航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Apr. 25 2019 Vol. 30 No.04 8-12

远程轰炸机液压系统分析

罗志会*
南京机电液压工程研究中心 航空机电系统综合航空科技重点实验室，江苏 南京 211106

摘　要：本文首先概述了远程轰炸机液压系统的现状，详细分析了B-1A和B-2B液压系统，包括系统构型、功能、部件和技术参数等，然后在分析的基础上总结了远程轰炸机液压系统的一些特点，最后对下一代远程轰炸机液压系统的设计进行了展望。

关键词：远程轰炸机；液压系统；B-1A；B-2B

中图分类号：V245.1　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.04.002

远程轰炸机作为“三位一体”的核打击力量，是任何一个政治大国不可或缺的手段，美国和俄罗斯正在积极发展下一代远程轰炸机。远程轰炸机具有载弹量大、航程远、载油量大、生存能力强等特点，这些特点会对远程轰炸机液压系统的设计提出特殊要求，远程轰炸机液压系统的设计方案将有别于其他机型。因此，全面了解现役远程轰炸机液压系统的设计方案和设计特点对我国未来远程轰炸机液压系统的研制具有重要参考价值。

1 现役远程轰炸机液压系统概况

目前，现役远程轰炸机中B-52和图-95均是20世纪50年代的产物，属于古董级机型，B-1、B-2和图-160是20世纪70—80年代研发的机型，其中1997年形成战斗力的B-2A最年轻。为了让现有的轰炸机满足未来的作战需求服役更长时间，对现有机型进行升级改造是当前轰炸机发展的主要策略，改进内容主要集中在航空电子现代化和综合新的武器这两个方面。液压系统并不在改造之列，一般而言，飞机的液压系统一旦设计好，并不会轻易改动，因为改动成本太大。因此，现役远程轰炸机液压系统仍然处于20世纪70—80年代的技术水平。

B-52最初采用气压作为附件系统的动力源，后来的型别改用机械传动，由发动机涡轮轴通过传动齿轮带动液压泵和发电机，液压系统压力为18.24MPa。图-95升降舵、副翼和方向舵均采用液压驱动，系统压力不详。B-1B和B-2A上均有4套液压系统，系统工作压力为28MPa，图-160液压系统工作压力为27.4MPa。

由上可知，现役远程轰炸机拥有的液压子系统数量要比其他机型多。一般而言，战斗机是两套液压系统，大型客机是三套液压系统，而远程轰炸机是4套液压系统。其次，远程轰炸机液压系统的压力较其他机型高。在20世纪70年代末期，飞机液压系统仍然普遍采用21MPa，然而远程轰炸机液压系统率先采用了28MPa。

2 B-1B液压系统

2.1 系统描述

B-1B飞机具有4套相同的28MPa液压子系统，子系统相互独立，系统之间不会交换液压油，系统温度在-54~135℃之间[1]。4套液压子系统共同为收放起落架、机轮刹车、前轮转弯、武器舱门开关、武器发射器旋转、机翼后掠、襟翼、缝翼以及扰流板作动等提供动力，4套子系统无明显的主次之分。

如图1所示，B-1B液压系统采用了复杂的余度技术。每套子系统配备两台发动机驱动泵（EDP），两台泵分别位于不同的发动机上，而且对于大多数主要的飞行控制操纵面，例如，水平安定面、方向舵、扰流板、机翼后掠由4套液压子系统共同提供动力，而对于少数主要飞控作动和次要的飞控作动，包括缝翼和襟翼、结构模式控制系统、俯仰增稳控制系统（SCAS）伺服舵机、滚转SCAS伺服舵机、偏航

收稿日期：2019-02-27；退修日期：2019-03-18；录用日期：2019-03-25
*通信作者. Tel.：13814079963　　E-mail：32228649@qq.com
引用格式：Luo Zhihui.Analysis of hydraulic system of long-range bomber[J].Aeronautical Science & Technology，2019，30(04)：8-12.罗志会.远程轰炸机液压系统分析[J].航空科学技术，2019，30(04)：8-12.

