

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2014.04.005

大型客机飞控作动系统配置方案设计

齐海涛¹, 付永领², 郎 燕³

(1. 北京航空航天大学 工程训练中心, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191; 3. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘 要:介绍了当前主流大型客机 A320、B737 和新型客机 A380、B787 的飞控作动系统配置及其特点, 指出了当前大型客机飞控作动系统的发展趋势——高度集成化、功率电传化、信号光传化、液压高压化和智能化。针对我国大型客机发展目标, 提出了一种适合我国国情的作动系统能源配置方案, 为 3 套独立液压系统 + 1 套电系统 (3H + E) 方案, 及相应的作动系统配置方案。指出了发展飞控作动系统需要解决的体系架构、高可靠性作动器研制、故障预测与健康管理等关键技术问题。

关键词:飞机; 飞行控制; 作动系统; 发展趋势; 方案; 关键技术

中图分类号: TH137; V227; V271.1 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858 (2014) 04-0019-07

Configuration Design of Flight Control Actuation Systems for Trunk Line Aircrafts

QI Hai-tao¹, FU Yong-ling², LANG Yan³

(1. Engineering Training Center, Beihang University, Beijing 100191;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191;

3. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190)

Abstract: The flight control actuation system configuration and characteristics of the current mainstream large aircrafts A320, B737 and new aircrafts A380, B787 are introduced. The future trends of flight control actuation system for current trunk line aircraft are outlined, namely highly integrated, power-by-wire, signal-by-light, high pressure hydraulic and intelligent. For the development goals of our trunk line aircraft, a suitable power configuration of actuation systems for China's actual conditions is proposed, which consists of three sets of independent hydraulic systems plus one set of electrical system, and the corresponding actuation system configuration. The key technologies of developing flight control actuation systems, namely architecture, high reliable actuators, fault prognostics and health management are indicated.

Key words: aircraft, flight control, actuation system, trend, proposal, key technique

引言

研制大型飞机是《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》确定的16个重大专项之一, 是我国科技发展的重中之重^[1]。飞控系统是大客机的关键子系统之一, 而飞控作动系统是飞控系统的重要组成部分, 可以按照飞控计算机给定的控制信号实现功率输出控制负载运动, 结构相对独立。通过飞控计算机的综合控制, 可以操纵飞机襟副翼、升降舵、

方向舵、平尾、襟翼、缝翼和扰流片等控制舵面, 实现飞行姿态和轨迹的控制^[2]。

收稿日期: 2013-12-22

基金项目: 航空科学基金(20132851033); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(YWF-13-T-RSC-100)

作者简介: 齐海涛(1981—), 男, 山东淄博人, 讲师, 博士, 主要从事飞机液压、作动系统及机电液控一体化技术方面的科研和教学。

飞控作动系统随着飞机飞行控制技术的进步而产生与发展,共经历了 5 个阶段:纯机械操纵;机械信号、液压动力的液压助力器;信号电传、液压动力的电液伺服作动器;信号电传、功率电传的功率电传作动器;信号光传、功率电传的新型作动器^[3-4]。截至目前,纯机械操纵和液压助力器已逐渐退出历史舞台,当前飞机上的主流配置为电液伺服作动器,功率电传作动器陆续在验证机上得到成功应用^[5-13]。到 2013 年,UTC 航宇、派克、穆格、利勃海尔等公司生产的多种功率电传作动器已在空客 A380、波音 787 等新一代民机,空客 A400M 军用运输机,以及美国的 F-35 战机上正式装备。而基于功率电传和信号光传技术的新型作动器还处在理论完善和实验室验证阶段,是未来的发展方向^[14-19]。

飞控作动器自身的不断发展,将对整个飞机飞控作动系统及其所依赖能源的配置产生巨大影响。因此,本文将在对比国外大型客机飞控作动系统配置方案的基础上,总结其发展趋势,进而提出一种适合我国国情的大型客机飞控作动系统配置方案,并指出其关键技术。

