



阎耀保 著

高速气动控制 理论和应用技术

High Speed Pneumatic
Theory and Technology



上海科学技术出版社

上海科技专著出版资金资助出版

高速气动控制理论和应用技术

High Speed Pneumatic Theory and Technology

阎耀保 著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书系统地论述高速气动控制理论及其应用技术。主要内容包括气动控制元件和执行元件,新原理高速气动伺服阀,气动伺服系统,气动制冷与制热原理,超高压气动控制阀,极端环境下的气动元件特性,飞行器燃气涡轮泵电液能源与舵机系统,飞行器姿态控制气动原理,气动潜孔锤、气动液压打桩锤,燃料电池汽车输氢系统,海洋波浪发电气动原理与装置等。本书图文并茂,深入浅出,侧重系统性、专业性、前沿性,理论与实践紧密结合,国家重大工程应用实例丰富、翔实。

本书可供从事重大装备和武器系统用先进气动控制元件和装置的研究、设计、制造、试验和管理的科技人员阅读,也可供高等院校航空、航天、舰船、机械、能源、海洋、交通等专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速气动控制理论和应用技术 / 阎耀保著. —上海:
上海科学技术出版社, 2014. 1
ISBN 978 - 7 - 5478 - 2068 - 1

I. ①高… II. ①阎… III. ①气动技术 IV. ①TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 267009 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销
上海中华商务联合印刷有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 29.25 插页 4
字数: 700 千字
2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷
ISBN 978 - 7 - 5478 - 2068 - 1/TP · 24
定价: 130.00 元



此书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

前 言

气动伺服控制起源于第二次世界大战前后的导弹与火箭飞行体姿态控制燃气伺服系统。近 60 年来,欧美为开发宇宙空间,采用冷气或热燃气作工作介质进行火箭姿态控制、飞行器推力矢量控制。中国长征系列运载火箭姿态控制采用气瓶气源驱动气动涡轮和液压泵产生液压能源,导弹和大型运载火箭推力矢量控制采用整体集成式燃气涡轮泵机电液一体化能源装置。由于高温、高压、高速热燃气与超高压冷气技术可应用于武器系统,现阶段各国对航天高速气动控制理论和技术都实行严格的控制和封锁,公开报道极其少见。1960 年,美国 J. L. Shearer 以气动马达实验为基础,与他人合作撰写了第一本流体动力控制著作 *Fluid Power Control*。1963 年,日本焊接协会将气动系统应用于汽车车身点焊机,气动电磁阀、气动比例阀相继问世。1965 年,日本荒木献次将容腔和弹簧补偿用于气动伺服阀,出版了代表性的气动伺服机构著作 *Servo Mechanism*。1986 年,中国曲以义归纳国外文献的精华,编写了《气压伺服系统》。多年来,高温、高压、高速与高精度气动控制理论和技术已经被列为各国重点研究的课题,但公开资料和成果尚不多见。

针对气动学科高速气动控制基础理论极其缺乏的现状,作者结合多年来从事重大装备和武器系统研制过程中的实践成果,包括作者所承担的国防武器系统、国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家自然科学基金、国家科技支撑计划、航空基金、上海市浦江人才计划、国家合作项目的气动系列研究课题,系统、及时地凝练和总结了高速气动控制的前沿基础理论及其应用技术,特别是在航天、航空、工程机械、新能源汽车、自动化生产线等装备研究与开发过程中形成的基础理论和应用于重大工程的关键技术。本书共分为 14 章。第 1 章绪论,着重描述气动伺服控制起源、种类和特点,使读者可以了解历史、发展过程及气动控制的典型流量特性。第 2 章气动元件基础,介绍工作介质,气动控制阀和气动伺服阀的种类、特点和基本特性。第 3、4 章新原理高速气动伺服阀,包括双边对称气动伺服阀、双边非对称气动伺服阀、非对称液控阀、对称均等负重合型气动伺服阀、对称不均等负重合型气动伺服阀、气动伺服阀零位流动状态、非对称气动伺服阀控压力系统。第 5 章阐述气动伺服系统,涉及气动伺服系统及其工作点的补偿方法,阀控气动系统数学模型、实例。第 6、7 章介绍气动制冷

机理、气动制热机理,气动温度控制原理,超高压气动减压阀新结构、原理与设计方法,35 MPa 和 70 MPa 气动减压阀。第 8 章介绍气动执行元件、极端环境下的气动元件特性,涉及气缸和液压缸固有频率,气动马达特性,极端温度环境下蓄能器与气瓶气腔服役特性。第 9、10 章描述飞行器高温高速燃气涡轮泵电液能源系统,飞行器姿态控制气动原理,涉及飞行器燃气涡轮泵电液伺服控制技术,燃气发生器、燃气涡轮、电液能源组合,燃气涡轮电机液压泵电液能源系统,燃气舵机,飞行器姿态控制气动新方法与新原理等研究成果。第 11、12 章介绍气动潜孔锤和气动液压锤,包括大直径气动潜孔锤冲击器和钻头设计理论、方法和实例,高速气动液压复合锤及桩土解析模型。第 13、14 章气动前沿应用技术,包括燃料电池汽车输氢系统,振荡水柱式波浪发电气动原理与数学模型,振荡水柱式波浪能发电站应用实例。本书旨在为中国重大装备和武器系统的研究、设计、制造、试验和管理的技术人员提供有益的前沿性基础理论和实践材料,为探索气动学科高速气动控制领域目前未知的基础理论、技术途径或解决方案起到一定的促进作用。

