

大型民用飞机前轮操纵转弯特性仿真

Nose Wheel Turning Simulation of Large Civil Aircraft Operation

刘刚 许锋 / 南京航空航天大学航空宇航学院

摘要: 在ADAMS/aircraft软件中,以波音757为例分别建立了飞机前起和主起模型,并与刚性机身装配成完整的波音757模型,基于此模型进行地面滑行转弯仿真,分析了前轮最大操纵角与滑行速度的关系,给出了不同速度下的最小转弯半径的仿真数据。

关键词: ADAMS; 仿真; 前轮操纵转弯; 最小转弯半径

Keywords: automatic dynamic analysis of mechanical systems; simulation; operation of nose wheel turning; minimum turn radius

0 引言

飞机地面运动特性研究已成为现代飞机设计及研制中的重要内容。目前,对飞机的地面运动特性研究主要集中在飞机着陆缓冲、滑跑减震、摆振等直线运动方面,对飞机的地面转向运动研究涉入不深。为实现飞机的地面转弯运动,可采用主轮的差动刹车、发动机推力差动或前轮操纵技术。

作为现代飞机地面操纵的核心,飞机的前轮操纵技术因其显著的优势已在现有飞机中得到了广泛应用。国内外的大多数民用飞机和军用飞机都采用操纵前轮转向方式。飞机在转弯运动时,因速度或者转弯角太大,可能引起前轮或主轮的侧滑。主轮的侧滑会导致飞机急剧转弯,甚至翻倒,是一种不允许的危险操纵。

国内外开展有关飞机地面运动动力学建模的研究较早,而且经历了一个不断发展和完善的过程。早期,受计算机计算能力和分析软件的限制,关于飞机地面运动动力学建模的研究主要集中在提高飞机建模的精确性和计算速度的快速性,通常只考虑飞机的一个偏

转自由度,将多轮多支柱起落架等效成一个起落架或轮胎考虑。

1970年,美国航空航天局(NASA)在综合考虑模型的复杂性和计算速度的条件下,建立了波音747的地面动力学模型,并在以后几十年中一直作为许多飞行员培训模拟器的基本模型。该模型中,机翼和机身上的主起落架等效成一个起落架,轮胎也在与起落架的连接点处等效成一个,为减少坐标转换,它采用小角度假设计算缓冲支柱对机身的作用力^[1]。80年代以后,随着计算机技术的发展,对飞机地面运动的建模更为合理,开始考虑飞机六自由度的地面运动。Pi等用数字建模方法开发了飞机的地面运行仿真程序,该模型考虑了机体的弹性模态,且起落架形式较为全面,包括刚性支柱、柔性支柱、摇臂和半摇臂等,但该模型假设飞机的三个角速度很小,据此对三个转动方程进行了简化^[2]。

在国内,李东营、顾宏斌利用虚拟样机技术,在机械系统动力学自动分析(ADAMS)软件中建立了前轮可偏转的全机模型,并进行了地面转弯仿真,通过仿真分析了飞机滑行速度和前轮操

纵角对飞机轮胎侧滑的影响,并指出,应用ADAMS/aircraft软件可以方便有效地进行飞机地面转弯的仿真,并预测轮胎侧滑^[3]。

李德庆、贾玉红等人利用ADAMS/aircraft软件建立了支柱式起落架虚拟样机模型及全机虚拟样机模型,对建立的起落架缓冲系统进行了受力分析。应用以上模型,分别进行了主起落架落震仿真试验和全机着陆动力学仿真试验,并分析了仿真试验结果。仿真结果表明所设计的起落架能够满足飞机着陆性能的要求^[4]。

张明将多学科协同仿真技术应用用于飞机地面动力学研究,以ADAMS/aircraft软件的多体动力学建模为核心,联合CATIA软件生成飞机和起落架几何构件,联合Patran/Nastran软件进行模态分析生成柔性体,并联合MATLAB软件建立了控制系统模型,对飞机地面滑跑转弯、防滑刹车、摆振等运动进行多学科协同仿真。结果表明,其仿真模型能准确模拟飞机的地面运动^[5]。

目前全机地面滑行转弯仿真方面的研究还都是基于小型军民飞机,针对起飞重量在100吨以上的大飞机尚未

有这方面的仿真分析。为了研究飞机地面转弯时出现的侧滑现象的机理以及影响因素,本文在ADAMS/aircraft软件中建立了以波音757为例的大型飞机起落架动力学模型,并与刚性机身装配成全机模型。对飞机前轮操纵的地面转弯运动过程进行了仿真,分析了前轮操纵角和滑行速度的关系,给出了不同速度下飞机的最小转弯半径。

