

反推力装置“地面/空中”判定条件研究

孟军红^{1*} 化东胜²

(1. 航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089; 2. 中航西飞民用飞机有限责任公司, 西安 710089)

摘 要: 只在地面使用的反推力装置,一方面根据 CCAR 25.933 的要求在空中要防止意外打开;另一方面在地面使用时要求迅速可靠地打开,因此判断飞机在“地面”或“空中”成为反推控制系统的一个重要设计内容,若该条件判定飞机在地面的约束过于严格,则飞机着陆时反推不能尽早打开,影响反推在飞机高速时高效发挥作用;反之,若判定飞机在地面的约束过于宽松,则会增加反推在空中意外打开的概率,影响安全。分析了几种现役民航飞机的反推“地面/空中”判定条件,认为飞机后轮刚刚触地(但不一定触发轮载信号)是一个较好的“地面/空中”判定条件,设计时应注意判定条件须保持一定的独立性;不能因某一判定信号故障,导致反推、减速板或刹车中任何两个同时不能工作;不能因减速板或刹车的工作状态导致反推力装置不能打开,同时注意判定条件会影响适航的验证方法。

关键词: 反推力装置;地面/空中;条件;后轮;触地

中图分类号: V212

文献标识码: A



0 引言

现役民用涡扇飞机一般都设计有反推力装置(简称反推),且只在地面使用,其主要功能是在飞机着陆时或中断起飞时使飞机减速,空中禁止打开并防止空中非指令打开;因此反推控制系统中一个重要设计内容是判断飞机是处于地面还是空中(简称“地面/空中”判定条件)。该条件的合理性,决定了反推在地面能否及时打开,在空中能否有效防止非指令打开。

1 地面使用的反推力装置“地面/空中”判定条件的特点

反推力装置设计时有两个方向的需求,1)空中需求:防止意外打开,以满足 CCAR 25.933^[1]的相关要求。一般会设计三道防线,任何一道防线可防止反推力装置非指令打开^[2];2)地面需求:在飞机高速时反推力装置效率最高,因此希望飞机一接“地”,反推能立刻可靠地打开。因此“地面/空中”判定条件应可靠、准确且迅速。

另外正常着陆时,反推最早可使用时机为飞机从“空中”到“地面”过渡状态,这增加了“地面/空中”判定条件的设计难度,若该条件判定飞机在地面的约束过于严格,则飞机着陆时反推不能尽早打开,影响反推在飞机着陆时高速阶段高效发挥作用;反之,若该条件判定飞机在地面的约束过于宽松,则会增加反推在空中意外打开的概率,影响安全。因此要求该条件即能保证安全性又能满足适用性,偏向任何一方,要么降低反推的适用性,要么降低安全性。

2 民航飞机的“地面/空中”判定条件

常用于“地面/空中”判定条件的信号有:

- 1) 轮载信号 WOW (Weight ON Wheels), 起落架因承载产生位置变化,通过接近传感器感知并产生开关信号;
- 2) 轮速信号 WS (Wheel Speed), 通过测量机轮转速并转换为前进速度;
- 3) 无线电高度信号 RA (Radio Altimeter), 用无线电波测量飞机与地面实际距离获得的高度信号;

* 通信作者: E-mail: m_jh77@126.com

引用格式: 孟军红,化东胜.反推力装置“地面/空中”判定条件研究[J].民用飞机设计与研究,2022(2):102-110. MENG J H, HUA D S. Research on the “ground/air” definition of thrust reverser for ground operation only[J]. Civil Aircraft Design and Research,2022(2):102-110(in Chinese).

4) 起落架的“快速地面”信号,小车式起落架的机轮连杆空中自由放下状态与触地状态产生位置变化,通过接近传感器感知并产生开关信号。

2.1 波音 737 系列飞机的“地面/空中”判定条件

波音 737 飞机是最畅销的窄体客机,有第二代^[3]、NG 系列^[4]和最新 MAX^[5]系列,波音 737NG

系列的反推力控制系统原理如图 1 所示,判定条件见图 2,使用 2 个无线电高度信号(RA1 和 RA2)和 6 个轮载信号(前轮 2 个、左主轮 2 个、右主轮 2 个),判定逻辑为:若 RA1 < 10 ft 或 RA2 < 10 ft 或 6 个轮载信号中有任何 2 个或 2 个以上有轮载,则认为飞机在“地面”。

