

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.08.024

上反射镜稳定系统机械谐振的分析

郭新胜¹, 陈洪彩², 党力³, 谭名栋¹, 雷海丽¹, 韩伟¹, 李红光¹

(1. 中国兵器第二〇五研究所第五研究室, 西安 710065;

2. 中国兵器第二〇五研究所第十研究室, 西安 710065;

3. 中国兵器第二〇五研究所总体一部, 西安 710065)

摘要: 针对在上反射镜 1/2 机械传动过程中存在机械谐振的问题, 提出抑制或消除机械谐振的方法。通过分析上反射镜稳定系统的控制结构模型, 推导出其传递函数和动力学方程, 结合上反射镜的实际结构, 分析机械谐振产生的机理, 讨论结构机械谐振频率与上反射镜稳定伺服系统带宽关系, 并以某型号坦克车长镜为例进行验证分析。结果表明: 整机系统没有出现失稳的现象, 应在结构设计初期采取合理的设计及更先进的仿真, 以抑制或消除机械谐振。

关键词: 机械谐振; 上反射镜; 稳定; 伺服带宽

中图分类号: TJ810.3⁺76 **文献标志码:** A

Upper Mirror Stabilization System on Analysis of Mechanical Resonance

Guo Xinsheng¹, Chen Hongcai², Dang Li³, Tan Mingdong¹, Lei Haili¹, Han Wei¹, Li Hongguang¹

(1. No. 5 Research Office, No. 205 Research Institute of China Ordnance, Xi'an 710065, China;

2. No. 10 Research Office, No. 205 Research Institute of China Ordnance, Xi'an 710065, China;

3. No. 1 Overall Department, No. 205 Research Institute of China Ordnance, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problem of mechanical resonance in the mirror for 1/2 mechanical transmission process, put forward the mechanical resonant reduced or eliminated mechanical resonant method. Through the analysis of the reflector stable system control structure model, and deduced the transfer function and dynamic equation, combining the actual structure the reflector, analyzes mechanical resonant emergence mechanism, discussion on the resonance frequency and mechanical structure mirror stable servo system in a relationship, and taking certain type tank length mirror as example progress validate analysis. The results show that the system doesn't appear instability of the structure design of the phenomenon, should take reasonable design and the beginning of more advanced simulation, to suppress or eliminate mechanical resonant.

Keywords: mechanical resonance; upper mirror; stabilized; servo bandwidth

0 引言

在机械传动的过程中, 始终存在机械谐振现象。在结构设计装配安装完成后, 其结构的谐振频率已经明确, 不会有太大的改变^[1]。在光电观瞄与跟踪系统中, 其负载大多由 2~4 个旋转体连接, 转动惯量大, 机械谐振表现更为明显, 极大地影响了系统稳定性与可靠性。

在分析伺服系统时, 往往将执行电机至控制对象之间的机械传动看成是绝对刚性传动, 当控制对象的转动惯量不大, 系统跟踪角加速度不高, 而传动装置的刚度较大时, 可以忽略弹性扭转变形。但随着性能指标的要求越来越高, 现有的光电系统是无法避开机械谐振的^[2]。而且机械谐振对系统的动态性能产生较大影响, 甚至使系统不稳定, 在某些

谐振频率下还可能会损坏精密的光电传感器及耦合轴系。因此, 笔者通过分析上反射镜中机械谐振产生和影响因素, 采取抑制措施, 以改善系统可靠性并提高系统带宽。

1 上反射镜稳定系统机械模型

上反射镜是车载光电观瞄设备中的关键部件, 在坦克装甲车辆上经常采取这种结构形式, 其性能的优劣直接关系到整个系统性能的好坏。在上反射镜系统中, 由于被控制对象上反射镜的转动惯量较大、粘性摩擦较小, 当 1/2 传动装置的刚性较差时, 执行电机至上反射镜之间的传动存在柔性传动。在坦克装甲车辆运动过程中, 其振动就会传递到反射镜上, 容易形成机械谐振。

