

21 世纪 | 21 SHIJI LILUN  
理论创新系列丛书

# 新型机载作动系统研究

Xinxing Jizai Zuodong Xitong Yanjiu

◎孙卫华 胡贵彦 著

中国物资出版社

21 SHIJI LILUN  
CHUANGXIN XILIE CONGSHU

《金瓶梅》中，京北一，著述費財，半工半，究爾幾系此中幾時堅確

中国物资出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新型机载作动系统研究/孙卫华, 胡贵彦著. —北京: 中国物资出版社, 2009. 9

(21 世纪理论创新系列丛书)

ISBN 978 - 7 - 5047 - 3182 - 1

I. 新… II. ①孙… ②胡… III. 飞机—飞行控制系统 IV. V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 139522 号

策划编辑 胡郁林

责任编辑 司昌静

责任印制 何崇杭

责任校对 孙会香 杨小静

中国物资出版社出版发行

网址: <http://www.clph.cn>

社址: 北京市西城区月坛北街 25 号

电话: (010) 68589540 邮政编码: 100834

全国新华书店经销

中国农业出版社印刷厂印刷

开本: 710mm × 1000mm 1/16 印张: 17.75 字数: 291 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

书号: ISBN 978 - 7 - 5047 - 3182 - 1/V · 0001

印数: 0001—2000 册

定价: 36.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

## 序 言

机载作动系统是实现飞机飞行姿态和飞行轨迹控制的关键飞行控制子系统之一，其性能的优劣直接影响飞机的飞行品质。现代及下一代战斗机的大攻角超机动飞行、推力矢量控制和主动控制都需要快速反应大功率机载作动系统的支持。飞机作动系统只有朝着高压大功率方向发展才能满足这一要求。

机载智能泵源系统可根据飞机飞行状态，即飞行包线的不同，自动调节输出压力和流量以实现与负载的匹配，从而达到在满足系统动态性能要求的前提下，使系统的效率最高。因此，它是解决温升急剧增加等问题的最佳选择，也是未来机载液压系统的主要发展趋势之一。智能泵是这一系统的核心部件，它的性能直接决定着飞机液压系统的性能，所以改进泵的结构、改善泵源的工作方式和能量管理方式以及为智能泵的地面测试配套完善的实验系统成为主要的研究任务。

本书主要提出了转速调节、排量调节和转速—排量复合调节三种智能泵实现模式，更好地实现了智能泵四种工作方式（恒流量、恒压力、恒功率和负载敏感），其中，转速—排量复合调节模式在保证智能泵效率的前提下，又使其动态特性进一步得到了改善。在此基础上，运用了优化技术、多模式复合控制，解决了大功率电液伺服系统中效率和快速性的矛盾，保证了系统的高效率和良好的动态特性。

研究了电机—泵复合控制方式，对电机—泵复合系统的两个子系统，即电机子系统和变量泵伺服变量子系统进行了数学建模和仿真研究，接着对整个非线性系统进行了数学建模，然后对电机—泵—阀并联式控制方式的三种工作模式分别进行了仿真，为后面的控制研究奠定了基础。

针对电机—泵复合控制系统存在强非线性（相乘非线性）特点，提出了

基于反馈线性化的最优控制策略。通过反馈线性化将此仿射非线性系统化线性子系统和非线性系统部分, 计算得出线性子系统只能临界稳定, 然后讨论非线性部分的零动态渐近稳定。本书证明, 在零动态稳定的基础上, 任何能使得线性子系统渐进稳定的线性反馈也能使最初的非线性系统渐进稳定, 线性反馈的参数可以通过二次型最优控制来确定。

本书研究了电机控制、泵的控制之间最佳权值分配和动态校正, 提出了一种用微处理器组成的协调控制器通过“软件伺服”来实现智能控制律的设想。本书采用粒子群优化算法 (PSO), 在保证允许的超调量的条件下, 研究了电机、泵之间的权值最优分配。进行了 PSO 算法的收敛性分析。在此基础上, 为了进一步提高系统的性能, 电机—泵两个子系统分别采用 PID 控制, 用改进的粒子群优化算法研究了此时系统的协调控制问题。