1 国外大型客机飞控作动系统对比

当今世界两大主要的大型客机供应商分别为欧洲的空客公司(Airbus)和美国的波音公司(Boeing),其主流机型 A320、B737 与新型客机 A380、B787 体现了目前大型客机设计的传统实用性与技术创新性^[16]。因此,本文将重点对上述 4 款机型的飞控作动系统进行对比分析。

1.1 空客 A320

空客 A320 飞机是第一款应用全数字电传操纵飞行控制系统的亚音速民航客机,双发、中短程、单过道、150 座级^[17]。

A320 飞机的飞控作动系统全部采用传统的中央液压源供油的伺服液压作动器(SHA, Servo-Hydraulic Actuator),由绿液压系统(Green Hydraulic System)、黄液压系统(Yellow Hydraulic System)和蓝液压系统(Blue Hydraulic System)三套独立的中央液压源为其提供能源,其配置如图 1 所示^[18]。每侧的副翼(Aileron)均由两个 SHA 驱动,方向舵(Rudder)由三个 SHA 驱动,每侧的升降舵(Elevator)均由两个 SHA 驱动,每侧的扰流板(Spoiler)由一个 SHA 驱动,前缘缝翼(Slat)由两个 SHA 驱动,后缘襟翼(Flap)由两个 SHA 驱动,可调水平安定面(THS, Trimmable Horizontal Sta-

bilizer)由两个 SHA 驱动。

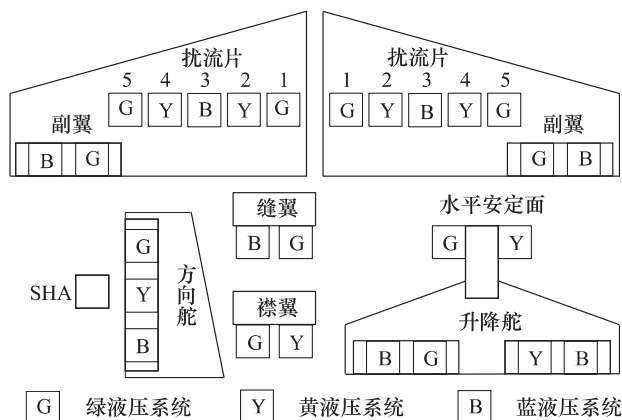


图 1 A320 飞机飞控作动系统配置

1.2 波音 B737

波音 B737 飞机是中短程、双发喷气式客机,为民航历史上最成功的窄体民航客机之一,可靠性高、操作简捷、运营和维护成本低^[19]。

B737 飞机的飞控作动系统也全部采用传统的 SHA,由 A 系统、B 系统和备用系统三套独立的中央液压源为其提供能源,其配置如图 2 所示^[20]。

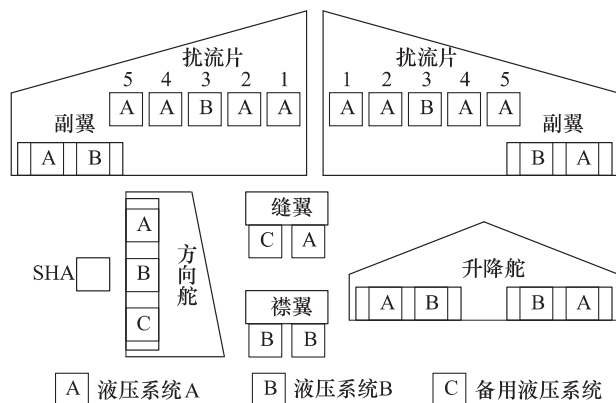


图 2 B737 飞机飞控作动系统配置

1.3 空客 A380

空客 A380 飞机是迄今为止世界上建造的最先进、最宽敞和最高效的飞机,有“空中巨无霸”之称,四发、远程、四过道、600 座级^[21]。

A380 飞机的飞控作动系统在部分舵面上采用了功率电传型作动器——电动静液作动器(EHA, Electro-Hydrostatic Actuator)和电备份式液压作动器(EBHA, Electrical Back-up Hydraulic Actuator),由绿、黄两套独立的液压能源系统和两套独立的电源系统为其提供能源,其配置如图 3 所示^[13]。

