

# 直流力矩电机在精密跟踪雷达中的应用\*

## The Applications of DC Torque Motors in Precision Tracking Radar

南京电子技术研究所 (南京 210013) 尹翔陵 王爱祥

**【摘要】** 简要介绍了直流力矩电机的工作原理,详细讨论了直流力矩电机的特点及其在精密跟踪雷达伺服系统中的应用。

**关键词:** 雷达; 直流伺服系统; 力矩电机

**【Abstract】** This paper introduces the principles of DC torque motors, then discusses the characters and applications of DC torque motors in Precision Tracking Radar Servo System.

**Keywords:** radar, DC servo system, torque motors

### 1 引言

到目前为止,在精密跟踪雷达中,直流伺服系统仍占主导。其执行元件或是高速伺服电机或是力矩电机。究竟选择何种执行元件,主要依据雷达总体对伺服系统提出的技战术指标要求。笔者参加研制的某精密跟踪雷达主要用于对高空卫星轨道的测量和低速快速目标(靶场试验)的跟踪测量。伺服系统在雷达中担负着对目标的角度截获和角度跟踪任务。根据目标特性,雷达总体对伺服系统的调速范围、低速性能、加速度等性能指标均提出了较高的要求。如:工作角速度从  $0.01^\circ/\text{s}$  到  $50^\circ/\text{s}$ ,工作角加速度  $100^\circ/\text{s}^2$  等。这些指标均超过我们以往研制的同类产品。如何实现这些要求,执行元件的选择和应用是一个关键环节。

### 2 直流力矩电机工作原理简述

直流力矩电机的工作原理与直流伺服电机相同,直流伺服电机的转矩公式为:

$$T_M = C_M \Phi_c I_a = \frac{PN}{2\pi\alpha} \Phi_c I_a$$

转速公式为:

$$n = \frac{60\alpha E_a}{PN\Phi}$$

由上述公式可知,通过采用特殊的结构设计,即采用绕组支路  $\alpha=1$  的单波绕组的扁平型结构,可以使  $\alpha$  最小,导体数  $N$  和极对数  $P$  增多,从而得到低速和

大转矩。可见,直流力矩电机是一种低转速、大转矩的直流电动机。它可在堵转下长期工作,可以直接带动低速负载。具有转速和转矩波动小,调节特性和机械特性线性度好等优点,特别适合于高精度的位置伺服系统和低速控制系统。

### 3 直流力矩电机的特点及其在精密跟踪雷达中的应用

#### 3.1 低速性能

为实现最低转速为  $0.01^\circ/\text{s}$  的指标要求,首先,要选用调速性能好的执行元件。高速伺服电机的额定转速为每分钟几千转,低速性差,不能在低速下正常运行,更不宜在堵转下工作。它的输出力矩不是很大,因此,带动低速负载及大转矩负载要用减速器。若设额定转速为 3000 转/分,而天线最高转速为  $50^\circ/\text{s}$  (8.3 转/分),取速比  $i=374$ ,若同时满足最低转速为  $0.01^\circ/\text{s}$ ,则要求电机平稳转速为 0.6 转/分,这样的低速性能要求,采用高速电机驱动难以实现。而笔者选用的直流力矩电机具有十八对磁极,磁场分布均匀。因此,小信号低速转动时,亦能保持转速平稳。电机力矩波动小,转矩-电流特性具有很高的线性度。又由于直流力矩电机直接驱动,减小了摩擦力矩,消除了齿隙死区,这些都使系统特性的线性度提高,为低速平稳运行创造了条件。

其次,天线座转动轴承静摩擦力矩必须严格控制,控制在电机额定力矩的 5% 以内。因为天线座转动轴

承静动摩擦力矩之比值大小也是最影响低速性能的一个重要因素。我所曾研制的某雷达,其要求最低转速也为  $0.01^\circ/\text{s}$ ,实际测试其最低转速为  $0.02^\circ/\text{s}$ 。后发现其中一个重要原因是静摩擦力矩超过了规定值的两倍以上(按 5% 额定力矩计算应为  $34\text{kg}\cdot\text{m}$ ,实际测试有  $80\text{kg}\cdot\text{m}$ )。所以,在天线座结构设计装配等方面采取措施,使静摩擦力矩控制在电机额定力矩的 5% 以内,静动摩擦力矩之比可达  $1.1\sim 1.25$ 。

再次,选择灵敏度较高的低速直流测速机。测速机的引入,增强了回路的阻尼,克服了因电机转速变化引起的粘滞阻尼变化对系统的影响,改善了伺服系统的线性。低速直流测速机内部结构为多极式,有十六对磁极。灵敏度高,线性度好,纹波电压输出小于 1%。测速机与力矩电机同轴安装,速度反馈回路不存在齿隙,故在低速时也能获得足够的信号输出。从而保证系统获得较好的低速性能。通过采用十七位轴角编码器(分辨率 10 角秒),雷达计算机进行数字引导,对伺服系统的最低转速进行测试,转速达到  $0.01^\circ/\text{s}$ 。

### 3.2 关于加速度

雷达总体对加速度指标要求是,最大角加速度  $100^\circ/\text{s}^2$ ,保精角加速度  $40^\circ/\text{s}^2$ 。采用直流力矩电机作为执行元件在快速性方面有以下一些优点:

- 耦合刚度高。力矩电机的转子直接套在天线座转轴上,其定子则与天线座装成一体,不需要传动齿轮箱。既消除了齿隙死区和弹性变形引起的误差,提高了传动精度;又增强了机械耦合刚度,提高了整个传动装置的机械结构谐振频率。

