

光电跟踪系统固有特性灵敏度分析

王 昱¹, 王小齐¹, 吴 佳², 柳华勃³, 吴英春¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210018;

3. 西安邮电大学理学院, 陕西 西安 710121)

摘 要:系统的固有不确定性导致其精确模型的建立难以实现。针对光电跟踪系统的结构不确定性建立其物理模型, 得到该系统的传递函数, 在此基础上应用一阶灵敏度函数法推导出系统灵敏度函数矩阵, 并通过轨迹灵敏度法和摄动法获取系统灵敏度曲线和数值。灵敏度的轨迹表明电机电阻对速度输出影响最大; 电动机-传动链-负载的等效转动惯量 J_m 对速度输出影响也相对较大; 电机电感 L 对速度的输出的影响最小。电动机-传动链-负载的等效转动惯量 J_m 对加速度的影响最大, 其次是电机电阻, 电机电感对加速度几乎没有影响。利用摄动法对速度灵敏度进行了验证, 结论与轨迹灵敏度法相同。

关键词:光电系统; 灵敏度; 轨迹灵敏度法; 摄动法

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.09.019

Sensitivity analysis of inherent characteristics in photoelectric tracking system

WANG Yu¹, WANG Xiao-qi¹, WU Jia², LIU Hua-bo³, WU Ying-chun¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210018, China;

3. School of Science, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: It is difficult to set up a precise model because of the inherent uncertainties of a photoelectric tracking system. The physical model of inherent characteristics was built for structural uncertainties of the photoelectric tracking system, and the transfer function of the system was obtained. On this basis, the sensitivity function matrix can be derived by first-order sensitivity function method, and the sensitivity curve and value can also be gotten by trajectory sensitivity method and perturbation method. The sensitivity track shows that the resistance of motor has the biggest influence on speed; the equivalent rotational inertia J_m of motor-transmission chain-load can also affect the speed; the inductance L of motor has minimal effect on speed. The equivalent rotational inertia J_m of motor-transmission chain-load has the biggest influence on acceleration; the second is the resistance of motor; the inductance L of motor has almost no effect on acceleration. Speed sensitivity is verified by perturbation method, and the obtained conclusion is the same as trajectory sensitivity method.

Key words: photoelectric system; sensitivity; trajectory sensitivity method; perturbation method

作者简介:王 昱(1990-), 女, 在读研究生, 助理工程师, 主要研究方向为光电跟踪系统伺服控制技术。E-mail: 289815648@qq.com

收稿日期: 2015-12-04; **修订日期:** 2016-01-05

1 引言

光电系统在飞机、舰船、坦克等具有动态特性的环境下工作时,都必须具有瞄准线稳定功能或图像稳定功能,来实现对目标的精确瞄准与跟踪,进而实现激光武器对目标的精确打击。任何系统中都存在着不同种类的不确定性,其中既包括结构不确定性,又包括非结构不确定性,想要精确地建立一个光电系统的精确模型是很难实现的。本文主要研究结构不确定性,这种不确定性严重影响到系统的性能以及控制器的设计,因此研究系统不确定性参数对系统的影响具有着重要的意义。本文采用轨迹灵敏度法^[1-2]和摄动法^[3-4]研究了光电跟踪系统固有组成部分中三个不确定性参数 L, R, J_m 三个参数对系统性能的影响。

2 灵敏度理论

系统的参数灵敏度是系统的参数变化对系统的动态性能的影响,即参数变化对系统的响应时间、超调量、稳定裕度等表征系统动态性能的影响。一般用灵敏度函数来计算灵敏度。计算灵敏度理论上有三种方法^[5]:①直接法;②高阶灵敏度函数法;③一阶灵敏度函数法。其中,一阶灵敏度函数法是工程中最常用的灵敏度计算方法。本文采用一阶灵敏度函数法构建光电系统的灵敏度矩阵方程。

