

步 进 电 动 机

哈尔滨工业大学 编著
成都电机厂

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书系统地叙述步进电动机的工作原理、静态和动态特性、计算和设计方法，并在相应的章节内列举了一些设计和计算例题。对步进电动机的驱动器作了简要的介绍，对电子计算机在步进电动机的研究和计算中的应用作了比较全面的介绍。

可供微特电机的研制、使用人员及高等院校有关专业的师生参考。

步 进 电 动 机

哈尔滨工业大学
成都电机厂 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

石家庄地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年7月第一版

开本：787×1092 1/32

1979年7月第一次印刷

印张：13 1/2

印数：0001—41,470

字数：308,000

统一书号：15031·213

本社书号：1311·15—5

定价：1.30元

目 录

前言	v
第一章 步进电动机的一般知识	1
§ 1-1 步进电动机	1
§ 1-2 步进电动机的应用举例	3
§ 1-3 若干名词术语及主要技术指标	6
§ 1-4 我国步进电动机生产的发展	9
第二章 反应式步进电动机	16
§ 2-1 动作原理	16
§ 2-2 步距和转子齿数	23
§ 2-3 关于绕组的连接	27
§ 2-4 单段不对称磁路结构	31
§ 2-5 多段式结构	34
§ 2-6 其他结构举例	37
第三章 反应式步进电动机气隙磁导的计算	40
§ 3-1 磁导、磁阻	40
§ 3-2 气隙磁导	42
§ 3-3 双折法	47
§ 3-4 代角法	50
§ 3-5 相似原理及数据表	54
§ 3-6 其他计算方法简述	65
第四章 反应式步进电动机的静转矩计算	68
§ 4-1 静态运行	68
§ 4-2 静转矩的基本公式	70
§ 4-3 静转矩的计算公式	81

§ 4-4 单相通电时矩角特性的计算·····	82
§ 4-5 几相同时通电时矩角特性的计算·····	97
§ 4-6 最大静转矩及其工程计算·····	102
第五章 反应式步进电动机的动特性 ·····	106
§ 5-1 基本表达式及基本参数·····	106
§ 5-2 自由振动频率及共振·····	114
§ 5-3 启动频率的计算·····	132
§ 5-4 连续运行频率及自振荡现象·····	153
第六章 反应式步进电动机的设计与计算 ·····	166
§ 6-1 技术指标·····	166
§ 6-2 主要性能和内部尺寸的关系·····	174
§ 6-3 结构型式、相数和极数·····	180
§ 6-4 尺寸及电磁负荷的确定·····	186
§ 6-5 设计程序及电磁核算·····	195
第七章 永磁式步进电动机 ·····	211
§ 7-1 永磁磁路的一般特性·····	213
§ 7-2 永磁式步进电动机的磁路分析·····	222
§ 7-3 静转矩的计算·····	226
§ 7-4 动态参数的计算·····	231
§ 7-5 电磁核算例题·····	234
§ 7-6 永磁式步进电动机的设计·····	244
第八章 永磁感应子式步进电动机 ·····	249
§ 8-1 作用原理·····	249
§ 8-2 磁路分析及静转矩计算·····	253
§ 8-3 电磁核算例题·····	260
§ 8-4 设计问题·····	267
第九章 单相及特种步进电动机 ·····	272
§ 9-1 单相步进电动机·····	272

§ 9-2 矩角特性的综合	279
§ 9-3 谐波式单相步进电动机的转矩与计算	284
§ 9-4 特种步进电动机简单介绍	289
第十章 步进电动机的驱动器	295
§ 10-1 晶体管开关特性	297
§ 10-2 脉冲发生器	301
§ 10-3 门电路和反相器	306
§ 10-4 双稳态触发器	314
§ 10-5 环形分配器	321
§ 10-6 计数器	329
§ 10-7 功率放大电路	338
第十一章 电子数字计算机在步进电动机研究和 计算中的应用	347
§ 11-1 矩角特性和设计计算问题	348
§ 11-2 动特性计算问题	357
§ 11-3 磁场计算问题	367
附录	404

