



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

机电系统中的传感器 与驱动器——设计与应用

SENSORS AND ACTUATORS IN
MECHATRONICS

Design and Applications

(波兰) Andrzej M. Pawlak 著

许良军 译

著
译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

机电系统中的传感器与驱动器——设计与应用

(波兰) Andrzej M. Pawlak 著
许良军 译



机械工业出版社

本书讨论了几种在工业应用中阐述较少的现代机电驱动器和磁传感器,主要包括磁传感器、线性和自锁螺线管驱动器、步进电动机、旋转式驱动器和其他特殊的磁性设备。每一章都论述了各种磁传感器和机电驱动器的分析和设计,并以汽车及其他工业的机电系统应用上的大量实例作为支持,讨论了电磁和机电设计、分析、优化和测试的常规研究,包括材料和应用。

本书可作为高年级本科生和研究生相关课程的参考书,也可作为研究人员以及工程技术人员

的工具书。
Sensors and Actuators in Mechatronics, Design and Applications Copyright © 2007 by Taylor & Francis Group, LLC.

Simplified Chinese translation edition published by China Machine Press.

All Rights Reserved.

本书简体中文版由机械工业出版社出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权所有,侵权必究。

本书封底贴有 Taylor & Francis 集团防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01-2008-2076 号。

图书在版编目(CIP)数据

机电系统中的传感器与驱动器:设计与应用/(波)帕拉克(Pawlak, A. M.)著;
许良军译. —北京:机械工业出版社, 2011. 7

(国际电气工程先进技术译丛)

Sensors and Actuators in Mechatronics-Design and Applications

ISBN 978-7-111-35258-7

I. ①机… II. ①帕… ②许… III. ①机电系统—传感器 ②机电系统—驱动机构
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 132016 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:闫洪庆

版式设计:张世琴 责任校对:申春香

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·21.5 印张·430 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-35258-7

定价:88.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

近 50 年来,以电子、计算机、新材料等为标志的科学技术的发展异常迅速,带动了应用技术的发展,使之产生了日新月异的变化。在机电系统中的突出体现是自动化、智能化,表现为水平的提升、程度的深入和应用的普及。而在机电系统的自动化、智能化过程中,传感器与驱动器(又称执行器)是必不可少的装置。由于原理、材料、制造技术、应用需求等诸多因素导致传感器与驱动器种类繁多,用法各异。这一方面给工程设计人员提供了设计创新的机会,但同时也带来了问题,即如何在设计中合理地选择、恰当地使用传感器与驱动器,以及充分地发挥它们的潜能。这些问题解决得好坏,很大程度上标志着设计师的能力和水平。因此,对于设计师而言,这是一个值得投入精力认真去做的事情。

本书以机电行业(侧重汽车工业)为背景,讨论了在工业应用中阐述较少的现代机电驱动器和磁传感器,包括磁传感器、线性和自锁螺线管驱动器、步进电动机、旋转式驱动器和其他特殊的磁性设备,涉及设计、分析、优化、测试、材料和应用。

本书突出且鲜明的特点是理论与实际密切结合。不仅阐述了磁传感器和机电驱动器的工作原理,更主要是讲述了其设计与应用。这些设计与应用大多来源于作者自身的工程实践和经验,这一特点是非常难能可贵的,这也是译者翻译本书和读者阅读本书的主要价值所在。目前我国的专业技术图书市场上不乏讲原理的专著、教科书,而这类书籍通常缺乏工程实践的内容;也有一些工程技术图书又往往缺少相关理论的阐述。这从一个方面表明我国比较缺乏既具有扎实的理论基础,又有丰富实践经验的高级工程技术人才。因此,阅读本书不仅可从中了解、学习和掌握磁传感器与机电驱动器的专业知识,也可从中感受和领悟到一个优秀的工程技术人员所应具备的知识和能力。可以预见,本书作为教学参考书,相关专业的高年级本科生、研究生在学习理论的同时,可以切实地了解其工程应用;作为工程技术图书,工程设计人员在学习其设计方法的同时,可以提高自身的理论水平。