本书为作者根据多年来在国内外的研究成果和实践经验系统地凝练、归纳而成,包括作者在同济大学、上海航天控制技术研究、日本国立埼玉大学期间的研究成果。全书由同济大学阎耀保教授主要撰写完成,其中第 1、3、4、6~10、13、14 章由阎耀保撰写;第 2、5 章由曲以义(上海交通大学)提供素材,阎耀保撰写;第 11、12 章由郭传新(北京建筑机械化研究院)、阎耀保撰写。本书在出版过程中得到了上海科学技术出版社、上海科技专著出版资金、同济大学教学改革研究与建设项目的大力支持和帮助。同济大学阎耀保教授研究室博士研究生李长明、王玉,硕士研究生陈昊,2009~2013 年硕士生协助进行资料整理工作。在此一并表示感谢。

本书作为同济大学博士研究生教材、硕士研究生教材已在教学中连续使用。限于作者水平,书中难免有不妥和错误之处,诚恳欢迎读者批评、指正。

作 者

目 录

第 1 章 绪论 / 1

1.1 概述 / 1

1.2 气动伺服控制系统 / 2

1.2.1 气动伺服系统的种类和应用 / 2

1.2.2 气动伺服系统的构成和特点 / 5

1.2.3 气动伺服系统与液压伺服系统的比较 / 5

1.3 气动控制阀 / 7

1.3.1 分类和结构 / 7

1.3.2 气动伺服阀 / 9

1.4 经过气动控制阀的质量流量特性 / 10

1.4.1 气体的状态方程 / 11

1.4.2 经过节流孔的流动 / 11

1.4.3 经过节流孔的气体的质量流量计算式 / 13

1.4.4 经过可变节流孔的气体的质量流量特性 / 14

第 2 章 气动元件基础 / 17

2.1 气动控制阀 / 17

2.1.1 气动控制阀的形式和特点 / 17

2.1.2 圆柱滑阀 / 18

2.1.3 喷嘴挡板阀 / 37

2.1.4 气动伺服系统中喷嘴挡板机构的动态特性 / 56

2.1.5 射流管气动伺服阀 / 64

2.2 气动伺服阀 / 68

2.2.1 气动伺服阀的结构与原理 / 68

2.2.2 带有弱弹簧补偿的力反馈气动伺服阀 / 69

2.2.3 不带弹簧补偿的力反馈气动伺服阀 / 83

2.2.4 采用弹簧、容器双补偿的力反馈气动伺服阀 / 84

2.2.5 具有补偿特性的力反馈气动伺服阀静特性 / 93

2.2.6 具有补偿特性的力反馈气动伺服阀的稳定区域 / 95

2.2.7 气动伺服阀的响应特性 / 103

第3章 双边气动伺服阀 / 108

- 3.1 概述 / 108
- 3.2 双边对称气动伺服阀 / 108
 - 3.2.1 具有不均等正开口量的双边滑阀式对称气动伺服阀结构 / 108
 - 3.2.2 双边滑阀式对称气动伺服阀数学模型 / 109
 - 3.2.3 双边滑阀式对称气动伺服阀基本特性 / 111
 - 3.2.4 结论 / 114
- 3.3 双边非对称气动伺服阀 / 114
 - 3.3.1 双边非对称气动伺服阀结构 / 114
 - 3.3.2 双边非对称气动伺服阀数学模型 / 116
 - 3.3.3 压力特性与泄漏量特性 / 118
 - 3.3.4 试验装置及事例 / 120
 - 3.3.5 结论 / 120
- 3.4 非对称液压阀 / 121
 - 3.4.1 零开口阀控非对称缸的数学模型与压力特性 / 121
 - 3.4.2 非对称阀控非对称缸液压系统速度增益特性 / 125
- 3.5 双边非对称气动伺服阀控气动压力控制系统 / 131
 - 3.5.1 非对称气动伺服阀控缸力控制系统 / 131
 - 3.5.2 非对称气动伺服阀基本特性 / 132
 - 3.5.3 数学模型 / 133
 - 3.5.4 气动压力控制系统基本特性 / 139
 - 3.5.5 结论 / 139

