

浅析大惯量负载对机电舵系统的影响

徐方洁, 李四保, 谢劲松
(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 随着导弹飞行速度的提高, 弹体姿态稳定所需的操纵力矩加大, 舵面气动加热效应加剧, 舵面的尺寸和惯量势必增加。在电机、传动机构与控制算法确定的前提下, 舵面惯量对机电舵系统具有何种影响, 成为提高机电舵系统控制要求的关键问题。在搭建的电机—传动机构—负载的三质量模型基础上, 从理论及仿真上进行了惯量负载对舵系统的影响分析, 并在某机电舵系统上进行了试验验证, 为研究大惯量负载机电舵系统提供了理论依据。

关键词: 大惯量负载; 机电舵系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8110 (2014) 01-0052-06

Influence of Electromechanical Fin Actuation System Under Heavy Inertial Load

XU Fang-jie, LI Si-bao, XIE Jin-song
(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: When increasing the missile flight speed, it needs more steering torque to maintain the stability of body attitude. Following with that, the aerodynamic heating effect intensifies, so the inertial and size of the rudder must be increased to keep the balance of the attitude. The inertial of the rudder has great effect on the EMA on the premise that the motor, driving mechanism and the load are selected, which becomes the key problem of improving EMA control requirement. Based on the the motor-driving mechanism-load three-mass model, the paper analyses the effect that heavy inertial load has on the EMFAS in the aspect of theory and simulation, and has an experiment on the system, which provides academic basis for electromechanical fin actuation system under heavy inertial load.

Key words: Heavy inertial load; Electromechanical actuation

0 引言

舵系统是导弹控制系统的执行机构, 其性能的好坏直接影响导弹的性能。随着导弹飞行速度进一步提高, 舵系统在高空稀薄空气下需要进行大舵偏机动, 而在低空需要克服强烈的气动加热和大气动扭矩, 舵面负载转动惯量势必增加, 这对舵系统提出了更高的控制要求。负载转动惯量的增加对系统动态品质及稳态性能影响明显, 严重时诱发系统产生极限环振荡, 因此有必要研究大惯量负载对机电舵系统的影响, 以提高舵系统自身的控制特性, 满足控制总体需求。本文研究了大惯量负载机电舵系统的组成及基本原理, 建立了电机—传动机构—负载的三质量模型, 分别从理论及仿真二方面分析了惯量负载对舵系统的

影响, 通过试验验证了模型建立的有效性, 理论分析与仿真结果的正确性。

1 大惯量负载机电舵系统组成及基本原理

某机电舵系统由舵机控制器、功率驱动电路、永磁无刷直流电机 (BLDCM)、传动机构和反馈电位计等五大部分组成, 结构组成如图 1 所示。其中传动机构由一级齿轮副、一级滚珠丝杠副、连杆及输出轴组成。

机电舵系统的工作过程如下: 舵机正常工作时, 舵机控制器接受制导计算机给定的舵机输出轴偏转指令, 驱动伺服电机带动舵面偏转, 同时舵机控制器实时采集实际的舵机输出轴角度, 保证舵面在一定的响应时间内以一定的精度趋近给

收稿日期: 2013-03-18; 修订日期: 2014-06-12。

作者简介: 徐方洁 (1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事伺服系统方面的研究。

定角度值。控制器采用高速 PWM 调速模式，通过调整 PWM 的脉冲宽度，实现对输出电压平均值的控制，从而达到通过控制电机的电枢电压来实现舵机调速。当实际舵机输出轴偏角与舵指令间存在误差时，控制器产生 PWM 信号，PWM 信号经过驱动器进行功率放大后，驱动伺服电机转动。

伺服电机输出的力矩通过传动机构到达舵机输出轴，带动舵面按照输入指令角度偏转；角度误差为正时，给出伺服电机正转的信号，舵面向正方向转动；角度误差为负时，给出伺服电机反转的信号，舵面向负方向转动，从而不断地调整角度，形成位置闭环系统。

