

# 航天机电

## 伺服系统

黄玉平 李建明 朱成林 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



# 航天机电

## 伺服系统

黄玉平 李建明 朱成林 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书系统、详细地介绍了航天机电伺服系统技术发展及各部件的关键技术。全书共分为9章。第1章介绍了航天伺服技术的特点,机电作动器技术发展情况及航天机电伺服系统的关键技术,论述了机电伺服系统中的新型伺服控制算法。第2章详细论述了航天伺服电动机的工作原理和结构特点。第3章对伺服电动机控制算法进行详细阐述,讨论了各控制方法的工作原理,推导了控制策略及控制算法数学模型。第4章介绍了机电伺服系统中常用传感器的特点、分类及工作原理。第5章详细论述了传动机构各种类型、结构形式、工作原理、结构参数计算方法和性能测试方法。第6章特别列举了现有国内外相关新型航天作动器专利,总结出了航天机电作动器研究方法。第7章主要就航天伺服用动力电源进行详细论述。第8章主要讲解了航天机电伺服系统总体设计技术。第9章针对机电伺服系统在军事及其他领域的应用情况进行列举。

本书的出版旨在帮助从事航天机电伺服系统设计和技术研究的读者更好地开展工作,并为从事机电伺服技术研究、设计、制造和教学的读者提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

航天机电伺服系统/黄玉平,李建明,朱成林编著. —北京:中国电力出版社,2013.11

ISBN 978-7-5123-4893-6

I. ①航… II. ①黄…②李…③朱… III. ①航天器-机电设备-伺服系统-研究 IV. ①V442

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第216013号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2013年11月第一版 2013年11月北京第一次印刷

700毫米×1000毫米 16开本 18印张 395千字

印数 0001—3000册 定价 58.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

航天机电伺服系统



## 本书编委会

黄玉平 李建明 朱成林 郑继贵  
郑再平 赵国平 肖 翀 王春明  
姜 涛 周寿明 仲 悦 徐祯祥  
宁 琦

## 前 言

机电伺服系统兴起于 20 世纪 30 年代，经历了曲折的发展过程后，于 20 世纪 80 年代重新崛起，在 21 世纪初得到迅速发展，现已成为伺服技术发展的主流，广泛应用于普通工业设备、生产制造装备和国防军事装备中。由于航天装备的特殊性，航天机电伺服系统对其体积、质量、可靠性、环境适应性的要求极为苛刻，客观上推动了机电伺服技术创新发展。

在航天机电伺服系统研制的工程实践中，产生了一系列具有自身鲜明特点的分析、设计理论和方法，有效地指导了机电伺服产品的研制，推动着机电伺服技术的发展。本书采用基础理论与工程技术相结合的方法，力求对航天机电伺服系统的技术基础、分析与设计方法、未来发展等做一个全面、系统的介绍，以帮助从事航天机电伺服系统设计和技术研究的读者更好地开展工作，并为从事机电伺服技术研究、设计、制造、教学的读者提供参考。

本书围绕航天机电伺服系统及现代机电伺服技术，系统、详细地介绍了航天机电伺服系统技术发展及各部件的关键技术。全书共为 9 章。第 1 章介绍了航天伺服技术的特点，机电作动器技术发展情况及航天机电伺服系统的关键技术，论述了机电伺服系统中的新型伺服控制算法。第 2 章就航天机电伺服系统的执行动力元件伺服电动机进行详细论述，航天伺服电动机包括直流伺服电动机、直流无刷电动机、永磁同步电动机、交流感应电动机及具有高冗余特性的开关磁阻电动机，该章节介绍各种伺服电动机的工作原理及结构特点，分别构建了伺服电动机电气、动力学及机电数学模型。第 3 章在前章节伺服电动机论述的基础上，针对各种伺服电动机对伺服电动机控制算法进行详细阐述，包括直流伺服电动机 PWM 控制、交流伺服电动机矢量控制和直接转矩控制、永磁同步伺服电动机电压空间矢量控制技术，讨论了各控制方法的工作原理，推导了控制策略及控制算法数学模型。第 4 章介绍了机电伺服系统中常用的传感器，详细论述了电流传感器、电压传感器、电机转子位置传感器、位移传感器及加速度传感器的特点、分类及工作原理。第 5 章对航天机电伺服系统中传动机构进行讨论，详细论述了传动机构各种类型、结构形式及工作原理，归纳了传动机构结构参数的计算方法，同时介绍了传动机构的性能测试方法。第 6 章论述了航天机电伺服作动器技术，特别列举了现有国内外相关新型航天作动器专利，总结出了航天机电作动器研究