第4章 负重合型气动伺服阀 / 143

- 4.1 对称均等负重合型气动伺服阀零位特性 / 143
 - 4.1.1 数学模型 / 144
 - 4.1.2 控制口压力特性与节流口流动状态 / 145
 - 4.1.3 结论 / 147
- 4.2 对称负重合型气动伺服阀阀口可能的零位流动状态 / 148
 - 4.2.1 对称负重合型四通气动阀控缸气动系统 / 148
 - 4.2.2 数学模型 / 149
 - 4.2.3 各阀口可能的流动状态 / 151
 - 4.2.4 实验结果及其分析 / 155
 - 4.2.5 结论 / 155
- 4.3 对称不均等负重合型气动伺服阀 / 156
 - 4.3.1 数学模型 / 157
 - 4.3.2 理论压力特性与泄漏量特性 / 158
 - 4.3.3 应用实例 / 162
 - 4.3.4 结论 / 162

第 5 章 气动伺服系统 / 165

- 5.1 阀控型气动伺服系统 / 165
 - 5.1.1 开环阀控气马达系统 / 165
 - 5.1.2 带平衡小容器阀控型气动伺服系统 / 172
- 5.2 活塞偏离中心点位置工作的气动伺服系统 / 178
- 5.3 气动伺服系统的参数对其工作特性的影响 / 181
 - 5.3.1 黏性摩擦力对系统工作特性的影响 / 184
 - 5.3.2 初始工作压力对系统特性的影响 / 188
 - 5.3.3 负载质量的影响 / 188
- 5.4 计算例题 / 188

第 6 章 气动节流致冷和致热机理及气动温度控制 / 195

- 6.1 气动节流过程的致冷机理与致热机理 / 195
 - 6.1.1 气体致冷、致热的气动控制机理 / 195
 - 6.1.2 常温下氮气致冷、氢气致热的机理 / 198
 - 6.1.3 实例分析 / 201
 - 6.1.4 结论 / 202
- 6.2 气动温度控制原理 / 202
 - 6.2.1 氢能源汽车输氢系统 / 203
 - 6.2.2 气动绝热节流的温度控制模型 / 203
 - 6.2.3 气体节流过程的制冷与制热特性 / 205
 - 6.2.4 结论 / 207

第 7 章 超高压气动减压阀 / 209

- 7.1 超高压气动减压阀结构与原理 / 209
 - 7.1.1 功能 / 209
 - 7.1.2 结构和工作原理 / 210
 - 7.1.3 气动减压阀主要零件 / 210
- 7.2 基本特性及工作点 / 211
 - 7.2.1 静态特性 / 211
 - 7.2.2 动态特性 / 213
 - 7.2.3 设计方法 / 214
 - 7.2.4 小结 / 215
- 7.3 结构参数及其对静动态特性的影响 / 215
 - 7.3.1 结构参数 / 215
 - 7.3.2 结构参数对基本特性的影响 / 216
 - 7.3.3 小结 / 221
- 7.4 35~0.16 MPa 超高压气动减压阀流场分布规律 / 221
 - 7.4.1 车载两级高压气动减压阀 / 221
 - 7.4.2 流场分析模型 / 222
 - 7.4.3 流场分布规律 / 223

- 7.4.4 小结 / 225
- 7.5 70~0.16 MPa 超高压气动减压阀流场分布规律 / 225
 - 7.5.1 流场分析数学模型 / 226
 - 7.5.2 流场分布规律 / 228
 - 7.5.3 小结 / 230

第 8 章 气动执行元件、驱动元件与辅件 / 232

- 8.1 气缸和液压缸 / 232
 - 8.1.1 气缸和液压缸的分类 / 232
 - 8.1.2 气缸的固有频率 / 233
 - 8.1.3 液压缸的固有频率 / 236
 - 8.1.4 气动气缸系统和液压油缸系统比较 / 238
 - 8.1.5 结论 / 238
- 8.2 执行元件结构与特性 / 239
 - 8.2.1 气缸 / 239
 - 8.2.2 气动马达 / 252
- 8.3 极端温度环境下的飞行器液压蓄能器与气瓶 / 253
 - 8.3.1 极端温度环境 / 253
 - 8.3.2 真实气体的范德瓦耳斯方程 / 254
 - 8.3.3 高压气瓶充气质量 / 255
 - 8.3.4 高压气瓶和气腔的气体压力服役特性 / 256
 - 8.3.5 蓄能器服役特性 / 257
 - 8.3.6 结论 / 258

