

# 民机舱门过中心锁机构的 传感器虚告警可靠性分析

徐锦锦\* 吴绍庭 王帅强 朱铮铮

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘要:** 基于适航条款对舱门的安全性要求,舱门普遍采用锁机构与锁传感器来实现锁定和指示功能。由于锁机构上锁、解锁状态与锁传感器激活、不激活状态存在偏差,导致传感器可能虚告警。分析了过中心锁机构的锁定原理,考虑锁机构过中心后过度运动导致的解锁风险,确定了过中心锁机构上锁、解锁的临界位置。针对典型的接近传感器,阐明了感应原理,考虑标靶与传感器的安装位置、制造及装配误差等因素,识别了传感器的确定激活区、确定不激活区的位置划分。通过对比分析,建立了由于机构导致的锁传感器虚告警可靠性分析模型,形成了可靠性分析方法。以某型民机舱门过中心锁机构的传感器为例,评估了由于机构导致传感器虚告警的失效概率,并对虚告警的可靠性提出了优化建议。结果表明,通过锁机构设计优化或者提高机构的制造、装配精度,同时综合权衡传感器误示上锁到位的风险,能有效提高舱门指示的可靠性,为舱门指示功能的设计提供参考。

**关键词:** 民机舱门;过中心锁机构;传感器;虚告警;可靠性分析

中图分类号: V223+.9

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

民机舱门在飞行过程中需保持舱门处于关闭、上闩和锁定的状态,防止飞行中舱门意外解闩造成灾难性的影响<sup>[1]</sup>。因此,舱门设计闩机构和锁机构,闩机构处于上闩位置时能限制舱门的打开,锁机构处于上锁位置时能限制闩机构脱闩。舱门锁机构普遍采用机构间的限位进行锁定,限制闩机构进一步的解闩运动。同时为了保障锁定状态的稳定性,在锁机构中可采用过中心设计<sup>[2]</sup>,保证锁机构能够保持在上锁状态。

依据航空事故的统计数据<sup>[3]</sup>,为了确保舱门机构处于安全位置,有必要针对舱门的关闭、上闩、锁定等状态进行监控,以便机组准确判断舱门状态。因此,建议在舱门上布置关闭、上闩、上锁等传感器,并通过舱门告警系统实时采集状态信息,及时反馈给机组人员<sup>[4]</sup>。在驾驶舱内,提供可靠的舱门

状态指示对于飞机组确认舱门安全尤为重要。

接近传感器是飞机舱门中常用的传感器,用于探测机构的运动状态。其可靠性除了考虑传感器本身元件的故障外,还应考虑由于感应原理、安装位置、调节精度、机构精度等因素的不确定性可能导致传递错误的舱门状态误判,包括误示舱门运动到位或误示舱门未到位(即虚告警)。

目前国内外学者在过中心机构<sup>[5-6]</sup>、传感器<sup>[7]</sup>的设计及可靠性等方面均有相关研究。晏瀛<sup>[8]</sup>等针对民机舱门过中心锁定机构进行了原理分析,以锁机构过中心为上锁到位的判据,开展了锁机构运动到位的可靠性分析。陈安强<sup>[9]</sup>等提出了一种基于机构运动精度的传感器错误指示可靠性分析方法,并对传感器误指示舱门上锁到位的失效原因和可靠性做了详细讨论。结合现有研究,需分析锁机构过中心设计特点,考虑锁机构过中心后继续运动,导致锁机构与闩机构的限位区域随之减少,从而无法有效上锁,增加作为上锁

\* 通信作者. E-mail: xujinjin@comac.cc

**引用格式:** 徐锦锦,吴绍庭,王帅强,等.民机舱门过中心锁机构的传感器虚告警可靠性分析[J].民用飞机设计与研究,2024(3):36-41. XU J J, WU S T, WANG S Q, et al. Reliability analysis of sensor false alarms for over-center locking mechanisms of civil aircraft doors[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3):36-41 (in Chinese).

