

文章编号: 1001-0920(2001)01-0072-04

基于解耦控制的同步传动技术的应用研究

郭庆鼎, 唐光谱

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 对龙门移动式镗铣床同步传动不一致性问题进行研究, 用两台直线电机作为龙门柱纵向进给的传动机构, 分析了扰动与输出之间存在的耦合, 设计出一种解耦控制器, 并用龙门框架不平行时所产生的应力变化进行补偿。仿真结果表明, 系统性能良好, 并能快速实现同步运行。

关键词: 同步传动; 解耦补偿控制; 直线电机; 龙门移动式镗铣床

中图分类号: TM 921

文献标识码: A

Research on Synchrodrive Technology Based on Decoupling Control

GUO Qing-ding, TAN G Guang-pu

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: The noncoincidental problem of synchrodrive for gantry-moving milling machines is studied. Two linear motors are applied as traversing drive mechanism of gantries. The coupling between disturbances and outputs is analyzed. A decoupling controller is designed. Tension compensation is used for realizing synchrodrive. Simulation results show system performance.

Key words: synchrodrive; decoupling compensation control; linear motors; gantry-moving milling machine

1 引言

随着高速高精度镗铣加工技术的发展, 常常要对大型整体零件和几何形状复杂的型面进行加工。由于机床运动部件重量大, 难以获得高的加速度; 同时因受工作台长度的限制以及工作场所的要求, 对大型复杂型面的高速加工已远远不能满足要求。对于高速龙门移动式镗铣床, 由于大型移动部件并不总是形成对称结构和对称受力, 以及运行中的各种不确定性扰动, 尽管龙门柱两边采用完全相同的传动机构, 但还是不能保证龙门框架移动的一致性。这

种不一致性所产生的机械耦合, 可能使龙门框架或驱动元件受到损坏。因此, 如何消除龙门柱偏移或扭斜所产生的机械耦合, 保证加工精度, 避免机构损坏, 是这类机床至今尚未很好解决的一个重要问题。

本文在同步传动的驱动元件中采用直线电机, 以发挥其高速动态响应能力, 实现快速同步。双电机同步传动系统的结构原理如图 1 所示。

2 直线电机数学模型

直线交流永磁同步电动机(LPM SM)是直接将

收稿日期: 1999-12-24; 修回日期: 2000-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50075057)

作者简介: 郭庆鼎(1940—), 男, 辽宁盖县人, 教授, 从事交流伺服系统、数控技术等研究; 唐光谱(1972—), 男(满族), 吉林省吉林市人, 硕士生, 从事交流伺服系统、数控技术等研究。

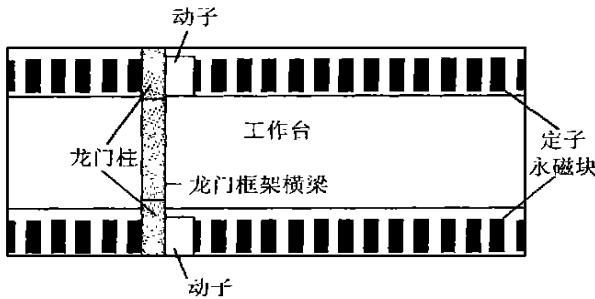


图 1 系统结构原理

交流电能转换为直线运动的推力装置^[1], 其基本结构及直线式交流伺服系统的结构和原理详见文献[1~3]。这里仅给出其简化数学模型

$$F_e = \frac{\pi}{\tau} \phi i_q = M \frac{dv}{dt} + Bv + F_l + F_d \quad (1)$$

$$s = vdt \quad (2)$$

其中, τ 为极距, M 为动子质量, B 为粘滞摩擦系数, F_e 为电磁推力, F_l 为负载阻力, F_d 为端部效应产生的阻力, s 为动子机械位移, v 为动子线速度, ϕ 为永磁体有效磁通。

3 解耦补偿控制器设计

两套伺服系统输出通过机械方式耦合在一起, 按同一速度给定信号运动, 并无电气参数上的直接耦合关系。由于作用在两台电机上的负载不可能严格相同, 所以当两台电机上的负载处于动态变化时, 便引起了电机速度发生变化, 从而引起位置不同步。为使伺服系统回到同步状态, 需要把机械位置的不同步转化为电气控制变量的变化, 通过对控制变量的调整, 使其恢复到同步状态。