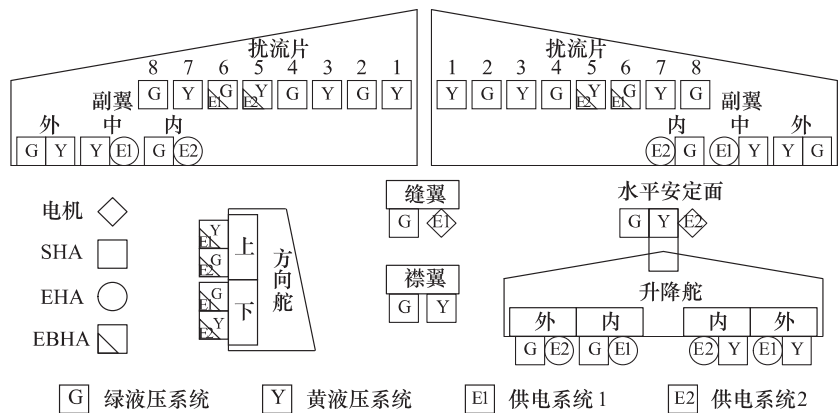


图 3 A380 飞机飞控作动系统配置

1.4 波音 B787

波音 B787 飞机是双发、中型宽体客机,200 ~ 300 座级。其突出特点是大量采用了复合材料,具有强度高、重量轻等优点,是航空史上首架超长程中型客机,被称为“梦想客机”^[22]。

B787 飞机的飞控作动系统在部分舵面上采用了功率电传型作动器——机电作动器 (EMA, Electro-Mechanical Actuator),由左、中、右三套独立的液压能源系统和一套独立的电源系统为其提供能源,其配置如图 4 所示^[23]。

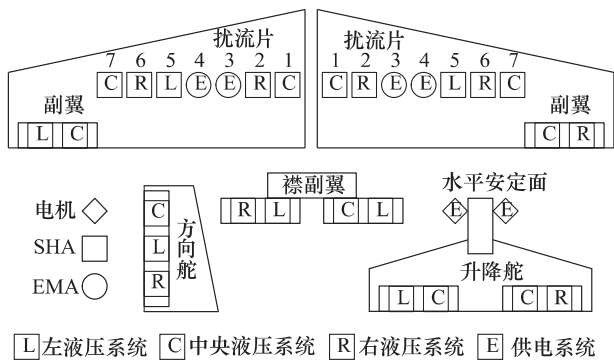


图 4 B787 飞机飞控作动系统配置

1.5 对比分析

对上述四种国外典型大型客机的飞控作动系统进行比较,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,随着功率电传技术的不断发展和成熟,大型客机在选用作动系统产品时,正逐步采用功率电传作动器替换传统的液压伺服作动器。

2 大型客机飞控作动系统发展趋势

随着大型客机对经济性、安全性、环保性和舒适性要求的不断提升,未来飞机将逐渐向多电/全电方向发展。

展。飞控作动系统为了满足上述要求,正体现出以下发展趋势。

表 1 国外典型客机飞控作动系统的比较

		A320	B737	A380	B787
副翼 (左/右)	内			SHA + EHA	2 SHA
	中	2 SHA	2 SHA	SHA + EHA	
	外			2 SHA	
方向舵	上	3 SHA	3 SHA	2 EBHA	3 SHA
	下			2 EBHA	
扰流片 (左/右)	1 号	SHA	SHA	SHA	SHA
	2 号	SHA	SHA	SHA	SHA
	3 号	SHA	SHA	SHA	SHA
	4 号	SHA	SHA	SHA	EMA
	5 号	SHA	SHA	EBHA	EMA
	6 号	/	/	EBHA	SHA
	7 号	/	/	SHA	SHA
	8 号	/	/	SHA	/
升降舵 (左/右)	内	2 SHA	2 SHA	SHA + EHA	2 SHA
	外			SHA + EHA	