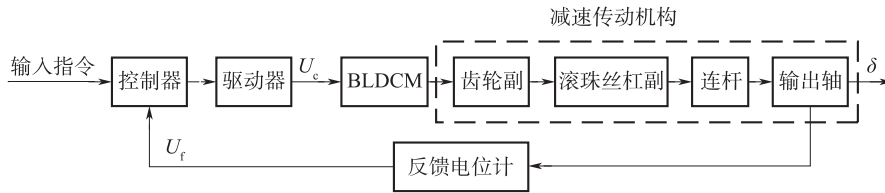


图 1 机电舵系统组成框图

Fig. 1 The scheme of EMA system

2 大惯量负载机电舵系统模型搭建

在大惯量负载机电舵系统中，我们关注系统的内在控制特性，特别是稳态附近的小信号特性，因此不能将电机与负载看成一体，否则就是一个简单的刚体运动。对于实际系统，即便电机与负载是直接耦合的，但传动本质上是弹性的，在电机驱动力矩的作用下，传动机构会产生某种程度的弹性变形。对于加速度要求大，快速性和精度要求高的系统或是转动惯量大、性能要求高的系统，弹性变形不能忽略。考虑传动机构的弹性变形，将舵系统广义的被控对象视为如图 2 所示的由电机、传动机构及负载还有连接三者间的等效刚度所组成的三质量系统，其中假设静摩擦及库仑摩擦均忽略不计^[1]。

构等效轴的转动惯量， J_L 为负载的转动惯量， K_a 为传动机构等效轴的扭转刚度系数， K_L 为舵机输出轴与舵面连接轴的扭转刚度系数，在机电舵系统中，一般将舵反馈进行滤波、微分后进行前馈的速度补偿，位置控制器采用比例控制器，以形成双环控制，以此搭建的仿真模型如图 3 所示：

图中， K_e 为反电势系数， K_T 为电机转矩系数， α 为反馈电位计反馈电压系数， C_a 为传动机构弹性轴阻尼系数， 2Δ 为间隙宽度， b_a 为传动机构等效轴黏性阻尼系数， $W_s(s)$ 为 PWM 控制与变换器的数学模型， b_L 为负载黏性阻尼系数， C_L 为舵机输出轴与负载舵面连接轴的阻尼系数， N 为减速比，各参数取值如表 1 所示。

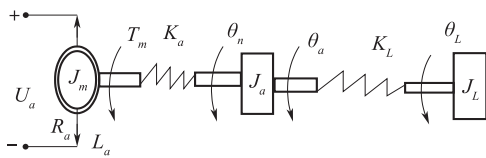


图 2 电机 - 传动机构 - 负载三质量机电舵系统模型

Fig. 2 The three quality model of EMA on motor, driving mechanism and load

其中， U_a 为电机某两相导通时的直流母线电压， R_a 和 L_a 分别为电机绕组线电阻与等效线电感， T_m 为电机的输出转矩， θ_n 为电机经过传动机构减速器的输出转角， θ_a 为舵机输出轴转角， θ_L 为舵面负载的输出转角， J_m 为电机的转动惯量， J_a 为传动机

表 1 机电舵系统各参数取值

Tab. 1 The value of all the parameters in EMA system

参数名称	取值
电机绕组线电阻	$R_a = 0.5\Omega$
电机绕组等效线电感	$L_a = 0.00072H$
电机转矩系数	$K_T = 0.07776N \cdot m/A$
线反电势系数	$K_e = 0.07776V \cdot s/rad$
间隙宽度	0.2°
传动机构等效轴转动惯量	$J_a = 0.042kg \cdot m^2$
传动机构弹性轴阻尼系数	$C_a = 0.25$
舵机输出轴与负载舵面连接轴的阻尼系数	$C_L = 0.02$
减速比	$N = 120$
反馈电位计反馈电压系数	$\alpha = 0.5$