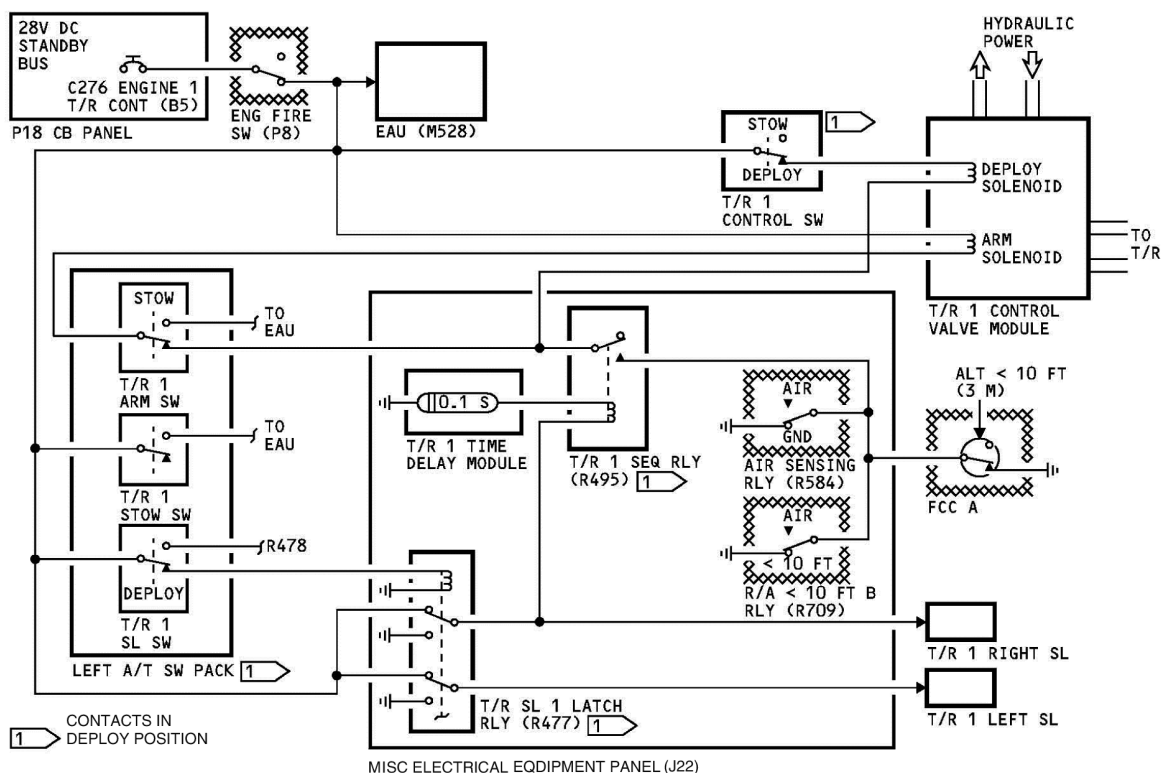
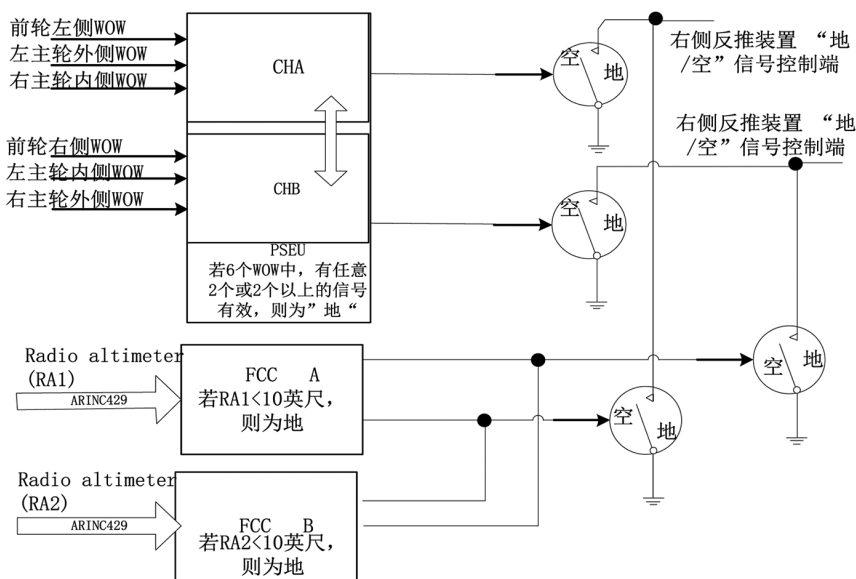


图 1 波音 737 NG 系列反推控制原理



根据波音 737 NG 系列的“地面/空中”判定逻辑,着陆时飞机与跑道距离小于 10 ft 或有主轮载信号时,机组就可操纵反推杆打开反推。NG 系列的机组操作手册^[6]也明确了飞机与跑道距离小于 10 ft 时允许打开反推,但实际上国内民航公司都要求机组至少后轮触地才能打开反推。那么波音公司这样设计的可能原因是什么?