1 起落架动力学建模

前起落架和主起落架的建模过程中,最重要的是缓冲器的模拟建立和合理轮胎模型的建立。

1.1 缓冲器建模

缓冲器的轴向力包含空气弹簧力、油液阻尼力、摩擦力和结构限制力。ADAMS中提供了几种空气弹簧力和油液阻尼力的定义,本文采用基于理想气体方程的单腔空气弹簧力。

基于理想气体方程的单腔空气弹簧力是通过全伸展状态下的气体压力、体积、压气面积和压油面积等参数进行计算,如式(1)^[6]。

$$F_a = A_{pn} P_0 \left(\frac{V_0}{V_0 - A_{AMB}} \right)^\gamma - A_{AMB} P_{AMB} \quad (1)$$

式中, A_{pn} 为有效压气面积, P_0 为缓冲器全伸展时的绝对压力, V_0 为缓冲器全伸展时的气腔体积, γ 为多变指数, A_{AMB} 为活塞杆面积, P_{AMB} 为大气压。

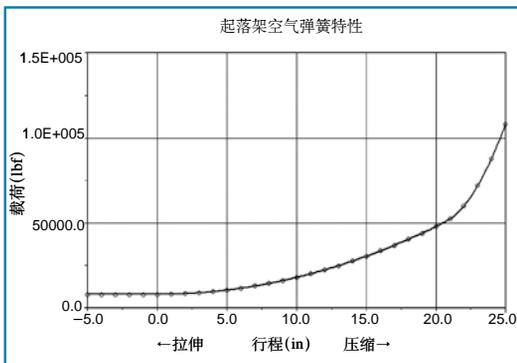


图1 空气弹簧形变—力曲线

图1给出了本文中前起和主起的空气弹簧的形变量与弹性力的关系曲线。

缓冲器中的油液用于吸收耗散冲击能量,其阻尼力的计算由式(2)^[7]得到。

$$P_L = \zeta \frac{\rho(F_L + f)F_L^2}{2f^2} \dot{S}^2 \approx \zeta \frac{\rho F_L^3}{2f^2} \dot{S}^2 \quad (2)$$

其中 F_L , 排挤油液的柱塞面积(通油孔的面积除外), 单位 m^2 ;

f , 通油孔面积, 单位 m^2 ;

\dot{S} , 活塞相对于外筒的速度, 单位 m/s ;

ζ , 计及油液摩擦损失的油液阻尼系数;

ρ , 油液密度, 单位 kg/m^3 。

对油液阻尼系数, 本文取如下值: 前起压缩行程取3 lbf_s/inch、扩张行程取5 lbf_s/inch、主起的压缩行程取6 lbf_s/inch、扩张行程取9 lbf_s/inch。

1.2 轮胎建模

准确的仿真结果同时要求建立合理的轮胎模型, 本文采用基本轮胎模型中的Fiala操纵力轮胎模型。在飞机地面滑行转弯时, 轮胎侧向力的计算方法如式(3)和(4)所示^[6]。

$$F_y = -\mu |F_z| (1 - H^3) \text{sign}(\) \quad (3)$$

$$H = 1 - \frac{C_{\alpha} |\tan \alpha|}{3\mu |F_z|} \quad (4)$$

其中, F_z 为轮胎径向力, μ 为轮胎与地面摩擦系数, α 为轮胎侧偏角, C_{α} 为侧偏角等于零时, 侧向力对侧偏角的偏导数。

$$C_{\alpha} = \left. \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \quad (5)$$

对轮胎径向力的计算, 由式(6)得到。

$$F_z = F_{Zk} + F_{Zc} \quad (6)$$

式(6)中, 由轮胎径向载荷——变形曲线计算; 则由轮胎垂直阻尼力系数和轮胎压缩速度确定, 即:

$$F_{Zc} = -f(\delta) \quad (7)$$

$$F_{Zc} = -C_{vd} V_{pen} \quad (8)$$

其中, C_{vd} 为轮胎垂直阻尼力系数, V_{pen} 轮胎压缩速度。

在不考虑机身柔性影响下, 本文采用刚性机身模型, 并与起落架动力学模型在ADAMS的Standard Interface模式下装配成全机模型。



图2 全机模型

2 仿真分析

飞机地面滑行时的转弯, 其向心力是由前主起轮胎的侧向力提供的, 当转弯速度或者转弯角过大, 导致转弯所需向心力超过所有轮胎能提供的最大侧向力时, 飞机就会出现侧滑。因为轮胎与地面的最大静摩擦力大于滑动摩擦力, 所以在飞机滑行速度和转弯角不变的前提下, 当飞机某轮胎出现侧滑时, 其侧向力会出现突然下降的现象。因而可以将此作为轮胎侧滑的临界参考进行重点监测。

