

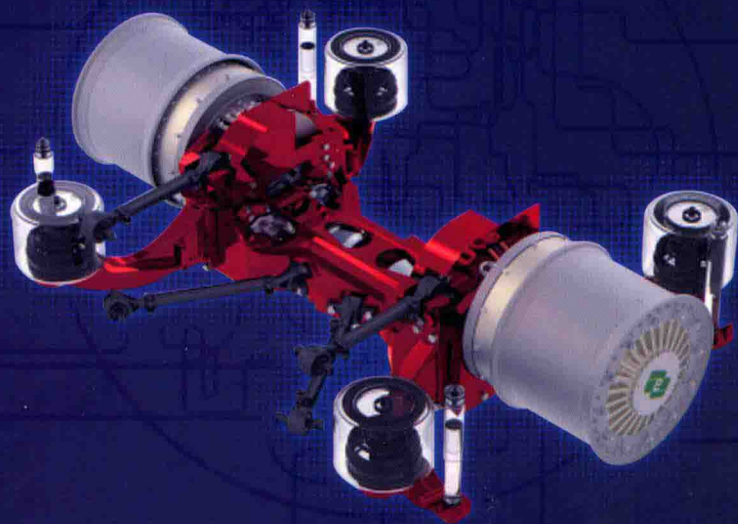


电气工程新技术丛书

控制电机电磁兼容 测试与抑制技术

Electromagnetic Compatibility Testing and
Suppression Technology of Control Electric Machine

主编 熊端锋 罗建



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电气工程新技术丛书

控制电机电磁兼容测试 与抑制技术

主编 熊端锋 罗 建

参编 唐名钟 金实斌 洪 颖 安 伟 张 颖 柳毛继 代 颖



机械工业出版社

本书从控制电机的基础理论、电磁兼容的基础、试验方法、测试标准、电磁兼容抑制技术等角度对控制电机及其系统的电磁兼容问题进行了阐述,主要分为三个部分,第一部分为控制电机及其系统的基础知识;第二部分和第三部分为电磁兼容基础和电磁兼容测试;第四部分为电磁兼容性抑制技术。

本书可供高校电机相关专业的师生参考,也可供电机企业及检测认证机构的工程人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

控制电机电磁兼容测试与抑制技术/熊端锋,罗建主编. —北京:机械工业出版社,2018.12

(电气工程新技术丛书)

ISBN 978-7-111-61788-4

I. ① 控… II. ① 熊… ② 罗… III. ① 微型控制电机-电磁兼容性-研究 IV. ① TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 007861 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:汤枫 责任编辑:汤枫

责任印制:孙炜 责任校对:张艳霞

北京中兴印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·12.75 印张·309 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-61788-4

定价:49.00 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

服务咨询热线:(010)88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010)68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

(010)88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

出版说明

近年来，电气工程领域的研究有了长足的发展，为促进电气工程学科的发展和人才培养，现机械工业出版社会同全国在电气工程领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校及科研机构，组成阵容强大的编委会，组织长期从事科研和教学的学者编写这套学术水平高、学科内容新、具备一定规模的电气工程新技术丛书，并将陆续出版。

这套丛书力求做到：学术水平高、学科内容新，能够反映国内外电气工程研究领域的最新成果和进展，具有科学性、准确性、权威性、前沿性和先进性；选题覆盖面广、深度适中，不仅体现电气工程领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套丛书的选题是开放式的。随着电气工程学科日新月异的发展，我们将不断更新和补充选题，使这套丛书及时反映电气工程领域的新发展和新技术。我们也欢迎在电气工程领域中有丰富科研经验的教师及科技人员积极参与这项工作。

由于电气工程领域发展迅速，而且涉及面非常宽，所以这套丛书的选题和编审中如有缺点和不足之处，诚请各位老师和专家提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

