

最佳电液位置伺服系统的设计

李贻斌 徐国华 孔蕙 樊炳辉 李洪亮

(山东矿业学院济南分院)

摘要 介绍了利用压力反馈和阶跃响应最佳准则实现具有最佳阶跃响应的电液位置伺服系统的方法。这种设计方法具有快速、准确、简便、灵活的特点,用这种方法所设计的系统不但跟踪性能好,而且抗干扰力强。

关键词 环路法;阶跃响应;最佳;压力反馈;伺服系统

中图分类号 TP272

伺服系统的根本目的是要求系统的输出量能紧紧地跟随着输入量的变化而变化,最理想的情况是,如果系统为单位反馈系统时当输入量为单位阶跃函数时,系统的输出也能以单位阶跃函数复现其输入量,而实际是不可能的。这是因为系统是由储能元件或环节组成,其能量是不能突变的,但总可以想办法使系统的过渡过程时间 t 的各项性能指标及超调量和稳态误差最小。文献^[1]提出了一个“阶跃响应最佳准则”,并求得了满足此准则的各阶闭环系统最佳传递函数,同时给出了最佳闭环控制系统的设计方法。

大多数液压伺服系统的阻尼比都比较低,常常成为限制性能指标的主要原因。如果能将阻尼比提高到 $0.4 \sim 1$,就可能使系统的稳定性和快速性有明显的改善。系统的时间响应也会很理想。研究表明,采用压力反馈或压力微分反馈是提高阻尼比而又不降低效率的有效方法^{[2][3]}。对于压力反馈和压力微分反馈可以采用电的办法来实现,也可以采用特殊的伺服阀来实现。

下面将介绍利用压力反馈实现具有阶跃最佳响应的电液位置伺服系统的综合校正技术及仿真实验结果。

1 阶跃响应最佳准则及最佳传递函数的设计

1.1 阶跃响应最佳准则

(1)阶跃响应最佳闭环传递函数的标准形式是:

$$\Phi(S) = (a_1s + a_0) / (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0)$$

(2)阶跃响应量佳系统必须满足 $\delta < 5\%$

(3)当系统的特征多项式分母的各项系数 $a_i (i=0, 1, \dots, n-1)$ 在一定范围内变化时,一般允许 $|\pm \Delta a_i| \geq 30\%$, 系统应具有较好的稳定性。

(4)在系统的单位阶跃响应中,使系统的过渡过程时间 t_{B1} 、 t_{B2} 、 t_r 、 t_p 为最小其中:

t_{B1} ——当允许稳态误差为 5% 时,系统稳态误差第一次等于 5% 时系统的过渡过程时间;

t_{B2} ——当允许稳态误差为 2% 时,系统稳态误差第一次等于 2% 时系统的过渡过程时间;

t_r ——系统的上升时间; t_p ——系统产生最大超调时的时间,即最大超调时间。

1.2 $\Phi(S)$ 系统的传递函数及单位阶跃响应

1.2.1 $\Phi(S)$ 系统的传递函数 根据阶跃响应最佳准则及其 $\Phi(S)$ 的标准形式,经计算机计算,给出了 $\Phi(S)$ 系统的 2~7 阶特征多项式,如表 1 所示:有了特征多项式,也就知道了 $\Phi(S)^{[1]}$ 。

表 1 $\Phi(S)$ 最佳系统的特征多项式

系统阶数	特征多项式
2	$S^2 + 20\omega_n S + \omega_n^2$
3	$S^3 + 8.75\omega_n S^2 + 22.75\omega_n^2 S + \omega_n^3$
4	$S^4 + 24.1\omega_n S^3 + 73.9\omega_n^2 S^2 + 102.8\omega_n^3 S + \omega_n^4$
5	$S^5 + 23\omega_n S^4 + 130\omega_n^2 S^3 + 235\omega_n^3 S^2 + 200\omega_n^4 S + \omega_n^5$
6	$S^6 + 15\omega_n S^5 + 190\omega_n^2 S^4 + 470\omega_n^3 S^3 + 600\omega_n^4 S^2 + 330\omega_n^5 S + \omega_n^6$
7	$S^7 + 20\omega_n S^6 + 200\omega_n^2 S^5 + 495\omega_n^3 S^4 + 900\omega_n^4 S^3 + 820\omega_n^5 S^2 + 360\omega_n^6 S + \omega_n^7$