分析:CCAR25.473(a)(2)设计着陆重量^[7](以最大下沉速度着陆情况中的最大重量)时的限制下沉速度为 10 ft/s;CCAR25.473(a)(3)设计起飞重量(以减小的下沉速度着陆情况中的最大重量)时的限制下沉速度为 6 ft/s。飞机一般在 10 ft 至 20 ft 的高度开始拉平,拉平后姿态角 3° ,典型的下降速率为每秒 2 ft ~ 3 ft。飞机与跑道距离等于 10 ft 时,

开始计时 $t=0$ s,无线电高度自动报出“TEN”,机组听到声音后,拉反推杆至反推慢车位置,假设机组反应时间为 2 s,则 $t=2$ s 时:飞机降落了 4 ft ~ 6 ft,与跑道的距离大约为 6 ft ~ 4 ft;反推完全打开需要时间为 1 s ~ 2 s,取平均值 1.5 s, $t=3.5$ s 时:飞机继续降落了 3 ft ~ 4.5 ft,与跑道的距离大约为 3 ft 或已经触地。这种设计从硬件上基本能保证反推打开时飞机后轮刚刚接触跑道或非常接近跑道,同时又给各个航空公司提供了更大的选择权限,各航空公司根据自己运营区域和特点,通过操纵程序限制,但在一些紧急情况下,能为机组提供较早的减速能力。

2.2 空客 A320 系列飞机的“地面/空中”判定条件

空客 A320^[8]系列飞机,发动机为翼吊安装,主起落架为支柱式,反推控制系统原理如图 3 所示。

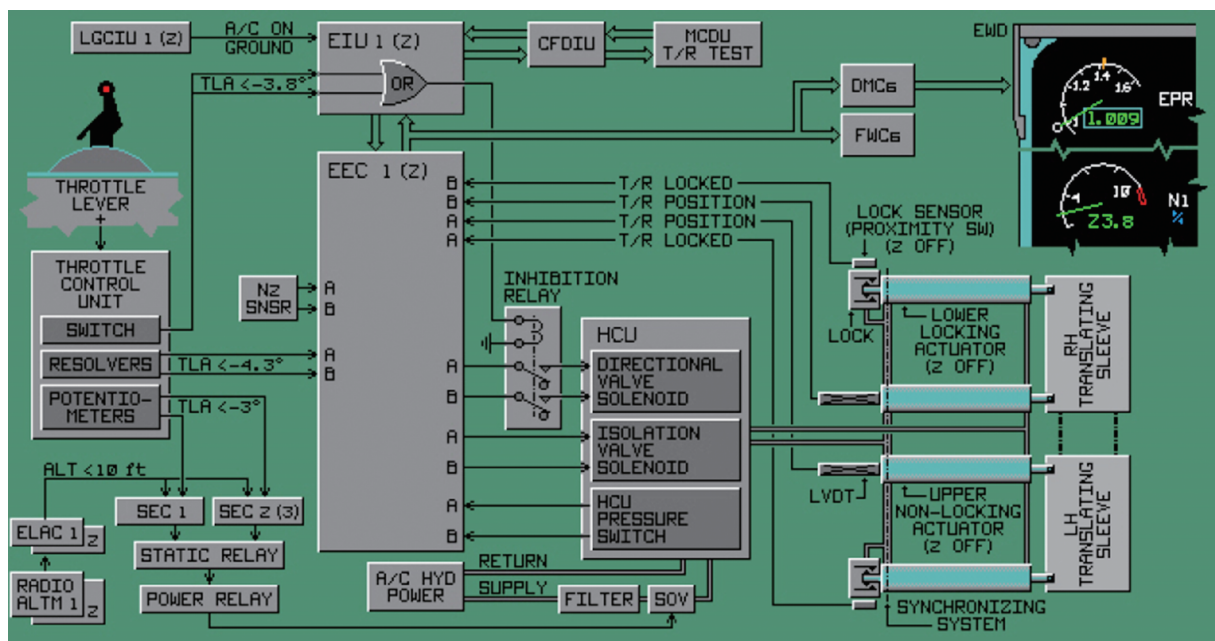


图 3 空客 A320 系列飞机反推控制原理

“地面/空中”的判定条件在第三道防线中采用无线电高度信号,在第二道防线中采用轮载信号。

第三道防线的“地面/空中”定义:如图 4 所示,当无线电高度信号 $RA < 10$ ft 时,扰流板升降舵计算机 SEC(The Spoiler Elevator Computer),判定飞机为地面,再当油门杆角度 TLA(Thrust Lever Angle) $< -3^\circ$ 时,打开反推液压切断阀 SOV 阀(Shut Off Valve),使飞机的液压进入反推作动系统。

第二道防线的“地面/空中”定义:如图 5 所示,采用轮载 WOW 信号判断“地面/空中”。左侧起落

架控制和接口组件 LGCIU(1)采集前轮、左主轮和右主轮的 WOW 信号,硬线送给发动机接口单元 EIU(1)(Engine Interface Unit),EIU1 根据 3 个信号判断飞机“地面/空中”状态,将结果通过总线送给 FADEC1 的两个通道。EIU 的判断逻辑:有 2 个或 3 个 WOW 信号为真(=1,在地面),即机轮已经承重,被压缩,则判断为“地面”;否则为“空中”。发动机电子控制器 FADEC 根据“地面/空中”信号和 TLA 控制反推打开。右侧反推使用 LGCIU(2)和 EIU(2),逻辑相同。

