

上羽贞行 富川义郎 著
杨志刚 郑学伦 译

超声波马达 理论与应用

上海科学技术出版社

超 声 波 马 达 理 论 与 应 用

上羽贞行 富川义郎 著
杨 志 刚 郑 学 伦 译

上 海 科 学 技 术 出 版 社

超声波马达理论与应用

上羽贞行 富川义郎 著

杨志刚 郑学伦 译

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所经销 上海市印刷十一厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 9.5 插页 4 字数 245 000

1998 年 12 月第 1 版 1998 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—2 000

ISBN 7-5323-4751-6/TK·20

定价:21.40 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,

请向承印厂联系调换

译 者 序

超声波马达是近年来发展的一门新技术,它以超声波振动为动力源,通过接触摩擦转换能量,形成旋转或位移输出,具有结构轻巧简单、高速低转矩等特点,在机器人、自动测控仪器仪表、航空航天等领域有着良好的应用前景。超声波马达自 80 年代初开发以来,获得了迅速发展,目前已发明的结构有几十种,其中部分已接近于实用或已被应用。我国的超声波马达研究也有几年的历史,部分超声波马达已经接近实用化。但到目前为止,国内尚无论述超声波马达的书籍,在一定程度上影响了我国在这一领域研究的进展。因此,我们特翻译了这本专著。

该书原著有日、英文两种版本,分别于 1991 年 12 月及 1993 年 3 月出版。由于它是世界上第一本比较全面和系统论述超声波马达的书籍,因而影响很大,受到了国内外专家的广泛欢迎。这本书的内容涉及超声波马达的发展过程、主要结构和原理、试验方法和性能、应用状况等,集近十年超声波马达研究之大成,因而具有较高的学术和实用价值,对于从事超声波马达研究与应用工作的科学技术人员来说,是一本很好的参考书籍。

本书主要根据日文版《新版超音波モータ》翻译而成,部分内容参考了英文版《Ultrasonic Motors—Theory and Applications》,由吉林工业大学杨志刚、上海同济大学郑学伦翻译,并经吉林工业大学郑志峰教授审校。翻译过程中,还得到了吉林工业大学程光明、荣长发以及刘景全、贾立山、马昊学、李军等同志的热情帮助。

最后,向在本书翻译与出版过程中给予了各种支持的所有人员致以诚挚的谢意。

译 者

1997 年 12 月

作 者 序

自超声波马达发明以来,已过去了十余年时间。这期间人们广泛地开展研究,已开发出了几十种结构,取得了多项成果。但应当说,超声波马达主要还处于开发与研究之中。因其结构种类繁多,它尚未形成一个完整的体系,也难以系统地进行汇集与整理。因此,尽管从事超声波马达研究的人员正在逐年增多,每年发表的论文不少,亦有部分论著,但尚没有人写过一本系统论述的著作,这对于超声波马达的研究和推广是不利的。

由于超声波马达经过十几年的发展,其主要的原理与结构已被研究与开发出来,其中某些马达已经实用化,另一些也已接近于实用,因此,トリケップス出版公司的河内健先生向我们提出了写书的请求。我们考虑,现阶段出书虽然难以顾及超声波马达的整个体系,但却可以大致把握超声波马达的主要内容,对于从事超声波马达研究与开发的人也是尽了一份社会责任,因此我们十分愉快地接受了这个请求。

我们在编写本书的过程中,遵守了下列原则:尽量进行系统的论述;尽量指明超声波马达发展的过程;尽量明确地给出设计、制造马达的原则;尽量准确地阐述和评价超声波马达的性能。在写作过程中,我们主要参考了学会和专业杂志上登载的一些论文,但可能遗漏专利文献中的一些内容,请予原谅。

编写分工如下:第一和第六章由东京工业大学教授上羽贞行编写;第二和第三章及第四章前半部由山形大学工学部教授富川义朗编写;第四章后半部及第五章由东京工业大学博士黑泽实编写;第七章由东京工业大学博士中村健太郎编写。

