

## ITAE 最优III型伺服系统的设计及工程实践

陈明俊, 李长红

(西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)



**摘要:** 介绍由工程需求而引出的 ITAE 最优高阶无静差控制系统的研制工作, 重点是如何根据系统典型固有环节构建此类系统的通用结构和物理实现方法, 通过台架和产品装机实验完善、认定, 对工程实践中遇到的相应问题给出理论分析, 最终验证其可行性和优越性。研制的新系统达到了预期的优良动静态性能, 解决了传统控制方法无法解决的技术难题, 如结构谐振, 在实际使用中表现出多项优点, 显著提高了武器系统性能。该技术成果最终在制式武器上采用, 通过定型, 装备军队。在控制领域里, 长期以来都认为III型以上的系统是难以实现和应用的, 三阶 ITAE 最优III型伺服系统研制的成功及实用, 使这个禁区不复存在, 展现了其可期望的应用前景。

**关键词:** ITAE; 高阶无静差; 伺服系统; III型系统

**中图分类号:** TP29

**文献标识码:** A

### Design and Engineering Practice of ITAE Optimum Type-III Servo System

CHEN Ming-jun, LI Chang-hong

(Northwest Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Xiayang 712099, China)

**Abstract:** A development of a ITAE optimal type-III servo system for which some weapon systems demanded, is introduced in this paper. The key problems such as the design and realization method based on typical original construction, the experiments of testbed and assembled real products, and theoretical analysis of some problems met in engineering practice are described in detail. The newly developed system shows its very good static as well as dynamic performance, it particularly solves the key technical problems other traditional servo systems could not do any good, such as structure resonance in the process of adjusting and assembling of the entire system and more advantages were found in running. Finally the ITAE optimal type-III servo system is equipped with the weapon systems. In the field of control, it has long been considered that the type-III servo system is difficult to realize and apply, the successful development and application of these ITAE optimal type-III servo systems makes the restricted zone no longer exist and opens up a vast range of application prospects for systems with the similar type.

**Key words:** ITAE; high order non-steady state error; servo system; type-III system

### 1 引言

ITAE 最优高阶无静差控制方法研究开始得很早, 因为算法无解析解, 1953年, 美国学者 Graham G 和 Lathrop R C 就用模拟计算机算出各阶线性系统在满足 ITAE 最优时应具有的参数<sup>[1]</sup>。1977年以后, 我国学者项国波等人用数字计算机对这些参数进行了验算, 并率先应用, 结果表明按这种最优指标校正得到的系统具有优异的动静态性能<sup>[2-8]</sup>。

到本文述及的研制工作之始, 国内外控制工程专著多对III型以上高阶无静差系统持否定态度, 如: “虽然好象对积分环节的个数没有限制, 但实际上

最常用的是 0 型、I 型和 II 型系统, 比III型更高的系统, 实际上不采用。……”, 另一些专著则根本不谈及III型以上系统。这使得很多人对选择 ITAE 最优III型系统的方案表示疑虑。近半世纪过去, 在控制工程中并没有看到 ITAE 最优高阶无静差伺服系统的研制和应用。

回顾起来, 一个成熟的理论能否得到广泛的应用, 工程需求是第一位的。本文内容的工程背景是研制一个大功率数字伺服系统, 其技术难点表现为

① 要求动态响应快, 近于无超调; 跟踪精度在

收稿日期: 2015-08-18; 修回日期: 2016-09-26

作者简介: 陈明俊(1942-), 男, 湖南攸县人, 研究员, 主要从事伺服系统驱动及控制技术、自适应控制与最优控制等方面的研究工作; 李长红(1978-), 男, 辽宁铁岭人, 研究员, 主要从事交流电机伺服驱动及控制等方面的研究工作。

1.2 rad/s 角速度、1.4 rad/s<sup>2</sup>角加速度输入下误差小于 4.0 mrad 之内；② 输入信号变化无事前规定，不能只按某种特定输入设计控制律；③ 不采用通常赖以提高精度的复合控制，这个要求最终导致要开发具有优良动静态性能的高阶无静差伺服系统。

满足二次型性能指标的最优控制，因能得到解析解，是讨论和应用最多的一种方法，但选加权阵仍要靠设计人员的经验和技巧，此外将伺服问题转为调节器问题，还需对输入信号的形式加以限定，所以不适合该伺服系统。

这样，按匀加速输入无差设计的三阶 ITAE 最优系统Ⅲ型伺服系统，就进入设计者的视线。这类系统能否研制成功，最实质的工作就是如何在物理上予以实现，这基于对控制系统的构成、基本环节选取、系统的主要非线性、物理的约束等方面的研究。可以看到，非如此就不会有成功的有普遍意义的 ITAE 最优Ⅲ型控制实现方法；而工程的实践，台架试验，特别是系统与装置也即被控对象实际安装连接后的实验，既是对系统性能和可用性的严峻检验，也创造着机会，正是出现了一般系统难以应付的结构谐振，才使 ITAE 最优Ⅲ型系统成为该产品唯一的选择，能够迅速在军队制式装备上应用；也正是装备使用的要求，显示了新系统的更多优异性能，使其有更全面认识，并促进了相应的深入分析，可以说工程实践丰富了对Ⅲ型控制方法的研究，证实了这类研究的推广应用价值。

