

电机工程手册

第23篇 控制微电机

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会

机械工业出版社

73.21073
210
23:2

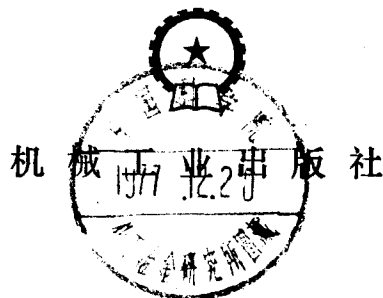
电机工程手册

第23篇 控制微电机

(试 用 本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册

34652 / B



本篇包括各类常用控制微电机——旋转变压器、交流测速发电机、直流测速发电机、自整角机、电机扩大机、交流伺服电动机、直流伺服电动机、步进电动机等。着重介绍用途、分类、结构、原理、特性、设计、试验、应用和制造工艺要点。对于一些新型的控制微电机也专列一章（其他控制微电机）介绍。

第23篇 控制微电机

（试 用 本）

西安微电机研究所 主编

*

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许可证出字第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 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $6\frac{3}{4}$ ·字数 179 千字

1977年9月北京第一版·1977年9月北京第一次印刷

印数 00,001—52,000·定价 0.53 元

*

统一书号：15033·4471

毛主席语录

人类的历史，就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。这个历史永远不会完结。在有阶级存在的社会内，阶级斗争不会完结。在无阶级存在的社会内，新与旧、正确与错误之间的斗争永远不会完结。在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来，特别是无产阶级文化大革命以来，机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下，坚持政治挂帅，以阶级斗争为纲，贯彻“**独立自主、自力更生**”的方针，取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验，加强机械工业科学技术的基础建设，适应实现“四个现代化”的需要，我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》，使出版工作更好地为无产阶级政治服务，为工农兵服务，为社会主义服务。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用，也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上，力求做到深入浅出，简明扼要，直观易懂，归类便查，以便广大机电工人使用，有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书，着重介绍各专业的理论基础、常用计算公式、数据、资料、关键问题以及发展趋向。在编写中，力求做到立足全局，勾划概貌，反映共性，突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时，《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成，构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分，共七十九篇；《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分，共五十篇。

32906

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区的科技交流部门, 为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中, 广泛征求广大机电工人的意见, 坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则, 发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面, 广泛征求意见, 先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验, 试用本在内容和形式方面, 一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证, 提出批评和建议, 以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是《电机工程手册》第23篇, 由西安微电机研究所主编, 参加编写的有博山电机厂、湘潭电机厂、西安微电机厂、哈尔滨工业大学、西安交通大学等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助, 在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

目 录

编辑说明
常用符号表

第 1 章 概 述

1 基本用途和分类	23-1
2 基本要求	23-3
2.1 高可靠性	23-3
2.2 高精度	23-3
2.3 快速响应	23-4
3 基本特点	23-4
3.1 生产特点	23-4
3.2 设计特点	23-4
3.3 工艺特点	23-4
3.4 试验特点	23-4

第 2 章 旋转变压器

1 用途和分类	23-5
2 基本结构和工作原理	23-6
3 特性	23-6
4 设计	23-7
4.1 设计特点	23-7
4.2 主要技术要求	23-7
4.3 定子铁心内径	23-7
4.4 冲片设计及槽配合	23-7
4.5 气隙长度	23-8
4.6 电磁负荷选择	23-9
4.7 正弦绕组计算	23-9
4.8 线性旋转变压器最佳变比	23-10
5 试验	23-10
5.1 正余弦函数误差试验	23-10
5.2 电气误差试验	23-11
5.3 线性误差试验	23-11
5.4 零位误差试验	23-11
5.5 变比和输出相位移测量	23-11
6 应用	23-12
7 电感移相器	23-12
7.1 基本结构及移相原理	23-12
7.2 电感移相器的设计特点	23-13

第 3 章 交流测速发电机

1 用途	23-13
2 分类	23-13
3 结构	23-13
4 原理	23-14
5 特性	23-14
6 设计	23-15
6.1 设计特点	23-15
6.2 主要技术要求	23-15
6.3 机座号的选择	23-15
6.4 主要尺寸	23-16
6.5 内、外定子冲片	23-16
6.6 定子绕组	23-16
6.7 杯形转子	23-17
7 试验	23-17
7.1 线性误差测量	23-17
7.2 输出相位移和相位误差测量	23-18
8 应用	23-18

第 4 章 直流测速发电机

1 用途	23-19
2 结构和分类	23-19
3 原理	23-19
4 特性	23-20
5 设计	23-21
5.1 设计特点	23-21
5.2 主要技术要求	23-21
5.3 基本尺寸的确定	23-21
6 试验	23-21
7 应用	23-22
7.1 产品选择	23-22
7.2 使用注意事项	23-22