为了得到不同的转弯操纵角下的最大滑行速度, 在转弯操纵命令不变的情况下, 通过定义不同的滑跑速度分别运行仿真, 直到飞机主起轮胎出现侧滑的状态, 此时的速度便是在该最大操纵角下的飞机最大允许滑跑速度。

从图3所示的前轮操纵命令曲线可知, 前轮最大操纵角从 10° 到 70° , 操纵率为 $25^\circ/s$, 在最大操纵角处持续3秒, 然后操纵角以 $25^\circ/s$ 的操纵速率减小为零, 机轮回正。

本文以最大转弯操纵角 30° 为例, 说明确定该操纵角下最大滑跑速度的过程。为方便描述飞机转弯过程中各机

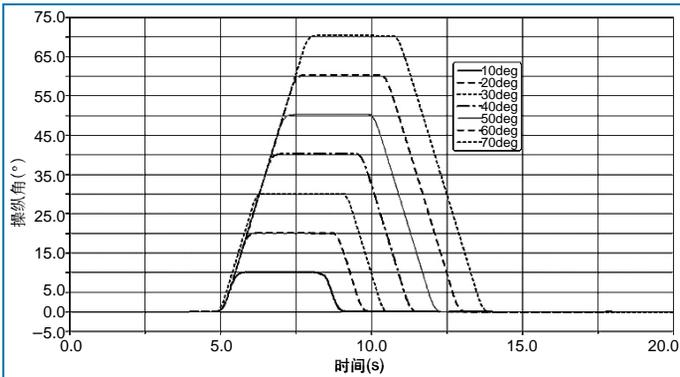


图3 转弯操纵纵命令

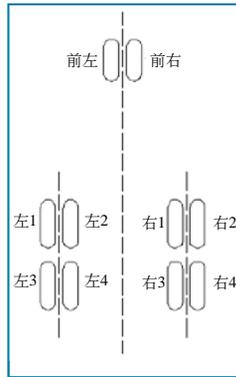


图4 起落架轮胎俯视图

轮的受力情况,图4给出了飞机轮胎分布的俯视图。

图5给出了飞机进行左转弯时主起各轮胎的径向力随时间的变化规律,图6给出了主起各轮胎在飞机左转弯时的侧向力比较。

由图5可知,飞机在左转弯时,转弯内侧(左侧)的轮胎径向力较外侧小,这是

由于左转弯时飞机或多或少的右倾所引起的,这与理论分析相一致;同时从图6中发现,飞机左转弯时,转弯内侧轮胎的侧向力(向心力)较外侧大。由以上分析可知,飞机进行左转弯时,转弯内侧(左侧)的轮胎径向力较小,而维持转弯所需的向心力较大,与外侧轮胎相比,内侧轮胎会首先出现轮胎所能提供的侧向力不足以满足其转弯向

心力的情况,继而出现轮胎侧滑现象。此时认为飞机操纵到极限情况。综合分析图5和图6可知,在飞机进行左转弯的时候,左3轮胎是所有轮胎中最容易出现侧滑现象的轮胎,因此在仿真中将主要监测左3轮胎的侧向力,并将此作为飞机地面操纵转弯的临界参考。

对左3轮胎,当飞机滑行速度从9m/s增大到10m/s时,轮胎侧向力随之增大,当速度增大到11m/s时,轮胎侧向力出现急剧下降,由前文的分析可知,此时该轮胎发生了侧滑,飞机达到操纵极限。类似地,对于最大操纵角为10°至70°的情况,采用同样的方法进行研究。最终得到的结果如下:

从图8中可以明显看出,随着

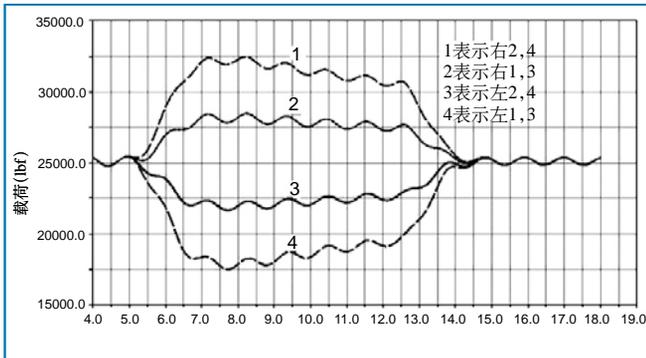


图5 主起轮胎径向力

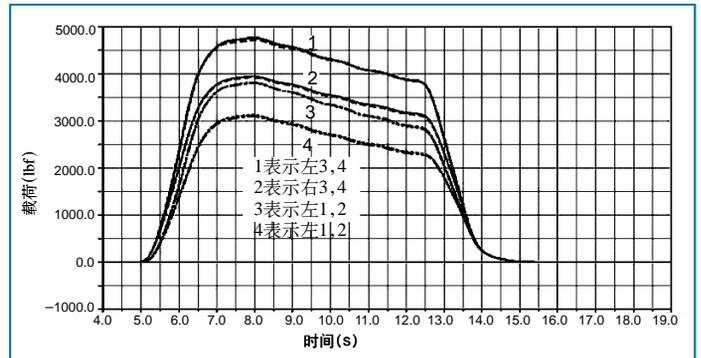


图6 主起轮胎侧向力

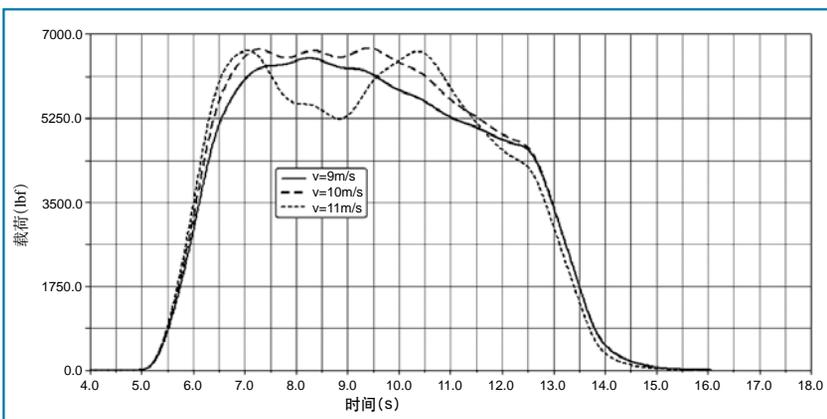


图7 左3轮胎在不同速度下的侧向力比较

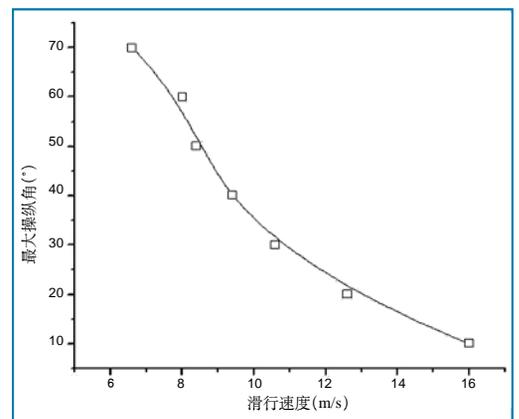


图8 滑行速度与最大操纵角关系曲线

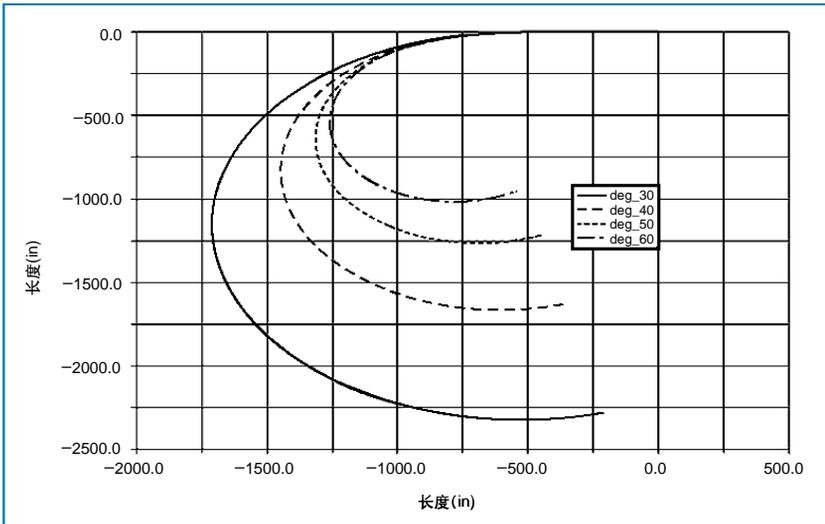


图9 飞机质心运动轨迹

滑行速度的增大,飞机所允许的最大操纵角不断减小,且当速度比较大时,飞机的最大操纵角的变化就变得较为平缓,说明此时飞机的最大操纵角提升空间随着速度的增大在不断减小;同时从图8中还可以发现,当滑行速度在8m/s以下时,曲线变化规律发生改变,并没有按照之前的规律变化,而是趋于平稳,与其他速度区域相比,此时的飞机,即使滑行速度有较大幅度的降低,也并没有使得飞机的操纵角有较大幅度的提高。这与滑行速度较大时的曲线变化规律一致,都表明此时的飞机最大操纵角的提升空间较小。

图9给出了滑行速度为7m/s,最大操纵角为 30° 至 60° 时的飞机的质心运动轨迹,其中,横坐标为跑道长度方向,纵坐标为跑道宽度方向。

图9表明,在一定的速度下,在飞机允许的最大操纵角范围内,飞机的转弯

表1 滑行速度与最小转弯半径

滑行速度 (m/s)	最小转弯半径 (m)
6.6	11.79
8.0	14.95
8.4	19.33
9.4	25.54
10.6	34.19

半径随着操纵角的增大而减小。从图9中可以很方便地算出此时飞机的最小转弯半径约为12.7米。表1列出了飞机滑行速度与最小转弯半径的关系。

3 结论与展望

本文应用ADAMS/aircraft模块对飞机地面转弯运动进行动力学仿真,通过仿真结果分析了地面转弯运动的基本特性,得出了飞机地面转弯过程中滑行速度与最大操纵角的关系,给出了不同速度下的飞机最小转弯半径。研究表明,应用虚拟样机技术可以快速准确地进行飞机地面运动的仿真,并在较短时间内快速建立全机仿真模型,在基本的操纵条件下,能够较全面地考察飞机地面运动特性。本文只考虑了滑行速度对操纵角的影响,且并未考虑飞机机身的柔性对飞机地面转弯机动性能的影响,采用了刚性机身模型,因此得到的结果不可避免地具有一定的局限性。而且对于其他对飞机地面转弯性能有影响的参数,比如缓冲系统的刚度和阻尼、飞机机身柔性、侧风速度、前轮操纵角加速度等因素未加以考虑,这都有待进一步研究。

