

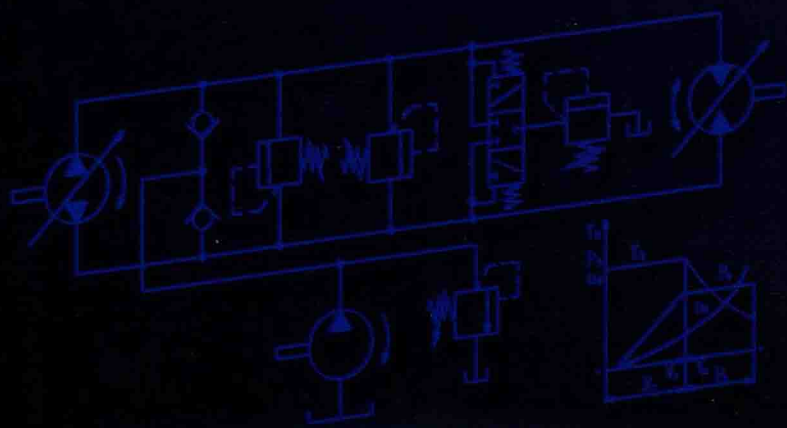
GONGCHENG JIXIE YEYA YU YELI CHUANDONG XITONG

工程机械

液压与液力传动系统

液 压 卷

初长祥 马文星 编著



化学工业出版社

GONGCHENG JIXIE YEYA YU YELI CHUANDONG XITONG

工程机械

液压与液力传动系统

液 压 卷

初长祥 马文星 编著



化学工业出版社

北京

《工程机械液压与液力传动系统》分为液压卷与液力卷。本书内容以工程机械为载体,密切关注液压与液力传动的典型系统组成与最新技术动向,在充分说明经典理论与应用的基础上,增加了很多最新的技术应用,如液压传动的负荷传感技术、液力传动的流动数值模拟与可视化等。液压卷包括基础知识、液压控制阀、液压回路、液压泵与执行元件、负荷传感液压系统及控制,以及典型工程机械液压系统与控制实例等。液力卷包括液力传动基础、液力变矩器与液力偶合器、液力元件设计、液力机械分流传动、液力传动装置、液力传动的试验等。作者根据多年教学、科研与工程实践的经验,使本书形成了严密完整的理论体系,对基本概念、典型元件、系统组成与应用都进行了深入阐述,思路清晰,言简意赅,易于读者理解。

本书可供液压、液力传动技术的科研人员、设计人员以及相关工程技术人员学习和参考。



图书在版编目(CIP)数据

工程机械液压与液力传动系统. 液压卷/初长祥,
马文星编著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 4
ISBN 978-7-122-23294-6

I. ①工… II. ①初…②马… III. ①工程机械-液压
传动系统 IV. ①TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 049708 号

责任编辑: 张兴辉
责任校对: 吴静

文字编辑: 陈喆
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装: 高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张21 字数560千字 2015年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 89.00 元

版权所有 违者必究

序

工程机械是国家基础建设的主要设备，广泛应用于矿山、公路、铁路、机场、水利、房地产以及其他公共设施的建设，特别是在重大工程施工中发挥着重要作用，如三峡工程、南水北调、高铁设施建设等。此外在核电、石油、化工、钢铁、风电、海洋工程等重大项目工程机械同样发挥着举足轻重的作用。工程机械行业是国民经济的支柱产业，是国家重大装备制造业，更是国家综合经济实力的象征。

改革开放以来，我国的工程机械行业得到了持续稳定的发展，产品品种不断增加，门类日渐齐全。我国研制的工程机械不但满足了国内绝大部分施工建设的要求，而且还大量出口到国外，特别是在欧美等发达国家也能看到中国制造的工程机械。

液压与液力传动是工程机械基础性技术，是各主机产业升级、技术进步的重要保障，是工程机械的核心技术之一。液压传动在工程机械中应用非常广泛，尤其是高性能液压元件以及为适应不同机型和工况所组成的高性能液压控制系统是工程机械稳定、高效运行必不可少的支撑。液力传动是工程机械行走系统最主要的传动形式之一，工程机械经常处于低速重载的工作状态，为了提高其对工作载荷的适应能力，大多采用液力传动。此外液力传动还在冶金、化工、石油、矿山、风电等领域有着非常广泛的应用，如液力耦合器在大型泵与风机中的调速节能，导叶可调液力变矩器与行星传动组成调速系统的风电变速恒频新技术等。

以欧美日为代表的工业发达国家和地区历来对液压传动技术非常重视，在工程机械液压与控制系统、高性能液压元件、新材料与新工艺等方面长期投入大量的研发资金，确保了其液压传动与控制技术领域处于世界领先地位。众所周知，液压技术是阻碍我国工程机械良性发展的主要瓶颈之一。我国液压零部件落后于欧美日等发达国家，主要表现在液压原理和技术的深度研究、液压元件的试验技术、液压元件的制造工艺、液压元件和系统与整机的匹配技术以及电子控制技术等多个环节。目前我国国有、民营和外资企业都在加大投入，因此有望在不久的将来从根本上解决我国本土液压件依靠进口的局面。工程机械液力传动的主要部件为液力变矩器，多年来经过各高校、科研院所和企业的合作研发，大部分已实现国产化，但在绿色设计和节能减排技术的深度研究方面还需进一步提高。

柳工首席科学家初长祥同志30多年来一直工作在柳工研发一线，是伴随柳工发展壮大而成长起来的工程机械专家。吉林大学马文星教授是我国著名的液力传动专家、首批柳工特聘科学家。初长祥同志与马文星教授合著的这部《工程机械液压与液力传动系统》，系统地介绍了工程机械液压与液力传动技术，包括基础理论、典型元件、典型系统及应用等多个方面，也包括两位专家多年来的研究成果以及国外在液压和液力传动领域的新技术。这部著作较好地体现了两位专家深厚的技术底蕴和解决实际问题的能力，诚为工程机械行业液压和液力传动技术领域的一本好书。



| 前言 |

| 录目 |

100 液压传动与液力传动都为流体传动，一字之差，易让初学者或非专业人士混为一谈。两者从传动原理、理论到典型的元件，乃至系统的应用都大相径庭。液压传动依靠流动压力能进行能量传递，是根据 17 世纪帕斯卡提出的液体静压力传动原理而发展起来的，如今已在工程机械领域获得了广泛应用。液力传动依靠流动动能进行能量传递，迄今为止也有 100 多年的发展历史，是工程机械行走系统的重要传动元件。