第 5 章 自整角机

1 用途和工作原理	23-22
1.1 力矩式自整角机工作原理	23-22

23-Ⅷ 目 录

1.2 控制式自整角机工作原理	23-23
2 结构和分类	23-24
2.1 结构	23-24
2.2 分类	23-25
3 特性	23-26
3.1 特性和技术指标	23-26
3.2 设计和工艺对特性的影响	23-26
4 设计	23-27
4.1 设计特点	23-27
4.2 主要技术要求	23-27
4.3 主要尺寸选择	23-27
4.4 气隙	23-28
4.5 冲片设计	23-28
4.6 斜槽	23-28
4.7 导磁材料和磁通密度的选择	23-28
4.8 阻尼绕组	23-29
4.9 绕组计算	23-29
4.10 绕组型式选择	23-30
5 试验	23-30
5.1 电气误差试验	23-30
5.2 零位误差试验	23-31
5.3 静态误差试验	23-32
6 应用	23-32
6.1 控制式与力矩式自整角机比较	23-32
6.2 选用注意事项	23-32
6.3 基准电气零位的确定	23-32
6.4 多台自整角变压器并联使用	23-32
6.5 多台自整角接收机并联使用	23-33
6.6 常见故障及故障原因	23-33

第6章 电机扩大机

1 用途和分类	23-33
2 工作原理及结构特征	23-33
3 特性	23-34
3.1 特性、要求和指标	23-34
3.2 各种去磁效应对特性的影响	23-36
4 设计	23-37
4.1 设计特点	23-37
4.2 主要技术要求	23-38
4.3 极数	23-38
4.4 主要尺寸	23-38
4.5 气隙	23-38

4.6 定子冲片	23-38
4.7 电枢冲片	23-39
4.8 电枢绕组	23-39
4.9 补偿绕组	23-39
4.10 交轴助磁绕组	23-40
4.11 换向	23-40
4.12 控制绕组	23-41
4.13 交流去磁绕组	23-42
4.14 槽满率	23-42
5 试验	23-42
5.1 剩磁电压测定	23-42
5.2 控制绕组平衡性检查	23-42
5.3 温升试验	23-42
5.4 外特性试验	23-42
5.5 时间常数测定	23-42
6 应用	23-43
6.1 选用原则	23-43
6.2 调整、使用和维护注意事项	23-43
6.3 常见故障及其判断方法	23-44

第7章 交流伺服电动机

1 结构和分类	23-45
2 工作原理	23-46
2.1 两相交流伺服电动机的基本 工作原理	23-46
2.2 两相交流伺服电动机的性能特点	23-46
2.3 两相交流伺服电动机的运行特点	23-47
3 特性	23-48
3.1 主要特性指标	23-48
3.2 绕组参数和工艺缺陷对性能的影响	23-49
4 设计	23-49
4.1 设计特点	23-49
4.2 主要技术要求	23-49
4.3 机座号和定子铁心尺寸	23-49
4.4 气隙长度	23-51
4.5 转子铁心主要尺寸	23-51
4.6 定、转子槽配合	23-51
4.7 转子斜槽	23-51
4.8 冲片和磁通密度	23-51
4.9 定子绕组	23-51
4.10 转子导条截面积	23-52
5 试验	23-52

6	应用	23-52
6.1	常用计算公式	23-52
6.2	产品的选择和使用	23-53
6.3	不同有效信号系数的机械特性	23-53
6.4	动态计算	23-53
6.5	移相方法的选择	23-54
7	交流伺服测速机组	23-54

第8章 直流伺服电动机

1	用途	23-54
2	结构和分类	23-54
3	工作原理	23-55
4	特性	23-56
5	设计	23-56
5.1	设计特点	23-56
5.2	主要技术要求	23-56
5.3	电枢直径	23-57
5.4	电枢铁心长度	23-58
5.5	电枢冲片	23-58
5.6	气隙长度	23-58
5.7	极对数	23-58
5.8	定子主要尺寸	23-58
5.9	换向器和电刷	23-59
5.10	电枢绕组	23-59
5.11	换向计算	23-60
5.12	激磁绕组计算	23-60
5.13	永磁钢及其尺寸选择	23-60
6	试验	23-61
6.1	空载始动电压测量	23-61
6.2	转动惯量测量	23-62
6.3	机电时间常数测量	23-62
7	应用	23-62
7.1	常用计算公式	23-62
7.2	产品选用	23-62
7.3	动态计算	23-63
7.4	使用注意事项	23-63

第9章 步进电动机

1	用途	23-64
2	工作原理	23-64
3	结构和分类	23-65

4	特性	23-66
5	单段反应式步进电动机设计	23-68
5.1	主要技术要求	23-68
5.2	基本结构的确定	23-68
5.3	转子外径	23-69
5.4	定子主要数据和气隙长度	23-69
5.5	冲片设计	23-69
5.6	气隙磁导计算	23-69
5.7	磁通密度和磁势	23-71
5.8	绕组设计	23-71
5.9	最大静转矩验算	23-71
6	步进电动机驱动电源	23-71
6.1	对驱动电源的基本要求	23-71
6.2	驱动电源的组成	23-71
6.3	驱动电源分类	23-72
7	试验	23-72
7.1	起动频率试验	23-72
7.2	运行频率试验	23-73
7.3	最大静转矩试验	23-73
7.4	步距精度试验	23-73
8	应用	23-73
8.1	步进电动机的选择	23-73
8.2	使用注意事项	23-73