在本书的翻译过程中,研究生张灏、黄超群、施夏峰、田瑞利、尹泉、周超峰、田野、王浩等同学协助做了大量前期工作,并参与了部分翻译工作;另外,黄若愚、黄加勇、殷铸灵、魏来、朱萌、张灏、张凡、肖然、要学玮、褚立辰等参与了部分翻译和其他相关工作,在此一并表示感谢。

由于译者的水平、翻译的时间有限,译文中难免存在疏漏及不足,恳请广大读者批评指正。

译者

原 书 序

机电设备的重要性——工业上的电磁设备和机电设备的应用以及它们对新兴技术的影响——近年来显著地增加了。在基于微处理器的控制技术方面的重要进步，以及高性能硬磁和软磁材料成本的大幅度降低，已经改变世界技术的面貌。

特别地，汽车工业已经从机械和液压的系统和元件转向基于电磁和机电设备的机电系统。用于工业应用的伺服电动机设计和优化技术，在其他相关文献中有充分的说明和描述。本书讨论了几种在工业应用中可能阐述较少的现代机电驱动器和磁传感器系列产品：磁传感器、线性和自锁螺线管驱动器、步进电动机、旋转式驱动器和其他特殊的磁性设备。本书志在填补现代工业应用中关于机电设备的发明和设计优化的空白。每一章都论述了各种磁传感器和机电驱动器的分析和设计，并以汽车及其他工业的机电系统应用上的大量实例作为支持。基本的关注点是在汽车应用上，结合电磁和机电设计、分析、优化和测试的常规研究讨论，包括材料和应用。

对所有感兴趣和工作职责与机电系统特别是磁传感器和机电驱动器有关的人员来说，本书将是有价值的。本书的目的是让读者更加了解技术发展水平，帮助他们理解设备的功能和特性，提供设计指导去满足具体的、甚至是极端的工业需求。对电磁设备和机电设备的关注是理所当然的，因为它们是基于我的发明创造。通过分享我作为一名设计和制造工程师、研究员和发明者的个人经验来帮助解释我的思考方法，将使得成千上万的传感器和驱动器在现代工业的机电系统中得以发展和成功实施。我希望本书能作为一本教科书为学生服务，作为一本设计手册为工程师服务，并激发这个领域的创新。同时我也希望分享商业和社会方面的技术开发过程去帮助解释它如何得以成功发展成为世界一流的技术。

本书的大部分研究内容是在 GM 公司和 Delphi 公司里与部门和外面的合作团队一起完成的。本书的许多内容以前是以专业论文和会议报告的形式出版的，现在的使用得到了 Delphi 公司充分的许可。我非常感谢为这些论文做出贡献的人，包括 Alex Alexandridis、David Graber、Bruno Lequesne 和 Takeshi Shirai，还要感谢所有研究人员、技术人员、起草者以及其他来自生产线的每个人所给予的支持、建设性的意见和优秀的工作。我也非常感谢我的女儿 Patrycja 为使

本书对读者具有亲和力所做的努力，以及我的妻子 Ewa 所提出的令人印象深刻的封面概念。最后，我还想说，如果没有与 Delphi 公司的 Thomas Nehl 博士卓有成效的讨论和西里西亚工业大学 Tadeusz Glinka 教授坚持不懈的鼓励，这本书将不可能完成。

Andrzej M. Pawlak

目 录

译者序

原书序

作者简介

第 1 章 导论	1
1.1 传感器和驱动器的分类	1
1.1.1 磁传感器	2
1.1.2 线性 and 自锁螺线管驱动器	3
1.1.3 步进电动机	5
1.1.4 特殊的磁装置	7
1.1.5 旋转和线性驱动器	8
1.2 磁性材料和技术	8
1.2.1 软磁材料	9
1.2.2 硬磁材料	11
1.2.3 镀膜技术	16
1.2.4 磁性材料的市场和应用	16
第 2 章 磁传感器	20
2.1 磁传感器理论	21
2.2 磁传感器分析	22
2.3 VR 传感器	25
2.3.1 传统的 VR 传感器	26
2.3.2 高性能 VR 传感器	30
2.3.3 带插入式磁铁的传感器	33
2.3.4 磁铁前置式传感器	39
2.3.5 带 E 形磁结构的传感器	41
2.3.6 带 U 形磁结构的传感器	42
2.3.7 多磁 VR 传感器	47
2.3.8 双磁传感器	47
2.3.9 双传感器的布局	55
2.3.10 分布式 VR 传感器	56
2.4 固体传感器	62
2.4.1 固体传感器分析	62
2.4.2 固体传感器设计	63
2.4.3 固体传感器测试结果	67