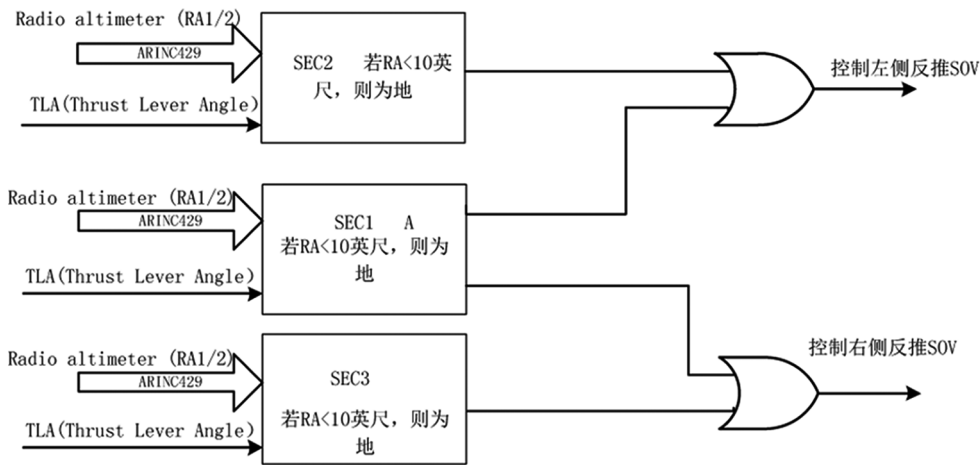


图 4 空客 A320 系列飞机 SOV 阀地面/空中”判定逻辑

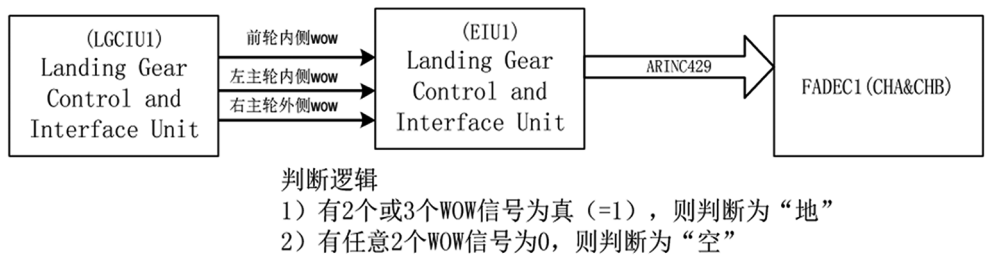


图 5 空客 A320 系列飞机“地面/空中”判定逻辑

2.3 ARJ21-700 飞机的“地面/空中”判定条件

ARJ21-700^[9]飞机是我国自主研发的第一款喷气式支线客机,发动机为尾吊安装,主起落架为支柱式,FADEC 根据轮载 WOW 和轮速 WS 信号确定飞机“地面/空中”状态。

轮载信号 WOW,如图 6 所示,由作动筒位置计算机 PACU(Position Actuation Control Units)采集前轮、左主轮内侧和右主轮外侧的 WOW 信号,将左主轮内侧 WOW 和右主轮外侧 WOW 通过硬线直接送进 FADEC,同时用总线将 3 个轮载信号 WOW 送进 FADEC。FADEC 中左右主轮载信号的选择逻辑见表 1。左侧反推使用 PACU1 和 DCU1,右侧使用 PACU2 和 DCU2。

表 1 轮载信号 WOW 选择逻辑

左侧/ 右侧硬线 WOW	左侧/右侧 总线 WOW	判定结果
TT	X	T
FF	X	F
TF	TT 或 T	T
TF	FF 或 F	F

左侧/ 右侧硬线 WOW	左侧/右侧 总线 WOW	判定结果
TF	TF 或 -	DEFAULT
T	TT 或 T	T
T	FF 或 F	DEFAULT
T	TF 或 -	T
F	TT 或 T	DEFAULT
F	FF 或 F	F
F	TF 或 -	F
-	X	DEFAULT

注:T-有轮载,在地面;F-无轮载,在空中;-信号故障;
X-信号不确定;DEFAULT-空中

轮速 WS 信号,如图 7 所示,由刹车控制计算机 BCU(Brake Control Unit)采集,将 4 个轮速信号通过总线经数据集中计算机 DCU (Data concentrator Unit)送进 FADEC。FADEC 选择有效信号,计算出平均值参与“地面/空中”判断。当信号都失效时,默认轮速为 200 节。左侧反推使用 BCU1 和 DCU1,右侧使用 BCU2 和 DCU2。

