# 一种引入位置比例控制提高电动负载模拟器性能的控制系统设计方法

郭行，陈康，孙力，闫杰

（西北工业大学 航天学院，陕西 西安 710072）

**摘 要：** 仔细分析了电动负载模拟器的工作原理及多余力矩的产生机理，建立了电动负载模拟器的数学模型，在被动加载的情况下，提出了采用位置比例控制与角速度前馈补偿两种方法共同抑制多余力矩，设计了包含位置比例控制+角速度前馈补偿+力矩闭环控制的三回路控制系统，进一步提高了电动负载模拟器的控制精度并展宽了力矩加载频带，使得电动负载模拟器的加载频带提高到了 25 Hz 以上。

**关 键 词：** 电动负载模拟器，多余力矩，位置比例控制，加载频带

**中图分类号：** TP271$^{+}$.4 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-2758(2014)02-0235-05

负载模拟器是进行飞行器地面半实物仿真的主要设备之一，用来模拟飞行器舵机系统在飞行过程中所承受的铰链力矩。随着力矩电机性能的不断提高，以伺服电机作为负载模拟器伺服系统的电动式负载模拟器也得到了越来越广泛应用。

负载模拟器的控制存在的主要问题有两个方面：多余力矩的抑制；加载频带的展宽。由于系统力矩的加载是通过力矩电机与舵机的相互扭转来实现的，因此舵机自身的运动将会对加载力矩产生显著影响，由此而产生的力矩就被称为多余力矩。

目前，在多余力矩的抑制方面，文献[1]中利用结构不变性原理设计了前馈控制器，而且前馈控制所需要的舵机角速度可以通过传感器测量得到，虽然前馈控制器可以构建出来，但需要产生高次微分项，在工程中无法实现完全的前馈补偿；文献[2]中提到利用同步电机来同步舵机的运动，进而抑制由于舵机运动而产生的力矩影响，但此种方法要求同步电机的频率特性与加载舵机的相同或相近，因此在具体应用中也受到限制。而在加载频带的展宽方面，它主要取决于伺服电机的工作频带和多余力矩的抑制。要达到所要的加载频带，首先需要伺服电机的频带达到要求，而后在多余力矩能够有效抑制的情况下，加载频带就能趋近于伺服电机的工作频带，进而达到加载要求。

本文提出构建包含位置比例控制+角速度前馈补偿+力矩闭环控制的三回路控制系统，在原来前馈控制器的基础上引入位置比例控制指令，它要求伺服电机以一定的比例系数跟随舵机进行同步运动，以位置的精确控制来实现力矩的精确控制。

## 1 电动负载模拟器工作原理及其数学模型

在对飞行器舵机进行力矩加载的仿真实验中，加载伺服电机在控制计算机的输出指令下工作，系统实际加载的力矩通过力矩传感器测量得到并反馈给控制计算机，为提高系统加载精度与频带，系统通过位置传感器测量舵机的转角和加载伺服电机的转角并反馈给控制计算机，加载系统的原理结构图如图 1 所示。通过分析加载伺服电机的工作原理及力矩的产生机理，我们可得到负载模拟器的数学模型如图 2 所示，其中 $U_{\mathrm{cmd}}$ 为控制计算机控制系统输出电压控制量，$K_{q1}$ 为前置放大器等效放大系数，$K_{q2}$ 为驱动器等效放大系数，$L_m$、$R$ 分别为力矩电机工作电感和电阻，$K_T$ 为电机转矩系数，$I_m$ 为电机工作电流，

收稿日期：2013-10-09

作者简介：郭行(1990—)，西北工业大学硕士研究生，主要从事飞行器导航制导与控制的研究。

$K_e$ 为电机反电动势常数，$B_m$ 为电机摩擦系数，$K_h$ 为电流环反馈系数，通常情况下为 1，$J_m$ 为力矩电机的转动惯量，$\Omega_m$ 为力矩电机的转速，$\theta_m$ 为力矩电机的转角，$\theta_f$ 为舵机的偏转角，$K_L$ 为弹簧杆的刚度系数，$T_L$ 为加载系统实际的输出力矩。