2.5 磁传感器应用	68
2.5.1 磁速度传感器需求	68
2.5.2 磁速度传感器应用	69
2.5.3 磁位移传感器应用	71
2.6 VR 传感器的噪声	72
2.6.1 数学模型和噪声分析	73
2.6.2 噪声问题的解决	73
例 2.1	76
例 2.2	77
例 2.3	78
第 3 章 线性驱动器	79
3.1 线性驱动器的数学模型	80
3.1.1 电磁装置的对称分析	80
3.1.2 电网络方程	81
3.1.3 机械方程	84
3.1.4 磁性力	85
3.1.5 脉宽调制 (PWM) 分析	86
3.1.6 电磁阀分析及仿真	91
3.2 快速响应驱动器	94
3.2.1 圆盘型电磁阀	95
3.2.2 活塞型电磁阀	96
3.2.3 球型电磁阀	98
3.2.4 锥形塞电磁阀	101
3.2.5 快速响应驱动器的优化	103
3.3 电磁阀驱动器的应用	106
3.3.1 长冲程电磁燃料泵	106
3.3.2 汽油喷嘴	109
3.3.3 天然气喷嘴	112
3.3.4 柴油喷嘴	119
3.3.5 压缩机电磁阀	124
3.3.6 传输电磁阀	127
例 3.1	135
例 3.2	137
第 4 章 线性自锁驱动器	140
4.1 自锁继电器	140
4.1.1 自锁继电器的动态分析	142
4.1.2 双极型自锁继电器	144
4.1.3 单极型自锁继电器	147

4.1.4 自锁继电器分析	149
4.1.5 自锁继电器的分析与测试	152
4.2 自锁螺线管	158
4.2.1 可动磁铁自锁螺线管	158
4.2.2 固定磁铁自锁螺线管	166
4.3 自锁螺线管应用	172
例 4.1	174
第 5 章 步进电动机	175
5.1 工作原理	175
5.2 步进电动机的静态分析	179
5.2.1 静态转矩分析	179
5.2.2 磁路分析	184
5.2.3 磁铁工作点	188
5.2.4 温度效应	191
5.2.5 电枢反应效应	191
5.2.6 静态特性实验结果	192
5.3 步进电动机的动态分析	197
5.3.1 动态分析的数学模型	198
5.3.2 步进电动机的动态仿真	200
5.3.3 动态模型验证	202
5.3.4 各参数对步进电动机性能的影响	206
5.3.5 动态特性的实验结果	210
5.3.6 粘性阻尼系数的评估	211
5.3.7 负荷转矩对步进电动机性能的影响	216
5.3.8 步进电动机动态运行的感应系数	219
例 5.1 磁路计算	226
例 5.2 静态转矩计算	231
例 5.3 磁通计算	233
第 6 章 专用磁装置	234
6.1 电磁阀	234
6.1.1 背景	235
6.1.2 心脏瓣膜的设计指标	235
6.1.3 心脏瓣膜的设计原理	237
6.1.4 数学模型与仿真	238
6.1.5 优化设计	242
6.1.6 对比与测试结果	243
6.2 心脏泵	244
6.2.1 心脏泵的设计指标	244