810 有关液压与液力传动的教科书或专著众多，且不乏优秀的作品。但详尽阐述工程机械液压与液力传动的原理、元件、系统组成与最新技术的专业书籍尚不多见，本书即以此为目的而编著。本书可以提供给有关专业高校教师与企业技术人员作为参考。本书以工程机械为载体，密切关注液压与液力传动的典型系统组成与最新技术动向，在充分说明经典理论与应用的基础上，增加了很多最新的技术应用。如液压传动的负荷传感技术、液力传动的流动数值模拟与可视化等。笔者根据多年教学、科研与工程实践的经验，使本书形成了严密完整的理论体系，对基本概念、典型元件、系统组成与应用都进行了深入阐述，思路清晰，言简意赅，易于读者理解。

《工程机械液压与液力传动系统》分为液压卷与液力卷。液压卷共 7 章，第 1 章为基础知识，第 2 章介绍液压控制阀，第 3 章介绍液压回路，第 4、第 5 章分别介绍液压泵与执行元件，第 6 章介绍负荷传感液压系统及控制，第 7 章则以工程机械典型机械为例介绍液压系统与控制。液力卷也为 7 章，第 1 章为液力传动基础，第 2、第 3 章分别介绍液力变矩器与液力偶合器，第 4 章系统阐述液力元件的设计方法，第 5 章介绍液力机械分流传动，第 6 章则介绍液力传动装置，第 7 章则为液力传动的试验。液压与液力传动技术通过众多专业人士的不懈努力，正在不断取得进步。希望本书能够展现液压与液力传动技术的魅力，使读者不仅能学到理论知识，又能掌握理论知识在工程实践中的应用，并能感受到从理论到实践的严谨科学态度。借用唐代诗人刘禹锡的名句“千淘万漉虽辛苦，吹尽黄沙始到金”，与广大同仁共勉。

广西柳工集团有限公司总裁、广西柳工机械股份有限公司董事长曾光安先生对本书写作给予了热情的鼓励与帮助，并亲为作序，使本书蓬荜生辉，笔者表示衷心感谢。

笔者参考了诸多专业书籍和国外公司的产品样本、使用和维修手册等资料，在此一并表示感谢。

参加校对、整理、图表制作的还有：刘春宝、吕景忠、张雁、才委、卢秀泉、柴博森、袁哲、谭越、王松林、许文、吴岳诗等。

本书成书过程中虽数易其稿，但因液压与液力传动知识博大精深，而笔者水平有限，难免有不足之处，还望广大读者批评指正。

初长祥
马文星

目 录

| 言 语 |

第1章 液压传动基础

001

- 1.1 流体力学基础 001
 - 1.1.1 流体静力学 001
 - 1.1.2 流体动力学 002
- 1.2 液压传动的定义和基本原理 006
 - 1.2.1 液压传动的定义 006
 - 1.2.2 液压传动的基本原理与组成 007
- 1.3 液压传动的工作介质 008
 - 1.3.1 液压传动工作介质的性质 008
 - 1.3.2 对液压传动工作介质的要求 010
 - 1.3.3 液压传动工作介质的分类和选用 012
 - 1.3.4 液压系统的污染控制 014
- 1.4 液压油在流动中的压力损失 018
- 1.5 孔口和缝隙流动 021
 - 1.5.1 孔口出流 021
 - 1.5.2 缝隙流动 022
- 1.6 基本液阻网络 025
 - 1.6.1 液阻结构与特性 025
 - 1.6.2 串联与并联 026
 - 1.6.3 基本桥路 027

第2章 液压控制阀

031

- 2.1 压力控制阀 031
 - 2.1.1 溢流阀 031
 - 2.1.2 减压阀 034
 - 2.1.3 顺序阀 039
 - 2.1.4 平衡阀 041
- 2.2 流量控制阀 042
 - 2.2.1 节流阀 042
 - 2.2.2 调速阀 046
 - 2.2.3 溢流型调速阀 049
 - 2.2.4 分集流阀 052
 - 2.2.5 单支稳流阀 054
- 2.3 方向控制阀 056
 - 2.3.1 单向阀 056
 - 2.3.2 换向阀 058
 - 2.3.3 多路换向阀 066
- 2.4 逻辑阀 (插装阀) 070

第3章 开式和闭式液压系统

074

- 3.1 开式系统 074
 - 3.1.1 压力控制回路 074
 - 3.1.2 速度控制回路 084
 - 3.1.3 方向控制回路 087
 - 3.1.4 顺序动作回路 088
 - 3.1.5 同步控制回路 090
- 3.2 闭式系统 093

第4章 液压泵

097

- 4.1 概述 097
 - 4.1.1 液压泵的工作原理 097
 - 4.1.2 液压泵的分类及图形符号 098
 - 4.1.3 液压泵的性能参数 098
- 4.2 齿轮泵 102
 - 4.2.1 外啮合齿轮泵 102
 - 4.2.2 内啮合齿轮泵 105
- 4.3 叶片泵 106

4.4 柱塞泵	107	4.5.3 液压伺服控制系统的组成及 应用	113
4.4.1 轴向柱塞泵	107	4.6 液压泵的变量控制	115
4.4.2 变量柱塞泵	110	4.6.1 变量控制原理及分类	116
4.5 液压泵的变量伺服控制原理	110	4.6.2 典型泵排量控制器原理 分析	117
4.5.1 伺服控制系统概述	110		
4.5.2 液压伺服控制系统的原理	111		