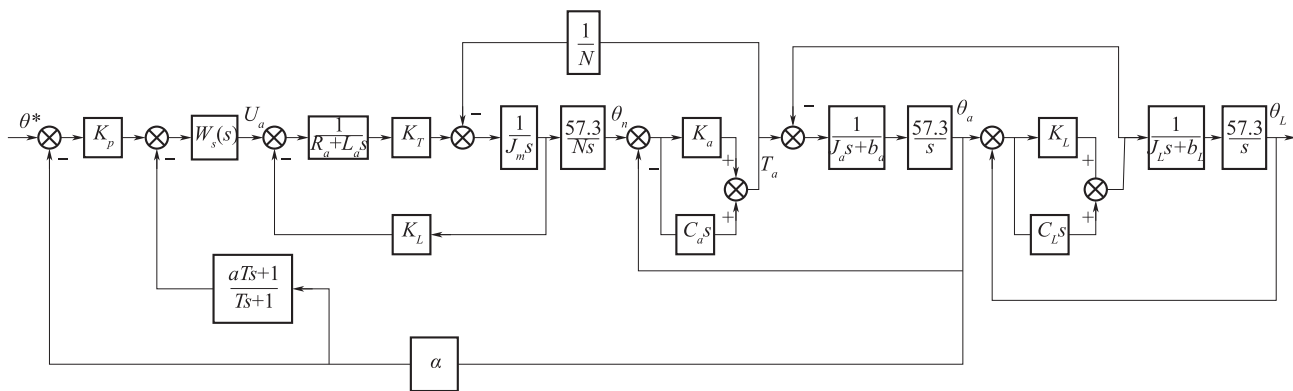


图3 电机-传动机构-负载的机电舵系统建模

Fig. 3 The model of EMA on motor, driving mechanism and load

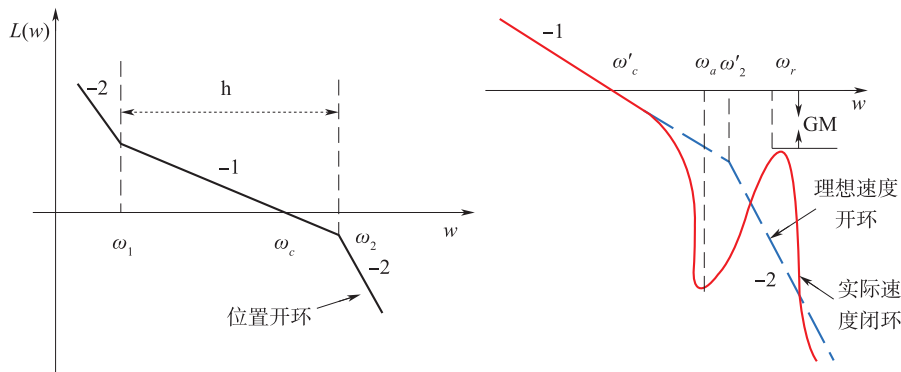
3 理论分析及仿真验证

3.1 大惯量负载对机电舵系统的理论分析

根据控制系统设计，一般位置环在频率响应范围内希望得到如图4(a)所示的开环波特图，其中 ω_2 为位置开环过零分贝线的下限转折频率，它也是速度环开环截止频率 ω'_c ，即 $\omega'_c = \omega_2$ 。由于性能指标的要求，一般速度环过零分贝线的下限转折频率 ω'_2 接近于高频谐振点 ω_r 与反谐振点 ω_a 。当速度环截止频率 ω'_c 不变情况下，高频反谐振点 ω_a 使速度环中频段下限频率 ω'_2 减小，则在整定速度环时，速度环开环截止频率 ω'_c 也减小，

造成速度环相位裕量下降，进而影响位置环开环截止频率 ω_c ，舵系统快速性下降，相对稳定性降低，如图4(b)所示。同时，高频谐振峰值接近零分贝线时，速度环增益裕量下降，一旦越过零分贝线速度闭环将产生等幅振荡。

负载转动惯量的增加，使高频谐振点及反谐振点向复平面左侧移动，谐振峰值越接近零分贝线，将造成更大程度的幅值裕度削减，反谐振频率的降低，造成相位裕度的减小，故负载转动惯量的增加，对于双环舵系统而言，对速度环的稳定性影响更大^[2]。



(a) 负载转动惯量对位置环的影响示意图

(b) 负载转动惯量对速度环的影响示意图

图4 负载转动惯量对位置环和速度环的影响示意图

Fig. 4 The scheme of the load inertial's impact on position loop and speed loop

3.2 大惯量负载对机电舵系统的描述函数分析法

非线性特性的描述函数法是非线性部件频率特性的一种推广，用来分析在无外作用的情况下，非线性系统的稳定性和自振荡问题，并且不受系统阶次的限制，一般都能给出满意的结果，因而

