

# 机床伺服电机的选型方法分析

肖 剑<sup>1</sup>, 马自勤<sup>2</sup>

(1. 秦川发展技术研究院, 陕西 宝鸡 721009; 2. 大连交通大学, 辽宁 大连 116028)

**摘要:** 重点介绍机床行业伺服电机的选型分析方法, 从机床负载的运动状态和惯量匹配的角度出发, 分析伺服电机的各项参数确定的计算方法, 通过在多种机床产品上的应用验证, 达到了机床所要求的位置精度(定位、重复定位精度)和伺服响应特性(低速、高速、空载、负载)的目的, 从而实现机床伺服驱动系统的优化配置。

**关键词:** 伺服电机; 闭环控制; 惯量匹配

中图分类号: TP29

文献标识码: A

文章编号: 1006-4414(2011)04-0048-02

## The selection method of servo motor in the field of machine tool

Xiao Jian<sup>1</sup>, Ma Zi-Qin<sup>2</sup>

(1. Qinchuan technology research institute, Baoji Shanxi 721009, China;

2. Dalian Jiaotong university, Dalian Liaoning 116028, China)

**Abstract:** The selection method of servo motors in machine tool industry is introduced in this paper. From perspective of the motion state and inertia match of the load of machine tools, the calculation method of the determination of working parameters of servo motors is analyzed. Through a variety of applied verification of machine tools in our company, the machine position accuracy required (positioning, repeat positioning accuracy) and servo response characteristics (low-speed, high-speed, no load, load) are reached, the optimal allocation of servo drive system on machine tools are achieved.

**Key words:** servo motor; closed-loop control ;inertia matching

## 2 电机额定转矩匹配

根据伺服电机的工作曲线, 负载转矩应满足: 当机床作匀速运行时, 在整个运行过程中, 施加在伺服电机轴上的负载转矩应在电机的连续额定转矩范围内, 即在工作曲线的连续工作区。以图 1 所示的伺服进给驱动系统为例, 该系统折算到电机轴上的负载转矩计算如下:

$$T_L = \frac{Z_1}{Z_2} \left( K \frac{F_{so} \cdot L}{2\pi\eta_1} + \frac{F \cdot L}{2\pi\eta_2\eta_1} + \frac{T_B}{\eta_1} \right) + T_A \quad (2)$$

式中:  $T_L$  为折算到电机轴上的负载转矩 ( $N \cdot m$ ) ;  $K$  为滚珠丝杠的扭矩系数,  $K = 0.05 / \sqrt{\tan \beta}$  ,  $\beta$  为滚珠丝杠的导程角;  $[1] F_{so}$  为滚珠丝杠螺母的预压负载;  $F$  为轴向移动工作台时所需的力 ( $N$ ) ;  $T_B$  为滚珠丝杠支撑轴承摩擦转矩之和 ( $N \cdot m$ ) ;  $\eta_2$  为滚珠丝杠的正向效率 (将旋转运动变为直线运动);  $\eta_1$  为齿轮的传动效率;  $T_A$  为电机同轴齿轮支撑轴承摩擦转矩之和 ( $N \cdot m$ ) 。

$$F = F_c + \mu(W + F_{sf}) \quad (3)$$

式中:  $F_c$  为切削反作用力 ( $N$ ) ;  $W$  为工作台及工件等滑动部分总重量 ( $N$ ) ;  $F_{sf}$  为由于切削力使工作台施加到导轨上的正压力 ( $N$ ) ;  $\mu$  为摩擦系数。当无切削时, 则  $F = \mu W$ ,  $T_f = T_L$ 。按满足下式的条件选伺服电

## 1 电机额定转速匹配

从负载的运动状态和惯量匹配角度出发, 按照速度、扭矩和惯量匹配原则介绍了机床伺服电机的选型计算, 从而达到机床伺服系统的优化配置。

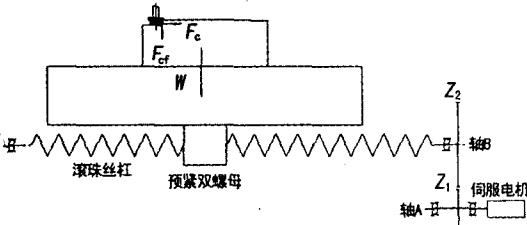


图 1 伺服进给驱动系统简图

伺服电机选择首先确保机床的快进速度, 使其折算到电机主轴的转速应严格控制在电机的额定转速之内。如图 1 所示, 当工作台以最大直线速度  $V_{max}$  ( $m/min$ ) 移动时, 伺服电机的实际转速  $n$  应小于其额定转速  $n_m$  ( $r/min$ ) 。

$$n = \frac{V_{max}}{L} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \leq n_m \quad (1)$$

