

波音 737-8 事故简析

Brief Analysis of the Boeing 737-8 Crashes

■ 冯建文 孙黎 刘金龙/中国航发研究院

初步调查发现，导致波音 737-8 飞机在相隔不到半年的时间发生两起机毁人亡事故的原因是 737-8 机载飞行控制程序——机动特性增强系统（MCAS）的设计缺陷。

埃塞俄比亚航空公司的一架波音 737-8 客机（航班号 ET302）于 2019 年 3 月 10 日在起飞后不久发生坠毁，机上 149 名乘客和 8 名机组人员全部罹难（见图 1）。事故一出，全球震惊。2018 年 10 月 29 日，印度尼西亚狮航的一架 737-8 客机（航班号 JT610）同样是在起飞阶段坠毁。在不到半年的时间，新交付的 737-8 连续发生两起惊人相似的空难将波音推向了风口浪尖，并引发了全球范围内波音 737 MAX 系列飞机的停飞。

ET302 与 JT610 事故非常相似，失事时飞机均为不可控的急速俯冲坠地。初步调查将导致事故发生的元凶指向了波音 737 MAX 系列飞机中新引入的一个飞行控制程序——机动特性增强系统（MCAS）。

若要探寻 737-8 发生空难事故的起因，需要从波音 737 飞机的出身谈起。

历久弥新

737 是波音公司开发的一款中短程、双发窄体喷气式客机，也是民航史上最畅销的一款机型。自 1967 年首飞至今，波音公司制造并交付了 1 万



图1 埃航 737-8 客机坠机现场和“黑匣子”

余架波音 737 系列飞机。

随着航空发动机以及机载设备技术的进步，波音在继承 737 机体结构的前提下对其不断进行升级换代。

波音 737 的发展共分为四代：第一代波音 737，包括 737-100/200（7370G），配套的是普惠 JT8D 小涵道比发动机；第二代波音 737，也

称为经典型 737（737 CL），包括 737-300/400/500，配套的是 CFM 国际公司的 CFM56-3 型大涵道比发动机，并升级了航电系统；第三代波音 737，也称为新一代波音 737（737 NG），包括 737-600/700/800/900，增大了机翼面积及翼展，配套的是 CFM56-7 发动机；第四代波音 737，即 737 MAX，

表1 波音737系列飞机主要取证参数

	型号	发动机	涵道比	额定起飞推力/kN	最大起飞重量/kg
第一代	737-100	JT8D-7/9/15	0.99 ~ 1.10	62.3 ~ 69.0	58105
	737-200	JT8D-7/9/15/17	0.99 ~ 1.10	62.3 ~ 71.2	58105
	737-200C	JT8D-7/9/15/17	0.99 ~ 1.10	62.3 ~ 71.2	58105
第二代	737-300	CFM56-3C-1 CFM56-3-B1 CFM56-3B-2	4.9 ~ 5.0	89.4 ~ 98.3	63276
	737-400	CFM56-3C-1 CFM56-3B-2	4.9 ~ 5.0	98.3 ~ 104.6	68038
	737-500	CFM56-3C-1 CFM56-3B-1	4.9 ~ 5.0	89.4	61688
第三代	737-600	CFM56-7B20/22	5.3 ~ 5.4	91.7 ~ 101.0	65997
	737-700	CFM56-7B20/22/24/26	5.1 ~ 5.4	91.7 ~ 121.5	77564
	737-700C	CFM56-7B20/22/24/26	5.1 ~ 5.4	91.7 ~ 117.0	77564
	737-800	CFM56-7B20/22/24/26/27	5.1 ~ 5.4	91.7 ~ 121.5	79015
	737-900	CFM56-7B24/26/27	5.1 ~ 5.3	91.7 ~ 121.5	79015
	737-900ER	CFM56-7B24/26/27	5.1 ~ 5.3	91.7 ~ 121.5	85139
第四代	737-8	LEAP-1B25/27/28	9.0	119.2 ~ 130.5	82190
	737-9	LEAP-1B27/28	9.0	119.2 ~ 130.5	88314