2.1 高度集成化

飞机总体性能的改善与其整体的减重总是紧密相关的,减重将可直接增加飞机的有效载荷和续航能力,或减少燃油消耗。而高度集成化带来的最直接好处就是可以减轻系统的重量。在高度集成化中将出现以下趋势:

(1) 传统液压伺服作动器的伺服阀、伺服放大控制器与作动筒等高度集成;

(2) 作动筒与位移传感器的活塞杆融合设计, 进行高度集成;

(3) 电动机与液压泵进行高度集成, 将电动机和液压泵共转子、共壳体设计, 与传统电动机驱动液压泵相比, 取消了中间连接环节的电动机输出轴、液压泵输入轴, 电动机的输出轴轴承及其端盖、液压泵的输入轴轴承及其端盖^[24]。

(4) 功率电传作动器自身的高度集成设计。

2.2 功率电传化

随着新材料、电机技术、控制学和先进制造技术的发展, 用以取代目前所依赖的功率液压传动的功率电传技术应运而生。所谓功率电传是指由飞机第二能源系统至作动系统各执行机构之间的功率传输采用电导线以电能量传输的方式完成。

国内外的研究表明, 采用功率电传作动系统后, 由于没有了遍布机身的液压管路, 且一体化作动器易形成容错能力, 使飞机具有以下优点^[25]:

(1) 维修性好。易于检测, 具有很强的机内自检能力; 同时, 定期维护工作也有所减轻;

(2) 可靠性高。电力作动方式易形成容错能力; 取消了液压系统中高故障率的伺服阀;

(3) 减轻起飞重量。采用电力作动方式将大大节省燃油, 减少管路布置, 减轻飞机冷却负担;

(4) 大量节省费用。降低了飞机的生产费用、发展费用和寿命期维护费用等。

2.3 信号光传化

机载作动系统的控制信号光传, 即光传操纵 (FBL, Fly-y-Light), 是继电传操纵 (FBW, Fly-y-Wire) 之后发展起来的一项用于飞行控制信号传输的新技术。根据控制信号传输媒介的不同, 相对于 FBW 系统可将 FBL 系统定义为: 以光代替电作为传输载体, 以光导纤维 (或光缆) 代替电导线 (电缆) 作为物理传输媒质, 应用光纤数据传输技术在飞控计算机之间或飞控计算机与远距终端 (如舵机等) 之间传递指令和反馈信息的飞行控制系统。具有以下优点^[26]:

(1) 在强电磁干扰下飞行。光传具有固有的抗电磁干扰能力, 可使对飞机的电磁干扰衰减若干个数量级。此外, 由于光纤内传播的光能几乎不向外辐射, 因此不会造成同一光缆中各光纤之间的串扰及故障扩散;

(2) 减轻机载设备重量。以光纤一对一地替换 FBW 系统中的电导线, 所需光纤的总重仅为原电导线

总重的 1/20。如果再将除操纵系统之外的其它系统的信号传输线 (电缆) 以光缆代替, 并考虑到由于光纤的使用大大减少了 FBW 系统所必需的屏蔽设施, 飞机的整体重量还可大大减轻;

(3) 数据传输速率高和传输容量大。由于光传输的高速率, 可以采用分时的方法在一根光纤中传递多路信号, 同时也为应用频分和波分等复用技术提高数据传输容量提供了很大的潜力, 如字长为 20 位时, 一路光纤传输 10000 路信号的频宽可达 100 Hz;

(4) 改善系统的动态特性。光传系统高速率、大容量的特点为提高系统频宽提供了相当的潜力, 同时, 光纤与神经网络技术的结合为有效地实施最优控制设计提供了可能。

2.4 液压高压化

作为一种十分成熟的飞控作动系统方案, 机载液压作动器在未来很长一段时间内, 仍将是飞控作动系统的一种主要选择方案。世界各国特别是美国的大量研究表明, 减轻飞机液压系统重量和缩小体积的最有利的途径就是提高飞机液压系统的工作压力^[27]。因此。液压作动系统作为液压系统的用户也必须提高系统压力, 以适应高压化的发展趋势。传统的 A320 及 B737 客机的液压系统压力等级均为 21 MPa, 而从新型客机 A380 及 B787 则应用了 35 MPa 的压力等级可以看出, 民用飞机具有发展高压系统的趋势。