1.2.2 $\Phi(S)$ 最佳系统的单位阶跃响应及其 ω_n 与单位阶跃响应性能指标的关系 应用计算机仿真技术对 $\Phi(S)$ 系统进行仿真实验得到 $\Phi(S)$ 系统的单位阶跃响应曲线及其 ω_n 与性能指标之间的关系。这里仅给出有最佳零点四阶最佳系统的单位阶跃响应曲线 ($\omega_n = 5$ 和 $\omega_n = 50$),如图 1 所示。

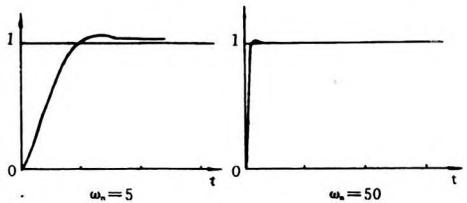


图 1 具有最佳零点四阶最佳系统的单位阶跃响应曲线

ω_n 与性能指标 t_r 、 t_{B1} 、 t_{B2} 、 t_p 、 δ 之间的关系如表 2 所示。

表 2 $\Phi(S)$ 系统的 ω_n 与时域性能指标的关系

系统阶数 n	$\omega_n \cdot t_r$	$\omega_n \cdot t_{B1}$	$\omega_n \cdot t_{B2}$	$\omega_n \cdot t_p$	δ
2	0.305	0.418	0.191	0.604	<0.3%
3	1.072	0.83	0.94	1.67	<1.8%
4	1.64	1.43	2.91	2.19	<3.7%
5	2.46	2.19	4.27	3.22	<4.1%
6	3.53	3.13	4.48	4.25	<3.0%
7	3.94	3.58	5.35	4.67	<3.5%

2 具有最佳阶跃响应的电液位置伺服系统的工程实现

2.1 环路法设计最佳状态反馈系统

常见的带有压力反馈的阀控马达电液位置伺服系统原理图如图 2 所示,图中用压差传感器测取液压马达的负载降 P_L ,反馈到伺服阀的输入端,构成压力反馈。

假定无弹性负载,伺服阀、传感器和放大器等环节的动态特性暂不考虑,可得到系统的方块图,如图 3 所示。由此方块图可以求得系统的固有传递函数:

$$W_0(S) = 4068.4553 / (S^3 + 25.195S^2 + 488.41S)$$

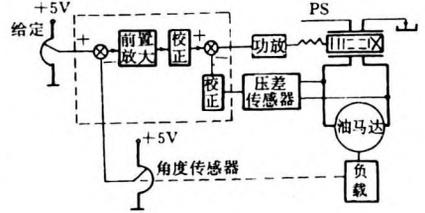


图 2 电液伺服系统原理图

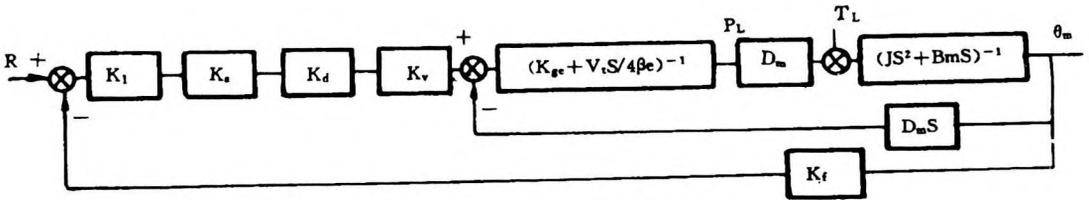


图 3 带压力反馈的系统方块图

为了将其设计成快速跟踪强抗扰动伺服控制系统,可通过设计和实现最佳传递函数 $\Phi(S)$ 来保证其快速跟踪性能,通过在系统扰动作用点前后各设计一个积分环节来保证其抗扰动性能,即把系统设计成对速度跟踪及恒值扰动均为无差的系统。