到位的判据。同时,传感器错误指示舱门未上锁的状态会造成虚告警,造成机组人员的工作负担,影响飞机签派,造成经济损失。因此,结合过中心锁机构的工作原理,开展传感器虚告警的可靠性分析十分必要。

本文以某型民机舱门过中心锁机构为分析对象,判断锁机构过中心后过度运动对锁定功能的影响,建立锁机构上锁到位的可靠性判据。依据适航条款 CCAR-25-R4 部第 25.783 条对舱门指示功能的要求,结合锁传感器的工作原理,建立由于机构导致的锁传感器虚告警和误示上锁的可靠性分析模型,分析锁机构的过中心设计、传感器布置位置、安装精度等对传感器虚告警的可靠性影响,形成过中心锁机构的传感器虚告警可靠性分析方法。

## 1 适航条款内容

CCAR 25.783(e)(3)<sup>[1]</sup> 条款要求:在驾驶舱内必须有目视措施,如果门没有完全关闭、锁闩和锁定则给驾驶员发出信号。该措施必须被设计成任何失效或者失效组合导致错误的关闭、锁闩和锁定指示是不可能的。

飞机失效状态的影响等级分为五类,即灾难性的、危险的、较大的、较小的和无安全性影响<sup>[10]</sup>。针对舱门指示功能,识别失效状态“舱门传感器错误指示”,属于较大的失效状态,其影响等级为 III 类,安全性指标要求为小于  $1 \times 10^{-5}$ /飞行小时<sup>[11]</sup>。

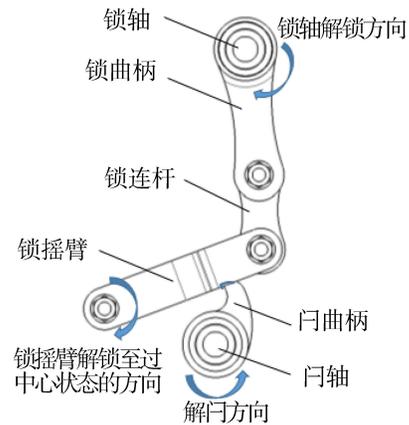
舱门锁传感器错误指示包括虚告警和误示舱门上锁到位。以某型民机舱门为例,除锁传感器本身元件的故障外,由于机构导致的锁传感器虚告警或误示上锁到位的可靠性要求均需小于  $5 \times 10^{-7}$ /飞行小时。

## 2 民机舱门过中心锁机构原理

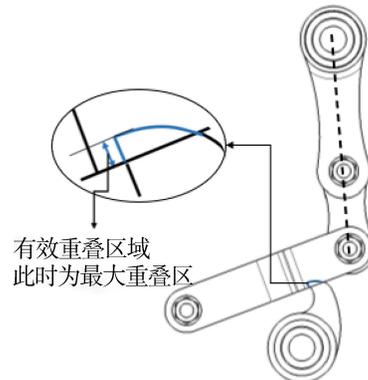
民机舱门普遍采用闩机构、锁机构实现舱门锁闩、锁定功能。闩机构阻止舱门意外打开,锁机构用于锁定闩机构,防止舱门意外解闩。

图 1 为某型民机舱门锁机构示意图,包括锁轴、锁曲柄、锁连杆、锁摇臂等。锁轴、锁摇臂安装在舱门结构上,舱门通过手柄机构驱动锁轴转动,锁轴带动锁曲柄转动,最终驱动锁摇臂转动。为保持锁机构处于上锁状态,平面四连杆设计过中心。当锁机构处于完全锁定状态时,若锁摇臂受到振动等外部因素导致解锁运动,机构解锁至过中心的临界位置,则锁摇臂无法继续带动锁曲柄转动,锁机构保持在上锁位置。