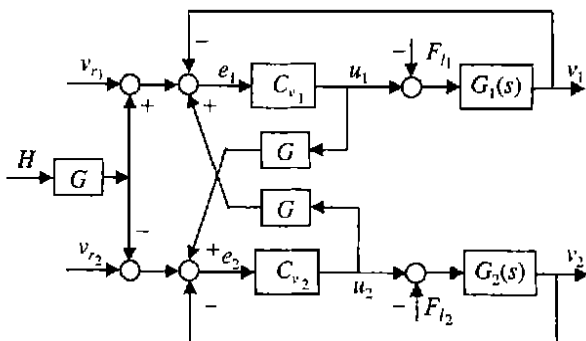


图 2 同步传动原理

3.1 解耦控制器设计

如图 2 同步传动原理所示, H 是不同步时与负载扰动有关的量, F_{l1} 和 F_{l2} 是外部扰动, 令 H, F_{l1} 和 $F_{l2} = 0$; u_1 和 u_2 是控制变量, $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 是控制对象, C_{v1} 和 C_{v2} 是调节器, 其中, $C_{v1} = C_{v2} = C_v$, $G_1(s) = G_2(s) = G_{p0}$ 则系统构成一个完全对称的耦合系统, 两个系统控制变量通过 G 相通, 由图 2 有

$$\begin{cases} e_1 = v_{r1} - v_1 + u_2 G \\ u_1 = e_1 C_{v1}, \quad v_1 = u_1 G_1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} e_2 = v_{r2} - v_2 + u_1 G \\ u_2 = e_2 C_{v2}, \quad v_2 = u_2 G_2 \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)和(4), 消去 e_1, e_2, u_1 和 u_2 , 可得

$$\begin{cases} v_1 = \frac{W [(1+W)v_{r1} + Nv_{r2}]}{(1+W)^2 - N^2} \\ v_2 = \frac{W [Nv_{r1} + (1+W)v_{r2}]}{(1+W)^2 - N^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $W = C_v G_p, N = C_v G_0$ 。如果 $v_{r1} = v_{r2}$, 则

$$\begin{cases} \frac{v_1}{v_{r1}} = \frac{W}{1+W-N} \\ \frac{v_2}{v_{r2}} = \frac{W}{1+W-N} \end{cases} \quad (6)$$

对于控制变量对称耦合系统, 由于系统的结构特性是对称的, 因此对于输出反应而言, 系统结构所起的作用对每一个输出反应均相同。此时, 系统可看作两个完全相同的单回路系统, 但它考虑了耦合作用, 即 N 中包含 G 。这样便实现了无差控制^[4], 即同步控制。

考虑外部负载扰动, 设 F_{l1} 和 F_{l2} 为外部扰动, 这样便构成一个多输入多输出系统。当 F_{l1} 和 F_{l2} 单独作用时, 系统输出与输入之间的关系如图 3 所示。由图得出

$$\begin{cases} e_1 = -F_{l1} - GC_{v1}C_{v2}v_2 - C_{v1}v_1 \\ v_1 = G_1e_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} e_2 = -F_{l2} - GC_{v1}C_{v2}v_1 - C_{v2}v_2 \\ v_2 = G_2e_2 \end{cases} \quad (8)$$

即

$$\begin{cases} (1 + G_1C_{v1})v_1 + G_1GC_{v1}C_{v2}v_2 = -G_1F_{l1} \\ (1 + G_2C_{v2})v_2 + G_2GC_{v1}C_{v2}v_1 = -G_2F_{l2} \end{cases} \quad (9)$$

由此得到

$$\begin{cases} v_1 = \frac{[-G_p(1+W)F_{l1} + W^2GF_{l2}]}{(1+W)^2 - W^2N^2} \\ v_2 = \frac{[W^2GF_{l1} - G_p(1+W)F_{l2}]}{(1+W)^2 - W^2N^2} \end{cases} \quad (10)$$

同理,可求出当 H 单独作用时系统输出与输入之间的关系

$$\begin{cases} v_1 = \frac{W}{1+W+N}GH \\ v_2 = -\frac{W}{1+W+N}GH \end{cases} \quad (11)$$

系统在给定量、扰动量、同步检测量作用下,其输出和输入之间的关系如下

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{l1} \\ F_{l2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} H \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} A_{11} = (1+W)S, & A_{12} = NS \\ A_{21} = NS, & A_{22} = -(1+W)S \\ B_{11} = -G_p(1+W)U \\ B_{12} = W^2GU, & B_{21} = W^2GU \\ B_{22} = -G_p(1+W)U \\ K_1 = ZG, & K_2 = -ZG \\ S = \frac{W}{(1+W)^2 - N^2} \\ U = \frac{1}{(1+W)^2 - W^2N^2} \\ Z = \frac{W}{1+W+N} \end{cases}$$