来源：FAA关于波音737的型号认证数据单第A16WE号以及EASA关于波音737的型号认证数据单第IM.A.120号。

包括737-7/8/9/10等型号，配装的是CFM国际公司的LEAP-1B发动机，首架波音737-8于2017年5月22日交付客户。

表1是波音737系列飞机的主要取证参数对比，从表中可见，第四代波音737使用的LEAP-1B发动机的推力基本达到了第一代波音737飞机使用的JT8D发动机的两倍。

高性能的发动机使得737的最大起飞重量及航程大大增加，极大地提高了飞机的运载能力。

成长的烦恼

在发动机推力一定的情况下，通过大尺寸的风扇将更多的空气以较低速度

排出，要比通过核心机将较少空气以较高速度排出的推进效率更高。因为前者排出气体的动能较低，发动机损失较少。基于上述原因，为了提高推进效率，民用涡扇发动机的涵道比越

来越大，JT8D、CFM56-3、CFM56-7、LEAP-1B的涵道比分别为1.0、5.0、5 ~ 5.5、9，相应地这4种发动机的风扇直径也越来越大，发动机外廓高度分别为1358mm、1817mm、1829mm及2256mm。

现代客机的发动机一般采用翼下吊挂的安装方式，以悬臂梁的方式由机翼翼盒向前延伸将发动机“挑”起来，发动机位于机翼的前下方，如图2所示。

这种发动机布局的优点包括：发动机进气口的气流较为干净，没有受到机翼干扰；机翼升力大部分由上翼面产生，因而翼下吊挂的发动机对上翼面流场的影响较小；发动机如果发生非包容性事故，碎片不会打伤机翼引发更大灾难；发动机推力与重力对机翼产生的扭矩能互相抵消一部分。

发动机翼吊布局要求机翼下方有足够的净空。虽然是一款成功的客机，但是波音737也存在一个较大的缺陷——起落架过短，给翼下吊挂大直径的涡扇发动机带来了诸多限制。波音在20世纪60年代初开始设计波音737，那时基本是涡喷发动机的天下。波音737的起落架针对涡喷发动机所设计的高度是足够

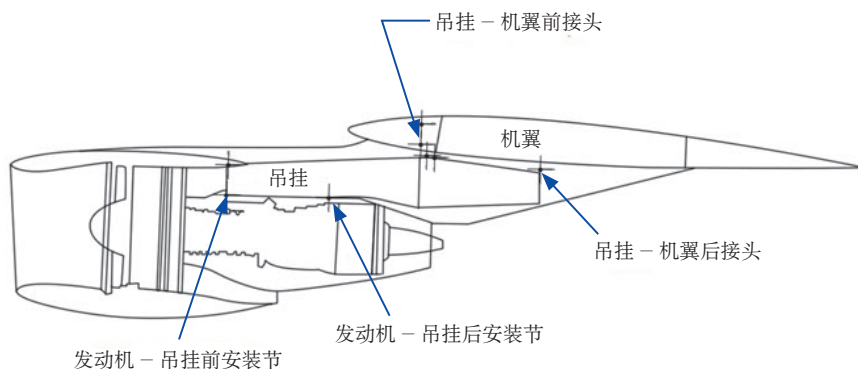


图2 吊挂典型结构形式

的。当涵道比更大的涡扇发动机问世后，波音737起落架短的问题就凸显出来了。

通过加大起落架高度以吊挂尺寸更大的发动机的想法并不可行。主起落架在飞机起飞后要向内侧收入到机体的主起落架舱内，所以起落架的高度还受限于起落架在机翼上的安装位置以及起落架舱空间的大小。而主起落架在翼盒上的安装位置，以及主起落架舱所在的机体龙骨梁区域分别是机翼和机体受力最大的区域。对这两处结构修改带来的工作量不亚于重新设计一款飞机。