2.5 智能化

为了提高安全性和可靠性, 未来的飞控作动系统要具备一定的故障诊断、容错控制、系统重构、余度管理、健康管理等智能化特点^[28]。通过加速度、电压、电流、速度、温度、压力、流量和压差传感器等, 获得作动系统本身的振动信号, 供油压力和流量、温度, 电机的电压和电流, 作动筒的速度和压差等信号, 从而评估作动系统的工作状态。当作动系统出现故障时, 监测、诊断作动系统的故障, 并进行故障定位和系统重构。如果作动系统的工作状态偏离正常现象, 但偏差处于一定范围内, 则预测故障出现的时间、位置, 评估系统的健康状态并根据在线采集数据及历史数据预测系统剩余寿命。同时, 可通过天地数据链系统将作动系统状态传给地面系统。

3 大型客机飞控作动系统配置方案

根据通过专家评审的总体技术方案, 我国的大型客机为单通道 150 座级、中短程、商用干线客机, 与目前畅销的空客 A320 和波音 B737 的级别一致^[29]。

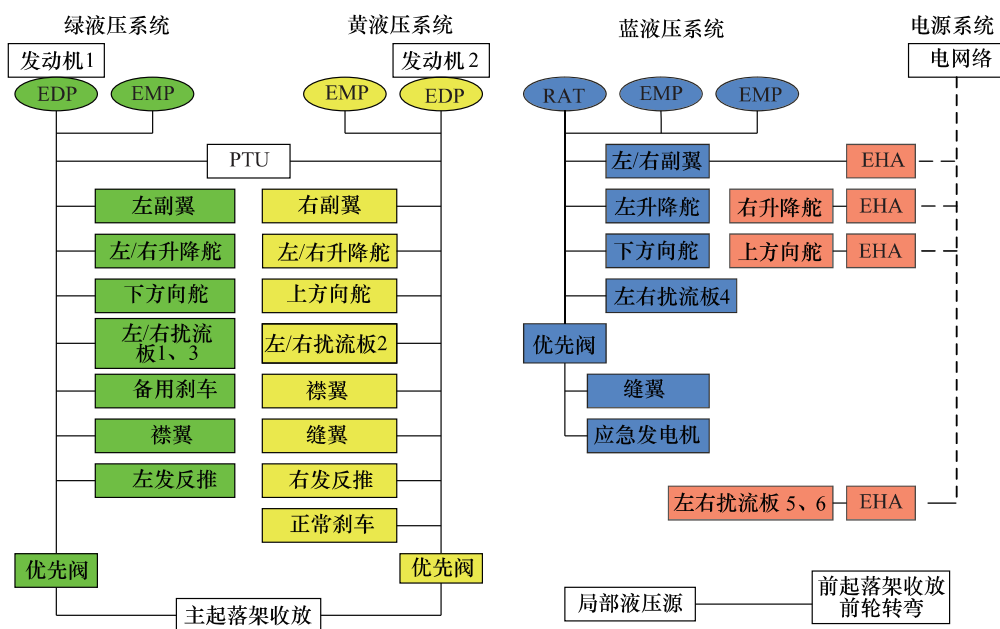


图 5 大型客机 3H + E 作动系统能源配置

飞机飞控作动系统的配置与其能源系统密切相关。A320 和 B737 的飞控作动系统采用的主要是液压能源，A380 采用的是 2 套液压能源和 2 套电能源，B787 采用的是 3 套液压能源和 1 套电能源。我国现有飞机的飞控作动系统几乎全部采用的是液压能源，压力体制以 21 MPa 为主，部分为 28 MPa。因此，根据我国现有技术储备的情况，综合考虑安全性、经济性和先进性的要求，在发展大型客机飞控作动系统时，考虑为其配置 3 套液压能源和 1 套电能源，压力体制选用 28 MPa，即 3H + E (3 Hydraulic + Electircal) 的作动系统能源配置方案，如图 5 所示。