第5章 液压执行元件

147

5.1 液压马达概述	147	5.4.1 斜盘式轴向柱塞马达及其 变量控制原理	154
5.1.1 液压马达的分类	147	5.4.2 斜轴式轴向柱塞马达及其 变量控制原理	161
5.1.2 液压马达的主要参数	147	5.5 径向柱塞马达	165
5.1.3 液压马达的使用性能	148	5.5.1 曲轴连杆式径向柱塞马达	166
5.1.4 液压马达的图形符号	149	5.5.2 静平衡式径向柱塞马达	167
5.2 齿轮马达	150	5.5.3 内曲线径向柱塞马达	169
5.2.1 外啮合渐开线齿轮马达	150	5.5.4 意大利 SAI 马达简介	172
5.2.2 内啮合摆线齿轮马达	151	5.6 液压缸	173
5.3 叶片马达	153	5.6.1 液压缸的类型及特点	173
5.3.1 高速小转矩叶片马达	153	5.6.2 液压缸的结构	176
5.3.2 低速大转矩叶片马达	153	5.6.3 液压缸参数设计	176
5.4 轴向柱塞马达及其变量控制 原理	153		

第6章 负荷传感液压系统及控制

179

6.1 负荷传感液压系统及控制原理	179	6.3.1 流量饱和的基本概念	199
6.1.1 负荷传感系统的主要组成 元件	179	6.3.2 补偿阀布置形式与抗流量 饱和性能	199
6.1.2 负荷传感基本原理	179	6.3.3 改善阀前补偿形式抗流量 饱和性能	200
6.1.3 负荷传感控制回路	182	6.4 负荷传感系统的元件选型与系统 调试	201
6.2 补偿阀的布置形式及特性分析	188	6.4.1 负荷传感系统的元件选型	201
6.2.1 阀后压力补偿	189	6.4.2 负荷传感系统的调试	202
6.2.2 阀前压力补偿	195	6.5 定量负荷传感系统	203
6.2.3 回油压力补偿	198		
6.3 流量饱和	199		

第7章 工程机械液压系统及控制

206

7.1 装载机的液压系统及控制	206	系统	240
7.1.1 典型装载机液压系统分析	207	7.2 履带式挖掘机液压系统及控制	250
7.1.2 装载机转向液压系统	218	7.3 履带式起重机液压系统及控制	300
7.1.3 装载机变量负荷传感液压 系统	240	7.3.1 下车液压系统	302

