

# 民用飞机刹车系统接地保护、 锁轮保护和滑水保护研究

## Research on Touchdown Protection, Locked Wheel Protection and Hydroplaning Protection for Commercial Aircraft Brake System

杨 鹏 / YANG Peng

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

介绍了民用飞机刹车系统的三个保护功能,即接地保护、锁轮保护和滑水保护功能,这三者虽然是刹车防滑功能的辅助功能,但对飞机的安全性和操作性有着重要影响。针对三个保护功能,分别分析了其设置目的、工作阶段、作用原理和控制逻辑,并给出了控制逻辑的建议值。鉴于其重要的安全性作用,进行了定性的安全性FHA需求分析。同时,对于控制逻辑相对复杂的锁轮保护功能,对比分析了两种不同控制方案,并给出了结论。

**关键词:** 刹车系统; 接地保护; 锁轮保护; 滑水保护; 逻辑; FHA

**中图分类号:** V227

**文献标识码:** A

[Abstract] This paper introduces three protection functions for brake system of commercial aircrafts. They are the touchdown protection, locked wheel protection and hydroplaning protection. Though the three functions are parts of antiskid protection, they significantly affect the safety and operability of the aircraft. This paper analyzes the purposes of its establishment, the working phases, the principle and control logic for the three functions, and gives the proposed value of the control logic. Furthermore, the Functional Hazard Assessment (FHA) requirements are analyzed because of the important safety effect. Meanwhile two control schemes are compared and analyzed for the complexity of locked wheel protection, and the conclusion was given.

[Keywords] brake system; touchdown protection; locked wheel protection; hydroplaning protection; logic; functional hazard assessment(FHA)

## 0 引言

刹车系统作为民用飞机的重要组成部分,承担着使飞机在滑行、中断起飞和着陆过程中安全减速的重要作用。最初,机轮刹车系统不具有防滑功能。为了防止机轮抱死和减少轮胎磨损<sup>[1]</sup>,二十世纪五十年代,英国邓禄普公司发明了防滑刹车系统。随着飞机的起飞、着陆速度逐渐提高,对防滑系统提出了更高的要求,要求防滑系统能够尽可能提高效率,减少中断起飞和着陆等情况下的刹车距离。美国 Hydro-

Aire 公司是其中的先行者和佼佼者,其开发的 MARK 系列自二十世纪至今已经有五代<sup>[2]</sup>,即 MARK I ~ MARK V,广泛应用于飞机中,随着对飞机安全性和操纵性等要求的进一步提高,飞机刹车系统实现了接地保护、锁轮保护和滑水保护等功能,这些功能作为防滑系统的辅助功能,同样承担着特定工况下防止机轮抱死和轮胎爆胎的作用<sup>[3]</sup>。基于此,本文以具有 2 个自动转动的前机轮和左右主起落架上的各 2 个共 4 个刹车主机轮的典型三点式起落架为例,着重描述了这三个辅助功能的工作状况、控制逻辑,并进行

了初步的定性 FHA 安全性分析。对于相对复杂的锁轮保护功能,还分析了两种不同控制方案。

## 1 接地保护

### 1.1 接地保护的工作阶段及作用

飞机在空中时,机轮是静止的。在着陆时的接地瞬间,速度比较大,此时如果机轮上有刹车压力(如着陆前飞行员就已经脚踩刹车脚蹬、飞行员已设置自动刹车指令等),机轮来不及快速起转,就有很大概率导致出现轮胎爆破,且可能是多个轮胎同时爆破。根据当前飞机主起落架布置,考虑刹车机轮所在起落架支柱上布置的刹车管路和电缆,很难避免因多个轮胎爆破而造成的刹车功能全部丧失等影响,而导致出现灾难级事件。在飞机设计时,根据 CS § 25.734<sup>[4]</sup>和 SAE ARP 4761<sup>[5]</sup>,要求不能因轮胎爆破而导致发生灾难级事件。因此必须在飞机着陆时增加相应的保护动作,即接地保护功能。

### 1.2 接地保护的逻辑

根据设置接地保护功能的目的,需要在着陆时使所有机轮上刹车压力为零(即使此时飞行员已经脚踩刹车脚蹬给出刹车指令),使机轮随飞机而自由滚转加速。当机轮加速到一定值时,或者飞机已经在地面上无刹车着陆一段时间后,再对机轮正常供压,实施刹车动作。

