

文章编号: 1002-2082(2004)03-0011-04

机械结构因素对光电跟踪伺服系统性能的影响

吴晗平^{1,2}, 易新建², 杨坤涛²

(1. 中国人民解放军驻中南地区光电系统军代表室, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为克服机械结构因素对光电跟踪伺服系统性能的不良影响, 分析了转动惯量、结构谐振频率、摩擦力矩等伺服机械结构因素与伺服系统性能的关系, 包括分析转动惯量与伺服系统性能的关系、结构谐振频率与伺服系统性能的关系、摩擦力矩与伺服系统性能的关系, 探讨了消除或减小机械谐振的措施。该分析方法可应用于设计和制造响应速度快、跟踪精度高的光电跟踪伺服系统。

关键词: 光电跟踪设备; 伺服系统; 转动惯量; 机械谐振; 摩擦力矩; 谐振频率; 伺服带宽

中图分类号: TH74

文献标识码: A

Mechanism Structure Factors on Performance of Opto-electronic Tracker Servo Systems

WU HAN-ping^{1,2}, YI Xin-jian², YANG Kun-tao²

(1. The optoelectronic system military representative office of the CPLA stationed in

the Zhongnan area of China, Wuhan 430074, China; 2. Department of

Photoelectron Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: By way of overcoming mechanism structure factors seriously affecting on performance of opto-electronic tracker servo systems, the relationship between servo system performance and servo mechanism structure factors that consist of inertia moment, structure resonance frequency and friction moment is analyzed. These include relations between inertia moment and servo system performance, between structure resonance frequency and servo system performance, and between friction moment and servo system performance. The measures that avoid or minimize the mechanism resonance are probed. These analytical methods may be used to design and make the opto-electronic tracker servo systems with quick response and high tracking accuracy.

Keywords: opto-electronic tracker; servo system; inertia moment; mechanism resonance; friction moment; resonance frequency; servo bandwidth

引言

分析伺服系统时, 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。但如果转动惯量较大时, 系统通频带又比较宽, 系统运动过程中传动轴的弹性扭转变形将造成明显滞后, 传动装置在传递运动时就会含有储能的元件。由于它速

度阻尼小, 其传递特性将出现较高的谐振峰, 形成机械谐振, 从而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。

机械谐振是由转动惯量和传动装置的材料、结构及尺寸等因素决定的。刚性越差, 机械谐振频率就越低, 反之亦然。通常伺服系统的机械传动装置都具有一个谐振频率, 但有的不止一个谐振频率。

收稿日期: 2003-08-11; 收到修改稿日期: 2004-03-25

作者简介: 吴晗平(1964-), 男, 湖南澧县人, 工程师, 博士生, 主要从事军用光电系统装备技术的研究。

如果谐振频率小于系统的带宽,则将对系统的动态性能带来很坏的影响,使系统易于损坏。

伺服机械结构是伺服系统的控制对象,也是伺服系统的重要组成部分,其因素就是伺服机械性能指标(主要有转动惯量、结构谐振频率、摩擦力矩、转动空回和传动精度等)。伺服系统的性能主要有稳定裕量、跟踪误差、过渡过程品质、伺服带宽和调速范围等。

1 转动惯量与伺服系统性能的关系

转动惯量指伺服机械结构的转动部分及其负载(包括激光测距仪、红外跟踪器和电视跟踪器等)的合成转动惯量,称为伺服系统的负载转动惯量,用符号 J_L 表示,是伺服系统设计的基本原始参数。负载转动惯量与系统开环截止频率 ω_c 、机电时间常数 T_m 、大角度调转时间 t_d 、低速平稳跟踪性能和阵风误差 σ_2 等都有关系。

1.1 转动惯量 J_L 与系统截止频率 ω_c 的关系

截止频率 ω_c 与负载转动惯量 J_L 的关系式为

$$\omega_c = \sqrt{\frac{M_{FS}}{J_L}} \quad (1)$$

从(1)式看出, J_L 增大,则 ω_c 减小。若系统的期望特性确定后, ω_c 减小,则系统的跟踪精度 θ_{rms} 下降,过渡过程时间 t_s 加长。

1.2 转动惯量 J_L 与机电时间常数 T_m 的关系

执行电机的机电时间常数 T_m 的计算公式为

$$T_m = \frac{(J_m + J_L)R_a}{C_m C_e} \quad (2)$$

从(2)式可以看出,当执行电机的转动惯量 J_m 、电枢回路电阻 R_a 、执行电机的力矩系数 C_m 等参数一定时, J_L 变大,则 T_m 增大。若 T_m 加大,系统的相角裕量减少,过渡过程超调量加大。

1.3 转动惯量 J_L 与大角度调转时间 t_d 的关系

调转时间 t_d 由调转过程的起动段时间 t_1 、恒速段时间 t_2 和制动段时间 t_3 合成,即 $t_d = t_1 + t_2 + t_3$ 。令 $t_3 = t_1$,则 t_1 为

$$\begin{cases} t_1 = \omega_{max} / \epsilon_{max} \\ \epsilon_{max} = M_{am} / J_L \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式看出,当最大调转角速度 ω_{max} 、角加速度 ϵ_{max} 及执行电机输出的最大电磁力矩 M_{am} 一定时,

