

民用飞机液压系统发展与展望



焦裕松*

航空工业南京机电液压工程研究中心, 江苏 南京 211106

摘 要:本文介绍了飞机液压系统的具体组成和工作原理,回顾了民机液压系统的发展历程,对民机液压系统的发展趋势进行了展望。针对我国未来民机发展的需求,本文提出了民机液压系统研究的一些新的关键技术,具体包括分布式技术、轻量化技术和智能化技术,并做了详细介绍。对民机液压系统发展历程的回顾和未来趋势的展望,为国内民机液压系统的发展提供技术支持。

关键词:民机; 液压系统; 分布式; 轻量化; 智能化

中图分类号:TH137

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.12.001

液压系统是指从机上或机外(发动机、电机、APU、EPU、RAT等)获得能量^[1],并将获得的能量转换为液压能,对液压能进行调节和分配,传输给飞机上各类液压作动装置的机电子系统。这些作动装置包括飞控作动、前轮转弯、机轮刹车等系统中需要利用液压能进行动作转换或伺服操纵的机构,液压系统与机内外系统/环境形成的拓扑结构如图1所示。液压系统对保证飞机安全正常飞行、完成设计性能以及保证飞行安全都起着至关重要的作用。随着民用飞机对安全性、功率重量(质量)比(简称功重比)的不懈追求以及多电化、增材制造等技术的牵引下,近些年,民机液压系统的发展呈现出一些新的特征,本文将在梳理其发展历程的基础上对这些特征进行阐述。

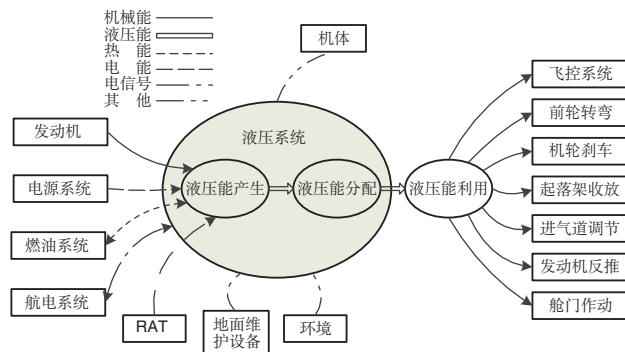


图1 液压系统拓扑图

Fig.1 The topological diagram of a hydraulic system

1 发展历程

液压系统早在20世纪30年代就出现于飞机上,用于驱动可收放的起落架。自那时起,通过应用液压系统动力执行的任务数目不断增加,因而大大增加了功率需求,液压系统的压力(压强)等级也在不断提升,可以说液压系统在所有现代民机上都起到了重要的作用。

液压助力飞行操纵系统的出现是液压动力应用的里程碑式案例,飞行员借助它可以在速度和机动要求不断增高的情况下仍能控制舵面运动。这一应用将液压系统带入到影响飞行安全性的关键系统领域,在这种场合不允许因单个故障而危及飞行安全。考虑到以上原因,飞机液压系统被设计成多套相互独立的余度系统,而单套液压系统又设置多台液压泵以提高系统的可靠性。

直到目前,液压系统仍然是民机主副飞行操纵系统、起落架收放系统、刹车系统的最有效动力源。

应用液压作为传输动力的方法从一开始就不无挑战。在所考虑的各种取代方法中,主要竞争来自电气系统的应用。全电/多电飞机概念的兴起,促使基于功率电传的电作动系统成为研究热点,在过去40多年中,已有许多技术论文评论了两者的优缺点。比较发现,液压操纵部件由于相对工作刚度大、快速性、执行机构的自润滑性以及故障回中等特性优势,目前仍然是飞控作动系统的首选方案。但随着稀土永磁材料的发展,电作动的核心部件——电机的功

收稿日期: 2019-10-10; 退修日期: 2019-10-20; 录用日期: 2019-11-10

*通信作者. Tel.: 010-85672631 E-mail: ast@aviationnow.com.cn

引用格式: Jiao Yusong. The development and prospect of hydraulic power system in civil aircrafts[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(12): 1-6. 焦裕松. 民用飞机液压系统发展与展望[J]. 航空科学技术, 2019, 30(12): 1-6.