第10章 其他控制微电机

1	多极旋转变压器和多极自整角机	23-74
2	感应同步器	23-74
2.1	圆盘式感应同步器	23-74
2.2	直线式感应同步器	23-75
3	直流力矩电动机	23-75
3.1	结构特点	23-75
3.2	使用时注意事项	23-76
4	电磁减速式电动机	23-76
4.1	反应式电磁减速同步电动机的 工作原理	23-76
4.2	激磁式电磁减速同步电动机的 工作原理	23-77
5	滚切式电动机	23-77
6	谐波电动机	23-78
7	电子换向式无刷直流电动机	23-78
7.1	结构	23-79
7.2	工作原理	23-79

第11章 控制微电机制造工艺要点

1 冲片制造.....	23-80
2 铁心叠压.....	23-81
3 线圈制造.....	23-81
4 绕组绝缘处理.....	23-82
4.1 浸渍工艺.....	23-82
4.2 浇注工艺.....	23-83
5 机械加工.....	23-84
5.1 机械加工工件的特征.....	23-84
5.2 对机械加工的要求.....	23-85
5.3 不锈钢加工.....	23-85
5.4 转子杯加工.....	23-85
6 电刷、滑环及换向器制造.....	23-85
6.1 电刷与滑环.....	23-85
6.2 塑料换向器.....	23-85
7 装配.....	23-86

附 录

附录1 控制微电机型号命名方法	23-87
附录2 控制微电机产品名称代号	23-87
附录3 控制微电机机座号	23-88
附录4 控制微电机使用环境条件	23-88
附录5 控制微电机电源频率和电压等级	23-88
附录6 旋转变压器主要技术数据表	23-89
附录7 CK系列空心杯转子异步测速发电 机主要技术数据表	23-91
附录8 自整角机主要技术数据表	23-92
附录9 SL系列两相交流伺服电动机主要技术 数据表	23-93
附录10 SZ系列直流伺服电动机主要 技术数据表	23-95
参考文献.....	23-97

常用符号表

A ——线电流密度	h_c ——轭高	p ——极数
A_{cu} ——裸铜线截面积	h_z ——齿高	R ——电阻
A_s ——槽面积	I ——电流	R_m ——磁阻
a ——加速度	I_a ——电枢电流	T ——转矩
B_δ ——气隙磁通密度	I_0 ——空载电流	U ——电压
B_c ——轭部磁通密度	I_f ——励磁电流	U_1 ——输入电压
B_z ——齿部磁通密度	J ——转动惯量	U_2 ——输出电压
b_0 ——槽口宽	j ——电流密度	U_j ——励磁电压
b_z ——齿宽	L ——自感	U_k ——控制电压
C ——电容	l_a ——电枢长度	W_R ——转子绕组匝数
D_a ——电枢直径	l_c ——换向器长度	W_s ——定子绕组匝数
D_c ——换向器直径	l_p ——磁极长度	X ——电抗
D_{iR} ——转子内径	l_R ——转子铁心长度	Z ——阻抗, 槽数
D_{is} ——定子内径	l_s ——定子铁心长度	α_i ——极弧角
D_k ——机壳直径	M ——互感	δ ——气隙长度
D_R ——转子外径	n'_0 ——空载转速	η ——效率
D_s ——定子外径	n_n ——额定转速	μ ——磁导率
E ——电动势	n_s ——同步转速	ν ——相对转速
F ——磁动势	P ——功率	τ_j ——机电时间常数
f ——频率	P_1 ——输入功率	φ ——相位角
H ——磁场强度	P_2 ——输出功率	ω ——角速度

第1章 概述

随着自动控制系统和计算装置的发展,尤其是自动控制系统的一个重要分支——控制物体位置的伺服系统的发展需要,在一般旋转电机的基础上,发展出多种具有特殊性能的小功率电机。这些在自动控制系统和计算装置中用作检测、放大、执行和解算的电机,统称为控制微电机。虽然,从基本原理来说,控制微电机和一般旋转电机没有什么根本差别,但是,一般旋转电机着重于起动和运转状态的力能指标,而控制微电机着重于特性的高精度和快速响应。

控制微电机的输出功率一般从数百毫瓦到数百瓦,机壳外径一般是12.5~130毫米,重量从数十克到数千克。但是在大功率自动控制系统中,控制电机的输出功率有的大到数千瓦、数十千瓦,外径达数百毫米,重达数十甚至数百公斤。

1 基本用途和分类

控制微电机在军用和民用各个方面的具体应用已不胜枚举。例如:火炮和雷达的自动定位,舰船方向舵的自动操纵,飞机的自动驾驶,遥远目标位置的复制;机床加工过程的自动控制和自动显示;阀门的遥控,矿井提升机和电梯的自动选层;高速针织机和造纸机的自动控制;天文望远镜和大型制图机的自动控制;鱼群探测和海底电缆的布设;自动记录仪表、录音、录像、摄影、人工呼吸机、医用彩色同位素扫描机和电子计算机等等。虽然,控制微电机可以用在各种不同的系统和装置中,但是,控制微电机和一些基本网络组成的典型环节却还是有限的。图23·1-1~图23·1-7是一些常见的典型环节的示意图,这些环节的适当组合,就可以构成不同用途的伺服系统和解算装置。

图23·1-1是自整角指示系统示意图。浮子随着液面的上升或下降通过绳索带动自整角发送机转子转动。自整角发送机和自整角接收机之间通过导线远距离连接起来;于是,自整角接收机带动指针准确地随着自整角发送机转子的转动而转动,实现了远距离目标位置的传递。它不仅指示液面位置,