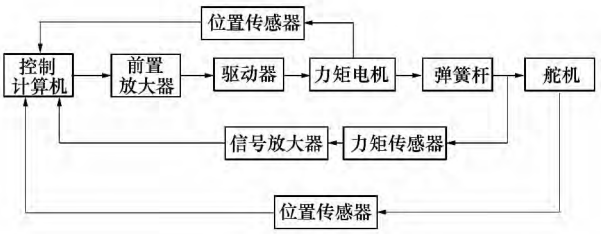



图 1 负载模拟器原理结构图

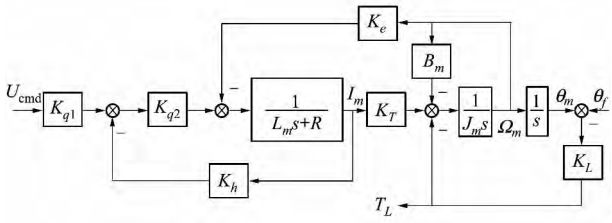



图 2 负载模拟器数学模型

## 2 以位置比例控制为核心的三回路控制系统设计

通过分析负载模拟器数学模型，可得到负载模拟器的实际输出力矩 $T_L(s)$ 为：

$$T_L(s) = G(s) \cdot U_{cmd}(s) + N(s) \cdot \theta_f(s) \quad (1)$$

式中：

$$G(s) = \frac{\tilde{K}}{M(s)} \quad (2)$$

$$N(s) = -\frac{K_L s\left[J_m L_m s^2 + (R_m J_m + B_m L_m)s + B_m R_m + K_T K_e\right]}{M(s)} \quad (3)$$

$$\left.\begin{aligned} M(s) &= J_m L_m s^3 + (R_m J_m + B_m L_m)s^2 + \\ &\quad (B_m R_m + K_T K_e + L_m K_L)s + R_m K_L \\ \tilde{K} &= K_T K_{q1} K_{q2} K_L, R_m = R + K_h K_{q2} \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

$N(s)$ 中的负号表示力矩方向与舵偏角方向相反。明显可以看出，舵机偏转角 $\theta_f(s)$ 对应的输出力矩部分即为多余力矩，它会对加载系统的实际输出力矩 $T_L(s)$ 产生重要影响，我们可以利用结构不变性原理[1] 对其进行补偿，这样就设计出了角速度前馈补偿回路。

在被动式负载模拟器加载模式下，指令力矩

$$T(s) = -K_g \cdot \theta_f(s) \quad (5)$$

$K_g$ 为加载梯度（N·m/(°)），它反映出不同飞行条件下舵机所受到的铰链力矩情况，负号表示指令力矩方向与舵偏方向相反。

在图 2 中可看出，加载力矩的最终形成取决于当前的舵机运动位置 $\theta_f$，电机运动位置 $\theta_m$ 和弹簧杆的刚度系数 $K_L$。在以往的控制系统设计中，为了实现指令力矩的加载基本都使用力矩闭环回路，通过力矩闭环来实现位置控制，最终实现加载力矩跟踪指令力矩。而本文提出以位置控制为核心，将所要求的力矩指令等效转化为位置指令，此时有

$$\theta_m = K \cdot \theta_f \quad (6)$$

式中：$K$ 为位置比例系数，$0 \leqslant K \leqslant 1$。

对于实际的输出力矩有

$$T_L(s) = (\theta_m - \theta_f) \cdot K_L \quad (7)$$

在确定比例系数 $K$ 时，令

$$T_L(s) = T(s) \quad (8)$$

结合(5)～(8)式，可求出比例系数 $K$ 的表达式为：

$$K = \frac{K_L - K_g}{K_L} \quad (9)$$

由此也可看出，位置比例控制要求 $K_L \geqslant K_g$。

角速度前馈补偿回路和位置比例控制回路的构建能够抑制多余力矩，然而为了最终能使得输出力矩有效地跟踪指令力矩，我们又在位置比例回路内部设计了力矩闭环控制回路，并且也引回了输出力矩的微分量来增加系统阻尼。由此就形成了位置比例控制+角速度前馈补偿+力矩闭环控制的三回路控制系统，它以位置比例控制为主，力矩控制为辅，如图 3 所示。

