = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad (5)$$

令  $S = j\omega$ , 可导出其闭环幅频特性:

$$A(\omega) = \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \quad (6)$$

式中:

$A(\omega)$ —对应于不同频率时整机输出转角与由驱动电机输入转角之比;

$\omega$ —圆频率;

$\omega_n$ —整机无阻尼固有频率;

$\zeta$ —阻尼比。

当整机结构处于光电跟踪测量系统闭环状态下,其幅频特性振幅比  $A(\omega)$  达到最大值  $A_{max}$  时,整机结构便发生机械谐振,此时的频率即为整机机械谐振频率。由式 (6),当  $A(\omega) = A_{max}$  时,应满足分母为极小值的条件:

$$\frac{d}{d\omega}(\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}) = 0$$

则可得出:

$$\omega = \omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (7)$$

式(7)表明整机机械谐振频率 $\omega_r$ 的大小取决于整机结构无阻尼固有振荡频率 $\omega_n$ 及阻尼比 $\zeta$ 。实际上谐振频率 $\omega_r$ 亦可看作是整机结构在有阻尼的情况下的固有振荡频率。当整机结构阻尼很低或阻尼分布均匀时, $\omega_r = \omega_n$ ,其相应的振型呈实模态振型。实际工程中,光电跟踪测量系统整机结构部件间具有一定的相对运动,伴随有库伦磨擦、粘滞磨擦等不容忽视的阻尼存在,其相应于 $\omega_r$ 的振型呈复模态振型。由 $\omega_n$ 及 $\zeta$ 确定的机械谐振频率 $\omega_r$ ,作为整机结构动态特性的一个重要的综合指标,对光电跟踪测量系统的动态性能起着至关重要的影响。这种作用突出地体现在对伺服控制系统工作性能的影响上,主要表现在:

1 系统的稳定性—光电跟踪测量系统是在闭环控制状态下进行工作,也即是说靠反馈原理来工作,这种系统本身就具有振荡的倾向。为使系统能正常工作,必须保证系统具有良好的稳定性,也即是与所需值的偏差必须随时间的增长趋向于零或小于给定值。整机谐振频率低,很容易因过大的惯量、较低的刚度造成整机转动部分在随动过程中产生“滞后”现象。这种“滞后”不仅使偏差难于收敛,而且由于误差信号与驱动电机力矩不协调导致振荡,使系统失去稳定性而无法工作。衡量系统稳定性往往以“稳定裕量”的大小加以评价。工程中常以“相角裕量”来反映系统的相对稳定性。相角裕量的大小由相应于式(6)的开环幅频特性 $20\log A(\omega) = 0$ 时(开环截止频率)的相位差角与 $-\pi$ 的差角确定,经由开环频率特性表达式求解可得:

$$\text{相角裕量} \quad \gamma = \sin^{-1}(2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}) \quad (8)$$

$\gamma$ 值越大,说明系统越稳定,反之, $\gamma$ 值越小,系统稳定性就越差。由式(8)可知, $\gamma$ 是阻尼比 $\zeta$ 的函数,由式(3)知, $\zeta$ 又是整机结构的刚度 $k$ 惯量 $J$ 及阻尼力 $F$ 的函数。由于 $\omega_r = f(\omega_n, \zeta) = f(K, J, F)$ ,因此一旦系统的参数 $K, J, F$ 被确定, $\omega_r$ 也就定了,其相应的相角裕量也就被确定。从某种意义上来说,整机机械谐振频率的大小与相位裕角相关,影响着系统的稳定性。

2 系统的快速响应性—在实际工程中,为了使光电跟踪测量系统能迅速地按照输入控制信号要求的形式运转,系统必须具有快速响应能力。衡量系统快速性的一个重要指标是控制系统的闭环频带宽度 $B$ 。带宽 $B$ 是指由零频率到闭环截止频率 $\omega_b$ 的频带宽度。 $\omega_b$ 值越大,系统的频带越宽,说明系统对较快的输入信号都能充分准确地反映出来,这意味着系统的过渡过程短。 $\omega_b$ 为幅频特性 $A(\omega)$ 降至零频幅值的70.7%(或相对零频增益下降3dB)时的频率,据此,将 $A(\omega) = 0.707$ 代入到式(6)中可得:

$$\omega_b = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{2 - 4\zeta^2 + 4\zeta^4}} \quad (9)$$

式(9)说明,频带宽度为 $\omega_n$ 及 $\zeta$ 的函数, $\omega_b$ 值的大小取决于 $\omega_n$ 及 $\zeta$ ,而 $\omega_n$ 及 $\zeta$ 决定了整机机械谐振频率 $\omega_r$ 的大小,因此,整机机械谐振频率 $\omega_r$ 对闭环频带宽度 $\omega_b$ (数值上 $\omega_b = B$ )起着限制作用。整机机械谐振频率 $\omega_r$ 越高,系统的闭环带宽就可以设计得越宽,因而系统的快