3 光电跟踪系统固有特性模型

光电跟踪系统结构^[6-8]一般如图1所示。图1中,视频跟踪通道由大气传输、视频探测器、视频跟踪器、数据传输四部分组成。力矩电机-传动链-负载为光电跟踪系统固有组成部分,其简化结构如图2所示。

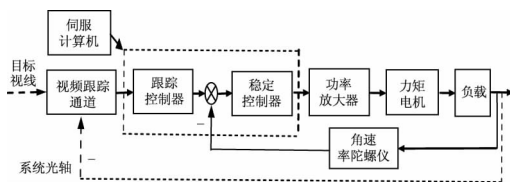


图1 光电跟踪系统原理框图

Fig. 1 The schematic diagram of photoelectric tracking system

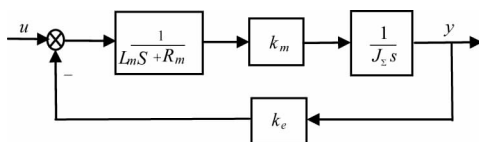


图2 光电跟踪系统固有特性结构图

Fig. 2 Structure chart of inherent characters in photoelectric tracking system

图2中, L_m 为电枢绕组等效电感,一般存在 $\pm 30\%$ 以内的误差; R_m 表示电枢绕组直流等效电阻,随温度而变化,一般存在 $\pm 15\%$ 以内的误差; k_m 表示电磁转矩系数^[9],一般可由电动机的峰值堵转力矩和峰值堵转电流计算得出; k_e 表示反电动势系数,数值与 k_m 相等; J_z 表示电动机-传动链-负载对应的等效转动惯量,表示为:

$$J_z = J_m + (1 + \alpha)J_p / i^2 \eta \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (1)$$

式中, J_m 表示电动机转子的转动惯量; J_p 表示负载的转动惯量; α 表示经验系数,是针对传动链和负载转动惯量估计误差的修正裕量,一般取值为0.3。由于通常光电跟踪系统中的被控对象回转速度较低,且对系统体积和质量的要求并不严格,因此可考虑采用力矩电机实现单轴传动。则传动链的传动比和传动效率近似满足关系式: $i = 1, \eta = 1$ 。此时,式(1)可表示为:

$$J_z = J_m + (1 + \alpha)J_p \quad (2)$$

因为结构建模、加工装配以及后期配平等原因, J_z 的实际值与设计值的误差范围为 $\pm 20\%$ 。

光电跟踪系统固有特性是控制系统设计^[10]的基础,其不确定性在一定程度上影响系统的性能,应予以建模、分析。图2所示光电跟踪系统固有特性传递函数为:

$$G(s) = \frac{k_m}{L_m J_z s^2 + R_m J_z s + k_e k_m} \quad (3)$$

由于构建高阶灵敏度函数计算灵敏度复杂低效,所以基于一阶灵敏度函数的近似算法最为实用。令高阶灵敏度函数中的阶数为1,即可得到一阶灵敏度函数的求解公式。这也是工程中最常用的灵敏度的求法。

4 固有特性灵敏度函数

式(3)中的三个不确定性参数,分别简记为: $L_m = L, R_m = R, J_z = J$,则式(3)可表示为:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{k_m}{JLs^2 + JRs + k_m k_e}$$

等价于:

$$JLs^2 Y(s) + JRs Y(s) + k_m k_e Y(s) = k_m U(s)$$

即:

$$JL\ddot{y}(t) + JR\dot{y}(t) + k_m k_e y(t) = k_m u(t)$$

其中, $\ddot{y}(t)$ 为跃度; $\dot{y}(t)$ 为加速度; $y(t)$ 为速度; $u(t)$ 为输入电压。令 $y_1 = y(t), y_2 = \dot{y}(t), u =$