第 9 章 飞行器高温高速燃气涡轮泵电液能源系统 / 260

- 9.1 飞行器燃气涡轮泵电液伺服控制技术 / 260
 - 9.1.1 电液控制技术概要 / 260
 - 9.1.2 弹性 O 型圈密封技术 / 264
 - 9.1.3 飞行器电气液伺服技术特点 / 267
 - 9.1.4 防空导弹控制执行系统设计方法 / 274
 - 9.1.5 防空导弹辅助能源 / 286
 - 9.1.6 飞行器燃气涡轮泵液压能源应用技术 / 294
- 9.2 舵机系统功率匹配设计 / 297
 - 9.2.1 舵机系统负载模型 / 297
 - 9.2.2 伺服机构输出特性与负载轨迹最佳匹配 / 299
 - 9.2.3 实际舵机系统能源需求状况 / 300
 - 9.2.4 工作压力变化因素与系统频率特性 / 301
- 9.3 燃气发生器设计原理 / 301
 - 9.3.1 理论推导 / 302
 - 9.3.2 应用讨论 / 305
- 9.4 导弹用小型燃气涡轮机设计原理 / 309

- 9.4.1 导弹用小型燃气涡轮喷嘴中的热力学过程 / 309
- 9.4.2 导弹液压系统小型燃气涡轮效率 / 311
- 9.4.3 导弹用小型燃气涡轮盘应力的图解分析方法 / 314
- 9.5 电液能源组合起动特性 / 318
 - 9.5.1 EHPU 起动特性描述 / 318
 - 9.5.2 EHPU 理论建模 / 318
 - 9.5.3 液压系统的起动特性 / 320
 - 9.5.4 电源系统的起动特性 / 320

第 10 章 气动技术在飞行器姿态控制中的应用 / 324

- 10.1 飞行器气动姿态控制原理与姿态控制方法 / 324
 - 10.1.1 飞行器姿态控制新方法 with 原理 / 324
 - 10.1.2 姿态控制侧向力分析 / 325
 - 10.1.3 实验与分析 / 330
 - 10.1.4 结论 / 331
- 10.2 飞行器姿态控制用拉瓦尔喷管 / 332
 - 10.2.1 拉瓦尔喷管流场分析 / 332
 - 10.2.2 制造工艺技术 / 338
- 10.3 利用燃气发生器及喷嘴横向力发生改变导弹运动方向的装置 / 338
- 10.4 燃气舵机的工艺技术 / 339
 - 10.4.1 结构与工作原理 / 340
 - 10.4.2 多余物控制 / 340
 - 10.4.3 配合间隙控制 / 341
 - 10.4.4 壳体组件质量 / 342
 - 10.4.5 反应时间对称性问题技术攻关试验 / 342

第 11 章 气动潜孔锤 / 344

- 11.1 概述 / 344
- 11.2 气动潜孔锤原理与分类 / 346
 - 11.2.1 气动潜孔锤分类 / 346
 - 11.2.2 阀式气动潜孔锤原理 / 347
 - 11.2.3 无阀式气动潜孔锤 / 347
 - 11.2.4 大直径气动潜孔锤 / 348
- 11.3 大直径气动潜孔锤冲击器原理与参数设计 / 351
 - 11.3.1 设计要求 / 351
 - 11.3.2 总体结构 / 351
 - 11.3.3 工作参数选择 / 352
 - 11.3.4 性能参数的计算方法 / 353
 - 11.3.5 关键零件设计 / 357
- 11.4 大直径气动潜孔锤动力学过程与理论模型 / 360

- 11.4.1 大直径气动潜孔锤动力学过程 / 360
- 11.4.2 大直径气动潜孔锤理论模型 / 363
- 11.4.3 大直径气动潜孔锤数值计算 / 365
- 11.4.4 小结 / 370
- 11.5 大直径潜孔锤钻头设计与球齿布局 / 370
 - 11.5.1 冲击破岩过程 / 370
 - 11.5.2 大直径气动潜孔锤钻头边齿的力学模型 / 372
 - 11.5.3 大直径气动潜孔锤钻头布局原则 / 378
- 11.6 典型工程案例 / 382
 - 11.6.1 工程地块 / 382
 - 11.6.2 气动潜孔锤型号与参数 / 382
 - 11.6.3 施工工艺流程 / 384
 - 11.6.4 钻头使用情况与现象分析 / 385

第 12 章 气动液压打桩锤 / 389

- 12.1 气动液压复合打桩锤 / 389
 - 12.1.1 典型液压打桩锤液压系统 / 390
 - 12.1.2 打击频率与打击能量 / 392
 - 12.1.3 主要特点与参数 / 392
 - 12.1.4 结论 / 393
- 12.2 高速气动液压复合锤 / 393
 - 12.2.1 气动液压打桩锤液压系统 / 394
 - 12.2.2 打击能量 / 397
 - 12.2.3 气动液压打桩锤特性 / 398
 - 12.2.4 结论 / 399
- 12.3 高速气动液压复合锤数学模型 / 400
 - 12.3.1 概述 / 400
 - 12.3.2 数学模型 / 401
 - 12.3.3 气动液压复合打桩锤特性与实例 / 403
 - 12.3.4 结论 / 405
- 12.4 高速气动液压复合锤快速打桩过程 / 405
 - 12.4.1 快速打桩原理 / 405
 - 12.4.2 快速打桩下降阶段数学模型 / 406
 - 12.4.3 快速打桩影响因素 / 408
 - 12.4.4 结论 / 410
- 12.5 桩与土壤接触模型 / 410
 - 12.5.1 桩和土的有限元分析模型 / 410
 - 12.5.2 桩和土有限元求解结果 / 412
 - 12.5.3 结论 / 415