速响应性就越好。

3 精确性—系统的精确性主要由跟踪误差、自动跟踪状态的测量误差以及引导状态下的指向误差等指标来衡量。跟踪误差是指光电跟踪测量系统的光轴与目标线之间的夹角，它是伺服控制系统精确性的重要指标，机械谐振频率  $\omega_r$  对跟踪误差的影响多半体现在系统误差上，例如由于  $\omega_r$  低，其机械结构的刚度偏低，造成轴系精度降低，就跟踪精度而言，一般影响不大，但对外界环境干扰作用时引起的随机误差，尤其是高频成分，对跟踪精度影响较大，须严格加以控制。自跟踪状态下的测量误差是指目标方位角与传感器输出的方位角（或二者的俯仰角）数据之差；引导状态的指向误差是指由外界引导系统发出的命令为输入角与光轴实际指向为输出角之差。由于这二者误差都涉及到由角位移传感器输出角度，而且这角度值就包括了整机机械结构弹性变形、轴系误差、数据传递误差等等因素。上述这些因素，尤其结构弹性变形因素，与整机机械谐振频率  $\omega_r$  有着密切关系。为了提高测量精度及指向精度就要尽力改善并提高光电跟踪测量系统机械谐振频率。

综上所述，光电跟踪测量系统整机机械谐振频率  $\omega_r$  对系统动态特性的影响，可归纳如下：

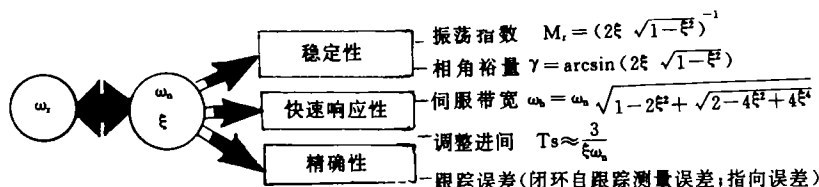


图2  $\omega_r$  对系统动态特性的影响

由上不难看出，为保证光电跟踪测量系统具有良好的动态性能，必须保证系统具有足够的整机机械谐振频率  $\omega_r$ ，关键是系统的  $\omega_n$  及  $\xi$  的合理设置： $\omega_n$  应尽量大，而  $\xi$  应适当选取，不宜太小，太小有时会造成系统不稳定，一般取  $\xi=0.4\sim 0.707$ 。

### 3 提高整机谐振频率的技术措施探讨

由式 (7)、(2)、(3) 知，整机机械谐振频率  $\omega_r$  由  $\omega_n$  和  $\xi$  决定，最终体现在整机结构的刚度  $K$ 、惯量  $J$  和阻尼力  $F$  等三个基本参数上。在整机总体设计时如何合理选择  $K$ 、 $J$  及  $F$  是解决整机结构谐振问题的关键。由于整机的机械谐振实际上是机电耦合相互作用结果，因此解决机械谐振问题需要从整机机械结构设计和伺服控制系统设计双方共同配合，站在系统的高度统筹考虑加以解决。提高整机谐振频率大体上可从下面几方面着手

1 结构设计上要增强整机刚度，减小惯量来提高结构固有频率。增大刚度无外乎从结构设计的合理性及选用比刚度较高的材料二方面入手。一个高刚度的合理结构应本着力的传递路径最短的原则，避免应力集中，结构应变能尽量小且均匀分布，尤其应注意传动链的末端

要保证有足够的刚度。因为传动链末端的刚度对等效刚度的影响最大。传动链中存在间隙往往导致谐振频率降低,装配过程中应予以注意。减小负载的转动惯量主要从合理的结构安排和选用弹性模量高比重小的材料进行考虑。应尽量使结构设计得紧凑,特别是质量大的部件应装配在高回转中心近的地方。

2 提高整机机械系统阻尼此是解决振问题的一种经济有效的办法。为了保证适当的稳定裕量,应使伺服带宽满足  $\omega_b = 2\zeta\omega_n$ , 因为结构的固有频率  $\omega_n$  不变,故提高  $\zeta$ , 可使  $\omega_b$  提高。国外有的经纬仪和雷达就是通过采用提高  $\zeta$  的办法实现增加带宽的目的。如  $\zeta$  由 0.01 提高到 0.1, 则伺服带宽可由  $0.02\omega_n$  提高到  $0.2\omega_n$ 。增加阻尼此可以通过采用粘性联轴器, 液压阻尼器、电磁阻尼器等手段实现, 此外, 采用相对阻尼系数较大的材料, 如灰铸铁, 硬橡胶等, 均对振动具有吸收作用。