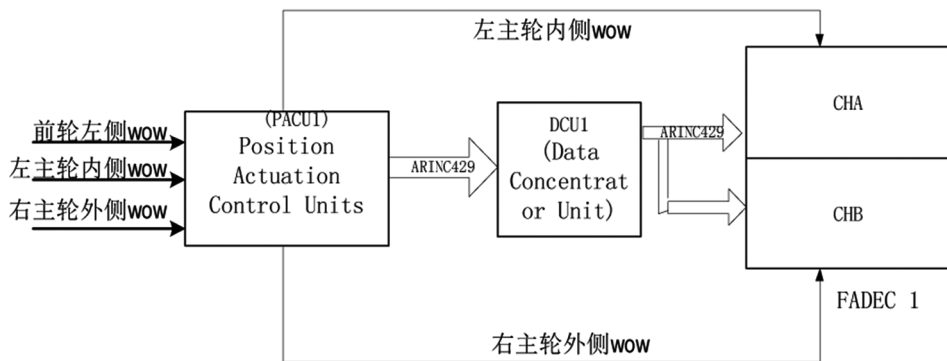


图6 ARJ21-700 飞机轮载 WOW 信号

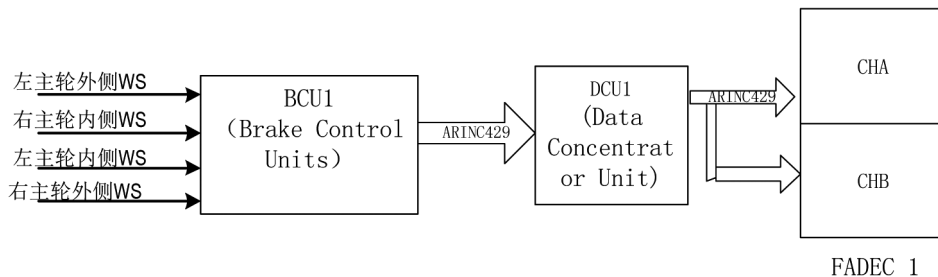


图7 ARJ21-700 飞机的轮速 WS 信号

ARJ21-700 飞机的“地面/空中”判断条件,见图 8,若主轮载 WOW 有效且[(轮速 WS > 20 节)或(前轮载 WOW 有效)],则认为飞机在“地面”。

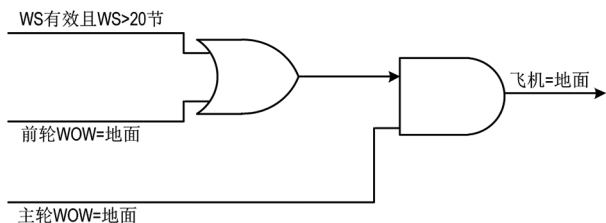


图8 ARJ21-700 飞机“地面/空中”判定逻辑

ERJ170、ERJ190/195^[10] 飞机与 ARJ21-700 飞机的“地面/空中”判断逻辑基本相同,综合使用了主轮载、轮速和前轮载信号,判断条件为:若主轮载 WOW 有效且[(轮速 WS > 25 节)或(前轮载 WOW 有效)],则认为飞机在“地面”。

波音 717^[11] 飞机,发动机为尾吊安装,主起落架为支柱式,打开反推力装置时,要求至少同时有一个前轮载信号和一个主轮载信号。

2.4 波音 787 飞机“地面/空中”判定条件

波音 787^[12] 飞机采用多轮小车式起落架,为了降落时能立刻使用反推,专门设了一种“快速地面”信号(fast on ground),该信号表征主机轮已经接

触地面,但主轮没有承载触发传统的“轮载”信号。该信号的传感器为接近开关,当主起落架放下且机轮未触地时,两个机轮的连接拉杆与地面成一定夹角,拉杆与接近传感器距离较小,接近传感器闭合,如图 9 所示,当主起落架放下且机轮触地后,连接拉杆与地面基本平行,拉杆与接近传感器距离较大,接近传感器断开,如图 10 所示。

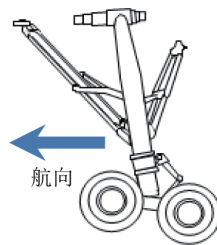


图9 波音 787 主轮放下状态且未触地前示意图

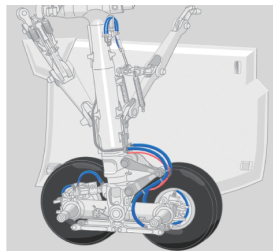


图10 波音 787 主轮放下状态且触地后示意图

打开反推时,要求左、右两侧必须同时有“快速地面”信号,这种设计的优点为机组感觉后轮落地,就能操作打开反推力装置,几乎不需要等待且可靠性较高。

2.5 空客 A330、A350 和 A380 飞机的“地面/空中”判定条件

空客 A330^[13] 和 A350 反推系统的“地面/空中”判断逻辑与 A320 基本相同,如图 11 所示。不

同的地方有两点:

1)第三道防线的无线电高度信号判断阈值从 10 英尺改为 6 英尺;

2)第二道防线采用类似波音 787 飞机的“快速地面”信号,表示:起落架放下且锁定,机轮触地(机轮离开自由放下位置,但没有因承重被压缩)。

A380 则采用机身起落架和机翼起落架的“快速地面”信号,没有使用前起落架信号。

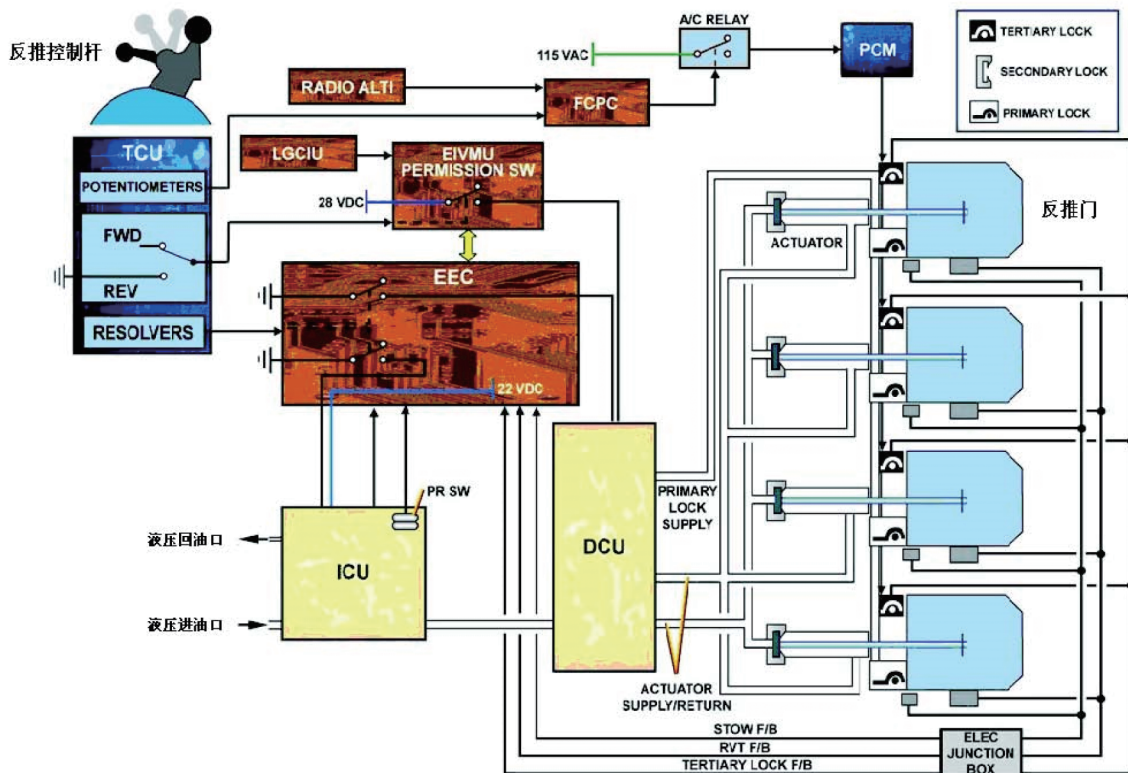


图 11 空客 A330 飞机反推控制原理图

2.6 图 154 飞机“地面/空中”判定条件

伊尔 76 飞机、图 154 飞机、伊尔-62 飞机和英国三叉戟飞机,在降落中后轮距离跑道大约 0.5 m ~ 1 m 时,就可以打开反推。

这类飞机大约为 20 世纪 70 年代设计,反推的控制方式为机械式,机组主要根据经验判断飞机与地面的距离,对机组操作技术要求高,目前还有少量运营。

该使用方法可能带来的好处:在减速板故障、逆风、落点过高或高速着陆的情况下,可尽早打开反推。但缺点也明显:打开反推后不能复飞;反推若不能对称打开,容易导致偏出跑道;若打开时导致飞机抬头,可能使机尾擦地,若打开时导致飞机低头,可

能导致前轮先落地。

3 设计时应注意的问题

3.1 “地面/空中”判定条件的信号防抖和滤波

设计时应根据“地面/空中”判定信号的特性,设计合适的滤波或防抖动功能。

轮载 WOW 信号受飞机状态影响较大,在飞机载重较轻、拉飘、落地过轻或侧风时,容易出现信号抖动或信号触发较晚,造成反推不能及时可靠打开。如图 12 所示,某飞机试飞时后轮载信号抖动(0 = 无轮载;1 = 有轮载),造成反推力装置频繁连续执行展开、收起动作,触发虚警和故障。