本书研究了机载作动系统中的电机—泵—阀复合控制机载作动系统的控制方案。以这种新型机载作动系统为研究对象, 针对该系统存在强非线性、抗外部干扰能力差等特点, 提出以滑动模态变结构控制与模糊控制相结合的模糊滑模控制律, 实现对含有相乘非线性的电机—泵—阀复合式作动系统的非线性控制, 使系统的动态响应特性和对外部干扰的鲁棒性得以综合提高; 提出模糊趋近律, 降低了传统滑模变结构中的抖振现象, 提高了控制精度。仿真试验表明本书提出的运用模糊变结构控制算法的新型机载作动系统原理方案可行。

PXI 总线是 21 世纪仪器总线系统和自动化测控系统的优秀平台, PXI 技术与计算机相结合组建复杂的测控系统已被广泛地应用于测量、监控、检测、教育、电信等领域。本书提出了基于 PXI 总线的测控系统的整体设计方案, 完成了测控系统的硬件设计和软件设计, 包括硬件系统构成与设计、虚拟仪器软件结构、高速同步实时数据采集、系统报警以及电机、伺服变量泵控制。

本书完成了电机—泵复合控制综合实验台的总体设计和实验研究; 进行了加载控制方法的研究, 使得作动系统和加载系统同步工作; 进行了系统的抗干扰设计, 采用可靠接地和数字滤波使得测控系统达到了较高的精度; 并对系统的测量精度进行了分析; 最后进行了实验验证。

书中第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章由孙卫华著写, 第 2 章、第 3 章、第

7 章、第 8 章由胡贵彦著写，第 1 章由孙卫华和胡贵彦合写。希望本书为下一代作战飞机新型复合机载动作系统的设计提供一定理论依据和实用参考价值。由于作者水平有限，加之时间仓促，书中如有不妥之处，望读者批评指正。

作 者

2009 年 7 月

# 目 录

|                        |      |
|------------------------|------|
| 1 绪 论                  | (1)  |
| 1.1 未来战斗机对机载作动系统的要求    | (1)  |
| 1.2 未来战斗机液压作动系统的主要发展方向 | (2)  |
| 1.3 液压节能技术的发展概述        | (5)  |
| 1.3.1 液压系统效率分析         | (5)  |
| 1.3.2 液压系统节能措施         | (6)  |
| 1.3.3 机载液压系统节能技术       | (6)  |
| 1.4 功率电传机载作动系统的研究现状    | (10) |
| 1.4.1 功率电传作动器设计研究计划    | (10) |
| 1.4.2 EPAD 研制的三种典型的作动器 | (10) |
| 1.4.3 国外研究机构的研究现状      | (12) |
| 1.4.4 国内研究现状及关键技术      | (14) |
| 参考文献                   | (16) |
| 2 智能泵结构形式及实现模式研究       | (23) |
| 2.1 机载液压系统对智能泵源提出的要求   | (23) |
| 2.2 智能泵与飞控系统的关系        | (26) |
| 2.3 智能泵结构形式选择          | (29) |
| 2.3.1 智能泵主要结构形式        | (29) |
| 2.3.2 智能泵结构方案          | (31) |
| 2.4 智能泵实现模式            | (34) |