超声波马达正处于发展之中,而从事其研究开发的科学技术

人员也在不断增多,如果本书能对超声波马达的进一步发展有所贡献,那将是我们的最大荣幸。

最后,对于在写作过程中为我们提供各种资料和多种方便的有关人员表示深深的谢意。

上羽贞行

富川义郎

1991 年 10 月

目 录

第一章 超声波马达概述	1
一、超声波马达的定义和历史.....	1
二、超声波马达的特点及其应用.....	4
参考文献.....	7
第二章 超声波马达原理和分类	9
一、驱动原理.....	9
二、椭圆运动的形成	10
三、椭圆运动的生成方法	11
1. 直线振动体	11
2. 共振模态的旋转	17
四、与电磁马达的相似性	23
五、位移放大机构及其功能	26
六、由模态组合而成的超声波马达	27
七、超声波马达的分类	30
1. 按工作原理分类	30
2. 按结构分类	31
3. 按功能分类	32
参考文献	34
第三章 旋转型马达之一——圆盘或圆环形马达	36
一、旋转模态马达	36
1. 圆盘的弯曲共振模态	36
2. B_{1n} 振动模态马达的比较	38
3. 利用 B_{1n} 模态的圆盘形马达	46
4. 利用 B_{0n} 模态的圆环形马达	51
5. 平面内共振模态及其马达	61

二、非旋转模态马达	75
1. 弯曲圆盘的单相驱动马达	75
2. 伸长(径向)一弯曲振动马达	84
3. 单一共振模态马达	86
参考文献	92
第四章 旋转型马达之二——棒形(杆形)或板形马达	94
一、纵一扭模态马达	94
1. 结构和原理	94
2. 复合振子型马达	95
3. 共振模态合成马达	105
二、模态转换型马达	114
1. 结构和原理	114
2. 样机和特性	115
3. 分析和讨论	117
三、单型振子组合型马达	118
1. 转子兼振子型纵一扭模态马达	118
2. 夹持转子型纵一扭模态马达	120
四、弯曲一弯曲振动马达	125
1. 双重弯曲振动马达	125
2. 双重弯曲振动圆筒马达	130
五、矩形板及其变形结构的马达	133
1. 纵一弯模态合成马达	133
2. 弯曲驻波型马达	150
参考文献	153
第五章 移动型马达	156
一、概述	156
二、他动式移动马达	156
1. 弯曲行波型移动马达	156
2. 层叠振子移动马达	171
三、自行式移动马达	176
1. 纵振子复合型移动马达	176
2. 弯曲振子复合型移动马达	180

3. π 型振子移动马达	184
4. 弯曲—弯曲模态马达	186
5. $(R,1)-(1,1)$ 模态开孔圆盘(圆环)马达	189
6. 纵—弯模态平板马达	191
参考文献	194
第六章 超声波马达的应用	196
一、超声波马达的一般应用	196
二、在照相机自动调焦机构中的应用	197
三、在钟表中的应用	202
1. 钟表用 B_{03} 弯曲圆盘马达	202
2. 马达步进方式的控制	204
四、在卡片传送装置中的应用	212
1. 双重弯曲模态马达	212
2. $(R,1)-(1,1)$ 模态马达	213
五、在纸张(带)传送机构中的应用	218
1. 纸张传送过程中滚轮的作用	218
2. 滚轮的摩擦	218
3. 滚轮加压的影响	219
4. 传送力	220
5. 加压力对共振频率及工作电流的影响	221
6. 纸张厚度的影响	222
六、在定位机构中的应用	224
1. π 型移动马达的定位	224
2. 复合振子型马达的旋转定位	226
参考文献	227
第七章 超声波马达的设计	230
一、简介	230
二、等效电路及其基本特性	230
1. 等效电路	230
2. 性能	233
三、特性设计	236
1. 特性设计过程	236

