

控制电机设计

第一册 自整角机

西安微电机研究所编

本书为《控制微电机设计》的第一册，书中以介绍自整角机的电磁设计计算方法为主，对自整角机的基本理论作了简要的叙述，汇总整理了设计程序，并附有计算应用举例。

本书可供控制微电机设计人员及其他从事控制微电机工作的人员参考。

控制微电机设计

第一册 自整角机

西安微电机研究所编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $8^{\frac{3}{16}}$ · 字数 176 千字

1974 年 4 月北京第一版·1974 年 4 月北京第一次印刷

印数 00,001—13,500 定价 0.85 元

*

统一书号：15033·4179

目 录

前言

第一章 单相自整角机的特点和设计的一般问题 1

§ 1-1 单相自整角机的分类和结构特点 1

§ 1-2 控制系统对自整角机的技术要求 9

一、对力矩式自整角机的技术要求 10

二、对控制式自整角机的技术要求 10

§ 1-3 自整角机设计的一般问题 10

一、通用性的考虑 11

二、力矩式自整角机的结构选型原则 12

第二章 自整角机设计的基本理论 14

§ 2-1 自整角机的等值电路 14

一、自整角机的纵轴等值电路 19

二、自整角机的横轴等值电路 24

三、自整角机的四端网络参数 30

四、典型自整角机系统的等值电路 37

§ 2-2 自整角机的主要尺寸、气隙和冲片尺寸的确定 44

一、定子铁心内径 45

二、定子铁心长度 47

三、气隙 48

四、定子冲片尺寸的确定 50

五、转子冲片尺寸的确定 50

六、转子铁心内径 51

七、极弧系数的计算和选取 51

§ 2-3 槽数和斜槽的选择 55

一、槽数的选择 55

二、斜槽的选择 56

§ 2-4 磁路计算	59
§ 2-5 绕组设计	70
一、绕组类型的选择	70
二、双层短距绕组的设计	71
三、不等匝绕组的设计	74
四、正弦绕组的设计	95
§ 2-6 自整角机参数计算	96
一、自感电抗和互感电抗的计算	97
二、漏抗计算	101
三、电阻的计算	106
§ 2-7 特性计算	107
一、横轴参数选择	107
二、阻尼时间的计算及其影响因素	113
三、比力矩的计算	115
四、同步力矩的计算	118
五、励磁电流与失调角的关系	119
第三章 自整角机设计程序及计算举例	121
§ 3-1 自整角机设计程序	121
一、技术要求	121
二、主要尺寸决定	122
三、冲片设计	123
四、磁路计算	129
五、转子绕组计算	132
六、定子绕组计算	137
七、损耗计算	140
八、参数计算	142
九、特性计算	148
§ 3-2 力矩式发送机、接收机计算举例	152
一、技术要求	152

二、主要尺寸决定	152
三、冲片设计	153
四、磁路计算	155
五、转子绕组计算	158
六、定子绕组计算	160
七、损耗计算	162
八、参数计算	165
九、特性计算	171
§ 3-3 控制式自整角变压器计算	179
一、技术要求	179
二、主要尺寸决定	179
三、冲片设计	180
四、定子绕组计算	182
五、磁路计算	185
六、损耗计算	188
七、转子绕组计算	190
八、参数及特性计算	193
§ 3-4 差动式自整角机计算	196
一、技术要求	196
二、主要尺寸决定	196
三、冲片设计	197
四、磁路计算	199
五、定子绕组计算	201
六、损耗计算	204
七、转子绕组计算	207
八、参数计算	209
九、特性计算	212
附录	217
一、不同槽数的不等匝绕组方案	217

1. 21槽绕组方案	217
2. 18槽绕组方案	218
3. 12槽绕组方案	220
4. 9槽绕组方案	222
二、阻尼条直径的选择及计算举例	223
三、控制式自整角机组合特性的计算	231
1. 发送机与 n 个同型号的自整角变压器的组合	231
2. 发送机与两个不同型号的自整角变压器的组合	233
3. 带有负载阻抗 Z 的自整角变压器与发送机的组合	235
4. 发送机和差动发送机与 n 个同型号的自整角变压器的 组合	239
四、常用磁化曲线数据表	241
五、高强度漆包圆铜线的直径、截面积和重量数据	244
六、本书主要符号的名称	246
参考文献	251