波音737两组主起落架间轴距为5.23m或5.72m，而设计于20世纪80年代的空客公司A320飞机的主起落架轴距则达到了7.59m。就此而言，A320对大尺寸发动机的适配性优于波音737。

换装CFM56

第二代波音737-300于1984年首飞，但是波音早在20世纪70年代就开始研究为737换装大涵道比涡扇发动机的方案，为此进行了大量的风洞试验以及由波音707搭载CFM56-2发动机进行飞行试验。

由于加高起落架的方案不可行，波音公司的换发方案主要包括修改吊挂位置和减小短舱高度两项措施，如图3所示。

将CFM56-3发动机安装位置向前移动约1930mm，发动机短舱最大横截面置于机翼前方，并提高吊挂位置，使波音737-300发动机最上端几乎与机翼上翼面平齐。波音对吊挂的气动外形、发动机排气与机翼及襟翼滑轨流场相互作用、发动机-吊挂-机翼的共振等进行了研究试验，确保了方案可行。为了抵消

发动机前移给机翼带来的下俯力矩，波音737-300中后机身额外加长了153mm，从而使机身重量对机翼产生附加上仰力矩。

波音737换装CFM56-3时，采用了把短舱“拍扁”的方法。所谓的“拍扁”是把原本安装在发动机竖直中轴线的附件传动装置移到发动机两侧，从而减小了短舱高度。修改后的短舱横截面上半部分为近圆形，下半部分为近椭圆形。短舱下半部分的曲率半径较大，波音在风洞试验中发现，这样的进气口构型有助于提高进气道总压恢复系数。

第一代与第二代、第三代波音737的吊挂及短舱相比，在视觉上有明显差异，如图4所示。同时，波音737还更换了直径更大的前轮，使得前起落架抬高了137mm，为短舱提供了额外的离地净空。为了通过飞

机溅水试验，避免前起落架拍打的跑道积水涌入直径较大的CFM56发动机中，波音737的前起落架安装位置也做了调整，使其溅起的水花贴着发动机内侧飞过而不致于让发动机吞水。为了配合发动机的更换，波音737机翼的缝翼、襟翼以及舵面都做了修改。

换装LEAP

为了应对白热化的市场竞争，空客与波音分别于2010年和2011年推出了A320neo系列和737 MAX系列飞机。二者都是在成熟机型基础上换装新型发动机。CFM国际公司的LEAP发动机是737 MAX的唯一动力和A320neo的可选动力。LEAP发动机针对A320neo和737 MAX的子型号分别是LEAP-1A和LEAP-1B。

LEAP-1A和LEAP-1B的核心机基本一致，但低压系统的设计则有

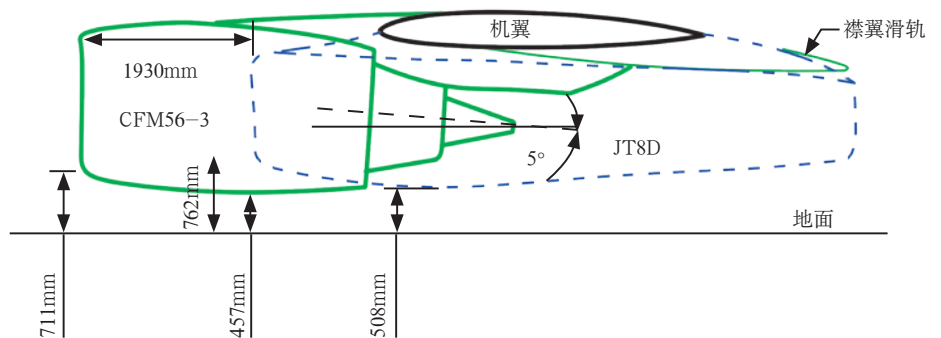


图3 CFM56-3与JT8D发动机安装对比



图4 波音737吊挂-短舱

所不同，其对比如表2所示。A320的空间足够，因此LEAP-1A风扇直径较大（198cm），涵道比达到了11。受限于737的安装空间，LEAP-1B的风扇直径稍小（176cm），涵道比只有9，驱动风扇的低压涡轮的级数也从7级降为5级。作为补偿，LEAP-1B转子的转速，特别是低压转子的转速明显高于LEAP-1A，从而实现了和LEAP-1A相当的推力水平。

