

Design of Servo Control
System for Advanced
Electromechanical
Equipment



高端机电装备

随动控制系统设计

胡 健 姚建勇 著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

Design of Servo Control
System for Advanced
Electromechanical
Equipment



高端机电装备

随动控制系统设计

胡 健 姚建勇 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书结合作者团队近年来在高端机电装备随动控制领域的研究成果,以火箭炮这一典型机电装备为对象,就高端机电装备随动控制技术进行了系统的阐述和讨论,主要内容包括:火箭炮随动系统组成、工作原理和发展趋势,火箭炮随动系统结构方案设计,火箭炮随动系统信息源,火箭炮随动系统经典控制策略设计,火箭炮随动系统自抗扰控制策略设计,火箭炮随动系统自适应鲁棒控制策略设计,火箭炮随动系统滑模控制策略设计,火箭炮随动系统智能控制策略设计,火箭炮随动系统通信方式,火箭炮随动控制器软硬件设计以及火箭炮随动控制系统实验等内容。

本书可作为机械电子工程、武器系统与工程相关专业方向的高年级本科生和研究生教材,也可供从事火箭炮随动系统领域技术管理、科研、生产的人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

高端机电装备随动控制系统设计 / 胡健, 姚建勇著
—北京: 北京理工大学出版社, 2022. 3
ISBN 978-7-5763-1138-9

I. ①高… II. ①胡… ②姚… III. ①机电设备-随
动系统-系统设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 042417 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)
(010)82562903(教材售后服务热线)
(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 17.5

字 数 / 408 千字

版 次 / 2022 年 3 月第 1 版 2022 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 刘亚男

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

高端机电装备通常由执行器（如伺服电机）、机械传动机构（如联轴器、减速器等）、负载、传感器（如旋转变压器、光电编码器等）和控制器组成，是一个典型的多变量、强耦合的非线性系统，同时具有较高的随动控制精度、可靠性和较强的鲁棒性。电机驱动的火箭炮随动系统是一类典型的高端机电装备，其通常由方位轴传动子系统和俯仰轴传动子系统组成，每个子系统均含有执行器、机械传动机构、负载、传感器和控制器等一套完整的机电元件。火箭炮具有较好的机动性，可以工作于各种地形情况下，如地势低平的平原盆地、波状起伏的丘陵，甚至道路崎岖的山岭等，因此其所处的工况较为复杂。其主要用于瞄准既定目标发射动能载荷，达到打击目标的目的，在军事领域有着广泛的应用，如用于防空反导，打击入侵目标等。如何提高火箭炮瞄准目标的快速性及准确性、降低动能载荷发射初始飞行扰动以及提高发射冲击载荷作用下系统的稳定性，一直是国内外学者研究的热点问题。要提高火箭炮随动系统上述综合性能所面临的挑战主要来自以下几个方面：（1）在发射动能载荷时，会产生强大的燃气流冲击力，对系统造成瞬时的强烈外部扰动，导致系统剧烈振动，从而严重影响系统控制精度及后续载荷的发射精度；（2）动能载荷发射过程中，会产生强大的热场从而导致系统的一些重要参数发生变化（如黏性摩擦系数、电气增益），此外系统转动惯量、不平衡力矩等重要参数也会发生显著改变，从而给系统的高性能控制带来较大的困难；（3）发射平台由方位回转机构和俯仰回转机构组成，当两套机构绕着各自的回转轴转动时，由于陀螺效应会对另外的回转机构产生陀螺力矩即干扰力矩，因此给系统的高精度控制又增添了新的难度；（4）火箭炮机械传动中往往存在着齿隙，齿隙的存在会给系统带来冲击，导致极限环震荡，大大影响系统的伺服性能，甚至造成系统不稳定；（5）火箭炮机械传动中还存在着摩擦非线性，摩擦非线性的存在会大大影响系统的低速伺服性能。因此针对上述问题，以火箭炮随动系统为对象，研究高端机电装备快速高精度响应的控制方法对于提高火箭炮随动系统及这一类的高端机电装备的动态性能与稳定性是具有极其重要的理论意义和实际应用价值的。