第一章 单相自整角机的特点和设计的一般问题

§ 1-1 单相自整角机的分类和结构特点

单相自整角机是感应型的机电元件，在同步连接系统中广泛地用于角度数据的传输、接收和变换。其基本结构与一般的电动机相似。定、转子铁心设置有绕组，通过绕组和磁路的设计，使定、转子绕组之间的互感随转子转角成正弦变化。借助原、副方之间的电和磁的作用，在自整角机转轴上产生同步力矩，或者在自整角机副方绕组中输出电气讯号。

虽然单相自整角机在结构上与绕线式异步电机类似，但其本质及作用原理则不同。我们要了解自整角机就应抓住自整角机的特殊本质，将其与其他电机区别开来。

按照使用的电源，自整角机可分为三相和单相两种。单相自整角机励磁绕组由单相电源供电，三相同步绕组由彼此在空间相距 120° 连接成星形的三个绕组所组成。应当指出，由于变压器的作用原理，同步绕组中通过的电流在时间上是同相位的。这是单相自整角机的特点。

自动控制系统中所使用的自整角机一般均为单相。三相自整角机多用于功率较大的场合，即所谓电轴系统中。它们不属于控制微电机的范围，本书未予叙述。以下所述自整角机均指单相自整角机。

自整角机按其工作原理的不同，可以分为力矩式自整角机和控制式自整角机二类。

力矩式自整角机主要用在指示系统中。这类自整角机本身不能放大力矩，要带动接收机轴上的机械负载，必须由自整角发送机一方的驱动元件供给能量。因此，可以认为力矩式自整角机系统是通过一个弹性连接的、能在一定距离内扭转的轴来带动负载的。力矩式自整角机系统为开环型，适合于对角度传输精度要求不很高的控制系统。

控制式自整角机主要在数据传输系统中作检测元件用。它与伺服电动机、放大器等元件一起组成闭环系统。控制式自整角机的基本连接

回路如图 1-1 所示。图中控制式变压器的输出电压经放大器 A 放大后，作为伺服电动机的控制讯号，使伺服电动机回转。伺服电动机回转时带动自整角变压器的转轴，使其转动到与自整角发送机相应的协调位置。

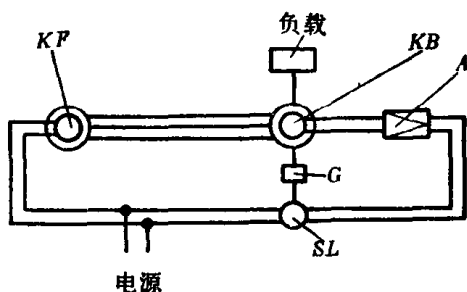


图1-1 自整角机伺服系统的基本回路
 KF —控制发送机； KB —控制变压器；
 A —放大器； G —减速齿轮； SL —伺服电动机

力矩式自整角机按其用途可分为四种：

1. 力矩式发送机 LF ：主要用来与力矩式差动发送机、力矩式接收机一起工作。

2. 力矩式差动发送机 LCF ：主要用来与力矩式接收机一起工作。其转子通过机械方式固定，定子接收由发送机传来的电气讯号。经过差动式自整角发送机变换后产生的电气讯号，对应于输入电气讯号的角度与其转子转动角度的和或

差（和或差系根据连接方式而定）。在原理上它也可作为差动式力矩接收机使用。

3. 力矩式差动接收机 LCJ：主要用来与两个力矩式自整角发送机一起工作。其转子角度对应于定子从一个发送机接收来的电气角度讯号与转子从另一个发送机接收来的电气角度讯号之和或差。

4. 力矩式接收机 LJ：主要用来与力矩式发送机及力矩式差动发送机一起工作。其定子接收某一电气讯号，转子励磁后即能自动地转到对应于定子上所接收的电气讯号角度的位置。