|                                    |             |
|------------------------------------|-------------|
| 2.4.1 排量调节模式 .....                 | (34)        |
| 2.4.2 转速调节模式 .....                 | (35)        |
| 2.4.3 转速—排量复合调节模式 .....            | (36)        |
| 2.5 智能泵源试验系统的总体方案 .....            | (37)        |
| 2.6 本章小结 .....                     | (40)        |
| 参考文献 .....                         | (41)        |
| <b>3 驱动系统结构及其静动态特性分析 .....</b>     | <b>(43)</b> |
| 3.1 泵源驱动系统的形式 .....                | (43)        |
| 3.2 智能泵源驱动系统方案 .....               | (45)        |
| 3.2.1 泵控液压马达速度伺服系统 .....           | (46)        |
| 3.2.2 阀控液压马达速度伺服系统 .....           | (48)        |
| 3.2.3 阀泵联合控制液压马达速度伺服系统 .....       | (51)        |
| 3.2.4 方案比较 .....                   | (54)        |
| 3.3 电液速度伺服系统静态特性分析 .....           | (55)        |
| 3.3.1 串联阀控液压马达速度伺服系统 .....         | (55)        |
| 3.3.2 并联阀控液压马达速度伺服系统 .....         | (60)        |
| 3.4 电液速度伺服系统动态特性分析 .....           | (65)        |
| 3.4.1 串联阀控液压马达速度伺服系统 .....         | (65)        |
| 3.4.2 并联阀控液压马达速度伺服系统 .....         | (72)        |
| 3.5 电液速度伺服系统静动态特性比较 .....          | (79)        |
| 3.6 本章小结 .....                     | (81)        |
| 参考文献 .....                         | (81)        |
| <b>4 功率电传作动系统方案研究及系统建模仿真 .....</b> | <b>(84)</b> |
| 4.1 电机—泵复合控制作动器的建模 .....           | (84)        |
| 4.1.1 无刷直流电机的建模与仿真 .....           | (84)        |
| 4.1.2 变量泵伺服变量机构的建模及仿真 .....        | (89)        |
| 4.1.3 电机—泵复合控制作动系统的建模 .....        | (93)        |

|                                         |              |
|-----------------------------------------|--------------|
| 4.2 电机—泵—阀复合控制系统的数学模型建立及理论分析 .....      | (94)         |
| 4.2.1 电机—泵—阀复合控制并联式作动系统的组成及工作原理 .....   | (95)         |
| 4.2.2 电机—泵—阀并联式复合控制作动系统数学模型的建立 .....    | (96)         |
| 4.2.3 电机—泵—阀并联式复合控制作动系统的仿真研究 .....      | (98)         |
| 4.3 本章小结 .....                          | (105)        |
| 参考文献 .....                              | (106)        |
| <b>5 电机—泵复合控制作动系统的相乘非线性研究 .....</b>     | <b>(107)</b> |
| 5.1 非线性控制方法 .....                       | (107)        |
| 5.1.1 非线性控制的古典方法 .....                  | (107)        |
| 5.1.2 非线性的现代控制方法 .....                  | (108)        |
| 5.2 非线性系统的线性化和最优二次型基本理论 .....           | (111)        |
| 5.2.1 非线性系统的线性化理论 .....                 | (111)        |
| 5.2.2 最优控制的基本理论 .....                   | (115)        |
| 5.3 基于反馈线性化的最优控制在电机—泵复合控制作动系统中的应用 ..... | (118)        |
| 5.3.1 电机—泵复合控制系统的仿射非线性方程建立 .....        | (119)        |
| 5.3.2 仿射非线性系统的相对阶、线性化和零动态 .....         | (121)        |
| 5.3.3 反馈控制器的设计及其稳定性 .....               | (125)        |
| 5.3.4 运用二次型设计状态反馈控制器 .....              | (128)        |
| 5.3.5 系统仿真 .....                        | (129)        |
| 5.4 本章小结 .....                          | (131)        |
| 参考文献 .....                              | (131)        |
| <b>6 电机—泵复合系统的协调控制 .....</b>            | <b>(134)</b> |
| 6.1 粒子群优化算法的基本理论 .....                  | (135)        |
| 6.1.1 算法思想 .....                        | (135)        |
| 6.1.2 PSO 算法的收敛性分析 .....                | (139)        |
| 6.1.3 PSO 算法流程 .....                    | (140)        |