因此接地保护功能的逻辑共分为 2 种情况:执行状态和解除状态。执行状态即接地保护功能起作用的状态,解除状态即不需要使用接地保护功能的状态。

根据以上分析,接地保护的执行状态控制逻辑为:

飞机状态指示在空中或飞机状态指示为由在空中转化为在地面上,且转化时间小于  $t$  接地且参考轮速小于  $V$  接地。

其中,  $t$  接地为接地的时间阈值,如可以设为  $2s \sim 5s$ ;  $V$  接地为参考轮速的速度阈值,根据飞机实际参数及着陆场长等指标进行选取,如  $30kn$  ( $1.852km/h$ )、 $60kn$  等;参考轮速是用于判断飞机机轮轮速的参考值,如可以使用四个机轮轮速的平均值,也可以使用四个机轮轮速的最小值等。

通过以上逻辑,就可以使飞机在空中时以及在接地的  $t$  接地时间内且飞机参考轮速尚未上升到  $V$  接地阈值时,使机轮刹车压力为零。

相应地,当满足飞机在地面上,且接地时间大于  $t$  接地或者参考轮速大于  $V$  接地阈值时,就可以抑制接地保护功能,使飞机正常供压进行刹车动作。

### 1.3 接地保护的 FHA 分析

FHA 为功能危害性分析,是对飞机系统功能的安全性进行定性评估的一种方法,考量的是系统故障后对飞机的影响,分为灾难级(I级,机毁人亡)、危险级(II级,机体结构部分损坏或者人员少量伤亡)、较大级(III级,较大降低飞机性能或者人员受伤)、较小级(IV级,轻微降低飞机性能或者人员不舒服)和无影响(V级,人员不方便),详见 SAE ARP 4761。

一个系统的功能故障一般分为两类:功能丧失和功能非指令作动。功能丧失即功能无法使用,功能非指令作动是指在飞机不需要此执行此功能,或者飞行员未下达执行指令时,此功能却自动执行。其中,对于功能丧失,还分为通告的功能丧失和未通告的功能丧失。通告的功能丧失是指在功能丧失后,会在驾驶舱种通过告警信息告知飞行员,从而使飞行员可以提前做好准备;未通告的功能丧失是指在功能丧失后,飞行员无法收到告警信息,只可能在由于功能丧失而对飞机造成影响后才可能感知到。

根据以上分析原则,考虑接地保护功能的工作机理,可知:当着陆前接地保护功能丧失且告知飞行员时,飞行员可以有意识地不踩刹车脚蹬,且不打开自动刹车功能,从而使着陆时不带刹车压力着陆,当已接地  $t$  接地时间后,再执行刹车动作,因为  $t$  接地时间比较短,不会使飞机因着陆距离过长而冲出跑道,因此定位 III 级;当着陆前接地保护功能丧失且未告知飞行员时,飞行员如果脚踩刹车脚蹬或者设置自动刹车指令,则会在着陆时带刹车,这样有很大概率导致多个轮胎爆破,进而导致完全丧失刹车功能等影响,因此定为 I 级;当在地面上非指令地执行接地保护功能时,会使刹车系统丧失供压而完全丧失刹车功能,因此定为 I 级。

因此接地保护功能的 FHA 应为如下三条:

- 1) 着陆前通告的丧失接地保护功能, III 级;
- 2) 着陆前未通告的丧失接地保护功能, I 级;
- 3) 非指令的接地保护功能, I 级。

## 2 锁轮保护

### 2.1 锁轮保护的工作阶段及作用

由于实际跑道路面情况多变,飞机气动力也在

调整,同时可能还存在侧风等情况,因此轮胎与地面的摩擦系数也在不停地变化中,这就会对防滑系统的工作带来极强的非线性。因此,实际刹车过程中,就可能出现某个机轮由于防滑工作不够及时而导致的打滑现象。当出现打滑时,机轮由滑动摩擦逐渐变为滚动摩擦,这会降低整个飞机的刹车能力,增大刹车距离。同时,由于对应另一侧起落架上的刹车能力不变,因而会由于力矩不平衡而导致可能出现飞机偏转,甚至冲出跑道,带来严重后果。因此,需要在刹车系统中增加对打滑机轮的保护动作,即锁轮保护功能。