控制式自整角机按其用途可分为三种：

1. 控制式发送机 KF：主要用来与控制式变压器或控制式差动发送机一起工作。

2. 控制式差动发送机 KCF：主要用来与控制式变压器一起工作。其作用原理类似于力矩式差动发送机，但因其以电气讯号供给控制式变压器，故转轴上没有力矩。

3. 控制式自整角变压器 KB：主要用来与控制式发送机及控制式差动发送机一起工作。其定子接收由控制式发送机或控制式差动发送机而来的电气角度讯号。转子的输出电压正比于输入电气角度与控制式变压器转子角度之差的正弦函数。

我国自行设计的 KL 系列自整角机共有八个机座号，其机壳外径见表 1-1。

表1-1 自整角机的机座号及机壳外径

机 座 号	12#	20#	28#	36#	45#	55#	70#	90#
机壳外径 D_K (毫米)	12	20	28	36	45	55	70	90

分析统计表明,上述八个机座号的各种规格产品的性能,基本上适合我国国民经济及国防建设发展的需要,而且也便于工厂组织生产。KL 系列自整角机的技术数据见表 1-2。

表1-2 KL 系列自整角机技术数据

序 号	型 号	额定电压 (伏)	频 率 (赫)	最 大 副方电压 (伏)	比力矩 (克·厘米 /度)	输入电流 (安)	输入功率 (瓦)
1	12KF4G	20	400	9	—	0.07	—
2	12KCF4G	9	400	9	—	0.1	—
3	12KB4G	9	400	18	—	0.05	—
4	20KF4E	36	400	16	—	0.072	—
5	20KCF4E	16	400	16	—	0.148	—
6	20KB4E	16	400	32	—	0.081	—
7	28KF4B	115	400	90	—	0.042	—
8	28KCF4B	90	400	90	—	0.039	—
9	28KB4B	90	400	58	—	0.02	—
10	28KF4E	36	400	16	—	0.135	—
11	28KCF4E	16	400	16	—	0.252	—
12	28KB4E	16	400	32	—	0.126	—
13	28KB4E ₁	16	400	32	—	0.059	—
14	28LF4B	115	400	90	0.6	0.1	2
15	28LCF4B	90	400	90	—	—	—
16	28LJ4B	115	400	90	0.6	0.1	2
17	28LF4E	36	400	16	0.6	0.3	2
18	28LCF4E	16	400	16	—	—	—
19	28LJ4E	36	400	16	0.6	0.3	2
20	36KF4B	115	400	90	—	0.092	—
21	36KCF4B	90	400	90	—	0.078	—
22	36KB4B	90	400	58	—	0.039	—
23	36LF4B	115	400	90	2.5	0.3	4
24	36LCF4B	90	400	90	1.5	0.3	4
25	36LJ4B	115	400	90	2.5	0.3	4

(续)

序 号	型 号	额定电压 (伏)	频 率 (赫)	最 大 副方电压 (伏)	比力矩 (克·厘米 /度)	输入电流 (安)	输入功率 (瓦)
26	45KF4B	115	400	90	—	0.2	—
27	45KCF4B	90	400	90	—	0.156	—
28	45KB4B	90	400	58	—	0.078	—
29	45KF5C	110	50	90	—	0.038	—
30	45KCF5C	90	50	90	—	0.035	—
31	45KB5C	90	50	58	—	0.028	—
32	45LF4B	115	400	90	8	0.6	8
33	45LCF4B	90	400	90	4	0.6	8
34	45LJ4B	115	400	90	8	0.6	8
35	45LF5C	110	50	90	3	0.15	3
36	45LCF5C	90	50	90	—	—	—
37	45LJ5C	110	50	90	3	0.15	3
38	55LF4B	115	400	90	15	0.9	12
39	55LCF4B	90	400	90	—	—	—
40	55LJ4B	115	400	90	15	0.9	12
41	55LF5C	110	50	90	10	0.25	4
42	55LCF5C	90	50	90	—	—	—
43	55LJ5C	110	50	90	10	0.25	4
44	70LF4B	115	400	90	—	—	—
45	70LCF4B	90	400	90	—	—	—
46	70LJ4B	115	400	90	—	—	—
47	70LF5C	110	50	90	—	—	—
48	70LF5C	90	50	90	—	—	—
49	70LJ5C	110	50	90	—	—	—
50	90LF5C	110	50	90	—	—	—
51	90LCF5C	90	50	90	—	—	—
52	90LJ5C	110	50	90	—	—	—