## 2 ITAE 最优调节律

### 2.1 ITAE 最优控制系统目标函数

即指满足误差绝对值  $|e(t)|$  乘以时间  $t$  的积分为最小的系统，其指标函数为

$$J(ITAE) = \int_0^{+\infty} t |e(t)| dt = \min \quad (1)$$

任何一个控制系统都是能量变换和传递过程，这种过程不可能在瞬间完成，系统过渡过程的初始误差是不可避免的，对其要求过高没有实际意义。ITAE 性能指标中，将误差  $|e(t)|$  乘以时变的权重  $t$ ，在过渡过程之初，权重  $t$  很小，误差可以较大，随着  $t$  的增加，逐渐加强对  $e(t)$  的权重，即强调减小稳态误差，促进它平稳收敛。因此 ITAE 最优调节律能使系统具有快速的过渡过程和平稳的高精度的稳态跟踪。这样的控制思想最接近大多数控制系统的实际情况，因而，更为合理，适于各种工程应用。

对不同的典型输入函数的 ITAE 最优传递函数是不同的，一般说来，对一种输入函数达到 ITAE 最优的传递函数，对另一种输入函数并非最优，有时

可能很差。

### 2.2 三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统的标准形式

在 ITAE 最优调节系统参数的确定过程中，采用标准化的微分方程，可以把  $n$  维系统待求参数的个数降低为  $n-1$  个。

三阶Ⅲ型 ITAE 最优系统的标准化传递函数为

$$\phi(s) = \frac{2.97s^2 + 4.94s + 1}{s^3 + 2.97s^2 + 4.94s + 1} \quad (2)$$

其通用表达式为

$$\phi(s) = \frac{2.97\omega_0^2 s^2 + 4.94\omega_0^2 s + \omega_0^3}{s^3 + 2.97\omega_0^2 s^2 + 4.94\omega_0^2 s + \omega_0^3} \quad (3)$$

对应的开环传递函数为

$$W(s) = \frac{2.97\omega_0^2 s^2 + 4.94\omega_0^2 s + \omega_0^3}{s^3} = \frac{\omega_0^3 (\frac{2.97}{\omega_0^2} s^2 + \frac{4.94}{\omega_0} s + 1)}{s^3} = \frac{\omega_0^3 (1 + \frac{1}{1.427\omega_0} s)(1 + \frac{1}{0.236\omega_0} s)}{s^3} \quad (4)$$

位置伺服系统是单位负反馈系统，所以对应上式的开环传递函数 Bode 图，如图 1 所示。

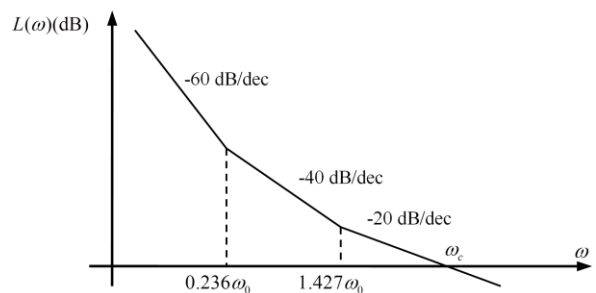


图 1 开环传递函数 Bode 图

Fig. 1 Bode diagram of open loop transfer function

三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统的波特图即系统的开环放大倍数为  $\omega_0^3$ ，系统的截止频率为  $2.97\omega_0$ ，系统的相角裕是  $60^\circ$ ，单位阶跃响应的超调量是 25 %。

把式(3)的分子和分母同除以  $\omega_0^3$ ，得：

$$\phi(s) = \frac{2.97(\frac{s}{\omega_0})^2 + 4.94\frac{s}{\omega_0} + 1}{(\frac{s}{\omega_0})^3 + 2.97(\frac{s}{\omega_0})^2 + 4.94\frac{s}{\omega_0} + 1} \quad (5)$$

与式(2)比较可知， $\omega_0$  的值只影响微分算子的倍数。这就说明了在系统的动态响应中， $\omega_0$  会影响响应时间，包括上升时间、调节时间等，而对系统的振荡幅度没有影响。随着  $\omega_0$  的增加，系统的开环放大倍数增大，则响应速度加快，调节时间短，跟踪

精度提高，而超调量几乎不变。当然，在实际系统中  $\omega_0$  受到系统实际加速能力—最大带宽的限制。

### 3 一个三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统的工程设计

#### 3.1 典型伺服系统的基本固有结构

控制算法应对特定的系统结构、参数进行设计。

取最常用的三环电气伺服系统作为典型来分析。按其基本环节建模，主要包括速度环、电流环、减速器、负载转动惯量，这通常是系统传递函数的不变部分，或称固有部分。在此基础上实现 ITAE 最优控制具有较好的通用性。电气位置伺服系统的结构框图，如图 2 所示。