第 13 章 气动技术在燃料电池汽车中的应用 / 418

- 13.1 气动系统与燃料电池输氢系统 / 418
 - 13.1.1 概述 / 418
 - 13.1.2 航天氢能源技术及其应用 / 418
 - 13.1.3 燃料电池汽车碳纤维缠绕气瓶 / 421
 - 13.1.4 燃料电池汽车输氢系统 / 422
- 13.2 车载高压输氢系统气瓶输氢加氢特性 / 423
 - 13.2.1 车载输氢储氢系统特性 / 423
 - 13.2.2 车载气瓶输氢压力特性 / 427
 - 13.2.3 车载气瓶加氢压力特性 / 428
 - 13.2.4 试验结果 / 430
 - 13.2.5 结论 / 431

第 14 章 振荡水柱式波浪发电气动原理与装置 / 434

- 14.1 概述 / 434
- 14.2 基本结构与气动原理 / 434
- 14.3 振荡水柱数学模型 / 436
 - 14.3.1 空气室气动模型 / 437
 - 14.3.2 Mighty Whale 型能量转换器频率响应 / 439
 - 14.3.3 Mighty Whale 型能量转换器数值计算举例 / 441
 - 14.3.4 浮动型振荡水柱式波浪能量转换器特点 / 442
- 14.4 振荡水柱式波浪能量转换器试验技术 / 443
 - 14.4.1 试验模型 / 443
 - 14.4.2 数值分析 / 444
- 14.5 振荡水柱式电站应用实例 / 447
 - 14.5.1 国内振荡水柱式波浪发电实例 / 447
 - 14.5.2 国外振荡水柱式波浪发电实例 / 450
- 14.6 振荡水柱式波浪发电装置关键技术 / 455

第 1 章

绪 论

气动伺服控制起源于第二次世界大战前后,已经广泛应用于宇航、飞行器和一般工业领域。本章介绍气动伺服系统的背景、种类和特点,描述气动控制阀的分类和典型节流孔流量特性。

1.1 概述

气动伺服控制起源于第二次世界大战前后的导弹与火箭飞行体姿态控制燃气伺服系统,该系统采用燃气发生器、气动伺服阀和燃气马达组成燃气伺服系统。图 1.1 所示为飞行器燃气伺服系统推力矢量控制原理图。图 1.2 所示为飞行器姿态控制燃气伺服系统。飞行器采用高压气动自备能源装置的气动伺服控制技术难度大,可靠性要求高,一直是航空航天和深空探测中棘手的问题。近 50 年来,欧美为开发宇宙空间,采用冷气或热燃气工作介质的火箭姿态控制、飞行器推力向量控制的气动伺服机构。图 1.3 所示为中国自行研制的长征系列运载火箭姿态控制装置图。中国长征系列运载火箭姿态控制采用气瓶气源驱动气动涡轮和液压泵产生液压能源。极端环境下高压气体的储存和排放、控制以及可靠性问题尚未完全解决,气动高速与高精度控制已经被列为重要课题。现阶段各国对航天高速气动控制技术都严格控制、封锁,公开报道极其少见。