我们自 2007 年开始了高端机电装备随动控制技术的研究工作。早期

采用经典的 PID 加前馈控制策略，获得了满意的控制性能。但是随着工业及国防领域技术水平的不断进步，传统基于线性理论的三环控制方法由于不具备学习能力、不具备对系统结构变化的适应性，已逐渐不能满足高端机电装备随动系统的高性能需求。2010 年姚建勇教授前往美国普渡大学（Purdue University）进行访问研究，开展了基于模型的先进非线性控制理论与技术的研究工作，并得到国际知名非线性控制学者 Bin Yao 的指导和帮助。2013 年胡健副教授前往美国加州大学欧文分校（University of California-Irvine）进行访问研究，开展了智能控制理论与技术的研究工作，并得到了美国机电及气动伺服控制领域的著名专家 J. E. Bobrow 教授的指导与帮助。回国后，我们将非线性控制方法和智能控制方法应用到我们的火箭炮随动系统中，较好地提高了火箭炮随动系统的跟踪精度、稳定性和鲁棒性。

本书是作者在承担国家自然科学基金面上项目（No. 51975294）、中南大学高性能复杂制造国家重点实验室开放课题基金项目（No. Kfkt2019-11）、国家自然科学基金青年基金项目（No. 51505224）、江苏省自然科学基金青年基金项目（No. BK20150776）研究成果的基础上撰写的，也是作者近年来潜心学习和研究非线性控制、智能控制及在高端机电装备随动系统中应用技术研究成果的一个总结。

本书结合我们近年来在高端机电装备随动控制领域的研究成果，以火箭炮为对象，对高端机电装备随动控制技术各个方面进行了较系统的阐述和讨论。全书共 11 章，第 1 章主要介绍火箭发射技术的发展、火箭炮随动系统的组成和工作原理，以及火箭炮随动技术的发展与趋势；第 2 章主要介绍针对火箭炮主要战术指标，进行两轴火箭炮随动系统结构方案设计以及选择合适的电气设备的方法；第 3 章主要介绍常用的火箭炮随动系统信息源——光电编码器和旋转变压器的工作原理及应用；第 4 章主要介绍火箭炮随动系统经典控制策略设计方法；第 5 章主要介绍火箭炮随动系统自抗扰控制策略设计方法；第 6 章主要介绍火箭炮随动系统自适应鲁棒控制策略设计方法；第 7 章主要介绍火箭炮随动系统滑模控制策略设计方法；第 8 章主要介绍火箭炮随动系统智能控制策略设计方法；第 9 章主要介绍火箭炮随动系统通信方式；第 10 章主要介绍火箭炮随动控制器软硬件设计方法；第 11 章主要介绍基于 DSP 的火箭炮随动控制系统实验。本书适合作为机械电子工程、武器系统与工程专业方向高年级本科生和研究生的学习教材。

本书的第 1~5、8~9 章由胡健副教授撰写和统稿，第 6~7、10~11 章由姚建勇教授撰写和统稿，姚建勇教授对整本书进行了校对。在本书的撰写、编辑、修改和参考文献的整理过程中，作者的研究生陈伟、徐晨晨、赵杰彦、王俊龙、胡良军、曹萌萌、王海建、王泽鸣、宋秋雨、白艳春、沙英哲、杨正银、邢浩晨、王鹏飞、李曦、魏科鹏做了大量而具体的工作，作者对他们的辛勤工作表示衷心的感谢。同时感谢北京理工大学出版

社的邓雪飞编辑对本书出版所做的认真而细致的工作。

高端机电装备随动控制技术是一个多学科交叉的研究方向，其理论和应用均有许多问题尚待深入研究。由于作者水平有限，书中难免存在疏漏与不足之处，真诚欢迎读者、同行批评指正。