《电气工程新技术丛书》编委会

主 编：严陆光（中国科学院电工研究所）

副主编：李华德（北京科技大学）

编 委（按姓名拼音排序）：

薄志谦（许继集团有限公司）

程 明（东南大学）

董朝阳（南方电网科学研究院）

范 瑜（北京交通大学）

干永革（中冶赛迪电气技术有限公司）

戈宝军（哈尔滨理工大学）

何怡刚（合肥工业大学）

江道灼（浙江大学）

金建勋（天津大学）

李 鹏（华北电力大学）

李欣然（湖南大学）

马小亮（天津电气科学研究院）

阮新波（南京航空航天大学）

舒 彬（北京电力经济技术研究院）

孙秋野（东北大学）

汤 涌（中国电力科学研究院）

唐跃进（华中科技大学）

王建华（西安交通大学）

王志新（上海交通大学）

伍小杰（中国矿业大学）

肖登明（上海交通大学）

肖立业（中国科学院电工研究所）

熊小伏（重庆大学）

袁 越（河海大学）

张 波（华南理工大学）

张潮海（国网电力科学研究院）

张承慧（山东大学）

张道农（华北电力设计院有限公司）

张晓星（武汉大学）

赵争鸣（清华大学）

前 言

在我国政府大力推行《中国制造 2025》国家战略的当下，以电动汽车、机器人、无人机、高精度机床为代表的智能制造产品取得了日新月异的发展。与此同时，控制电机及其系统作为这四类智能制造产品的核心驱动部件也得到了相应的发展。

目前控制电机及其系统涉及电机本体的电磁设计技术、永磁材料的应用技术、自动控制理论应用技术、电磁兼容适用性技术、低不确定度和高精度的测试技术等核心技术。由于对电磁兼容认识上的不足，一些工程师在控制电机及其系统“源设计”时并未过多考虑电磁兼容的问题，因此目前市面上存在着一定数量的控制电机的电磁兼容指标不满足相应标准的要求。

通常情况下，电机电磁设计、控制理论、电磁兼容分属不同的学科，由于学科之间存在一定的差别，目前整体掌握控制电机及其系统五个核心技术的工程师少之又少。

为了解决这个现实问题，本书试图从控制电机的基础理论、电磁兼容的基础、试验方法、测试标准、电磁兼容抑制技术等角度对控制电机及其系统的电磁兼容问题进行阐述，以供高校的老师和学生、企业及检测认证机构的工程人员参考。

本书分为四个部分，第一部分为控制电机及其系统的基础知识，重点阐述这类电机及其系统涉及的电磁兼容的问题；第二部分和第三部分为电磁兼容基础和电磁兼容测试，重点阐述电磁兼容标准、测试设备、测试方法、标准的适用性等问题；第四部分为电磁兼容性抑制技术，重点阐述电磁兼容性抑制原理、提高产品抗电磁兼容性的元器件、电磁兼容超标的改进策略、电磁兼容设计要点等问题。

本书由熊端锋、罗建统筹，负责全书的整体策划、设计和协调；上海大学“千人计划”获得者罗建教授负责全书的审核，哈兆检测技术（上海）有限公司的熊端锋高级工程师负责全书的统稿；参与编写人员根据各自专长分工协作，共同编著完成。本书编写人员包括熊端锋、罗建、唐名钟、金实斌、洪颖、安伟、张颖、柳毛继和代颖。

在本书的编写过程中，得到了哈兆检测技术（上海）有限公司、南京出入境检验检疫局/江苏扬子检验认证有限公司、唐为（上海）电机制造有限公司、首策科技（上海）有限公司、上海麦巨电力电子有限公司、温岭市产品质量监督检验所全体员工的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

目 录

出版说明

《电气工程新技术丛书》编委会

前言

第一部分 控制电机基础

第 1 章 控制电机基础	3
1.1 控制电机的定义与分类	3
1.2 控制电机的技术概况	4
1.3 常见控制电机原理	5
1.3.1 伺服电动机	5
1.3.2 步进电动机	8
1.3.3 直线电动机	11
1.3.4 开关磁阻电动机	13
1.3.5 磁滞电动机	14
1.3.6 旋转变压器	15
1.3.7 超声波电动机	17
1.3.8 自整角机	18
1.3.9 无刷直流电动机	19
1.3.10 电动汽车驱动电动机	20
1.4 控制电机标准体系概况	22
1.5 控制电机电磁兼容技术概况	24