SCAS伺服舵机、俯仰主作动器和滚转主作动器，则由两套液压子系统提供动力[2]。这样的多余度技术最大限度地保证了B-1B飞机飞行控制系统的可靠性。

机翼后掠由双液压马达驱动的两个单向螺旋作动器提供，4台马达经过测试，推力额定值为44.5^{6}N，这大大地超过了移动机翼所必需的马力数[2]。两个螺旋作动器用一个扭矩轴连接，确保两个机翼始终协调运动。每台驱动马达由不同的液压系统提供动力，任何两台马达失效，都不会影响机翼后掠。所有尾翼操纵面(升降舵和方向舵)的液压驱动都是用机械方式传递信号，并有电气备份[3]。

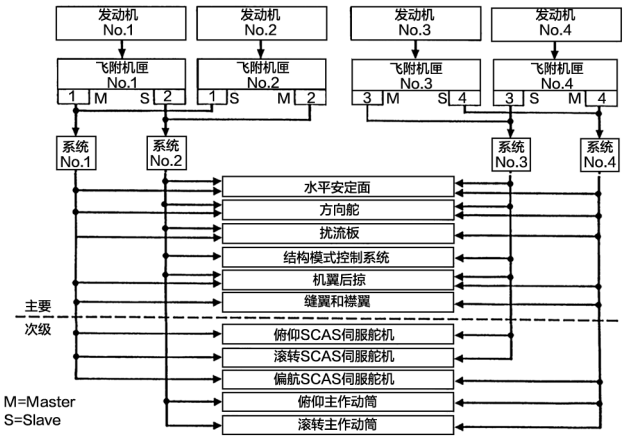

图1 B-1B液压系统的飞控用户配置

Fig.1 B-1B flight control hydraulic system

如图2所示，对于起落架收放、机轮刹车、前轮转弯、前部和中部武器舱门的开关、武器发射器旋转、航电舱风扇等公用系统，主要由系统2和系统3负责，大多数情况正常工作时使用系统2，系统3做备用，系统1和系统4负责为尾部武器舱门和发动机引气预冷风扇提供动力。