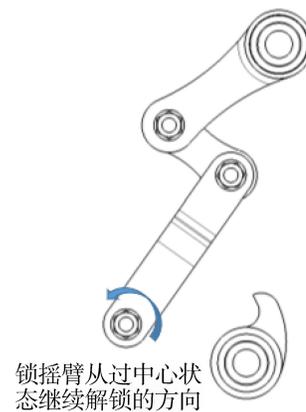
闩轴上布置闩曲柄,在完全上锁位置闩曲柄与锁摇臂保持适量重叠,从而限制闩机构解闩运动,实现锁定功能。当锁机构处于过中心临界状态时,锁摇臂与闩曲柄的重叠区域最大。随着锁机构越过过中心位继续上锁,锁摇臂会反向运动,重叠区域随之减小。当重叠区域减小到一定程度时,锁机构失去锁定功能。因此,锁机构需保证越过过中心位的临界状态,同时锁摇臂与闩曲柄保有安全重叠量,才能实现锁定功能。



(a) 完全上锁状态



(b) 锁机构过中心状态



(c) 完全解锁状态

图 1 舱门过中心锁机构示意图

### 3 锁传感器原理

锁传感器采用接近传感器,主要由传感器、标靶、支架等组成,传感器通过支架安装在舱门固定结构上,标靶安装在锁机构上。传感器相对舱门固定结构保持静止,标靶随锁机构转动。当锁机构处于完全锁定状态,标靶端面与传感器端面接近并保证一定覆盖,传感器指示上锁到位。

典型接近传感器的感应曲线,如图 2 所示。当标靶的边缘位于曲线  $a$  之上,则为确定不激活区域;当标靶的边缘位于曲线  $b$  之下,则为确定激活区域;当标靶的边缘位于曲线  $a$  和  $b$  之间,则为模糊区域。通过标靶边缘到传感器轴线的距离、标靶端面到传感器端面的轴向距离,考虑传感器安装的同轴度、间距公差等因素,获取给定传感器的确定激活区域、确定不激活区域的临界位置,用于可靠性分析。

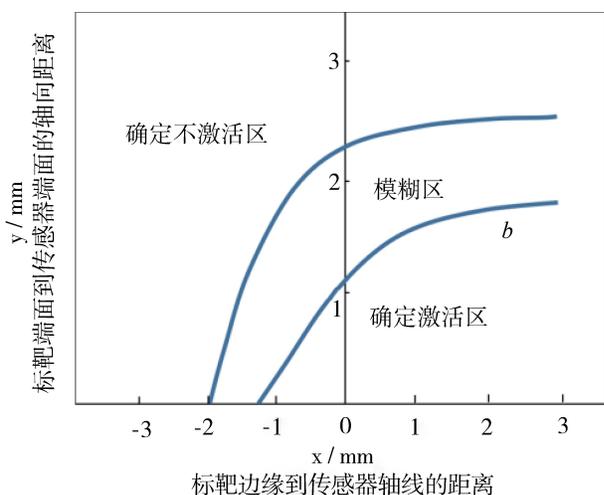


图 2 典型接近传感器的感应曲线

### 4 锁传感器虚告警可靠性分析

由于机构导致的过中心锁机构传感器虚告警,主要研究锁机构上锁、解锁位置与传感器激活、不激活区域间的差异性。依据过中心锁机构的设计原理以及传感器的感应方式,建立传感器虚告警的可靠性模型。同时,也可建立传感器误示上锁的可靠性模型。

