

内 容 提 要

本书对旋转放大机、各种微型电动机（直流伺服电动机、整流子电动机、感应伺服电动机、同步伺服电动机、步进电动机等）、测速发电机、自整角机、旋转变压器的运行原理、构造、特性、选择和应用作了系统的阐述。可以作为电气化、自动化专业的学生、研究生的参考书，也可作为有关专业的科学技术工作者的参考书。

责任编辑：胡玉雁

E.V.ARMENSKY G.B.FALK
FRACTIONAL-HORSEPOWER
ELECTRICAL MACHINES
Mir. Publishers 1978

微 电 机
(苏)E.B.阿曼斯基 G.B.弗尔兹
张美东 戴鸿仪 译

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门内和平门16号)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 9
字数 197 千字 印数 1—8,620
1982年12月第1版 1982年12月第1次印刷
书号 15035·2512 定价 0.95 元

目 录

序言

引言	1
0.1. 微电机的类型和在现代工程技术中的作用	1
0.2. 微电机的基本技术和经济要求	3
0.3. 微电机可靠性的一般问题	4
第一章 旋转放大机	12
1.1. 概述	12
1.2. 自励旋转放大机	14
1.3. 正交磁场旋转放大机(交磁放大机)的结构和运行原理	21
1.4. 交磁放大机的静态和动态特性	25
1.5. 旋转放大机的应用	32
第二章 微型电动机	36
2.1. 概述	36
2.2. 微型直流伺服电动机的结构和运行原理	37
2.3. 微型直流伺服电动机的控制方法	48
2.4. 微型直流伺服电动机的动态特性	61
2.5. 万能微型整流子电动机	66
2.6. 微型感应伺服电动机的结构和运行原理	69
2.7. 微型感应伺服电动机的控制方法	81
2.8. 微型感应伺服电动机的动态特性	91
2.9. 连续运转的微型同步伺服电动机	94
2.10. 微型同步伺服电动机转速的稳定性	112
2.11. 连续运转的低速同步电动机	117
2.12. 步进电动机	131

2.13. 辅助微型单相电动机	144
2.14. 交流电动机组	152
2.15. 伺服电动机的应用	157
第三章 测速发电机	162
3.1. 概述	162
3.2. 直流测速发电机	163
3.3. 交流感应测速发电机	171
3.4. 交流同步测速发电机	182
3.5. 测速发电机的动态特性	183
3.6. 测速发电机的应用	185
第四章 自动同步机(自整角机)	190
4.1. 概述	190
4.2. 单相自整角机的机械结构	191
4.3. 同步指示器	196
4.4. 同步变压器	206
4.5. 指示传输系统中的差动式自整角机	210
4.6. 高转矩指示传输系统	213
4.7. 同步指示器的动态特性	214
4.8. 自整角机的应用	217
第五章 旋转变压器	222
5.1. 概述	222
5.2. 旋转变压器的结构	223
5.3. 正弦-余弦旋转变压器	225
5.4. 旋转变压器的平衡调整(补偿)	229
5.5. 线性、比例和向量计算旋转变压器	234
5.6. 旋转变压器的误差	243
5.7. 正弦-余弦旋转变压器用于远方高准确度的角位 移传输系统	245
5.8. 旋转变压器的应用	251