|                                        |              |
|----------------------------------------|--------------|
| 6.1.4 基于 MATLAB 的算法流程 .....            | (140)        |
| 6.1.5 PSO 算法的应用 .....                  | (144)        |
| 6.1.6 实例 .....                         | (145)        |
| 6.2 PSO 算法的改进 .....                    | (147)        |
| 6.3 电机—泵复合系统的协调控制 .....                | (150)        |
| 6.3.1 电机—泵复合系统的模糊控制 .....              | (150)        |
| 6.3.2 电液复合系统的建模 .....                  | (151)        |
| 6.4 粒子群算法优化电液复合作动系统 .....              | (154)        |
| 6.4.1 适应度函数 .....                      | (154)        |
| 6.4.2 约束条件 .....                       | (155)        |
| 6.4.3 PSO 算法步骤 .....                   | (155)        |
| 6.4.4 仿真分析 .....                       | (156)        |
| 6.5 基于粒子群算法的电机—泵复合控制作动系统的 PID 控制 ..... | (157)        |
| 6.5.1 PID 控制 .....                     | (157)        |
| 6.5.2 适应度函数的选取和 PID 参数范围的确定 .....      | (159)        |
| 6.5.3 MPSO 算法 .....                    | (161)        |
| 6.5.4 仿真分析 .....                       | (164)        |
| 6.6 本章小结 .....                         | (165)        |
| 参考文献 .....                             | (165)        |
| <b>7 自适应模糊滑模变结构控制 .....</b>            | <b>(170)</b> |
| 7.1 引言 .....                           | (170)        |
| 7.2 传统滑模变结构控制的理论基础 .....               | (170)        |
| 7.2.1 线性变结构系统的一般性质 .....               | (171)        |
| 7.2.2 设计变结构控制的基本步骤 .....               | (173)        |
| 7.2.3 变结构控制中实现到达条件的趋近律 .....           | (173)        |
| 7.2.4 多输入线性变结构系统的递阶控制 .....            | (175)        |
| 7.2.5 变结构控制中切换函数的设计 .....              | (176)        |
| 7.2.6 自由递阶控制及其简化 .....                 | (178)        |

|                                                 |              |
|-------------------------------------------------|--------------|
| 7.3 自适应模糊滑模变结构控制 .....                          | (180)        |
| 7.3.1 滑模变结构控制中的抖振及减抖措施 .....                    | (180)        |
| 7.3.2 变结构控制的控制过程分析 .....                        | (185)        |
| 7.3.3 模糊趋近律 .....                               | (188)        |
| 7.3.4 模糊滑模变结构控制 .....                           | (195)        |
| 7.4 本章小结 .....                                  | (198)        |
| 参考文献 .....                                      | (199)        |
| <b>8 模糊滑模变结构控制泵阀并联作动系统的研究 .....</b>             | <b>(201)</b> |
| 8.1 引言 .....                                    | (201)        |
| 8.2 基于自适应模糊滑模变结构控制器的设计 .....                    | (201)        |
| 8.2.1 电机—泵—阀并联式作动系统的线性化复合 .....                 | (202)        |
| 8.2.2 建立系统的跟踪偏差状态方程 .....                       | (203)        |
| 8.2.3 切换函数的设计 .....                             | (204)        |
| 8.2.4 控制向量的设计 .....                             | (205)        |
| 8.2.5 主要给定参数的确定 .....                           | (206)        |
| 8.2.6 结合棒棒控制的变结构控制 .....                        | (206)        |
| 8.3 模糊变结构控制算法在电机—泵—阀复合控制并联式<br>作动系统中的仿真研究 ..... | (207)        |
| 8.3.1 模糊变结构控制算法设计 .....                         | (207)        |
| 8.3.2 模糊变结构控制算法说明 .....                         | (209)        |
| 8.3.3 电机—泵—阀并联式作动系统的仿真 .....                    | (211)        |
| 8.3.4 电机—泵—阀复合控制并联式作动系统的控制权值<br>动态校正仿真研究 .....  | (215)        |
| 8.4 本章小结 .....                                  | (218)        |
| 参考文献 .....                                      | (219)        |
| <b>9 基于 PXI 总线的电机—泵复合控制实验研究 .....</b>           | <b>(221)</b> |
| 9.1 实验系统的设计 .....                               | (221)        |