6.2.2 心脏泵的设计原理	245
6.2.3 分析仿真与优化设计	245
6.3 磁流变液螺线管	250
6.3.1 背景	250
6.3.2 磁流变液螺线管执行器	252
6.3.3 磁流变液的应用	254
例 6.1	255
例 6.2	256
例 6.3	256
第 7 章 旋转式驱动器	258
7.1 磁盘旋转式驱动器	259
7.1.1 磁盘旋转式驱动器分析	260
7.1.2 磁盘旋转式驱动器设计	264
7.1.3 磁盘旋转式驱动器激励电磁回路	264
7.1.4 磁盘旋转式驱动器齿形磁部件	265
7.1.5 磁盘旋转式驱动器永久磁铁	266
7.1.6 磁盘旋转式驱动器测试结果	268
7.2 爪极旋转式驱动器	270
7.2.1 爪极旋转式驱动器分析	272
7.2.2 爪极旋转式驱动器设计	273
7.2.3 爪极旋转式驱动器激励电磁回路	273
7.2.4 爪极旋转式驱动器齿形磁部件	274
7.2.5 爪极旋转式驱动器永久磁铁	275
7.2.6 爪极旋转式驱动器测试结果	277
7.3 圆筒旋转式驱动器	279
7.3.1 圆筒旋转式驱动器分析	281
7.3.2 圆筒旋转式驱动器二维分析	282
7.3.3 圆筒旋转式驱动器三维分析和测试结果	286
7.3.4 圆筒旋转式驱动器设计	289
7.3.5 圆筒旋转式驱动器永久磁铁	290
7.3.6 圆筒旋转式驱动器激励电磁回路	295
7.3.7 圆筒旋转式驱动器齿形磁结构	295
7.4 圆筒旋转式驱动器应用	296
7.4.1 磁盘旋转式驱动器应用	298
7.4.2 爪极旋转式驱动器应用	299
7.4.3 圆筒旋转式驱动器应用	301
例 7.1	304
例 7.2	304

例 7.3	305
第 8 章 结束语	306
8.1 技术的发展	306
8.1.1 合作关系	306
8.1.2 竞争	307
8.1.3 坚持	308
8.1.4 技术的进步	309
8.2 技术价值	309
8.2.1 技术属性	310
8.2.2 商业属性	314
8.2.3 金融属性	315
8.2.4 技术等级	315
附录 符号和缩写	317
参考文献	325

第 1 章 导 论

机电一体化是机械工程和电子学的综合,是两个不同的技术领域在复杂系统设计中的综合应用。它是精密机械、电子控制和系统分析在产品设计和加工时设计中的协调融合 (Alciatore 和 Hiestand 2003, Baumann 等 2000, Bishop 2002, Triantafyllou 等 1999)。传感器和驱动器转换机电系统的能量,并且对于这样的转换来说,磁路似乎是最好的媒介 (White 和 Woodson, 1959)。因此,带有电可控磁路的磁传感器和机电驱动器是机电一体化系统的关键元件 (Delphi 2002),我们选来在本书中描述的这些驱动器包括步进电动机、磁传感器、旋转式驱动器、线性螺线管和其他的使用智能材料的专用设备。本书中讨论的是工业应用中现代电磁和机电设备,并且试图引导读者进行分析和优化设计 (Baumann 等 2000, Bishop 2002, Box 等 1969, Dabrowski 1977, Fletcher 1987, Gieras 和 Wing 1994, Kuester 等 1973, Navarra 1990, Pawlak 1989, Piron 等 1999, Yoon 等 1999)。这些原型和测试结果的陈述以及分析可以从概念和制造上得到更深的了解。

本章的第 1 部分对在机电一体化应用中使用的一些机电和电磁设备的几个关键系列作了分类和描述。尤其关注变磁阻 (VR) 传感器,可以描述并分类为磁传感器、线性和自锁螺线管、步进电动机,以及各种旋转式驱动器 (Pawlak 等 1997, Pawlak 1996)。也介绍了一些特殊的磁性设备,包括特别应用在生物学上的用智能材料制成的设备。

因为它们的简单、低成本、可控性和高性能,现代机电和电磁传感器与驱动器在工业上的使用正在增加 (Aftonin 等 1999, Ellis 和 Collins 1980, Hanitsch 1994)。正确地选择磁性材料是电磁电路设计的一个关键因素。因此,本章的第 2 部分对软硬磁材料都进行了描述 (Carpenter 1989, Daido 2003, Furlani 2001, Hitachi 1999, Kasai 1992)。软硬磁材料的评述包括对各种不同应用的建议 (Dabrowski 1980, Gieras 和 Wing 2002, Ginka 1995, Macoit 1999, Pawlak 等 1999, Pawlak 2000a, Pawlak 1996, Rashidi 1982)。当然,高性能磁铁的新特性的所有应用都在产品化磁性材料的基础上。另外,磁性材料的制造技术可以帮助读者理解磁性材料的优势和限制,所以在本章中也有相关方面的介绍。