LEAP-1B的一些关键参数是在波音参与的情况下确定的。不难推测，LEAP-1B的尺寸、转速的选择背后是波音公司大量的分析权衡。LEAP-1B在尺寸受限的情况下仍能获得优秀的性能，充分体现了波音公司强大的系统集成能力。

然而，发动机安装的问题还是没有完全解决，LEAP-1B的高度依然比

表2 LEAP-1A与LEAP-1B对比

	LEAP-1A	LEAP-1B
风扇增压级数	3	
高压压气机级数	10	
高压涡轮级数	2	
风扇直径/cm	198	176
涵道比	11	9
低压涡轮级数	7	5
长度/mm	3328	3147
外廓最大宽度/mm	2533 ~ 2543	2421
外廓最大高度/mm	2362 ~ 2368	2256
额定起飞推力/kN	106.8 ~ 143.05	111.27 ~ 130.41
额定最大连续推力/kN	104.58 ~ 140.96	107.00 ~ 127.62
LP最大转速/(r/min)	3894 (101% N1)	4586 (104.3% N1)
HP最大转速/(r/min)	19391 (116.5% N2)	19828 ~ 20171 (117.5% N2)

来源：EASA关于CFM LEAP-1A的型号认证数据单第E110号；EASA关于CFM LEAP-1B的型号认证数据单第E115号。

上一代的CFM56-7高出42.7cm。波音把LEAP-1B的吊挂点向前、向上

移动，最终保证了短舱与地面净空达到43cm，避免了吸入跑道异物的风险，同时保证了前起落架垮塌时发动机不会触碰到地面，如图5所示。

从737 MAX和737 NG正视图的对比可以看到LEAP-1B发动机的吊挂点有明显的提升，如图6所示。

对于机身更长的737-10，为了避免起飞时机尾擦地，波音公司采用了可伸缩式起落架，起落架在起飞过程中根据抬轮角度可最多升高241mm，如图7所示。

纵观四代波音737，发动机直径增大得较多，而短舱离地净空仅仅从51cm降到43cm，波音主要是通过降低吊挂高度和压缩短舱高度实现的。

MCAS及故障

虽然通过种种“修形”手段成功安装了LEAP-1B发动机，但737 MAX的短舱在大迎角飞行时会形成脱体涡流产生升力，由于LEAP-1B吊挂太过靠前，脱体涡流升力对机翼产生了较大的上仰力矩并有可能