第一章 步进电动机的一般知识

§ 1-1 步进电动机

步进电动机是一种将电的脉冲信号转换成相应的角位移(或线位移)的机电元件。通俗地讲,就是外加一个脉冲信号于这种电动机时,它就运动一步。正因为它的运动形式是步进式的,而称为步进电动机。

步进电动机的输入是脉冲信号,从它绕组内的电流来看,既不是通常的正弦交流,也不是恒定的直流,而是脉冲的电流,所以有时也叫做脉冲马达。

步进电动机的定子上通常具有多相绕组,转子为有齿的铁芯或具有永磁的磁极。从电机元件本身来看,只要在各相绕组内轮流通电,就能产生步进运动。在实际系统内,这种轮流通电,通常是由电子的脉冲分配回路来达到的,并需经过功率放大。分配回路和功率放大等环节在一起,组成步进电动机的驱动器。驱动器和电动机是两个不可分割的组成部分。步进电动机简单的工作原理图如图 1-1。

当外加脉冲信号时,步进电动机的机械运动与脉冲信号相对应,也就是说作同步的旋转。顺便可以指出,如果脉冲信号发生器放在电机本身的轴上,就可以得到电枢不动的无刷直流电动机,它的转速将由外加电压的大小来决定。

步进电动机可以作为驱动电机,但大部分情况下是作为伺服电动机用的,

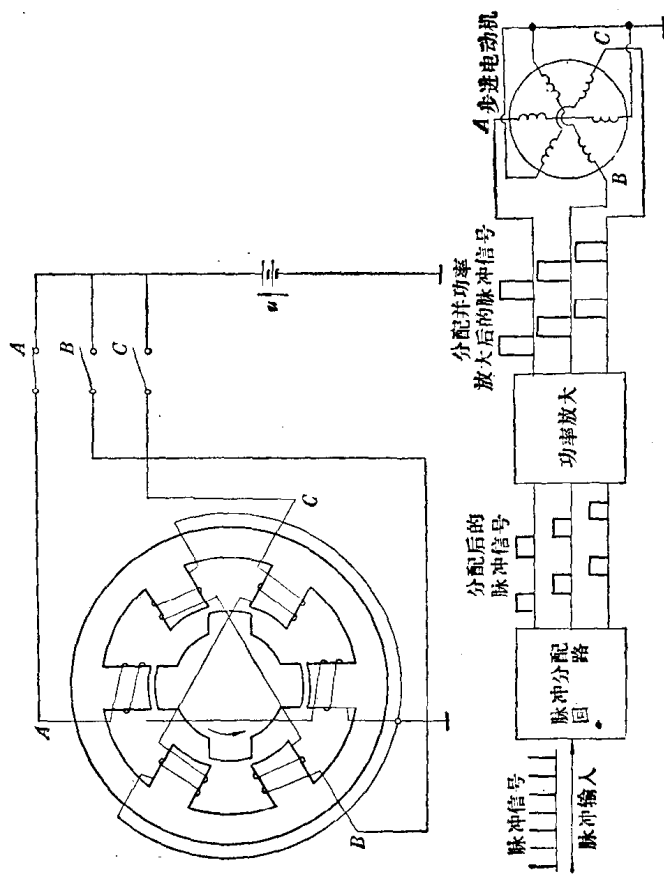


图 1-1 步进电动机及其驱动器简图

§ 1-2 步进电动机的应用举例

步进电动机由于它独特的优点，作为伺服电动机应用于控制系统时，往往可以使系统简化，工作可靠，而且获得高的控制精度。在多数情况下，可以代替直流和交流伺服电动机。因此应用日广，近二十年来获得很大的发展。