2.2 部件

(1) 泵

B-1B液压系统一共有8台EDP，均是可变排量轴向柱塞泵，系统2和系统3配有备用泵。

(2) 蓄压器

蓄压器一共7个，均是柱塞、充气类型，分别位于APU起动机、起落架和空中加油插头内。

(3) 液压油箱

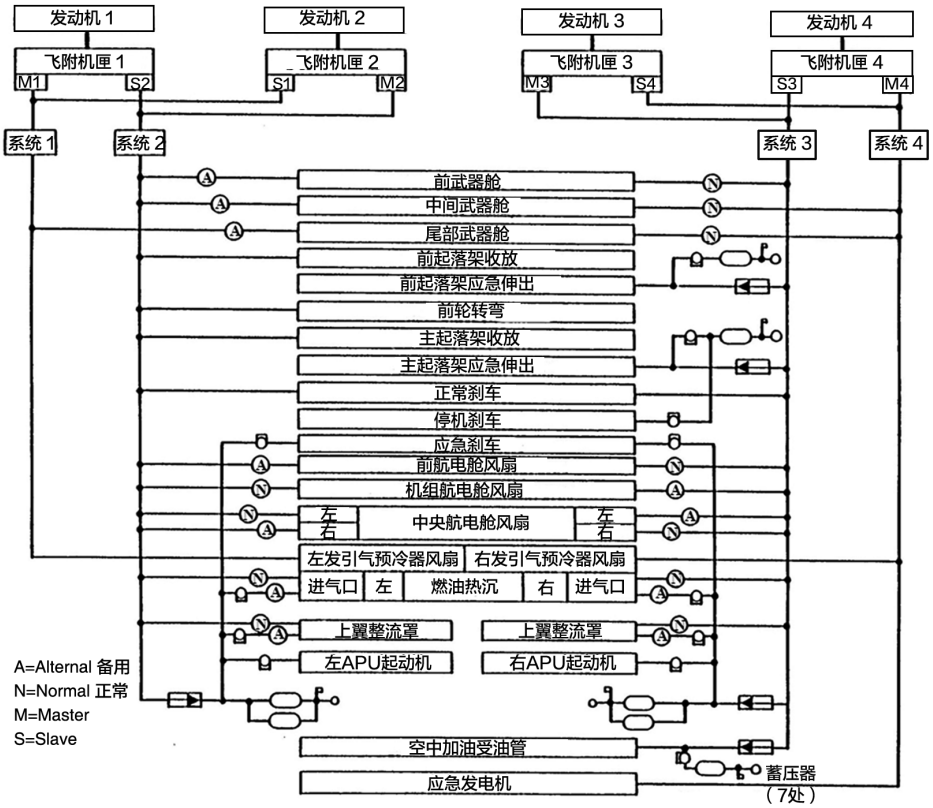

图2 B-1B液压系统的公用系统用户配置

Fig.2 B-1B hydraulic system utility system

液压油箱采用氮气增压(现大多采用自增压式液压油箱),氮在21℃时压力达到17.4MPa。

(4) 管道

高压管道和低压管道均采用符合3AL−2.5V T1规范的材料,固定接头采用纯钛,可分离接头采用符合6AL−4V T1规范的材料。系统1到系统4静态流量分别为10.2lpm、10.9lpm、9.5lpm和5.7lpm。

3 B−2A液压系统

3.1 系统描述

B−2A轰炸机液压系统与B−1B一样,由4套相同的相互独立的28MPa液压子系统组成,系统工作温度在−54~135℃之间[1]。4套液压子系统共同为飞机的11个操纵面、武器舱开关、起落架收放、前轮转弯、机轮刹车等提供液压动力。4套子系统无主次之分,对于飞行控制的作动器,4套子系统共同负责;对于武器舱、起落架等公用系统,则4套系统组合起来分别承担不同任务,如左发动机辅助进气门由系统1和系统2负责,右发动机辅助进气门由系统3和系统4负责,左、右武器舱的开关由系统1、系统3和系统4负责,如图3和图4所示。

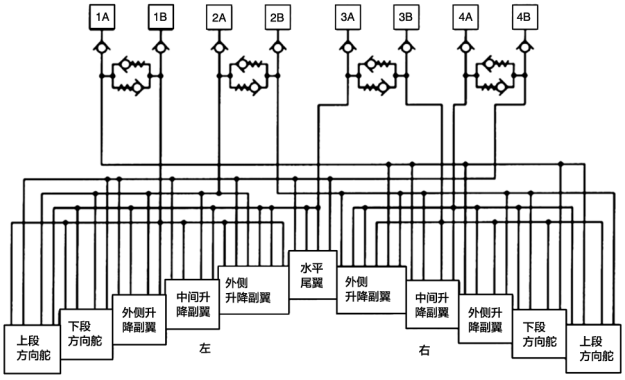

图3 B−2A液压系统的飞控舵面作动配置示意图

Fig.3 B−2A flight control hydraulic system schematic

B−2A液压系统采用的余度技术是多层级的。首先具备4套子液压系统,每套液压系统有两个发动机驱动泵,分别安装在不同的发动机上,两个泵之间有类似于PTU(功率传输装置)的装置,也就是说能源部分是双余度的。其次每个操纵面至少两个作动器(内侧升降副翼三个作动器,其他操纵面两个),作动部分是双余度的。所有作动器均采用单缸活塞、直驱伺服阀的液压作动器,用模式控制转换阀来选择三种工作模式:主要、备用和旁路。再次每个作动器由三