引言

0.1. 微电机的类型和在现代工程技术中的作用

根据微电机的不同用途，可将它们分为如下两种类型：

1. **通用式微电机**（图0.1）包括整流子式、感应式和同步式微型电动机。它们单独地或串联地用于驱动各种机构、部件或家庭用具等。

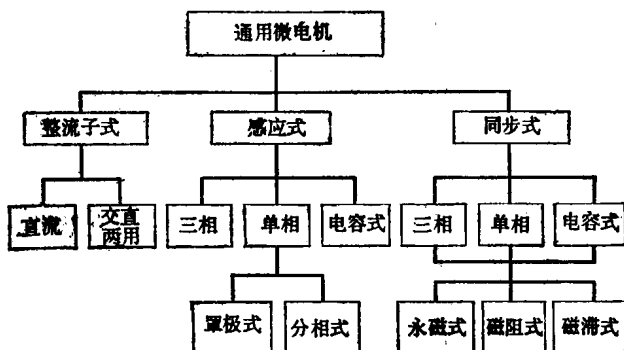


图 0.1. 通用式微电机的类型

2. **自动控制系统用的微电机**（图0.2）根据它们用途不同，又可再分为四类：

- (a) 将电能转变为机械能的动力机；
- (b) 将旋转角，角速度，角加速度转变为电信号的信息机；
- (c) 与陀螺装置结合的回转机；
- (d) 电流电压变换器，频率变换器以及功率放大机。

微电机在现代控制系统中所起的重要作用，还可从它构成伺服系统的一部分这方面显示出来。

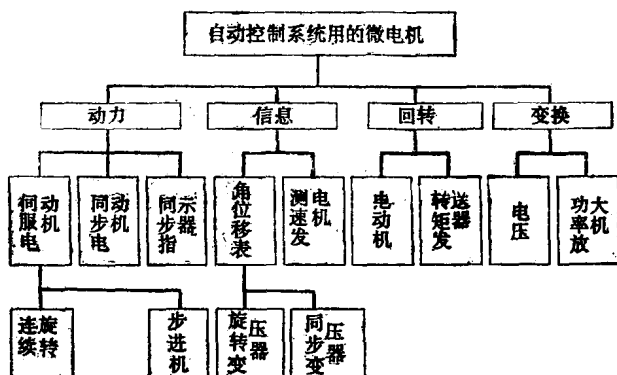


图 0.2. 自动控制系统用的微电机的类型

(图0.3) 表示一个简单的伺服系统，两电位器 R_1 与 R_2 组成电桥，一个作驱动元件，一个作比较元件。电位器接于电压为 V 的直流电源。在电位器的滑片上加一个信号，送入转换器 C ，经放大器 A 放大后送到伺服电动机 SM 。电动机经减速器 RU 将运动传给控制装置 CE ，同时推动电位器 R_2 的滑片。当电位器 R_1 与 R_2 的滑片原先处于位置 I 时，此二滑片间的电位差为 0 ，这时系统不能传输任何信号，系统称为处于平衡状态。

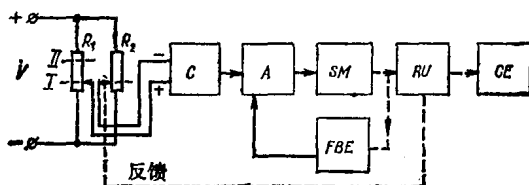


图 0.3. 伺服系统

移动电位器 R_1 的滑片至位置Ⅱ，使转换器输入端得到一个信号，信号的大小取决于移动量的大小（现在是与位置Ⅰ和位置Ⅱ的距离成正比），它的极性取决于移动的方向（现在是电位器 R_1 输入正电位，电位器 R_2 输入负电位）。经转换与放大之后，信号将推动伺服电动机，电动机将驱动控制装置CE及电位器 R_2 的滑片。这个运动将继续进行下去直至电位器的滑片移到位置Ⅱ为止。在实际的伺服系统中还装有反馈元件以改进动态特性。现在反馈元件是FBE，装在伺服电动机与放大器之间。

对于这样类型的直流系统，可用一台直流放大机作放大器，一台直流机作伺服电动机，一台直流测速发电机作反馈元件。对于交流系统，可用同步变压器或旋转变压器代替电位器，用一台感应电动机作伺服电动机，用一台感应式测速发电机作反馈元件。