1.1 传感器和驱动器的分类

机电和电磁传感器以及驱动器,比如步进电动机、传感器、旋转式驱动器、线

性螺线管等在机电系统中可电控的设备,和其他用智能材料制成的专用设备,将在本章中描述和分类。

1.1.1 磁传感器

当今在机电系统中普遍使用的磁传感器是变磁阻传感器和固体传感器 [霍尔效应装置和磁阻 (MR)]。它们快速地占领了市场 (Foster 1988, Ohshima 和 Akiyama 1989a, Ohshima 和 Akiyama 1989b, Podeswa 和 Lachman 1989)。在过去的 10 年中,安装在汽车中的传感器的平均数量已经从几个上升到现在的 20 个。在不久的将来,有望超过 50 个。在世界范围内,汽车传感器市场价值为 50 亿美元,并且将以每年 7% 的速率继续增长。磁传感器的一般应用包括点火计时、功率检测、阀门位置、电流检测、线性或旋转运动探测、速度检测、长度测量、流体检测、转速检测、安全系统等。磁感应器一般用于以脉冲序列的形式提供速度、计时,或者同步数据显示 (或控制电路)。因此转速和速度测量这两种最流行的应用可以几乎在任何市场中找到:

1) 转速测量应用在飞机、汽车、轮船、公共汽车、农用设备、卡车、有轨电车的发动机上,以及精密照相机、带式录音机和运动图像设备、钻机、研磨机、车床、自动螺纹切削机床等设备的电动机。

2) 速度测量应用在食品、纺织品、木工、造纸、印刷、烟草和制药工业机械过程,以及水泵、鼓风机、搅拌机、排气和通风扇、电动机和发电机。

完全地自驱动、VR 传感器是简单、鲁棒性好的装置,工作时不需要额外的电源 (Pawlak 等 1991d)。它们的特点是不接触、驱动速度向输出频率转化准确、安装简单、没有运动部件。它们可以在很宽的速度范围内使用,并且可以适应各种结构。这些属性让它们可以用于许多工业领域。因此 VR 传感器有许多与应用相关的名称,如电磁拾音器、速度传感器、运转机械传感器、脉冲发生器、变磁阻传感器、频率发生器、变送器、磁探头、计时探头、磁单极子、敏感元件等。

VR 传感器的缺点是它们产生一个正比于磁场变化率的信号。信号的强度随速度的减小而减小,因此当磁场变化率小于某个值时,信号将淹没在噪声中。在高频磁场里,线圈过高的输出电压给电路设计者带来问题。VR 传感器线圈气隙为 $0.25 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、线圈电阻为 $200 \sim 4000 \Omega$ 、温度范围为 $-40 \sim +165^\circ\text{C}$ 时,产生的电压可达到 4000V。

模拟 VR 传感器是无源传感器,不需要任何外界电源。传感器产生一个典型的类似正弦的输出电压,这个电压与励磁轮的速度成正比。信号的水平是传感器和锯齿状励磁轮间的气隙的函数。数字输出 VR 速度传感器产生一个数字 (方波) 脉冲,这个脉冲与励磁轮的速度成正比。带有传感器的有源的固态信号调节集成器将模拟 VR 输出变为数字脉冲。在频率达到 50000Hz 时,励磁轮速度感应范围在 $0.5 \sim 40 \text{ m/s}$ 之间。

在多数应用中,有一个电压输出就足够了;然而当速度传感器需要冗余时,多线圈结构具有优越性。用多线圈传感器取代两个独立线圈的传感器,在满足了冗余的需要的同时,可使系统成本和重量最小化。为满足冗余和多个读出需要,传感器线圈选择包括单独、双重、三重或四重线圈结构。其中两线圈用来冗余速度探测,三独立线圈用来接地调整、位置读出等。多线圈的应用主要是传感器或系统出现故障时能保持输出电压,比如传感器或相应的电子装置电路短路时保持速度检测的完整。

