

力矩电动机及同轴测速发电机的研制

畅巨明

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 简要介绍了用于260经纬仪的主传动永磁直流力矩电动机及同轴测速发电机的设计及制作。阐明了对系统动态精度提高的意义,列出了系统达到的实测精度数据。

关键词: 力矩电动机;测速发电机;电影经纬仪

1 概述

260激光电视电影经纬仪采取永磁直流力矩电动机作驱动件,并采用与力矩机同轴耦合的高灵敏度永磁直流测速发电机作速度检测反馈元件以构成直流式力矩电机——测速电机模拟量伺服系统,这种传动系统,响应时间短、加速速率大、捕获能力强,在电子线路的保证下,系统的控制误差达到了一角分以下,其精度高出同类型的160经纬仪一个数量级。

2 电机的设计特点

主动力矩电机和测速发电机的结构和性能技术指标是以整机系统所要达到的捕获、跟踪、定位特性和精度为依据而确定的。由于整机系统的特殊性,因而对电机的设计也提出了特殊要求。

(1)电机应具有高的结构刚度。

可类比的160经纬仪的机械刚性是较低的,其机械谐振频率一般不超过10周/秒。本系统需要把机谐频提高到30周/秒左右。方位力矩电机的定子要设计成平面度达0.002mm高的联接法兰接口,以进一步保证机械刚度。

(2)电机应具有一定的短时过载能力。

本仪器要求具有 $60^\circ/\text{秒}^2$ 的加速性能,它是区别于其它仪器的特点之一。设计电机时,除应达到电机峰值力矩值外,为了弥补转动惯量计算不准可能导致峰值力矩不足的问题,力矩机从结构形式上要具有一定的短时过载能力。即发生电磁过载时,既不要烧毁电机线圈,也不要造成定子磁极的永久性退磁。据此,选用了带极靴的磁极凸出式定子结构,并对极靴厚度作了精密的设计。

(3)电机要有更快的响应速度。

仪器要快速响应,其调速系统的带宽欲做到10周/秒以上,有必要降低电机自身的电气时间常数 T 值。一般要求 T 值需在5~20毫秒之内。为了达到这一指标,必须增加力矩电机和测速发电机的极对数。故力矩机设计成7对极,并可采用铝镍钴5永磁钢,但对于隐极式的测速机则需要采用矫顽力 H_c 、最大磁能积更大的永磁材料。为此,我们研制出了磁性能更高的钴镍铝8永磁钢,满足了测速机的设计要求。

(4)要求力矩电机的纹波力矩和测速电机的纹波电势小。

在设计上采用独立换向器和斜槽铁心技术。用减小圆周分布磁阻变化的办法来降低磁链改变引起的力矩或电势波动。另外,在采用多磁极、多齿(槽)的同时,还设置虚槽,即采用几倍于实槽数 Z 的换向片(或整流片)数 K 把实槽“细分”,以便使由于换向引起的波频增高,波幅降低。这是一般商品电机所不具备的。

3 设计计算

所用计算公式多由基本电磁感应原理和电磁作用定律推导而出。现扼要讨论几种别具特点的设计。

3.1 转子冲片设计

3.1.1 电枢铁心外径(即冲片外径)的计算

(1)凸极式力矩电机电枢外径计算公式

$$D_a = \sqrt[3]{\frac{2M_p \times 9.81 \times 10^8}{\pi \beta A_{l, \max} B_g}} \text{ cm} \quad (1)$$

式中

M_p ——峰值堵转力矩,单位:公斤·米

β ——电枢心长径比,

即 $\beta = \frac{L_a}{D_a}$ 通常在0.05~0.5范围内选取。

α ——极弧系数,一般取0.66~0.7

B_g ——空气隙中的工作磁密,单位:高斯

$A_{l, \max}$ ——电枢最大线负荷

$A_{l, \max}$ 一般在150~400安匝/厘米范围内选用

(2)隐极式(桥式)测速发电机电枢外径计算公式

$$D_a = \frac{PK_s \alpha K_p \delta}{\pi \mu_0 H_m} \quad (2)$$

式中

P ——磁极对数

k_s ——卡氏系数

$$k_s = \frac{t + 10\delta}{t + 10\delta - b_s} \text{ 通常在 } 1.08 \sim 1.15 \text{ 间预选, } t: \text{齿距} \quad b_s: \text{槽口宽}$$