作者

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 火箭发射技术的发展	1
1.2 火箭炮随动系统简介	2
1.2.1 火箭炮随动系统的组成	3
1.2.2 火箭炮随动系统工作原理	3
1.3 火箭炮随动技术的发展与趋势	4
1.3.1 火箭炮随动控制技术的发展	4
1.3.2 火箭炮随动系统非线性补偿方法的发展	9
1.3.3 火箭炮随动技术的发展趋势	10
1.4 本书主要内容	11
参考文献	13
第 2 章 火箭炮随动控制系统总体设计	16
2.1 稳定性与闭环控制系统	16
2.2 火箭炮随动系统性能要求	17
2.2.1 控制精度	17
2.2.2 瞬态响应特性	18
2.2.3 灵敏度	18
2.2.4 抗干扰性	18
2.3 火箭炮随动转塔的结构设计	19
2.3.1 火箭炮随动系统总体结构	19
2.3.2 火箭炮随动系统方位回转传动机构	20
2.3.3 火箭炮随动系统俯仰回转传动机构	20
2.3.4 储运发射箱	21
2.3.5 方位、俯仰传动系统电机与减速器	21
2.4 火箭炮随动系统参数计算	22

2.5 火箭炮随动系统元器件选型·····	26
2.5.1 电机与减速器的选型·····	26
2.5.2 传感器的选型·····	30
2.6 本章小结·····	31
参考文献·····	31
第3章 火箭炮随动系统信息源 ·····	33
3.1 光电编码器·····	33
3.1.1 绝对式编码器·····	35
3.1.2 增量式编码器·····	35
3.2 旋转变压器·····	37
3.2.1 旋转变压器的工作原理·····	37
3.2.2 旋转变压器的信号采集与处理·····	38
3.2.3 旋转变压器的主要参数·····	40
3.3 本章小结·····	41
参考文献·····	42
第4章 火箭炮随动系统经典控制策略设计 ·····	43
4.1 基于传递函数的火箭炮随动系统数学模型·····	43
4.1.1 火箭炮方位与俯仰两轴系统运动方程·····	43
4.1.2 火箭炮执行器数学模型·····	45
4.1.3 火箭炮随动系统数学模型·····	56
4.2 火箭炮随动系统PID控制·····	57
4.2.1 PID控制原理·····	57
4.2.2 PID与前馈复合控制原理·····	58
4.2.3 火箭炮随动系统阶跃响应性能分析·····	60
4.2.4 火箭炮随动系统正弦响应性能分析·····	66
4.2.5 仿真分析·····	70
4.3 本章小结·····	73
参考文献·····	73
第5章 火箭炮随动系统自抗扰控制策略设计 ·····	75
5.1 自抗扰控制理论·····	75
5.1.1 抗扰范式·····	75
5.1.2 跟踪微分器·····	77
5.1.3 扩张状态观测器·····	78
5.1.4 自抗扰控制器组成·····	78
5.1.5 线性扩张状态观测器·····	80
5.1.6 稳定性分析·····	81

5.2 火箭炮随动系统自抗扰控制	87
5.2.1 简化模型的抗干扰控制器设计	88
5.2.2 惯性近似模型的控制器设计	89
5.2.3 反馈控制器 u_0 的设计	90
5.2.4 微分跟踪器设计	91
5.3 仿真分析	91
5.3.1 阶跃响应	92
5.3.2 斜坡跟踪	92
5.3.3 正弦跟踪	94
5.4 本章小结	95
参考文献	95
第6章 火箭炮随动系统自适应鲁棒控制策略设计	98
6.1 自适应鲁棒控制理论	98
6.1.1 问题描述	98
6.1.2 反馈线性化	99
6.1.3 自适应控制	100
6.1.4 鲁棒控制	100
6.1.5 自适应鲁棒控制	103
6.2 基于状态方程的火箭炮随动系统数学模型	113
6.2.1 火箭炮随动系统非线性数学模型	113
6.2.2 系统状态空间模型	113
6.3 火箭炮随动系统自适应鲁棒控制	114
6.3.1 自适应律的不连续映射	114
6.3.2 控制器设计	115
6.3.3 输出微分观测器	117
6.3.4 仿真结果与分析	117
6.4 基于线性扩张状态观测器的自适应鲁棒控制器设计	119
6.4.1 线性扩张状态观测器设计	121
6.4.2 控制器设计	121
6.4.3 仿真结果与分析	124
6.5 本章小结	130
参考文献	130
第7章 火箭炮随动系统滑模控制策略设计	133
7.1 滑模变结构控制理论	134
7.1.1 基本概念	134
7.1.2 滑模控制律	134
7.1.3 稳定性理论	136