方法。由于航天机电伺服系统采用的是有限能源供应系统。第7章主要就航天伺服用动力电源进行详细论述，分析了航天伺服动力电源的特性，介绍了现有的化学电源及新型弹载电源技术。第8章就航天机电伺服系统总体设计技术进行论述，分析了机电伺服系统中负载特性和系统参数。第9章针对机电伺服系统在军事及其他领域的应用情况进行列举。

全书由中国运载火箭技术研究院北京精密机电控制设备研究所编写。北京精密机电控制设备研究所充分发挥了航天机电伺服专业的技术优势和机电一体化的机制优势，组织长期专业从事电气控制、伺服机构设计、空间电源管理、总体设计等众多技术人员，在充分讨论、分析、总结及全面深化的基础上，从航天机电伺服系统中各单元部件到总体设计，进行逐层次论述，由北京精密机电控制设备研究所各技术组讨论后定稿。

在本书的编写过程中，得到了中国航天科技集团公司、中国运载火箭技术研究院本部、北京精密机电控制设备研究所专家组的帮助；哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学及南京理工大学的同行专家对本书提出了宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中如有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 航天机电伺服概况 .....	1
1.2 机电伺服技术发展 .....	2
1.3 航天机电伺服作动器 .....	4
1.4 航天机电伺服的关键技术 .....	5
1.4.1 伺服电动机技术 .....	5
1.4.2 驱动控制技术 .....	7
1.4.3 机械传动技术 .....	8
1.4.4 可靠性技术 .....	9
1.5 机电伺服系统控制算法 .....	12
<b>第 2 章 伺服电动机</b> .....	18
2.1 直流伺服电动机 .....	18
2.1.1 电动机基本结构与分类 .....	18
2.1.2 直流伺服电动机特点 .....	19
2.1.3 基本原理与构成 .....	19
2.1.4 直流伺服电动机数学模型 .....	20
2.1.4.1 起动机特性 .....	21
2.1.4.2 调速特性 .....	21
2.1.4.3 制动特性 .....	22
2.2 无刷直流伺服电动机 .....	22
2.2.1 无刷直流电动机本体组成 .....	22
2.2.2 无刷直流电动机转子位置检测装置 .....	24
2.2.3 功率电子驱动装置 .....	24
2.2.4 无刷直流电动机工作原理 .....	25
2.2.5 无刷直流电动机数学模型 .....	25

2.2.6	永磁无刷电动机的 PWM 调速控制 .....	26
2.3	永磁同步伺服电动机 .....	29
2.3.1	永磁同步电动机基本结构 .....	29
2.3.2	永磁同步电动机的数学模型 .....	31
2.3.2.1	永磁同步电动机基本电压方程 .....	31
2.3.2.2	CLARK 变换原理 .....	32
2.3.2.3	PARK 变换原理 .....	33
2.3.2.4	坐标变换后的永磁同步电动机数学模型 .....	33
2.3.3	永磁同步电动机的设计方法 .....	34
2.3.3.1	主要尺寸和气隙长度选择 .....	34
2.3.3.2	定子设计原则 .....	35
2.3.3.3	转子磁路与永磁体尺寸的确定 .....	35
2.3.4	永磁同步电动机的特点与应用 .....	36
2.4	交流感应电动机 .....	37
2.4.1	交流感应电动机结构 .....	38
2.4.2	感应电动机工作原理 .....	40
2.4.3	交流感应电动机机械特性 .....	40
2.4.4	感应电动机数学模型 .....	41
2.5	开关磁阻电动机 .....	45
2.5.1	开关磁阻电动机结构 .....	45
2.5.2	开关磁阻工作原理 .....	49
2.5.3	开关磁阻电动机特点 .....	50
2.5.4	开关磁阻电动机数学模型 .....	52
2.5.4.1	电路方程 .....	52
2.5.4.2	机械方程 .....	52
2.5.4.3	机电联系方程 .....	53
2.6	直线电动机 .....	54
2.6.1	直线电动机的基本原理 .....	55
2.6.2	直线电动机的分类 .....	56
2.6.3	圆筒型直线电动机的特点与应用 .....	56
<b>第 3 章</b>	<b>伺服电动机驱动技术 .....</b>	<b>58</b>
3.1	PWM 控制技术 .....	58
3.1.1	PWM 基本原理 .....	58
3.1.2	PWM 的理论基础 .....	59
3.1.3	直流电动机的 PWM 控制技术 .....	60
3.2	矢量控制技术 .....	60
3.2.1	矢量控制变换的思路 .....	61