自整角机按结构不同可分为接触式和无接触式两大类。KL 系列自整角机均为接触式。其特点为封闭式、单轴伸。KL 系列自整角机采用封闭式结构可以防止因机械撞击及电刷、滑环污染而造成接触不良对性能的影响，适用于较为恶劣的环境中工作。

按机座号大小不同，KL 系列自整角机结构类型有两种：一种为“一刀通”结构，一种为装配式结构，分别如图1-2、图 1-3 所示。“一刀通”式结构是指定子内径与轴承室为同一尺寸，因此可以一次装夹加工。其主要优点是定、转子的同心度较高；缺点是由于采用了环氧树脂封装灌注，定子与机壳、端盖成为牢固的一体，难于互换。“一刀通”结构主要用于机座号较小的电机，而装配式结构则用于机座号较大的电机。

自整角机主要部件的结构见图 1-4。

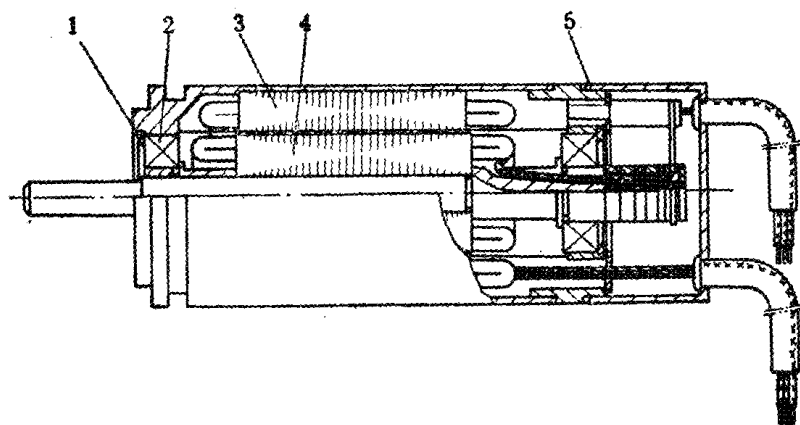


图1-2 “一刀通”式结构

1—挡圈；2—轴承；3—定子；4—转子；5—端罩

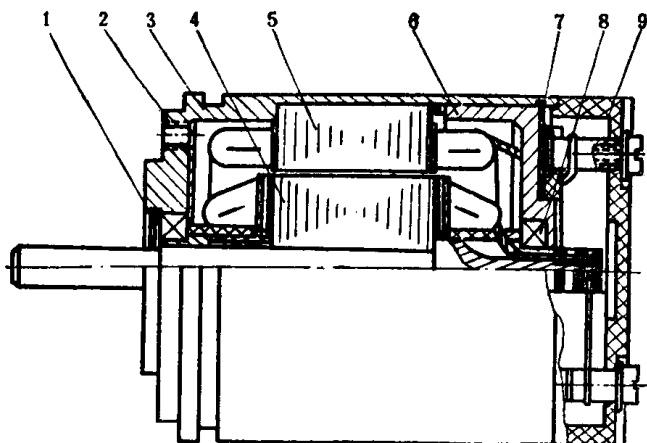


图1-3 装配式结构

1—挡圈；2—保护板；3—机壳；4—转子；5—定子；
6—端盖；7—挡圈；8—轴承；9—端罩

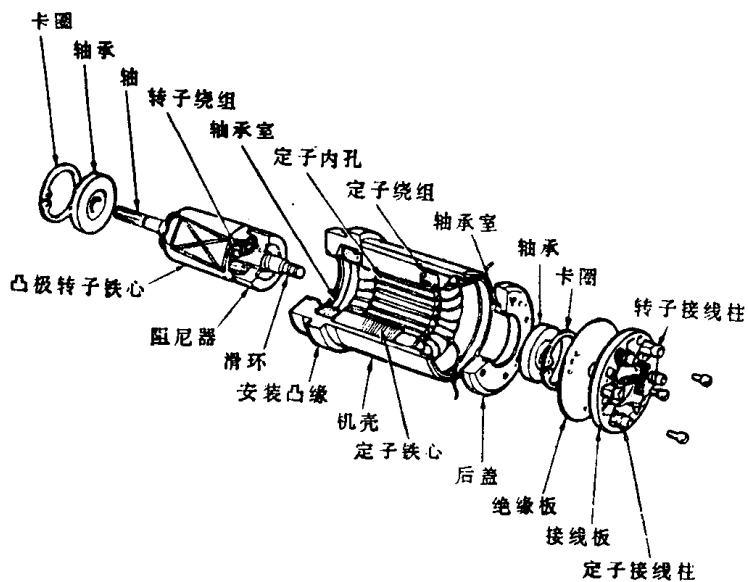


图1-4 自整角机主要结构部件

机壳：机壳材料有硬铝合金和不锈钢两种。小机座号的自整角机一般采用不锈钢做机壳，因为小机座号的自整角机气隙小，为了保证同心度的要求，多采用“一刀通”结构。此外小机座的自整角机的机壳壁薄，要求材料具有较高的机械强度，不锈钢的机械强度抗腐蚀性能优于铝合金。但不锈钢的加工比较困难，成本较高。大机座号的自整角机一般采用装配式结构，可以用硬铝合金做机壳。一般12*、20*机座自整角机采用不锈钢机壳，36*机座以上自整角机采用硬铝合金机壳，28*自整角机机壳可以采用不锈钢，也可用硬铝合金。机壳按形状来分，有杯形和筒形两种。杯形机壳可以不用前端盖（轴伸端的端盖叫前端盖），但其加工比一般的筒形机壳困难。