7.3.2 行走液压系统 303

7.3.3 回转液压系统 304

7.3.4 起升液压系统 305

7.3.5 变幅液压系统 307

7.3.6 平衡阀 308

7.4 履带式摊铺机的液压系统及控制 318

7.4.1 行走液压系统 318

7.4.2 输料液压系统 321

7.4.3 分料液压系统 321

7.4.4 振捣液压系统 322

7.4.5 振动液压系统 323

7.4.6 辅助液压系统 323

参考文献

326

181 181

182 182

183 183

184 184

185 185

186 186

187 187

188 188

189 189

190 190

191 191

192 192

193 193

194 194

195 195

196 196

197 197

198 198

199 199

200 200

201 201

202 202

203 203

204 204

205 205

206 206

207 207

208 208

209 209

210 210

211 211

212 212

213 213

214 214

215 215

216 216

217 217

218 218

219 219

220 220

221 221

222 222

223 223

224 224

225 225

226 226

227 227

228 228

229 229

230 230

231 231

232 232

233 233

234 234

235 235

236 236

237 237

238 238

239 239

240 240

241 241

242 242

243 243

244 244

245 245

246 246

247 247

248 248

249 249

250 250

251 251

252 252

253 253

254 254

255 255

256 256

257 257

258 258

259 259

260 260

261 261

262 262

263 263

264 264

265 265

266 266

267 267

268 268

269 269

270 270

271 271

272 272

273 273

274 274

275 275

276 276

277 277

278 278

279 279

280 280

281 281

282 282

283 283

284 284

285 285

286 286

287 287

288 288

289 289

290 290

291 291

292 292

293 293

294 294

295 295

296 296

297 297

298 298

299 299

300 300

301 301

302 302

303 303

304 304

305 305

306 306

307 307

308 308

309 309

310 310

311 311

312 312

313 313

314 314

315 315

316 316

317 317

318 318

319 319

320 320

321 321

322 322

323 323

324 324

325 325

326 326

327

199 199

200 200

201 201

202 202

203 203

204 204

205 205

206 206

207 207

208 208

209 209

210 210

211 211

212 212

213 213

214 214

215 215

216 216

217 217

218 218

219 219

220 220

221 221

222 222

223 223

224 224

225 225

226 226

227 227

228 228

229 229

230 230

231 231

232 232

233 233

234 234

235 235

236 236

237 237

238 238

239 239

240 240

241 241

242 242

243 243

244 244

245 245

246 246

247 247

248 248

249 249

250 250

251 251

252 252

253 253

254 254

255 255

256 256

257 257

258 258

259 259

260 260

261 261

262 262

263 263

264 264

265 265

266 266

267 267

268 268

269 269

270 270

271 271

272 272

273 273

274 274

275 275

276 276

277 277

278 278

279 279

280 280

281 281

282 282

283 283

284 284

285 285

286 286

287 287

288 288

289 289

290 290

291 291

292 292

293 293

294 294

295 295

296 296

297 297

298 298

299 299

300 300

301 301

302 302

303 303

304 304

305 305

306 306

307 307

308 308

309 309

310 310

311 311

312 312

313 313

314 314

315 315

316 316

317 317

318 318

319 319

320 320

321 321

322 322

323 323

324 324

325 325

326 326

327 327

328 328

329 329

330 330

331 331

332 332

333 333

334 334

335 335

336 336

337 337

338 338

339 339

340 340

341 341

342 342

343 343

344 344

345 345

346 346

347 347

348 348

349 349

350 350

351 351

352 352

353 353

354 354

355 355

356 356

357 357

358 358

359 359

360 360

361 361

362 362

363 363

364 364

365 365

366 366

367 367

368 368

369 369

370 370

371 371

372 372

373 373

374 374

375 375

376 376

377 377

378 378

379 379

380 380

381 381

382 382

383 383

384 384

385 385

386 386

387 387

388 388

389 389

390 390

391 391

392 392

393 393

394 394

395 395

396 396

397 397

398 398

399 399

400 400

401 401

402 402

403 403

404 404

405 405

406 406

407 407

408 408

409 409

410 410

411 411

412 412

413 413

414 414

415 415

416 416

417 417

418 418

419 419

420 420

421 421

422 422

423 423

424 424

425 425

426 426

427 427

428 428

429 429

430 430

431 431

432 432

433 433

434 434

435 435

436 436

437 437

438 438

439 439

440 440

441 441

442 442

443 443

444 444

445 445

446 446

447 447

448 448

449 449

450 450

451 451

452 452

453 453

454 454

455 455

456 456

457 457

458 458

459 459

460 460

461 461

462 462

463 463

464 464

465 465

466 466

467 467

468 468

469 469

470 470

471 471

472 472

473 473

474 474

475 475

476 476

477 477

478 478

479 479

480 480

481 481

482 482

483 483

484 484

485 485

486 486

487 487

488 488

489 489

490 490

491 491

492 492

493 493

494 494

495 495

496 496

497 497

498 498

499 499

500 500

508

495 495

496 496

497 497

498 498

499 499

500 500

501 501

502 502

503 503

504 504

505 505

506 506

507 507

508 508

509 509

510 510

511 511

512 512

513 513

514 514

515 515

516 516

517 517

518 518

519 519

520 520

521 521

522 522

523 523

524 524

525 525

526 526

527 527

528 528

529 529

530 530

531 531

532 532

533 533

534 534

535 535

536 536

537 537

538 538

539 539

540 540

541 541

542 542

543 543

544 544

545 545

546 546

547 547

548 548

549 549

550 550

551 551

552 552

553 553

554 554

555 555

556 556

557 557

558 558

559 559

560 560

561 561

562 562

563 563

564 564

565 565

566 566

567 567

568 568

569 569

570 570

571 571

572 572

573 573

574 574

575 575

576 576

577 577

578 578

579 579

580 580

581 581

582 582

583 583

584 584

585 585

586 586

587 587

588 588

589 589

590 590

591 591

592 592

593 593

594 594

595 595

596 596

597 597

598 598

599 599

600 600

601 601

602 602

603 603

604 604

605 605

606 606

607 607

608 608

609 609

610 610

611 611

612 612

613 613

614 614

615 615

616 616

617 617

618 618

619 619

620 620

621 621

622 622

623 623

624 624

625 625

626 626

627 627

628 628

629 629

630 630

631 631

632 632

633 633

634 634

635 635

636 636

637 637

638 638

639 639

640 640

641 641

642 642

643 643

644 644

645 645

646 646

647 647

648 648

649 649

650 650

651 651

652 652

653 653

654 654

655 655

656 656

657 657

658 658

659 659

660 660

661 661

662 662

663 663

664 664

665 665

666 666

667 667

668 668

669 669

670 670

671 671

672 672

673 673

674 674

675 675

676 676

677 677

678 678

679 679

680 680

681 681

682 682

683 683

684 684

685 685

686 686

687 687

688 688

689 689

690 690

691 691

692 692

693 693

694 694

695 695

696 696

697 697

698 698

699 699

700 700

第1章

液压传动基础

1.1 流体力学基础

1.1.1 流体静力学

流体静力学研究的是静止液体或内部质点之间没有相对运动的液体的力学性质。

(1) 液体的压力

液体单位面积上所受的垂直力称为压力。在物理学中称为压强，但在液压传动中习惯称为压力。压力通常以 p 表示。

当液体面积 ΔA 上作用垂直力 ΔF 时，液体内某点处的压力为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1-1)$$

液体的压力有两个特性：

① 液体的压力沿着内法线方向作用于承压面。

② 静止液体内任意一点的压力在各个方向上都相等。

(2) 液体静力学基本方程

静止液体内任意一点处的压力都由两部分组成：一部分是液面上的压力 p_0 ，另一部分是该点以上液体自重产生的压力，即 $\rho g h$ 与该点离液面高度 h 的乘积。

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1-2)$$

式(1-2)即为液体静力学基本方程。

当液面上受大气压 p_a 作用时，则液体内任意一点处的压力为

$$p = p_a + \rho g h \quad (1-3)$$

静止液体内的压力随液体深度变化呈直线规律分布。离液面深度相同的各点组成了等压面，此等压面为一水平面。

(3) 压力的表示方法和单位

液体压力分为绝对压力和相对压力两种。如式(1-3)表示的压力 p ，其值是以绝对真空为基准来度量的，为绝对压力；而式中超过大气压的那部分压力 $(p - p_a) = \rho g h$ ，其值是以大气压力 p_a 为基准来度量的，为相对压力。一般压力表在大气中的读数为零，用压力表测得的压力数值显然是相对压力。正因为如此，相对压力又称表压力。在液压技术中，如不特别指明，压力均指相对压力。如果液体中某点的绝对压力小于大气压力，这时，比大气压力小的那部分数值称作真空度。以大气压力为基准计算压力时，基准以上的正值是表压力，基准以下的负值是真空度。

压力的常用单位为 Pa (帕, N/m^2)、MPa (兆帕, N/mm^2)，有时也使用 bar (巴) (bar 为非法定计量单位)。常用压力单位之间的换算关系为： $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$ ， $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ 。

(4) 静止液体内压力的传递

如图 1-1 所示密闭容器内的液体，假设活塞的重量忽略不计，由外力 F 引起的活塞与液

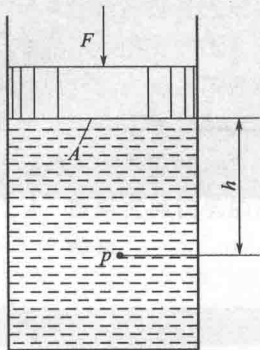


图1-1 密闭容器内液体

体接触面的压力为 p_0 。则深度为 h 处的压力 $p = p_0 + \rho gh$ ，由于液体自重形成的那部分压力相对很小，在液压系统中可以忽略不计，因而可以认为液体内部各处的压力是相等的。在外力 F 变化引起压力 p_0 发生变化时，只要液体仍保持原来的静止状态不变，则液体内部任意一点的压力将发生同样大小的变化。也就是说，在密闭容器内，施加于静止液体的压力将以等值传递到液体各点。这就是帕斯卡原理，或称静压力传递原理。活塞上的作用力 F 是外加负载， A 为活塞横截面面积，根据帕斯卡原理，容器内液体的压力 p 与负载 F 之间总是保持着正比关系，即