2. 马达尺寸与输出转矩	237
3. 纵振动共振系统的设计	238
四、瞬态响应与性能测定	241
1. 瞬态响应	241
2. 由瞬态响应推测马达的性能	244
五、摩擦工作面的考察和分析	245
1. 摩擦现象	245
2. 润滑油与马达的性能	246
参考文献	249
附录一 压电振子的等效电路	250
1. 压电振子及其基本关系式	250
2. 等效电路分类	252
(1) 电声转换式和等效电路	253
(2) 输入导纳等效电路	253
(3) Mason 等效电路	255
3. 层叠型压电振子(转换器)	257
参考文献	260
附录二 超声波马达用振子	261
1. 单压电片和双压电片型振子	261
2. 螺栓紧固型郎之万振子(BLT)	262
(1) 结构	262
(2) 解析方法	263
(3) 纵-扭复合振子	265
(4) 弯曲振子	266
3. 转换效率	266
参考文献	267
附录三 测量	268
1. 压电振子常数的低振幅测量	268
2. 压电振子常数的高振幅测量	269
(1) 测量原理	270
(2) 测定实例	272
3. 超声波马达工作状态下导纳的测量	272
4. 振子位移的测量	274

参考文献.....	277
附录四 电源电路	279
1. 功放电路	279
2. 脉冲电路	282
参考文献.....	284
附录五 耐磨材料	286
1. 分析方法	286
2. 耐磨材料比较	286
参考文献.....	289

第一章 超声波马达概述

一、超声波马达的定义和历史

超声波马达是一种借助摩擦传递弹性超声波振动以获得动力的驱动机构。

利用弹性振动获得动力的尝试是从钟表开始的。1961年，Bulova 钟表公司开始出售一种利用音叉的往复位移拨动棘轮而获得驱动的手表^[1]。图 1-1 给出了这种手表的工作原理。由线圈激发音叉进行 360Hz 左右的低频振动，音叉的一只臂上装有驱动爪，驱动爪压紧在直径 2.4mm、齿数 300 的棘轮上。当音叉臂向左运动时，驱动爪推动棘轮转动；向右运动时，与棘轮相脱离。反转止动爪用于防止摩擦引起的棘轮反向转动。这种表的月误差仅为 1min，在当时已是了不起了。大约十年之后，即在 1970 年到

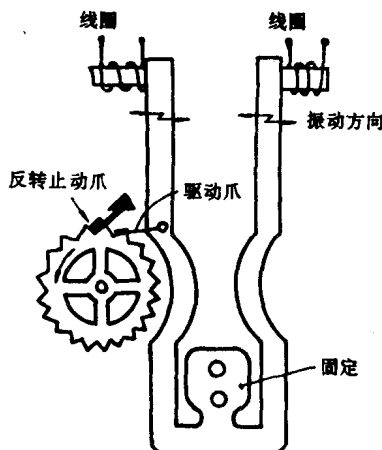


图 1-1 音叉钟表的驱动机构

1972 年之间,西门子公司和松下公司开发出一种直线驱动器和步进马达,其中使用了共振子和滤波器的关键元件——压电振子。由于这种振子的共振频率为数十千赫以上,因而其振幅极小,无法获得较大的转矩或动力。

1973 年,IBM 公司的 H. V. Barth 提出了如图 1-2 所示的超声波马达^[2]。其中,驱动足由压电体(PZT)提供振动,其前部压置在转子上,因而借助摩擦力可推动转子旋转。转子需要顺时针转动时,左侧的驱动足工作,右侧的停止;需要逆时针转动时,右侧的驱动足工作,左侧的停止。如果转子的摩擦工作表面做得比较粗糙,其作用就相当于前述的棘轮。这种马达的结构仅仅是一种原理性的方案。根据大致相同的原理,V. V. Lavrinenco 等人(前苏联)也提出了多种结构^[3],并在此基础上归纳出了超声波马达的多种特点:①结构简单,价格低廉;②低速高转矩;③较大的功率重量比;④可实现精确定位;⑤不需铜线,因而节省资源。

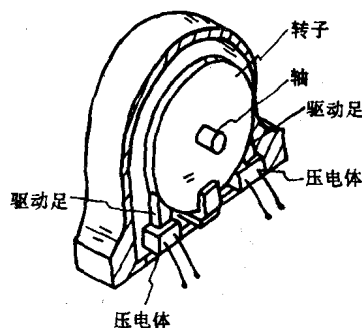


图 1-2 超声波马达

1978 年,华西列夫等人(前苏联)提出了一种转动良好的旋转型超声波马达^[4],如图 1-3 所示,它的压电振子由两个金属块夹持压电元件而构成,可降低共振频率并提高振幅。同时在电路中设置了反馈回路以稳定振幅。其工作过程为:压电振子的纵向振动传递给与转子相接触的振动片,振动片纵向振动的同时弯曲振动而拨动转子旋转。他们还在这种马达之外,开发出了其他一些结构相近