舱门过中心锁机构及锁传感器的工作分析,如图 3 所示。

图中各参数含义如下:点  $O$  为锁轴中心; $OA_0$  为手柄完全打开时锁处于完全解锁状态; $OA$  为手柄完

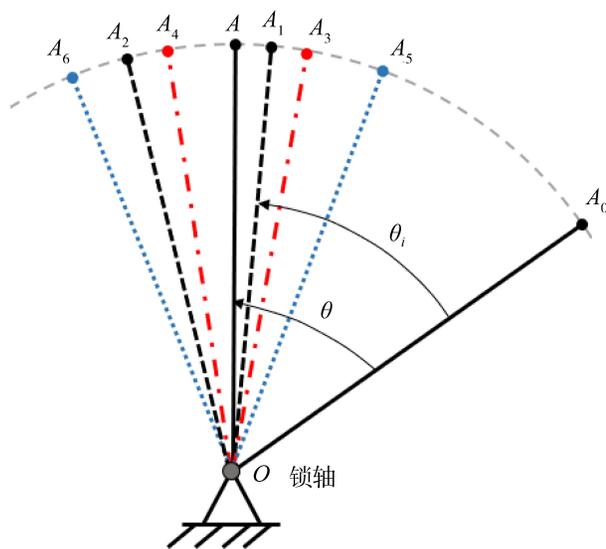


图 3 过中心锁机构及锁传感器的工作分析图

全关闭时锁处于完全上锁状态; $OA_1$  为锁机构处于过中心的临界状态; $OA_2$  为锁机构过中心后过度运动至临界解锁状态; $OA_3$  为锁传感器进入确定激活区的临界状态; $OA_4$  为锁传感器远离确定激活区的临界状态; $OA_5$  为锁传感器远离确定不激活区临界状态; $OA_6$  为锁传感器进入确定不激活区临界状态; $OA_1$  至  $OA_2$  为锁机构上锁到位的范围; $OA_3$  至  $OA_4$  为锁传感器确定激活的范围; $OA_5$  至  $OA_6$  的以外区间为锁传感器确定不激活的范围; $OA_5$  至  $OA_3$ 、 $OA_4$  至  $OA_6$  为锁传感器模糊区域的范围; $\theta$  为锁机构从完全解锁  $OA_0$  状态到完全上锁  $OA$  状态锁轴转动的角度; $\theta_i$  为锁机构从完全解锁  $OA_0$  状态到  $OA_1$  状态锁轴转动的角度。

锁机构的运动精度取决于零件制造、机构装配等过程中的各种随机因素。锁机构认定上锁取决于过中心的临界位置以及锁摇臂与凹曲柄的有效重叠量。锁传感器的激活、不激活判断取决于传感器的感应原理、标靶与传感器的安装间隙和同轴度要求等。

以锁机构过中心为例,建立功能函数:

$$\theta_M = \theta - \theta_1 \quad (1)$$

式中,  $\theta_M > 0$  时表示锁机构满足过中心要求;  $\theta_M \leq 0$  时表示锁机构不满足过中心要求。则舱门锁机构未过中心的概率为:

$$P_f = P(\theta_M = \theta - \theta_1 \leq 0) \quad (2)$$

考虑影响  $\theta$  和  $\theta_1$  的各参数具有分散性,假设各随机参数服从正态分布,则锁机构过中心的可靠性

指标为:

$$\beta_M = \frac{\theta - \theta_1}{\sqrt{\sigma_\theta^2 + \sigma_{\theta_1}^2}} \quad (3)$$

式中,  $\theta$  和  $\theta_1$  代表均值;  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_{\theta_1}$  分别为  $\theta$  和  $\theta_1$  的标准差。

根据正态分布, 计算锁机构未过中心的失效概率为:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta_M) = \Phi(-\beta_M) \quad (4)$$

由此, 建立锁传感器虚告警、误示上锁可靠性分析模型:

- 1) 过中心锁机构上锁到位需满足:  $\theta_1 < \theta < \theta_2$ ;
- 2) 锁传感器确定激活需满足:  $\theta_3 < \theta < \theta_4$ ;
- 3) 锁传感器确定不激活需满足:  $\theta < \theta_5$  或  $\theta > \theta_6$ ;
- 4) 锁传感器虚告警的范围:  $\theta_4 < \theta < \theta_2$  或  $\theta_1 < \theta < \theta_3$ ;
- 5) 锁传感器误示上锁到位的范围:  $\theta_5 < \theta < \theta_1$  或  $\theta_2 < \theta < \theta_6$ 。