整套系统由 4 套独立的能源系统组成，包括 3 套传统的液压能源和 1 套采用电的能源系统，分别标记为绿液压系统、黄液压系统、蓝液压系统和电源系统。绿液压系统和黄液压系统为飞机主液压系统，都由一个 180 L/min 的发动机驱动泵 (EDP, Engine Driven Pump) 和一个 30 L/min 的电机驱动泵 (EMP, Electric Motor Pump) 组成液压源；蓝液压系统和电源系统为备用系统，蓝液压系统由两个 30 L/min 的 EMP 和一个冲压空气涡轮 (RAT, Ram Air Turbine) 泵组成液压源。在正常工作情况下，绿液压系统和黄液压系统中的 EDP 和蓝液压系统中的一个 EMP 作为系统主泵，为各系统用户提供所需要的实时液压功率。绿液压系统的 EDP 通过机构与左发动机相连，黄液压系统的 EDP 通过机构与右发动机相连，只要相应的发动机启

动，EDP 即启动工作，蓝液压系统中的主 EMP 则只要有任何一个发动机启动即启动工作。绿液压系统和黄液压系统中的 EMP 只在飞行剖面中大流量工况 (如起飞和降落等) 或主泵故障时启动。绿液压系统和黄液压系统失效情况下，启动蓝液压系统中的备用 EMP 和电源系统作为应急能源提供系统压力；当飞机失去电力以及 2 台发动机全部失效时，由 RAT 泵为系统提供压力；此外 RAT 还为恒速马达发电机 (CSM/G, Constant Speed Motor/Generator) 提供动力。当绿液压系统或黄液压系统出现低压状况时，双向动力转换单元 (PTU, Power Transfer Unit) 为故障系统或低压系统提供动力，为低压系统补压。

此外，采用一套局部液压源专门为前起落架系统供压，保证前起落架收放和前轮转弯所需功率。如此可省去从中央液压源到前起落架的冗长的液压管路，减轻了系统重量，并且中间管路的消失也有利于机舱的布局。同时，局部液压源只在前起落架收放以及飞机在地面滑行时才工作，而在占飞行大部分时间的巡航阶段则不工作，可以极大提高液压系统的效率。

基于上述作动系统能源配置，提出一种我国大型客机作动系统的配置方案，如图 6 所示。

通过引入国内发展相对成熟的 EHA，将其配置在左/右副翼、上方向舵、右升降舵上，与相应的 SHA 形成非相似冗余，能够大大提高飞控作动系统的可靠性。此外，5 号和 6 号扰流片也采用 EHA 驱动。

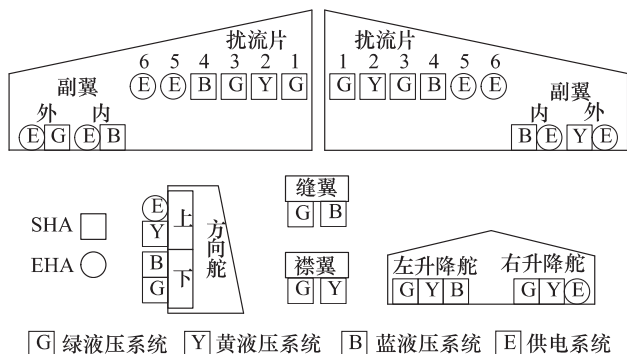


图6 大型客机作动系统配置

4 大型客机飞控作动系统关键技术

4.1 体系架构

随着各种新型飞控作动器的不断成熟和逐渐采用,必将对现有的飞控系统体系架构产生重要影响。需要从整机层面考虑能源系统的余度配置和余度管理、故障重构、作动系统的工作模式、与其它相关系统的接口、操纵显示和安全报警。

4.2 高可靠性作动器

作动器性能的好坏将直接影响飞控作动系统的可靠性。目前,国内企业还不能生产高可靠性的作动器,尤其是新型的功率电传作动器以及光传作动器。因此,研制开发具有自主知识产权的高可靠性作动器是实现上述大型客机作动系统配置的关键。