的马达。但由于这类马达要么在连续工作中磨损与发热严重,振幅很不稳定;要么结构比较复杂,实际应用上有很大难度,因而尚无实用的报道。

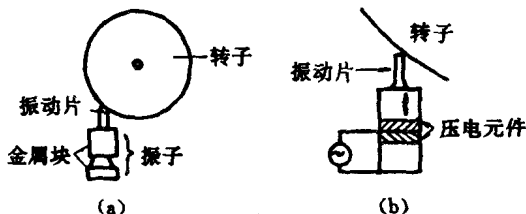


图 1-3 利用压电振子的超声波马达

1980年,指田年生(日本)提出并试制了一种与图1-3在原理上大致相同的振动片型超声波马达^[5]。其结构如图1-4所示,振子与转子的轴线重合,振动片与振子做成一体,但稍倾斜于振子轴线。这种马达的振子是共振频率为27.8kHz的螺栓紧固型郎之万(Langevin)振子,输入功率为90W时,其机械输出功率达到50W,转矩为0.25N·m,接近可实用程度。但是,由于振动片几乎与转子相垂直,磨损比较严重。为了解决这个问题,指田年生又发明并试制了行波型超声波马达^[6]。这种马达的原理是利用行波在有限弹性体内传播时表面质点产生的椭圆运动,如图1-5所示。这种发明证明,当作为定子的弹性体表面可以生成椭圆运动时,它就可以用作构造超声波马达。以此为契机,日本学者提出并研究了多种利用纵振动、弯曲振动及扭转振动组合以构成椭圆运动的方法。这些构成椭圆运动的方法大致可以分为利用单一振动模态的单一模态

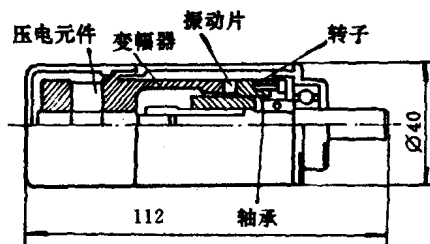


图 1-4 振动片型超声波马达

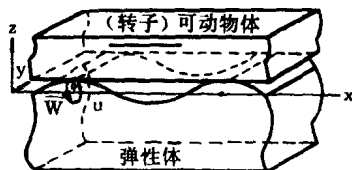


图 1-5 行波型超声波马达

方式和组合多个振动模态的复合模态方式两种。

单一模态方式又可进一步分为驻波型与行波型两种,而复合模态方式又可分为:在单一激振源下,通过模态转换获得两个模态的模态变换式;利用同一个压电元件激振获得不同种类多个模态的多重模态式;以某种相位差的多项电源激振生成不同位置下的相同模态的模态旋转式;以及由各自的压电振子激振生成各自不同的模态的复合振子式^[7]。而马达的形状可以有圆柱、圆环、圆板、棱柱、圆筒等多种,每一种形状都可找出一些振动模态与之相适应。人们正在探讨这些马达的性能及其应用的可能性。其中,圆环状的超声波马达已经作为自动调焦照相机的镜头驱动机构得到应用(佳能),其他马达的实用化研究也在进行中。此外,关于能量转换机理、设计中的结构优化、高功率输出以及小型化等等问题,也在探讨和解决之中。除此而外,有人还在研究和开发以液体或气体作为转子与定子之间导能介质的超声波马达。

二、超声波马达的特点及其应用

超声波马达能够具有的或已经明确的特点列举如下:

- ① 与通常的电磁型马达高速下效率高而转矩小相比较,超声波马达低速下转矩大且效率高。
- ② 单位重量下可获得的转矩大,而且由于可以减小运动部件(转子)的惯性,因而起停、停止等的控制性好。
- ③ 由于转矩较大,因而无需利用减速机构增大转矩,可实现直接驱动。