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-4)$$

可见，液体内的压力是由外界负载作用所形成的，即系统的压力大小取决于负载，这是液压传动中的一个非常重要的基本概念。

图 1-2 所示为相互连通的两个液压缸，已知大缸内径 D ，小缸内径 d 。大活塞上放置物体的重量为 G ，小活塞上所加的力为 F 。根据帕斯卡原理，由外力产生的压力在两缸中相等，即

$$\frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{G}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (1-5)$$

故为了顶起重物，应在小活塞上加力为

$$F = \frac{d^2}{D^2} G \quad (1-6)$$

式(1-6)说明了液压千斤顶等液压起重机械的工作原理，小活塞上较小的力即可以顶起大活塞上较重的重物，体现了液压装置的力放大作用。但能量是守恒的，小活塞移动距离会大于大活塞。

(5) 液体对固体壁面的作用力

在液压传动中，由于不考虑由液体自重产生的那部分压力，液体中各点的静压力可看作是均匀分布的。液体和固体壁面相接触时，固体壁面将受到总液体压力的作用。当固体壁面为一平面时，静止液体对该平面的总作用力 F 等于液体压力 p 与该平面面积 A 的乘积，其方向与该面垂直，即

$$F = pA \quad (1-7)$$

当固体壁面为曲面时，曲面上各点所受的静压力的方向是变化的，但大小相等。可通过积分计算液体对固体壁面的作用力。实际上，曲面在某一方向上所受的总作用力，等于曲面在该方向的投影面积和液体压力的乘积。

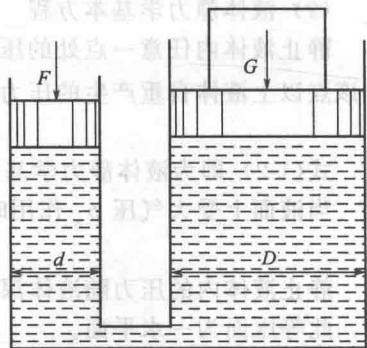


图1-2 帕斯卡原理应用

1.1.2 流体动力学

流体动力学主要研究流动状态、运动规律、能量转换以及流动液体与固体壁面的相互作用力等问题。这些内容是液压技术中分析问题和设计计算的理论依据。

(1) 基本概念

① 理想流体与实际流体、定常流动与非定常流动 一般把既无黏性又不可压缩的流体

称为理想流体。所谓理想流体实际上是不存在的，主要在于使所分析讨论的问题理论上简单化。自然的实际流体都是有黏性的。研究液体流动时，必须考虑黏性的影响。但由于这个问题非常复杂，所以可以先假设液体没有黏性，然后再考虑黏性的作用，并通过实验验证的办法对结论进行补充或修正。这种办法同样可以用来处理液体的可压缩性问题。

液体流动时，若液体中任意一点处的压力、速度和密度等参数都不随时间而变化，则这种流动称为定常流动。反之，只要压力、速度或密度中有一个参数随时间变化，就称非定常流动。

② 流线、流管、流束、通流截面 流线是某一瞬间液流中标志流体质点运动状态的曲线，在流线上各点的瞬时液流方向与该点的切线方向重合，如图 1-3 所示。由于液流中每一点在每一瞬间只能有一个速度，因而流线既不能相交，也不能转折，是一条条光滑的曲线。在流场内作一封闭曲线，过该曲线的所有流线所构成的管状表面称为流管，流管内所有流线的集合称为流束。根据流线不能相交的性质，流管内外的流线均不能穿越流管表面。



图1-3 流线

垂直于流束的截面称为通流截面（或过流断面），通流截面上各点的运动速度均与其垂直。因此，通流截面可能是平面，也可能是曲面。

通流面积无限小的流束称为微小流束。

③ 流量和平均流速 单位时间内流过某一通流截面的液体体积称为体积流量。流量以 q 表示，单位为 m^3/s 或 L/min 。

当液流通过微小的通流截面 dA 时（图 1-4），液体在该截面上各点的速度 v 可以认为是相等的，所以流过该微小断面的流量为

$$dq = v dA \quad (1-8)$$

则流过整个过流断面 A 的流量是

$$q = \int_A v dA \quad (1-9)$$

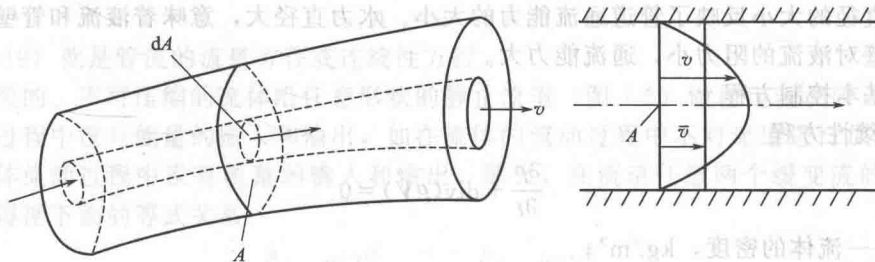


图1-4 流量和平均流速

对于实际液体的流动，由于黏性力的作用，整个过流断面上各点的速度 v 是不等的，故按式(1-9)积分计算流量是不方便的。因此，采用平均流速 \bar{v} 的概念，即假设过流断面上各点的流速均匀分布（图 1-4），液体以此均布流速 \bar{v} 流过此断面的流量等于以实际流速流过的流量，即

$$q = \int_A v dA = \bar{v} A \quad (1-10)$$

由此得出过流断面上的平均流速为

$$\bar{v} = \frac{q}{A} \quad (1-11)$$

在工程实际中,平均流速 \bar{v} 才具有应用价值。以下为方便,用 v 表示平均流速。液压缸工作时,活塞运动的速度就等于缸内液体的平均流速,因而可以根据式(1-11)建立起活塞运动速度 v 与液压缸有效面积 A 和流量 q 之间的关系。当液压缸有效面积一定时,活塞运动速度取决于输出液压缸的流量。