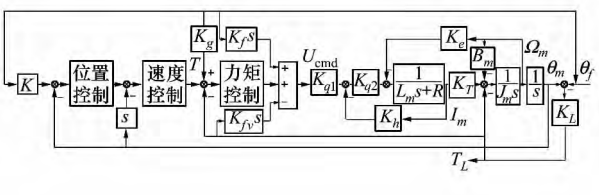



图 3 加入三回路闭环控制后系统整体结构图

## 3　控制系统时域与频域特性分析

由于角速度前馈补偿回路不影响系统结构，为了验证设计的三回路控制系统的优良特性，我们将其与仅有力矩单回路闭环的常规控制系统作了对比分析，它们的闭环传递函数分别为:

$$\Phi_1(s)=\frac{K_gG(s)-N(s)}{K_g[1+G(s)]} \tag{10}$$

$$\Phi_2(s)=\frac{G(s)(K_g+1+K)-N(s)}{K_g[1+G(s)(1-1/K_L)]} \tag{11}$$

根据(10)式、(11)式可得到它们的等效开环传递函数，由此可画出它们的根轨迹，如图 4 所示。

由图 4 可以看出，当根轨迹增益过大时，采用常规控制系统会发散(增益约为 46.4)，而采用三回路控制系统则能始终保持稳定。由于开环增益与根轨迹增益是成比例的，因而从稳定性方面来讲，三回路闭环系统的开环增益可以设计得更高。

系统开环增益对系统稳定性和动态响应性能有重要影响，然而它的调节也受限于系统阻尼，对于力矩单回路闭环方式，虽然它可以采用输出力矩的力矩微分反馈来改善阻尼特性，但工程上由于力矩测量中所含噪声较大，将其进行微分后噪声更被放大，此时又要采用滤波器进行滤波，所以设计时反馈系数必须取得较小，反馈信号无法充分利用; 而对于位置闭环方式，它采用速度反馈改善阻尼特性，由于位置的测量噪声较小，因而得到的速度信号比较纯净，对其处理也较简单，所以我们能更大程度的利用速度信号。因此，从系统阻尼方面来讲，三回路闭环的系统比力矩单回路闭环的系统能采用更高的开环增益。