第二部分 电磁兼容基础

第 2 章 电磁兼容基础	29
2.1 电磁兼容的基本概念	29
2.2 电磁兼容的研究领域	30
2.3 电磁干扰的危害	31
2.4 电磁骚扰的分类	31

2.5	电磁骚扰的时域与频域	32
2.6	电磁骚扰发生的机理	34
2.6.1	放电现象	34
2.6.2	感性负载的瞬变	35
2.6.3	功率电子器件的瞬变	35
2.6.4	反射现象	36
2.7	电磁骚扰产生干扰的模式	37
2.8	电磁兼容的传播特性	38
2.9	电磁骚扰的耦合途径	39
2.10	电磁兼容标准化组织	44
2.11	电磁兼容标准体系	47
2.11.1	IEC 电磁兼容标准体系	47
2.11.2	电磁兼容标准	48
2.12	电磁兼容的测量单位	51
2.13	测量误差常识	52

第三部分 电磁兼容测试

第3章	电磁兼容测试基础	55
3.1	电磁兼容测试原理	55
3.1.1	辐射骚扰测试原理	56
3.1.2	传导骚扰测试原理	57
3.1.3	电磁场辐射抗扰度测试原理	58
3.1.4	射频场感应的传导骚扰抗扰度测试原理	58
3.1.5	骚扰功率测试原理	59
3.1.6	静电放电抗扰度测试原理	59
3.1.7	抗扰度测试原理	60
3.2	电磁兼容测试场地	61
3.3	电磁兼容测试场地确认	66
3.4	电磁兼容测试设备	71
3.5	电磁兼容实验室认可	81
第4章	电磁兼容的基础测试方法	85
4.1	控制电机电磁兼容测试项目概况	85

4.2	通用电磁骚扰发射和抗扰度要求	87
4.3	辐射骚扰测量试验	88
4.4	传导骚扰测量试验	88
4.5	谐波电流发射试验	89
4.6	电压波动和闪烁测量试验	90
4.7	静电放电抗扰度试验	92
4.8	射频电磁场辐射抗扰度试验	93
4.9	电快速瞬变脉冲群抗扰度试验	94
4.10	浪涌(冲击)抗扰度试验	96
4.11	射频场感应的传导骚扰抗扰度试验	98
4.12	电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验	100
4.13	工频磁场、脉冲磁场、阻尼振荡磁场抗扰度试验	102
4.14	振铃波抗扰度试验	104
4.15	汽车电子设备传导发射试验	106
4.16	汽车电子设备辐射发射试验	109
4.17	汽车电子设备辐射抗扰度试验	110
4.18	汽车电子产品传导耦合/瞬态抗扰度试验	112
4.19	道路车辆-电气及电子设备的环境条件和试验	118
4.20	断续骚扰和喀咧声试验	121
第5章	控制电机电磁兼容测试的适用性	124
5.1	工科医产品的电磁兼容测试	124
5.2	家用电器、电动工具产品的电磁兼容测试	127
5.3	汽车及汽车电子产品的电磁兼容测试	129
5.4	机器人和无人机产品的电磁兼容测试	131
5.5	军用产品的电磁兼容测试	132

第四部分 电磁兼容性抑制技术

第6章	电磁兼容性抑制原理	137
6.1	接地	137
6.1.1	参考接地	137
6.1.2	设备接地	139
6.2	屏蔽	141

6.3 滤波	144
第7章 提高产品抗电磁兼容性的元器件	152
7.1 专用线路	152
7.2 瞬变干扰吸收器件	154
7.3 滤波器	158
7.4 磁珠	158
7.5 隔离变压器	159
7.6 光耦	162
第8章 电磁兼容设计要点	164
8.1 控制电机电磁兼容设计的思路	164
8.2 印制电路板基础	169
8.3 印制电路板布局	171
8.4 印制电路板布线	175
8.5 印制电路板的电路设计	178
8.6 电缆线的选择、屏蔽和接地	181
8.7 连接器及接口电路的选择	184
8.8 控制器壳体的屏蔽	185
8.9 元器件排布及布线问题	189
参考文献	191

