

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.08.002

波音 777 型飞机稳态转弯滑行时道面侧向荷载研究

陈小薇^{1,3}, 游庆龙², 赵志^{2,6}, 赵科展⁴, 雷晓萍⁵

(1. 长沙理工大学 土木与建筑工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
3. 湖南交通职业技术学院, 湖南 长沙 410132; 4. 北京城建道桥建设集团有限公司, 北京 100124;
5. 中国民航机场建设集团公司, 北京 100621; 6. 迪恩机场工程有限公司, 北京 100621)

摘要: 为分析 B777-300ER 飞机转弯滑行时侧向荷载的分布规律, 基于速度瞬心法对其转弯滑行时的侧向荷载进行计算与分配。计算过程中, 将单个六轮小车式起落架简化为一个整体性的轮胎, 计算出相应转弯条件下 B777-300ER 稳态转弯滑行时对沥青道面的总侧向荷载, 同时将总侧向荷载有效分配到各个轮胎, 考虑不同速度与前轮操作角对飞机各个轮胎侧向荷载的影响。计算结果表明: 滑行速度和前轮操作角均对低速转弯时轮胎的侧向荷载有影响, 且随着速度和前轮操作角的增加其影响越来越显著; B777-300ER 的最大侧向荷载出现于前轮或主起落架靠近转弯中心的内侧轮胎, 应将这两者作为沥青道面极限侧向荷载的重点分析对象, 这对于确保滑行道面的安全运营具有重要价值。

关键词: 道路工程; 侧向荷载; 速度瞬心法; 沥青道面; 有效分配

中图分类号: U416.223; V351.11

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 08-0009-07

Study on Lateral Loads on Airport Pavement during B777 Aircraft Steady Taxiing Turn

CHEN Xiao-wei^{1,3}, YOU Qing-long², ZHAO Zhi^{2,6}, ZHAO Ke-zhan⁴, LEI Xiao-ping⁵

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan 410004, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China; 3. Hunan Communications Polytechnic, Changsha Hunan 410132, China; 4. Beijing Urban Construction Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Beijing 100124, China; 5. China Airport Construction Group Corporation, Beijing 100621, China;
6. C-ENG Airport Engineering Co., Ltd., Beijing 100621, China)

Abstract: In order to analyse the distribution of lateral load of B777-300ER aircraft during taxiing turn, the lateral load of the aircraft is calculated and allocated based on the speed instantaneous center method. During the calculation, a single six-wheel body landing gear is simplified as an integrative tire, and the total lateral load on the asphalt pavement during B777-300ER aircraft making a steady taxi turn under the corresponding tuning condition is calculated. Meanwhile, the total lateral load is effectively distributed to each wheel considering the influence of different speeds and operating angles of nose wheel on the lateral load of each wheel. The calculation result shows that (1) both taxiing velocity and nose wheel steering angle effect on the lateral load of the wheel when turning at low speed, and the influence is more significant with the increasing of velocity and angle; (2) the max lateral load of B777-300ER aircraft appears on nose wheel or the inside tire of main landing gear near the turning centre, and they are recommended as the key analysis object of ultimate lateral load on asphalt pavement. This is significant for the safe operation of aircraft taxiing on asphalt pavement.

收稿日期: 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308064); 中国博士后科学基金项目 (2014M552398); 中国民用航空局科技项目 (20150224)

作者简介: 陈小薇 (1981-), 女, 河南内乡人, 博士研究生. (124795524@qq.com)

Key words: road engineering; lateral load; velocity instantaneous center method; asphalt pavement; effective allocation

0 引言

近年来,我国机场建设发展迅速,根据中国民航发展十三五规划,至 2020 年布局规划民用机场总数达 260 个,其中新建机场 44 个,同时对一大批民用机场进行改扩建。因此,未来数年内仍是我国机场建设的高速发展期^[1]。与水泥道面相比,沥青混凝土道面具有平整、抗滑、舒适、减震等良好的使用性能,以及机械化施工程度高、工期短、养护方便等施工优点,已被国际上很多大型民用机场采用。随着对道面的使用性能和飞行安全的更高要求,我国今后也将会有更多机场沥青混凝土道面出现^[2]。