也可以用来指示阀门位置,电梯和矿井提升机位置,变压器分接开关位置等等。

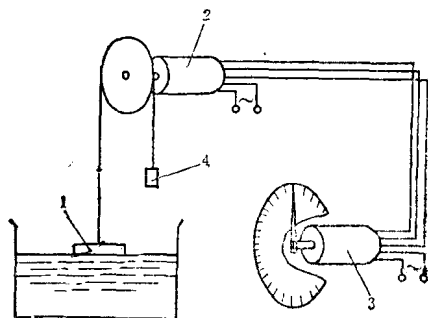


图23·1-1 自整角指示系统示意图

1—浮子 2—自整角发送机 3—自整角接收机
4—平衡锤

图23·1-2是自整角伺服系统示意图。自整角发送机的轴和主令轴相连接,它的位置叫做主令位置或输入位置 θ_1 。

控制对象或负载的位置是 θ_2 。当 θ_2 和 θ_1 不同时,与自整角发送机通过导线相连的自整角变压器就会有一个误差信号电压 U_e 加在放大器输入端,于是,放大器就会输出一个 U_k 给伺服电动机的控制绕组。伺服电动机按照 U_k

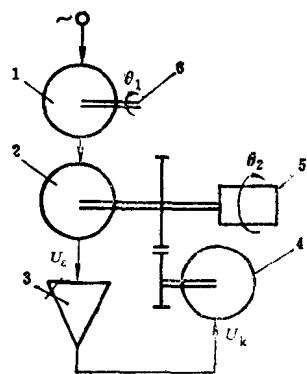


图23·1-2 自整角伺服系统示意图

1—自整角发送机 2—自整角变压器 3—放大器 4—伺服电动机 5—负载 6—主令轴

的相位和大小并通过齿轮带动负载和自整角变压器顺时针或逆时针以不同速度旋转,使 θ_2 接近 θ_1 。 θ_2 与 θ_1 差值越小, U_e 和 U_k 也越小,伺服电动机的转速也越低。当 θ_2 等于 θ_1 时, U_e 和 U_k 就都等于零,伺服电动机就立即自行制动并停止转动。这时负载和主令轴位置处于协调位置。实现了位置传递,所

以称为位置伺服系统。图 23·1-1 和图 23·1-2 虽然都起到了主令位置的传递作用，但它们之间却有本质区别：图 23·1-2 中负载和自整角变压器是刚性连接的，自整角变压器输出的误差信号电压 U_e 是 $\theta_1 - \theta_2$ 的正弦函数，它力图使 θ_2 等于 θ_1 ，它在系统中起检差作用。所以，图 23·1-2 系统是一个闭环调节系统，它比图 23·1-1 的开环系统精度要高得多。而且，只要选择适当功率的伺服电动机来做执行元件，输出功率也会大的多。图 23·1-2 中的输入轴如果以某种速度连续转动，负载也就以相同的转速和转向连续旋转，这种系统称为追随系统。

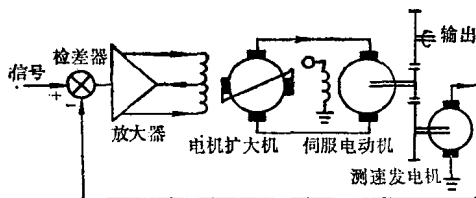


图23·1-3 直流伺服系统示意图

图 23·1-3 是省略了控制对象和主令之间的检差环节的直流伺服系统示意图。系统中增加了电机扩大机来做功率放大环节和测速发电机来做微分反馈环节。测速发电机的作用是：其输出电压和转速成正比，当负载转速高时，测速发电机的电压也高，电压反馈到输入端与信号电压相减（负反馈）后，起了抑制速度的阻尼作用，改善了系统的动态性能。

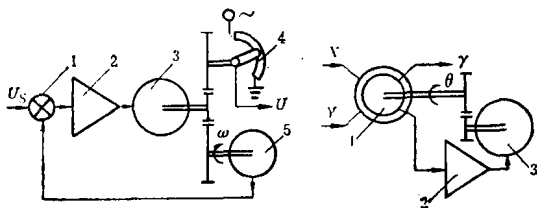


图23·1-4 速度伺服系统和积分电路示意图

1—检差器 2—放大器 3—伺服电动机 4—电位器 5—测速发电机

图23·1-5 座标变换示意图

1—旋转变压器 2—放大器 3—伺服电动机

ω 也一定，这就是速度伺服系统。加上电位器之后，电位器的输出电压 U 等于信号电压 U_s 的积分，就成为积分电路。

图 23·1-5 是利用旋转变压器把直角座标量 x 、 y 变成极座标量 r 、 θ 的座标变换示意图。图中伺服电动机的作用是：它要拖动旋转变压器转动，直到旋转变压器与放大器相连的绕组输出电压为零时为止。这时，旋转变压器的转子转角恰恰是 θ ， $\theta = \arctg \frac{x}{y}$ 。利用几个旋转变压器可以解算很复杂的数学问题。