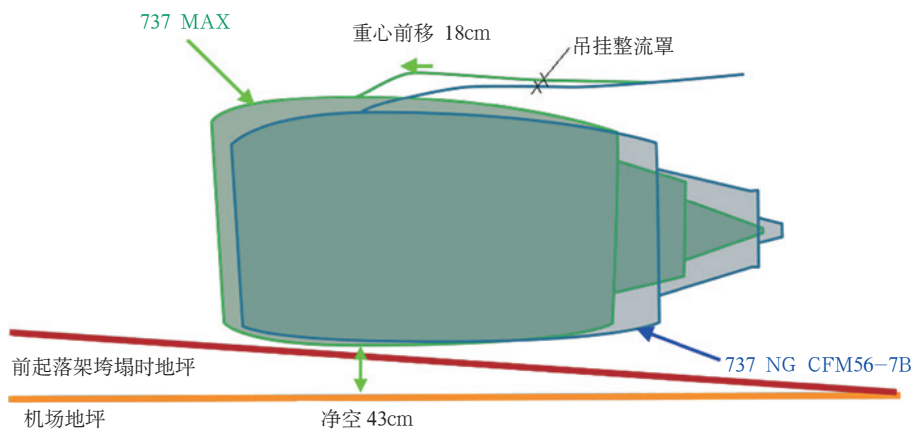


图5 737 MAX短舱安装调整示意



图6 737 MAX与737 NG对比（正视图）

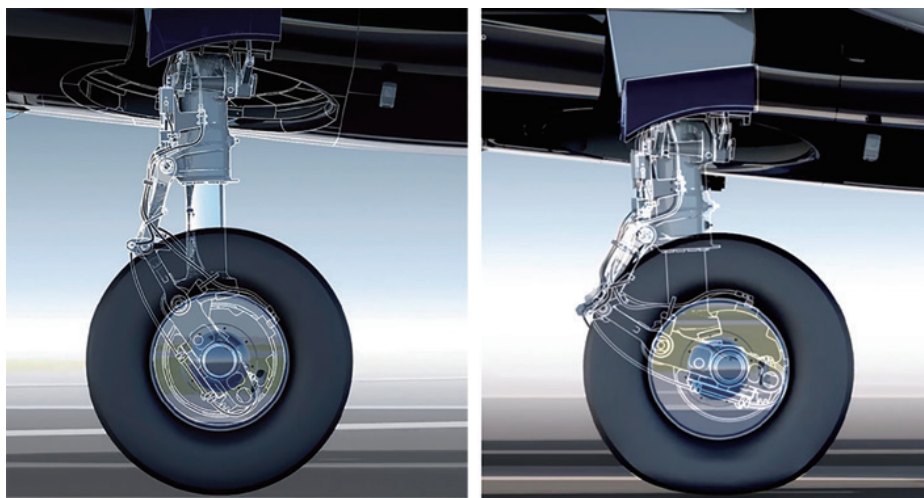


图7 波音737-10伸缩式起落架

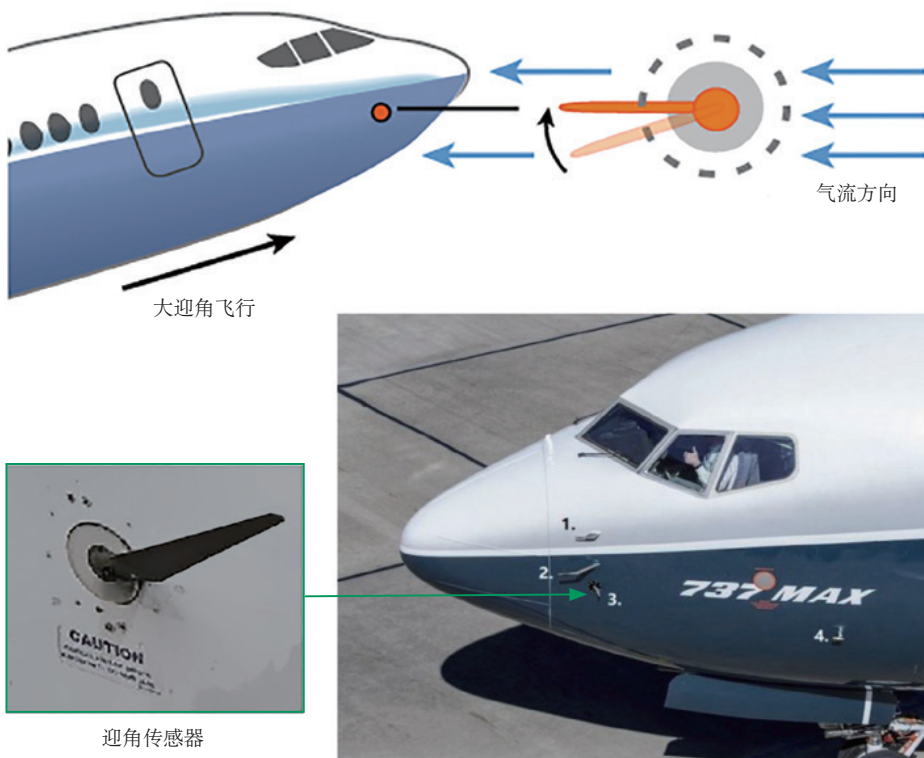


图8 迎角传感器

导致迎角进一步增大，不利于飞行俯仰稳定性。

为了增加飞行稳定性，波音开发了MCAS对飞行俯仰进行自动配平。MCAS在手动大迎角飞行、襟翼收起情况下自动启动。

MCAS利用机头的迎角传感器（见图8）读取飞机迎角。波音737机头两侧各有一组迎角传感器，但是MCAS只使用其中一组传感器的数据而没有将两组传感器数据对比检查，这为日后的空难埋下了祸根。

MCAS根据空速以及高度判断迎角超过限度后即自动启动。MCAS控制安定面以 $0.27 \text{ (}^\circ\text{) / s}$ 的速度向上偏转以压低机头，如图9所示，一次最多持续9.26s，使得安定面的偏转角度达到 2.5° 。执行一次安定面调节后MCAS会暂停5s，之后会根据迎角传感器数据判断是否进行下一次安定面调节。

前程未卜

印尼狮航JT610空难发生后，初步调查即怀疑事故原因为MCAS传感器故障所致。美国联邦航空局（FAA）发布了AD 2018-23-51适航指令，要求波音公司修改737 MAX飞行手册并告知飞行员如何解决由传感器错误导致错误的自动配平问题。FAA还指出，此适航指令只是过渡性措施，并非最终解决方案。波音在2018年11月6日以服务通告的形式公布了飞机在传感器读数错误引起不受控自动配平情况下手动切断平尾自动配平装置电路的方式。然而在2019年3月10日，又发生了埃塞俄比亚航空的ET302航班空难。

ET302航班空难发生后立即引发了全球范围内关于波音737 MAX的停飞潮。3月11日，中国民航局（CAAC）以民航明传电报的形式发布了《关于暂停波音737-8飞机商业运行的通知》，要求国内运输航空公司于2019年3月11日18时前暂停波音737-8飞机的商业运行。紧接着，印尼、新加坡、澳大利亚、马来西亚、阿曼、英国、欧盟等国家和地区先后发布了波音737 MAX的禁飞令。3月13日，美国政府及FAA对737 MAX也下达了停飞令。3月19日，美国交通部以及国会展开了关