霍尔效应和磁阻(MR)传感器都不能独自产生一个信号电压,必须要有一个外部电源。因此它们被称作有源传感器。固体传感器可以产生数字或者模拟的输出。数字输出传感器有两种状态——开或关。模拟传感器产生一个连续的电压输出,这个输出随磁场强度增加而增加。有三种类型的数字传感器:双极、单极和全极。双极传感器闭合时要求一个正的磁场强度(南极),释放时需要一个负的磁场强度(北极)。全极传感器的闭合既可以是南极也可以是北极。单极传感器需要一个单独的磁场(南极)闭合;当这个极消失时传感器关断。模拟传感器可在任一磁极附近动作(Rowley 和 Stolfus 1990)。

霍尔效应传感器是零速度、非接触的传感器,能够在 $0 \sim 50\text{kHz}$ (甚至可到 100kHz)、气隙达 $3.0 \times 10^{-3}\text{m}$ 的典型的目标范围提供恒定的输出。霍尔效应电路测量速度可以在旋转或者运行方向上精确到零,并给出精确的角度位置。因为低磁场灵敏度 ($0.5 \sim 5.0\text{mV}/100\text{Oe}^\ominus$ 施加场),霍尔效应元件产生的初始信号非常小,并且元件性能很大程度上取决于温度。霍尔效应传感器以精确到零的速度检测为特征,有一个宽的运行电压范围为 $5.0 \sim 24.0\text{V}$,一个集电极开路输出伴随着 35mA 的衰减电流和一个范围可高达 150°C 的工作温度。

新推出的巨磁阻(GMR)效应金属多层传感器在电流测定MR传感器的基础上有所改进。新的无源固体磁传感器(PSSM)是磁致伸缩效应和压电效应两种技术的结合。相对于一个磁场,磁致伸缩现象对压电元件产生压力,压电元件依次产生一个PSSM传感器的电输出信号。如果是有成本效益的大规模生产,并且最终产品可以在恶劣的环境下工作,这种传感器将有潜力替换现有的传感器。PSSM传感器不耗费电功率,兼备了霍尔传感器的小规格以及VR传感器的无源特性的优点。对于固体传感器和VR传感器,会在第2章中阐述。

1.1.2 线性和自锁螺线管驱动器

螺线管驱动器是常见的工业元件,在每个工厂的运动控制中都经常使用(Boldea 和 Nasar 2001)。螺线管在需要夹持、锁定、转向、移动、止动或者某种冲击功能中得到广泛的工业应用,比如工厂自动化、材料加工、运输、汽车工业、食

$^\ominus 10\text{Oe} = 79.5775\text{A/m}$

品加工、医疗设备、农用设备、自动售货机、洗衣机、建筑设备、船舶、航天、航空等。除此之外，螺线管驱动设备在用户市场广泛采用。

螺线管包括一个带有缠绕在线轴上的线圈（线轴上带有运动衔铁）和一个压缩在外壳里的复位弹簧。按照衔铁的形状，螺线管可以被分为活塞型、圆盘型、球型、锥型。当线圈通电时，励磁磁场吸引衔铁，并把它拉进螺线管中与衔铁挡块相接触，拉伸复位弹簧。当电流消失时，衔铁在复位弹簧或者重力作用下回到它的原始位置。典型的螺线管可分为交流或直流，线性或旋转运动，或相对于变化位置的开关。线性的螺线管可以是一个低成本、低效率的情况下应用的开放构架的螺线管结构，也可以是一个应用在长寿命、高强度的情况下的管状螺线管。

线性螺线管通过铁心的推拉运动把电能转换为机械功。电动势由于电流流经线圈而产生，并受线圈的散热能力限制。工作周期或螺线管供电的时间百分比是选择螺线管的一个关键因素，螺线管供电时需要的时间越短，冷却的时间就越多，因此可以通过一个更大的额定电流，提供更大的动力。根据不同的工作周期，相同的螺线管设计可以有很宽的变化力额定值。连续工作螺线管可以有 100% 的工作周期。一般来说，这个工作周期会有一个最低的力额定值。