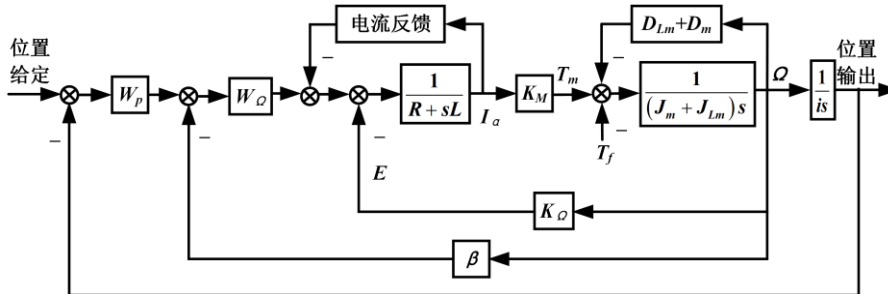


图 2 位置伺服系统的结构框图

Fig. 2 Block diagram of the position servo system

图 2 中， $W_p$  为位置调节器， $W_s$  为速度调节器， $R$  为电机电枢电阻， $L$  为电枢电感， $I_a$  为电枢电流， $K_M$  为力矩电流系数， $T_m$  为电机输出转矩， $D_m$  为电机粘滞摩擦系数， $D_{Lm}$  为则算到电机轴的负载粘滞摩擦系数， $J_m$  为电机轴转动惯量， $J_{Lm}$  为则算到电

机轴的负载转动惯量， $T_f$  为阻力矩， $\Omega$  为电机转速， $i$  为传动比， $K_\Omega$  为反电势系数， $E$  为反电势， $\beta$  为速度反馈系数。

略去粘性阻尼，代入某伺服系统相应参数，得框图，如图 3 所示。

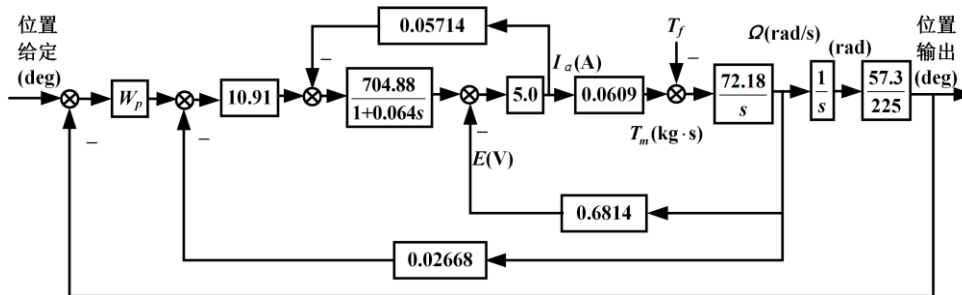


图 3 某伺服系统的传递函数方框图

Fig. 3 The transfer function block diagram of a servo system

通常，电流环的时间常数是相当小，可以将电流环看成比例环节。系统工作在线性区时，速度环不难调整为过阻尼二阶环节，进而可以简化为一阶环节，这样图 2 在系统的线性工作区内可以进行简化，如图 4 所示。

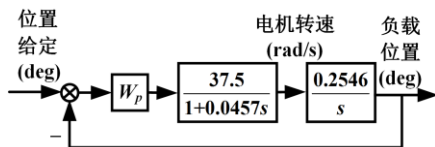


图 4 位置伺服系统的简化图

Fig. 4 Simplified block diagram of the position servo system

不失一般性，大部分伺服系统的固有部分均可简化为一阶惯性环节的速度环和一个积分环节。

速度环时间常数  $T_\Omega=0.046$  是系统的关键小时时间常数。对一个实际系统影响因素要复杂得多，如非线性：饱和、库伦摩擦、传动机构的齿隙、结构谐振等；很多系统更要对力矩扰动特性及变化予以极大关注，特别是则在某些进给系统、某些承受发射后座冲击力的系统中将直接关系到伺服系统是否可用，其他如回转部分重心偏移，当放列不水平引起的与位置有关的负载力矩变化、俯仰机构因平衡装置设计制造带来的附加力矩；还有实际上存在的参数慢时变，如放大器增益的变化及非线性，供电电压的变化、电枢回路电阻随温升的变化等可归结为系统增益  $K$  的变化。后者还可归结为系统机电时间常数的变化。这些都因系统不同而异，要有针对性地解决。

3.2 三阶 ITAE 最优III型伺服系统实现方法

① 用状态方程确定系统结构与参数

对匀加速输入信号无差的标准三阶 ITAE 最优III型系统的传递函数

$$\omega_b(s) = \frac{2.97\omega_0 s^2 + 4.94\omega_0^2 s + \omega_0^3}{s^3 + 2.97\omega_0 s^2 + 4.94\omega_0^2 s + \omega_0^3}$$

这种最优传递函数只需选一个参数  $\omega_0$ ， $\omega_0$  越大，系统响应越快。显然， $\omega_0$  受到执行机构最大加速能力的限制。