④ 雷诺数、层流、湍流 液体的流动有两种状态,即层流和湍流,这两种流动状态的物理现象可以通过著名的雷诺实验观察出来。实验证明,液体在圆管中的流动状态不仅与管内的平均流速 v 有关,还和管道内径 d 、液体的运动黏度 ν 有关。实际上,判定流动状态的是上述三个参数所组成的一个无量纲数即雷诺数

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (1-12)$$

对通流截面相同的管道来说,若流动的雷诺数 Re 相同,它的流动状态就相同。雷诺数的物理意义:雷诺数是液流的惯性力对黏性力的量纲为 1 的比值。当雷诺数较大时,液体的惯性力起主导作用,液体处于湍流状态;当雷诺数较小时,黏性力起主导作用,液体处于层流状态。

液流由层流转变为湍流时的雷诺数和由湍流转变为层流时的雷诺数是不同的,后者的数量较前者小,所以一般都用后者作为判断流动状态的依据,称为临界雷诺数,记作 Re_r 。当液流的实际雷诺数 Re 小于临界雷诺数 Re_r 时,为层流;反之,为湍流。

对于非圆截面的管道, Re 可用下式计算

$$Re = \frac{d_H v}{\nu} \quad (1-13)$$

式中 d_H ——通流截面的水力直径, m。

d_H 可按下式求得

$$d_H = \frac{4A}{x} \quad (1-14)$$

式中 A ——通流截面的面积, m^2 ;

x ——湿周长度,即通流截面上与液体相接触的管壁周长, m。

水力直径的大小反映了管道通流能力的大小。水力直径大,意味着液流和管壁的接触周长短,管壁对液流的阻力小,通流能力大。

(2) 基本控制方程

① 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1-15)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

\mathbf{V} ——流动速度矢量。

对于不可压缩均质液体 ρ 为常数,于是有

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (1-16)$$

② 运动微分方程

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (1-17)$$

$$\nu = \mu / \rho$$

式中 ν ——运动黏度, m^2/s ;

F ——流体的质量力, N;

p ——压力, Pa。

式(1-16)和式(1-17)为不可压缩均质流体三维流动基本方程组, 是对液压和液力元件进行计算流体力学(CFD)分析的基础。

对于一维流动, 也可以用流量方程和伯努利方程来描述。

当流体沿着某一几何形状的管路流动时, 在流场中取一控制体积, 如图 1-5 中控制面 1 和 2 以及管路壁面所包围的体积, 并研究流进与流出这个控制体积的流体质量和控制体积内流体质量的变化关系。若在某一时间间隔 Δt 内, 当流出控制体积的流体质量大于流进的流体质量时, 那么, 在控制体积内流体质量必然减少。但由于控制体积的大小已经确定, 并且不变, 所以流体的密度 ρ 就要减小; 反之, 就要增大。如果控制体积内流体的密度 ρ 不变, 那么, 流出控制体积的流体质量就必然等于流进控制体积的流体质量。这就是流量方程的物理本质。

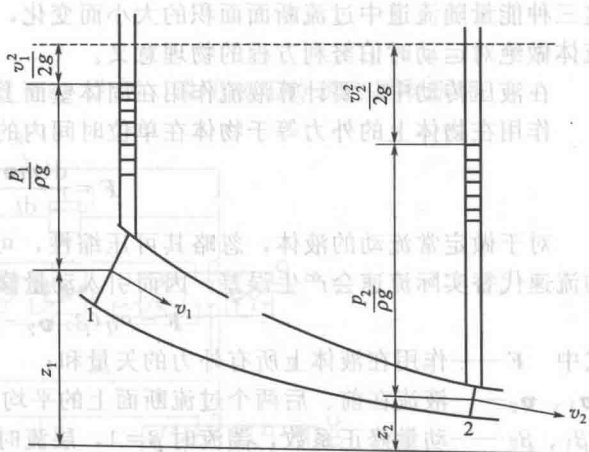


图 1-5 流体在管路中的流动

在对管路进行计算时, 只要对管路的两个过流断面作为控制面进行计算, 就可以得出流量方程。在稳定流动时有

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (1-18)$$

式中 A_1 ——过流断面 1 的面积, m^2 ;

A_2 ——过流断面 2 的面积, m^2 ;

v_1 ——过流断面 1 的流体平均流速, m/s ;

v_2 ——过流断面 2 的流体平均流速, m/s 。

对不可压缩的均质流体有

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q \quad (1-19)$$

式(1-19)就是管流的流量方程或连续性方程。

当连续的、不可压缩的流体沿任意形状的静止流道(图 1-5)做稳定流动时, 只要在流体的流动过程中没有能量的输入和输出, 如在流体的流动过程中不对流道进行加热或冷却, 或者在流体流动过程中没有流量的输入和输出, 那么, 在流道任意两个缓变流的过流断面上, 都将遵循下面的等式关系

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \sum h_s \quad (1-20)$$

式中 Z_1, Z_2 ——断面 1 和 2 处单位重量流体位能的平均值, m ;

ρ ——工作流体的密度, kg/m^3 ;

$\frac{p_1}{\rho g}, \frac{p_2}{\rho g}$ ——断面 1 和 2 处单位重量流体压力能的平均值, m ;

$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g}, \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$ ——断面 1 和 2 处单位重量流体动能的平均值, m ;

$\sum h_s$ ——单位重量流体由断面 1 流至断面 2 时的能量损失总和, m;