K_p ——磁路饱和系数

铁心迭片采用冷轧硅钢片时,一般 $K_\mu = 2.1 \sim 3$

μ_0 ——真空中的导磁率 $\mu_0 = 0.4\pi$

H_m ——永磁钢工作点的磁场强度一般 $H_m = (0.7 \sim 0.85) \frac{H_c}{\mu_0}$, 单位:安/厘米

δ ——空气隙长度

这里选用 $p = 10$, $k\delta = 1.09$, $\alpha = 0.7$, $\delta = 0.1$ 厘米, $K_\mu = 2.4$, $B_s = 4560$ 高斯,

$$H_m = 0.8 \frac{H_c}{\mu_0} = \frac{800}{\mu_0} \text{安/厘米}$$

这里要提及的是 B_s 没有在一般资料中推荐的6000~7000高斯范围内选取,而取了较低的值,这是为了提高槽齿宽度比,扩张槽面积,增多安匝数的需要。

3.1.2 齿(槽)数 Z 的选取

一般选取齿(槽)数时,同时必须考虑与极对数的最佳匹配,其原则为

a. 总槽数与磁极数无公约数,一般采用奇数槽实现。

b. 为了减少纵向磁场脉动,每对极下的齿数一般也采用奇数值,即 $\frac{Z}{P} = \text{奇数}$ 。

c. 为了减小横向磁场脉动,在极弧长度 b 下槽数应为整数槽加 $\frac{1}{2}$ 个槽,即 $\frac{Z}{3P} = \text{整数槽} + \frac{1}{2}$ 个槽。

我们所设计的每对极下的齿数均在13个以上。

3.1.3 齿宽 b_z 的选取

若将力矩机的气隙磁密取在6600~7300高斯;测速机的气隙磁密取为4500高斯时,则它们的齿宽的计算公式取下式为好。

$$\text{力矩机} \quad b_{zm} = (0.36 \sim 0.39)t \quad (3)$$

$$\text{测速机} \quad b_{zg} = (0.25 \sim 0.28)t \quad (4)$$

式中 t ——齿距,可由 $t = \frac{\pi D_c}{Z}$ 计算得到。

3.1.4 齿高 h_z

根据齿磁密 B_z 的选取值与磁密修正项 $K_3 \mu_0 H_z$ 的差值,即 $B_z - K_3 \mu_0 H_z$ 可查材料 $B-H$ 曲线得 H_z ,再根据齿部降落磁势 F_z 即可由式(5)计算出

$$h_z = \frac{F_z}{H_z} \quad (5)$$

3.1.5 槽的形式

力矩机和测速机电枢冲片槽形均采用半闭口齿壁平行的梨形槽。

3.1.6 空气隙长度 δ 的选取

要使极弧面临的空气隙中的磁场在任何情况下不改变方向,必须满足下列条件:

$$A_{\max} b_s \leq (0.8 B_s) 2 K_s \delta_{\max} \quad (6)$$

式中

δ_{\max} ——极靴下最大空气隙长度一般 $\delta_{\max} = 2\delta$

B_s ——极弧长度,一般 $B_s = b_p$, b_p ——极靴宽度

此式的意义是,在可能的最大负载时,由于电枢反应的存在,使主磁势(在气隙中主磁场所给的磁势)不等于零。假定最大过载为1.5倍,而卡氏系数 k_s 平均值为1.15,则上式可变换为

$$\delta = 0.4 \frac{A_{1, \max} b_p}{B_g} \quad (7)$$

我们可利用这个公式计算选取 δ 值。

3.2 换向器设计

3.2.1 首先应确定换向片(或整流片)数 K 值,但 K 值的确定不是任意的,它必须符合绕组对称条件,亦即:

$$K = PY_k \pm a = U_n$$

式中 P ——极对数; Y_k ——绕组节距

a ——并联支路对数; U_n ——虚槽数

由于单波绕组对平衡电磁性能和减小波动有利,我们所设计的各电机均采用了单波形式,即 $a=1$,此时

$$K = PY_k \pm 1 = U_n$$

3.2.2 梯形铜排换向器

用于力矩电机的独立换向器。换向片为银铜合金拉拔制成的梯形铜排,片间绝缘为人造换向器云母板片。工作面为圆柱面,工作可靠、耐用、承载电流大。

3.2.3 端面整流子换向器

测速机采用端面整流子换向器。其基体为紫铜,表面有双层镀层;基层镀镍,表层镀铍或钯,片间为环氧树脂灌封绝缘。这种换向器与滚子电刷构成的接触对、摩擦付,产生的电磁噪声和机械噪声特别小。前者在微伏级。

3.3 定子设计

如前所述永磁直流力矩电机和同轴永磁测速发电机分别采用了磁极凸出式(即凸极式)和磁极隐蔽式(即隐极式,或称桥式)两种型式。前者的磁路特点是:磁钢即磁极,相邻磁钢磁势成串联。两块磁钢的串联磁势降落在“两齿两隙”上;后者的磁路特点是:相邻磁钢的磁通成并联。降落在“两齿两隙”上的磁势等效于一块磁钢发出的磁势(假定并联各磁钢的基准磁势相同)。根据有关公式要计算确定的是磁钢结晶向的高度 h_m 或长度 L_m 以及宽度 b_m 。最后设计确定定子机座的内外径和轴向长度。

需要提到的是凸极式力矩电机的极靴,其材料要选择低碳钢,为减小极靴端部漏磁,极靴轴向两端伸出部分要设计成倾斜面式。极靴宽度取与磁钢宽度一致。极靴中心高度 h_p 经计算取4mm左右为佳。

3.4 绕组设计

3.4.1 关于绕组匝数的确定

绕组总导体数的计算运用下列公式

$$N = \frac{120aK10^8}{\pi D_a L_0 \alpha B_g} \quad (8)$$

式中 K 为电机灵敏度系数。对于力矩电机,它指反电势系数 K_E ;对测速电机,它指输出电压灵敏度 K_G 。

3.4.2 线圈元件半匝长 L_a

L_a 主要决定于斜槽长度和线圈所跨的槽距。总结实际经验,当槽面积在100mm²左右时,宜取

$$L_a = (\sqrt{L^2 + t^2} + 2 \times 1) \times 1.5\tau \frac{Y_z}{Y'_z}$$

式中:

L ——铁心长度(mm), t ——齿距(mm)

Y_z ——绕组节距, $Y_z = \frac{Z \pm \epsilon}{2P}$

Y'_z ——理论节距, $Y'_z = \frac{Z}{2P}$

当槽面积在70mm²以下时,则取

$$L_a = (\sqrt{L^2 + t^2} + 2 \times 1) 1.25\tau \frac{Y_z}{Y'_z}$$

3.5 电刷架设计

我们所设计的电刷架是全额电刷安装在一个绝缘板上的整体组件。采用两种形式,即力矩电机刷架为银石墨刷子的圆周面接触式刷架,测速电机刷架为银镍铜合金球面滚子端面接触式刷架。我们的电刷架设计在国内是独特的。它具有接触压降小,电磁、机械噪声低,工作可靠、使用寿命长等优点。

3.6 磁路计算

磁路计算,我们是采用在等效磁路基础上归纳出来的近似算法。即根据磁势平衡原理,磁路负载磁势降的总和等于磁钢磁势的等式关系计算和设定各段磁路的磁势值或选定磁钢的源磁势。磁路负载一般包括 a. 气隙磁势降、b. 齿部磁势降、c. 接触气隙磁势降、d. 定子轭磁势降。所设计的磁路要求达到磁饱和程度,因此,我们把工作磁通、齿部磁密、磁路总磁势降均看作为气隙磁密 B_g 的函数。我们所形成的一套计算程序(略)业经几十台电机设计实验验证,表明精确度是很高的。