为了说明机械谐振频率对上反射镜稳定系统系

收稿日期: 2011-04-17; 修回日期: 2011-05-30

基金项目: 总装备部装计[2009]1001 号; 装陆[2009]454 号

作者简介: 郭新胜(1972—), 男, 陕西人, 博士, 高级工程师, 从事光电稳定与跟踪技术研究。

统动态性能的影响，上反射镜稳定系统的结构包含有电机轴和反射镜轴，2 个轴依靠 1/2 传动机构(钢带、连杆)连接，如图 1。当电机带动反射镜运动时，1/2 传动机构存在弹性变形。因此，将上反射镜稳定系统这种光电系统的结构等价为一个二阶电机—弹簧—质量系统，其中弹簧—质量构成一个振动子系统^[3]，如图 2。

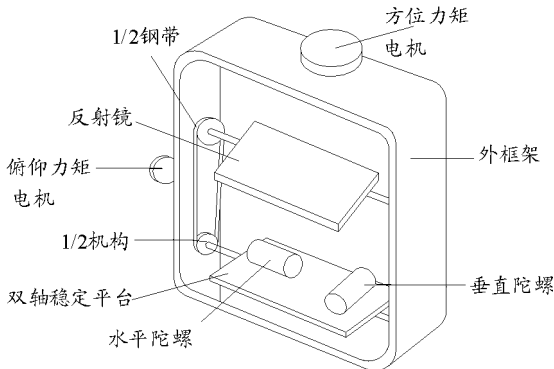


图 1 上反射镜的典型结构

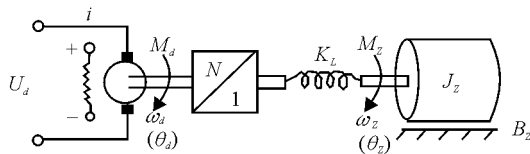


图 2 二阶电机—弹簧—质量系统模型

由图 2 通过对系统模型的动力方程，进行拉氏变换，得到其传递函数式如下：

$$\omega_d(s) = \frac{C_m s \left[U_d(s) + \frac{K_L(R+Ls)}{C_m s} \omega_z(s) \right]}{LJ_d s^3 + RJ_d s^2 + (C_m C_e + LK_L)s + K_L R} \quad (1)$$

$$\omega_z(s) = \frac{\omega_d(s) K_L - s M_z(s)}{J_z s^2 + B_z s + K_L} \quad (2)$$

由式 (1)、式 (2) 可作出相应的动态结构图，如图 3。

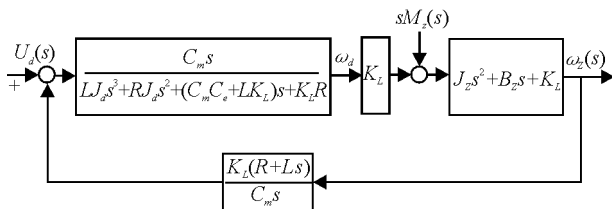


图 3 电动机—传动机构—负载动态结构图

由图 3 可求出电枢电压 U_d 与负载转速 ω_z 间的传递函数 ($M_z=0$)

$$G(s) = \frac{\omega_z}{U_d} = \frac{C_m K_L}{\Delta_1} \quad (3)$$

式中

$$\Delta_1 = \left[(LJ_d s^4 + RJ_d s^2 + (C_m C_e + LK_L)s + K_L R)(J_z s^2 + B_z s + K_L) \right] + K_L^2 (Ls + R)$$

通过分析式 (3) 可知，传递函数 $G(s)$ 不会出现零、极点相消。由可控、可观测的判据，被控对象是可控、可观测的。但是，由图 3 可以看出，在考虑了 1/2 机构传递过程的弹性变形后，电动机的数学模型和参数被改变了，而且在电机轴转速 ω_d 与负载转速 ω_z 之间还增加了一个二阶振荡环节。这个二阶振荡环节通常具有很低的阻尼系数 (0.02 ~ 0.1)，当它的自然振荡频率 $\omega_0 = \sqrt{\frac{K_L}{J_z}}$ 接近或小于系