α_1 、 α_2 ——动能修正系数, 其值与液体的流态有关, 湍流时 $\alpha=1$, 层流时 $\alpha=2$ 。

式(1-20)即为实际流体在静止流道中流动时能量守恒定律的数学表达式, 也称为流体做绝对运动时的伯努利方程。如果不考虑流体在流动过程中的能量损失, 可以看出, 在任意一个缓变流的过流断面上, 单位重量流体都具有三种形式的能量, 即位能、压力能和动能。这三种能量随流道中过流断面面积的大小而变化, 但能量之和却是不变的、守恒的。这就是流体做绝对运动时伯努利方程的物理意义。

在液压传动中, 要计算液流作用在固体壁面上的力时, 应用动量方程求解比较方便。作用在物体上的外力等于物体在单位时间内的动量变化量, 即

$$F = \frac{d(m\boldsymbol{v})}{dt} \quad (1-21)$$

对于做定常流动的液体, 忽略其可压缩性, 可将 $m = \rho q dt$ 代入式(1-21), 并考虑以平均流速代替实际流速会产生误差, 因而引入动量修正系数 β , 则可写出如下形式的动量方程

$$F = \rho q (\beta_2 \boldsymbol{v}_2 - \beta_1 \boldsymbol{v}_1) \quad (1-22)$$

式中 F ——作用在液体上所有外力的矢量和;

\boldsymbol{v}_1 、 \boldsymbol{v}_2 ——液流在前、后两个过流断面上的平均流速矢量;

β_1 、 β_2 ——动量修正系数, 湍流时 $\beta=1$, 层流时 $\beta=4/3$;

q ——液体的流量, m^3/s 。

式(1-22)为矢量方程, 使用时应根据具体情况将式中的各个矢量分解为指定方向的投影值。

1.2 液压传动的定义和基本原理

1.2.1 液压传动的定义

在传动系统中, 若有一个或一个以上的环节以液体为工作介质传递动力, 则此传动系统定义为液体传动系统。在液体传动系统中, 以液体传递动力的环节称为液体传动元件, 简称为液体元件。

在液体元件传递能量过程中, 机械能首先转变为液体能, 再由液体能转变为机械能。液体能以三种形式存在: 位能、压力能和动能。在液体元件中液体相对高度位置没有变化或变化很小, 位能变化可以忽略不计。因此, 在液体元件中运动液体的能量变换主要表现为动能和压力能两种形式。

主要依靠工作液体压力能的变化传递或实现能量变换与控制的液体元件称为液压传动元件, 如液压泵、液压马达和液压缸。在传动系统中有一个或一个以上的环节采用液压传动元件传递动力时称为液压传动。

与机械传动等其他传动方式相比, 液压传动主要具有以下优、缺点。

(1) 优点

① 体积小、重量轻、结构紧凑, 传递转矩大。

② 可无级变速, 传动平稳。

③ 易标准化、系统化和通用化。

④ 安装方便, 运行安全可靠。

⑤ 自润滑性好, 元件寿命长。

(2) 缺点

- ① 不能得到严格的传动比。
- ② 传动效率低，不适于远距离传动。
- ③ 受温度条件限制元件制造精度要求高，对液压油性能要求严。
- ④ 对密封有较高要求。
- ⑤ 发生故障不易检查。

1.2.2 液压传动的基本原理与组成

以某型号装载机工作装置液压系统（图 1-6）为例，说明液压传动的基本原理。

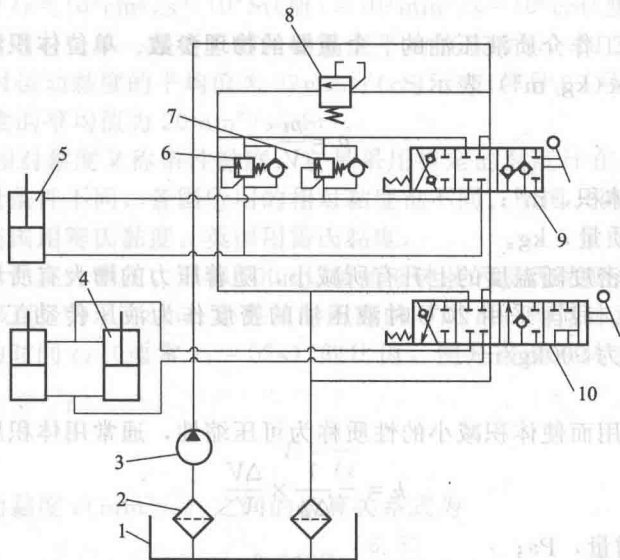


图 1-6 装载机工作装置液压系统

- 1—油箱；2—滤清器；3—液压泵；4—动臂油缸；5—铲斗油缸；6—铲斗油缸大腔双作用安全阀；
7—铲斗油缸小腔双作用安全阀；8—主安全阀；9—铲斗油缸换向阀；10—动臂油缸换向阀

当铲斗油缸换向阀 9 的控制手柄和动臂油缸换向阀 10 的控制手柄都处于中位时，液压油直接回油箱。此时，将换向阀 9 的控制手柄置于左位，铲斗油缸的小腔接通高压油，铲斗油缸的大腔接通油箱，在高压油的作用下，铲斗油缸活塞向里收回。将换向阀 9 的控制手柄置于右位，铲斗油缸的大腔接通高压油，铲斗油缸的小腔接通油箱，在高压油的作用下，铲斗油缸活塞向外伸出。将换向阀 9 的控制手柄置于中位，同时将换向阀 10 的控制手柄置于左位，动臂油缸的小腔接通高压油，大腔接通油箱，在高压油的作用下，动臂油缸活塞向里收回。此时，将换向阀 10 的控制手柄置于右位，使动臂油缸大腔接通高压油，小腔接通油箱，在高压油的作用下，动臂油缸向外伸出。这样，控制手柄置于不同的位置，就可以实现动臂和铲斗油缸活塞的不同动作。