半导体工业的发展及大功率晶体管的应用，研究出了工作可靠，动作速度快，寿命长的电子转换器，为步进电动机的发展创造了条件。

计算技术的发展，数字控制系统的采用，促进了步进电动机的发展。步进电动机可以直接将电脉冲信号变换成相应的机械位移，恰好符合数字控制系统的要求。此外，步进电动机还有一系列特点和优点，例如：(1) 步距值不受各种干扰因素的影响，如电压的大小，电流的数值，波形，温度的变化等等，相对来说，都不影响步距值，也就是说，转子运动的速度主要取决于脉冲信号的频率，而转子运动的总位移量则取决于总的脉冲信号数；(2) 误差不长期积累。步进电动机每走一步所转过的角度(实际步距值)与理论步距值之间总有一定的误差，从某一步到任何一步，也就是走任意一定的步数以后，也总是有一定的累积误差。但是每转一圈的累积误差为零，所以步距的误差不是长期地积累下去的；(3) 控制性能好。起动，停车，反转及其他任何运行方式的改变，都在少数脉冲内完成，在一定的频率范围内运行时，任何运行方式都不会丢失一步。

由于上述的条件和特点，步进电动机获得越来越广泛的应用。在数控机床上的应用，可以算是典型的例子，也是一个重要的方面。

占机械加工总量 80% 以上的单件和小批生产中的加工自动化问题, 很长时间没有得到解决. 特别是国防工业, 绝大部分都是小批生产和单件加工, 而且往往碰到形状特别复杂, 加工精度要求很高的情况. 数字控制机床的出现, 为解决这一问题, 提供了广阔的前景. 它与其他各种自动化机床的显著区别, 在于当这种机床上的加工对象改变时, 除了重新装卡零件, 更换刀具外, 只要更换一个新的控制介质(如纸带), 即可以自动地加工出所需的新零件, 而不需要对机床作任何调整. 它是当前机床发展的主要方向之一. 步进电动机是数控机床的重要元件之一, 甚至可以说是数控机床的核心. 开环数控机床的伺服机构, 通常由步进电动机和液压扭矩放大器组成, 也可以将二者做成一体, 称为电液步进电动机. 这种开环控制方式, 结构简单, 系统调试方便, 工作可靠, 成本较低, 在国内外都得到广泛的应用. 例如, 日本的数控机床, 90% 以上属开环系统, 特别是中小型数控机床.

图 1-2 是数控机床的例子, 除了机床本身以外的控制系统装在一起称为数控装置. 数控装置根据穿孔纸带上的数据和指令值, 经过运算发出输出脉冲量, 送到电液步进电动机, 使它转过一定的角度, 带动丝杠螺母使工作台移动一定的距离. 这种没有信号反馈和位置检测, 也不将被控制量的实际值和指令值进行比较的系统, 叫做开环系统.

在数控机床中, 步进电动机通过液压扭矩放大器或者直接带动丝杠系统, 要求它带动一定的惯量并有足够的输出转矩是很清楚的. 需要有一个步距值及一定的精度要求也是容易理解的. 另外还要求有足够高的工作速度, 前面已经讲过, 步进电动机的转子运动速度取决于脉冲信号的频率, 因此对工作速度的要求, 意味着对频率指标的要求. 每输出一个脉冲, 工作台就有一个相当的移动量, 称为脉冲当量(ΔS), 它的

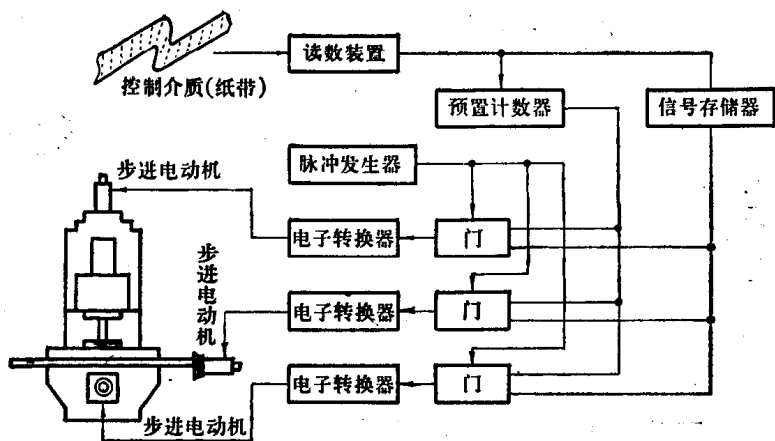


图 1-2 数控铣床控制系统示意图

大小是根据机床加工精度的要求同时考虑到编制程序的方便性来选定的。例如可选取为 0.01, 0.005, 0.002, 0.001 毫米/步等, 它由步进电动机的步距及减速器的速度变比决定。