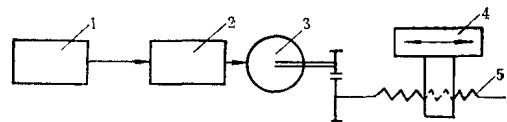


图23·1-6 步进电动机驱动示意图

1—数控装置 2—驱动电源 3—步进电动机
4—负载 5—丝杠

图 23·1-6 是利用步进电动机和电子数字控制装置直接相连的步进电动机驱动示意图。步进电动机根据控制装置发出的指令以一定速度带动负载移动一个固定距离。

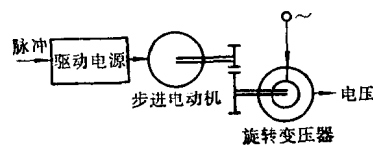


图23·1-7 数、模转换示意图

图 23·1-7 是一种数、模转换示意图。它把输入的数字量（脉冲数）转换为旋转变压器输出的模量（连续变化的电压）。

从以上各图可见：各种控制微电机的用途和功能尽管不同，但是，它们基本上分属信号元件和功率元件两大类。凡是用来转换信号的（如把角位移转换成电信号的旋转变压器，自整角变压器；把速度转换成电压的测速发电机等）都是信号元件。凡是把信号转换为输出功率的（如电机扩大机）以及把电能转换为机械能的（指示系统的自整角机，交、直流伺服电动机等）都属于功率元件。表23·1-1列出了一些常用元件的用途和分类。

表23-1-1 控制微电机的用途和分类

类别	名 称	用 途	类别	名 称	用 途
信 号 元 件	旋转变压器和多极旋转变压器	旋转变压器做成一对极的。输出电压是转子转角正弦、余弦或其他函数关系。主要用作座标变换、三角解算,也可以作为角度数据传输和移相元件使用。多极旋转变压器是在一般旋转变压器基础上发展起来的一种多对极的,精度可达到角秒级的元件。在高精度解算装置和多通道系统(也称多速系统,见本篇第10章第1节)中用作解算和检测元件	功 率 元 件	电机扩大机	用输入端较小的功率变化来控制输出端较大的功率变化。在系统中用作功率放大元件
	交流和直流调速发电机	输出电压精确地与其转速成正比。在系统中用作检测转速,速度反馈和进行微分、积分计算元件		交流和直流伺服电动机	堵转转矩与信号电压成正比,转速随转矩的增加而均匀下降。在系统中,通过齿轮带动负载,作为执行元件
	自整角机和多极自整角机	自整角机的基本用途是角位传输。一般是两个以上元件对接使用。输出电压信号的,属于信号元件;输出转矩的,属于功率元件。输出电压是两个元件角差的正弦函数;输出转矩也近似于两个元件角差的正弦函数。多极自整角机是在一般自整角机基础上发展的一种多对极的精密元件,在多通道系统中用作角位检测的信号元件		步进电动机	定子上有多相绕组,由专门电源供给电脉冲。角位移与接受的电脉冲数成正比;转速与每秒电脉冲数成正比。多在开环系统中用作执行元件
	感应同步器	利用多极旋转变压器的原理制成的印制绕组精密检测元件。用作直线位移和角位移的检测。直线位移精度达到微米级,角位移精度达到角秒级		力矩电动机	能长期在堵转状态下工作,低速运转时能产生足够大的转矩。在系统中用作直接驱动负载的执行元件
				低速电动机	不需要齿轮减速的,每分钟数十转的特殊电动机。其转动惯量小,起动和停止快。通以交流电可作低速旋转;通以脉冲电可作步进运转。在系统中作为直接驱动负载的执行元件

2 基本要求

现代自动控制系统对控制微电机的基本要求是:高可靠性、高精度和快速响应。

2.1 高可靠性

由于控制微电机要在恶劣环境中(见本篇附录4)使用,所以,它对不同环境条件应有广泛的适应性。由于一套自动控制系统要使用数十台甚至数百台控制微电机,所以,它应有高的可靠性或低的失效率。例如,元件的可靠性如果是99.5%,那末,40个元件组成的系统可靠性仅有81.8%^①,100个元件组成的系统可靠性仅有60.5%。因此,控制微电机在不同使用环境下可靠地工作是系统对它提出的第一项基本要求。

2.2 高精度

现代自动控制系统的精度越来越高。以角位检测为例,自整角机指示系统的精度以度来衡量;要求较高的伺服系统的精度以角分来衡量;现代一些高精度系统的精度要求达到数十甚至数个角秒。因此,对于控制微电机的精度要求也越来越高。控制微电机的精度,对信号元件来说,包括静态偏差、动态偏差和使用环境温度变化、电源频率、电压变化引起的漂移;对功率元件来说,包括特性的线性度 $\ominus$ 和不灵敏区。这些都直接影响着系统精度。高精度是系统对控制微电机提出的第二项基本要求。

① 这是一个概率问题,此例中系统可靠性 $0.818 = 0.995^{40}$ 。

② 对于主要是应用在开环系统的执行元件,如步进电动机来说,表征其精度的主要指标是步距精度。

2.3 快速响应

由于自动控制系统的主令信号变化快,所以要求控制微电机,特别是功率元件对信号能作出快速响应。表征快速响应的主要指标是机电时间常数和灵敏度。这些都直接影响着系统的动态偏差、振荡频率和振荡时间。快速响应是系统对控制微电机的第三项基本要求。