参考文献

- [1] Robert F S, Walter B H. Mechanical properties of pneumatic tires with special reference to modern aircraft tires[R]. NASA TR R-64, 1960.
- [2] Pi W S, Yamane J R, Smith M J C. Generic aircraft ground operation simulation[R]. AIAA 86-0989. 1986.
- [3] 李东营, 顾宏斌. 基于虚拟样机技术的飞机地面转弯特性研究[J]. 机械工程与自动化, 2009(2): 34-36.
- [4] 李德庆, 贾玉红, 杨尚新. 基于ADAMS/Aircraft的大型飞机起落架动态性能仿真分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2009(S): 103-107.
- [5] 张明, 聂宏, 朱如鹏, 熊俊杰. 基于虚拟样机技术的飞机地面运动多学科协同仿真[J]. 中国机械工程, 2010, 21(10): 1194-1198.
- [6] 钱小妹. 飞机操纵前轮转弯仿真特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [7] 高泽迥. 飞机设计手册第14分册: 起飞着陆系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 323-408.
- [8] Collins R L. Theories on the mechanics of tires and their applications to shimmy analysis[J]. Journal of Aircraft, 1971, 8(4): 271-277.
- [9] 顾宏斌. 飞机地面运动的综合仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
- [10] 王孝英, 诸德培. 飞机操纵前轮转弯运动的数学模型及数值仿真[J]. 应用力学学报, 1997, 14(4): 46-50.

作者简介

刘刚, 硕士研究生, 主要研究方向是动力学仿真。