率重量比得到了较大提升,在中小功率(3kW以下)作动场合已能与液压作动相匹敌。而在更大功率场合,液压与电作动相结合的分布式液压与作动系统将成为未来的发展方向。液压系统与电气系统在作动方面的比较,见表1。

表1 液压作动与电作动

Table 1 Hydraulic actuation and electromechanical actuation

类型	优点	缺点	建议的适用范围
电作动	结构原理简单,成本低,电缆连接和在飞机上的敷设比较容易	速度响应慢;启动、制动、换向慢;惯性大;传动间隙大;输出功率重量比小,体积大	用于应急系统的执行机构,或用于气动调整片的操纵;采用新技术、新材料提高性能后有广泛的应用前景
液压作动	速度响应快、增益高、频带宽,在有负荷的情况下,仍可输出很高的速度;启动、制动、换向快;惯性小;传动间隙小;输出功率重量比大	对油液的污染度控制要求高;精密度高,设计、工艺复杂;成本较高;存在密封失效的风险	用于现代高速、高机动性的飞机

另一方面,模拟和数字技术的快速发展,也带动了液压系统在监控及执行控制功能上的快速进步。液压系统故障预测与健康管、智能变压力系统等新技术得到重视和研究,它可以克服常规液压系统存在的某些缺点,使液压系统变得更加健壮。

2 发展趋势

2.1 分布式

目前,民机液压系统大多采用集中式油源,发动机驱动泵为飞机各个用户提供液压能。基于三套或四套容错设计的集中式液压能源系统已成为民机液压系统的典型配置。随着大型客机的发展,集中式液压系统的缺点显得不可忽视,长管道占飞机液压系统总重量的比重越来越大。电动液压能源系统由于可以布置于用户附近,自带控制单元,不仅能够降低飞机的整体重量,而且分布式的布局将大大提高飞机的可靠性和维修性。目前,A380率先采用了三套分布式电动液压能源系统(见图2),作为前轮转弯系统与刹车系统的备用液压源。

将分布式液压能源与终端作动器进一步集成,则形成了电静液作动器(EHA),EHA作为飞控系统的重要组成部分,是体现飞机技术先进性的重要标志^[2]。已经服役的A380和A350(见图3)飞机应用多电技术成功取消了一套集中式液压系统,在1/3以上的主飞控作动系统中使用了电作动系统,

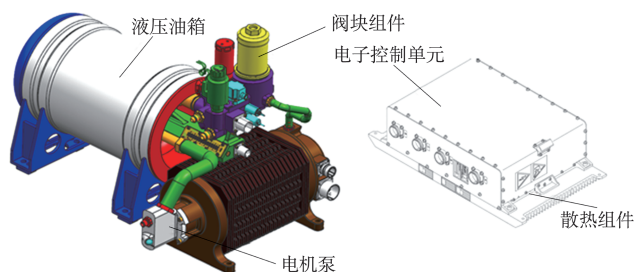
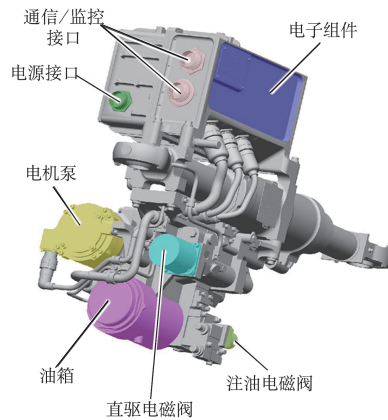
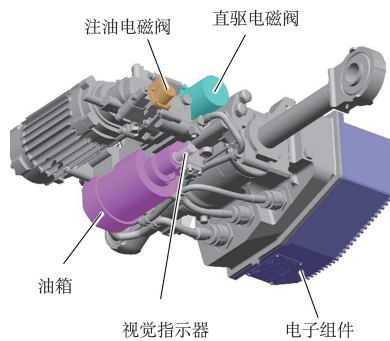


图2 A380分布式电动液压能源系统

Fig.2 The distributed electro-hydraulic energy system of A380



(a) 方向舵EHA



(b) 副翼EHA

图3 A350 EHA主要组成元件

Fig.3 The main components of EHA used in A350

主要包括EHA和电备份液压伺服作动器(EBHA,核心技术与EHA相同)。以EHA为典型代表的电作动系统的使用,使得飞机能够获取更多的收益,主要表现在以下三个方面:

(1) 减少一套液压系统,减轻了飞机重量,如A380采用5000psi(11bf/in²=6.895kPa)液压压力体制和EHA/EBHA技术后减重约1t。

(2) 功率传输方式采用具有一定柔性的电缆替代刚性的液压管路,使得飞机机载设备布局和总体设计具有更大的灵活性,功率管理、故障隔离和容错运行性能得到明显

提高。

(3) EHA/EBHA 的运用,增强了飞机的自检能力,提高了可靠性,同时也降低了外场维护需求,所需要的维护设备和维护工作量大大减少,这主要得益于减少了更换液压油滤、添加液压油、管路的检查与更换等定期维护工作。

空中客车公司民机液压系统的电驱动化发展趋势^[3]如图4所示,可以预期,在民机领域,随着技术成熟度的提升,基于发动机驱动泵的集中式液压系统将逐步被电驱动化的分布式液压系统代替。

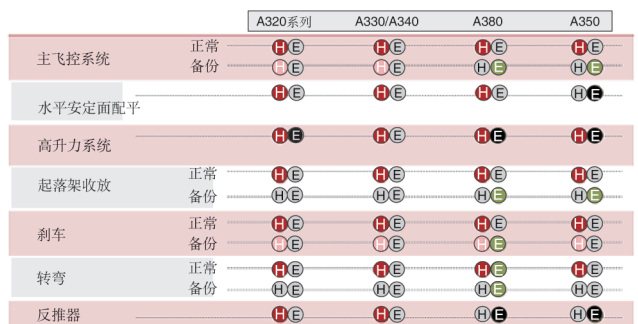


图4 空客民机液压系统电驱动化发展趋势

Fig.4 The development of electric drive used in hydraulic power system of airbus civil aircrafts

2.2 轻量化

提高液压系统的功率重量比,可以增加飞机的有效载荷,研究表明:液压系统重量减少1kg,可以使飞机结构重量减少4kg,或者使飞机承载能力提高15kg。因此,轻量化成为液压系统发展的永恒追求。目前,围绕液压系统轻量化主题的研究与应用热点主要是提高系统压力及采用增材制造技术。

(1) 高压液压系统

如果保持液压系统的输出功率不变,即流量与压力的乘积不变,根据液压系统的相似准则,流量正比于液压元件体积的三分之二次方与流速的乘积。由此可见,提高液压系统压力可以减少流量需求,从而减小液压元件的体积与重量。

国外近30年来的大量研究表明:飞机液压系统减小体积和降低重量的最有效途径是提高工作压力。以3000psi作为飞机液压系统的基础压力,综合考虑多种设计因素,在不计最初的试制成本时,使系统重量最小的压力是4000psi;采用钢或合金钢材料的液压系统,最佳压力是5000psi;采用钛合金材料的液压系统,最佳压力是8000psi。表2给出了以3000psi为基准压力,提高系统工作压力之后飞机液压系统重量、体积的变化情况^[4]。

当前,5000psi 高压等级液压系统已成为体现民机技术水平和竞争力的重要因素,是民机未来发展的必然方

表2 液压系统重量、体积变化与提高工作压力的关系

Table 2 The influences of increasing pressure on the changes of weight and volume of a hydraulic power system

压力提高情况		3000psi↗ 4000psi	3000psi↗ 5000psi	3000psi↗ 8000psi
系统变化	重量降低/%	2.46	12.2	30
	体积缩小/%	13.8	28.3	40