工业螺线管能够设计成将负载附加在动铁心的端部产生拉或推运动。在一些应用中，动铁心装配可设计成在两个端部都附加负载装置。这种连接负载到工业螺线管的方法，必须考虑到如果使用不正确，负载将会影响螺线管的寿命。进一步来说，如果安装在行程的任何一个位置引起了约束条件，将会导致额外的磨损和运行寿命的降低。

螺线管驱动器把电能转换为机械能。按照功能的不同，可以把螺线管驱动器划分为三类：轴向旋转运动的旋转螺线管、线性运动的线性螺线管和有保持力的约束螺线管。旋转螺线管是一个机电设备，可以通过三个球形轴承沿着倾斜的轨道运行，把线性运动转换成为旋转运动。当线圈被激励时，装配的衔铁被朝着定子的方向拖动，然后通过一个由轨道圆决定的弧线旋转。线性螺线管可再细分为

- 单向线性螺线管——螺线管只在一个方向产生力，靠机械作用返回。
- 双向线性螺线管——运动受专门提供激励的各自线圈作用。
- 双稳态螺线管——开关受一个极性变化的电流脉冲作用，终端位置的维持不需要电流。

线性螺线管有三个重要的特性：行程、牵引力、相对工作周期。行程是衔铁应该移动的距离。牵引力定义为运动开始之前的有效力。相对工作周期表示接通时间和工作周期时间的关系。因为整体的线圈温度不会超过最大的可允许定额（环境温度为 25℃ 时，A 类为 105℃、B 类为 130℃、F 类为 155℃、H 类为 200℃），所以螺线管的 100% 工作周期为定额是指可以由额定电压（电流）连续地激励。小于 100% 的工作周期属于断续工作周期运行范围，有一个相关的、不能超过的、允许

的“接入”时间。对于相同的螺线管，断续工作的线圈比连续工作的线圈提供更大的力。

根据行程长度、力的输出能力和工作周期的最大范围，线性螺线管可以有各种不同的类型和尺寸（Pawlak 等 1988）。线性螺线管可针对标准、强化、高负荷运行应用设计特殊的类型，比如为低能消耗设计的双稳态线性螺线管和自保持自锁螺线管。旋转螺线管提供的旋转角度为 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

比例螺线管是一个线性驱动器，有确定的行程范围，在此范围内，输入信号的值与螺线管的行程距离相对应。比例螺线管可以精确地控制位置。螺线管也能够被简单地设计成开-断应用，其作用如同继电器。比如，它们可以用于启动装置和门锁。例如在传输和燃油喷射应用中，脉宽调制（PWM）线性螺线管可用于操纵活塞和阀门以精确控制流体压力和流量。传输要求精确和平滑控制在离合器上的压力用来改变啮合以及控制静态转矩换能器。电子控制传输可以包含 8 个以及 8 个以上的螺线管，所有的这些都要求平滑、精确控制。在普通火车内燃机的燃油喷射应用方面（压力超过 $13.8 \times 10^3 \text{ kPa}$ ）要求每个气缸里有一个线性螺线管用来精确控制压力，保持可预期的喷射燃油流量。线性螺线管的位置由反馈环控制。比如，一个阀门的阀后压力为可以被监测，并且作为一个反馈信号和设定值相对比，调整 PWM 占空比来控制螺线管。然而，测量阀后压力可能是非常困难、不切实际并且非常昂贵的。一个可行的办法是测量通过螺线管的电流来确定螺线管的位置。这是可实现的，因为在螺线管上的机械负载直接与磁场成比例，而这个磁场直接与通过线圈的电流成比例。螺线管的比例控制是通过弹簧负载和螺线管磁场之间的力的平衡来完成的，这个控制可以通过测量通过螺线管的电流来决定。第 3 章介绍了线性螺线管。

螺线管可以设计为磁场闭锁模式（Pawlak 等 1999）。在这种情况下，磁铁可以用在螺线管里。当线圈被激励时，铁芯被拉进螺线管里，即使线圈激励消除，磁铁也可以让铁芯保持同一个位置上。然后加一个反向电压用来让铁芯离开螺线管，并回到起始位置。双稳态螺线管有两个没有电流时的稳定端位置。在两个端位置之间，切换受变化极性的电流脉冲作用。对比标准线性螺线管，双稳态螺线管以三个特征力为特点：拉力（和标准线性螺线管一样）、使铁芯完全保持在终止位置的保持力和令衔铁保持在起始位置的保持力。闭锁螺线管会在第 4 章中介绍。