液压系统通常由以下几部分组成。

- ① 液压泵 将机械能转变为工作介质的压力能，并输出具有一定压力的工作介质的元件。
- ② 执行元件 将工作介质的压力能转变为机械能，驱动工作机构做功的元件，如铲斗油缸 5 和动臂油缸 4。
- ③ 控制元件 通过对工作介质的压力、流量、流动方向的控制，实现对执行元件的运动速度、方向、作用力等的控制。也用于实现过载保护、程序控制等。如铲斗油缸换向阀 9 和动臂油缸换向阀 10。

④ 辅助元件 除上述三个组成部分以外的其他元件,如油箱、管件、过滤器、蓄能器等。

⑤ 工作介质 系统的载能介质,在传递能量的同时还起到润滑冷却作用。

1.3 液压传动的工作介质

1.3.1 液压传动工作介质的性质

(1) 密度

密度是液压传动工作介质液压油的一个重要的物理参数。单位体积液压油的质量称为液压油的密度,通常用 ρ (kg/m^3)表示。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-23)$$

式中 V ——液体的体积, m^3 ;

m ——液体的质量, kg 。

石油基液压油的密度随温度的上升有所减小,随着压力的增大有所增大,但是变化值不大,通常认为是常数。我国采用 20°C 时液压油的密度作为液压传动工作介质的标准密度。常用液压油的密度约为 $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(2) 可压缩性

液压油受压力作用而使体积减小的性质称为可压缩性,通常用体积压缩系数 k 表示。

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \times \frac{\Delta V}{V} \quad (1-24)$$

式中 Δp ——压力增量, Pa ;

ΔV ——体积增量, m^3 ;

V ——液压油体积, m^3 。

由于压力增大时,液体的体积减小,即 Δp 与 ΔV 的符号始终相反。为保证 k 为正值,在式(1-24)的右边加一负号。

k 的倒数称为液体的体积模量,以 K 表示,即

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{V\Delta p}{\Delta V} \quad (1-25)$$

K 表示液体产生单位体积相对变化量所需要的压力增量。在常温下,纯净液压油的体积模量 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{Pa}$,数值很大,故一般可认为液压油是不可压缩的。若液压油中混入空气,其抗压缩能力会显著下降,并将严重影响液压系统的工作性能。因此,在考虑液压油的可压缩性时,必须综合考虑液压油本身的可压缩性、混在油中的空气的可压缩性,以及盛放液压油的封闭容器(包括管道)的容积变形等因素的影响,常用等效体积模量 K' 表示。

$$K' = (0.7 \sim 1.4) \times 10^9 \text{Pa}$$

在变动压力下,液压油的可压缩性的作用极像一个弹簧,即压力升高,油液体积减小;压力降低,油液体积增大。

(3) 黏度

液压油在外力作用下流动(或有流动趋势)时,分子间产生阻止分子间相对运动的剪切摩擦阻力,这种现象称为液压油的黏性。黏性的大小用黏度表示。常用的黏度有三种,即动力黏度、运动黏度和相对黏度。

① 动力黏度 μ 动力黏度又称绝对黏度。根据牛顿液体的内摩擦定律

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

动力黏度的物理意义是：液体在单位速度梯度下流动时，流动液层间单位面积上的内摩擦力，单位为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

② 运动黏度 ν 动力黏度与该液体密度的比值称作运动黏度，用 $\nu(\text{m}^2/\text{s})$ 表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-26)$$

运动黏度的单位换算：

$$1 \text{m}^2/\text{s} = 10^4 \text{cm}^2/\text{s} = 10^4 \text{St}(\text{斯}) = 10^6 \text{mm}^2/\text{s} = 10^6 \text{cSt}(\text{厘斯})$$

液压油牌号，常用它在某一温度下的运动黏度平均值来表示，如 32 号液压油，就是指这种液压油在 40°C 时运动黏度的平均值为 $32 \text{mm}^2/(\text{cSt})$ 。旧牌号 20 号液压油是指这种液压油在 40°C 时运动黏度的平均值为 $20 \text{mm}^2/\text{s}(\text{cSt})$ 。

③ 相对黏度 相对黏度又称条件黏度，它是采用特定的黏度计在规定的条件下测量出来的黏度。由于测量条件不同，各国所用的相对黏度也不同。中国、德国和俄罗斯等一些国家采用恩氏黏度，美国用赛氏黏度，英国用雷氏黏度。

恩氏黏度用恩氏黏度计测定，即将 200mL 被测液体装入恩氏黏度计中，在某一温度下，测出液体经容器底部直径为 $\phi 2.8 \text{mm}$ 小孔流尽所需的时间 t_1 ，与同体积的蒸馏水在 20°C 时通过同一小孔所需的时间 t_2 （通常 $t_2 = 52 \text{s}$ ）的比值，便是被测液体在这一温度时的恩氏黏度。

$$^\circ E = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-27)$$

恩氏黏度与运动黏度 $\nu(\text{mm}^2/\text{s})$ 之间的换算关系式为

$$\nu = 7.31^\circ E - \frac{6.31}{^\circ E} \quad (1-28)$$

④ 调和油的黏度 选择合适黏度的液压油，对液压系统的工作性能起到重要的作用。当能得到的液压油的黏度不符合要求时，可把两种不同黏度的液压油按适当的比例混合起来使用，这就是调和油。

调和油的黏度可用下列经验公式计算

$$^\circ E = \frac{a^\circ E_1 + b^\circ E_2 - c(^\circ E_1 - ^\circ E_2)}{100} \quad (1-29)$$

式中 $^\circ E_1, ^\circ E_2$ ——混合前两种油液的黏度；

$^\circ E$ ——混合后的调和油黏度；

a, b ——参与调合的两种油液所占的百分数 ($a + b = 1$)；

c ——实验系数，见表 1-1。

表 1-1 系数 c 的数值

a	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b	90	80	70	60	50	40	30	20	10
c	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

⑤ 黏度与压力的关系 当压力增大时液压油的黏度增大。对于一般的液压系统，当压力在 20MPa 以下时，压力对黏度的影响不大，可以忽略不计。当压力较高或压力变化较大时，黏度的变化则不容忽视。石油型液压油的黏度与压力的关系可用下列公式表示

$$\nu_p = \nu_0(1 + 0.003p) \quad (1-30)$$