向。图5展示了飞机液压系统压力高压化发展趋势,可以看出波音787、空中客车公司A380及A350XWB等大型民机均采用了5000psi压力等级。

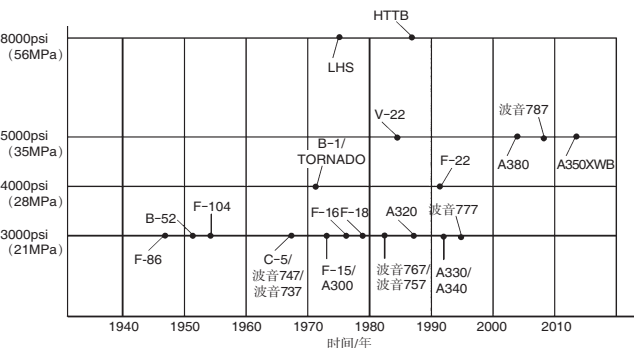


图5 液压系统高压化发展趋势

Fig.5 The development of high pressure technology in hydraulic power system

(2) 增材制造技术

高性能金属构件增材制造技术是以金属粉末为原料,通过高能激光逐层熔化沉积生长(增材制造),直接从零件数字化模型一步实现大型复杂整体高性能金属构件的“近终成形”。将增材制造技术应用于民机液压系统中的复杂液压产品,通过流道优化、拓扑优化、工艺优化后,可显著降低液压产品重量^[5,6]如图6所示。以德国利勃海尔公司为例,通过使用增材制造技术,使A380液压作动器重量减轻35%,体积减小15%,同时产品零件的数量也减少了15%。液压系统主要部件液压泵、液压油箱、液压蓄压器等与液压作动器有类似的设计方法,增材制造技术完全可以作为液压系统部件的减重手段,实现液压系统的轻量化。

2.3 智能化

随着电力电子和计算机技术的发展,复杂的逻辑控制方法被引入液压系统备用泵的启停控制中,可以根据大流量和故障工况,适时启动备用泵源,有效地降低了飞行员的操作负荷,提高了飞行安全性^[7,8]。同时,随着传感器技术的发展,对系统状态参数和健康情况的监视也不断完善,系统的油量、压力等状态以及过热、低压等失效情形,可以直观

地展示在驾驶舱内,有助于飞行员及时了解飞机状况并做出反应,还能够作为系统自动控制和故障重构的输入条件。因此,飞机液压系统正在逐步变得智能化。

(1) 故障预测与健康管理

随着故障预测与健康管理 (Prognostics and Health Management, PHM) 技术在民机中的不断推广,以及飞机机电系统监测技术和能力的提高,民机液压系统状态监测与预测技术的研究基础已经成熟。液压系统状态监测和预测能力的提升不仅可以在液压系统发生故障前发出警告,避免因发生故障可能导致的严重后果,而且可以通过寿命预测,合理灵活地安排维修任务,提高民机的利用率和经济性^[9],如图7所示。

民机液压系统的 PHM 技术研究需要突破液压系统 PHM 顶层设计和需求分析、液压系统故障模式分析与监控布局、油液在线监测、液压系统与关键部件故障诊断与预测等多项关键技术。

(2) 变压力控制

提高液压系统压力会带来一系列的好处,但随着液压系统压力和功率的增加,发热量、部件磨损程度也随之增加,因而减少液压系统的发热量、提高能源利用效率又成为需要解决的主要问题。变压力液压系统是一种按需使用液压动力的系统,具有节能和减少发热量的优点,并且系统重量也得到有效减轻。这种变压力依靠自身的传感信息和控制算法实现,已具备智能化的特征。

日本富士重工业股份有限公司对飞机变压力操纵进行了大量的研究,他们对大型机和小型机飞行中的压力、流量进行了统计,结果表明,飞行过程中飞机在高压或大流量状态下的工作时间是很短的。最大压力仅在飞机飞行中的某些短时间飞行状态需要,如起飞、着陆等,这类飞行状态约占飞行时间的 10%,其余飞行状态(90%飞行时间)下,低压就能保证飞机控制的全部需要。经过对比研究,变压力系统的功耗比恒压系统的功耗要小得多,温升也小得多。