3.2.2	按转子磁场定向的矢量控制的实现 .....	62
3.2.3	正弦波脉宽调制技术 .....	64
3.3	电压空间矢量控制技术 .....	65
3.3.1	逆变器调制方式比较 .....	65
3.3.2	SVPWM 调制方式算法原理 .....	65
3.3.2.1	空间电压矢量与磁链矢量的关系 .....	65
3.3.2.2	SVPWM 算法分析 .....	68
3.3.3	永磁同步电动机的电压空间矢量控制 .....	70
3.4	直接转矩控制 .....	70
3.4.1	电压型逆变器的模型 .....	72
3.4.2	磁链轨迹的控制 .....	73
3.4.3	磁链轨迹区段的确定 .....	74
3.4.4	转矩控制 .....	75
3.4.4.1	直接转矩的开关矢量表 .....	76
3.4.4.2	直接转矩控制的基本结构 .....	76
3.4.5	感应电动机定子磁链和转矩的估算 .....	78
3.4.5.1	异步电动机定子磁链的估算 .....	78
3.4.5.2	异步电动机转矩的估计 .....	78
3.5	迭代学习控制方法 .....	78
3.5.1	开关磁阻电动机转矩脉动产生原因 .....	79
3.5.2	基于模型控制和迭代学习控制 .....	79
3.5.3	迭代学习控制过程和开环 PID 迭代学习控制 .....	80
3.5.4	开关磁阻电动机的迭代学习控制理论分析 .....	81
3.5.4.1	速度调节器设计 .....	82
3.5.4.2	转矩分配函数的设计 .....	84
3.5.4.3	电流控制器设计 .....	85
3.6	永磁同步式起动/发电机的最大转矩/电流控制 .....	87
<b>第 4 章</b>	<b>机电伺服系统传感器 .....</b>	<b>91</b>
4.1	电流传感器 .....	91
4.1.1	电流传感器组成与分类 .....	91
4.1.1.1	普通电流测量 .....	92
4.1.1.2	大电流测量 .....	92
4.1.1.3	微电流测量 .....	92
4.1.1.4	非正弦电流测量 .....	93
4.1.2	霍尔电流传感器工作原理 .....	93
4.1.2.1	磁平衡补偿 .....	94
4.1.2.2	温度影响 .....	95

4.1.2.3	不等位电动势影响 .....	96
4.1.3	电流互感器工作原理 .....	96
4.1.4	磁阻式电流传感器工作原理 .....	98
4.1.5	电阻式电流传感器 .....	99
4.1.6	电流传感器在电动机控制中的应用 .....	100
4.2	电压传感器 .....	103
4.2.1	电压传感器的分类和特点 .....	103
4.2.2	电磁式电压互感器工作原理 .....	104
4.2.3	电容式电压互感器的工作原理 .....	105
4.2.4	霍尔电压传感器 .....	106
4.2.4.1	磁平衡式电压传感器的工作原理 .....	107
4.2.4.2	磁调制式电压传感器的工作原理 .....	109
4.2.5	电压传感器在传动系统中的应用 .....	110
4.3	转子位置传感器 .....	111
4.3.1	光电编码器传感器 .....	111
4.3.1.1	增量式光电编码器 .....	112
4.3.1.2	绝对式光电编码器 .....	112
4.3.2	旋转变压器 .....	113
4.3.2.1	旋转变压器工作原理 .....	113
4.3.2.2	解码芯片结构与特点 .....	114
4.3.2.3	外围电路设计 .....	115
4.3.3	磁编码器 .....	118
4.3.3.1	磁编码器工作原理 .....	118
4.3.3.2	磁编码器设计 .....	119
4.3.4	编码器在伺服系统中的应用 .....	121
4.4	位移传感器 .....	123
4.4.1	位移传感器的分类 .....	124
4.4.2	光栅位移传感器的工作原理 .....	125
4.4.3	光学位移传感器的工作原理 .....	126
4.4.3.1	光学三角位移传感器 .....	127
4.4.3.2	光学编码尺位移传感器 .....	127
4.4.4	直线磁编码器 .....	128
4.5	加速度传感器 .....	129
4.5.1	压电式加速度传感器 .....	130
4.5.2	电容式加速度传感器 .....	130
<b>第五章</b>	<b>机电伺服传动机构</b> .....	<b>133</b>
5.1	概述 .....	133