$u(t)$, 则有^[11]:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = -\frac{k_m k_e}{JL} y_1 - \frac{R}{L} y_2 + \frac{k_m}{JL} u \end{cases}$$

$$\frac{\partial \dot{y}_1}{\partial L} = \frac{\partial y_2}{\partial L}$$

$$\frac{\partial \dot{y}_1}{\partial R} = \frac{\partial y_2}{\partial R}$$

$$\frac{\partial \dot{y}_1}{\partial J} = \frac{\partial y_2}{\partial J}$$

$$\frac{\partial \dot{y}_2}{\partial L} = -\frac{k_m k_e}{JL} \frac{\partial y_1}{\partial L} - \frac{R}{L} \frac{\partial y_2}{\partial L} + \frac{k_m k_e}{JL^2} y_1 + \frac{R}{L^2} y_2 - \frac{k_m}{JL^2} u$$

$$\frac{\partial \dot{y}_2}{\partial R} = -\frac{k_m k_e}{JL} \frac{\partial y_1}{\partial R} - \frac{R}{L} \frac{\partial y_2}{\partial R} - \frac{1}{L} y_2$$

$$\frac{\partial \dot{y}_2}{\partial J} = -\frac{k_m k_e}{JL} \frac{\partial y_1}{\partial J} - \frac{R}{L} \frac{\partial y_2}{\partial J} + \frac{k_m k_e}{J^2 L} y_1 - \frac{k_m}{J^2 L} u$$

设:

$$Z = \left[\frac{\partial y_1}{\partial L} \quad \frac{\partial y_1}{\partial R} \quad \frac{\partial y_1}{\partial J} \quad \frac{\partial y_2}{\partial L} \quad \frac{\partial y_2}{\partial R} \quad \frac{\partial y_2}{\partial J} \quad y_1 \quad y_2 \right]^T$$

则有:

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_m k_e}{JL} & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 & \frac{k_m k_e}{JL^2} & \frac{R}{L^2} \\ 0 & -\frac{k_m k_e}{JL} & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & -\frac{k_m k_e}{JL} & 0 & 0 & -\frac{R}{L} & \frac{k_m k_e}{J^2 L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_m k_e}{JL} & -\frac{R}{L} & 0 \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{k_m}{JL^2} \\ 0 \\ -\frac{k_m}{J^2 L} \\ 0 \\ \frac{k_m}{JL} \end{bmatrix} u \quad (4)$$

5 灵敏度分析

5.1 轨迹灵敏度分析

轨迹灵敏度反映系统中某一参数或结构的变化对系统动态轨迹变化的影响程度。依据已知参数的动态响应轨迹及轨迹灵敏度可以求得参数变化时系统的动态轨迹。轨迹灵敏度是建立在光电系统数学模型基础上的,其计算模型一般为一组变系数的微分方程组根据光电系统灵敏度函数矩阵,通过 matlab 中的 ode45() (四阶五级 Runge-Kutta 算法)^[12] 函数解矩阵方程(4)可以得到如下结果:

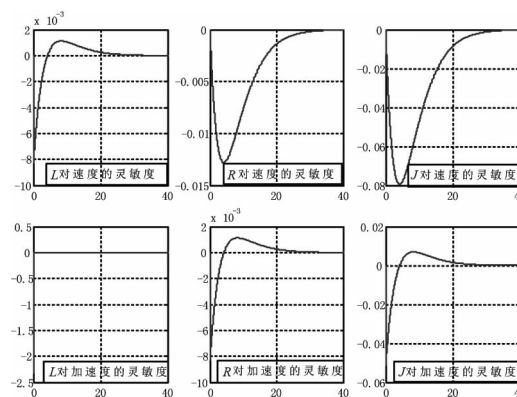


图3 灵敏度函数矩阵的解曲线

Fig.3 The answer curve of sensitivity function matrix

1) 对速度而言:由图3可以看出,电机电感 L 在轨迹的初始阶段是同向的,影响程度最小,随着时间的推移,且趋于零。电机电阻 R 和电动机-传动链-负载的等效转动惯量 J 在轨迹的初始阶段的影响是反向的,其中,电机电阻 R 在轨迹初期的影响程度较大,其次是总转动惯量 J ,且随着时间推移明显减弱。