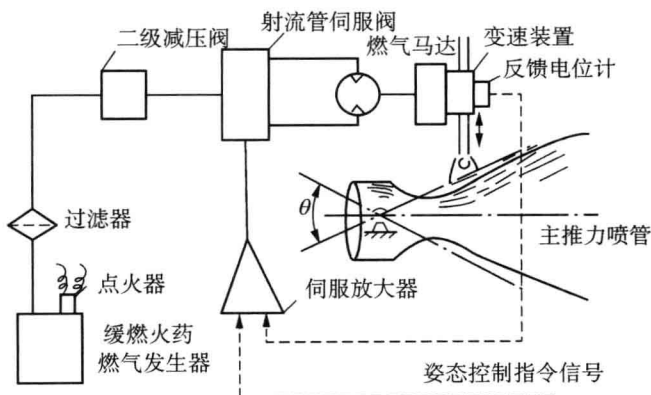


图 1.1 燃气伺服系统推力矢量控制原理图

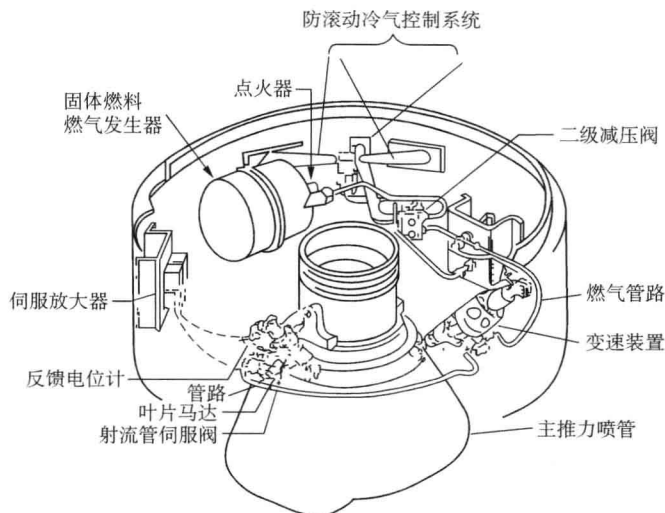


图 1.2 姿态控制燃气伺服系统

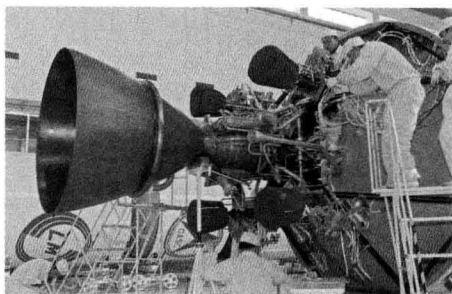


图 1.3 运载火箭姿态控制装置

气动技术的工业应用自 20 世纪 60 年代开始,伺服控制逐步替代响应缓慢的气动系统,形成了具有较高精度、较大功率和一定响应速度的气动控制技术。1963 年日本焊接协会将气动系统应用于汽车生产线的车身点焊机设备,气动电磁阀、气动比例阀相继问世。液压领域,1950 年美国 W. C. Moog 首次开发电液伺服阀以来,针对油液的压缩性和不对称油缸的结构,各地学者陆续研究高速高精度的现代流体控制方法。

随着科学技术的发展,自动控制技术已被广泛地应用于工农业生产和国防建设中,主要控制方式包括电气(电子)控制和流体动力控制等。流体动力控制可分为以下三类。

(1) 液压控制。工作流体主要是矿物油。近几年采用了一种高含水工作液体,还可用于伺服控制。

(2) 气动控制。工作介质主要是压缩空气,其次是燃气和蒸气,或其他压缩气体。

(3) 射流技术。工作介质有气体也有液体,该技术在一些多管道的生产流程中得到应用。

流体动力控制三大类中,包括射流技术、液压控制在各个工程技术领域中得到了迅速发展和广泛应用,气动控制应用于各种现代工业自动化生产线。

1.2 气动伺服控制系统

1.2.1 气动伺服系统的种类和应用

气动伺服系统和气动伺服机构,已经广泛地应用于汽车生产线、冶金、化工和食品等工业中一些多管道生产流程中的比例调节控制系统和程序控制系统。这类气动控制主要控制主流量阀的开启量,由于控制端的气体压力在 0.1 MPa 左右,而且频带很窄,只有 1~2 Hz,因此这是一种响应速度慢而平滑的气动伺服系统。通常所见有比例调节器、气动执行器及气动仪表所组成的比例调节系统。

1) 燃气伺服控制系统

导弹、火箭的姿态控制大多采用燃气作为工作介质的气动伺服系统,控制飞行体喷气发动机推力矢量从而控制飞行姿态。图 1.1 是控制飞行器主推力喷管方向的燃气伺服系统原理

图。图 1.2 表示飞行体姿态控制燃气伺服系统,在该系统内有一个内藏缓燃火药的燃气发生器,当燃气发生器内固体燃料点火燃烧后,获得的高压、高温燃气经二级减压阀减压到射流伺服阀的工作压力,通过如图 1.4 所示的燃气射流管伺服阀控制气流,驱动如图 1.5 所示的执行元件——膨胀型燃气叶片马达工作,改变主推力喷管的方向,完成飞行姿态控制。该燃气伺服系统的主要参数如下。

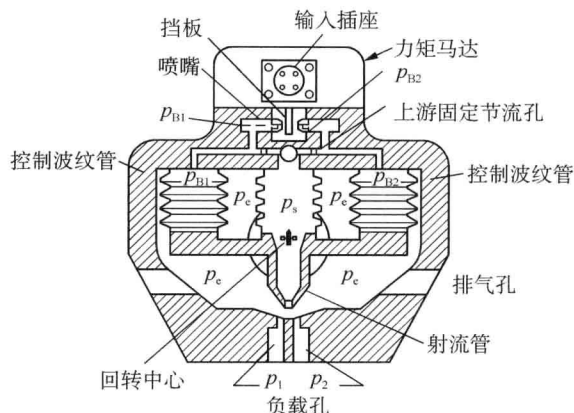


图 1.4 燃气射流管伺服阀构造原理图

p_s —供气压力; p_1, p_2 —负载压力; p_{B1}, p_{B2} —波纹管压力; p_c —排气压力

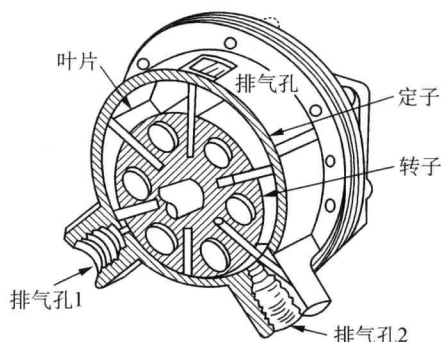


图 1.5 膨胀型燃气叶片马达构造原理图

燃气发生器内气体压力:13.6~13.8 MPa;