由  $\omega_c = 2.97\omega_0$ ，可以根据系统受动力学约束所能达到的最大开环穿越频率来校核  $\omega_0$  选取结果。

最优传递函数类于伺服系统校正综合的希望特性，通过状态方程分析，用状态反馈方法对典型伺服系统固有部分进行补偿，使其尽量逼近要求的 ITAE 最优传递函数。

将标准传递函数写成状态方程形式

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \\ Y(t) = C^T X(t) = \omega_0^3 x_1(t) + 4.94\omega_0^2 x_2(t) + 2.97\omega_0 x_3(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中，

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\omega_0^3 & -4.94\omega_0^2 & -2.97\omega_0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} X(t) &= [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t)]^T \\ C^T &= [\omega_0^3 \quad 4.94\omega_0^2 \quad 2.97\omega_0] \end{aligned} \quad (7)$$

选定系统原始开环传递函数，由系统的速度环和转速-输出角积分环节串联一个 PID 调节器构成，如图 6 的前向通路，为使参数选择更为规范和简化，加入局部加速度反馈  $(1-T_2)s/K_\Omega$ ，使速度环传递函数为  $K_\Omega/(1+s)$ ，则原始开环传递函数为

$$\frac{K_p K_\Omega (1+T_1 s)(1+T_2 s)}{s^2 (1+s)}$$

选择参数， $K = K_p K_\Omega = \omega_0^3$ ， $K T_1 T_2 = 2.97\omega_0$ ， $K(T_1 + T_2) = 4.94\omega_0^2$ ，使固有闭环传递函数最接近标准最优传递函数。

代入参数值，原始闭环传递函数为

$$\phi_0(s) = \frac{2.97\omega_0 \cdot s^2 + 4.94\omega_0^2 \cdot s + \omega_0^3}{s^3 + (1+2.97\omega_0)s^2 + 4.94\omega_0^2 \cdot s + \omega_0^3} \quad (8)$$

则相应的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot u(t) \\ Y(t) = C^T \cdot X(t) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\omega_0^3 & -4.94\omega_0^2 & -(1+2.97\omega_0) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ C^T &= [\omega_0^3 \quad 4.94\omega_0^2 \quad 2.97\omega_0] \end{aligned} \quad (9)$$

比较状态方程(7)和(9)，差异在于状态  $X(t)$  的反馈系数，如果能够设法引入状态反馈  $x_3(t)$ ，则基本系统便具有标准 ITAE 三阶无静差最优控制结构了，如图 5 所示。

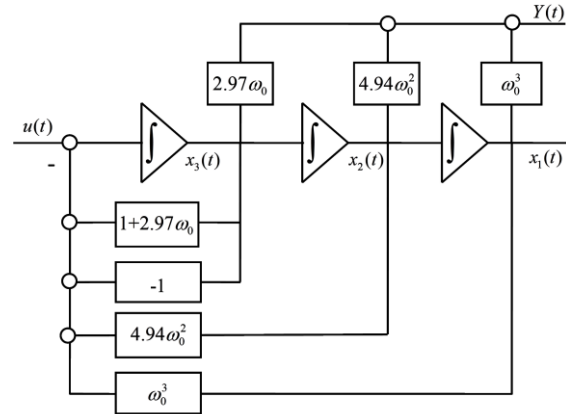


图 5 状态方程的模拟框图

Fig. 5 Analog diagram of the state space function

实际系统的状态并非全部都可以直接测量到，为避免状态重构的麻烦，利用输出  $Y(t)$  来实现上述状态反馈，由式(9)得：

$$\begin{aligned} Y(s) &= (\omega_0^3 + 4.94\omega_0^2 \cdot s + 2.97\omega_0 \cdot s^2) x_1(s) \\ x_3(t) &= \ddot{x}_1(t) \end{aligned}$$

则

$$x_3(s) = \frac{s^2 \cdot Y(s)}{2.97\omega_0 \cdot s^2 + 4.94\omega_0^2 \cdot s + \omega_0^3}$$

显见，只要在基本系统的闭环传递函数框图中引入上式的等效输出正反馈，即实现了 ITAE 最优三阶无静差系统。系统实现的闭环传递函数框图，如图 6 所示。

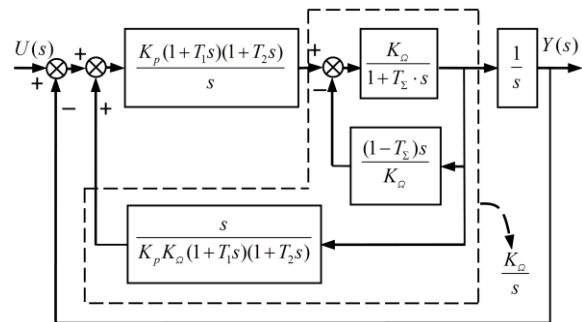


图 6 三阶 ITAE 最优III型控制系统的结构框图

Fig. 6 Block diagram of the three order ITAE optimum type-III control system

由图可见，系统实现简单，计算形式标准，为实现 ITAE 最优控制加了 2 个反馈通道：加速度负反馈和速度正反馈，在电气传动中均易实现。

从图 6 中可看出这种实现方案的实质：

速度正反馈环的引入形成伺服环路中第三个纯积分环节  $K/s$ ，(对一阶惯性环节的速度环引入正反馈，反馈系数是速度环放大倍数的倒数，即将该速度环改造为积分环节)。三阶 ITAE 最优的开环传递函数只有 3 个零极点，没有非零极点。若非零极点存在则无法实现这类 ITAE 最优；而速度环小时间常数，受物理限制，是不可能消除，有人尝试用零点抵消它，而另加入一个积分环节，证明不可行。在本文采用的设计方法中，将这个短时间常数改造为积分环节，成功实现了三阶 ITAE 最优控制。