4 电机的研制特点

鉴于在研制本系统的力矩电机和同轴测速发电机时,采用了一些新的技术措施致使造出的电机较之于我们以往设计的电机具有了某些新的特点:

4.1 力矩电机凸极磁路的定子机座材料以往采用中碳铸钢或铸铁,现在根据本系统主机配合光度、精度要求改用了35号锻钢。这样,便提高了机加工性能,保证了配合光、精度的需要。

4.2 力矩电机机座上的磁钢镶嵌槽任意两槽等分误差都控制在 $\pm 1'$,而调整磁场分布精度的任一相邻极靴间距离,则利用一套特制的高精度装配、检测用程序塞规作为辅装工具达到0.03mm以内的等距精度。

4.3 测速电机隐极磁路的机座,过去曾采用过无磁铸铁材料,但实验证明,它仍有不可忽略的漏磁(实测导磁率 $\mu \geq 1.5$ 高/奥)之弊。本仪器测速电机机座则全部采用了我所研制的高强度铸造铝合金AL(40)。使用表明,这种材料从强度、刚度上完全满足电机要求。同时,铝合金材料的机座不但对电机磁系统有保护作用,而且明显地减轻了电机的重量。

4.4 力矩电机上套装于定子凸极磁钢的扁铜纱包线充磁线圈,过去每只线圈的首尾端头自然地分别出自里层及表层,而里层之首头的引出则靠接头上铜片折向外层。这不但增加了铜片引接件和增多了焊接点,而且也多占用了一定位置的线圈长度。本电机线圈则设计成和制作了首

尾分别绕制且同时由表层引出的新式线圈。这种线圈革除了引接铜片,使定子各充磁线圈的串接点均安置在极间空档处。其状不但规整、且突出的优点是减少了端接线长度,有效地利用了线圈长度空间。

4.5 为了缩小体积、减轻重量,本测速机定子磁钢采用了我所研制的定向结晶铝镍钴8类磁钢,并由我所自己探索试验解决了该磁钢充磁难的问题。

4.6 为了缩短测速电机电枢长度,我们作了电枢端部绕组的机械模压整形试验,试验获得了成功,端部形状规整齐一,端部尺寸达到了要求。

4.7 电枢冲片槽分度相邻误差基本控制在 $\pm 1'$,而任意两槽间的累积误差控制在 $2\sim 2.5'$;电枢外圆粗糙度磨到 $0.8\mu\text{m}$,同轴度在 0.02mm 以内。直接耦合的方位传动力矩电机和同轴测速电机采用组合加工法,一刀加工出两电机电枢外圆尺寸,保证了两机同步运转的同轴精度。

4.8 为了提高力矩电机梯形铜排换向器工作表面的接触电导性能,把换向器表面的粗糙度降低到 $0.8\mu\text{m}$ 以下,并作抛光处理。实验证明,这种抛光后的换向器结构牢固、可靠、工作性能稳定。

4.9 测速电机端面整流子表面经电镀和抛光处理,底层为 0.015mm 厚的镍层,表层为 0.005mm 厚的铯层,表面粗糙度在 $0.4\mu\text{m}$ 以下,用铯层替代曾用的金层,较大地提高了整流子表面的抗蚀和耐磨性。

4.10 力矩电机的电刷架做了改进。电刷与刷握导向配合有效长度增加约 10mm ,刷握外工作时的外伸长度由 1.5mm 缩到 1mm 以下(与331[#]力矩电机作对比),这一改动措施特别有效地抑制了电刷与换向器接触运行中有时会出现的刺耳的机械噪声。另外,对电刷架上同性电刷间的连线,统由明设线改成了隐蔽线,这就增加了联线的工作的安全性和可靠性。

5 电机的设计与实测性能

各电机的技术性能指标列入表1~6。表中4.100电机、4.200电机分别代表方位传动力矩电机和方位同轴测速机;4.300、4.400电机则顺序代表俯仰传动力矩机和俯仰测速机。