7.2	火箭炮滑模变结构控制器设计	136
7.2.1	反推滑模控制器的设计	137
7.2.2	基于上界估计的反推滑模控制器设计	139
7.2.3	仿真分析	140
7.3	本章小结	145
	参考文献	145
第8章	火箭炮随动系统智能控制策略设计	147
8.1	神经网络理论基础	147
8.1.1	神经网络原理	148
8.1.2	神经网络学习算法	149
8.1.3	典型神经网络	151
8.2	基于神经网络在线调参的智能 PID 控制	155
8.2.1	控制器结构	155
8.2.2	仿真分析	158
8.3	基于神经网络的自适应鲁棒控制器设计	163
8.3.1	针对时变扰动的神经网络观测器设计	163
8.3.2	基于神经网络观测器的 ARC 控制器设计	165
8.3.3	稳定性分析	166
8.3.4	仿真分析	167
8.4	本章小结	174
	参考文献	174
第9章	火箭炮随动系统通信方式	176
9.1	串口通信	176
9.1.1	通信的基本概念	176
9.1.2	串口通信的工作方式	177
9.1.3	串口电路的连接方式	177
9.1.4	串口通信的数据格式	179
9.2	CAN 总线通信	181
9.2.1	CAN 总线的基本概念	181
9.2.2	CAN 总线协议概述	182
9.2.3	CAN 总线物理层	183
9.2.4	CAN 总线数据链路层	185
9.2.5	CAN 总线应用层	187
9.3	以太网通信	190
9.3.1	以太网技术	190
9.3.2	以太网工作原理	191
9.3.3	以太网物理层	193

9.3.4	以太网数据链路层	194
9.3.5	以太网网络层协议	195
9.3.6	以太网运输层协议	197
9.3.7	以太网应用层协议	201
9.4	本章小结	203
	参考文献	204
第 10 章	火箭炮随动控制器软硬件设计	205
10.1	控制器处理器简介	205
10.1.1	处理器内核结构	206
10.1.2	存储器结构	208
10.1.3	中断系统	211
10.2	软件开发环境与过程简介	213
10.2.1	了解 CCS6.0 的布局 and 结构	213
10.2.2	完整工程的构建	214
10.2.3	用 C 语言操作 DSP 的寄存器	217
10.2.4	寄存器文件的空间分配	221
10.3	基于 DSP 的随动控制器硬件设计	222
10.3.1	电源转换模块	223
10.3.2	DSP 最小系统电路	224
10.3.3	以太网通信模块	224
10.3.4	励磁电路模块	228
10.3.5	RDC 模块	230
10.3.6	CAN 总线通信模块	230
10.3.7	D/A 模块	233
10.3.8	串口通信电路设计	233
10.4	基于 DSP 的随动控制器软件设计	235
10.4.1	主程序设计	235
10.4.2	定时器中断程序设计	235
10.4.3	串口通信模块	237
10.4.4	CAN 中断模块	237
10.4.5	以太网通信模块	237
10.5	本章小结	241
	参考文献	241
第 11 章	基于 DSP 的火箭炮随动控制系统实验	243
11.1	实验系统介绍	243
11.2	随动控制器代码实现	244
11.2.1	数据结构定义	244

11.2.2	主程序设计	247
11.2.3	定时器中断服务程序设计	248
11.2.4	PID 控制程序设计	250
11.2.5	串口中断服务程序设计	250
11.2.6	DA 输出程序设计	252
11.3	实验结果	254
11.3.1	阶跃信号跟踪实验	254
11.3.2	系统斜坡响应特性分析	255
11.3.3	正弦信号跟踪实验	257
11.4	本章小结	258
附录	非线性控制理论基础	259
1.1	数学基础	259
1.2	非线性系统相关控制理论	262
1.3	反推控制方法	262
1.4	速度模式与转矩模式下随动系统数学模型等效性说明	264