加速度负反馈并非必须，实际上只影响了不变部分的增益，(减小了  $1/T$  倍)，使调节器参数有向大方向选择的余地，还在一定程度上减小参数变化的影响。

之所以以速度环形式作为位置伺服系统的不变部分，是因为它典型有普遍性，还因为在大角度调转的双模控制中，它是必须的。

② 直接断开速度环反馈

在实际工程系统中，如粘性阻尼很小时，对图 3 中所示的速度环结构，反电势反馈响应很慢，对电流环影响很小可略去，开环中就存在一个积分环节，若将速度环反馈断开，则原速度环便成了一个含有积分的环节，如图 7 所示。

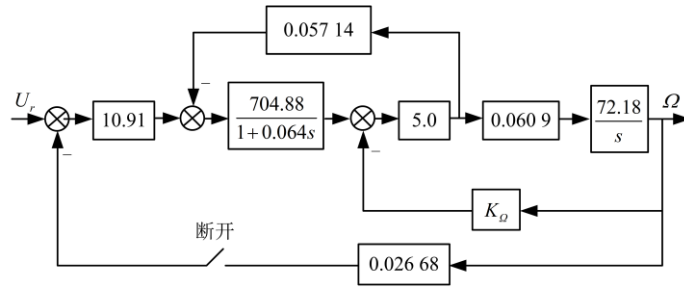


图 7 速度环断开后的结构

Fig. 7 Block diagram after disconnecting the speed loop

电流环的时间常数非常小，可近似为比例环节，此时断开了的速度环在线性工作区内的传递函数为

$$G(s) = 10.91 \times 17.16 \times 0.0609 \times \frac{72.18}{s} = \frac{823.0}{s}$$

可视为一个积分环节。前述方法加正反馈正是为了抵消速度环中原有的负反馈，也就相当于断开原有的负反馈。实际上这两种校正方法在粘性阻尼可以忽略时是一致的。

“断开”方法看来结构更简洁，但在系统粘性阻尼不可忽略时，用“断开”方法则得不到积分环节，而用“正馈”方法仍可得到积分环节。

有的系统，不设电流环，例如，研制过一个 20 W 的小功率伺服系统，为简化结构只有速度环，就不能用“断开”方法得积分，只能用“正馈”方法。因而，“正馈”法应用更普遍。

事实上，这种方法，还可用于各类非 ITAE 最优控制的Ⅲ型系统，根据不同的系统要求，对系统的开环传递函数的参数用频域法如伯德图等进行设计。而项国波先生及其团队对综合阶跃、斜坡、抛物线、力矩响等多个目标的 ITAE 最优控制方法做出开拓性成绩，使应用不局限于只能选取对单一输入

形式的标准 ITAE 最优传函，为频率法工程应用开辟了更广阔的天地，只是需考虑物理约束。

3.3 饱和效应与双模控制

在实际系统中，存在诸多引起输出饱和的因素，如控制器最大输出、电机最大电流和转速等，此时系统已工作在线性区，破坏了最优Ⅲ型系统的基本条件。随饱和程度加大可能出现误差收敛的拖尾，过大超调，过多震荡，甚至失稳。解决此问题的途径是在线性区内采用 ITAE 控制律，超出此范围自动转为  $\sqrt{e}$  控制律，通常称为的双模控制。

在 ITAE 型系统中的应用要规定的是位置误差线性区的范围，即超过多大的误差被认为是进入非线性区(大角度调转)，此时控制律要切换到  $\sqrt{e}$  控制，即速度环输入正比于位置误差的平方根，目的是保证位置误差近零时速度也近于零，做到按最大加速度启动、制动，无超调地到达协调点实现时间最优控制，但结构上要加入速度环，以减小速度跟踪的滞后；根据 ITAE 控制方式的不同，对“正馈”方法要切断正馈，对“断开”方法要接入负反馈。“正馈”方法保留了速度环，又用正馈抵消，看似多余，但对一个实际伺服系统而言，在大角度调转

时要实现双模，转速环并不能省略。因而“正馈”结构更为实用和方便。

### 4 数字化 ITAE 最优Ⅲ型系统结构与控制律实现

按前述设计方法，应用数字控制器实际构成了 4 种不同的数字伺服系统：7.5 KW-PWM 伺服系统；3.2 KW-FWM 伺服系统；7.5 KW-电机扩大机伺服系统和 20 W 小功率伺服系统，都实现了三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统，性能都达到预期。