|       |                        |       |
|-------|------------------------|-------|
| 9.1.1 | 技术参数依据                 | (221) |
| 9.1.2 | 实验台原理图                 | (222) |
| 9.1.3 | 主要元件的参数选取              | (222) |
| 9.1.4 | 油源系统                   | (224) |
| 9.1.5 | 实验测试项目                 | (225) |
| 9.2   | 加载系统                   | (227) |
| 9.2.1 | 工作原理                   | (227) |
| 9.2.2 | 加载系统的控制                | (227) |
| 9.3   | 虚拟仪器的概述                | (228) |
| 9.3.1 | 虚拟仪器的概念                | (228) |
| 9.3.2 | 虚拟仪器的构成及分类             | (229) |
| 9.4   | 测控系统组成                 | (232) |
| 9.4.1 | 测控系统硬件                 | (232) |
| 9.4.2 | 测试系统软件                 | (234) |
| 9.5   | 虚拟仪器控制面板的设计与实现         | (237) |
| 9.6   | 在 LabVIEW 中构造复杂多任务应用程序 | (238) |
| 9.6.1 | 测试系统中常见的线程及其关系         | (238) |
| 9.6.2 | LabVIEW 上复杂多任务的实现      | (240) |
| 9.7   | LabVIEW 中高精度软定时器的实现    | (241) |
| 9.7.1 | VC 中定时器的实现方法           | (242) |
| 9.7.2 | 在 LabVIEW 中使用高精度定时器    | (243) |
| 9.8   | 虚拟仪器中采样数据的预处理          | (243) |
| 9.8.1 | 软件调零                   | (243) |
| 9.8.2 | 刻度标定                   | (244) |
| 9.8.3 | 标度变换                   | (245) |
| 9.9   | 虚拟仪器中的数据管理             | (247) |
| 9.9.1 | 测试系统中的数据管理             | (247) |
| 9.9.2 | 基于数据库管理的虚拟仪器系统         | (248) |
| 9.10  | 虚拟仪器测试系统的抗干扰设计         | (249) |

|                             |              |
|-----------------------------|--------------|
| 9.10.1 抗干扰设计应采取的措施 .....    | (249)        |
| 9.10.2 接地 .....             | (250)        |
| 9.10.3 软件抗干扰设计 .....        | (252)        |
| 9.11 基于 PXI 总线的测控系统误差 ..... | (257)        |
| 9.11.1 直接测量结果误差 .....       | (257)        |
| 9.11.2 误差合成的基本公式 .....      | (258)        |
| 9.12 电机—泵复合控制的仿真与实验结果 ..... | (259)        |
| 9.12.1 电机—泵复合控制的仿真结果 .....  | (259)        |
| 9.12.2 电机—泵复合控制的实验结果 .....  | (260)        |
| 9.13 本章小结 .....             | (264)        |
| 参考文献 .....                  | (264)        |
| <b>附录 参数符号表</b> .....       | <b>(266)</b> |

# 1 绪 论

飞机机载作动系统是指在飞机上实现具有相当功率输出的机械作动系统,包括从二次动力源开始至执行机构的全套功率传输转换设备,以及相应的检测设备和控制系统。机载作动系统的优劣直接影响到飞机的整体性能,因此,机载液压系统在保证飞行安全和提高飞行性能方面扮演着重要的角色,下一代飞机对机载作动系统提出了更高的要求。

矢量控制、余度技术和多舵面已成为操纵系统中必不可少的要素,对能源装置和作动系统的要求也在不断提高。目前,国外新型作动系统的研究从两方面着手,一方面研究更高压力的液压泵源和节能泵,另一方面研究完全抛弃传统的液压作动系统,采用功率电传的作动系统。国内在这方面的研究还处于起步阶段,还须进行更深一步的研究。

## 1.1 未来战斗机对机载作动系统的要求<sup>[1]</sup>

综合未来战斗机发展的趋势,它将对机载作动系统提出如下要求:

### 1. 作动系统元件的体积要小、重量要轻

未来战斗机要求具有高超音速巡航能力,从高超音速飞机的气动力模型来看,未来飞机的机翼将变得更小更薄,这就必然要求装在机翼内的作动系统元件的体积要小、重量要轻。例如,美国空军要求下一代战斗机机翼内的液压部件体积要比现役飞机缩小60%。

### 2. 作动系统的功率要大

从未来战斗机降低静稳定度和提高机动性的要求,实现可调推力矢量控制所要提供的动力等方面来看,加大作动系统的功率势在必行。资料表明,美国F-22战斗机上作动系统的功率约为F-15战斗机作动系统功率的2倍。