3 基本特点

虽然控制微电机是在一般旋转电机基础上发展起来的,但是,由于对控制微电机的特殊要求,所以它在生产组织、设计、工艺、材料选用和试验等方面具有一些特点。

3.1 生产特点

由于控制微电机在自动控制系统和解算装置中有多种用途,所以,它的品种繁多,规格数以千计。虽然它的总产量很大,但每个规格每批生产量相对来说又比较小。由于控制微电机的标准化、系列化和结构件的通用化程度高,所以,它的生产特点是:产品的多品种、小批量,通用结构件的成批大量。它的生产组织着眼于多品种,它的加工技术着眼于单机自动化。

3.2 设计特点

(1) 设计功率元件时,首先着眼于满足特性要求,其次才考虑力能指标;设计信号元件时,主要着眼于精度和阻抗,而把能量传递往往放在次要地位。

(2) 气隙磁场波形是保证信号元件精度的基础,也是保证功率元件得到高灵敏度和预期特性的重要条件。因此,提高磁路的对称性和使绕组导体沿铁心圆周的分布规律服从磁场波形的要求,是控制微电机设计中的重要特点。

(3) 要考虑温度变化,接触电阻变化,负载变化,电压、频率波动的影响和相应的补偿措施;要考虑在振动、冲击、加速度环境中结构的可靠性;

要考虑高温、低温、潮湿、高海拔环境中结构件的热膨胀、抗腐蚀能力、接触导电部分摩擦损耗加速以及噪音和对无线电的干扰等。这些都是在设计和材料选择上必须注意的。

3.3 工艺特点

由上述设计特点所决定,控制微电机的制造工艺特点是:保证定、转子的高同轴度和磁路的对称,电路的平衡。具体表现在:定、转子冲片的槽分度误差和累积误差有的小到几个角分和十几角分;大部分金工加工零、部件的配合尺寸要达到一、二级精度;绕组匝数要准确,有的不仅要求各相绕组匝数相同,而且要求电阻相等。绝缘处理和热处理等专业工艺多而且工艺规范要求严格;工艺装备系数高;工序间的运输和传递要用适当的工位器具,以防止零、部件的变形和对于应力敏感的磁性材料做成的零、部件的磁性能变坏;装配环境要求高度清洁和保持一定的温度、湿度。

3.4 试验特点

(1) 控制微电机的试验项目繁多,各类产品各有专用试验项目(见本篇以下各章),也有共同试验项目,主要是:接触可靠性试验(有电刷、滑环的产品),绝缘介电强度试验,绝缘电阻测量,温升试验(功率元件),低温试验,高温试验,振动试验,振动强度试验,冲击试验,噪音试验,耐潮试验,寿命试验。有的产品还要进行低温和高温低气压试验,加速度试验和无线电干扰试验等。

(2) 专用试验设备多,要求精度高。例如:角位、位移、相位、小力矩和转数测量仪器,稳频、稳压电源,稳速装置和各种无线电感函数电阻箱等。这些仪表和设备精度有的要比产品精度高一个数量级。

(3) 由于控制微电机的功率一般都比较小,所以,对于仪表的选择、试验线路的连接以及由于仪表产生的分流、分压等因素要给予注意和修正。

(4) 有些试验项目要在标准环境下进行。

第2章 旋转变压器

1 用途和分类

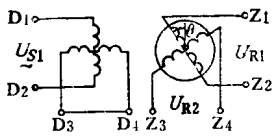
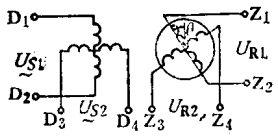
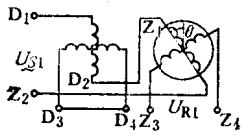
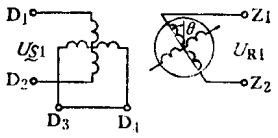
旋转变压器是一种输出电压随转子转角变化的信号元件。当激磁绕组以一定频率的交流电压激磁时，输出绕组的电压幅值与转子转角成正弦、余弦函数关系，或在一定转角范围内与转角成正比。它主要用作坐标变换、三角运算和角度数据传输，也可以作为移相器和用在角度——数字转换装置中。

按输出电压与转子转角间的函数关系，旋转变压器可分为正余弦旋转变压器、线性旋转变压器和比例式旋转变压器，见表23·2-1。后两种旋转变压器实际上也是正余弦旋转变压器，不同的是，线性

旋转变压器采用了特定的变比和接线方式，比例式旋转变压器则在结构上增加了一个将转子位置固定的装置。

按旋转变压器在系统中不同用途，可分为：计算用旋转变压器和数据传输用旋转变压器。根据数据传输用旋转变压器在系统中的具体用途，又可分为：旋变发送机（代号XF），旋变差动发送机（代号XC），旋变变压器（代号XB）。各种数据传输用旋转变压器在系统中的作用与相应的控制式自整角机（见本篇第5章）相同。一般来说，由旋转变压器组成的系统精度比控制式自整角机的要高。