#### 4.1 ITAE 最优Ⅲ型系 7.5KW 的直流系统

该系统是一个双模控制数字伺服系统。线性范围设定为(-24 mrad, +24 mrad)，即在该误差范围内，系统按 ITAE 最优三阶无静差工作，当-24 mrad<e(t)

< +24 mrad 时，系统工作在  $\sqrt{e}$  方式。用软件开关实现 2 种算法的切换。

工作在误差线性区：按 ITAE 控制律工作，正馈通道接入，使速度环变为积分环节，采用数字系统连续化设计方法，将控制器的连续传递函数变换到数字滤波器。据计算、仿真、实验表明，此伺服系统采用 100 Hz 以上的采样频率和双字节（16 位）运算，对主要的离散化方法均可达系统设计要求的。

工作在  $\sqrt{e}$  控制区（大角度调转）：正馈断开，恢复速度环功能，实现快速跟踪速度环。用查表方法代替位置误差平方根计算，减小运算时间，作为速度环输入，实现  $\sqrt{e}$  控制律。系统原理框图，如图 8 所示。

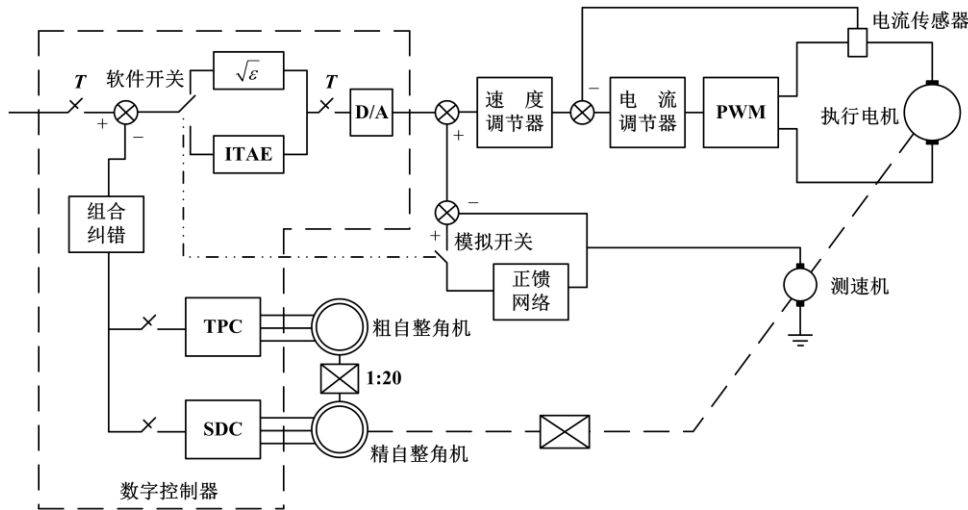


图 8 数字伺服系统原理图

Fig. 8 Block diagram of the digital servo system

数字控制器用 8 位单片机 8031，配以外围芯片即可。数字控制器以分时方式完成输入输出、控制运算、轴角编码、精粗组合纠错等功能；分别控制高低和方位系统；程序在汇编级完成，长度约 2 K，在 6 M 晶振下运行时间为 2 ms，程序简练，适于实

时工作。

#### 4.2 台架实验结果

在台架上进行了此伺服系统的动、静态试验，其测试曲线，如图 9 所示。

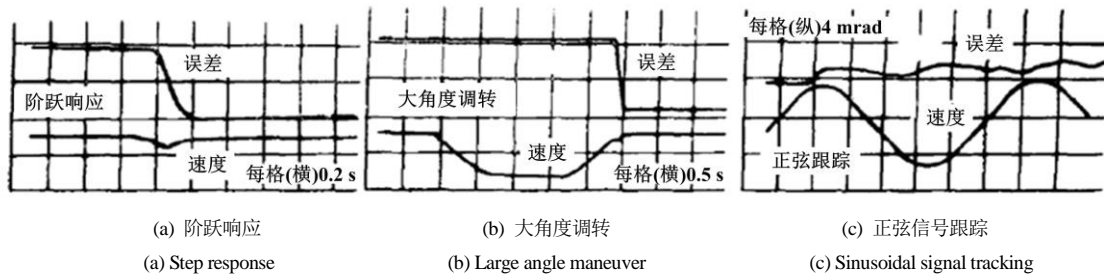


图 9 伺服系统性能测试曲线

Fig. 9 Servo system performance curve

① 系统具备优良的动态性能。系统在线性区的阶跃响应反映系统的动态品质，从实验波形可看出

系统 24 mrad 阶跃响应的过渡过程时间小于 0.4 s, 超调小于 10%, 单半波。作为比较, 某Ⅱ型电液数字伺服系统, 负载惯量、执行元件功率等级与本系统相近, 其 9 mrad 的阶跃响应性能是, 过渡过程时间小于 0.9 s, 超调量小于 35%, ITAE 三阶无静差系统在动态性能上的优越性是显著的。