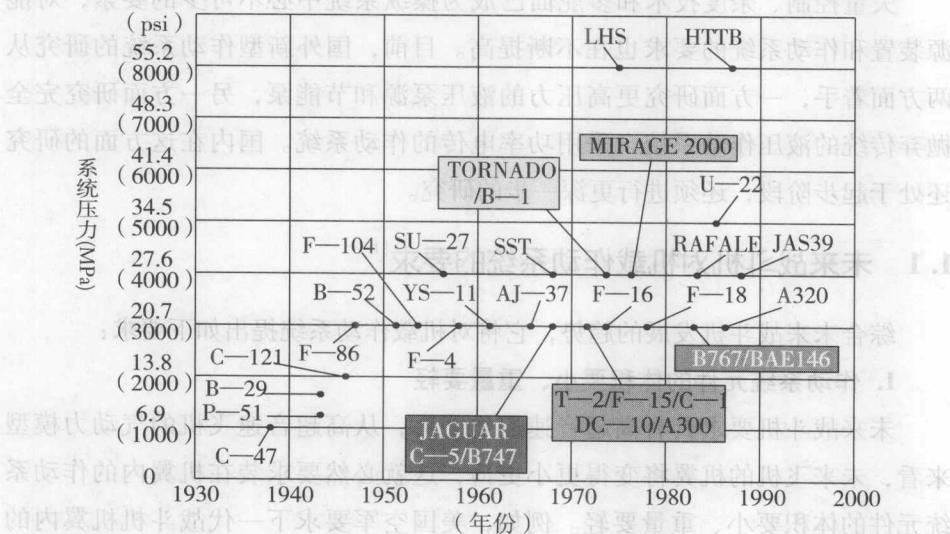
### 3. 液压系统的维修性要好

系统的可维修性将是未来液压系统的关键性能指标之一。为了提高系统的维修性,采用功率电传是实现上述指标的有效手段之一。一方面是由于电气参数本身易于检测,另一方面是由于电传作动系统中微处理机具有很强的机内自测能力,从而在提高设备检测功能的同时降低了对地面设备和维护人员的要求。

## 1.2 未来战斗机液压作动系统的主要发展方向<sup>[1-16]</sup>

### 1. 高压化

目前,国内外多数战斗机都采用 20.7 兆帕的液压系统。20 世纪 70 年代中期,国外有少量新机开始装备 27.6 兆帕的压力体制的液压系统。现在,美国正在研制 55.2 兆帕的液压系统。如图 1-1<sup>[2]</sup>所示,是世界各国主要机型液压系统的工作压力。



民用运输机: A300、A320、B747、B767、BAE 146、DC—10、SST、YS—11  
 军用运输机: C—1、C—5、C—47、C—121、V—22  
 战斗机: AJ—37、F—4、F—15、F—16、F—18、F—86、F—104、JAGUAR、JAS39、  
 MIRAGE 2000、P—51、RAFALE、SU—27、TORNADO  
 轰炸机: B—1、B—29、B—52  
 实验机: LHS、HTTB

图 1-1 世界各国主要机型液压系统的工作压力

就传动力和做功而言, 高压意味着可以减小动力元件的尺寸, 因而可以减轻液压系统的结构重量, 增加附件动作的敏捷性。图 1-2 显示了飞机液压系统压力增加后, 飞机重量减轻和体积减小的情况, 从图 1-2 可以看出, 当系统压力从 20.7 兆帕提高到 55.2 兆帕时, 液压系统的重量最大可以减轻 30%、体积最大可以减小 40%。研究表明: 液压系统每减少 1 千克, 可以使飞机结构重量减轻 4 千克, 而飞机承载量可增加 15 千克; 另外, 从未来高性能飞机的飞行性能与合理的重量分配来看, 最有利的机载液压系统重量应小于全机重量的 1%, 而目前机载液压系统的重量占飞机全重的 3% ~ 15%。实验表明, 就目前飞机液压系统元件普遍采用的钢或合金钢材料来说, 34.5 兆帕是最佳压力, 如果采用钛合金材料, 最佳压力则为 55.2 兆帕。