统的截止频率 ω_c 时，会引起系统的强烈振荡。据相关资料显示，坦克装甲车辆上的环境十分恶劣，垂直的摇晃极为严酷，其振动频率最高可达 500 Hz，而上反射镜就处在这种环境条件下，若处理不好机械谐振，非常容易引起系统性能的严重下降，甚至损伤。

2 机械谐振频率与上反射镜稳定系统的关系

2.1 建立反射镜动力学方程

以双连杆机构进行分析，忽略连杆的质量，假设轴与连杆之间完全刚性连接，并忽略轴的扭转，不考虑连杆自身的振动。假设变形为小变形，忽略滑块、轴承与连杆间的间隙，各几何关系如图 4。

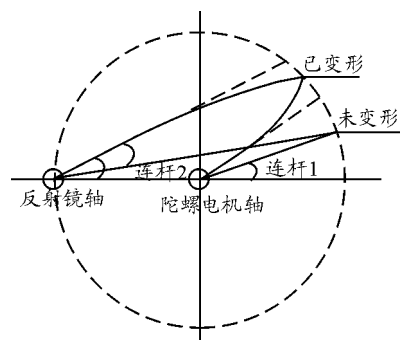


图 4 摆杆式反射镜轴与陀螺电机轴几何关系图

其动力学方程为：

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + F \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) R &= M_1 \\ J_2 \ddot{\theta}_2 - FL_2 - M_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中： $M_1 = M_{\text{motor}} - M_{\text{friction1}}$ ， $M_2 = M_{\text{friction2}}$ ，

$L_2 = 2R \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right)$, 为连杆 2 的长度。 R 为连杆 1 的长度。

由于轴向刚度通常远大于横向刚度, 这里忽略连杆 1、2 的轴向变形。根据图示的变形协调条件, $\theta_2 - \frac{\theta_1}{2}$ 很小时, 下列关系成立

$$R(2\theta_2 - \theta_1) = \frac{F}{k_2} + \frac{F \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right)}{k_1} \quad (5)$$

其中: $k_2 = \frac{3E_2 I_2}{L_2^3}$, $k_1 = \frac{3E_1 I_1}{R^3}$

$$\text{可得: } F = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2 \cos\frac{\theta_1}{2}} L_2 (\theta_2 - \frac{\theta_1}{2}) \quad (6)$$

从而 $F = g(\theta_1)(\theta_2 - \frac{\theta_1}{2})$, 其中:

$$g(\theta_1) = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2 \cos\frac{\theta_1}{2}} L_2$$

继续推导, 可得到刚度矩阵为 θ_1 的函数。将其代入式 (4), 可得到反射镜连杆式动力学模型:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + g(\theta_1)(\theta_2 - \frac{\theta_1}{2}) R \cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) &= M_1 \\ J_2 \ddot{\theta}_2 - g(\theta_1)(\theta_2 - \frac{\theta_1}{2}) L_2 &= M_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可以看出系统刚度是转角 θ_1 的函数, 系统在不同位置的固有谐振频率是不同的。机械谐振是由转动惯量和传动装置的材料、结构及尺寸等诸多因素决定的。刚性越差, 机械谐振频率就越低, 反之亦然。若谐振频率小于伺服系统的带宽, 将对系统的动态性能带来很坏的影响。因此, 需要继续探讨机械谐振频率与上反射镜稳定系统带宽的关系, 为后续的设计提供依据。

2.2 机械谐振频率对稳定系统带宽的限制

上反射镜稳定系统的频带反映系统响应的快速性, 提高带宽可加快响应速度, 提高跟踪精度。系统的快速性是由系统的闭环带宽 ω_B 决定的^[4]。 ω_B 越大即系统的闭环带宽越宽, 系统的响应速度就越快, 即系统的过渡时间就越短; 反之, 系统的响应速度就越慢, 则系统的过渡时间就越长。 ω_B 可表示为:

$$\omega_B = \omega_n \left[1 - 2\xi^2 + (2 - 4\xi^2 + 4\xi^4)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (8)$$