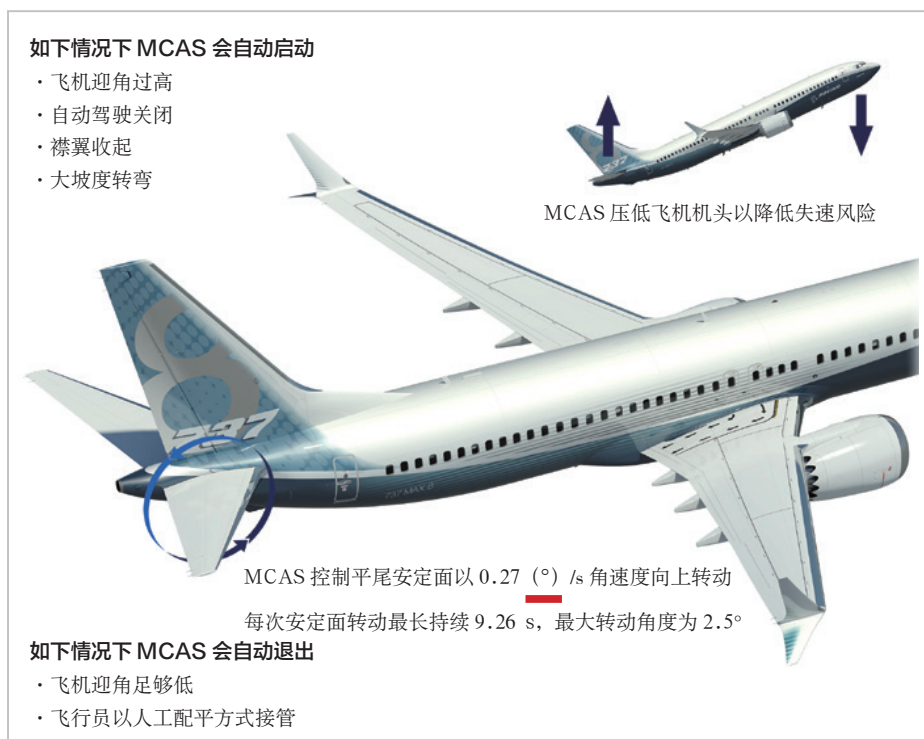


图9 737 MAX 的MCAS

于 FAA 对 737 MAX 系列飞机适航审定过程的调查。3月27日, 波音在西雅图公布了 MCAS 的改进计划, 主要包括软件改进、驾驶舱显示以及飞行员培训等三方面内容。

升级后的 MCAS 将提供多重容错保护, 飞控系统将对两套迎角传感器的数值, 如果两侧传感器数值差达到 5.5° 及以上时, MCAS 将不启动并在显示器上提醒飞行员。MCAS 在每个大迎角事件下激活时只提供一次输入而不会反复介入。飞行员通过驾驶杆操作飞机时, 飞行员的指令能够覆盖 MCAS 的命令。

波音表示将加强对飞行员关于 MCAS 的培训, 包括模拟器培训以及手册培训, 升级配平非正常检查单以及快速参考手册。

4月4日, 埃塞俄比亚交通部发布了 ET302 事故初步调查报告。对飞

行数据记录仪数据解读发现, ET302 起飞后不久两侧迎角传感器读数即产生了较大偏差, 其中左侧迎角传感器读数达到了 74.5° 而右侧迎角传感器读数为 15.3° 。飞行数据记录仪记录到非飞行员输入的 4 次自动的飞机机头向下配平指令及相应的 3 次水平安定面调整。飞行员按照波音所提供的方法切断了平尾自动配平装置电路, 并使用手动配平, 但没能将飞机从俯冲状态改出。同一天, 波音发表声明, 承认 MCAS 在两次空难事故中均由于错误的迎角输入而启动。

结束语

截至 4 月上旬, ET302 与 JT610 的官方调查最终报告还未发布, 波音 737 MAX 尚未复飞。但是, 这两件空难事故给人留下了很多思考。以下仅代表笔者个人观点。

飞行安全涉及飞行器的设计、制造、维护及人员培训等方方面面, 任何一方面都不允许有疏漏。波音 737 MAX 飞行手册中 MCAS 的描述篇幅过短, MCAS 系统失效情况下的应急预案在飞行员培训时很容易被漏掉。

飞机、发动机都属于复杂的巨系统, 对某一个部件的修改往往会牵一发而动全身。对导致波音 737-8 失事的 MCAS 的分析还得追溯到 737 原始的总体结构布局以及波音为了换发所做的种种努力。一架飞机、一台发动机上百万个设计参数的每一个参数都是精心雕琢出来的, 每一个零件背后都有一部进化史。型号设计水平依靠的是长期实践, 没有弯道超车的捷径。

飞行中到底是电脑更可靠还是人更可靠, 这是一个航空界长期争论的话题。波音升级版的 MCAS 将最终的决定权交给飞行员, 重新回到波音倡导的“飞行员高于一切”的设计理念。但另一方面, 依靠先进的机载电脑设备避免飞行员误操作, 在危急时候拯救飞机的例子也屡见不鲜。这个争论恐怕还要继续下去。但是, 有了先进的自动驾驶设备绝不代表可以降低对飞行员素质的要求。

737-8 事故对波音这个百年老字号的打击如此之大, 也为国内的航空制造业敲了一记警钟。未来国产大飞机、发动机投入市场后任何严重的质量问题、故障都有可能迫使型号停止发展。这是摆在航空制造业每一个从业人员面前的一个严峻的挑战。

航空动力

(冯建文, 中国航发研究院, 高级工程师, 主要从事结构强度分析工作)