3 正确配置敏感元件。敏感元件, 如测速元件, 放置的位置不同, 则测得的结果就可能不同, 尤其是传动链的弹性变形不容忽视时, 就必须考虑敏感元件放置的位置。

4 在伺服回路中串联反谐振滤波器。针对整机结构谐振频率  $\omega_r$ , 在伺服回路中串联一反谐振滤波器校正网络, 使其频率特性具有一个凹口, 将凹口对准系统的结构谐振频率  $\omega_r$ , 以达到抵消谐振峰的目的。在实际工程中, 由于弹性振动中的非线性因素以及一些虽然呈线性但随工况变化而变的参数, 使得谐振峰的抵消很难实现, 尤其是对液峰很陡,  $\zeta$  很小的情况下更是如此。因此, 这种方法只有在  $\zeta$  值较大, 谐振峰较缓的情况下才有效。

5 通过采用 SFO (标准型优化) 的方式利用计算机对伺服控制回路实施 PID 校正达到改善系统动态特性往往是行之有效的。

## 4 在设计阶段中整机谐振频率的预估

为提高设计成功的概率并实现优化设计, 在光电跟踪测量系统样机制作出来之前, 应对系统整机机械谐振频率进行预估, 以及早发现隐患, 改进设计并实现优化。现代 CAD/CAE 的手段为实现“预估”及“优化”提供了方便、高效的工作平台。其大体步骤如图 3 所示:

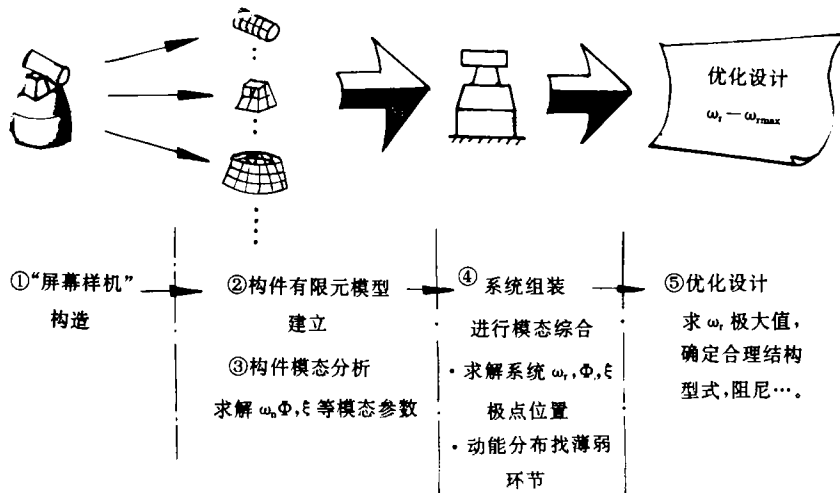


图 3 整机结构谐振频率性能预估及优化步骤示意图

首先通过三维实体建模的手段构造光电跟踪测量系统的整机结构“屏幕样机”，该“样机”不仅具有几何属性、拓扑关系，而且还具有各组成构件的物理属性，材料属性等信息；然后在屏幕样机的基础上，建立各构件的有限元力学模型并通过对各构件进行模态分析，求出各构件的模态参数 $\omega_n$ （固有频率）， $\Phi$ （振型）及 $\zeta$ （模态阻尼比）；在获取了对各构件动态特性描述的模态参数后，就可进行系统动力学组装，通过模态综合的办法求出整机结构的 $\omega_r$ ， $\Phi$ ， $\zeta$ 及极点位置，极点位置可反映出模态频率与阻尼的关系，由后处理程序还可求出动能分布情况以便暴露整机结构的薄弱环节，有助于改进设计。最后，为了使设计更加合理，还应进行优化迭代计算，求取 $\omega_r$ 为最大值时的结构参数及阻尼比值，实现整机结构的优化设计。整机结构机械谐振频率的改善往往从机电双方统筹考虑，在数学模型上由于机、电各自的控制方程相似，以及闭环中数据的藕合，因此可建立统一的数学模型，在此基础上求得的结果将全面地反映了系统的动态特性，有助于从系统的高度出发探讨谐振频率的改善问题。限于篇幅，在此就不加赘述了。

总之，从系统的动态的观点出发，借助于CAD/CAE高科技手段对改善光电跟踪测量系统整机机械谐振频率问题进行探讨是非常必要的，行之有效的。

## Talking About How to Improve the Resonance Frequency of OE Tracking & Measuring System

Lu E

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun 130022)*

### Abstract

This paper describes the influence applied by mechanical resonance frequency of OE tracking & measuring system to the system dynamical behaviours. The factors which influence the resonance frequency are depicted and the way to estimate and to improve the resonance frequency of design phase are also stated.

**Key Words:** Resonance frequency, Nature frequency, Damp