J_L 增加, ϵ_{max} 减小, t_1 增加,从而使大角度调转时间 t_d 加长。

1.4 动惯量 J_L 与低速平稳性能的关系

伺服系统在跟踪低速目标时,将产生不均匀的“跳动”,即“步进”或“爬行”现象,爬行跟踪的角加速度 ϵ_L 为

$$\epsilon_L = \frac{M_{FS} - M_{F1}}{J_L} \quad (4)$$

从(4)式看出,当静摩擦力矩 M_{FS} 和库仑摩擦力矩 M_{F1} 一定时, J_L 加大, ϵ_L 则减小,因而改善了系统低速平稳跟踪性能,扩大了系统的调速范围。

1.5 转动惯量 J_L 与阵风误差 σ_2 的关系

由阵风力矩 M_{dy} 产生的误差 σ_2 为

$$\sigma_2 = \frac{M_{dy}}{J_L \omega_c \omega_{cr}} \quad (5)$$

从(5)式看出,当阵风力矩 M_{dy} 、系统截止频率 ω_c 及速度回路截止频率 ω_{cr} 一定时, J_L 增加, σ_2 减小。

从以上5点分析看出,转动惯量 J_L 增大时,将会使系统跟踪误差 θ_{rms} 和稳定裕量减小,过渡过程超调量加大、过渡过程时间 t_s 增长及大角度调转时间 t_d 增加。这些都不利于提高系统性能。但 J_L 增大后,却改善了低速跟踪性能,扩大了系统的调速范围,并能减小阵风误差 σ_2 和提高系统跟踪精度 θ_{rms} 。这有利于提高系统性能。不过,在设计伺服系统时,实现系统的调速范围是依靠选择执行元件和速度回路的设计来保证的;减小阵风误差 σ_2 依靠增大 ω_c 和 ω_{cr} 值来保证。另外,在选择执行元件和计算惯性力矩 M_J 时,也希望 J_L 小一些。综上所述,虽然 J_L 小一些好,但不是越小越好,因为在 J_L 和执行元件的转动惯量 J_m 之间还存在着转动惯量匹配问题。

1.6 转动惯量的匹配

J_m 和 J_L 的匹配用匹配系数 λ 表示。 λ 系数为

$$\lambda = J_L / J_m \quad (6)$$

采用的执行元件不同,匹配系数 λ 也不同。采用低速力矩电机时, $\lambda > 1$; 采用高速伺服电机时, $\lambda = 1$ 。

2 结构谐振频率与伺服系统性能的关系

结构谐振频率用 f_L (Hz) 或用符号 $\omega_L (= 2\pi f_L)$

(rad/s)表示。伺服机械结构及其负载的结构谐振特性包含结构谐振频率 ω_L 和相对阻尼系数 ξ_L 两个参量。结构谐振特性(ω_L, ξ_L)对伺服系统性能的限制体现在对伺服系统带宽 $\omega_B (= 2\pi\beta_n)$ 和速度回路截止频率 ω_c 两个方面的限制,但最终都归结到对系统截止频率 ω_c 的限制。这样,就体现了结构谐振频率 ω_L 与系统的相角裕量、跟踪误差 θ_{rm} 和过渡过程品质之间的关系。

2.1 结构谐振频率对伺服带宽的限制

结构谐振频率 ω_L 对伺服带宽 $\omega_B (= 2\pi\beta_n)$ 的限制为

$$\omega_B \leq 2\xi_L \omega_L \quad (7)$$

式中,相对阻尼系数 ξ_L 一般设计在0.1~0.35范围内,取 $\xi_L = 0.25$,则(7)式简化为

$$\omega_B \leq (1/2)\omega_L \quad (8)$$

伺服带宽 ω_B 对伺服系统性能的限制通过限制系统截止频率 ω_c 来体现。 ω_B 和 ω_c 的关系通常为

$$\omega_B = (1/2)\omega_c \quad (9)$$

由(8)和(9)式可得到

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

因此,对高性能的光电跟踪设备而言,为了满足较高的跟踪性能要求,需要其跟踪座与安装基座具有较高的扭转谐振频率。

2.2 结构谐振频率对速度回路截止频率的限制

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

$$\omega_c \leq (1/2)\omega_L \quad (11)$$

实践证明, ω_c 可由下式确定:

$$\omega_c \leq (4/5)\omega_L \quad (12)$$

另外, ω_c 对 ω_c 的限制式为^[1]

$$\omega_c = (1/3)\omega_c \quad (13)$$

(12)和(13)式可求得 ω_L 对 ω_c 的限制条件:

$$\omega_c \leq \frac{1}{3} \times \frac{4}{5} \omega_L \leq \frac{4}{15} \omega_L \leq \frac{1}{4} \omega_L \quad (14)$$

从(10)及(14)式看出,虽然结构谐振频率 ω_L 从两方面限制系统截止频率 ω_c ,但都得到相同的结果。与参考文献[2]指出的限制条件 $\omega_c \leq (1/8 \sim 1/10)\omega_L$ 相比,这个结果对设计伺服系统更为有利。