0.2. 微电机的基本技术和经济要求

微电机的主要技术和经济要求可分类如下。

1) 一般情况下，不考虑机器的功用，结构和运行原理。通用机器的要求如下：

- (a) 高效率，高功率因数；
- (b) 使用年限长；
- (c) 成本低；
- (d) 构造简单，制造容易；
- (e) 可以修理。

对于自动控制装置中用的微电机这些要求并不很重要。微电机的主要要求如下：

- (a) 原信号的转换高度准确；

- (b) 工作稳定;
- (c) 响应灵敏;
- (d) 高度可靠。

对信息机和回转机的主要要求是特性的准确和稳定。动力机和功率变换机不须高效率和高功率因数，并有足够的准确性和响应灵敏。

2) 对微电机的要求还取决于运行和使用的条件:

- (a) 航空用的微电机要求体积小，重量轻;
- (b) 运输业、农业、航空用的还要求抗震，抗冲击;
- (c) 核反应堆、外层空间和热带用的要求抗环境影响，抗辐射;
- (d) 矿井用的要求防爆;
- (e) 纪录或复制用的要求噪音小;
- (f) 与电子设备结合使用的要求电磁波干扰小;
- (g) 真空器具用的要求密封性好，不漏气。

0.3. 微电机可靠性的一般问题

微电机的可靠性表明电机在所要求的环境下和规定的时间内良好工作的可能性。

可靠性是电机的主要技术经济指标之一。对于短时工作或一次冲击式工作的设备(如军用的)，微电机的高度可靠性极为重要。

对长期使用的微电机的可靠性，应在考虑其经济因素的同时，保证它有一个合理的可靠性水平。即在成本最低时，所获得的最佳可靠水平。

微电机可靠性的定量估算，可采用概率和数理统计等方法进行。

根据可靠性理论，各种设备可分为可修复的和不可修复的两类，即有的设备损坏了还可以修复，有的则不能。损坏，即工作能力的全部或一部分损失掉（机械或电气故障，功能变坏或全坏等）。微电机属于可修复的设备，但它具有哪一类可靠性，则取决于使用情况。

在可靠性理论中，通常认为故障是无规律的事件，因此所有的数量特性都带偶然性。对于分析微电机最适用的特性（特别是不可修复特性）有以下几种：

无故障运行概率 $P(t)$ 即一台机器到损坏为止，无故障运行的时间是大于或等于规定的时间。

统计学估算无故障概率用以下公式（假定机器损坏后既不修复也不更换）

$$P^*(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (0.1)$$

式中 N_0 为试验开始时的机器数； $n(t)$ 为在 t 时间内损坏的机器数。

微电机的故障概率为

$$Q(t) = 1 - P(t) \quad (0.2)$$

故障强度 $\lambda(t)$ ，即在规定的起始时间之后，每单位时间内机器的故障概率，等于故障概率密度与无故障概率之比。

$$\lambda(t) = \frac{\frac{d}{dt}Q(t)}{P(t)} \quad (0.3)$$

故障强度的统计估算可用下式

$$\lambda^*(t) = \frac{n(t)}{\Delta t N_{av}} \quad (0.4)$$

式中 $n(t)$ 为在时间 Δt 内出故障的机器数； N_{av} 为在时间 Δt 内

无故障运行的平均机器数。

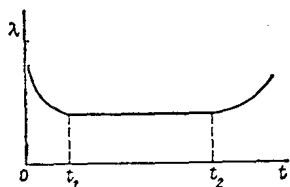


图 0.4. 故障强度特性

根据经验得出微电机的故障强度的典型特性为(图0.4)所示。 $0-t_1$ 段故障较多,但曲线急剧下降。这说明由于制造上缺点造成初期故障较多。 t_1-t_2 段表明机器正常运行。 t_2 以后的末段,故障强度突然增加,

这是由于机器部件的机械磨损或电气损耗造成故障。

因此,正常运行期间的机器的故障强度可以认为是常数,即 $\lambda = \text{const}$ 。在这种情况下,无故障运行概率可用指数规律表示。

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (0.5)$$

无故障运行平均时间 t_{av} , 即机器无故障工作时间的数学期望值。

$$t_{av} = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (0.6)$$

它表明从开始运行到第一次故障出现的平均时间间隔。

由于 $\lambda = \text{常数}$, 平均无故障时间

$$t_{av} = \frac{1}{\lambda} \quad (0.7)$$

也可以同样表明两次故障之间的平均无故障时间。

统计学估算平均无故障时间可用下式。

$$t_{av}^* = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0} \quad (0.8)$$