举例来说, 一台数控机床的脉冲当量 $\Delta S = 0.01$ 毫米/步, 所用步进电动机的最高运行频率 $f_{\infty} = 16000$ 脉冲/秒, 则工作台移动的最高速度 $v_{\max} = 0.01 \times 16000 = 160$ 毫米/秒, 即大约 10 米/分。如果所采用的步进电动机, 它的最高运行频率只有, $f_{\infty} = 3000$ 脉冲/秒, 则工作台运动的最高速度就相应地只有, $v_{\max} = 0.01 \times 3000 = 30$ 毫米/秒, 即 1.8 米/分, 这样的速度, 在空行程和对刀的情况下, 就显得慢了, 影响生产率。当然, 取较大的脉冲当量, 就可以相应地提高工作速度, 但是这要影响控制及加工的精度。因此数控机床力求高精度和高速度的发展方向, 要求步进电动机有更高的频率指标。反过来讲, 数控机床的加工精度和工作速度, 首先取决于步进电动机的技术指标, 所以常常说步进电动机是数控机床的核心或

者关键性元件,就是这个道理。

步进电动机应用的范围很广,除用于各类数控机床外,在自动仪表,计算机的外部及外围设备,军事工业,钟表工业,以及各种数控专用装置等各个方面,也都获得相当广泛的应用。

§ 1-3 若干名词术语及主要技术指标

1. 步距角(θ_b)

$\theta_b = \frac{360^\circ}{\text{每转步数}}$,是指的理论值或平均值,即每给一个脉冲信号,电动机转子所转角度的理论值。

2. 精度

通常指的是最大步距误差或最大累积误差,直接用机械角度或步距的百分数来表示。步距误差和累积误差是两个概念,在数值上也就不一样,这就是说精度的定义没有完全统一起来。从使用的角度看,对多数情况来说,用累积误差来衡量精度比较方便。最大累积误差,是指从任意位置开始,经过任意步之间,角位移误差的最大值。由于步进电动机转过一圈以后,转子的运动有重复性,所以精度的定义,可以认为是在一圈范围内,任意步之间转子角位移误差的最大值。

3. 转矩

保持转矩(或定位转矩),是指绕组不通电时电磁转矩的最大值,或转角不超过一定值时的转矩值。通常反应式步进电动机的保持转矩为零,除非具有特殊的产生保持转矩的装

置。若干类型的永磁式步进电动机，具有一定的保持转矩。

静转矩是指不改变控制绕组通电状态，即转子不转情况下的电磁转矩。它是绕组内的电流及失调角的函数，当绕组内电流的值不变时，静转矩与失调角的关系称为矩角特性。对应于某一失调角时，静转矩的值为最大，称为最大静转矩(M_k)，它的值取决于通电状态及绕组内电流的值。

动转矩是指转子转动情况下的最大输出转矩值。它与运行的频率有关。

4. 响应频率

在某一频率范围内，步进电动机可以任意运行而不会丢失一步，则这一最大频率称为响应频率。通常用起动频率(f_s)来作为衡量的指标，它是能不丢步地起动的极限频率，有时也叫做突跳频率。对于一定的电动机及一定的驱动器情况，起动频率的值与负载的大小有关，负载的大小包含负载转矩和负载转动惯量二方面的含义。

5. 运行频率(或连续频率)

是指频率连续上升时，电动机能不失步运行的极限频率。它的值也与负载的大小有关。很显然，在同样负载情况下，连续频率(f_c)的值高于响应频率或起动频率(f_s)的值。