基于以上分析, 过中心锁机构传感器虚告警的失效概率为:

$$P_f = P(\theta_4 < \theta < \theta_2) + P(\theta_1 < \theta < \theta_3) \quad (5)$$

过中心锁机构传感器误示上锁到位的失效概率为:

$$P_f = P(\theta_5 < \theta < \theta_1) + P(\theta_2 < \theta < \theta_6) \quad (6)$$

基于上述公式, 规避或减少  $\theta_1$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_5$  之间的差异以及  $\theta_2$ 、 $\theta_4$ 、 $\theta_6$  之间的差异, 能降低虚告警和误示上锁的失效概率。然而传感器存在模糊区, 锁机构的上锁状态和锁传感器的激活状态通常难以完全匹配, 需进行可靠性计算及可靠性优化设计。

## 5 应用算例

某型民机舱门过中心锁机构可简化为一套平面四连杆, 如图4所示。过中心锁机构的设计参数, 详见表1。

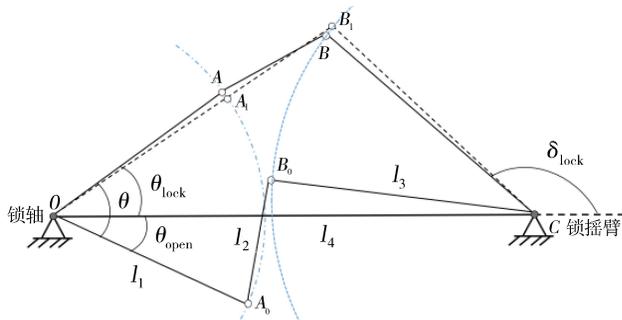


图4 某型民机舱门过中心锁机构分析图

表1 某型民机舱门过中心锁机构设计参数

参数	均值	标准差
$l_1$	60 mm	0.123 mm
$l_2$	35 mm	0.103 mm
$l_3$	80 mm	0.143 mm
$l_4$	140 mm	0.167 mm
$\theta_{open}$	25°	0.167°
$\theta$	60°	0.240°
$\theta_{lock}$	35°	0.292°
$\delta_{lock}$	139.32°	0.167°

依据舱门机构工作原理, 分析手柄机构与锁轴间的传动关系, 获取锁轴完全解锁位置的角度  $\theta_{open}$ 、锁轴实际转动角度  $\theta$ 、锁轴完全上锁位置的角度  $\theta_{lock}$  及其分布情况。建立图4中平面四连杆的几何关系, 结合蒙特卡罗法<sup>[12]</sup>, 分析锁摇臂在完全上锁位置的角度  $\delta_{lock}$  及其分布。

当锁机构处于过中心状态时, 通过公式(7), 计算过中心的临界角度  $\theta_1$  及其分布。

$$\theta_1 = \arccos \frac{(l_1 + l_2)^2 + l_4^2 - l_3^2}{2l_4(l_1 + l_2)} + \theta_{open} \quad (7)$$

为保障锁摇臂与凹曲柄保持安全的重叠量, 依据锁摇臂与凹曲柄的限位情况, 当锁摇臂在完全上锁位置,  $\delta_{lock}$  继续旋转约2°, 锁机构处于临界解锁位置。通过平面四连杆的几何关系, 获取该临界状态对应的角度  $\theta_2$  及其分布。

依据锁传感器的感应原理和安装位置, 结合标靶与传感器的间隙、同轴度等情况, 分析传感器确定激活和确定不激活的范围, 获取  $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 、 $\theta_5$  和  $\theta_6$  及其分布。

通过上述方法, 完成锁机构及锁传感器的参数值计算, 详见表2。

表2 某型民机舱门锁机构及锁传感器计算参数

参数	均值/(°)	标准差/(°)
$\theta_1$	58.33	0.236
$\theta_2$	68.27	0.289
$\theta_3$	57.96	0.304
$\theta_4$	62.04	0.304
$\theta_5$	50.88	0.322
$\theta_6$	69.12	0.322