式中 t_i 为第 i 台样机的无故障时间。

微电机的可靠性比自动控制系统的其它无触点元件要差些，因为后者没有运动的部件。

自动控制系统元件的故障强度（每小时）

微电机	$(0.01 \sim 8.0) \times 10^{-4}$
变压器	$(0.0002 \sim 0.64) \times 10^{-4}$
电阻器	$(0.0001 \sim 0.15) \times 10^{-4}$
半导体器件	$(0.0012 \sim 5.0) \times 10^{-4}$

经验表明，大多数故障是由于微电机的主要部件出故障或特性改变所造成的。

微电机主要部件可能出现的大多数故障如下。

滑 动 接 触

- (a) 刷握受机械损伤；
- (b) 整流子或滑环被电刷磨损；
- (c) 由于电刷磨损或电刷压力不足造成电刷与整流子或滑环接触不良。

轴 承

- (a) 轴承破裂；
- (b) 由于润滑不好造成轴承卡住。

绕 组

(a) 由于过载，造成线匝间或端子烧坏，温度变化造成绕组变形，电腐蚀（特别是湿度大的环境中）；

(b) 由于绝缘强度不够，造成匝间或对地绝缘损坏（特别是高湿度，高温环境中）。

磁 系 统

- (a) 由于冲击，振动和变形造成磁特性发生变化；
- (b) 由于铁心叠片间短路或电腐蚀造成磁特性发生变化。

轴承的工作条件和滑动接触状况主要取决于电机转子的

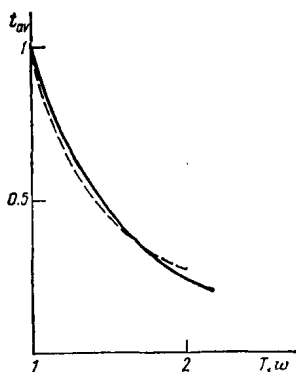


图 0.5. 整流子微电机的
平均无故障运行时间与转速
和温度的关系

转速。大部分部件的磨损（特别是整流子和电刷）随转速增加而增加，因而这些部件以及整个电机的可靠性也随之降低。

（图0.5）中表明直流整流子微电机的平均无故障运行时间 t_{av} 与转速的关系（图中的实线）。额定转速和额定平均无故障时间作为 1。

因此制造厂保证的电动机工作寿命取决于额定转速。例如 ДПР 系列的整流子微电机的

保证工作寿命为：

额定转速为 2,500 转/分时，2,000 至 3,000 小时；

额定转速为 9,000 转/分时，200 至 600 小时。

这说明要想获得高度的可靠性，必须取消滑动接触，发展无接触结构。MB 系列无接触微电机在额定转速 12,500 转/分时，工作寿命为 10,000 小时；而 ДПМ，ДПР 等系列直流整流子微电机转速低得多，寿命却不超过 3,000 小时。

电机绝缘的可靠性在很大程度上取决于周围环境温度，相对湿度和电机本身的温度。湿度和绝对温度增加则绝缘的电气强度降低，由于对地绝缘和匝间绝缘的破坏造成故障强度增大。

温度和湿度超过规定的限值，不仅对绝缘而且对其他许多部件产生不良影响。对许多直流和交流微电机进行试验的

结果表明,由于湿度太大或温度过高,或过低所造成的故障,占整个各种非额定运行条件所造成的故障的70~100%。

(图0.5)表示直流整流子微电机的平均无故障时间 t_{av} 与周围环境温度(用虚线表示)的关系。(额定的周围环境温度和对应的时间当作1)

制造厂在确定微电机的保证工作寿命时,上述方面都是重要的因素。例如ДИД-А系列感应伺服电动机当周围环境温度为100℃时寿命为500小时,若周围环境温度不超过70℃,则寿命可达1,000小时。