- 在负载轴上有高的力矩-惯量比,响应速度快。如图 1 所示,若设减速比(电机转速/负载转速)为  $i$ ,且在负载处需要同样的电磁转矩和转速。即  $T_L = iT_1 = T_2$ ,间接驱动时,折算到负载轴上的系统转动惯量为  $i^2J_1 + J_L$ 。系统的理论加速度应是:

$$a_1 = \frac{iT_1}{i^2J_1 + J_L} = \frac{T_L}{i^2J_1 + J_L}$$

对于直接驱动方式,系统的理论加速度应是:

$$a_2 = \frac{T_2}{J_2 + J_L} = \frac{T_L}{J_2 + J_L}$$

一般情况下,  $J_2$  远远小于  $i^2J_1$ ,况且间接驱动时还要加上减速器的折算惯量。因此,采用力矩电机驱动时,在负载处力矩-惯量比大,理论加速度大。与和它的惯量相同的普通伺服电机相比,机电时间常数较小。再加上力矩电机设计成多磁极对数,电枢铁心磁

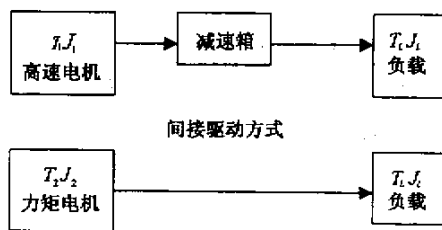


图 1

密较高,使电感很小,从而电磁时间常数也很小。所以,在过渡过程中的快速性很好。

选择了快速性能好的力矩电机后,对系统应用而言,还应注意以下两点:

其一,根据负载情况,确定合适的电机力矩。力矩电机应有足够大的驱动力矩,以具有加速能力。通常,产品目录上列出的力矩电机参数有:最大空载转速  $n_0$ (r/min),峰值堵转力矩  $T_{fd}$ (N·m),连续堵转力矩  $T_{Ld}$ (N·m),峰值堵转时的电枢电压  $U_m$  和连续堵转时的电枢电压  $U$  等,根据这些参数可以确定电机的机械特性图如图 2 所示。由目标航迹,计算出当角加速度最大时对应的角速度,在图 2 中找出对应的力矩  $T_a$ ,图中  $n_{i0} = n_0 \frac{U}{U_m}$ ,当  $T_a \geq T = T_c + T_f + (J_m + J_L)a_{\max}$  时,表示所选合格。

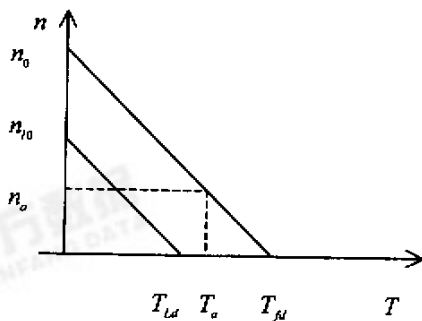


图 2

其二,速度回路带宽应足够宽。我所曾研制的某雷达,其保精加速度要求为  $40^\circ/\text{s}^2$ ,开环测试时,角加速度为  $40^\circ/\text{s}^2$

说明驱动马达有这种加速能力。但速度回路闭环后,角加速度就达不到  $40^\circ/\text{s}^2$ ,主要原因是受到速度回路带宽限制。而速度回路带宽往往受到机械结构谐振频率制约。因此,须提高结构的固有频率。从  $\omega = \sqrt{\frac{K}{J}}$  可以看出,一是提高结构刚度  $K$ ,二是降低负载惯量  $J$ 。由上述力矩电机的特点可知,采用力矩电机后,可大大提高结构的固有频率。但仍需在降低负载惯量等方面采取措施,以满足系统对机械结构谐振频率的要求。

### 3.3 抗风性能

力矩电机的最大缺点是负载特性很软,电机的输出力矩会随着电机转速的增加而降低。当转速低于 6 转/分时,电机输出力矩按电机的额定力矩提供,当转速高于 6 转/分时,电机输出力矩按相应转速时的力矩提供。平均转速每分钟提高一转,输出力矩下降  $50\text{kg} \cdot \text{m}$ ,当电机转速为 8 转/分时,电机输出力矩为: $300\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \times 50\text{kg} \cdot \text{m} = 200\text{kg} \cdot \text{m}$ 。这时如要加速或承受瞬时阵风,系统误差有可能增大。可见,力矩电机过载能力差,也就是抗瞬时风力矩能力差。由于力矩电机直接驱动,风力矩直接作用于力矩电机,受风力矩的影响很大。

在应用中,如何提高力矩电机驱动系统的抗风能力,主要是通过速度回路来提高系统的抗风刚度和减小速度误差。可以采取以下两种措施,一是提高速度回路增益,以降低稳态风力矩误差。二是速度回

路设计成 I 型系统,以消除阵风力矩引起的误差。

## 4 结束语

采用直流力矩电机构成的雷达伺服系统,经过几个月的分系统调试及雷达全机联调等过程,现已交付用户使用。伺服系统的设计是成功的。经用户测试,各项性能指标均达到或超过了总体要求。特别是在加速度、低速性能、调速范围等方面充分体现了力矩电机伺服系统的优越性。

### 参 考 文 献

- 1 赵文常,侯荣恩,周洪宇. 自动控制元件. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1986
- 2 梅晓榕,兰朴森,柏桂珍. 自动控制元件及线路. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993
- 3 章燕申,袁曾任. 控制系统的设计和实践. 北京: 清华大学出版社, 1992