伺服系统大角度调转的性能, 是武器伺服系统的重要战技指标, 由图 9 可见, 2 800 密位的调转在 3 s 内完成, 系统以最大加速能力 1 s 即达最大速度, 等速运行 1 s 后以最大减速能力在 1 s 内制动到零速, 几乎无超调。符合时间最优控制规律。

② 高精度跟踪性能。由实验波形中的正弦跟踪过程知, 当正弦主令信号对应的速度、加速度分别 1.40 rad/s、1.04 rad/s<sup>2</sup> 的规范时, 系统最大跟踪误差小于 4 密位 (4 mrad), 不加入二阶前馈, 数字式Ⅲ型 ITAE 最优伺服系统跟踪精度显著优于现有系统。

Ⅱ型伺服系统的高精度跟踪要依赖于复合控制的前馈信号, 且对前馈信号的精度、品质要求苛刻。而在雷达、电视等跟踪系统中, 前馈信号难以直接取得, 需要对目标的运动规律限定为等速直线, 经过复杂的坐标变换和运算得出。对此类系统, ITAE 三阶无差控制方式便具有无可争议的优越性。

## 5 三阶 ITAE 最优Ⅲ型数字伺服系统的装机实验

一个新设计研制的武器伺服系统, 由实验台架向实际控制对象的跨越, 是考核检查控制方法是否成功的最重要阶段, 这是因为实际被控对象是自行高炮的庞大的炮塔, 惯量大, 传动刚度受结构或设计限制, 其力矩特性、空回等因素不易在台架上模拟, 所有可能对伺服系统运行造成困难的问题, 在武器装备机械结构加工装配完成后, 往往不容更改地全都留给了伺服系统设计者去克服, 这是工程实践中更重要更困难的一部分内容。

### 5.1 结构谐振

为减少风险, 尽量采用成熟技术, 产品的第一控制方案采用传统的 PI 调节器, 速度、电流双闭环的Ⅱ型方案。该方案在台架上完全满足了系统的性能要求, 但安装在实际装置上后, 方位系统动态性能和稳态跟踪精度都很差, 完全不能满足性能要求。经分析, 由于产品在方位上惯量很大、机械传动刚度小, 系统惯量刚性比过大, 引起速度环结构谐振, 结构谐振频  $\omega_L = \sqrt{K_L / J_L}$  ( $K_L$  为折合在负载侧的等效刚度项,  $J_L$  为负载转动惯量), 该谐振频过于靠近系统的开环穿越频率, 这是伺服系统设计之大忌,

PI、双环Ⅱ型方案中视速度环为小时间常数的惯性环节, 作为伯德图校正综合设计的基础, 而实际的速度环, 经实测则是表现出一种特殊的振荡形式, 完全不同于实验台架上的惯性环节, 不能工作也是必然的。虽经采用陷波器等技术, 终因严重影响系统动态而作罢。由于进度要求急, 重新设计方位系统机械结构和传动已不可能, 产品研制面临颠覆性问题。

ITAE 最优Ⅲ型方法, 如前分析不再保留速度环, 因而也不依赖于速度环模型。这一原理上的优势使其有可能在出现上述结构谐振状态时正常工作, 因而, 改为在试验台架上成功运行的三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统的结构和控制算法, 结果喜出望外, 新算法在存在机械结构谐振时, 系统不仅工作正常, 而且全面优于所要求的性能指标。由于系统的固有部分设计是相同的, 故控制方式的转换并没有太大的工作量。

为什么Ⅲ型系统对低频结构谐振有较强的抑制能力呢? 对考虑了弹性耦合的系统传递函数, ITAE 最优Ⅲ型系统的标准开环传递函数要再乘以下式:

$$\left(1 + \frac{s^2}{\omega_L^2}\right) / \left(1 + \frac{s^2}{(m+1)\omega_L^2}\right)$$

式中,  $m$  为负载折算到电机轴的惯量与电机惯量之比。

我们把分子增加项称为反谐振环节(二阶微分环节), 分母增加项称为综合谐振环节。综合谐振环节的频率为, 可见反谐振环节的频率  $\omega_L$  低于综合谐振环节的频率  $\omega_s$ , 即反谐振峰对应频率低  $\sqrt{m+1}$  倍, 在综合谐振峰的前面, 反谐振环节给系统带来正的相位移, 其值最大为 +180° (忽略粘性阻尼时), 可以抵消由综合谐振环节给系统带来的负相位移, 并且反谐振环节的相角是随着角频率的增大而增大的。因此, 即使综合谐振峰穿过零分贝线, 将截止频率往后移, 系统还是有足够的相角裕度, 能保证系统有良好的动态性能。当然, 如果结构谐振频率太低, 以至于破坏了系统中频段的幅频特性, 系统的性能将会变差。

### 5.2 零位摆动

多年来, Ⅱ型系统在多个武器系统中得到应用, 它是二阶无静差系统, 速度跟踪无差, 较早期开发的产品进了一步。由于系统机械传动不可避免的齿隙, 存在固有的极限环, 其表现为零位摆动问题, 虽可以控制在精度要求范围内, 却给系统检测和全武器系统标定带来不便, 是明显的缺点。ITAE 最优