通过上面各公式可以看出, 系统闭环带宽 ω_B 及

系统的相角裕量 γ 均和机械谐振有关。低的机械谐振频率容易对系统的稳定性造成不利的影 响, 同时也大大限制了系统的闭环带宽^[3]。通过查阅文献资料, 结构谐振频率 ω_L 对伺服带宽 $\omega_B (= 2\pi\beta_n)$ 的限制为:

$$\omega_B \leq 2\xi_L \omega_L \quad (9)$$

通过式 (5), 并结合工程设计要求, 取相对阻尼系数 $\xi_L = 0.25$, 可以得到:

$$\omega_B \leq (1/4)\omega_L \quad (10)$$

可以看出对于上反射镜这种高性能的光电瞄准跟踪设备而言, 为了满足较高的跟踪性能要求, 需要其上反射镜组件应具有较高的机械谐振频率。

2.3 机械谐振频率对速度回路截止频率的限制

从 20 世纪 60 年代以来, 结构谐振频率 ω_L 对速度回路截止频率 ω_{cr} 的限制一直受到下式束缚^[1]:

$$\omega_{cr} \leq (1/2)\omega_L \quad (11)$$

但通过长时间的工程实践证明, 可以得到 ω_{cr} 对 ω_c 限制条件^[1], 从而得到 ω_L 对 ω_c 的限制条件:

$$\omega_c \leq \frac{1}{4}\omega_L \quad (12)$$

结构谐振频率 ω_L 对系统闭环带宽 ω_c 的限制, 与参考文献[3]指出的限制条件 $\omega_c \leq (1/10 \sim 1/8)\omega_L$ 相比, 参考文献的结果与工程上对于坦克装甲车瞄准镜机械谐振频率的设计要求基本相符, 这样才能保证上反射镜稳定的性能。

3 消除或减小机械谐振对上反射镜系统的措施

上反稳瞄系统工作在装甲车上或坦克上, 在高速机动时瞄准射击, 会受到不间断的强烈振动和冲击。因此不仅要求战车在低频颠动下系统具有较高的低频精度, 还要求在射击过程中具有较好的抗震能力, 给设计带来了很大的困难。结合工程实践设计及机械谐振的产生机理, 为了消除或减小机械谐振对上反射镜稳定系统品质的影响, 提出以下措施:

1) 提高上反射镜稳定系统伺服机械结构固有频率^[5-6]

提高伺服机械结构固有频率的措施主要从提高结构的刚度和减小转动惯量来考虑。影响结构刚度的因素很多, 设计时应着重提高指向器座架和驱动

装置的刚度。减小转动惯量与结构布局有很大关系,应尽量使结构布局紧凑,使质量大的零件尽量靠近回转轴线。此外,采用刚度比较大的结构也能使惯量减小;采用低速、大扭的力矩电机直接驱动,可以显著减小电机的折算惯量,大大提高扭转刚度。

2) 加大上反射镜稳定系统机械阻尼^[7]

如果提高机械传动装置的刚度受到限制,可采用加大机械阻尼的办法,减弱机械谐振对系统的影响。

3) 调整上反射镜稳定系统中 1/2 传动机构的间隙

在上反射镜稳定系统中 1/2 传动机构间隙的大小,是机械谐振的一个关键点。间隙过大,会引起机械谐振;间隙过小,会造成摩擦力矩增大。

4) 采用串联补偿

在上反射镜稳定系统中采用串联无源或有源补偿装置,利用补偿网络的复零点和复极点对消,可消除、减弱机械谐振对系统的影响。

4 机械谐振对上反射镜稳定系统的影响

以××车长镜为例,由于无法单独测试上反镜稳定组件,只能安装在整机系统中,通过观察振动实验中瞄准线的抖动幅度的大小来检验它的机械谐振,具体方法如图 5。这种方法可以当作机械运动引起的角运动在电气上的反映,当系统工作的环境没有产生机械谐振点频率的振动时,十字线的宽度属正常,但其工作的环境产生机械谐振点频率附近的振动时,系统谐振会使线振动引起角振动,从而会使目标十字线变宽。(注:30"为平行光管的十字线宽度。振动环境为频率在 5~200 Hz 以 2.5g(g 为重力加速度)的加速度垂直振动)。