第一部分

控制电机基础

第 1 章 控制电机基础

1.1 控制电机的定义与分类

控制电机是指在自动控制系统中作状态监测、信号处理或伺服驱动等用途的各种电机、电机组件及其系统。

控制电机的种类较多，通常按其在控制系统中的作用不同，可分为信号控制电机和功率控制电机两类。

信号控制电机主要用于信号转换，比如将航向等角位移信号转换为电信号的同位器和旋转变压器、将转速信号转换成电信号的测速发电机等。这类信号控制电机在自动控制系统中主要作为敏感元器件、校正元器件、阻尼元器件和解算元器件使用。

功率控制电机主要用于将电信号转换成轴上的角位移或角速度、直线位移或线速度，从而带动控制对象运动。

控制电机包括伺服电动机、步进电动机、直线电动机、开关磁阻电动机、磁滞电动机、旋转变压器、超声波电动机、自整角机、无刷直流电动机、直流测速发电机、电动汽车电动机等。

伺服电动机是指应用于运动控制系统中的电动机，它的输出参数，如位置、速度、加速度或转矩是可控的；步进电动机是指一种多相同步电动机，它的定子绕组按一定程序励磁时，其转子按一定角位移（或直线位移）做增量运动；开关磁阻电动机是指采用定转子凸极且极数相接近的大步距磁阻式步进电动机的结构，根据转子位置信息，通过电子电路进行换相和/或电流控制的电动机；旋转变压器是指以可变耦合变压器原理工作的交流控制电机，它的二次侧输出电压与转子转角呈确定的函数关系；超声波电动机是指利用压电材料的逆压电效应，将电能转换成弹性体的超声振动，并通过摩擦传动的方式，将超声振动转换成转子运动的电动机。

与控制电机有关的术语主要有功率密度、转矩密度、峰值转矩、峰值电流、电气时间常数、热时间常数、机电时间常数等。控制电机的典型术语见表 1-1。

表 1-1 控制电机的典型术语

序号	术 语	定 义
1	控制电机	在自动控制系统中作状态监测、信号处理或伺服驱动等用途的各种电机、电机组件及其系统
2	功率密度	控制电机单位质量或单位体积的输出功率
3	转矩密度	控制电机单位质量或单位体积的输出转矩
4	旋转变压器	以可变耦合变压器原理工作的交流控制电机，它的二次侧输出电压与转子转角呈确定的函数关系
5	伺服电动机	应用于运动控制系统中的电动机，它的输出参数，如位置、速度、加速度或转矩是可控的
6	无槽电机	电枢铁心采用无齿槽结构，绕组置于电枢铁心表面的电机
7	步进电动机	一种多相同步电动机，它的定子绕组按一定程序励磁时，其转子按一定角位移（或直线位移）做增量运动
8	开关磁阻电动机	采用定转子凸极且极数相接近的大步距磁阻式步进电动机的结构，根据转子位置信息，通过电子电路进行换相和/或电流控制的电动机
9	摆动电动机	转子在一定角度范围内摆动的电动机
10	超声波电动机	利用压电材料的逆压电效应，将电能转换成弹性体的超声振动，并通过摩擦传动的方式，将超声振动转换成转子运动的电动机
11	伺服驱动器	用于伺服电动机的驱动器
12	峰值转矩	在规定条件下，电动机所能输出的最大转矩。在峰值转矩下短时工作不会引起电动机损坏或性能不可恢复
13	峰值电流	在规定条件下，电动机输出峰值转矩时的线电流值。该电流在电动机方波运行时为峰值，正弦波运行时为有效值，恒定直流供电时为直流电流值
14	电气时间常数	在阶跃输入电压和规定条件下，堵转电机使绕组电流达到其最终值的 63.2%所需时间
15	热时间常数	在恒定功耗和规定条件下，电机绕组温升达到其稳定值的 63.2%所需时间
16	机电时间常数	伺服电动机在空载和额定励磁条件下，加阶跃的额定控制电压，转速从零上升至空载转速的 63.2%所需时间
17	恒转矩	多速电动机的转速改变时，电动机的转矩接近恒定
18	恒功率	多速电动机的转速改变时，电动机的功率接近恒定

1.2 控制电机的技术概况

电磁理论、电工技术、电力电子技术、微电子技术及现代控制理论的快速发展促进了控制电机技术及产业的发展。总结控制电机的发展方向有如下六个方面。

- 1) 无刷化：无刷化电动机可克服传统有刷直流电动机的缺点，比如换向火花大、电磁干扰严重、寿命短、更换不方便等。
- 2) 极速化：为实现直接驱动、提高运行精度，需要速度极高或极低的电机。超声波电