式中:  $L$  为丝杠导程 ( $m$ ) ;  $Z_1$  为齿轮 1 的齿数;  $Z_2$  为齿轮 2 的齿数。

动机：

$$T_L \leq T_e \quad (4)$$

式中： $T_e$  为伺服电动机的额定转矩； $T_f$  为负载的摩擦转矩。

### 3 电机惯量匹配原则及负载惯量的计算

为了保证切削轮廓形状精度和低的表面加工粗糙度，要求数控机床具有良好的快速响应特性。负载惯量与电机的响应和快速移动 ACC/DEC 时间息息相关。因此，加在电机轴上的负载惯量的大小，将直接影响电机的灵敏度以及整个伺服系统的精度。当负载惯量 5 倍以上时，会使转子的灵敏度受影响，电机惯量  $J_M$  和负载惯量  $J_L$  必须满足：

$$1 \leq J_L/J_M < 5 \quad (5)$$

由电机驱动的所有运动部件，无论是旋转运动的部件，还是直线运动的部件，都成为电机的负载惯量。电机轴上的负载总惯量可以通过计算各个被驱动的部件的惯量，并按下述一定的规律将其相加得到。

#### 3.1 惯量计算基本方法

##### (1) 圆柱体惯量

如滚珠丝杠，齿轮等围绕其中心轴旋转时的惯量计算：

$$J = \frac{\pi \gamma}{32} D^4 L \quad (6)$$

式中： $\gamma$  为材料的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $D$  为圆柱体的直径 ( $\text{m}$ )； $L$  为圆柱体的长度 ( $\text{m}$ )。

有台阶的回转体，可按每个台阶分别计算后相加。因此，上式可写成：

$$J = \frac{\pi \gamma}{32} (D_1^4 L_1 + D_2^4 L_2 + \dots + D_i^4 L_i) \quad (7)$$

##### (2) 轴向移动物体的惯量

工件和工作台等轴向移动物体的惯量计算：

$$J = \frac{W}{g} \cdot \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2 \quad (8)$$

式中： $W$  为直线移动物体的重量 ( $\text{N}$ )； $L$  为电机每转一转时物体在直线方向移动的距离 ( $\text{m}$ )，若电机与丝杠直联，则  $L$  为丝杠导程  $L_0$ 。

##### (3) 圆柱体围绕某一中心运动时的惯量计算

如图 2(a) 所示，属于这种情况的例子：如大直径的齿轮，为了减少惯量，往往在圆盘上挖出分布均匀的孔这时的惯量可以这样计算：

$$J = J_0 + \frac{W}{g} R^2 \quad (9)$$

式中： $J_0$  为圆柱体围绕其中心线旋转时的惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $W$  为圆柱体的重量 ( $\text{N}$ )； $R$  为旋转半径 ( $\text{m}$ )。

##### (4) 齿轮传动机构的惯量计算：

如图 2(b) 所示，负载惯量  $J_0$  折算到电机轴上的

计算方法如下：

$$J = J_0 (Z_1/Z_2)^2 \quad (10)$$

式中： $Z_1, Z_2$  为齿轮的齿数。

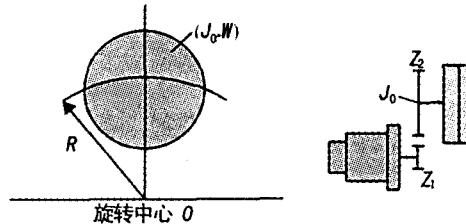


图 2 圆柱体围绕某中心运动和齿轮传动机构简图

#### 3.2 负载惯量计算

根据上述惯量基本公式，折算到电机轴上的负载惯量  $J_L$  为（以图 1 为例）：

$$\begin{aligned} J_L &= J_{G1} + J_{Ac} + J_{Ab} + (Z_1/Z_2)^2 \\ &\quad [(J_{G2} + J_{Bc} + J_{Bb} + J_s) + W/g(L/2\pi)^2] \end{aligned} \quad (11)$$

式中： $J_{G1}$  为齿轮 1 的惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $J_{Ac}$  为 A 轴上联轴节的惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $J_{Ab}$  为 A 轴上轴承内圈的惯量之和 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $J_{G2}$  为齿轮 2 的惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $J_{Bc}$  为 B 轴上联轴节的惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $J_{Bb}$  为 B 轴上轴承内圈的惯量之和 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $J_s$  为 B 轴上轴承内圈的惯量之和 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )。

#### 4 伺服电机负载转矩选择匹配

(1) 按线性加速时的最大转矩计算如下：

$$T_a = T_{La} \pm T_f = \frac{2\pi n_m}{60} \frac{1}{t_a} (J_M + J_L) \pm T_f \quad (12)$$

式中： $n_m$  为电机的稳定速度 ( $\text{r/min}$ )； $t_a$  为加速、减速时间 ( $\text{s}$ )，一般按  $t_a \approx 3/K_s$  取  $150 \sim 200 \text{ms}$ ； $K_s$  为系统的开环增益，通常取  $8 \sim 25(1/\text{s})$ ，加工中心一般取  $K_s = 20$  左右； $J_M$  为电机转子惯量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $K_s$  为位置伺服开环增益；当加速度与速度方向一致，取 +，否则，取 - <sup>[2]</sup>。