轮速信号 WS 在低速时,偏差较大,高速时信号

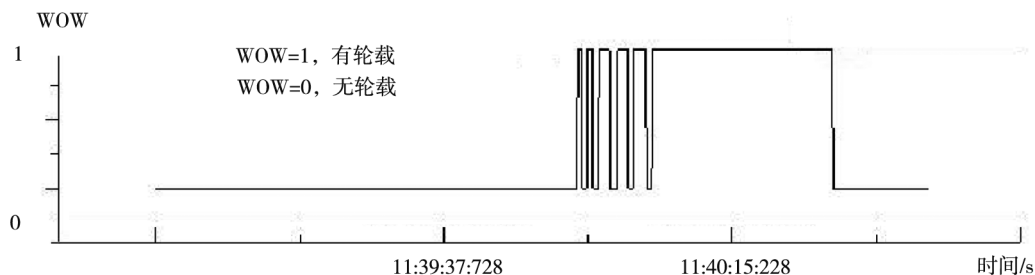


图 12 某飞机试飞落地时时主轮载信号抖动

有时会瞬变,应设计滤波和防抖动功能。飞机起飞离地之后收起落架之前,机轮由于惯性,轮速会继续保持一段时间,应屏蔽轮速信号。

无线电高度信号 RA 在接近跑道时精度较差,易受地表障碍物和雨水影响。

建议初始设计时,实现反推控制功能的计算机尽可能获取到上述所有信号(有些信号可作为备份信号),当后期试飞需要改进逻辑时,只需反推控制计算机软件更改,不会引起多个系统软件或硬件的连锁更改。同样,信号滤波或防抖设计应该由反推控制计算机实现,当试飞时发现阈值或逻辑不合适需要改进时,只需要反推控制计算机软件更改。

3.2 “地面/空中”判定条件的独立性

刹车、减速板和反推力装置是飞机地面减速最主要的三种方式。一般正常操作步骤如下:

- 1) 飞机拉平,在跑道接地区域主轮接地;
- 2) 放出减速板;
- 3) 使用反推力装置和刹车;
- 4) 持续使用刹车。

反推力装置的“地面/空中”判定条件应该保持一定的独立性。独立性包含两个含义:

- 1) 不能因某一判定信号问题,导致反推、减速板或刹车中任何两个同时不能正常工作;
- 2) 判定条件不因减速板或刹车的工作状态影响,导致反推力装置不能打开。

在某运输机开始试飞时,机组反映减速板、反推力装置在飞机后轮触地后较长一段时间才能打开。

该运输机的减速板完全打开和反推的打开都需要有后轮载信号,没有后轮载信号时,减速板只能部分放出,主轮承受载较轻,刹车只能起到部分减速作用,此时整个飞机的减速能力大大下降,可能会影响安全。查看飞行参数,着陆时从后轮触地开始计时,在刹车部分起作用、减速板部分放出、反推力装置没

有打开的情况下,需要大约 4 s ~ 10 s 才能稳定触发后轮载信号。刹车系统设计时认为减速板部分放出后能迅速破坏飞机升力构型,产生后轮载,但实际上该运输机因气动特性影响,减速板部分放出情况下并不能立刻产生轮载,因此导致刹车等待减速板放出触发轮载,而减速板和反推力装置却在等待轮载来完全放出或打开,造成三种减速方式的触发条件互锁。后来系统改进时,减速板引进轮速和低空无线电高度信号,反推力装置引进轮速信号,减速板所用的轮速信号与反推力装置所用的轮速信号来自不同的传感器和计算机,反推力装置用轮速判断飞机在地面的逻辑比减速板要宽松一些:中轮或后轮有任何两个轮速大于 120 km/h 且连续保持 400 ms,就允许打开反推力装置。更改后即使减速板没有完全放出,飞机后轮触地后约 1 s 内轮速就可大于 120 km/h。更改后,机组反映效果良好。

3.3 “地面/空中”判定条件的宽严对反推力装置 CCAR25.933(a) 操纵性符合性验证方法的影响

若“地面/空中”判定条件过宽,会增加空中反推力非指令打开的概率,影响适航 CCAR25.933(a) 操纵性符合性验证方法的选择^[14],该条验证方法的基本选择原则如下:当空中反推力装置的非指令打开概率大于 1×10^{-7} /飞行小时,必须通过飞行试验来表明失效后的操纵性,具体标准包括 CCAR25.143、CCAR25.147、CCAR25.149 和 CCAR25.161 条款;当空中反推力装置非指令打开的概率小于 1×10^{-7} /飞行小时,但大于 1×10^{-9} /飞行小时,符合性方法可以是飞行试验或者是分析计算,但该分析的数据必须是经由飞行试验验证过的有效数据;当概率小于 1×10^{-9} /飞行小时,可以从可靠性方面通过分析表明符合性。目前飞机设计时更倾向于使空中反推力装置非指令打开的概率小于 1×10^{-9} /飞行小时,采用可靠性分析的方法证明符合性。