步进电动机作为伺服电动机或驱动电动机，它的主要技术指标包括：步距，输出转矩，起动频率，运行频率，精度以及效率等。由于步进电动机用在数字程序控制系统内，这种系统的工作速度，取决于电动机的控制频率，用每秒脉冲数(或每秒步数)来衡量，所以步进电动机的频率指标常常特别重要。至于主要要求起动频率还是运行频率指标，则要看系统的具体情况而定。有的系统经常带着固定的负载，要求恒定的工作

速度,不允许工作速度有变化,例如“作孔机”(纸带穿孔机)就是这样. 步进电动机应用于这种系统时,主要要求负载情况下的起动频率指标,运行频率指标在这里就没有什么意义. 相反在另外一些系统内,工作的速度可以并且要求有变化,例如数控机床就是这样,在这种情况下主要就是运行频率指标了.

最近二十年来,步进电动机有很大的发展,各项性能指标有了很大的提高,而其中主要的是频率指标的提高. 这一方面从改善电动机元件本身的结构、设计和工艺来达到,同时也

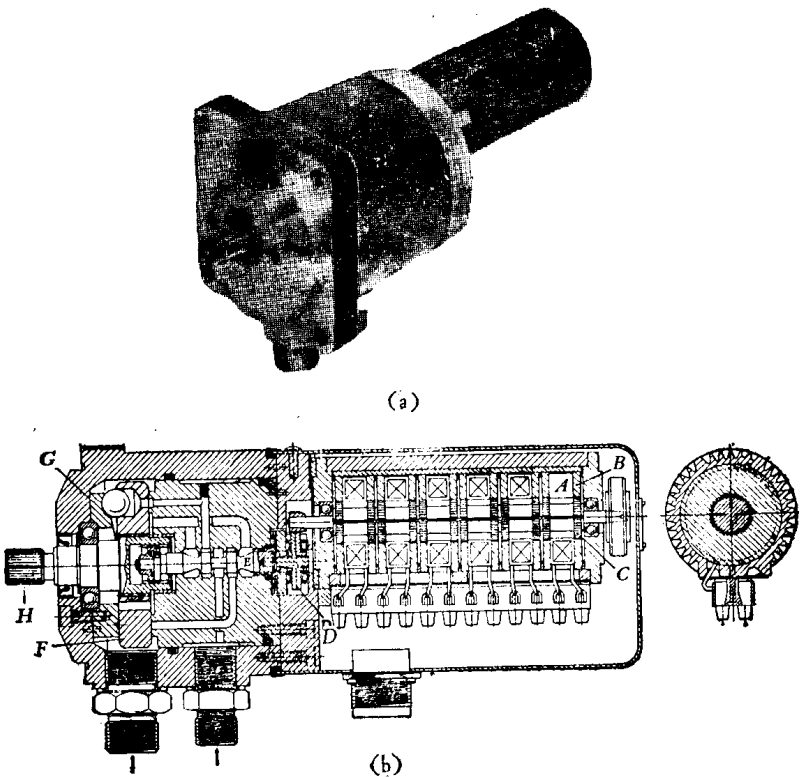


图1-3 普拉特精密液压件公司(英)的SM10型电液步进电动机

A—定子线圈 B—定子铁心(导磁环) C—转子 D—齿轮
E—随动滑阀 F—缸体 G—凸轮盘 H—输出轴

从驱动器的改进来获得。目前小步距步进电动机的最高启动频率大约可以达到2000—5000步/秒，最高运行频率可以达到16000步/秒，而在驱动器采用所谓“细分”线路时，最高运行频率可以达到160000步/秒，或更高一些。

一般来说，尺寸大或功率大的步进电动机，较不容易获得高的频率指标，为了解决这一矛盾，采用了液压扭矩放大器。步进电动机与液压扭矩放大器组合在一起，构成所谓“电液步进电动机”，并有专门的系列产品。图1-3是它的结构示例。