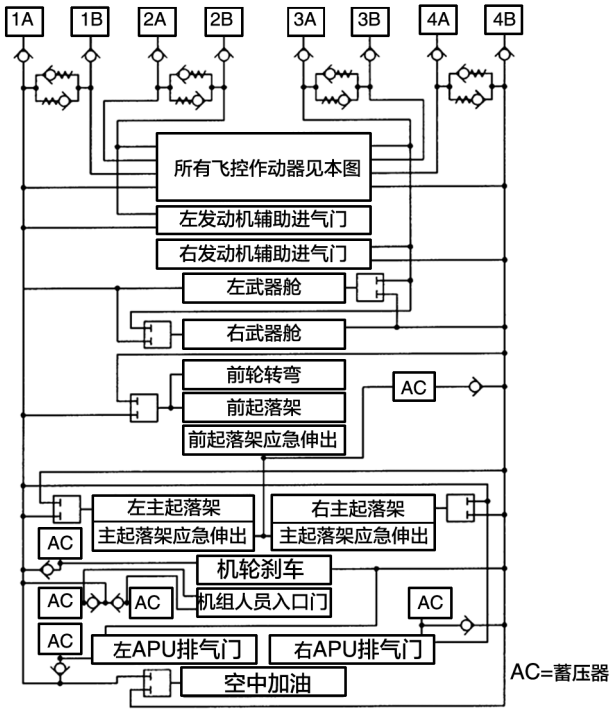

图4 B−2A液压系统的公用系统配置

Fig.4 B−2A hydraulic system utility system

套液压系统提供液压能源,也就是说在作动器这一级,液压动力源是双余度的,而对于每个飞行操纵面,液压动力源是四余度的。B−2A液压系统多层次地采用了四余度,这让B−2A液压系统如同民用飞机一样,灾难性故障低于1×10^{-9}次/飞行小时(10亿飞行小时一次故障)[4]。

3.2 部件

(1) 作动器

B−2A有11个翼面,每个翼面至少由两台完全相同的作动器驱动,每个作动器与两个液压子系统的管线连接[5]。

(2) 泵

B−2A液压系统主泵采用发动机驱动泵,一共有8个主泵,均是可变排量的轴向柱塞泵,整个液压系统无备用泵。

(3) 蓄压器

蓄压器一共有10个,均是柱塞、充气类型,分别位于内机组人员入口、应急刹车、液压油箱、APU排气门和起落架应急装置内。

4 远程轰炸机液压系统特点

由上可知,远程轰炸机液压系统有如下特点:具有4套独立的、设计相同的液压系统;4套系统无主次或主备之分,

4套液压系统共同负责为飞行操纵面供压，各个公用系统由4套系统以组合的方式分别承担；工作压力为28MPa，比同时代机型高；能源部分和作动部分采用复杂的四余度技术，提高任务可靠性；系统中没用采用电动泵，可能和轰炸机核辐射有关，设计中考虑到了电动泵受核辐射干扰，其可靠性会受影响；无提供应急动力的冲压空气涡轮；备用泵不是必备的设计。

5 下一代远程轰炸机液压系统的展望

5.1 子系统数量

按照安全性要求等级的不同，采用的冗余数也不同，一般战斗机采用两套独立的液压能源系统，民用客机多采用三套独立的系统，当然也有采用4套系统的，运输机和轰炸机一般采用4套系统。

据此，未来远程战略轰炸机液压系统应该是采用三套以上的子系统。如果侧重考虑系统可靠性的话，很有可能采用B−1和B−2类似系统构型的4套子系统。如果从飞机整体性能上考虑（从重量（质量）、体积、布局、效能等方面总体衡量），三套液压子系统或许是最优选择。子系统应该共同承担飞行控制和公用用户，子系统无主次之分。

5.2 系统压力

机载液压系统的发展趋势之一是高压化。21MPa工作压力在20世纪80年代以前是主流，之后压力逐步提高至28MPa、35MPa，现役几款远程战略轰炸机采用了28MPa的工作压力。据此，未来远程轰炸机液压系统的工作压力应该是在28MPa以上。2000年以后研发的新机型波音787、A380和F−35均采用35MPa。然而压力不是越高越好，事实证明，高压会带来很多问题，所以从技术成熟度、技术储备等方面综合考虑，28MPa的工作压力是未来远程轰炸机液压系统的最优选择。

而且研究表明，飞机液压系统需要高压的时间非常短，典型战斗机需要高压的时间还不到整个任务飞机时间的10%，其余时间内，包括起飞、飞到作战位置、返航和着陆，21MPa压力已能满足要求[6]。所以，不排除下一代远程轰炸机液压系统会采用变压力系统，采用双级压力变量泵或智能泵。

5.3 主泵的类型

从SEA AIR 1899提供的数据来看，军用飞机主泵均采用发动机驱动泵（EDP）。远程战略轰炸机需要执行核任务，会有核辐射，电子产品可靠性会打折扣，B−1B和B−2A主泵均采用EDP。因此，从可靠性考虑，下一代远程轰炸机液压系统主泵应该是EDP。

5.4 备用泵

很多机型的液压系统均会有备用泵，备用泵在主泵故障后起动。一般会采用电动泵EDP、应急动力装置（EPU）或辅助动力装置（APU）驱动泵、冲压空气涡轮（RAT）泵作为备用泵，有些甚至会配备手摇泵。当所有发动机故障时，RAT是最后的救命稻草，作为应急动力。