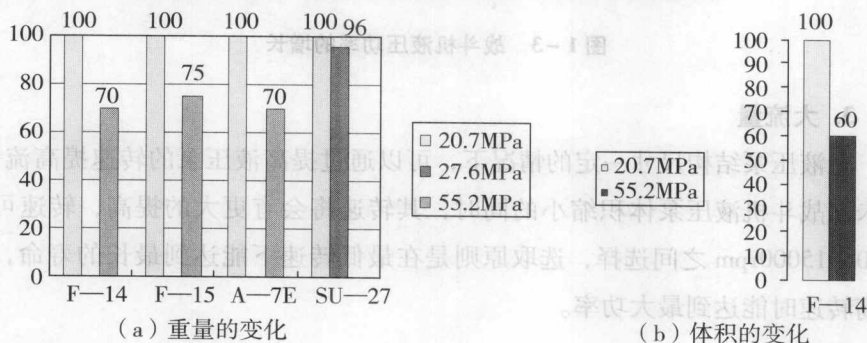


图 1-2 飞机液压系统压力升高后液压系统重量和体积的变化

## 2. 大功率

未来飞机要求液压系统的功率大幅度提高的主要原因为: ① 飞机性能的提高使得机上利用液压动力的控制操纵功能增多, 例如发动机及矢量推力的控制使得机载液压功率增加 50% ~ 100%; ② 飞机飞行速度的加快和机动性的提高导致飞行控制舵面承受的气动力载荷变得更大、作动速率也更快, 因而驱动这些舵面的液压作动器的功率将更大; ③ 主动控制技术的应用和发展, 使得飞机液压系统的功率将不断提高。如 YF-22A 飞机液压系统的功率为 560 千瓦, 约为 F-15 战斗机的两倍; YF-23A 飞机液压系统的功率也在 450 千瓦以上。对先进战斗机来讲, 要求其液压系统应具有近 600 千瓦的功率。目前, 高性能战斗机所需的液压系统的功率为第二次世界大战时的 5 倍以上;

未来飞机需要的液压系统的功率也将是现在的 5 倍以上。总之，大功率是飞机液压系统发展的必然趋势。图 1-3 显示了战斗机液压功率的增长趋势。

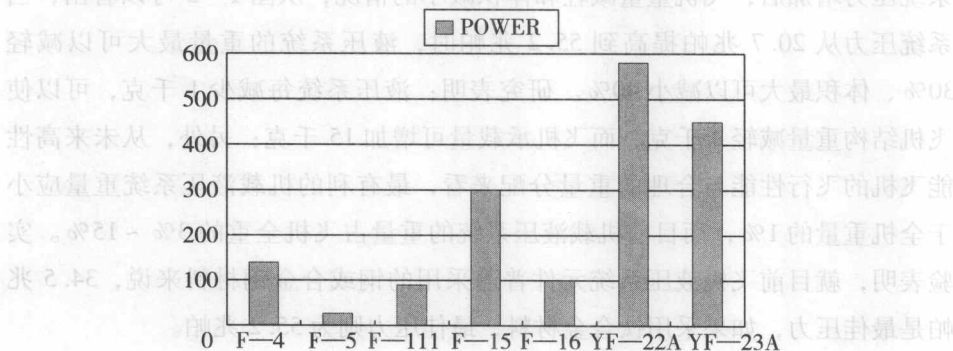


图 1-3 战斗机液压功率的增长

### 3. 大流量

在液压泵结构尺寸一定的情况下，可以通过提高液压泵的转速提高流量。在未来战斗机液压泵体积缩小的同时，其转速将会有更大的提高，转速可在 3000 ~ 15000rpm 之间选择，选取原则是在最低转速下能达到最长的寿命，在最高转速时能达到最大功率。

### 4. 变压力

变压力液压系统是实现液压系统节能的一种有效手段。试验结果表明，一架战斗机实际需要高压（55.2 兆帕）工作的时间还不到整个飞行时间的 10%，其余大部分时间采用低压（20.7 兆帕）已完全能够满足工作需要，因此，国外正在研制变压力液压系统。在变压力液压系统中，系统的压力随飞行控制舵面铰链力矩而变化，压力由电调节的液压泵提供，而控制部分的关键部件是一台多通道的微处理机。

### 5. 智能化

为了全面优化液压泵，未来战斗机将用微处理机来控制液压泵。这种液压泵将由液压泵主体、功率调节模块和控制模块组成。在整个装置中，将把微处理机、传感器、控制阀和其他小型电子部件组合到标准的液压系统中，以提供控制液压泵排量所必需的反馈信号，从而控制液压泵的排量。每一个