如果能用步进电动机直接拖动，不用液压扭矩放大器，可以省去液压系统，这自然是很希望的。因此研制较高技术指标的大功率步进电动机，是近年来普遍关心的一项课题。

对较大功率的步进电动机，其效率是很重要的。电动机本身结构的完善和驱动线路的改进，使步进电动机的效率指标获得很大的提高。另一方面，步进电动机运行的稳定性得到了改善，能够在宽广的频率范围内稳定地运行，不发生严重的振荡。

§ 1-4 我国步进电动机生产的发展

我国步进电动机的研制工作，是从1958年开始的，近年来获得了迅速的发展。表1-1列出了我国若干步进电动机产品的技术数据。

图1-4是我国生产的五相步距角较小的步进电动机，步距角 $\theta_s = 0.36^\circ$ ，即每转1000步，用在数控线切割机床上，可以省去一套减速齿轮，直接由步进电动机带动丝杆，从而减少传动间隙，提高机床精度。

表 1-1 若干反反应式步进电动机产品的技术数据
a. 常州电讯电机厂的部分产品

型 号	项 目										备 注	
	相 数	步距角 (度)	电压 (伏)	相电 流 (安)	最大静 转矩 (公斤· 厘米)	空载启 动频率 (步/秒)	外形尺寸			重 量 (公斤)		
							外径 (毫米)	长度 (毫米)	轴径 (毫米)			
26BF3007	3	1.5/3	27	1.5	0.7	3000	36	43	3	0.3		
45BF3010	3	1.5/3	24—30	2.5	1	3000	45	53	5	0.4		
75BF1840	3	1.5/3	24	3	4	1800	75	53	6	1		
70BF4040	5	1.5/3	60	3.5	4	4000	70	112	6	1.6		
90BFG2004	4	0.9— 1.8	70	7	40	2000	90	147	10	4.5		
130BFG3010	5	0.75— 1.5	80	13	100	3000	130	170	14	10.5		
150BFG2815	5	0.75— 1.5	80	13	150	2800	150	158	18 (大端)	14		
150BFG2820	5	0.75— 1.5	80/1.2	13	200	2800	150	183	(同上)	16		
技 术 数 据												
连续运行矩特性												
							步/秒	8000	16000			
							公斤·厘米	4	2.5			
							千步/秒	2	4	6	8	
							公斤·米	0.4	0.22	0.12	0.09	
							千步/秒	2	4	6	8	
							公斤·米	1	0.75	0.5	0.4	
							千步/秒	2	4	6	8	16
							公斤·米	1.20	0.8	0.68	0.54	0.2
							千步/秒	2	4	6	8	16
							公斤·米	1.6	1.05	0.85	0.72	0.3

b. 北京微电机厂的部分产品

电机型号	电压 直流 (伏)	电 流 (安)	相 数	负 载 转 矩	负 载 后 动 频 率 (步/秒)	步 距 角 (度)	电机外形 尺寸(毫米) 不包括轴伸	使 用 条 件		
								相对湿度	环境温度	海拔高度
GB ₁ -6D-1	110	6	6	1 公斤·米	400	0.75°/1.5°	φ188×286	90±5%	-30°C—+40°C	≤1000米
SB ₃ -6B-2000	-282.5		6	2000克·厘米	2000	0.75°/1.5°	φ70×110	98%	-30°C—+40°C	≤1000米
XB ₁ -6B-5000	110	5	6	5000克·厘米	1500	1.5°/3°	φ132×164	90±5%	-30°C—+40°C	≤1000米
XB ₁ -6D-10000	110	5	6	10000克·厘米	850	1.5°/3°	φ132×164	90±5%	-30°C—+40°C	≤1000米
XB ₁ G-6D-20000	110	5	6	20000克·厘米	650	1.5°/3°	φ132×210	90±5%	-30°C—+40°C	≤1000米