5.2 谐波传动 .....	134
5.2.1 谐波齿轮传动原理 .....	134
5.2.2 谐波齿轮传动的传动比计算 .....	135
5.2.2.1 单级谐波齿轮传动 .....	135
5.2.2.2 双级谐波齿轮传动 .....	135
5.2.3 谐波传动主要构件的结构形式 .....	136
5.2.4 谐波齿轮传动的失效形式 .....	137
5.2.5 谐波齿轮传动的效率 .....	138
5.3 滚珠丝杠 .....	138
5.3.1 滚珠丝杠副的工作原理及结构形式 .....	139
5.3.1.1 滚珠丝杠副的工作原理 .....	139
5.3.1.2 滚珠丝杠副的结构形式 .....	139
5.3.1.3 滚珠丝杠副的主要几何尺寸 .....	143
5.3.2 滚珠丝杠副的承载能力 .....	144
5.3.2.1 滚珠丝杠副的额定动载荷 .....	144
5.3.2.2 滚珠丝杠副的静载荷 .....	144
5.3.2.3 滚珠丝杠副的刚度计算 .....	145
5.3.3 滚珠丝杠副的预紧 .....	147
5.3.3.1 滚珠丝杠副轴向间隙 .....	147
5.3.3.2 滚珠丝杠副预紧方式 .....	147
5.3.3.3 预紧力的确定 .....	149
5.3.3.4 预紧后摩擦力矩的计算 .....	150
5.3.4 滚珠丝杠副的驱动力矩及传动效率 .....	151
5.3.4.1 驱动力矩 .....	151
5.3.4.2 传动效率 .....	153
5.4 行星滚柱丝杠 .....	155
5.4.1 行星滚柱丝杠的工作原理与结构类型 .....	156
5.4.1.1 工作原理 .....	156
5.4.1.2 行星滚柱丝杠结构类型 .....	156
5.4.1.3 行星滚柱丝杠的特点 .....	158
5.4.2 行星滚柱丝杠的运动分析 .....	158
5.4.2.1 旋转运动分析 .....	159
5.4.2.2 轴向运动分析 .....	160
5.4.2.3 结论 .....	162
5.4.3 行星滚柱丝杠的尺寸参数 .....	163
5.4.3.1 螺旋部件的尺寸参数 .....	163
5.4.3.2 内齿圈和滚柱端齿轮计算 .....	164
5.5 传动机构性能测试 .....	165

5.5.1	承载能力和效率测试试验 .....	165
5.5.1.1	减速器的承载能力和传动效率测试试验 .....	165
5.5.1.2	螺旋副承载能力和效率测试试验 .....	168
5.5.2	传动精度测试试验 .....	168
5.5.2.1	减速器传动精度测试试验 .....	168
5.5.2.2	螺旋副传动精度检测 .....	170
<b>第 6 章</b>	<b>机电作动器 .....</b>	<b>172</b>
6.1	机电作动器分类 .....	172
6.2	机电作动器结构形式 .....	173
6.3	机电作动器国内相关专利 .....	177
6.4	机电作动器国际相关专利 .....	181
6.5	机电作动研究方法 .....	191
6.5.1	计算机辅助设计与分析 .....	191
6.5.2	控制系统软硬件设计 .....	192
6.5.3	机械传动件的选型设计 .....	192
6.5.3.1	驱动电动机的选择 .....	192
6.5.3.2	减速器的选型 .....	193
6.5.3.3	丝杠的选择 .....	194
6.5.4	可靠性研究方法 .....	195
6.6	机电作动器研究发展方向 .....	196
<b>第 7 章</b>	<b>伺服动力电源 .....</b>	<b>198</b>
7.1	机电伺服用电特性 .....	198
7.1.1	机电伺服电源的工作过程 .....	198
7.1.2	机电伺服系统的用电特性 .....	199
7.2	化学电源 .....	200
7.2.1	热电池 .....	200
7.2.1.1	热电池概述 .....	200
7.2.1.2	热电池工作原理 .....	201
7.2.1.3	热电池的结构 .....	201
7.2.1.4	热电池的特点 .....	202
7.2.1.5	热电池的使用和维护 .....	204
7.2.2	锌银电池 .....	205
7.2.2.1	锌银电池发展概况 .....	205
7.2.2.2	锌银电池工作原理 .....	206
7.2.2.3	锌银电池的结构 .....	206
7.2.2.4	锌银电池的特点 .....	208
7.2.2.5	锌银电池的使用和维护 .....	208