查表 1,四阶闭环系统最佳传递函数为:

$$\Phi(S) = (102.8\omega_n^3S + \omega_n^4) / (S^4 + 24.1\omega_n S^3 + 73.95\omega_n^2 S^2 + 102.8\omega_n^3 S + \omega_n^4)$$

根据所提供的原始资料、时域性能指标及其它因素,选取 $\omega_n = 20$, 从而:

$$\Phi(S) = (822400S + 160000) / (S^4 + 482S^3 + 29580S^2 + 822400S + 160000)$$

根据环路法,利用能控标准形,得到最佳状态反馈系统的方块图,如图 4 所示。

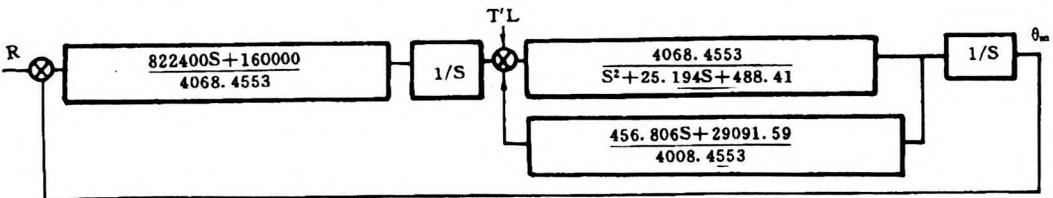


图 4 最佳状态反馈系统方块图

由于本系统拟采用压力反馈来实现内环反馈校正,故其又可等效为图 5

由此可以看出,压力反馈并联校正装置是一个带有滤波器的 PD 控制器,而位置环校正装置为一个 PI 控制器,这在工程上都较易实现。

2.2 系统误差分析

由图 5 可求得系统的等效误差传递函数为：

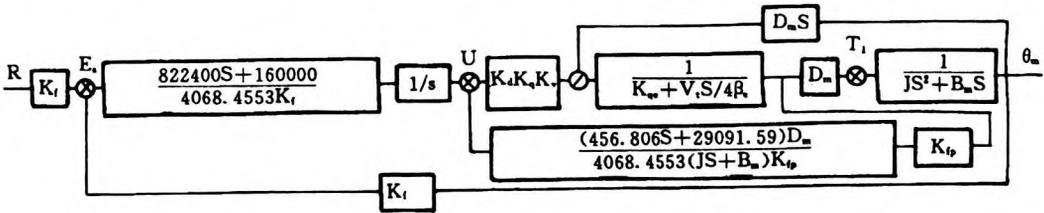


图 5 带压力反馈的等效方块图

$$\Phi_a(S) = (S^4 + 482S^3 + 29580S^2) / (S^4 + 482S^3 + 29580S^2 + 822400S + 160000)$$

从而可以求得系统的稳态位置误差等于零，稳态速度误差等于零，稳态加速度误差等于 0.184875。同理可以求得系统对扰动 T'_L 的稳态位置误差等于零，而其稳态的速度误差等于 0.02543。

由此可见，本系统是一个 II 型系统，对单位阶跃函数、单位斜坡函数的跟踪达到无静差，同时对加速度函数也有很好的跟踪作用，而且对恒值扰动的跟踪达到无静差，对速度型扰动也有很强的抑制作用。