依据公式(5),计算锁传感器虚告警的失效概率为:

$$P_f = P(\theta_4 < \theta < \theta_2) + P(\theta_1 < \theta < \theta_3)$$

$$P_f = 6.93 \times 10^{-8}$$

依据公式(6),计算锁传感器误示上锁到位的失效概率为:

$$P_f = P(\theta_5 < \theta < \theta_1) + P(\theta_2 < \theta < \theta_6)$$

$$P_f = 3.50 \times 10^{-7}$$

本文研究对象的平均飞行时间为 2.5 飞行小时,由于机构导致的锁传感器虚告警和误示上锁的失效率分别为  $2.8 \times 10^{-8}$ /飞行小时、 $1.4 \times 10^{-7}$ /飞行小时,可靠性满足指标要求。

锁传感器错误指示的原因在于激活、不激活区域与锁机构上锁、不上锁的状态存在偏差。为了降低虚告警的风险,可通过锁机构的设计优化降低由于机构导致虚告警的失效概率。以优化  $\theta_2$  为例,进行对比分析,详见表 3。

表 3 某型民机舱门锁传感器虚告警优化分析

参数优化	$P_f$ 虚告警	$P_f$ 误示上锁到位
$\theta_2 \sim N(68.27, 0.289^2)$	$6.93 \times 10^{-8}$	$3.50 \times 10^{-7}$
$\theta_2 \sim N(62.1, 0.289^2)$	$5.80 \times 10^{-8}$	$3.61 \times 10^{-7}$
$\theta \sim N(60, 0.240^2)$	$6.93 \times 10^{-8}$	$3.50 \times 10^{-7}$
$\theta \sim N(60, 0.210^2)$	$1.68 \times 10^{-8}$	$6.24 \times 10^{-8}$

分析结果表明:减小  $\theta_2$  的均值,即缩小  $\theta_2$  和  $\theta_4$  的差异,可以降低由于机构导致虚告警的失效概率,但会增加误示上锁的风险。因此,锁机构设计优化需综合权衡虚告警和误示上锁的失效,满足指示功能的可靠性要求。

另一方面,提高零件的制造精度、安装精度等,减小各参数的分散性,如表 3 中减小  $\theta$  的分散性,可以同时有效降低虚告警和误示上锁的失效概率,进一步提高指示功能的可靠性。

## 6 结论

1) 针对民机舱门过中心锁机构,本文分析了过中心设计的原理和锁定机理,突出讨论了锁机构过中心后由于过度运动导致的上锁重叠区域减少,引发上锁失效的问题,定义了过中心锁机构上锁到位的判断标准。

2) 结合锁传感器的设计特点,研究了传感器

的工作原理,分析了传感器在确定激活区、确定不激活区和模糊区的划分,以及由此导致的锁传感器与锁机构上锁状态的偏差问题。

3) 将锁机构的上锁状态和锁传感器的激活状态进行综合对比,识别出虚告警和误示上锁的风险范围,建立了由于机构导致的虚告警可靠性模型,形成了可靠性分析方法。

4) 以某型民机舱门过中心锁机构及锁传感器为例,计算锁传感器由于机构原因导致的虚告警和误示上锁的失效概率,结果满足可靠性指标要求。

5) 基于锁传感器虚告警可靠性分析模型,提出了降低虚告警失效概率的优化方法。通过优化锁机构设计,可以降低虚告警失效概率,但需考量是否会增加误示上锁的风险,应综合权衡。通过提高零件的制造精度、机构和传感器的装配精度,能有效降低虚告警和误示上锁的失效概率,进一步提高舱门的安全性及可靠性。

## 参考文献:

[1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京:中国民用航空局,2011.