在设计控制系统后，采用三回路闭环控制的系统开环频域特性如图 5 所示，单位阶跃响应曲线如图 6 所示。

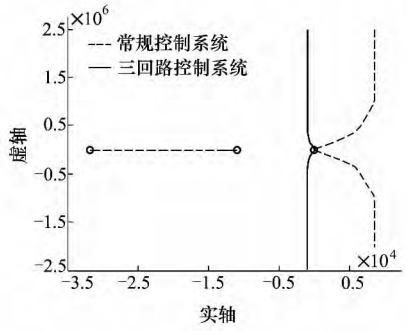



图 4　系统的根轨迹图比较

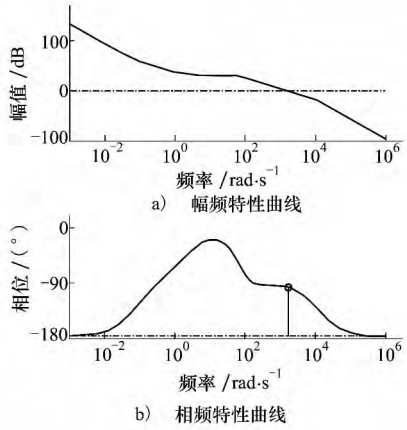



图 5　系统开环频域特性

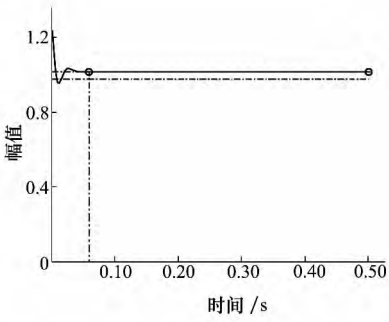



图 6　系统单位阶跃响应

表 1　系统频域与时域特性汇总表

| 性能指标 | 结果 |
|---|---|
| 截止频率/(rad·s$^{-1}$) | 1 650 |
| 相角裕度/(°) | 82 |
| 幅值裕度/(°) | 无穷大 |
| 调节时间/s | 0.06 |
| 稳态误差 | 0 |

以上分析可以看出，采用三回路闭环控制系统截止频率高，相位裕度和幅值裕度较大，系统响应时间快，稳态误差为零。

## 4　仿真实验结果及分析

我们使用 Simulink 搭建了系统结构框图，并根据以上控制系统设计方法进行了数学仿真，得到的仿真结果展示如下。

在舵机运动频率为 25 Hz 时，系统在仅含有力矩闭环和角速度前馈补偿的控制系统(常规控制系统)和三回路控制系统下的响应对比如图 7 所示，可以看出三回路控制系统的跟踪精度更高。

图 8 给出了在舵机运动频率为 25 Hz 时，常规控制系统和三回路控制系统电机运动位置跟踪舵机

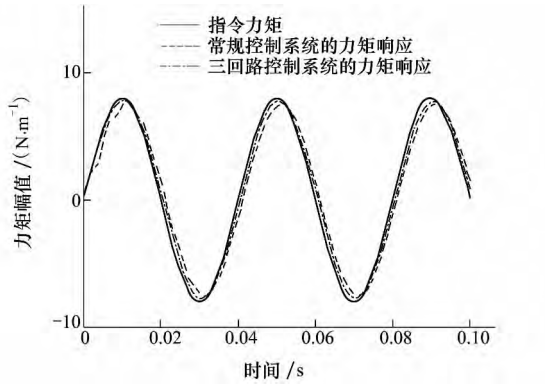



图 7 频率为 25 Hz 时系统响应对比

运动位置的情况，可以看出在三回路控制的情况下电机运动位置能更加准确地跟踪舵机运动位置，从而保证了加载力矩能更好地跟踪指令力矩。

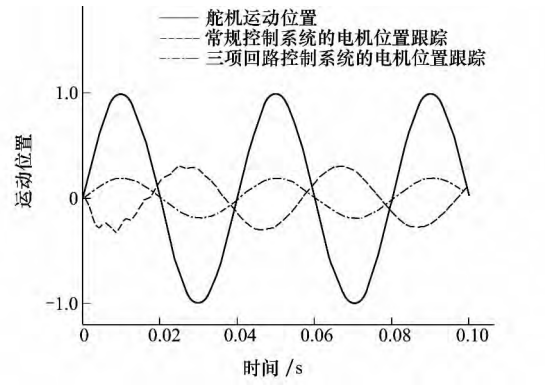



图 8 25 Hz 情况下系统位置跟踪情况对比

在不同的舵机运动频率下，系统响应的幅差和相差结果如表 2 所示。

表 2 舵机不同工作频率下系统响应幅差和相差对比汇总表

| 工作频率 | 控制方式 | 相差 /(°) | 幅差 /% |
|---|---|---|---|
| 10 Hz | 常规控制系统 | 5.04 | 0.75 |
| | 三回路控制系统 | 2.52 | 0.25 |
| 20 Hz | 常规控制系统 | 8.64 | 4.28 |
| | 三回路控制系统 | 4.42 | 2.25 |
| 25 Hz | 常规控制系统 | 11.16 | 6.13 |
| | 三回路控制系统 | 5.13 | 3.63 |