获得了广泛的应用。

文中假设机电舵系统的电机、传动机构及控制器参数已经确定，研究负载转动惯量不同对舵系统造成的影响。按照描述函数法的分析方法，首先对图3进行化简，如图5所示。

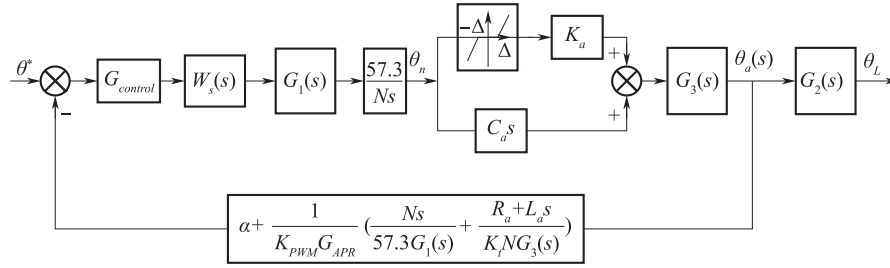


图 5 描述函数分析法线性部分简化

Fig. 5 Simplification of the linear part about the describing function analysis method

其中: $G_{control} = K_p + \frac{1 + aTs}{1 + Ts}$

$$G_1(s) = \frac{K_T}{J_m L_a s^2 + J_m R_a s + K_T K_e}$$

$$G_2(s) = \frac{57.3 K_L}{J_L s^2 + C_L s + 57.3 K_L}$$

$$G_3(s) = \frac{57.3 (J_L s^2 + C_L s + 57.3 K_L)}{s^2 [J_a J_L s^2 + J_a C_L s + 57.3 K_L (J_a + J_L)]}$$

$$B(s) = \alpha + \frac{1}{G_{control} K_{PWM}} \left(\frac{Ns}{57.3 G_1(s)} + \frac{R_a + L_a s}{K_t N G_3(s)} \right)$$

将间隙非线性等价为非线性环节 N_A ，由 θ^* 至 θ_a 的闭环系统的特征方程为：

$$1 + \frac{57.3}{Ns} G_{control} K_{PWM} G_1(s) G_3(s) B(s) N_A + \frac{57.3}{N} G_{APR} K_{PWM} G_1(s) G_3(s) B(s) C_a = 0 \quad (1)$$

记 $P(s) = \frac{57.3}{Ns} G_{control} K_{PWM} G_1(s) G_3(s) B(s)$

$$Q(s) = \frac{57.3}{Ns} G_{control} K_{PWM} G_1(s) G_3(s) B(s) C_a$$

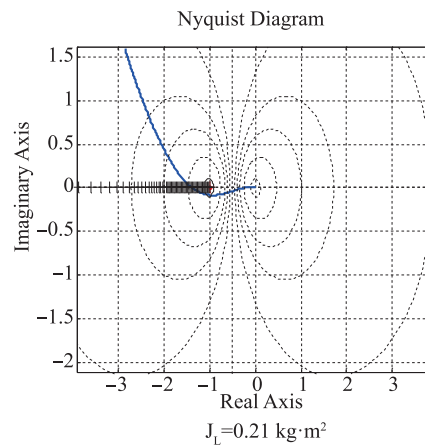
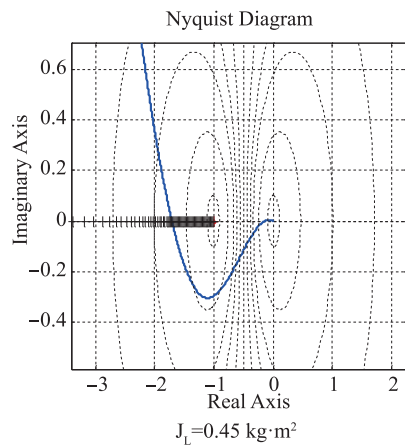
式 (1) 可以简化为

$$1 + \frac{P(s)}{1 + Q(s)} N_A = 0 \quad (2)$$

式 (2) 等价形式为

$$G(j\omega) = \frac{P(s)}{1 + Q(s)} = -\frac{1}{N_A} \quad (3)$$

改变负载转动惯量，利用 matlab 将线性部分的 Nyquist 曲线与间隙的负倒描述函数画在同一复平面中，即可确定系统是否会产生振荡，描述函数分析结果如图 6 所示。