第 1 章

绪 论

1.1 火箭发射技术的发展

火箭起源于中国，公元 969 年，北宋的岳义方用黑火药制成了火箭，成为世界上第一支以火药为动力的火箭^[1]，如图 1-1 所示。这种最早出现的火箭简称为火药箭，是在普通的箭杆上绑一个火药筒，发射时用引线点燃火药，火药燃气从火药筒尾部喷出，产生推力推动火箭前进。它以火药燃烧产生的燃气为动力，箭杆为弹体，箭头为战斗部，箭羽为稳定尾翼，虽然结构简单，但功能齐全，堪称现代火箭的雏形。我国明代初期发明了“架火战车”，其在人力独轮车上装有 6 个长方形箱体的火箭发射箱，像 6 个大蜂窝排列成上、下两排，共装有 160 支火箭，如图 1-2 所示。火箭预先装在发射箱内，所有火箭的引火线都连接在一起，形成引火总线^[2]。发射时，点燃引火总线，火箭犹如条条火龙，一起从发射箱内喷出，扑向敌阵。“架火战车”虽然简陋粗糙，但体轻灵活，使用和转移都很方便，可谓是现代多管火箭炮的雏形。

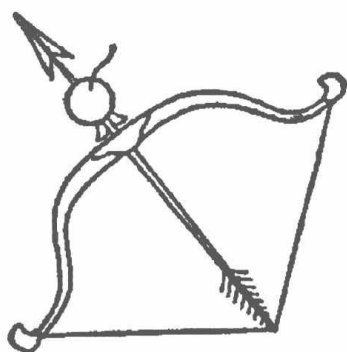


图 1-1 中国北宋的火药箭



图 1-2 中国明代的“架火战车”

1933 年，苏联制造出世界上最早的多管自行火箭武器 EM-13 火箭炮（“喀秋莎”），并在第二次世界大战战场上叱咤风云，成为主要的火力突击力量。在斯大林格勒保卫战中，“喀秋莎”为苏联最终赢得战斗胜利起了举足轻重的作用，引起各国的关注^[3]。第二次世界大战结束后的数十年中，东、西方两大阵营的长期对峙，使导弹、核武器等战略武器迅速发展，而火箭武器作为常规武器，其地位一度动摇。然而，进入 20 世纪 90 年代以来，随着

苏、美对抗结束，世界多极化格局的出现，人们意识到核战争没有打起来，局部战争却此起彼伏，常规武器受到重视。随着战争理论研究的发展并经计算机模拟验证，现代战争中战场上炮兵作战所产生的巨大威力，并不在于精确瞄准后一发一发地进行射击，而是在极短的时间内能向目标发射尽可能多的炮弹，使敌人无时、无处躲避。由于现代战场侦察设备性能不断提高，任何武器射击后都很可能被发现。保证安全的关键是武器自身能否迅速有效地转移，否则都将有被消灭的危险。在这种背景下，火箭武器结构简单、操作方便、成本低廉，能提供连续不断的火力的优点却突显出来。因此，不论是发达国家还是发展中国家，目前都在积极地研制火箭武器。

近年来，随着军事科学技术的发展，常规火箭武器性能也获得了较大提高，不仅由传统的陆基车载火箭武器发射系统发展到了机载、舰载火箭武器系统^[4]，而且由单纯的无控火箭武器系统发展到了简易控制的火箭武器系统。由于火箭炮不仅在技术上比火炮更容易实现发射末段制导子弹，而且火箭炮发射的火箭弹携带的子弹多、射程远，其散布更接近于末段制导子弹要求的母弹散布值的最佳值，因此有控火箭武器得到了快速的发展。同时由于多管火箭武器是一种能够提供大面积瞬时密集火力的有效武器，具有很高的火力密集度及机动性，可实现压制与精确打击的目的，符合在高新技术条件下局部战争的需要，且与导弹武器相比价格低廉、使用方便、维护简单，因此国内有专家提出将火箭武器用于防空反导的新设想，组成新的弹箭结合、箭炮结合或者弹箭炮结合等综合立体化防空武器系统^[5-8]。而要将火箭武器用于防空反导，就需要大大提高火箭武器的随动跟踪性能，包括响应的快速性、鲁棒性和跟踪精度，这样才能有效发挥火箭武器的威力，提高火箭武器防空反导的命中概率。