从图 5 中可以看出:系统在 80 Hz 以内,目标十字的宽度均不超过 40",系统的低频特性较好,但 100 Hz 和 170 Hz 附近目标十字线宽度较大,这说明在上反射镜稳定系统结构产生了机械谐振。

由于结构已确定,只能在电气上进行处理,采用串联陷波器的方法来消除机械谐振对系统造成的影响。由于陷波器的引入会影响系统的稳定裕度,为了尽量减小这种影响,陷波器的 Q 值(品质因数)应选得比较大。对于本系统,在振动试验时有 2 个谐振点,位于 100 Hz 和 170 Hz 附近。170 Hz 距离系统带宽频率较远,消除 170 Hz 处的谐振可以采用串连陷波器的补偿方法,而 100 Hz 距离系统的带宽

频率太近,由于陷波器具有相角滞后的特性,若仍采用陷波器的补偿方法,会造成系统的不稳定。因此只好采用通过降低系统增益、降低系统带宽的方法来抵消谐振对系统造成的部分影响。

采取措施后,再次对车长镜进行振动试验,从图 5 的试验结果可以看出,170 Hz 附近处的目标十字线宽已降至 1.8",而 100 Hz 处的也有所降低,取得了较满意的结果,整机系统没有出现失稳的现象,稳定性得到了提高。

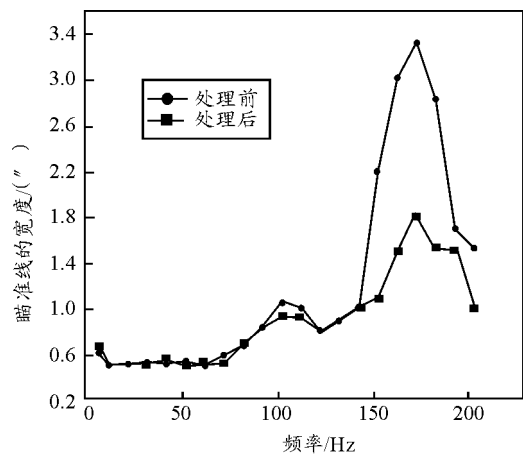


图 5 谐振处理前和处理后的瞄线与频率

5 结论

通过上述对抑制或减小机械谐振措施的应用,可以较好地抑制整机系统的谐振,但针对不同的系统应采取不同的措施。总之,只有在结构设计初期,采取合理的设计与更加先进的仿真,才能抑制或消除机械谐振。

参考文献:

- [1] 吴晗平. 机械结构因素对光电跟踪伺服系统性能的影响[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 11-14.
- [2] George Biernson. Relation between structural Compliance and allowable friction in a servomechanism[J]. IEEE Transactions on Automatic control, 1965, AC-10: 59-61.
- [3] 马佳光. 捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题[J]. 光电工程, 1989, 16(3): 1-14.
- [4] 吴晗平. 舰用红外成像跟踪系统的技术要求与统计分析[J]. 现代防御技术, 1998(4): 48-54.
- [5] 卢铿. 改善光电跟踪测量系统机械谐振频率方法的探讨[J]. 光学精密工程, 1994(2): 47-52.
- [6] 纪明. 反射镜稳定系统的仿真与误差分析[J]. 应用光学, 2000, 21(5): 19-22.
- [7] 俞文伯. 传动反射镜方式的陀螺稳定平台的稳定性[J]. 火力与指挥控制, 1992, 17(2): 1-8.