若  $T_a$  小于伺服电机的最大转矩  $T_{max}$ ，则系统能以所取时间常数进行加速和减速。

(2) 按指数曲线加速，速度为零时的转矩  $T_0$  由下式计算：

$$T_0 = \frac{2\pi n_m}{60} \frac{1}{t_e} (J_M + J_L) \quad (13)$$

式中： $t_e$  为指数曲线加速时间常数。

若是  $T_0$  小于伺服电机的静止扭矩  $T_s$ ，则系统能以指数曲线进行加速和减速。

##### (3) 按电机转矩均方根值选择电机

(下转第 52 页)

40ppm，平均每百小时增高4.7ppm，铜含量的绝对值明显地高于铁元素含量(28.4ppm)和铅元素含(24.8ppm)，达到了历史最高值，且其增长速率也高于铁、铅两种元素。

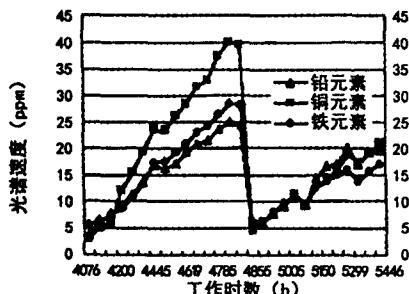


图1 主机磨损趋势图

通常铜元素的含量及其增长率都远低于铁、铅元素，因为在柴油机的摩擦副材质中大部分为铁和钢的成分，而主轴瓦及连杆轴瓦等含有较高的铅成分，铜质部件相对较少。经过分析认为有可能存在故障隐患，于是更换了主机润滑油，清洗并检查滤器，以改善润滑状态；有针对性地进行了阶段性集中检修；同时加大了燃气轮机的使用强度。换油后，从监测结果看，各主要磨损元素的含量的绝对值都有很明显的回落。到5446h，换油后运行了591h。润滑油中铜元素含量由5.8ppm上升到20.9ppm，这一段铜

元素浓度增长速率略变缓，平均每百小时增高2.5ppm，浓度值仍然略高于铁、铅元素。

## 4 结论

(1) 通过对主柴油机的润滑油液跟踪测试分析，监测到主要摩擦副的磨损趋势，主柴油机以铜质摩擦副(如连杆小端等)磨损为主，以轴瓦磨损为辅，主机存在异常磨损的可能。

(2) 在船舶远航中，将润滑油液监测技术应用于主柴油机的状态监测是行之有效的方法，提高了监测的及时性和有效性。

## 参考文献：

- [1] Schwartz S E, Smolenski D J. Development of automatic engine oil-change indicator system[J]. SAE technical paper series, 1987(4): 32-35.
- [2] 陈铭,王成森.车用内燃机润滑系统的状态监测技术[J].内燃机工程,2000(3):64~70.
- [3] SATO A. Electrical conductivity method for evaluation of oxidative degradation of oil Lubricants [J]. Lubrication engineering, 1992(7):539-544.
- [4] Johnson M D, Korcek S. In-service engine oil condition monitoring opportunities and challenges [J]. SAE Technical Paper Series, 1994(2):76-79.
- [5] 吕晓军,伍昕,景敏卿,等.润滑油中磨粒浓度的动态过程研究[J].润滑与密封,2003(1):15-17.

(上接第49页)

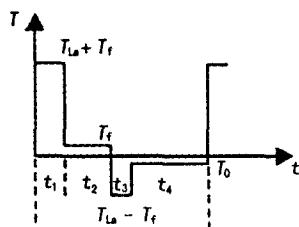


图3 扭矩与时间关系图

当机械系统作频繁启动、制动时(如图3)，必须检查电机是否过热，因此需计算在一个周期内电机转矩的均方根值，并且应使此均方根值小于电机的连续转矩。电机的均方根值由下式计算：

$$T_{\text{rms}} =$$

$$\sqrt{\frac{(T_{La} + T_f)^2 t_1 + T_f^2 t_2 + (T_{Ld} - T_f)^2 t_3 + T_0^2 t_4}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}} \quad (14)$$

式中： $t_1$  为加速时间； $t_2$  为匀速时间； $t_3$  为减速时间； $t_4$  为静止时间。

## 5 结语

根据机床伺服轴的负载与运动特性，结合上述伺服电机的选型计算，所选伺服电机在公司磨齿机YK73200和高精度镗铣床QJG001产品上得到了应用验证，并实现了公司产品所要求的运动特性和位置精度。

## 参考文献：

- [1] NSK 技术研发组. 精机产品 [M]. 东京:日本精工株式会社, 2009.
- [2] 廉元国,张永洪. 加工中心设计与应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 1995