7.2.3	动力型锂离子电池 .....	209
7.2.3.1	动力型锂离子电池的工作原理 .....	209
7.2.3.2	锂离子电池的结构 .....	210
7.2.3.3	动力型锂离子电池应用于航天机电伺服系统要解决的关键技术 .....	210
7.3	弹载发电机 .....	211
7.3.1	涡轮发电机 .....	211
7.3.1.1	微型涡轮发动机特点及应用 .....	212
7.3.1.2	MTE 技术现状 .....	214
7.3.2	斯特林发电机 .....	216
7.3.2.1	斯特林发电机特点 .....	216
7.3.2.2	自由活塞式斯特林发电机工作原理 .....	217
7.3.2.3	斯特林发电机技术现状 .....	219
7.4	电源管理技术 .....	222
7.4.1	组合电源 .....	223
7.4.2	先进储能及功率调节技术 .....	223
7.4.3	快响应升压技术 .....	223
7.4.4	电源一体化技术 .....	224
7.4.5	再生电能的管理 .....	224
<b>第 8 章</b>	<b>航天机电伺服系统分析与设计 .....</b>	<b>226</b>
8.1	机电伺服系统设计需求 .....	226
8.1.1	结构与质量要求 .....	226
8.1.2	性能要求 .....	226
8.1.3	其他要求 .....	227
8.2	机电伺服系负载特性分析 .....	227
8.2.1	负载的种类和性质 .....	227
8.2.2	负载的计算 .....	228
8.3	机电伺服系统方案设计 .....	230
8.3.1	初步方案设计 .....	230
8.3.2	静态计算 .....	231
8.4	机电伺服系统参数设计和性能分析 .....	232
8.4.1	机电作动器行程设计 .....	232
8.4.2	减速比设计 .....	233
8.4.3	伺服电动机参数设计 .....	234
8.4.4	可靠性设计 .....	234
8.4.4.1	可靠性模型 .....	234
8.4.4.2	可靠性预计 .....	235

8.4.4.3	可靠性分配 .....	236
8.4.4.4	基于故障树法的可靠性分析 .....	236
8.5	机电伺服系统数学建模与仿真 .....	237
8.5.1	机电伺服系统数学建模 .....	237
8.5.2	机电伺服系统性能仿真 .....	239
<b>第9章</b>	<b>机电伺服技术应用 .....</b>	<b>241</b>
9.1	军事装备领域的应用 .....	241
9.1.1	无人驾驶飞机的应用 .....	241
9.1.2	战斗机副翼 .....	242
9.1.3	飞机水平安定面 .....	242
9.1.4	飞机飞行控制面 .....	243
9.1.5	飞机起落架 .....	243
9.1.6	飞机反推力装置 .....	245
9.1.7	飞机电刹车系统 .....	246
9.1.8	一次性飞行器 .....	249
9.1.9	导弹 .....	250
9.1.10	鱼雷 .....	251
9.2	其他领域的应用 .....	251
9.2.1	舰船消振 .....	251
9.2.2	倾斜列车控制 .....	253
9.2.3	车辆主动悬架 .....	254
9.2.4	六自由度列车驾驶运动平台 .....	256
9.2.5	高层建筑和高耸结构 .....	258
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>259</b>

## 概 论

## 1.1 航天机电伺服概况

机电伺服系统是航天器控制系统的主执行机构，其工作原理为：伺服控制器接收控制系统的指令，结合伺服系统内部状态、发动机喷管状态，生成机电作动器动作指令发送给伺服驱动器；伺服驱动器接收伺服控制器的机电作动器动作指令，结合伺服驱动器、机电作动器和伺服动力电源的状态，发出开关系列指令，通过开关阵列对电源进行调制，控制馈入伺服电动机的电能；位于机电作动器上的伺服电动机将电能转换为机械能，并产生具有指定特性（方向、大小、作用时间）的机械运动；位于机电作动器上的伺服传动机构与负载传动机构配合，将伺服电动机的机械运动转换为负载的机械运动，最终实现对负载进行伺服控制的功能要求。航天机电伺服系统是一类特殊的自动控制系统，其典型组成如图 1-1 所示。