图6 增材制造技术在液压类产品中的应用

Fig.6 The application of additive manufacturing in hydraulic products

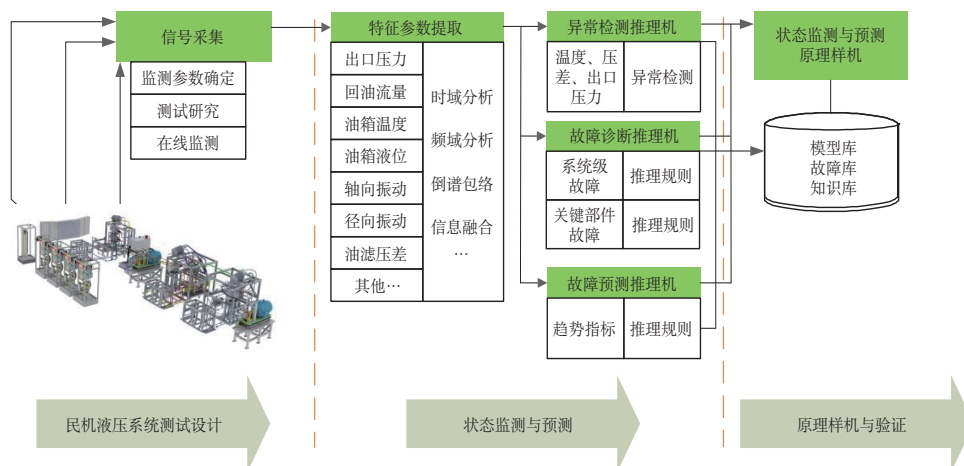


图7 液压系统PHM研究方案

Fig.7 The research protocol for PHM of hydraulic power system

从目前国内外研究进展来看,变压力一般可分为双级变压力和无级调压两种类型,由于液压系统主液压泵一般要为多个用户提供压力,各用户对压力的需求不一致,采用可靠性更高的双级变压力更实用^[10]。图8为基于改变调压弹簧压缩量的双级变压力变量泵原理图,当电磁通断阀断电时,调压弹簧的安装座在弹簧力作用下处于右位,调压弹簧的预压缩力较小,系统在调压阀的作用下平衡于低压状态,相反的情况下,电磁通断阀通电,调压弹簧预压缩力变大,系统处于高压工作状态。

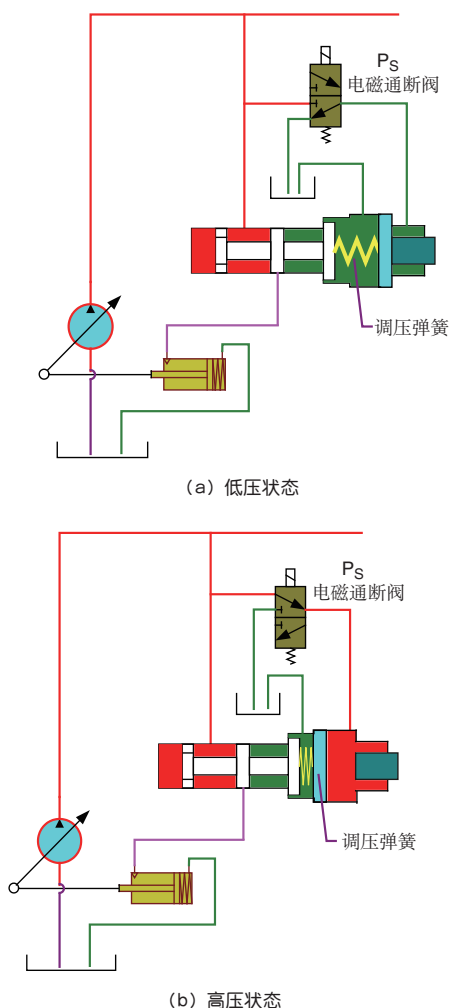


图8 改变调压弹簧压缩量的双级变压力变量泵的原理图
Fig.8 The schematic diagram of a two-stage variable pressure pump that can change the compression amount of the spring

变压力控制的另一个典型应用场景是刹车系统的能源供给,由于防滑刹车瞬时的流量需求非常大,一般采用蓄压器作为液压能调节装置,补充瞬时流量,防止压力的突变继而影响

其他系统。当采用分布式液压能源为刹车系统供压时,采用基于恒功率的压力流量智能调节方案具有较明显的优势。

采用恒功率控制方案的特点在于:在不提高电机功率的前提下,提高流量输出;通过合理设置恒功率点满足防滑刹车的高流量需求。在同样的电机峰值扭矩条件下,利用该种恒功率控制方式的泵能够充分发挥及利用电机的能量,进而能减小电机功率需求。电机功率减小,体积、重量也相应地减小,功率重量比上有较大优势。目前,A380刹车系统的备用分布式液压能源已采用此种形式的控制方式,相比恒压变量油源节省了约一半的提取电功率(见图9)。

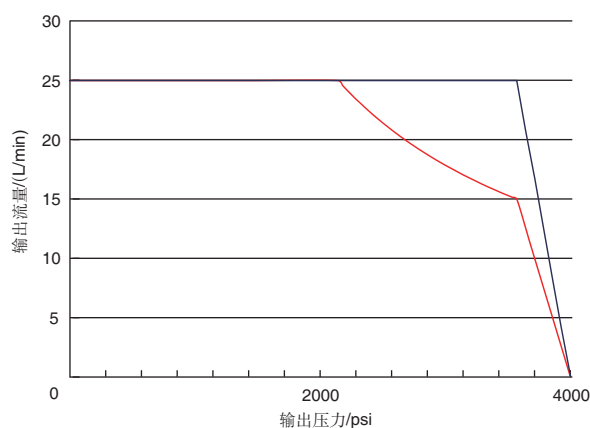


图9 恒压力与恒功率压力流量曲线对比

Fig.9 Pressure-flow curves in two situations with constant pressure and constant power