1.2 火箭炮随动系统简介

目前，世界各强国都有自己的火箭炮武器系列，比如美国 M270A1 火箭炮系统（见图 1-3），是美国在 20 世纪 80 年代研发的，除了能发射火箭弹还能发射 ATACMS 导弹；俄罗斯“龙卷风”系列火箭炮（见图 1-4），射程远，精度高；中国“卫士”系列火箭炮（见图 1-5），作战反应快、齐射威力猛、使用维护简单。随着火箭炮武器系统射程和精度的提高以及灵活性和机动性的进一步增强，火箭炮武器系统将是未来局部战场上精确压制武器的重要组成部分。



图 1-3 美国 M270A1 火箭炮



图 1-4 俄罗斯 S 模块化火箭炮



图 1-5 中国“卫士-2D”火箭炮

1.2.1 火箭炮随动系统的组成

火箭炮随动系统对火箭武器的命中概率有着重要的影响，是火箭炮的重要组成部分。通常火箭炮随动系统由俯仰和方位位置伺服系统两个子系统组成，每个子系统又通常由执行器、机械传动机构（如联轴器、减速器等）、负载（如转塔、挂架等）、传感器（如旋转变压器、光电编码器等）和控制器组成；具有接收指挥系统的目标指令，进行俯仰和方位自动调炮和目标跟踪的功能，同时具有接收指挥系统的发射指令进行发射的功能。

早期，火箭武器系统俯仰和方位位置伺服系统常采用液压执行器，但是由于其长期存在一些问题不易解决，包括漏油造成环境污染、噪声大、维护不方便、体积大等，目前随着电机技术的快速发展，正逐渐被电机执行器所取代。电机位置伺服系统可分为直流伺服系统和交流伺服系统两大类。随着电子技术的发展，直流伺服系统在 20 世纪 60 年代开始得到广泛应用，随后出现的大功率电力电子器件，使直流伺服系统在市场上占据了主导地位^[9]。但是直流伺服系统不能高速大转矩运行，需经常维护，而且存在退磁问题，到了 20 世纪 80 年代末交流伺服系统登上舞台，其执行器包括感应电机、永磁同步电机等交流电机，交流电机体积更小，效率更高，转矩也较直流电机大大增加，经过多年的发展，已经十分成熟并成为伺服领域的主流。

一个采用交流电机作为执行器的火箭炮随动系统组成原理框图如图 1-6 所示。其以交流伺服电机为执行元件，以工业控制机为伺服系统数字控制器，采用半闭环位置反馈控制结构，位置反馈采用旋转编码器作为角度传感器采集位置信息。

1.2.2 火箭炮随动系统工作原理

火箭炮随动系统用于控制火箭炮的俯仰角、方位角运动。火箭炮随动系统控制器接收到火控计算机或操纵手柄发送的俯仰角及方位角指令后，采集俯仰及方位位置传感器的信息，经过一定的控制算法，解算出相应的控制量发送给驱动器，驱动器带动执行电机驱动火箭炮机械本体进行运动，以使火箭炮发射架的俯仰角和方位角跟上火控计算机或操纵手柄的指令信息。火箭炮随动系统通常具有自动、半自动两种工作模式。在自动工作模式下，自动接收火控系统的指令，对目标进行自动跟踪，正确赋予射向；在半自动工作模式下，接收射手通