控制,在提高了一阶无静差度的前提下,具有无零位摆动的优点。

### 5.3 对开环增益变化的鲁棒性

自行高炮以主柴油机直接带动电机扩大机,因而在行进间转速波动很大,这实际上是系统开环增益的变化,其后果是采用PI+双环II型方案的高低伺服系统在车速较低,对应柴油机中速运转时,即产生低频大幅振荡,不能正常工作;而按ITAE最优III型算法设计的方位系统,在同样状态下工作正常,两种类型系统的表现对比鲜明,ITAE最优III型算法带来的这个优点对自行高炮行进间瞄准射击很有意义,原因分析如下:

电机扩大机转速大幅下降的结果是放大系数降低,对具有速度环的II型系统,电机扩大机是速度闭环的一个环节,造成速度环开环增益减小,由于速度环的关键小时间常数近似反比于开环增益,因而关键小时间常数随转速降低而加大,速度环闭环增益由于负反馈的作用为 $K/(1+K\beta)$ ,变化相对较小,这样位置环开环增益变化相对较小,即系统的开环传递函数Bode图的中频段显著变短而增益却下降不多,可能造成-40 dB 过零、稳定储备减小,震荡度加大,直至出现不稳定、低频等幅震荡。

前已述及,在ITAE最优III型系统中,开环增益 $K = \omega_0^3$ 只影响微分算子的倍数。这就 $\omega_s = \sqrt{m+1} \cdot \omega_L$ 说明了的动态响应中, $\omega_0$ 会影响响应时间,包括上升时间、调节时间等,而对系统的振荡幅度没有影响。即使系统的开环放大倍数减小,即 $\omega_0$ 减小,响应速度变慢,调节时间变长,跟踪精度降低,但超调量几乎不变,稳定性不变,仍可正常工作。

由此得出ITAE最优III型系统的另一大优点:系统的稳定性不受开环增益的影响,对开环增益超强的鲁棒性,在很多应用中都非常重要。

### 5.4 对功率放大器动态响应要求

时间常数是功率放大器的最重要参数,对系统动态性能影响很大,瑞士电机扩大机时间常数就很小,仅20 ms,而本系统采用的是国产电机扩大机zKK600/1 000,时间常数约达60 ms~80 ms,性能相差甚远。正由于新系统的特殊结构,由实验结果可见,可以做到以低水平的功率放大器,实现性能优良的伺服系统。

## 6 结 论

本文论述的III型ITAE三阶最优伺服系统由实际装备的需求提出,研究的控制结构和实现方法立足于实际工程,考虑了系统的环节、通用结构、非线性、负载特性,具有实用和通用特点。它的如下优点:不依赖前馈而有较高精度;快速而超调小的优良动态性能;对较低机械结构谐振的容忍程度;对功率放大器动态性能的宽松要求,稳定性不受开环放大倍数影响;无零位摆动等;解决了国家重点项目系统定型中的多个技术关键,因而成功地应用于实际产品中。就我们所知,该系统是国内外第一个实现的III型ITAE最优伺服系统。

## 参考文献(References)

- [1] Graham D, Lathrop R C. The synthesis of optimum transient response criteria and standard forms[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, 1953, 72 (5): 273-288.
- [2] Xiang G B, Qian Y Q. X-Q adaptive PID controller and its application to multiobjective control system with satisfied performance[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(3): 380-384.
- [3] 钱业青, 项国波. 纯时滞两次ITAE优化控制系统的背驰定律[J]. 信息与控制, 2000, 29(3): 211-218.  
Qian Y Q, Xiang G B. A law of run in the opposite direction for the twice ITAE optimum control in the system with dead-time[J]. Information and Control, 2000, 29(3): 211-218.
- [4] 项国波. ITAE最佳控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.  
Xiang G B. ITAE optimum control[M]. Beijing: China Machine Press, 1986.
- [5] 杨益群, 项国波, 赵杨. 线性多目标优化控制系统的设计[J]. 电气传动, 2007, 35(7): 35-38.  
Yang Y Q, Xiang G B, Zhao Y. Design method of the linear multi-objective optimum control[J]. Electric Drive, 2007, 35(7): 35-38.
- [6] 杨益群, 项国波. 新的ITAE最佳传递函数标准型[J]. 信息与控制, 1997, 26(4): 259-265.  
Yang Y Q, Xiang G B. The new standard forms of ITAE optimum transfer function[J]. Information and Control, 1997, 26(4): 259-265.
- [7] 杨益群, 项国波. 单变量时滞系统优化控制[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(5): 125-129.  
Yang Y Q, Xiang G B. Modern optimum control theory for SISO system with delay[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(5): 125-129.
- [8] 项国波. 线性负反馈系统ITAE最佳调节[J]. 电气传动, 1977(2): 18-42.  
Xiang G B. Linear negative feedback system ITAE optimum control[J]. Electric Drive, 1977(2): 16-40.