表23·2-1 旋转变压器分类

名 称	代 号	电 气 原 理 图	基 本 关 系 式	用 途
正余弦旋转变压器	XZ		$U_{R1} = k_u \textcircled{1} U_{S1} \cos \theta \textcircled{2}$ $U_{R2} = -k_u U_{S1} \sin \theta$	座标变换、三角运算、角度数据传输、移相器、角度-数字转换
			$U_{R1} = k_u U_{S1} \cos \theta + k_u U_{S2} \sin \theta$ $U_{R2} = k_u U_{S2} \cos \theta - k_u U_{S1} \sin \theta$	
线性旋转变压器	XX		$U_{R1} = k_u U_{S1} \frac{\sin \theta}{1 + k_u \cos \theta}$	机械转角与电信号的线性变换
比例式旋转变压器	XL		$U_{R1} = k_u U_{S1} \cos \theta$	调节电压和匹配阻抗

① k_u ——变比（空载最大输出电压与激磁电压之比）。
② θ ——转子转角（激磁绕组和余弦输出绕组轴线间的夹角）。

2 基本结构和工作原理

旋转变压器的结构与线绕式异步电机相似。一般造成两极电机，定、转子上分别布置有两个互相垂直的绕组，转子绕组由电刷和滑环引出。其结构和原理图见图23·2-1和图23·2-2。

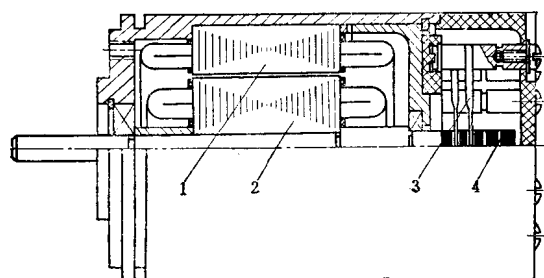


图23·2-1 正余弦旋转变压器结构图

1—定子 2—转子 3—电刷 4—滑环

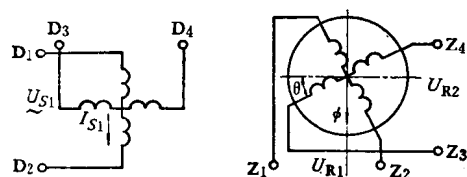


图23·2-2 正余弦旋转变压器原理图

D_1D_2 —激磁绕组 D_3D_4 —交轴绕组
 Z_1Z_2 —余弦输出绕组 Z_3Z_4 —正弦输出绕组

旋转变压器的工作原理与普通变压器相似。因为普通变压器的输入绕组和输出绕组是相对固定的，所以它的输出电压与输入电压之比为常数。由于旋转变压器的激磁绕组和输出绕组是分别嵌在定子和转子上的，所以输出电压大小就随着转子位置的变化而改变。如图23·2-2所示，当 D_3D_4 绕组开路，在激磁绕组 D_1D_2 上加以交流激磁电压 U_{s1} 时，激磁绕组中就会有电流 I_{s1} 并在电机气隙中建立一个和转子位置无关的交变磁通 ϕ 。如果 ϕ 在气隙中按正弦规律分布，那么输出绕组 Z_1Z_2 和 Z_3Z_4 上感应电压的大小就会是转角 θ 的余弦和正弦函数。

$$\left. \begin{aligned} U_{R1} &= k_u U_{s1} \cos \theta \\ U_{R2} &= -k_u U_{s1} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (23 \cdot 2-1)$$

当输出绕组接有负载时，就有电流通过输出绕组并产生电枢反应磁通，使电机气隙中磁场发生畸变。这时，输出电压就不再是转角的正弦函数，而有一定偏差。为了减小这种偏差，旋转变压器在工作时，要求 D_3D_4 交轴绕组短接，或 Z_1Z_2 、 Z_3Z_4 两输出绕组接以对称负载。为了提高旋转变压器的工作精度，其负载阻抗应尽量大。

3 特性

旋转变器的主要特性、误差范围见表23·2-2。

表23·2-2 旋转变器的主要特性

名 称	含 义	误差范围	备 注
正余弦函数误差 δ_n	正余弦旋转变压器一相激磁绕组以额定电压和频率激磁，另一相激磁绕组短接，在不同转角位置下，两相输出绕组的感应电势与理论正弦（或余弦）函数之差对最大理论输出电压之比	0.02~0.1%	产生误差主要原因是加工不良，和磁性材料不均匀。作为解算元件时，直接影响解算精度
线性误差 δ_x	线性旋转变压器在工作转角范围内，不同转角时，实际输出电压与理论直线之差，对理论最大输出电压之比	0.02~0.1%	产生误差原因除加工不良、磁性材料不均匀外，还有设计原理误差。工作转角范围一般为 $\pm 60^\circ$
电气误差 $\Delta\theta_d$	正余弦旋转变压器在不同转角位置下，两个输出绕组电压的比所对应的正切或余切角度与实际转角之差。以角度表示	2'~10'	它包括了函数误差、零位误差、变比误差、阻抗不对称等，反映了旋转变压器的综合精度。电气误差大，使数据传输系统的精度下降
零位误差 $\Delta\theta_0$	正余弦旋转变压器一相激磁绕组短接，另一相激磁绕组在额定激磁状态下，两个输出绕组的电压为最小值时的转子位置叫作电气零位，零位误差为实际电气零位与理论电气零位（0°，90°，180°，270°）之差	2'~10'	磁路不对称，定、转子铁心不同轴、不圆，铁心片间短路、绕组分布不对称及匝间短路等都会产生零位误差。零位误差直接影响计算、数据传输系统精度
零位电压 U_0	转子处于电气零位时的输出电压（由与激磁电压频率相同，但相位相差90°的基波正交分量和与奇数倍激磁频率的高次谐波组成）	额定电压的0.05~0.2%	磁性材料非线性、磁路不对称、气隙不均匀及绕组分布、电容影响等都会使零位电压升高。零位电压过高，使下级放大器饱和
输出相位移 φ	输出电压基波分量与输入电压基波分量的相位之差	3°~12°	铁耗及原方绕组电阻影响