4.3 故障预测与健康管理

随着大型客机对安全性和可靠性要求的不断提高,传统的基于传感器的故障诊断正在向基于智能系统的故障预测方向发展,通过对作动器的智能检测和系统级评估进行健康管理,可以为飞行员提供信息和辅助决策,以降低生命周期风险,避免不可预料的风险事故。国内故障预测与健康管理的研刚刚起步,尚有大量工作需要开展。

5 结论

(1) 当前大型客机飞控作动系统的发展趋势为高度集成化、功率电传化、信号光传化、液压高压化和智能化;

(2) 我国大型客机可以采用3套独立液压系统+1套电系统(3H+E)的作动系统能源方案,飞控作动系统配置方案与之匹配;

(3) 发展飞控作动系统需解决诸如体系架构、高可靠性作动器研制、故障预测与健康管理等关键技术问题。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年) [EB/OL]. 2006-02-09. http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gkjgh/200811/t20081129_65774.htm.
- [2] 王占林. 近代电气液压伺服控制 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:148-169.
- [3] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 第12册:飞行控制系统和液压系统设计 [M]. 北京:航空工业出版社,2003:131-153.
- [4] Moir I., Seabridge A. Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration [M]. Third Edition. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2008:30-34.
- [5] Alden R. C-441 and C-430 Power-by-wire Flight Control Systems [C] //Proceedings of the IEEE 1991 National Aerospace and Electronics Conference. Dayton, 1991:535-539.
- [6] Navarro R. Performance of an Electro-hydrostatic Actuator on the F-48 Systems Research Aircraft [R]. NASA, 1997.
- [7] Jensen S. C., Jenney G. D., Raymond B. Flight Test Experience with an Electromechanical Actuator on the F-48 Systems Research Aircraft [C] //Proceedings of the 19th Digital Avionics Systems Conferences. Philadelphia, 2000: 2E3/1-2E3/10.
- [8] Croke S., Herrenschmidt J. More Electric Initiative-Power-by-wire Actuation Alternatives [C] //Proceedings of the IEEE 1994 National Aerospace & Electronics Conference. New York, 1994:1338-1346.
- [9] Bossche D. V. D. "More electric" Control Surface Actuation-A Standard for the next Generation of Transport Aircraft [C] //Proceedings of the Conference on More-electric Aircraft. London: Royal Aeronautical Society, 2004.
- [10] Biedermann O., Bildstein M. Development, Qualification and Verification of the A380 Spoiler EBHA [C] //Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components. Toulouse, 2004: 97-101.
- [11] Schley W. R. The state of the Art and Remaining Challenges in Electric Actuation for Flight and Propulsion control [C] //Proceedings of the Conference on More-Electric Aircraft. London: Royal Aeronautical Society, 2004.
- [12] Todeschi M. A380 Flight Control Actuation Lessons Learned on EHAs Design [C] //Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components. Toulouse, 2007:21-26.
- [13] Charrier J. J., Kulshreshtha A. Electric Actuation for Flight & Engine Control System: Evolution, Current trends & Future Challenges [C] //Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, 2007:1-20.

(下转第27页)

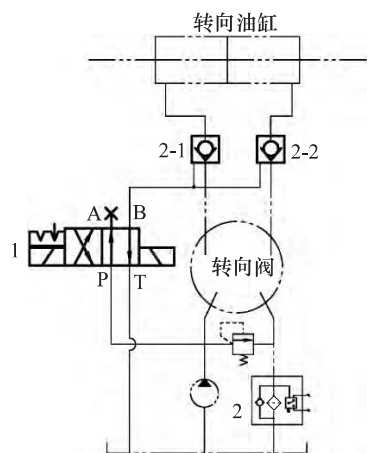


图5 转向系统原理图

该电磁阀是二位四通换向阀，阀芯带机械定位功能。该阀与导向装置中的换向阀联动，即司机选择铁路工况还是公路工况时，导向装置系统与转向控制系统同时切换到需要的工作状态。