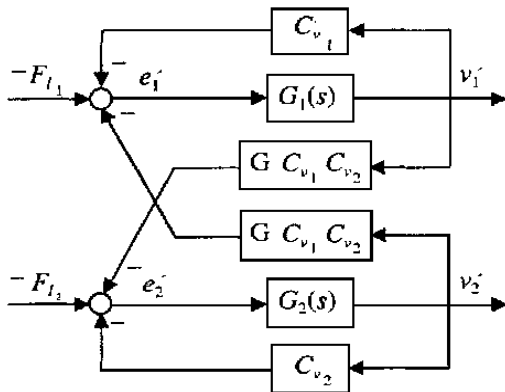


图3 扰动输入输出关系

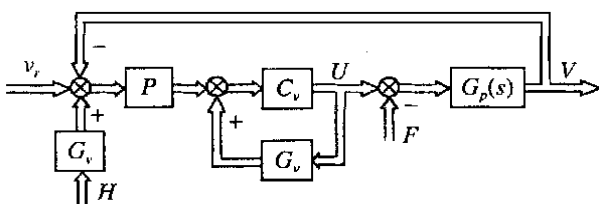


图4 系统结构

由式(12)看出,扰动对系统输出存在着耦合,可用传统方法将其变为对角阵或单位阵来实现解耦。这里采用前馈解耦,取单位阵,系统结构如图4所示。其中 V_r 为给定量, V 为输出量, P 是解耦阵, $F = [F_{l1} \ F_{l2}]$ 是扰动, H 是应力检测量,而

$$H = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}, \quad C_v = \begin{bmatrix} C_{v1} & 0 \\ 0 & C_{v2} \end{bmatrix}$$

$$G_p = \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix}, \quad G_v = \begin{bmatrix} 0 & G \\ G & 0 \end{bmatrix}$$

由图4可得

$$\begin{cases} U = [(V_r - V)P + PG_vH + G_vU]C_v \\ V = (U - F)G_p \end{cases} \quad (13)$$

进一步得

$$V = R G_p (I - C_v G_v)^{-1} P C_v V_r + R G_p (I - C_v G_v)^{-1} P C_v G_v H - R G_p F \quad (14)$$

其中, I 是单位阵, $R = [I + G_p (I - C_v G_v)^{-1} P C_v]^{-1}$, 当 $P = (I - G_v C_v) (C_v G_p)^{-1}$ 时,系统实现解耦。代入 G_v, C_v, G_p , 得

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{v1}G_1} & \frac{-G}{G_2} \\ \frac{-G}{G_1} & \frac{1}{G_{v2}G_2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

从而得

$$V = V_r - G_p F + G_v H \quad (16)$$

3.2 补偿控制原理

由式(16)看出,解耦后系统变成两个单回路,可以分别加以控制。但由于负载扰动不同,难以实现同步,并且当负载扰动时,只能通过检测不同步时龙门横梁产生的应力变化,补偿负载扰动产生的速度变化,从而实现同步。

设 F_1 和 F_2 是两台电机的推力,当发生不同步时, $F_1 \neq F_2$ 。设 $F_1 > F_2$, 则

$$F_1 = u_1 - F_{l1}, \quad F_2 = u_2 - F_{l2} \quad (17)$$

$$Q = (F_1 - F_2)L = [\Delta u - (F_{l1} - F_{l2})]L \quad (18)$$

其中, Q 为力偶矩, L 为龙门横梁的长度,正应力 σ 为

$$\sigma_{max} = Q y_{max} / J_z \quad (19)$$

梁截面上最大正应力发生在离中性轴最远处, y_{max} 为最远点到中性轴的距离, J_z 为惯性矩。引用记号

$$W_z = J_z / y_{max} \quad (20)$$

则

$$\sigma_{max} = Q / W_z \quad (21)$$

其中 W_z 称为抗弯截面模量,它与截面的几何形状有关,其量纲为(长度)³。矩形截面(高为 h , 宽为 b)的抗弯截面模量为

$$W_z = \frac{J_z}{h/2} = \frac{bh^3/12}{h/2} = \frac{bh^2}{6} \quad (22)$$

设检测到的龙门横梁应力为 τ , 则

$$\tau = k_1 \sigma_{\max} = \frac{k_1 Q}{W_z} \quad (23)$$

其中 k_1 为检测放大系数。将式(18)代入(23), 得

$$\begin{cases} \tau = \frac{k_1}{W_z} L [\Delta u - (F_{l_1} - F_{l_2})] \\ \tau - \frac{k_1}{W_z} L \Delta u = - \frac{k_1}{W_z} L (F_{l_1} - F_{l_2}) \end{cases} \quad (24)$$