研究发现，轰炸机B−1B采用的是APU驱动泵作为备用泵，而B−2A没有备用泵。考虑到轰炸机投放核弹后，其产生强大的电磁辐射会干扰电子设备正常工作，下一代远程轰炸机液压系统应该不会采用电动泵为备用泵。如果液压系统配备备用泵，可能会是手摇泵、APU泵等类型。

另外，为了不同液压系统间传递功率，现代民机或部分军机会配置有功率传输装置（PTU）。B−2A每一套液压子系统的两个主泵之间有类似PTU功能的设备，下一代远程轰炸机液压系统也有需要考虑PTU，以提高系统可靠性。

5.5 多电新技术的采用

未来飞机的发展趋势是多电，就液压系统上而言，更多地采用EMP来代替EDP，或采用EHA和EMA等电作动器取代传统液压泵。A380充分诠释了这种趋势，其飞行控制系统上采用了4套动力系统，两套以液压为动力的作动系统，两套以电为动力通过分布式电液作动器系统操纵舵面的系统，称为2H/2E结构布局。但两套液压系统仍是主动力系统，两套电动力系统为备用系统。这说明液压系统仍是目前飞机的主流。

而且就战略轰炸机而言，必须考虑核弹的电磁辐射对用电设备的可靠性的影响。因此，除非采用了很好的电磁隔离技术，否则下一代远程轰炸机液压系统上应该不会大范围地使用EMP、EHA、EMA，传统液压泵仍是主流。

6 结束语

远程轰炸机需要深入敌区执行高空或低空突防任务，每次执行任务的空中飞行时间非常长，一般不少于10h。远程轰炸机的液压系统必须可以支持这种长航时的飞行任务，保证飞行安全。因此，远程轰炸机液压系统的第一设计要素是可靠性，而非先进性，B−1B和B−2A液压系统的设计特点充分体现了该原则。 AST

参考文献

[1] Society of Automotive Engineers. AIR 1899 Aerospace military aircraft hydraulic system characteristics[S]. USA：

Society of Automotive Engineers，2001．

[2] Koziol D E，Billips G C, Petersen F W．Flight control system development on the B−1 program[R]. SAE 831485, USA: Society of Automotive Engineers, 1983．

[3] 丹尼斯·R.詹金斯．B−1轰炸机：迄今为止最复杂的战机[M]．北京：航空工业出版社，2008．
Dennis R. Jenkins. B−1 bomber: the most complicated fighter aircraft to date [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008. (in Chinese)

[4] Ian Moir. 飞机系统：机械、电气和航空电子分系统综合[M]．凌和生，译.北京：航空工业出版社，2011.
Ian Moir. Aircraft system: mechanical, electrical and avionics subsystems integration [M]. Ling Hesheng, Translated.Beijing: Aviation Industry Press, 2011. (in Chinese)

[5] Schaefer W S，lnderhees L J, Moynes J F. Flight control actuation system for the B−2 advanced technology bomber[R]. SAE 911112，USA：Society of Automotive Engineers，1991．

[6] 焦裕松，焦宗夏，范开华．航空液压技术发展研究[R].中国航空学会，2019.
Jiao Yusong, Jiao Zongxia, Fan Kaihua．Research on the development of aviation hydraulic technology [R]. Chinese Aviation Society, 2019. (in Chinese)

作者简介

罗志会(1981−) 女，硕士，高级工程师。主要研究方向：机载系统情报研究。

Tel: 13814079963

E−mail:32228649@qq.com

Analysis of Hydraulic System of Long-range Bomber

Luo Zhihui*

Aviation Key Laboratory of Science an Technology on Aero Electromechanical System Integration，Nanjing Engineering Institute of Aircraft System，Nanjing 211106，China

Abstract: This paper firstly presents the overview of long−range bomber hydraulic systems, and then analyzes the B−1A and B−2B hydraulic systems in detail, including system configuration, functions, components and technical parameters, and then summarizes characteristics of the long−range bomber hydraulic system, and finally made a reasonable guess and speculation on the design of the next−generation long−range bomber hydraulic system.

Key Words: long-rang bomber; hydraulic system; B−1A; B−2B

Received: 2019-02-27； **Revised:** 2019-03-18； **Accepted:** 2019-03-25

***Corresponding author.Tel. :**13814079963 **E-mail:** 32228649@qq.com