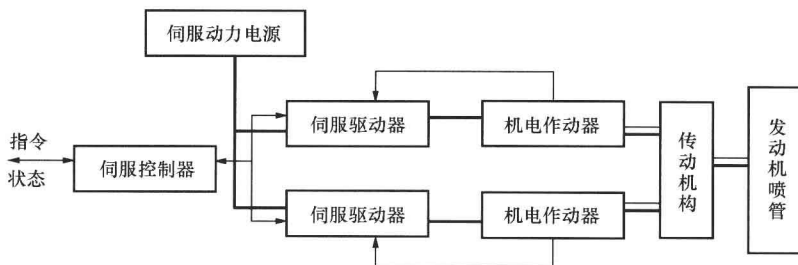


图 1-1 固体发动机推力矢量控制机电伺服系统组成图

对伺服系统的性能要求主要有：负载能力、控制精度、动态响应能力和尺寸、质量、环境适应性、可靠性、寿命等。由于航天器的特殊性，每一种航天器对伺服系统的要求都是不同的，即使是同一种航天器，当执行不同的任务时，甚至在同一次任务的不同阶段，对伺服系统性能的要求也是不同的。这些要求本身又有软、硬之分，其相互之间的关系更是错综复杂，因此，到目前为止，伺服系统的方案设计主要是一种艺术活动，而不是期望的工程科学过程。

与一般地面使用的军、民用伺服系统（如雷达天线伺服系统、地面发射装置伺服系统、冶炼设备伺服系统等）相比，航天伺服系统具有以下特点。

(1) 体积小、质量轻。航天伺服系统对其体积、质量的要求极为苛刻。因弹上可供伺服系统安装的空间有限，为充分发挥固体弹道导弹和其他航天器的运载能力，应尽

可能减轻其结构质量，要求元器件小型化、整机集成化，功率质量比要求相当高。

(2) 能源自备。固体弹道导弹或以固体助推器作为运载手段的航天器，不能为伺服系统提供能源，伺服系统必须自备能源装置。

(3) 高可靠性。由于固体弹道导弹是一次性使用的武器，发射之后伺服系统一旦发生故障是无法自行排除的。因此，和弹上其他产品一样，要求伺服系统必须具有高可靠性。

(4) 强环境适应能力。固体弹道导弹在起飞时推力上升很快，起飞加速度很大，起飞环境十分恶劣，伺服系统要经受发动机工作过程中产生的强烈振动、冲击、过载和高温等环境的考验。在运输、储存过程中还要经受高低温、潮湿和盐雾等作用，还应能承受核辐射的影响。因此，伺服系统必须进行环境设计，必要时采取抗核加固措施，与一般伺服系统相比，对环境适应能力的要求要高得多。

(5) 短时间工作。航天伺服系统工作时间都很短，在导弹飞行中各级伺服系统一般只工作几分钟便完成其使命。

(6) 高集成化。由于固体弹道导弹结构上的限制，结构设计都相当紧凑，弹上仪器设备安装得十分密集，要求伺服系统采取各种措施，将功能部件进行集成化设计。

## 1.2 机电伺服技术发展

伺服系统是以机械参数为控制对象的自动控制系统。在伺服系统中，输出量能够自动、快速、准确地跟随输入量的变化，因此又称之为随动系统或自动跟踪系统。伺服系统中机械参数主要包括位移、角度、力、转矩、速度和加速度等。

伺服技术是在 20 世纪 30 年代以高性能军事装备研制为牵引发展起来的，到第二次世界大战结束，已形成了完整的伺服机构分析和设计技术体系。这个时期的伺服机构主要是电动伺服机构，其典型应用是红石导弹的电动舵机。

20 世纪 50 年代，随着电液伺服阀的发明，航天伺服技术进入了液压伺服的时代。与当时的电动伺服机构相比，液压伺服驱动能力非常大、动态响应性能好、比功率高；但液压伺服系统组成复杂、工艺要求高、能源效率低、使用维护不便，一直是航天型号的关键技术，也是型号研制的短线。