定子：定子由铁心和绕组组成。定子铁心由定子冲片经涂漆、涂胶叠装而成。为了充分利用轴向长度，铁心两端可以不用绝缘端板，而在铁心的两端面上涂以电阻磁漆达到绝缘的目的。力矩式自整角机的定子冲片采用高导磁率、低损耗的硅钢薄板。控制式自整角机由于有剩余电压和电气精度的要求，定子冲片以采用磁化曲线线性度好、比损耗低、导磁率高的铁镍软磁合金为好，也可采用符合上述要求的硅钢薄板材料，如DG41等。

无论控制式或力矩式自整角机，定子铁心总是做成隐极的，以便将三相同步绕组布置在定子上。在装配式结构中，定子绕组需浸环氧树脂漆或其他绝缘漆。

转子：自整角机的转子铁心有凸极式和隐极式两种。凸极转子结构与凸极同步电机转子相似。但在自整角机中均为两极，形状则与哑铃形相似，以保证在 360° 范围内能够自动同步的要求。隐极式转子结构与绕线式异步电机相似。转子

铁心导磁材料选用的观点与定子铁心相同。力矩式自整角机凸极式转子冲片可以采用有方向性的冷轧硅钢薄板，以提高纵轴方向的导磁率，降低横轴方向的导磁率。

自整角机转子采用凸极或隐极结构，应视其性能要求而定，一般可按下列原则考虑：

1. 控制式自整角发送机：要求输出阻抗低，采用凸极式结构较好。发送机的精度主要取决于副方，原方采用凸极或隐极对其电气精度影响不大。

2. 差动式自整角机：由于原、副方均要求布置三相绕组，无疑应采用隐极结构。

3. 自整角变压器：由于转子上的单相绕组为输出绕组，为了提高电气精度、降低剩余电压，采用隐极以便布置高精度的绕组。但事物的矛盾在一定条件下是可以互相转化的，在精度及剩余电压要求不高的条件下，凸极转子结构的自整角机也可作为自整角变压器使用。自整角变压器采用隐极结构可以降低从发送机取用的励磁电流，有利于多个自整角变压器与控制式发送机的并联工作。