2) 对加速度而言:由图3可以看出,电机电感 L 对加速度几乎没有影响。电机电阻 R 和电动机-传动链-负载的等效转动惯量 J 在轨迹的初始阶段的影响是同向的,其中,转动惯量 J 在轨迹初期的影响程度较大,随着逐渐推移明显减弱,最后趋于0。

5.2 摄动法灵敏度分析

摄动法灵敏度分析,即用摄动法分析参数的灵敏度,将某一参数在其参考取值范围内按一定的步长调整(一般按参考范围的10%变动),其他的参数固定不变,观察被控量或者系统输出的变化,从而得到输出关于该参数的灵敏度^[13-14]。

利用摄动法分析速度对参数的灵敏度,可得到如下结果:

1) 由表1可以看出,电机电阻的变化对电机转速影响最大。当电阻从 12.1Ω 下降20%时,

电机转速增大了52.1%;当电阻增大时,电机转速的下降并不是特别的明显,当电阻从 12.1Ω 上升20%时,电机转速只减小了19.46%。并且当电阻继续增大时,电机转速有增大的趋势。

2) 由表2可以看出,电机电感的变化对电机转速影响相对较小。当电感从 0.0159 H 下降20%时,电机转速只增大了0.97%;当电感从 0.0159 H 时上升20%时,电机转速只减小了0.96%。

表1 速度对电阻 R 的灵敏度Tab.1 Speed sensitivity for resistance R

R/Ω	9.68(-20%)	10.89(-10%)	12.1	13.31(+10%)	14.5(+20%)	15.7(+30%)
y	7.6125	6.1089	5.0049	4.1710	4.0307	4.0330
Δy	2.6076	1.104	0	-0.8339	-0.9742	-0.9719

表2 速度对电感 L 的灵敏度Tab.2 Speed sensitivity for inductance L

L/H	0.01272(-20%)	0.01431(-10%)	0.0159	0.01749(+10%)	0.01908(+20%)	0.02067(+30%)
y	5.0533	5.0290	5.0049	4.9809	4.9571	4.9334
Δy	0.0484	0.0241	0	-0.024	-0.0478	-0.0715

表3 速度对转动惯量 J_m 的灵敏度Tab.3 Speed Sensitivity for rotational inertia J_m

$J_m/(kg \cdot m^2)$	1.5632(-20%)	1.7586(-10%)	1.954	2.1494(+10%)	2.3448(+20%)	2.5402(+30%)
y	6.1816	5.5314	5.0049	4.5699	4.2043	4.0290
Δy	1.1767	0.5265	0	-0.435	-0.8006	-0.9759

3)由表3可以看出,电动机-传动链-负载的等效转动惯量 J_m 对电机转速有较大的影响。

当 J_m 从 $1.1954 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 下降20%时,电机转速增大了23.5%;当 J_m 从 $1.1954 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 上升20%时,电机转速减小了16%。

本节所得结论和5.1节所得结论是一致的。在不同的时间段内,不同参数对轨迹的灵敏度不同,对轨迹的影响也有着不同的特点,这就要求我们在做试验的时候要联动的处理各个参数,而不能孤立去调整某个参数。根据图1可以得到灵敏度的最大值,从而确定光电系统的不确定性界,这是设计鲁棒控制器的一个必要条件。同样,灵敏度的最大值也可以用来验证设计出的鲁棒控制器是否满足要求,只要在灵敏度最大值处系统满足鲁棒性,那么系统在整个不确定性范围内都是满足鲁棒性的。由于电机电阻对系统的影响较大,而电感对系统的影响较小,故而在电机制造过程中就应该多注意电机本体电阻的精度,而电感的精度可以适当放宽一些。这对电机设计以及制造人员具有一定的参考意义。