动机等各种新型的电机被不断开发并得到日益广泛的应用。

3) 无级调速化: 变频技术和反馈技术的发展促进了电机控制学科的发展, 使得交流电机无级调速的实现变得相对容易和简单。

4) 伺服化: 机器人、机床和无人机行业的发展促进了电机伺服技术的进步。伺服电动机不仅仅实现电能与机械能之间的转换, 还用作机电信号的转换、检测放大、执行、解算或控制等, 在机电一体化设备中得到广泛的使用。

5) 机电一体化: 电机与后级的执行机构(各种机械、液压、气动装置等负载)整合形成机电一体化系统。机电一体化系统涵盖电机本体、计算机、控制器、功率变换器、传感器和控制技术等多个方面。

6) 智能化: 电机不仅提供动力, 还提供高精度和复杂的运动控制, 具备自适应、自学习、自保护、自存储和远程监控等功能。

控制电机技术包含电机本体的电磁设计技术、永磁材料的应用技术、自动控制理论的应用技术、电磁兼容的适用性技术、低不确定度和高精度的测试技术等核心技术。目前电磁设计技术、永磁材料的应用技术、自动控制理论的应用技术、低不确定度和高精度的测试技术较为成熟, 但电磁兼容的适用性技术普及及掌握的程度较低。未来一段时间, 如何确保控制电机的电磁指标满足相关标准的要求将是控制电机技术的一个发展趋势。

1.3 常见控制电机原理

1.3.1 伺服电动机

伺服系统理论是伺服电动机分析的基础。伺服系统是按照控制命令的要求, 对机械位移、机械角度、力、转矩或加速度等信号进行变换、调控和功率放大等处理的系统。电气伺服系统由伺服电动机、反馈装置、功率驱动装置和控制器四部分组成, 以电动机为执行元器件和控制元器件, 将电动机的机械参数作为控制对象的自动控制系统。伺服电动机是伺服系统的中心, 其性能决定着伺服系统的最终性能。伺服电动机及其系统如图 1-1 所示。

伺服电动机可实现高精度地控制速度和位置, 可将电压信号转化为转矩和转速控制信号, 进而实现电动机轴上的角位移或角速度输出。伺服电动机的转速受输入信号的控制能快速反应, 在自动控制系统中, 作为执行元件的伺服电动机具有机电时间常数小、线性度高、始动电压低等特性。

伺服电动机分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。

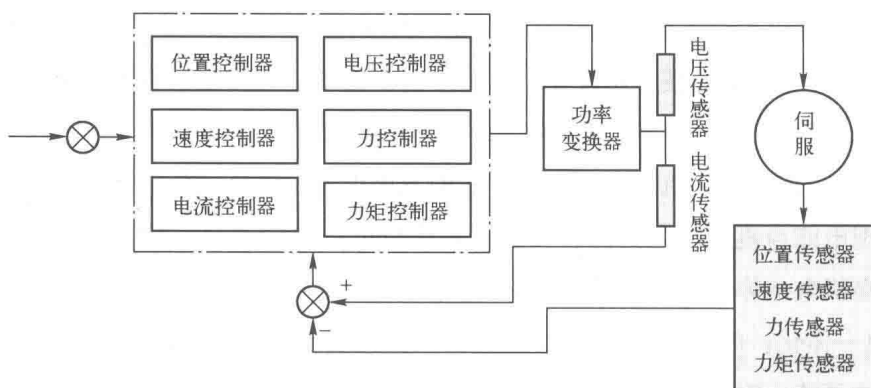


图 1-1 伺服电动机及其系统

按照电机结构，直流伺服电动机分为永磁式和电磁式两种基本结构类型，电磁式直流伺服电动机分为他励、串励、并励和复励四种；按照转子的型式，直流伺服电动机可分为常规电枢转子、空心杯形转子和无槽电枢直流伺服电动机；按照控制方式，直流伺服电动机可分为励磁电压控制和电枢电压控制方式。按照转子的结构型式，直流伺服电动机可分为有刷和无刷电动机，有刷电动机成本低，结构简单，起动转矩大，调速范围宽，控制容易，维护不方便，电磁干扰大，对环境有要求；无刷电动机体积小，重量轻，响应快，速度高，惯量小，转动平滑，力矩稳定。