统观电机的全部实测性能数据,可知各项技术性能指标全部达到了设计要求。实测工作点比予定工作点略高一点,最大不超过 10% (另见电机工作点确定图),这当属精确度很高的精密设计之列。

表1 力矩电机技术性能指标对照表

序号	项 目	4.100 电机		4.300 电机	
		实测值	设计值 (或要求值)	实测值	设计值 (或要求值)
1	M_p , 公斤·米	22.8	20	3.1	2.5
2	K_T , 公斤·米/安	1.47	1.3	0.37	0.3
3	K_E , 伏/(转/分)	1.51	1.335	0.38	0.3084
4	n , 转/分	25	29	61	75.6
5	$P_p(25^\circ\text{C})$, 瓦	603	612 _(15^\circ\text{C})	210	210 _(15^\circ\text{C})
6	T , 秒	0.02	0.022	0.005	0.004

续表 1

7	$L_{(isc)}$ 亨	0.0502	0.0559	0.0152	0.0121
8	F_0	8.45	6.5	0.44	0.29
9	K_m 公斤·米/(安·欧 $^{\frac{1}{2}}$)	0.93	0.81	0.21	0.17
10	M_R %	< 3	< 4	< 1.4	< 4

表2 测速机转性能指标对照表

序号	项 目	4.200,4.400测速机	
		实 测 值	设 计 值 (或要求值)
1	K_C 伏/(弧度/秒)	42~44	43
2	$R_{(isc)}$ 欧	668~706	≤803
3	n_m 转/分	12	12
4	E_R %	<0.4~1.1	<1.5

表3 力矩电机

电机型号	M_p 公斤·米	K_T 公斤·米/安	P_p 瓦	K_m 公斤·米/ (安·欧 $^{\frac{1}{2}}$)	G 公斤	C_G 公斤·米/ (安欧 $^{\frac{1}{2}}$ · 公斤)
4.100电机(凸极) (260方位传动)	22.8	1.47	612	0.93	114	0.0082
ZLM14电机(凸极) (718俯仰传动)	30	1.14	1010	0.95	140	0.0068
[美]T-12014-A(凸极) (K400方位传动)	34.6 (250磅·呎)	1.78	2710	0.66		
4.300电机(凸极) (260俯仰传动)	3.1	0.37	210	0.21	38	0.0055
(隐极) K400俯仰传动	4.56 (33磅·呎)	0.8	800	0.16		
ZLM90电机(凸极) (718方位传动)	90	3	990	2.86	410	0.007
[美]T-18004-A	124 (900磅·呎)	4.82	3500	2.1	274 (600磅)	0.0077
[美]T-12008-A	27.7 (200磅·呎)	1.29 (9.3磅·呎/安)	2513	0.55 (4磅·呎/安·欧 $^{\frac{1}{2}}$)	155.4 (340磅)	0.0036

表4 测速电机

电机型号	K_C 伏/(弧度/秒)	R_{isc} 欧	K 周/转	E_r %	G 公斤	C_G (伏/弧度 /秒·欧 $^{\frac{1}{2}}$ · 公斤)
4.400测速机(隐极) (260俯仰测速)	44	668	411	<0.4 ~1.1	23	0.074
YZCD50测速机(隐极) (718俯仰测速)	66	400	669	<0.4	46	0.072