4 液压控制系统的特点

公铁两用牵引车液压系统使用了某品牌的标准液压元件产品，质量可靠，标准化程度高，液压管路全部使用卡套式管接头，系统清洁度高且管路安装方便。

利用蓄能器保压和卸荷阀卸荷，使液压泵长时间处于低功率状态工作，节能环保。

相比平衡阀，本系统中利用单向节流阀既实现平衡负载的功能，又简化了管路设计且节约成本。

5 结论

本研究于2013年5月完成首台牵引车的样车试制，7月完成各项性能试验，经实践证明，液压控制系统较好的完成各项动作任务，实现了设计要求。

参考文献：

- [1] 雷天觉. 新编液压工程手册 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [2] 官忠范. 液压传动系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [3] 林建亚, 何存兴. 液压元件 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [4] 张云, 杨继民, 段志强. 装载机牵引式综采支架搬运车液压系统设计 [J]. 液压与气动, 2009, (9): 46-47.
- [5] 闫岷, 赵立军, 姜继海, 刘涛. 飞机牵引车结构及动力传动系统的发展 [J]. 液压与气动, 2009, (12): -4.
- [6] 张辉, 王志, 王洲, 刘清林, 王伟平. 电控泵在牵引车液压行走系统中的应用 [J]. 液压与气动, 2008, (11): 78-80.
- [7] (上接第24页)
- [14] Todd J. R., Hay J. A., Dinh, T. Integrating Fly-by-light/Pow-er-by-wire Flight Control Systems on Transport Aircraft [C] // AIAA/IEEE 12th Digital Avionics Systems Confer-ence. Fort Worth, 1993: 457-462.
- [15] Zavala E. Fiber Optic Experience with the Smart Actuation System on the F-18 Systems Research Aircraft [C] // Pro-ceedings of the 16th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Irvine, 1997: 7.3-9-7.3-25.
- [16] 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): 2152-2159.
- [17] Airbus. A320 [EB/OL]. 2013-11-01. <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a320/>.
- [18] Airbus. A320 Flight Crew Operating Manual-flight Controls [R]. Airbus SIMU F. P. S. 3 UP, 2006.
- [19] Boeing. 737 Family [EB/OL]. 2013-12-20. <http://www.boeing.com/boeing/commercial/737family/background.page>.
- [20] Boeing. Boeing 737 Management Reference Guide [R]. Chi-cago: Boeing Company, 2005.
- [21] Airbus. A380-new Generation new Experience [EB/OL]. 2013-04-13. http://www.airbus.com/fileadmin/media_gal-tery/files/brochures_publications/aircraft_families/Airbus-A380-leaflet-Apr13.pdf.
- [22] Boeing. Boeing 787 Dreamliner Provides new Solutions for Airlines, Passengers [EB/OL]. 2013-12-20. <http://www.boeing.com/boeing/commercial/787family/background>.
- [23] Nelson T. 787 Systems and Performance [EB/OL]. 2009-03-31. [http://www.oaviao.com/oaviao_novo/newsletter/ima-ges/B787_Systems_and_Performance.pdf](http://www.oaviao.com/oaviao_novo/newsletter/imag-es/B787_Systems_and_Performance.pdf).
- [24] 付永领, 李祝锋, 安高成, 等. 电液泵发展现状与关键技术综述 [J]. 机床与液压, 2012, 40(1): 143-149, 160.
- [25] Botten S L, Whitley C R, King A D. Flight Control Actuation Technology for Next Generation All-electric Aircraft [J]. Technology Review Journal-Millennium Issue, 2000, Fall/Winter: 55-68.
- [26] 祁晓野, 付永领, 王占林, 等. 机载作动系统的控制信号光传方案 [J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(2): 160-163.
- [27] 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: 2-5.
- [28] 夏立群, 田一松, 王可. 浅谈作动器健康管理技术 [J]. 系统仿真学报, 2009, 20(增): 295-299.
- [29] 张晓鸥. C919大飞机总体技术方案获批 [EB/OL]. 2011-12-10. http://whb.news365.com.cn/zhxw/201112/t20111210_3201352.htm.