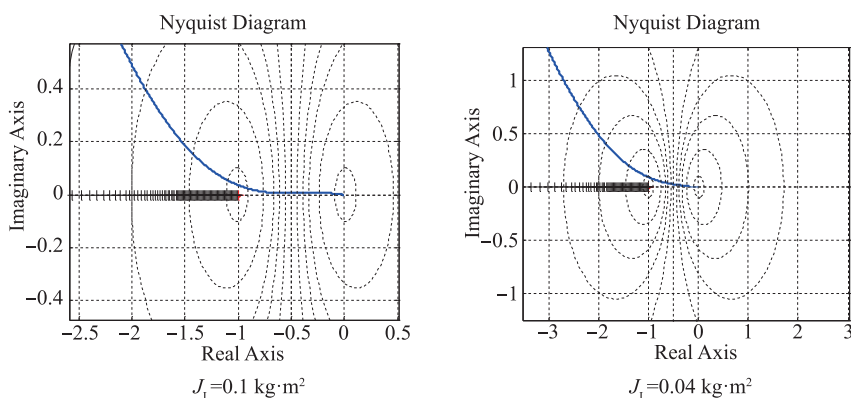


图6 负载转动惯量不同时, 系统描述函数法示意图

Fig. 6 The scheme of the describing function method under different load inertial

从图6可以看出, 负载转动惯量为 $0.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时, 由舵指令至舵反馈的非线性系统线性部分的频域特性与间隙的负倒描述函数间无交点。当负载转动惯量为 $0.21 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $0.45 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 时, 由舵指令至舵反馈的非线性系统线性部分的频域特性与间隙的负倒描述函数间存在交点, 即非线性系统不稳定, 而负倒描述函数随着振幅增加的方向由不稳定区进入稳定区域, 交点对应着稳定的周期运动, 对负载转动惯量 $0.45 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 处的交点进行计算, 振荡频率约为 157 rad/s , 幅值

约为 0.2 V , 描述函数法分析非线性系统与下一小节时域仿真结果相对应。

3.2 仿真验证

负载转动惯量不同时, 对机电舵系统进行仿真分析, 仿真结果如图7所示。设置负载转动惯量分别为 $0.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $0.21 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $0.45 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 四种情况, 由于舵机输出轴与舵面连接轴刚度较强, 故舵机输出轴响应与舵面响应基本类似。

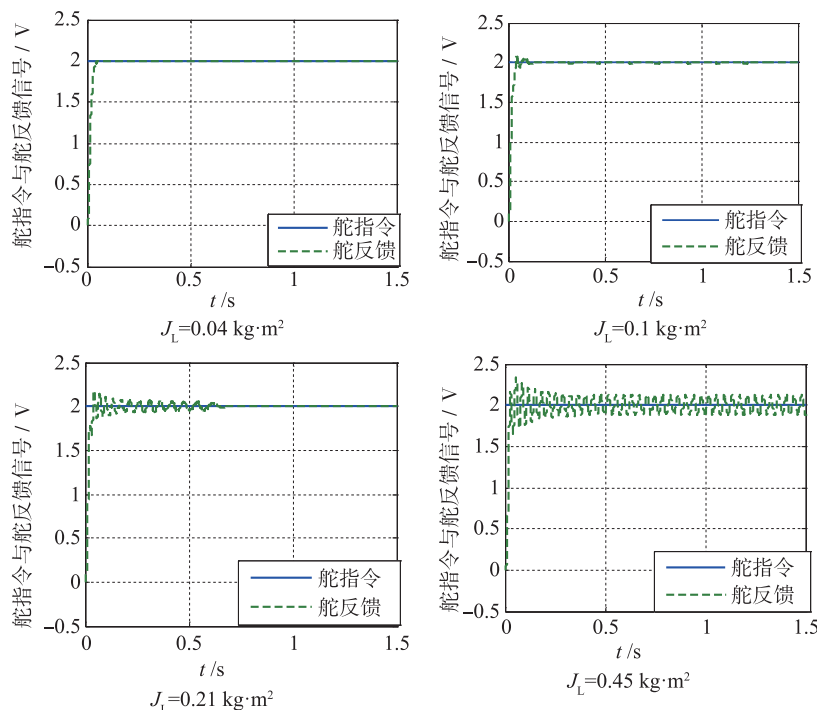


图7 负载转动惯量不同, 机电舵系统阶越响应仿真曲线

Fig. 7 The simulation results of EMA system under different load inertial

仿真结果表明,随负载转动惯量的增加,舵反馈由较好地跟随指令到初期有几个振荡随后收敛于指令到呈现出等幅振荡,振荡程度愈加剧烈。为了验证模型搭建,理论分析与仿真的正确性,在某机电舵系统上进行了不同负载转动惯量的机电舵系统试验。