3 结束语

随着国家日益富强和人民生活水平的不断提高,对便捷出行的需求越来越强烈,民用航空也迎来了最好的发展机遇。液压系统作为飞机各类操纵装置的动力源,目前仍是各类新设计民机的首选方案,而且逐渐向分散化、轻量化和智能化方向发展。把握民机液压系统的最新进展能够指明相关技术的研究方向,提高民机液压系统的性能,对提升我国民机设计制造水平具有重要意义。

AST

参考文献

- [1] 莫伊尔,西布里奇. 飞机系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2011. Moir, Seabridge. Aircraft systems[M]. Beijing: Aviation Industry Press, Beijing, 2011. (in Chinese)
- [2] 邱献双. 先进的作动器技术研究[J]. 航空科学技术, 2009(4):6-8. Qiu Xianshuang. Research on the advanced actuators technique [J]. Aeronautical Science & Technology, 2009(4):6-8. (in Chinese)
- [3] Larrieu N, Lamoussiere X, Andrieu L. AIRBUS research and

- perspectives for aircraft control actuation[C]// Proceedings of the eighth International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, Toulouse, France, 2018.
- [4] 王占林. 飞机高压液压能源系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004.
- Wang Zhanlin. High pressure hydraulic energy systems of aircrafts [M]. Beijing: Beihang University Press, 2004. (in Chinese)
- [5] 杨恩泉. 3D打印技术对航空制造业发展的影响[J]. 航空科学技术, 2013(1):13-17.
- Yang Enquan. The influence of 3D printing to the development of aviation manufacturing[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(1):13-17. (in Chinese)
- [6] Kausch M, Meyer M, Kroll L, et al. Novel hydraulic lightweight manifolds in aviation[C]// Proceedings of the fourth International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, Toulouse, France, 2010.
- [7] 杨华勇, 丁斐, 欧阳小平, 等. 大型客机液压能源系统[J]. 中国机械工程, 2009, 20(18):2152-2158.
- Yang Huayong, Ding Fei, Ouyang Xiaoping, et al. Hydraulic power systems for trunk line aircrafts [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(18):2152-2158. (in Chinese)
- [8] 朴学奎. 大型民用客机液压系统的对比与分析[J]. 航空科学技术, 2011(6):15-17.
- Piao Xuekui. Contrast and analysis on civil aircraft hydraulic system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2011(6):15-17. (in Chinese)
- [9] 陈丽君, 姚建勇. 机载液压系统故障诊断与健康管理的航空精密制造技术, 2016, 52(2):5-9.
- Chen Lijun, Yao Jianyong. Aircraft hydraulic system fault diagnosis and health management status [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(2):5-9. (in Chinese)
- [10] 陈焕明, 刘卫国, 习仁国, 等. 双压力柱塞泵建模与仿真研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(8):71-74.
- Chen Huanming, Liu Weiguo, Xi Renguo, et al. Research on the modeling and simulation of the double-pressure axial piston pump [J]. Machine Tool & Hydraulic, 2012, 40(8):71-74. (in Chinese) (责任编辑 王为)
- 作者简介**
焦裕松(1962—)男, 博士, 研究员。主要研究方向: 飞机液压系统和飞控作动系统研究。
Tel:010-85672631 E-mail:ast@aviationnow.com.cn

The Development and Prospect of Hydraulic Power System in Civil Aircrafts

Jiao Yusong*

AVIC Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China

Abstract: This paper first introduces the main components and working principle of an aircraft hydraulic power system, then reviews the development history of the civil aircraft hydraulic power system, and finally looks forward to the trend of the system. In view of the future development of civil aircrafts in China, this paper proposes some key points for the study of hydraulic power system in civil aircrafts, including distributed system, light-weight design and intelligent technology. This paper also makes a detailed introduction of these technologies, which can provide reference for the development of domestic civil aircraft hydraulic power system.

Key Words: civil aircraft; hydraulic power system; distributed system; light-weight design; intelligent technology

Received: 2019-10-10; Revised: 2019-10-20; Accepted: 2019-11-10

*Corresponding author.Tel. : 010-85672631 E-mail: ast@aviationnow.com.cn