使电机在超过规定限值的温度下工作,不仅故障增多,而且使它的输出特性变坏。对于信息机将使它的相位误差和振幅误差增大。对于动力机则使它在超限的绝对温度下达不到需要的转速等。

因此,为某种特别装置选择微电机时,必须认真考虑温度条件,其他工作条件当然也要考虑。

1) 一般微电机都做成全封闭式的,在这种情况下,等于周围环境的温升主要取决于每单位机座面积的功率损失。将微电机装在设备上面时,应使机座与金属底盘或其它元件相联,以改善散热条件。

2) 微电机可以装在封闭的箱体或分隔小腔内,形成另一个发热部件。此时应认真计算当微电机工作时周围环境的温度。由于周围环境温度升高,电机的绝对温度将增加。如前所述,绝对温度升高将影响电机的可靠性和准确性。

3) 微电机中的动力机,旋转功率放大机,感应式测速发电机,以及通用电动机本身就是强热源。在计算它们的温度影响时必须注意它们的运行状况。例如长时无负载、满载、频繁起动和反转(间歇工作)等等。信息机固有的热损耗很

表 0.1

电 机 类 型	λ , 损 坏 (每小时)	工作寿命 (小时)
ДПМ型直流微型永久磁铁整流子电动机		
2500转/分	$(1.3 \sim 8) \times 10^{-4}$	1,000
9000转/分	—	50 ~ 300
ДПР型直流微型永久磁铁整流子非磁性电枢电动机		
2500转/分	—	2,000 ~ 3,000
9000转/分	—	200 ~ 600
ПЯ型直流微型永久磁铁圆盘-电枢电动机	0.1×10^{-4}	500
МВ型微型永久磁铁无接触电动机	—	10,000
微型感应伺服空心非磁性转子电动机		
АДП	—	1,500 ~ 2,000
ЭМ-М	—	400
ДИД	2.9×10^{-4}	500
ЛКМ系列微型鼠笼感应伺服电动机	—	1,000
УАД型通用微型感应电动机	—	3,000
АПН型高可靠性感应电动机	$(0.2 \sim 0.4) \times 10^{-4}$	5,000
家庭用单相微型感应电动机		
ДАО	1.7×10^{-4}	—
КД-40	1.35×10^{-4}	—
КД-3-5А (滑动轴承)	8.2×10^{-4}	—
ДСР型微型同步减速电动机 (转子转速115转/分) 内装减速器速比115/60或115/2	0.008×10^{-4}	10,000
ДСД型微型分极同步电动机 (转子转速3,000转/分) 内装减速器速比3,000/60或3,000/2	$(1.7 \sim 2.6) \times 10^{-4}$	—
ДС型永久磁铁同步电动机	—	3,000
Г型微型磁滞同步电动机		2,000
永久磁铁步进同步电动机		
ШД1	10^{-4}	—
ДШ	—	1,000
ШД300型磁阻步进同步电动机	0.75×10^{-4}	—
БД-160А和БС-155А型单相旋转变压器, 装有插入环形变压器	0.06×10^{-4}	5,000

小，它们的温度主要取决于周围环境温度。

微电机的可靠性也受工作条件的影响，如在振动，冲击或大气压力过低的条件下，可靠性将降低。

为了提高它们的可靠性，可以采取以下措施。

- (a) 改进机器的结构；
- (b) 改进制造技术；
- (c) 改进绝缘的耐热性和机械与电气性能；
- (d) 在规定的工作条件下使用电机。

微电机的可靠性与它们在机械方面或电气方面的耐久性有联系。机械和电气方面的耐久性自始至终可用工作寿命来确定。通常它们也是评价通用微电机和其它可修复机器的标准。确定微电机的工作寿命时还要考虑它们的用途、工作条件和经济效果（通用机更要考虑这一点）。