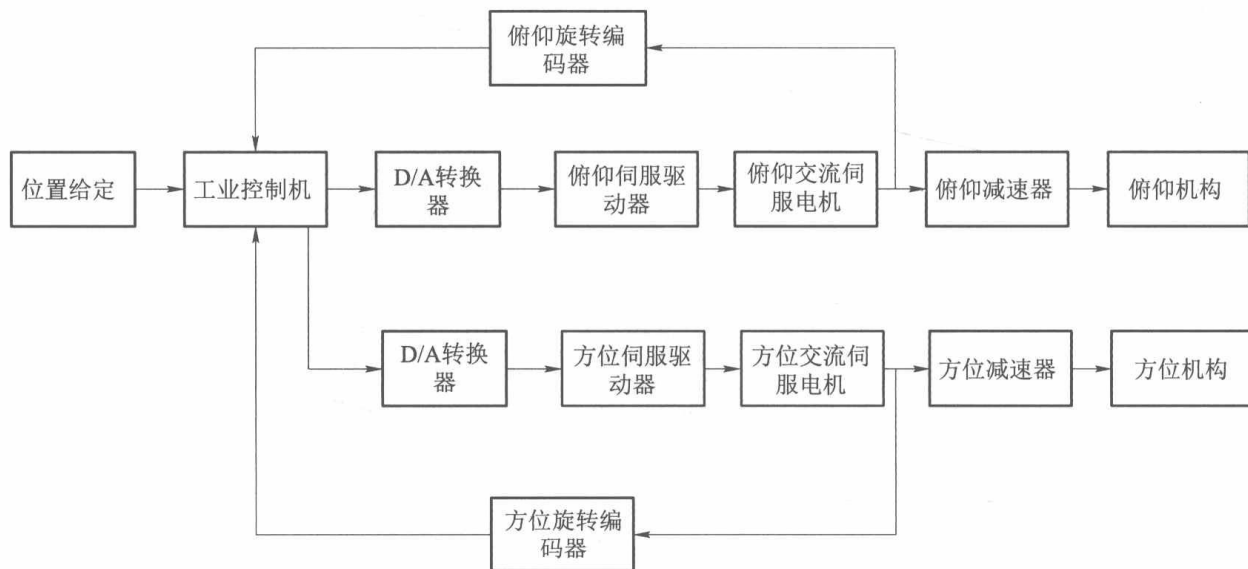


图 1-6 火箭炮随动系统原理图

过操纵手柄和操控台发出的调转指令，使火箭炮发射架按照操纵指令进行调转运动。

火箭炮随动系统是一个复杂的非线性系统，具有存在强耦合、强干扰、参数时变等显著特点。例如车载火箭炮，其本身和车悬架以及轮胎与地面共同组成了一个耦合系统，车辆行驶在颠簸的路面上时，火箭炮转塔会随着车体振动，对行进间射击的火箭炮发射造成一定的干扰；火箭弹发射时火箭弹发动机会产生高温高速燃气射流，沿弹飞出方向向后射出，作用在火箭炮发射转塔上，也会对火箭炮的发射造成较强的干扰；火箭炮在发射过程中，由于弹量的减小，整体质量会减少，质心会降低，因此会引起惯性力矩这一系统参数的变化。这些特点的存在都会给火箭炮随动系统的高精度运动控制带来不小的挑战。

1.3 火箭炮随动技术的发展与趋势

1.3.1 火箭炮随动控制技术的发展

火箭炮随动系统最初采用液压执行器，但是其长期存在一些问题不易解决，包括漏油造成环境污染、噪声大、维护不方便、体积大等。而近年来机电伺服控制技术发展迅速，由于机电伺服系统具有响应快、维护方便、传动效率高、污染小及能源获取方便等突出优点，在众多重要领域得到了广泛应用，并往往处于控制和动力传输的核心地位。正因如此，其也逐渐获得了火箭炮随动系统的青睐。目前基于经典三环控制的方法仍是采用电机作为执行器的火箭炮随动系统的主要控制方法，其以线性控制理论为基础，由内向外逐层设计电流环（力矩环）、速度环及位置环，各环路的控制策略大都采用 PID 校正及其变型。但是随着工业及国防领域技术水平的不断进步，传统基于线性理论三环控制方法由于不具备学习能力，不具备对系统结构变化的适应性，已逐渐不能满足火箭炮随动系统的高性能需求，成为限制火箭炮随动系统发展的瓶颈因素之一，迫切需要研究更加先进的控制方法。

近年来，随着信号处理技术、高速采集与计算和控制理论等基础学科的迅速发展，基于