4 结论

1) 只在地面使用的反推力装置,其主要功能是在飞机着陆时或中断起飞时使飞机减速,空中禁止打开并防止空中非指令打开,因此反推控制系统设计中一个重要设计内容是判断飞机是处于地面还是空中,该条件的合理性,决定了反推在地面能否及时可靠地打开,空中能否有效防止非指令打开。该判定条件会影响适航 CCAR25. 933 (a) 操纵性符合性验证方法的选择;

2) 飞机后轮刚刚接触地面是一个较好的判定飞机在“地面”的判定条件;

3) 可用于“地面/空中”的判定条件信号有: 轮载 WOW、轮速 WS、无线电高度 RA 和起落架的“快速地面”信号。注意应设计信号的滤波和防抖动功能;

4) 判定条件应该保持一定的独立性: 不能因某一判定信号故障,导致反推、减速板或刹车中任何两个同时不能工作;不能因减速板或刹车的工作状态导致反推力装置不能打开。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 中国民用航空规章第 25 部运输类飞机适航标准:CCAR-25R4[S]. 北京:中国民用航空局,2011.
- [2] 张艳慧,秦浩,王代军. 发动机反推力系统安全性设计[J]. 航空动力学报,2015,30(7):1784-1792.
- [3] THE BOEING COMPANY. 737-300/400/500 Aircraft maintenance manual[M]. The Boeing Company, 2008.

- [4] THE BOEING COMPANY. 737-600/700/800/900 Aircraft maintenance manual [M]. The Boeing Company, 2001.
- [5] THE BOEING COMPANY. 737-7/8/9 Aircraft training manual[M]. The Boeing Company, 2016.
- [6] THE BOEING COMPANY. 737-600/700/800/900 Flight crew operations manual [M]. The Boeing Company, 2008.
- [7] 冯振宇. 运输类飞机适航要求解读:第二卷[M]. 北京:航空工业出版社,2013:201-208.
- [8] THE AIRBUS COMPANY. A319/A320/A321 Aircraft maintenance manual[M]. The Airbus Company,1996.
- [9] 中国商用飞机有限责任公司. ARJ21-700 飞行机组操作手册[M]. 中国商用飞机有限责任公司. 2018.
- [10] THE EMBRAER COMPANY. 190/195 Aircraft maintenance manual[M]; The Embraer Company, 2007.
- [11] THE BOEING COMPANY. 717 Aircraft maintenance manual[M]. The Boeing Company,2007.
- [12] THE BOEING COMPANY. 787 Flight crew training manual[M]. The Boeing Company, 2016.
- [13] THE AIRBUS COMPANY. A330 Aircraft maintenance manual[M]. The Airbus Company,2005.
- [14] 冯振宇. 运输类飞机适航要求解读:第四卷[M]. 北京:航空工业出版社,2013:51-61.

作者简介

孟军红 男,工程师。主要研究方向:动力装置控制系统设计工作。E-Mail:m_jh77@126.com

化东胜 男,工程师。主要研究方向:动力装置控制系统设计工作。E-Mail:xcac_huads@avic.com

Research on the “ground/air” definition of thrust reverser for ground operation only

MENG Junhong^{1*} HUA Dongsheng²

(1. China AVIC The First Aircraft institute,Xi'an 710089,China; 2. AVIC XAC Commercial Aircraft Co. Ltd,Xi'an 710089,China)

Abstract: On the one hand, the thrust reverser that operate on ground only will prevent accidental opening in air in order to comply with the CCAR 25. 933; on the other hand, it is required to deploy reliably and rapidly when landing on the ground. Therefore, judging whether the aircraft is on the “ground or in the air” has become very important for the control design of thrust reverser. If the “ground/air” definition that judge the aircraft is on ground is too

rigid, the thrust reverser can not be opened as soon as possible when landing, affecting the efficient role of the thrust reverser at high speed on the contrary, if the definition is too loose, it will increase the probability of accidental opening of the thrust reverser in the air. This paper analyzes the “ground/air” definition of thrust reverser for several civil aircraft in service, and considers that the main land wheels just touch the ground (but does not necessarily trigger the wheel load signal) is a good time to deploy. In the design, it should be noted that the definition to deploy should be independence: any two of the thrust reverser, wheel braking or spoiler speed braking can not work at the same time due to the failure of a judgment signal. The thrust reverser cannot be opened due to the working state of the wheel braking or spoiler speed braking. At the same time, it shall be noted that the definition have influence on the means compliance with CCAR requirements.

Keywords: thrust reverser; ground /air; definition; the main land gear; touch the ground

* Corresponding author. E-mail: m_jh77@126.com