2.3 系统仿真结果

为了对上述设计进行验证和比较，分别对直接闭环控制系统、加入串联 PID 控制器的控制系统和最佳状态反馈系统进行仿真，结果分别对应图 6 的曲线 1、2 和 3。

由仿真曲线可见，采用上述方法所设计的系统比常规设计方法所设计的系统具有更高的性能指标。

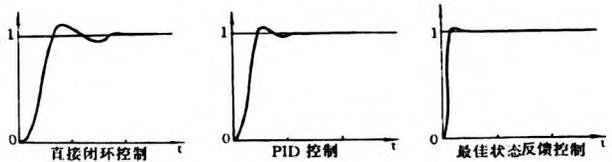


图 6 仿真曲线

3 结论

- (1) 基于阶跃响应最佳准则的闭环系统传递函数是一种最佳控制系统传递函数，较其它参数最佳控制系统，有极好的性能指标。
- (2) 利用环路法和能控标准型，能迅速设计出最佳状态系统，且无需状态观测器，它与其它设计方法相比，具有快速、准确、简便、灵活的特点，可一次性设计成功，设计方法极易为工程技术人员所掌握，校正装置也极易在工程中实现。
- (3) 采用上述方法所设计的系统，不但跟踪性能好，而且抗扰动能力强，解决了设计中跟踪性能与扰动性能相矛盾的难题。

参考文献

- 1 李镇铭著. 环路法及最佳状态反馈系统设计. 北京: 国防工业出版社, 1988. 158~179.
- 2 李连升. 刘绍球著. 液压伺服理论与实践. 北京: 国防工业出版社, 1990. 137~145.
- 3 李洪人编著. 液压控制系统. 北京: 国防工业出版社, 1981. 239~254.

$$\begin{aligned}
& 112G_5G_4F_2 + 56G_5F_4 + 448G_3G_4^2F_2 - 224G_3G_4F_4 \\
& = -14(F_7 - 2F_2G_7 + 12G_3G_6F_2 - 6G_3F_6 - 48G_3^3G_4F_2 + 24G_3^3F_4 + 8G_5G_4F_2 \\
& \quad - 4G_5F_4 - 32G_3G_4^2F_2 + 16G_3G_4F_4) \\
& = -7\varphi_7
\end{aligned}$$

从而 $128C_8 = -35\varphi_7$, R_8 的其它系数也可以求出(不具体求了),由(5)式即可知道此时原点为系统(1)的三阶细焦点。证毕。

我们猜想当 $n > 3$ 时,且 φ_{2n+1} 是第一个不为 0 的数,此时原点为(1)的 n 阶细焦点,但因计算太烦,人工不可能得证,我想借助于计算机可以完成。

参 考 文 献

- 1 韩茂安,朱德明.微分方程分支理论.煤炭工业出版社,1994.
- 2 韩茂安.平面定常系统有无闭轨的判别法.南京大学学报(自然科学版).1985,(2)
- 3 蔡燧林,马晖.广义 Liénard 方程的奇点的中心焦点问题.浙江大学报(自然科学版),1991,(5):562—568
- 4 张锦炎.常微分方程几何理论与分支问题.北京大学出版社,1986.

Determination of LoCad Focus of Plane Lienad System

Zhuo xianglai

(Dept. of Basic courses)

ABSTRACT By using the fromal series, we give out the determining conditions for local focus of lienard system[1], and get the relation between the determining conditions of the stability of the local focus from [2,3] and its orders.

KEY WORDS Liénard system; Local focus ; stability.

(上接 68 页)

The Design of Servosystem with Optimal Electro-Hydraulic position

Li Yibin Xu Guohua Kong Hui Fan Binghui Li Hongliang

(Jinan Branch of SIMT)

ABSTRACT This paper introduces the technique that realizes electro-hydraulic position servosystem with optimal indicial response by the means of pressure feedback and optimal ruler of indicial response This design method has been proved to be fast、accurate、simple and flexible, the system designed with this method is of better trace properties and stronger anti-interference capability.

KEY WORDS Loop technique; Indicial response; Optimal; Pressure feedback; servosystem