20 世纪 70 年代起，随着微电子技术、电力电子技术、传感器技术、计算机技术、现代控制理论、稀土永磁材料的快速发展以及交流电动机结构及制造工艺水平的不断提高，给伺服系统带来了新的发展机遇。伺服系统由传统的步进伺服、直流伺服发展到以永磁无刷同步电动机、感应电动机、开关磁阻电动机等新型电动机为主的新一代交流伺服系统。其中交流伺服系统中最主要的两类伺服电动机：一种是由感应电动机构成的伺服系统，感应电动机具有结构坚固、高速运行、价格低廉、维护方便、适合大容量场合等优点；另一种是由永磁无刷电动机构成的伺服系统，永磁电动机的转子由永磁体代替励磁绕组，而且省去了集电环和电刷结构，它具有结构简单、体积小、质量小、效率高、气隙磁密高、功率因数高、转矩惯量比大、转矩电流比高以及可靠性高等优点。根据永磁无刷同步电动机电枢电流驱动波形不同，通常可以分为正弦波



供电的永磁同步电动机 (PMSM) 和方波供电的无刷直流电动机 (BLDC); 根据转子永磁体安装方式的不同, 永磁同步电动机又可分为表面式 (面装式)、嵌入式和内置式三种, 它们的转子结构如图 1-2 所示, 本文将重点研究表面式永磁体结构永磁同步电动机的交流伺服系统。

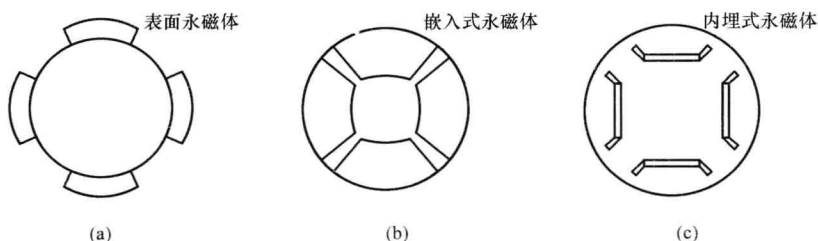


图 1-2 永磁同步电动机转子结构  
(a) 表面式结构; (b) 嵌入式结构; (c) 内置式结构

交流电动机系统是一个高阶、非线性、强耦合、多变量的系统, 运行过程中许多参数会发生变化, 因此它的动态数学模型非常复杂。矢量控制理论的提出和不断成熟, 极大地推动了交流伺服驱动技术的发展, 简化了交流电动机的数学模型, 将其数学模型等效为他励直流电动机数学模型, 分别控制  $d$  轴 (直轴) 和  $q$  轴 (交轴) 电流从而达到对电动机磁场和转矩的独立控制, 从而使交流电动机的调速控制性能可以和直流电动机相媲美。

永磁同步电动机与感应电动机相比较, 由于没有转子损耗, 因而具有更高的效率; 由于有较小的转动惯量, 因而动态响应速度快; 由于是转子表面永磁体产生气隙磁场, 因而电动机的功率因数高, 在同样的输出功率下, 所需要的整流器和逆变器的容量小, 降低了控制器的成本。在矢量控制方面, 永磁同步电动机的控制算法比感应电动机简单, 并且可靠性高。

由于永磁同步电动机的上述优点, 得到了伺服领域研究人员的青睐。目前伺服系统的控制器主要采用以微处理器为主, 变频驱动电路以智能化功率器件为主, 因而其控制方法可以灵活改变, 控制精度大大提高, 控制线路复杂程度降低, 并且变频驱动电路的通用性增强。特别是新的控制理论和控制策略的发展及智能控制的兴起和不断成熟, 加之计算机技术、微电子技术的迅猛发展, 使得许多先进的控制策略和基于传统控制理论的控制策略完美结合, 应用到了伺服系统中, 很好地克服了伺服系统模型存在参数变化和非线性等不确定因素的缺点, 提高了伺服系统的鲁棒性, 为伺服系统的实际应用奠定了坚实的基础。

自 20 世纪 80 年代以来, 国外一些著名的公司相继推出了交流伺服系统产品。20 世纪 90 年代后期, 由于数字信号处理器 (DSP) 技术的发展和采用全数字控制的永磁同步电动机伺服系统成功地实现了商品化, 如日本的 FANUC、安川、富士通、松下; 美国的 AB、科尔摩根公司以及德国的西门子公司、法国的 BBS 公司等都相继推出了交流伺服驱动产品。当时国内的研究相对落后, 从 20 世纪 90 年代开始, 华中理工大学