[2] 秦强,冯蕴雯,薛小锋,等. 基于过中心原理的机构锁定可靠性分析[J]. 机械强度, 2013, 35(1):28-32.

[3] 秦强. 民机舱门安全性与可靠性分析研究[D]. 西安:西北工业大学,2016.

[4] 严立浩. 民用飞机舱门传感器设计分析[J]. 山东工业技术, 2017(15):104.

[5] 张兴金. 民机舱门过中心锁定机构可靠性设计分析[J]. 黑龙江科技信息, 2016(18):56.

[6] 陈涛,王玖,张健. 面向成本和功能的舱门锁闭机构公差设计优化方法[J]. 飞机设计, 2021, 41(5):16-21.

[7] 郁有文,常健,程继红. 传感器原理及工程应用:第四版[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2014.

[8] 晏瀛,冯蕴雯,薛小锋,等. 民机舱门过中心锁定机构可靠性设计[J]. 航空计算技术, 2013, 43(1):76-80.

[9] 陈安强,冯蕴雯,薛小锋,等. 用于机构位置监测的传感器误指示可靠性分析[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(6):852-856.

[10] 郭博智,王敏芹,阮宏泽. 民用飞机安全性设计与验证技术[M]. 北京:航空工业出版社,2015.

[11] European Aviation Safety Agency. System design and analysis: AMC 25.1309 Amendment 24 [S]. Europe: EASA, 2020.

[12] 宋黎,杨坚,曹惟庆. 用蒙特卡洛法进行平面连杆机

构的运动误差综合[J]. 机械科学与技术, 1997, 16 (3).

#### 作者简介

徐锦锦 女, 硕士。主要研究方向: 飞机舱门系统安全性及可靠性分析。E-mail: xujinjin@comac.cc

吴绍庭 男, 硕士。主要研究方向: 飞机舱门系统安全性分析及结构设计。E-mail: wushaoting@comac.cc

王帅强 男, 硕士。主要研究方向: 飞机舱门系统安全性分析及结构设计。E-mail: wangshuaiqiang@comac.cc

朱铮铮 男, 博士。主要研究方向: 飞机舱门系统安全性及可靠性分析。E-mail: zhuzhengzheng@comac.cc

## Reliability analysis of sensor false alarms for over-center locking mechanisms of civil aircraft doors

XU Jinjin \* WU Shaoting WANG Shuaiqiang ZHU Zhengzheng

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

**Abstract:** Based on the safety requirements of airworthiness clauses for doors, civil aircraft doors generally use lock mechanisms and lock sensors to achieve locking and indication functions. Due to the deviation between locking/unlocking status of lock mechanisms and activation/deactivation status of lock sensors, lock sensors may give false alarms. The locking principle of over-center locking mechanisms has been analyzed. Taking the unlocking risk caused by excessive movement of locking mechanisms after passing through the center into consideration, the critical position for locking and unlocking of over-center locking mechanisms has been determined. For typical proximity sensors, the induction principle has been elucidated. Taking into account factors such as arrangement, manufacturing and assembly errors between targets and sensors, the location division of determined active zone and determined inactive zone of the sensor has been identified. Through comparative analysis, for sensor false alarm caused by mechanisms, a reliability analysis model has been established, and a reliability analysis method has been formed. Taking the sensor of the over-center locking mechanism of a certain type of civil aircraft door as an example, the failure probability of sensor false alarms caused by the mechanism has been evaluated, and optimization suggestions for the reliability of false alarms have been proposed. The results show that, optimizing the design of lock mechanism or improving the manufacturing and assembly accuracy of the mechanism, while comprehensively balancing the risk of sensor false indication of locking in place, can effectively improve the reliability of civil aircraft door indication and provide reference for the design of door indication function.

**Keywords:** civil aircraft door; over-center locking mechanisms; sensor; false alarm; reliability analysis

---

\* Corresponding author. E-mail: xujinjin@comac.cc