从经济效果考虑，微电机的最佳耐久性应是在整个工作寿命时期内（运转时间），维修量最少，运转费用最低。

（表0.1）列出了由制造厂提供的几种型号的微电机的保证工作寿命及其可靠性数据。

第一章 旋 转 放 大 机

1.1. 概 述

功率放大机是一种利用小功率信号（输入值）来控制相当大功率（输出值）的设备。输出值是输入信号的函数，放大器的能量由外电源供给。

根据控制能量的不同，放大器可分为：电动的，气动的，液力的，机械的等类型。

电动的放大器同样又可分为：电子的，闸流管的，磁力的，铁电介质的和旋转的等类型。前五种是静止的机械，后一种是具有旋转电枢的放大机。

旋转放大机的输出（受控制的）功率是由驱动电动机的机械功率转变而来的。

旋转放大机实际上是直流整流子电机。

根据励磁方式的不同，放大机又可分为：直轴励磁放大机和交轴励磁放大机或交磁放大机。

直轴励磁放大机的主磁通沿着电机的直轴轴线通行，可分为：

- （1）它励放大机；
- （2）自励放大机；
- （3）电动机-放大机组；
- （4）双整流子放大机；
- （5）二级和三级直轴励磁放大机。

交轴励磁放大机（交磁放大机）的主磁通是沿着正交轴

线通行的，可分为：

- (1) 全节距绕组交磁放大机；
- (2) 半节距绕组交磁放大机；
- (3) 分离磁系统交磁放大机。

放大机的控制功率越小则整个控制装置的体积也越小，越轻。放大机最重要的特性是它的放大倍数或增益。因此，放大机的特性可用功率增益，电流增益和电压增益来表示。

交磁放大机的功率增益 K_P 是输出功率与控制功率之比。

$$K_P = P_{out}/P_{cont}$$

交磁放大机的电流增益 K_I 是通过放大机输出电路的电流与控制电流之比。

$$K_I = I_{out}/I_{cont}$$

交磁放大机的电压增益是跨接于输出电路两端的电压与控制电压之比。

$$K_V = V_{out}/V_{cont}$$

因此

$$K_I K_V = K_P$$

旋转放大机可能取得高达 10^3 至 10^5 的功率增益。

一个更为重要的特性是以放大机电路的时间常数表示的放大机响应。

时间常数以调节过程中的磁场能量的变化来确定的。一个电路的时间常数为：

$$\tau = L/R$$

式中 L 为电路的电感， R 为电路的电阻。

放大机的时间常数 $\tau = 0.02$ 至 0.2 秒。

最好的放大机应该有很大的功率增益和灵敏的响应，即

时间常数应最小。由于放大机的时间常数与功率增益成比例，因此不同的放大机可再用一个特性进行比较，即用一个品质因数 K_q 比较。 K_q 是功率增益与放大机各级的时间常数的和之比，即：

$$K_q = K_P / \Sigma \tau$$

用于自动控制系统的放大机还有一个重要的特点，即它们的输出特性的直线性，也就是输出对输入的特性之比的直线性。如果这条要求能满足，则放大机的增益就能保持恒定，与控制信号无关。

旋转放大机用于自动控制系统作功率放大器，主要是承受暂态时可能发生的相当大的过负载电流。因此旋转放大机的另一更重要的特性是它的过载能力。

同样，旋转放大机具有高度的可靠性和稳定性是很重要的。

在不同的工作条件下，旋转放大机应有的特性已在0.2.节中阐述过。

需要小功率时可采用正交励磁放大机，某些特殊用途的系统则可用自励放大机。

就它们的机械结构和电路的安排来看，独立励磁的放大机和独立励磁的直流发电机相似。独立励磁放大机的功率增益相当小，因而应用不广。在华德-列昂拉系统 (Ward-Leonard systems) 中要求电动机具有广泛的调速范围，发电机作独立励磁放大机运行。多级直接励磁放大机在小功率系统很少使用。

1.2. 自励旋转放大机

自励放大机可用来获得大的功率增益。自励放大机与独