## 2.2 锁轮保护配对机轮选择方案对比分析

根据设置锁轮保护功能的目的,一般选择一个配对机轮作为参考对象,通过比较配对机轮轮速与目标机轮的轮速,当目标机轮的轮速比其配对机轮轮速低于一定比例时,就认为此机轮发生了严重打滑现象,此时就将其刹车压力设置为零,使之随飞机自由滚转。当其轮速转上来时,就可以施加刹车压力,重新执行刹车动作。

对于配对机轮的选择,一般有两种方案,其中方案 A 选择同侧主起落架上的机轮作为配对机轮,即左内机轮与左外机轮作为一对配对机轮,右内机轮与右外机轮作为一对配对机轮;方案 B 选择另一侧主起落架上的镜像机轮作为配对机轮,即左内机轮与右内机轮作为一对配对机轮,左外机轮与右外机轮作为一对配对机轮。在正常情况下,两种方案都可以在某一机轮打滑到一定程度时执行锁轮保护功能,效果也是一样的。但是,当出现以下两种非正常情况时,两种方案就会有区别。

1)情况 1:当同侧两个机轮同时打滑时,如跑道上某处有积水,此时方案 A 无法执行,方案 B 仍可执行锁轮保护。相对来说,左右两侧机轮由于积水同时打滑的概率就小得多。

2)情况 2:当某一机轮轮速信号故障时,如轮速传感器故障,导致非指令地执行了锁轮保护功能,切掉配对机轮的刹车压力,此时如果按照方案 A,可能导致同侧两个机轮无法刹车,或者同侧一个机轮无法刹车、一个机轮无法防滑的情况,飞机可能出现严重的偏转;而方案 B 则可能出现左右各一个机轮无法刹车,或者左右一个机轮无法刹车、一个机轮无法防滑的情况,由于是左右各一个机轮刹车故障,因此偏转影响比较小。

综上,方案 B 更有效。

## 2.3 锁轮保护的逻辑

根据以上分析,选择方案 B 对每一个刹车机轮执行锁轮保护。锁轮保护功能的逻辑共分为两种情况:执行状态和解除状态。

针对每一机轮的锁轮保护的执行状态控制逻辑为:

飞机状态指示在地面上且机轮轮速小于配对机轮轮速的  $X$  锁轮%且配对机轮轮速大于  $V$  锁轮。

其中  $X$  锁轮%为机轮轮速为与配对机轮轮速的比例阈值,如可以设为 20%~50%; $V$  锁轮为配对机轮轮速阈值,只有在配对机轮轮速大于此阈值时才能执行锁轮保护功能,防止在地速时差动刹车转弯时非指令地执行锁轮保护功能,如可以设为 60kn。

当满足执行状态逻辑时,就将此机轮上的刹车压力设为零。当不满足此逻辑时,就抑制锁轮保护功能,执行正常的刹车动作。

## 2.4 锁轮保护的 FHA 分析

根据 FHA 分析原则,当锁轮功能故障且告知飞行员时,飞行员可以轻踩刹车并随时准备纠偏,定为 IV 级;当锁轮保护功能故障且未告知飞行员时,飞机可能出现刹车能力降低和偏转,定为 III 级;当非指令地执行锁轮保护功能时,可能出现比较严重的刹车能力降低和偏转,定为 II 级。

因此锁轮保护功能的 FHA 应为如下三条:

- 1)通告的丧失锁轮保护功能,IV 级;
- 2)未通告的丧失锁轮保护功能,III 级;
- 3)非指令的锁轮保护功能,II 级。

# 3 滑水保护

## 3.1 滑水保护的工作阶段及作用

当飞机在积水等摩擦系数过低的跑道上中断起飞或者着陆时,有可能会由于积水等带来的摩擦系数太低而导致机轮打滑,从而导致无法刹车、刹车能力降低、刹车距离增大,并且导致飞机偏转。因此,针对这些情况,需要在刹车系统中增加对摩擦系数过低的跑道情况的适应性和保护,即滑水保护。