按照电机结构，交流伺服电动机分为永磁式和电磁式两种基本结构类型。按照电气原理，交流伺服电动机可分为同步和异步电动机；按照转子的结构型式，交流伺服电动机可分为绕线型转子、笼型转子和非磁性空心杯转子交流伺服电动机；按照控制方式，交流伺服电动机可分为幅值控制、频率控制、相位和幅相控制交流伺服电动机。

伺服系统通过传感器将电动机的转速、转矩、位移等信号反馈至电动机的控制端，控制端通过功率变换器驱动伺服电动机，从而实现电动机的转速、转矩等信号的高精度控制。按照驱动的伺服电动机类型，分直流伺服电动机和交流伺服电动机来分析其工作原理。

不考虑伺服系统中的传感器、反馈装置和功率变换器，直流伺服电动机的电气原理与他励式直流电机相同，其电气原理如图 1-2 所示， U_f 为励磁电压， U_c 为控制电压。忽略电枢回路电阻的影响， $U_c = E_a = C_e n \Phi$ ，假设 U_f 恒定，则 $U_c \propto n$ ，当转速 n 上升时，通过“负反馈”使 U_c 下降，依据 $U_c = E_a = C_e n \Phi$ ，转速 n 随着 U_c 的下降而下降，该过程为直流伺服电动机实现转速高精度的控制过程。

交流伺服电动机定子的构造基本上与单相异步电动机相似，其电气原理如图 1-3 所示。其定子上装有两个位置互差 90° 的绕组，励磁绕组始终接在交流电压上；控制绕组连接着控制信号电压。当励磁绕组和控制绕组同时供电时，伺服电动机内部会产生椭圆形旋转磁场

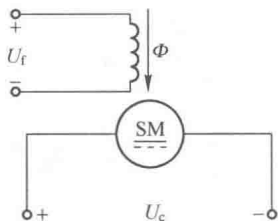


图 1-2 直流伺服电动机电气原理图

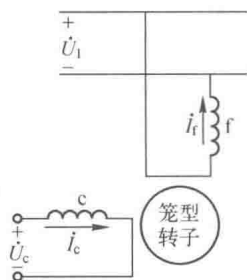


图 1-3 交流伺服电动机电气原理图

并使伺服电动机转动起来，从而实现机电能量交换。当励磁电压保持不变时，改变控制电压的大小，即可调节气隙磁动势的大小，从而实现调节电动机转速和转矩的目的。调节控制电压和励磁电压的相位，控制相位的“超前”或“滞后”即可控制伺服电动机的旋转方向。

电气伺服系统的基本结构由伺服电动机、反馈装置、功率驱动装置和控制器四部分组成，其中反馈装置包括电压传感器、电流传感器、光电编码器、磁编码器、霍尔位置传感器和温度传感器等，通常安装在伺服电动机的定子外壳或绕组中；功率驱动装置主要向伺服电动机提供主电路或控制电路所需的交流或直流驱动功率；控制器的作用是将反馈装置得到的信号经过比较、分析后输出控制信号，实现对功率驱动器的控制。通常情况下，功率驱动器和控制器集成为伺服驱动器。

直流伺服电动机与他励直流电动机的结构类似，由机座或外壳、定子铁心、定子绕组、转子铁心、转子绕组、换向器或无刷器件等器件构成；交流伺服电动机与单相异步电动机的结构类似，由机座或外壳、定子铁心、定子绕组和铸铝转子等器件构成。松下伺服电动机及伺服驱动器的外形图如图 1-4 所示。

直流伺服电动机的定子与他励直流电动机类似。交流伺服电动机的定子与单相异步电动机类似，励磁绕组和控制绕组嵌放至定子铁心中。转速、转矩和位移等传感器安装在定子上。

直流伺服电动机的转子与他励直流电动机类似。交流伺服电动机的转子通常做成鼠笼式。为使伺服电动机具有较宽的调速范围、线性的机械特性，无“自转”现象和快速响应