1.1.3 步进电动机

步进电动机是一个电子操作的旋转电动机，它以一个有限的角度增量把电脉冲转变为机械旋转运动，这个增量称为“步”。步进电动机轴的每次旋转都是由一系列的离散的单步完成的。一步定义成当电动机收到一个脉冲时，由输出轴产生旋转角度。在数字控制电路中，这类电动机是非常普及的，比如机器人，因为它们很适合通过数字脉冲进行步进控制。这些电动机很普及，因为它们适合现代数字控制。步进电动机也叫做步进机，这种步进电动机有很宽泛的使用范围，仅举几例来

说,它们在机床、过程控制系统、磁带和光盘驱动系统以及可编程序控制器方面使用很广泛 (Ellis 和 Collins 1980, Furlani 2001)。

有三种不相同的步进电动机家族,它们在基于磁性材料选择上彼此不同。也许最普遍的一族是永磁 (PM) 步进电动机,这种电动机在多极圈或者薄盘永磁转子和定子的电磁场之间的相互作用下运行。转子转矩的产生方式与同步电动机中带有定子的旋转磁通以及永磁磁通在电磁上相互作用是同样的方式。

爪极步进电动机也叫做薄罐或者罐架电动机,由于它的低成本、简单、高稳定性和相对低的惯性,普遍在低转矩和低速时使用。这种电动机由线圈、多极环形磁铁和爪极定子组成。定子表面的齿和转子极表面的齿相互错开,从而使只有有限的转子的齿可以与被激励的定子极调整啮合。转子和定子齿的数量决定了每一次脉冲发生时的步距角,并且线圈的极性是变化的。步距角越小 (如典型的 7.5° 或 15°), 齿的数量就越多。爪极步进电动机会在第 5 章中介绍。

VR 步进电动机有磁阻型铁磁转子,可以产生磁阻转矩。不像永磁步进电动机,VR 步进电动机没有可以让转子在电动机断电时保持在同一位置的剩余转矩。当定子线圈被激励,转子的齿将会与被激励的定子极对齐。磁通的动态特性会寻找最小磁阻的路径。因此,电动机趋于调整转子的极中心到定子凸极的对称轴重合。通过改变激励的定子线圈,定子的磁场改变,并且转子转动到一个新的位置。通常磁阻电动机的转子是由软铁制成的,定子为多相线圈。为了提高电动机性能,也为了小角度移动获得更多的步距,三相电动机的结构彼此相连并且相对错开。

混合步进电动机的结构结合了 VR 步进电动机和有源永磁电动机设计而成,并且在永磁电动机和 VR 电动机的组合运行原则下运行 (Crnosija 2000, Croat 1985, Russell 和 Lenhouts 1980)。混合电动机的定子核心结构本质上是与 VR 步进电动机相同的。主要的不同是在 VR 电动机中的一相上只有两个线圈中的一个缠绕在一个极上。但是典型的混合电动机有两个不同相的线圈缠绕在同一极上。两个线圈在同一极上缠绕,在结构上叫做双线 (Bifilar) 连接。混合电动机的每一极都由软铁制成的间距均匀的齿覆盖。每一极上的两部分的齿相互错开半个齿位。典型的设计为圆柱形永久磁铁夹在两个 VR 末端转子之间有一个位置偏移。与其他类型相比,它们的性能有所改进,但是成本更高。

定子线圈的设计也同样有变化。因此,从控制器的角度来看,有许多种类的步进电动机。双极步进电动机有一个简单的线圈,但是有“H”形开关的复杂的控制器,而单极步进电动机有简单控制器和更复杂的线圈。一台步进电动机的双极线圈可以应用到同样的转子和定子结构作为一个双极电动机,但与定子上的绕组为单线不同,需要两线相互平行地缠绕,使得电动机的线数增加了一倍。多相定子绕组的步进电动机不很普遍,但是三相绕组比较普遍。三相绕组有连接成 Δ 和 Y 结构。

根据运行模式不同,步进电动机可实现全步进、半步进和微步进。半步进是两