续表4

[美]TG-10022-C -A	32	828	279	0.25	34.3 (75磅)	0.033
	53.5	2100	279	0.25	34.3	0.034

表5 260力矩电机技术数据

序号	项 目 名 称	符 号	单 位	电 机 编 号	
				4.100	4.300
1	峰值堵转力矩	M_p	公斤·米	22.8	3.1
2	电机常数	k_m	公斤·米/(安·欧 $^{\frac{1}{2}}$)	0.93	0.21
3	峰值堵转控制功率	$P_{p(25^\circ\text{C})}$	瓦	603	210
4	粘滞阻尼系数(电源内 阻为零)	F_0	公斤·米·秒	8.45	0.44
5	电气时间常数	T_e	秒	0.02	0.005
6	机电时间常数	T_m	秒	0.04	0.16
7	力矩灵敏度	K_T	公斤·米/安	1.47	0.37
8	反电势系数	K_E	伏/(转·分 $^{-1}$)	1.51	0.38
9	峰值力矩电压	U_p	伏	39.5	25.3
10	峰值力矩电流	I_p	安	15.5	8.3
11	最大空载转速	n_0	转/分	25	61
12	转子惯量	J_m	公斤·米·秒 2	0.38	0.075
13	最大理论加速度	α_m	弧度/秒 2	60	41
14	最大功率比	$\dot{\rho}$	公斤米/秒 2	1368	127
15	直流电阻	$R_{(25^\circ\text{C})}$	欧	2.51	3.04
16	电枢电感	$L_{(15^\circ\text{C})}$	亨	0.0502	0.0152
17	摩擦力矩(带一定 负载)	M_F	公斤·米	0.45	0.23
18	纹波力矩(估算)	M_R	%	<3	<1.4
19	每转波动周期数	·	周/转	274	230
20	电机重量	G	公斤	114	38
21	轮廓尺寸 外径 轴向长		毫米	φ 452 185	φ 378 100

表6 260测速机技术数据

序号	项 目 名 称	符 号	单 位	电 机 编 号	
				4.200	4.400
1	输出灵敏度	K_G	伏/(弧度·秒 ⁻¹)	42	44
2	最大允许运行速度 (受滚刷转速限制)	n_m	转/分	12	12
3	电机内阻	$R_{(25^\circ\text{C})}$	欧	706	668
4	电枢电感	$L_{(15^\circ\text{C})}$	亨	0.95	0.95
5	纹波电势	E_R	%	<0.4~1.1	<0.4~1.1
6	每转电势波动周期数			411	411
7	转子惯量	J	公斤·米·秒 ²	0.08	0.09
8	电机重量	G	公斤	26	21
9	外廓尺寸 外径 轴向长		毫 米	$\varphi 380$ 162	$\varphi 366$ 100

6 结束语

力矩电机、测速电机作为整机设计的一部分,构成了本仪器系统高机械精度、高电气性能的机电核心部件。它是主系统精度的基础,是传动分系统的主体。由出厂验收的仪器的数据可知,在电子线路的保证下,方位与俯仰传动的各项技术指标均已达到了相当高的水平。比如

a. 整机规定的数字引导精度:系统误差最大值要求3',实际 δ_{\max} 达到了22"~49.2",比要求提高了2.66~7.18倍;随机误差均方值要求30",实际达到了7.8"~18.4",比要求提高了0.63~2.85倍。

b. 最大角速度,要求35°/s,实际达到了36.88°~38.2°/s。

c. 最低角速度,要求0.03°/s,实际达到了0.016°/s~0.02°/s。

从最早研制出的第一台主机于84年开始作传动试验起,历经多年的室内动态检测 运转跑合,以及室外的机场试验,多套主传动电机的工作一直比较好。尤其在近几年来,仪器临海使用,所处环境较之室内恶劣得多,但电机系统未曾发生一次故障,确实保证了各次任务的顺利完成。

因此,应得的结论是:我们所研制的上述专用结构型电机不仅性能优良,完全达到并满足于主机对它的实际要求,而且其工作适应性能做到稳定、可靠、经受住了沿海环境和时间的考验。

参 考 文 献

- [1]畅巨明,孙民平,718"电影经纬仪用直流水磁力矩电机及低速测速发电机.718"鉴定会材料之十七,1978
- [2]北京微电机厂,清华大学电子系,直流水力矩电机系列设计程序.微电机专业会议会议录,1978

Development of Torque Motor and Coaxial Techogenerator

Chang Juming

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

The paper describes briefly the design and manufacture on the permanent magnet DC torque motor and coaxial techogenerator for the driving system in the cinetheodolite model 260. Improvement of the motors are discussed to be contributed to dynamical accuracy of the system. Finally measurement results of system accuracy are given.

Key words: Torque motors, Techogenerators, Cinetheodolites