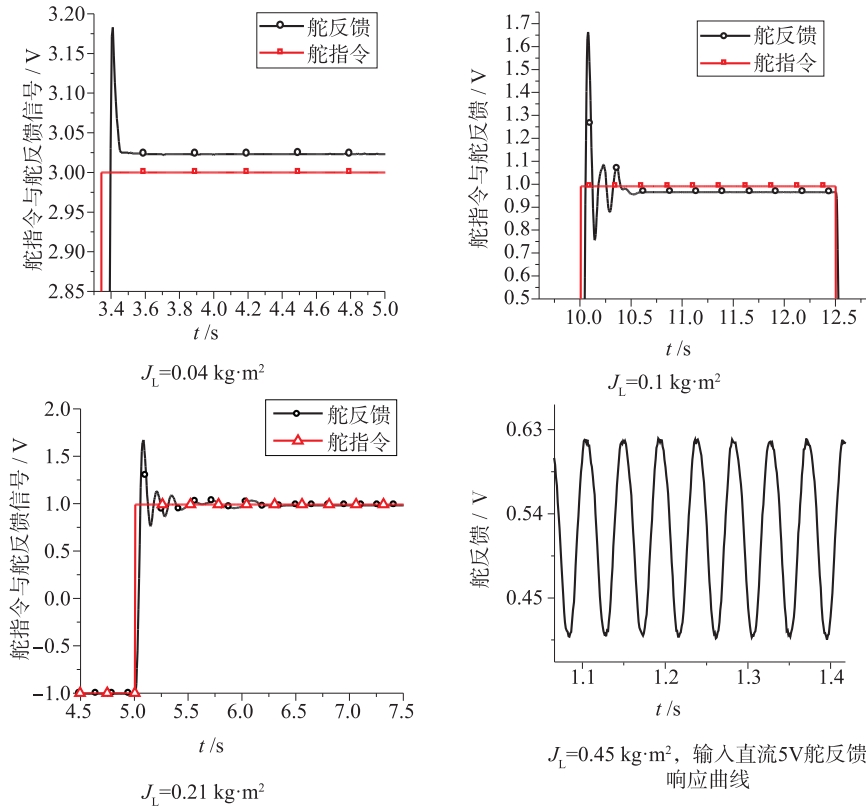


图8 负载转动惯量不同,机电舵系统阶越响应试验曲线

Fig. 8 The experiment results of EMA system under different load inertial

从图8可以看出:对于某特定舵系统而言,一定负载惯量范围内,舵反馈响应初期出现几个振荡随后收敛于指令,但随负载转动惯量增加,调节时间变长,响应初期振荡个数增加,超调增加,但系统快速性能够达到性能要求。当负载转动惯量进一步增加,舵反馈出现了幅值一定、频率一定的极限环振荡。

5 结论

通过对大惯量负载机电舵系统的组成及基本原理分析,建立了电机—传动机构—负载的三质量模型,在模型基础上,从理论及仿真上分析了大惯量负载对机电舵系统动态品质及稳态性能的影响,并在某机电舵系统上进行了试验验证。结果表明:负

4 试验验证

通过在舵面负载上贴装不同厚度的质量块以改变转动惯量,分别对负载转动惯量为 $0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $0.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 四种情况进行了试验,试验结果如图8所示。

载转动惯量的增加,会造成系统动态品质及稳态性能下降,严重时引起系统振荡,为后续改善系统动态及稳态性能,采取陷波滤波器及可调惯量比控制等控制方法提供了较强的理论依据。

参考文献

- [1] 刘金琨. 先进PID控制及其Matlab仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. [Liu Jin-kun. Advanced PID control and Matlab simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2005.]
- [2] 吴宇航, 王占强, 传动间隙对舰炮随动系统的影响研究[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(5): 68-72. [Wu Yu-hang, Wang Zhan-qiang. The research on the transmission backlash effect of gun servo system [J]. Ship science and technology, 2009, 31(5): 68-72.]
- [3] 胡寿松, 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001. [Hu Shou-song. The principle of automatic control [M]. Science Press, 2001.]