4 设计

4.1 设计特点

(1) 旋转变压器的主要功用是输出一个与转子转角成正弦(或余弦)函数关系的电气信号。设计时,应从精度出发来选择绕组形式,定、转子齿槽配合,导磁材料及磁通密度等,以提高电机气隙磁场分布的正弦性。从理论上说,旋转变压器的精度与电机尺寸无关,但实际上,随着电机尺寸增大,由于工艺性的改善,旋转变压器的精度可以做得高一些,输出相位移、相位移变化及输出阻抗可以减小。因此,在尺寸许可的情况下,可选择较大的机座号。

(2) 旋转变压器的输出阻抗对负载阻抗的比值越小,输出电压的畸变也越小。因此,旋转变压器应具有尽可能小的输出阻抗。

(3) 气隙磁场是单相脉振磁场。旋转变压器定、转子上虽然都有两相绕组,但两相绕组在空间是相互垂直的,彼此之间无电磁耦合,所以,电磁计算时可按单相电机计算。

(4) 旋转变压器要求在接近空载状态下工作,设计时可按定、转子绕组处于最大耦合位置的空载状态下进行计算。

(5) 旋转变压器的电磁负荷较低,一般不进行损耗、温升及机械计算。

4.2 主要技术要求

额定电压,伏;额定频率,赫兹;输出电压与转角的函数关系;空载输入阻抗,欧;变比;机壳外径(在有尺寸要求时,应提出最大允许机壳外径);精度(零位误差、正余弦函数误差、线性误差或电气误差);零位电压,毫伏。

4.3 定子铁心内径

当机壳外径一定时,定子铁心内径 D_{is} 的大小主要影响定、转子槽面积的分配。当定子为激磁方时,要使旋转变压器有较小的输出相位移及相位移变化和较大的电势降落系数,则必须减小 D_{is} ,增大定子槽面积;但转子的槽面积随 D_{is} 的减小而缩小,致使输出阻抗增大。因为大部分产品的变比都小于或等于1(即激磁绕组匝数多于输出绕组匝数),所以,激磁方总槽面积应大于输出方总槽面积。按以上原则,可根据定子为激磁方还是转子为激磁

方,分别按以下公式选定定子铁心内径。

定子为激磁方:

$$D_{is} = (0.57 \sim 0.63) D_s \quad \text{mm}$$

转子为激磁方:

$$D_{is} = (0.65 \sim 0.7) D_s \quad \text{mm}$$

式中 $D_s = D_k - 2\Delta_k$ ——定子铁心外径 mm

D_k ——机壳外径 mm

Δ_k ——机壳壁厚 mm, 见表 23-2-5

采用定子铁心内孔与轴承室直径相同结构时, D_{is} 应考虑与轴承外径一致。

4.4 冲片设计及槽配合

旋转变压器的产品规格是按机座号、空载输入阻抗及变比来划分的。常用的标准机座号有:12, 20, 28, 36, 45, 55, 70等。

标准变比有:0.15, 0.45, 0.56, 0.65, 0.78, 1, 2等七种。

标准空载输入阻抗有:200, 400, 600, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000, 10000欧等九种。

a. 冲片设计时应考虑通用性。同一机座号应采用同一冲片,并能包括尽可能多的空载输入阻抗等级。高的空载输入阻抗主要受导线的最小线径(不小于0.05毫米)和下线工艺的限制。低空载输入阻抗主要受电流密度和磁通密度的限制。所以冲片尺寸要根据本机座号的最低空载输入阻抗来确定,此时磁通密度最高。最大的气隙磁通密度 $B_{\delta\max}$ 由下式计算:

$$B_{\delta\max} = 505 U_n \sqrt{\frac{k_e \times 10^5}{D_{\delta} l_{\delta} k_{\mu} k_{\delta} \delta f Z_{\min}}} \quad \text{G} \quad (23-2-2)$$

式中 $D_{\delta} = D_{is} - \delta$ ——气隙平均直径 mm

$l_{\delta} = \frac{l_s + l_r}{2}$ ——气隙轴向计算长度 mm

其中, $l_s = 0.7 \sim 1.6 D_{is}$ ——定子铁心长度, 一

般取 $l_s = D_{is}$

$l_r = l_s \pm 0.5$ ——转子铁心长度 mm

k_{δ} ——气隙系数

k_e ——电势降落系数,见表23-2-3

k_{μ} ——磁路饱和系数,见表23-2-4

δ ——单边气隙长度,见表23-2-6

$Z_{\min}$ ——本机座号最小空载输入阻抗 Ω

U_n ——额定电压 V