6 结论

针对光电系统跟踪系统进行了说明,简要介绍了灵敏度理论,建立了光电跟踪系统固有特性模型,得到了系统灵敏度函数矩阵方程,利用轨迹灵敏度分析法和摄动法分析了光电跟踪系统固有参数对系统的灵敏度,有助于电机制造以及鲁棒控制器的设计及验证。

参考文献:

- [1] SONG Yongchao. Research on reactive power and voltage control strategies of power system based on the sensitivity analysis[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
宋永超. 基于灵敏度分析的电力系统无功电压调控策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [2] ZENG Chongqun. Research on dynamic simulation and parameter sensitivity of the generator active control system [D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
曾崇群. 发电机有功控制系统动态仿真与参数灵敏度分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [3] CAI Guanglin, ZHANG Yongjun, YU Tao, et al. Prevention control of the static voltage stability based on unified sensitivity[J]. High Voltage Technology, 2008, 34(4): 748-752. (in Chinese)
蔡广林, 张勇军, 余涛, 等. 基于统一灵敏度法的静态电压稳定预防控制[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 748-752.
- [4] ZHAO Yuan. Research on reliability assessment of bulk power system based on sensitivity analysis and a corrective model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
赵渊. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析及其校正措施模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [5] HAN Linsheng, LI Xiangyang, YAN Dakao. Several mathematical methods of sensitivity analysis[J]. China Water Transport, 2008, 8(4): 177-178. (in Chinese)

- 韩林生,李向阳,严大考. 浅析灵敏度分析的几种数学方法[J]. 中国水运,2008,8(4):177-178.
- [6] YANG Xiulin, LU Peiguo, LIU Xiaoqiang, et al. Simulation and analysis of the composite axis track control system for shipborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2015,45(8):943-947. (in Chinese)
- 杨修林,陆培国,刘小强,等. 舰载激光武器复合轴跟踪控制系统仿真分析[J]. 激光与红外,2015,45(8):943-947.
- [7] YAN Ming, DU Pei, WANG Huilin, et al. Ground multi-target positioning algorithm for airborne optoelectronic system[J]. Journal of Applied Optics, 2012,33(4):717-720. (in Chinese)
- 闫明,杜佩,王惠林,等. 机载光电系统的地面多目标定位算法[J]. 应用光学,2012,33(4):717-720.
- [8] JIANG Feng. Integration technology of stabilized electro-optical sight system[J]. Journal of Applied Optics. 2007. 28(2):156-158. (in Chinese)
- 姜峰. 光电稳瞄系统装调的关键技术[J]. 应用光学,2007,28(2):156-158.
- [9] HU Qiansheng, HU Minqiang. Electromechanics [M]. Beijing:China Electric Power Press,2009. (in Chinese)
- 胡虔生,胡敏强. 电机学[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [10] JIN Gangshi, ZHANG Junrong, et al. Design of the DC motor controller based on morder control theory[J]. Laser & Infrared,2009,39(10):1082-1085. (in Chinese)
- 金刚石,张俊蓉,等. 基于现代控制理论的直流电机控制器的设计[J]. 激光与红外,2009,39(10):1082-1085.
- [11] ZHENG Dazhong. Linear system theory[M]. 2nd ed. Beijing:Tsinghua University Press,2002. (in Chinese)
- 郑大钟. 线性系统理论[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2002.
- [12] XUE Dingyu. Computer aided control systems design using MATLAB language [M]. 3rd. ed. Beijing: Tsinghua University Press,2012. (in Chinese)
- 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计—MATLAB 语言与应用[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2012.
- [13] Maria Marta Seron, Graham C. Goodwin Sensitivity limitations in nonlinear feedback control[D]. The University of Newcastle Australia,1996.
- [14] Cruz J B, Perkins W R. A new approach to the sensitivity problem in multivariable feedback system design [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1964, AC - 9(3):216-223.