燃气温度:1065 °C;

燃气伺服阀工作压力:4 MPa;

推力喷管角位移输出:±8.25°,精度±0.1°,最大摆动速度 30°/s;

频带宽度:58 rad/s(8~10 Hz,如图 1.6 所示)。

高温高压燃气伺服控制系统,最适用于一次性、短时间内工作的飞行器装置。抗污染力强的喷嘴挡板控制的射流管阀能有效地防止固体火药产生的气体污染;另外考虑到导弹、火箭等飞行器携带的燃料质量受到严格限制,需选用耗气量小的膨胀型燃气叶片马达作为执行机构。

除了燃气以外,还有蒸气、冷高压气体作为工作介质的气动伺服系统。如弹道导弹防滚动控制系统,就是采用高压氮气作为工作介质的气动伺服控制系统。

2) 采用电子气动伺服系统的自动化生产线机械手

图 1.7 表示一种零部件自动供料气动伺服系统,它能按指令信号,当每取走一个零件后,依靠气动伺服控制系统控制零件外露的高度不变。通过气动伺服阀控制供料气缸活塞的位置,从而控制零件外露高度;通过电磁阀控制输送气缸和夹紧气缸的动作。

图 1.8 所示是一种汽车自动喷漆气动伺服控制系统应用实例。它表示自动喷涂的气动伺

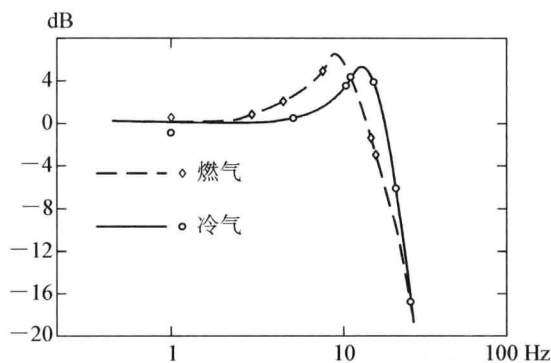


图 1.6 燃气伺服系统幅频特性

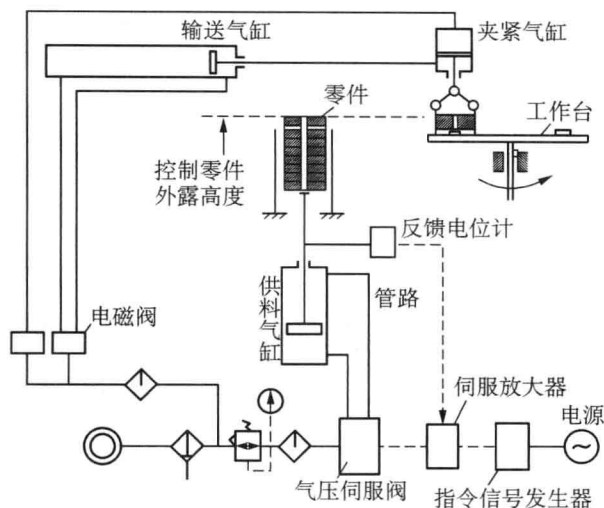


图 1.7 零部件自动供料气动伺服系统

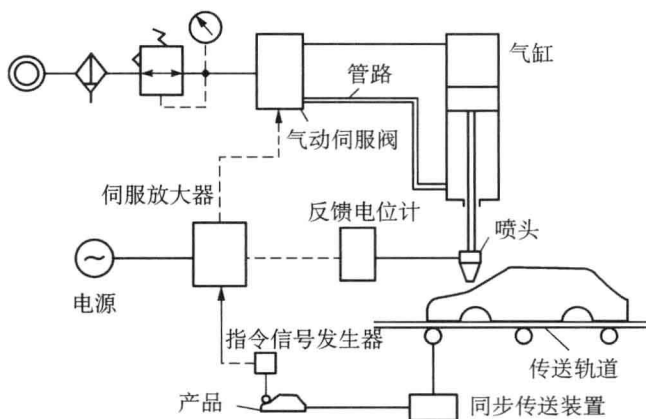


图 1.8 汽车自动喷漆气动伺服控制系统应用实例

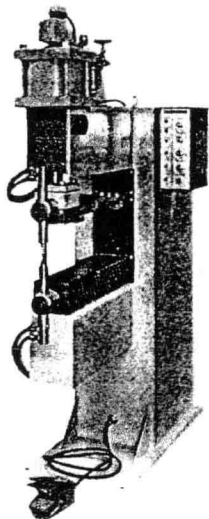


图 1.9 气动加压力的电焊机

服控制机械手原理,主要应用于工业机器人的手臂控制装置上。该工业机械手气缸活塞重复定位精度 $\pm 0.5\text{ mm}$ 。

汽车生产线常采用以压缩空气为工作介质的电气-气动伺服系统。低气压的气动伺服控制系统,除了作为机械手臂用于自动喷涂作业外,还可用于自动焊接、自动供料装置的机械手。图 1.9 所示为气动加压力点焊机。该装置广泛用于汽车生产线的车体焊接。从古代一直到 19 世纪末,广泛采用金属铆接方法。现在,工业上多采用气弧焊、氩弧焊、电阻熔接焊接等方法。点焊技术是电阻熔接焊接的一种有效方法。电阻熔接焊接方法和氩弧焊方法相比,生产工艺成熟,对于薄板焊接具有良好的生产性,广泛用于汽车、铁道车辆、飞机、各种钣金、家电、冷藏柜、洗衣机的制造过程,也广泛用于钢厂钢板、机械等工业领域。

气动系统工作压力: 0.5 MPa ;

焊接板厚: $0.4\sim 3.2\text{ mm}$;

电极直径:8 mm;

通电电流:5 000~20 000 A;

电极加压力:1.15~8.2 kN,加压上升时间 3 ms。