4. 力矩式自整角机：因为有比力矩和阻尼时间的要求，采用凸极式或隐极式转子结构，应视其横轴参数配合是否合理而定。小机座号（45°以下）的工频和中频自整角机一般采用凸极结构。大机座号（70°以上）的工频自整角机可以采用凸极结构，中频自整角机则有可能采用隐极结构。

§ 1-2 控制系统对自整角机的技术要求

作为控制系统的元件，自整角机除要求重量轻、体积小、精度高、寿命长外，根据自整角机在系统中应用的特点，还有下列要求：

一、对力矩式自整角机的技术要求

1. 有较高的静态和动态转角传递精度；
2. 有较高的比力矩和最大同步力矩；
3. 要求阻尼时间短。即当接收机与发送机失调时，接收机能迅速回到与发送机协调的位置；
4. 在运行过程中无抖动、缓慢爬行、粘滞等现象；
5. 能在一定的转速下运行而不失步；
6. 要求从电源取用较小的功率和电流。

二、对控制式自整角机的技术要求

1. 电气误差尽可能小；
2. 剩余电压的基波值及总值尽可能小；
3. 控制式变压器应有较高的比电势和较低的输出阻抗，以满足放大装置对灵敏度的要求；
4. 控制式变压器应有较高的输入阻抗，控制式发送机则应有较低的输出阻抗；控制式差动发送机的阻抗应与发送机和变压器的阻抗相匹配；
5. 速度误差要小。

§ 1-3 自整角机设计的一般问题

自整角机种类繁多，而且结构形式多样，其性能要求各不相同，有的甚至是矛盾的。设计时应根据各种类型自整角机的不同性能要求全面考虑，突出主要性能，分别取舍，以求得较为合理的解决。例如自整角机的温升可以不必计算，而通过选取适当的电磁负载控制温升不超过规定的数值。又如自整角机作为控制元件，材料选用的要求与一般电机不完全相同，如绝缘材料的选用并不是从使用寿命要求出发的，在保证一定的绝缘强度，且不影响性能的情况下，可以从简。

下面着重说明如何考虑自整角机的零、部件通用性，以及力矩式自整角机的选型原则。

一、通用性的考虑

1. 力矩式发送机与力矩式接收机：设计时两者的结构和电磁数据可以相同，出厂试验时两者的考核指标有所不同。如接收机要考核阻尼时间。发送机虽然出厂试验时不考核阻尼时间，但由于在控制系统中发送机与接收机往往成对使用，或者一台发送机带多台接收机，因此设计发送机时也应考虑阻尼性能的要求。

2. 控制式发送机与力矩式发送机：在同一机座号中，控制式发送机与力矩式发送机仅绕组数据不同，两者结构则完全相同。力矩式自整角机要求比力矩高，后面我们将说明，当自整角机的横轴短路电阻 r'_q 愈小，而且横轴短路电抗 x'_q 与 r'_q 较为接近时，比力矩愈大。后面还将看到，由于参数 r'_q 和 x'_q 与阻抗 Z_{sR-90} (Z_{sR-90} 叫做转子与零位偏离 90° 时的定子短路阻抗) 有如下关系：

$$Z_{sR-90} = \frac{3}{2} (r'_q + jx'_q)$$

因此，对力矩式自整角机相应要求阻抗 Z_{sR-90} 较小。控制式发送机要求有较低的输出阻抗，即要求阻抗 Z_{sR} (定子短路阻抗) 较小。一般说来，对于同一类型的自整角机， Z_{sR-90} 较小者 Z_{sR} 也较小。设计时，力矩式发送机磁路磁通密度选用较高，因而其阻抗较低，如其剩余电压满足控制系统的要求，则可作为低阻抗的控制式发送机使用。

3. 控制式差动发送机与力矩式差动发送机、差动接收机：控制式差动发送机与力矩式差动发送机的结构相同，仅绕组数据不同，前者选用磁通密度较低，要求剩余电压较小。