④ 无需中间的增减速机构,因而没有中间传动误差,可以实现精确定位。

⑤ 切断电源时由于摩擦力依然存在,因而能够保持原有的停止位置不变。

⑥ 由于转子结构简单且总可以找到与定子形状相适应的共振模态,因而马达的形状设计有很大的自由度。

⑦ 容易制成直线移动型马达。

⑧ 无需增减速机构,因而噪声较小。

⑨ 由于并未使用磁场,因而不产生磁性干扰。

⑩ 结构简单。

⑪ 具有转速随负荷增加而减小的特性(如图 1-6)^[8]。

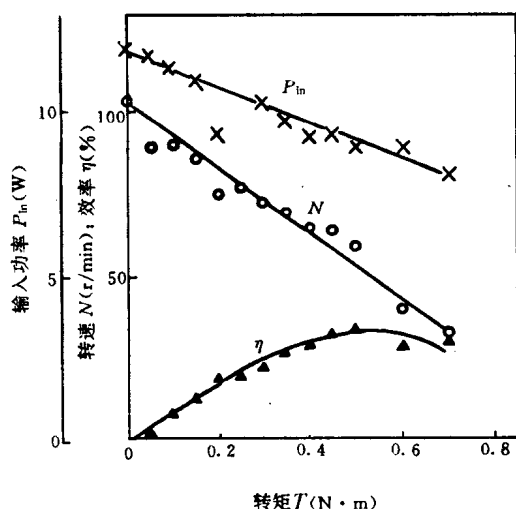


图 1-6 负载特性

⑫ 需使用高频电源。

⑬ 需采用耐磨材料。

⑭ 由于必须产生共振模态,因而在数千瓦以上的功率状态下实现起来极为困难。

由于超声波马达具有上述与传统马达不相同的一些特点,因

此可以认为,如果利用它所具有的一些优点,作为电磁马达的一种补充,它可以用在不适于电磁马达的场合,例如用在形状要求比较特殊而工作时间相对较短的工况之下。可以认为,它在如下几方面有着应用前景:

(1) 机器人驱动器 现在的工业机器人大多利用油压机构来驱动,但由于油压装置必须使用压力油管联接液压站,因而不适宜于能够自由行走的下一代机器人。另一方面,如果利用传统的电磁马达,则当需要发生规定的转矩时,其重量较大且传动机构比较繁杂。而超声波马达却容易实现轻巧且产生规定转矩的要求。另外,如果在机器人的关节处使用圆环形或者圆筒形超声波马达,既可减小关节的重量,其中空的结构内部还可容纳信息和动力传递机构。进一步讲,随着社会进入老龄化,家庭中也开始使用机器人,特别是家务护理等特殊机器人将会大量地涌入家庭。这些机器人将十分需要超声波马达这类轻巧而大转矩的驱动机构。

(2) 民用驱动器 我们已经知道,圆环形超声波马达已被应用在照相机的自动调焦系统中,这种圆环形超声波马达的中空构造正好适应了镜头的结构,同时满足了照相机良好的控制性及低噪性要求,是一个成功的应用事例。另外,高级汽车中通常配用着70个左右的驱动器,其中频繁使用的仅有几个,其余大多数每月仅使用几回,但通常要求具有较高的转矩。这些驱动器如果采用超声波马达且使用同一信号发生器,则既可以相对减少使用信号发生器造成的成本上升,避开超声波马达不适于连续工作的弱点,又能充分发挥超声波马达低速高转矩及低噪声的特点。关于超声波马达在汽车中的适用性问题,目前正在探讨之中。根据超声波马达形状多样、低速高转矩及低噪声等特点,有人已在研究把它作为汽车车窗及百叶窗开闭驱动机构的可能性。

(3) 精密定位驱动器 具有纳米级的转动精度且可快速定位的驱动装置在半导体生产中占有重要的地位,且随着集成度的增加,其精度要求也日益提高。但是,传统的电马达的驱动装置,由于增大转矩和推力时,常要加装齿轮传动装置,因而增加了误差积累