3 摩擦力矩与伺服系统性能的关系

摩擦力矩分为静态摩擦力矩 M_{FS} 、库仑摩擦力矩 M_{F1} 和速度摩擦力矩 M_{F2} 等^[3]。摩擦力矩除了是系统负载力矩的一个分量外,它对系统性能的影响主要有5点:

(1) 摩擦力矩是影响系统截止频率的因素

截止频率 ω_c 与静摩擦力矩 M_{FS} 的关系式可按(1)式进行分析。当 J_L 一定时, ω_c 与 M_{FS} 的平方根成正比。对于伺服系统性能来说, ω_c 大一些好,这样能提高系统的跟踪精度,改善过渡过程品质。

(2) 摩擦力矩是产生定值静态误差的因素

静摩擦力矩 M_{FS} 产生的定值静态误差分量 Δ_l 为

$$\Delta_l = M_{FS}/K_{t1} \quad (15)$$

从(15)式看出,当系统的静态力矩误差常数 K_{t1} 一定时, Δ_l 与静摩擦力矩 M_{FS} 成正比。

(3) 摩擦力矩是影响低速爬行跟踪停断时间的因素

低速爬行跟踪停断时间 Δ_{l1} 为

$$\Delta_{l1} \approx \sqrt{\frac{M_{FS}T_{rs}}{K_{t1}\omega_{min}}} \quad (16)$$

从(16)式看出,当系统的等效时间常数(从执行电机轴到系统误差角) T_{rs} 、低速跟踪角速度 ω_{min} 和静态力矩误差常数 K_{t1} 一定时,其时间 Δ_{l1} 与静摩擦力矩 M_{FS} 的平方根成正比; Δ_{l1} 加长,则低速跟踪性能差,调速范围下降。

(4) 摩擦力矩影响低速跟踪角速度大小

静摩擦力矩 M_{FS} 只在跟踪角速度为零时才出现,一旦指向器开始转动, M_{FS} 立即变为库仑摩擦力矩 M_{F1} 。在低速“步进”跟踪状态中,指向器再次转动的初始角加速度 ϵ_{m0} 为

$$\epsilon_{m0} = M_{FS} - M_{F1}/J_L \quad (17)$$

当 M_{FS} 和 M_{F1} 之差值增大时,低速跟踪不平稳现象严重,跟踪时的误差增加。

(5) 摩擦力矩是产生跟踪误差的因素

由库仑摩擦力矩 M_{F1} 和速度摩擦力矩 M_{F2} 产生的跟踪误差 Δ_3 为

$$\Delta_3 = M_{F1} + M_{F2}/K_{t2} \quad (18)$$

从(18)式看出,当动态力矩误差常数 K_{t1} 一定时, Δ_3 与 M_{F1} 和 M_{F2} 之和成正比。

综上所述,摩擦力矩对系统性能的影响主要表

现在跟踪误差和调速范围(低速跟踪不平稳)两方面,对精度影响不大,调速范围由速度回路设计保证。总之,摩擦力矩小一些较好,但不是越小越好;摩擦力矩太小(比如采用静压液浮轴承)时,一般采用减小传动空回的措施。

4 消除或减小机械谐振的措施

为了消除或减小机械谐振对系统品质的影响,可考虑主要从以下几个方面采取措施^[4~5]:

(1) 提高伺服机械结构固有频率

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、大扭矩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) 加大机械阻尼

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) 采用串联补偿

在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,即可消除机械谐振对系统的影响。

(4) 采用综合速度反馈

在小摩擦系统中,消除谐振可以由综合测速发电机电压与正比于电动机电流的电压来实现。值得注意的是,实际系统可能不止一个谐振频率和谐振

峰值,系统的参数也可能变化,谐振频率也不能保持恒定,加上传动装置存在间歇、干摩擦等非线性因素,使得实际的机械谐振特性十分复杂。

(5) 克服机械谐振的状态反馈设计

对于转动惯量大的伺服系统,机械谐振频率低,严重影响系统获得应有的通频带,加上风扰力矩严重,使系统跟踪运动的状态更为恶劣。若对系统采取全状态反馈,可以任意配置系统的极点,特别是针对机械谐振这一对复极点,进行阻尼重新配置,可以有效克服机械谐振现象的出现。

5 结束语

伺服机械结构的负载特性是伺服系统设计的先决条件。优良的伺服机械结构性能有:结构谐振频率高、负载转动惯量小、传动空回小、传动精度高及摩擦力矩小。对于设计一个响应速度快和跟踪精度高的光电跟踪伺服系统,伺服机械结构性能的优劣是至关重要的。

参考文献:

- [1] George Biernson. Relation between structural Compliance and allowable friction in a servomechanism [J]. IEEE Transactions on Automatic control, 1965, AC-10:59-61.
- [2] 曾乐生,施妙和. 随动系统[M]. 北京:北京工业学院出版社,1988.
- [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, (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] 吴晗平. 动态多目标自动识别及自适应多波门跟踪[J]. 光学精密工程, 1996, (2):53-61.