焊接电流及其波形、通电时间、电极加压力、电极形状及其尺寸等因素是点焊焊接的基本条件。其中,通电时间、焊接电流、电极加压力是点焊焊接的三大因素。电焊机多采用气缸控制加压力大小,通过气动伺服系统控制加压力时间和动态过程。日本焊接协会 1956 年首先通过点焊机发现了气缸控制过程中充气时间与排气时间的差异,以及气动伺服控制的非对称性,通过持续的基础理论和应用研究,形成了以荒木献次、香川利春为代表的日本气动学术界。

1.2.2 气动伺服系统的构成和特点

从前几节介绍的气动伺服系统应用实例,可以看出气动伺服系统的基本构成包括气动控制元件、气动执行元件(马达、气缸等)组成的驱动回路(也称为动力回路),还包括反馈电位计、伺服放大器、传感器等组成的信息反馈回路。

从能量传递和转换意义上看,气动伺服系统与气压传动一样,是一个通过工作介质进行能量调节、传递和转换的装置。因此,任何一个气动伺服系统,都可归纳为如下几个组成部分。

能量转换部件:气动马达、气缸也称气动动作筒;

能量调节部件:节流孔板、节流阀、气动滑阀、喷嘴挡板阀、射流管阀、减压阀等;

能量传递部件:管道及各种辅助元件,如滤清器等;

信息回路部件:各种检测元件、各种放大器以及传感器,如压力传感器、位移传感器、速度传感器等。

气动伺服系统的特点,可归纳为:

(1) 系统的工作介质为压缩性大的气体,结构简单的储气瓶或储气罐能储存较多气体能源。这种能源供应方式简单,非常适合用于空间要求严格和重量限制苛刻的场合,所以航天、舰船、重大装备的控制系统和自备能源装置大多采用气动控制系统。

(2) 气动系统没有回收管路,可做到体积小、成本低、操作方便和容易维护。

(3) 适合于那些温度高或温度场变化较大的环境或对防火、防爆等有严格要求的场合。另外,由于气体导热性差,温度变化率幅度大的环境,对气体的黏度影响只起次要作用,所以气动伺服系统的无因次阻尼系数值比较稳定。

(4) 由于气体压缩性大,本身具有良好的“柔软性”,方便适应一些自适应控制系统的要求。

1.2.3 气动伺服系统与液压伺服系统的比较

气动伺服控制系统与液压伺服控制系统相比较,两者在工作性能,介质在能量传输、调节和转换过程中的流动特性以及物理状态方面都存在着根本性的差异。归纳有以下几点:

(1) 因为气动伺服系统的气压动力回路或动力机构的无阻尼固有频率比液压系统固有频率低得多,因此气动系统容易发生低频振荡,气动系统的稳定性能较差。

(2) 气动伺服系统的输出刚度、响应速度以及效率比液压系统低。由于气体的黏性阻力系数小、润滑性差,运动部件之间容易发生库仑摩擦,配合部件之间的密封困难,泄漏量大。鉴于上述原因,气动伺服系统不太适用于功率大、外负载变化大的场合及位置控制精度要求严格的装置。但对于气动伺服控制系统而言,在气源充足的条件下,可选用中开式或者其他形式的正开口控制阀来增加系统回路的阻尼比值,改善系统的性能。

(3) 气动系统工作过程中,气流本身具有状态变化,因此气流在气缸的进排气通道、节流孔