## 3.2 滑水保护的逻辑

由于飞机在积水等摩擦系数过低的跑道上刹车时,可能出现两个以上甚至所有机轮一起打滑的情况,因此就不能采用锁轮保护中配对机轮作

为参照的方式,而是需要根据飞机地速进行判断。飞机地速是指飞机相对地面的相对速度,一般由飞机上的惯导系统提供。当出现某一机轮速度低于地速一定值时,就将此机轮上的刹车压力降为零,从而使此机轮可以随飞机自由滚转;当其轮速上升到地速附近时,就重新施加刹车压力进行正常刹车。

相应来说,积水等摩擦系数过低的跑道情况比较少,跑道上全程积水等情况出现的概率也比较低,因此只需要在左右主起落架机轮中各选出一个机轮执行滑水保护功能即可。本文推荐采用左外轮和右内轮或者左内轮和右外轮的组合,这样可以覆盖尽可能多的工况。

因此,针对左外轮和右内轮或者左内轮和右外轮的滑水保护的逻辑为:

飞机状态指示在地面上且机轮轮速比地速小 $V$ 滑水且地速大于 $V$ 滑水。

其中, $V$ 滑水为机轮轮速比地速小的差值阈值和地速的阈值,以此来判断机轮轮速比飞机速度小的程度,地速达到阈值且差值达到阈值时就认为此机轮出现滑水情况,当地速小于阈值时,飞机处于低速阶段,不需要执行滑水保护,如可以设置为30kn~60kn。

当满足执行状态逻辑时,就将此机轮上的刹车压力设为零。当不满足此逻辑时,就抑制滑水保护功能,执行正常的刹车动作。

### 3.3 滑水保护的FHA分析

根据FHA分析原则,当滑水功能故障且告知飞行员时,飞行员可以轻踩刹车并随时准备纠偏,定为IV级;当滑水保护功能故障且未告知飞行员时,飞机可能出现刹车能力降低和偏转,定为III级;当非指令地执行滑水保护功能时,由于仅仅在左右各

一个机轮上有滑水保护设置,刹车能力降低和偏转不会太严重,定为III级。

因此滑水保护功能的FHA应为如下三条:

- 1) 通告的丧失滑水保护功能,IV级;
- 2) 未通告的丧失滑水保护功能,III级;
- 3) 非指令的滑水保护功能,III级。

## 4 结论

本文介绍了飞机刹车系统防滑功能的三个辅助功能:接地保护、锁轮保护和滑水保护,分析了功能来源、工作阶段、工作方式、控制逻辑和定性的安全性要求,并进行了锁轮保护两种不同控制方案的对比分析,对于飞机刹车系统的控制研究具有一定意义。其中,控制逻辑的建议阈值需要根据实际飞机的参数和需求进行最优选择,并辅助仿真和可行的试验进行验证。

### 参考文献:

- [1] Young D W. Aircraft Landing Gears—The Past, Present and Future[S]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D Transport Engineering, pp. 75-92, 1986.
- [2] 陆晓洁,谢利理,林辉. 飞机防滑刹车系统的回顾与展望[J]. 航空科学技术, 2003(2): 29-32.
- [3] SAE. AIR 1739A-Information on Antiskid Systems, Society of Automotive Engineers, pp. 12, 2010.
- [4] EASA. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes[S]. Amendment 16, European Aviation Safety Agency, pp. 1-D-13—1-D-15, 2015.
- [5] SAE. ARP 4761-Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment[S]. Society of Automotive Engineers, 1996:26-28.

(上接第19页)

- [4] ATA. MSG-3 Operator/manufacturer Scheduled maintenance development[S]. USA: ATA, 2007.
- [5] 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册(下册): 损伤容限设计与分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 361-368.
- [6] FAA. AC25.571-1D Damage tolerance and fatigue evaluation of structure[S]. USA: FAA, 2011.
- [7] Boeing. Structural Fatigue Methods and Allowables Manual

- [Z]. USA: Boeing, 1997.
- [8] Airbus. Fatigue Manual[Z]. France: Airbus, 1998.
- [9] 《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》编委会. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册(上册): 疲劳设计与分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 312-323.
- [10] Airbus. Factors to be Used in Justification [Z]. France: Airbus, 2007.
- [11] Airbus. Selection of Mandatory Fatigue Maintenance Tasks [Z]. France: Airbus, 2003.