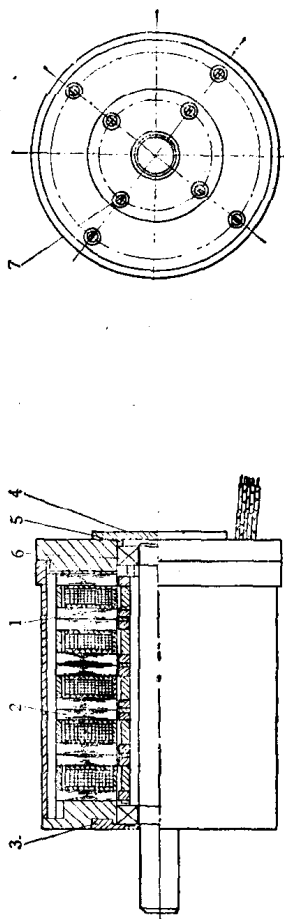


图 1-4 每转 1000 步的五相步进电动机
 1—转子 2—定子 3—轴盖 4—轴承盖 5—波纹弹性套圈 6—轴承 7—圆柱头螺钉

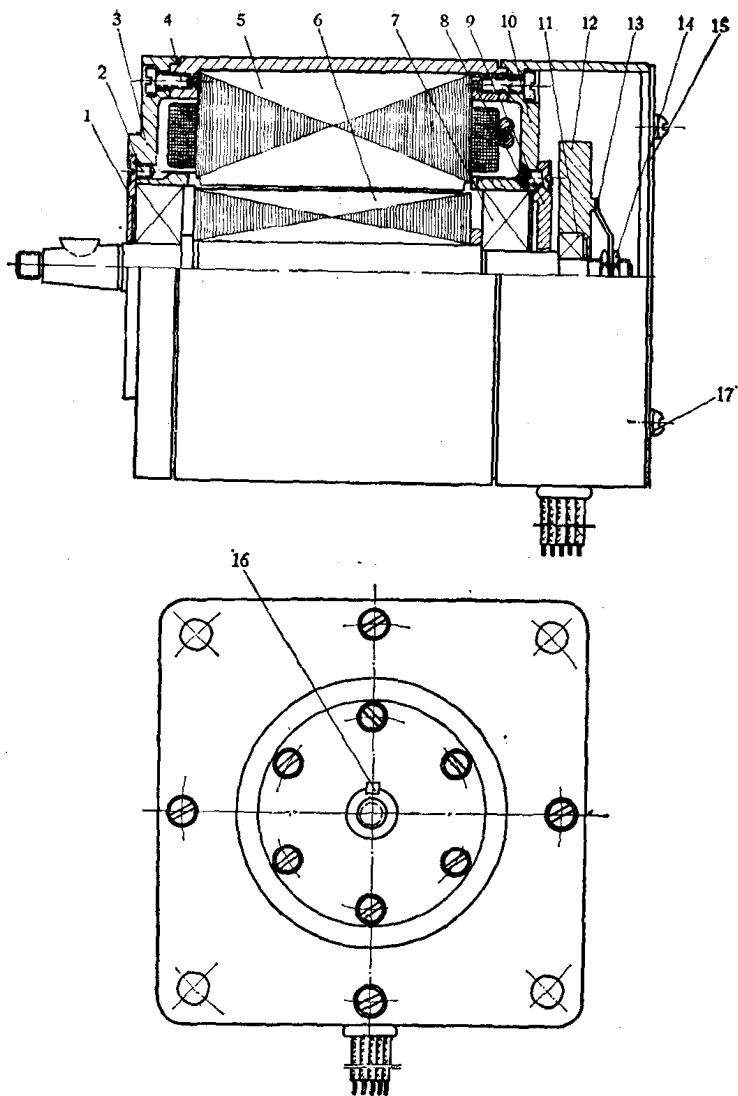


图 1-5 我国较大功率步进电动机的一台样机

- 1—前轴盖 2—螺钉 3—前端盖 4—螺钉 5—定子 6—转子 7—轴承
 8—调整垫圈 9—后轴盖 10—后端盖 11—轴承 12—惯性盘
 13—弹簧片 14—螺帽 15—盖板 16—半圆键 17—螺钉