## 5 结 论

本文仔细分析了电动负载模拟器的结构组成及工作原理，建立了负载模拟器系统的数学模型，并提出了位置比例控制+角速度前馈补偿+力矩 PID 控制的三回路控制系统，通过角速度前馈和位置比例控制两种方式有效地抑制了多余力矩，又详细分析了它的时域和频域特性，结果证明它能够将加载频带展宽至 25 Hz。此外，本文还为工程中负载模拟器控制系统设计提供了新的思路。

## 参考文献:

[1] 符文星，孙力. 电动负载模拟器控制系统设计 [J]. 西北工业大学学报，2008，26(5)：621-622
Fu Wenxing, Sun Li. Improving Design of Control System for DC Motor-Driven Torque Control Simulator [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(5): 621-622 (in Chinese)

[2] 方强. 被动式力矩伺服控制系统设计方法及应用研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2006
Fang Qiang. Research on Design Method for Passive Torque Servo Control System and Its Application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese)

[3] 苏东海，吴盛林，付兴武，刘庆和. 利用基于同步补偿的角速度差值克服多余力矩 [J]. 哈尔滨工业大学学报，2000，32(1)：78-81
Su Donghai, Wu Shenglin, Fu Xingwu, Liu Qinghe. Eliminating Disturbance Torque by Angular Velocity Difference Based on Synchro-Compensation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(1): 78-81 (in Chinese)

[4] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京：机械工业出版社，2002
Tao Yonghua. New Kinds of PID Control and Applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2002 (in Chinese)

[5] 于慈远，赵克定. 飞行器负载仿真台速度反馈克服多余力矩的仿真研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报，1997，29(6)：126-129
Yu Ciyuan, Zhao Keding. Study on Speed Feedback Applied to Craft Load Simulator to Overcome Disturbance Torque [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1997, 29(6): 126-129 (in Chinese)

# An Effective Method for Designing Control System of Motor-Driven Torque Control Simulator by Introducing Position Proportional Control

Guo Hang, Chen Kang, Sun Li, Yan Jie

( College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi´an 710072, China)

**Abstract:** We establish the mathematical model of a motor-driven torque control simulator. Under the circumstance of passive load, we suppress the surplus torque by using the position-proportional control and angular-speed feed forward compensation. We design the control system that includes three loops: position-proportional control, angular speed feed forward compensation and closed-loop PID torque control. We then analyze the time domain and frequency domain characteristics of the control system. The results and their analysis show preliminarily that the control system thus designed can significantly enhance the control precision of the motor-driven torque control simulator and expand the frequency band of its torque load to at least 25Hz.

**Key words:** computer simulation, control systems, closed loop control systems, cutoff frequency, feedforward control, frequency domain analysis, MATLAB, position control, root loci, sensors, time domain analysis, velocity control; motor-driven torque control simulator, position-proportional control, surplus torque, torque load

## 《机械科学与技术》第 33 卷( 2014 年) 头 4 期英摘关键词平均每篇使用 21 世纪 Ei 主题词 1.19 个

《机械科学与技术》第 33 卷( 2014 年) 头 4 期共有 122 篇文章,共使用 145 个 21 世纪 Ei 主题词,平均每篇 1.19 个。

4 期使用 21 世纪 Ei 主题词情况如下表:

| 期 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1-4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 篇数 | 28 | 32 | 31 | 31 | 122 |
| 共使用 21 世纪 Ei 主题词数目 | 28 | 28 | 43 | 46 | 145 |
| 平均每篇使用的 21 世纪主题数目 | 1.00 | 0.88 | 1.39 | 1.48 | 1.19 |

胡沛泉

2014 年 4 月