由于 Δu 是系统内部可测量, 则

$$T = k(F_{l_1} - F_{l_2}) \quad (25)$$

其中, $T = \tau - \frac{k_1}{W_z} L \Delta u$, $k = - \frac{k_1}{W_z} L$ 。令 $m_1 = T$, $m_2 = -T$, 代入式(16), 则

$$\begin{aligned} v_1 - v_2 &= G_p(F_{l_1} - F_{l_2}) + G(m_2 - m_1) = \\ &(-G_p - 2Gk)(F_{l_1} - F_{l_2}) \end{aligned} \quad (26)$$

当 $2Gk = -G_p$ 时, 通过间接检测负载扰动, 对速度变化加以补偿, 从而实现同步。

4 系统仿真

对所提出的同步传动理论, 采用本课题组研制的直线电机进行系统仿真研究。系统参数为: $M_n = 11.0\text{kg}$, $B_n = 8\text{ON} \cdot \text{s/m}$, $K_{fn} = 28\text{5N/A}$, $F_{em} = 300\text{N}$, $v_n = 1.0\text{m/s}$

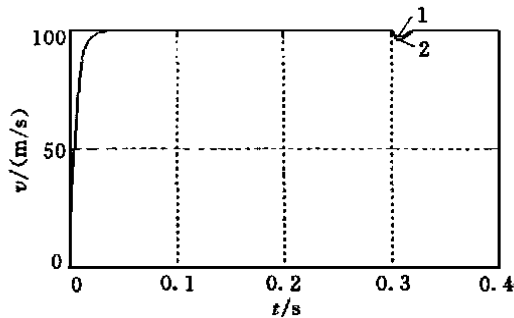


图 5 系统的阶跃响应

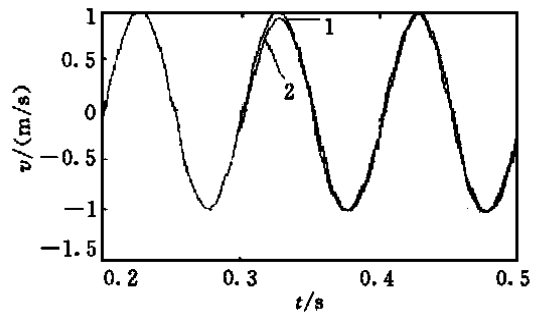


图 6 系统的正弦信号速度响应

当 $t = 0.3\text{s}$ 时, 同时加入不同的持续扰动 ($F_{l_1} = 200\text{N}$, $F_{l_2} = 150\text{N}$), 系统的阶跃响应如图 5 所示。由图可见, 虽然输入不同的扰动, 但系统速度很快趋于一致。当 $t = 0.3\text{s}$ 时, 对系统加入不同的扰动 ($F_{l_1} = 100\text{N}$, $F_{l_2} = 50\text{N}$), 系统的正弦信号速度响应如图 6 所示。从仿真结果可以看出, 系统能快速恢复同步。

5 结 语

本文对龙门移动式镗铣床中双直线电机同步传动问题进行了研究, 对龙门柱在运行过程中不平衡负载产生的耦合进行了分析, 并设计了解耦补偿控制器。仿真结果表明, 系统响应速度快, 抗扰动能力强, 并能快速恢复到同步状态。

参考文献:

- [1] 孙宜标, 郭庆鼎, 石丽梅 基于推力观测器的直线式交流伺服系统滑模变结构控制[J] 电工技术学报, 1998, 13(2): 1-5
- [2] Mitchell O sak Linear motors drive motion control[J] Design Engineering, 1998, 44(10): 17-19
- [3] 郭庆鼎, 王成元, 周美文, 等 直线交流伺服系统的精密控制[M] 北京: 机械工业出版社, 2000
- [4] 刘晨辉 多变量过程控制系统解耦理论[M] 北京: 水利电力出版社, 1984