随着航空客流的不断增大,以波音 B777 - 300ER 为代表的新一代大型飞机 (New Generation Large Aircraft, NGLA) 已开始在我国逐步投入运营,截止 2010 年 5 月,中国共有 61 架波音 777 系列飞机在运营中^[3]。其中, B777 - 300ER 采用标准的前三点式起落架平面布置形式,图 1 为其起落架构型,两组主起落架采用六轮小车式构型,轮子数目达 12 个^[4]。一组主起落架需承担 166 978 kg 的重量,平均分摊到每个轮子的重量高达 27 830 kg,稳定制动时的单轮水平荷载达 89.4 kN,轮胎压力达 1.524 MPa,具有轴载重、轮压高、制动产生的水平力大等特点^[5],使得道面呈现拉、压等不同高低应力峰值的复杂力学响应^[6]。现有的国内外沥青道面结构设计和评价方法均假设飞机起落架荷载为静载^[7],并未考虑飞机转弯滑行的侧向荷载。飞机从航站楼到跑道,需经过多次转弯,转弯滑行产生的侧向荷载已经在国内外沥青道面表面产生不同损害,如图 2 所示,因此有必要对其转弯滑行时的侧向荷载进行分析^[8]。

基于瞬心假定的简化方法是飞机设计手册第 14 分册^[9]提供的转弯侧向力计算方法,适用于前三点式飞机刚性轮胎与弹性轮胎假定下的起落架侧向荷载计算。R. W. Allen^[10]基于此假定,分析飞机稳态操作角转弯情况下的转弯侧向力。朱天文^[11]基于速度瞬心假定与机轮的滚转角提出前三点式飞机的重心、前轮与后轮的转弯半径计算方法,同时利用翻倒力矩与稳定力矩平衡形式的侧向翻倒临界状态计算不同前轮操作角度对应的转弯速度。翁兴中^[12]基

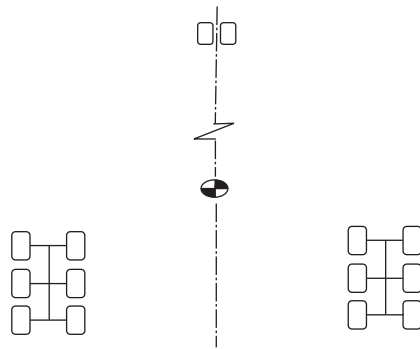


图 1 B777 - 300ER 起落架平面布置

Fig. 1 Layout of landing gears of B777 - 300ER aircraft



图 2 沥青道面弯道处剪切破坏

Fig. 2 Shear damage at curved asphalt pavement

于此方法对前三点式飞机 J - 7 的转弯侧向力进行力学计算,结果显示随着滑行速度与前轮操作角的增加,前轮与后轮的侧向力逐渐增加。基于速度瞬心的运动假设法虽然可以反映飞机绕定点转动的实际受力状况,但是计算非定轴转弯情况时会产生一定误差,主要原因在于未考虑转弯过程中速度瞬心加速度,诸德培^[13]通过飞机转弯过程中前轮摆振频率提出此方法产生 10% ~ 20% 的计算误差。

转弯力学的研究目前主要集中在前三点式飞机,转弯动力学的计算虽然朝着 ADAMS 仿真甚至多学科联合仿真为主,但是转弯力学计算仍以速度瞬心假定分析为主。为此,文中采用速度瞬心法对 B777 - 300ER 定点稳态转弯进行计算,将起落架的总荷载转化为每个轮胎对机场道面有效的侧向荷载,着眼于大型飞机转弯滑行对沥青道面的有效荷载大小,为揭示沥青道面剪切损坏提供依据。

1 基于速度瞬心法的无侧偏转弯荷载分析

1.1 飞机转弯计算的基本假设

(1) 起落架支柱与机身视为刚性,忽略转弯过程中机身与重心的侧倾;(2) 假定轮胎只有竖向弹

性变形与滚动变形, 忽略转弯过程中的侧向变形与扭转变形; (3) 忽略道面不平整度的影响; (4) 将单个六轮起落架简化为整体性轮胎进行分析; (5) 速度瞬心视为稳态转弯中心, 前轮操作角速率 $d\alpha/dt = 0$, 即 α 为常数。

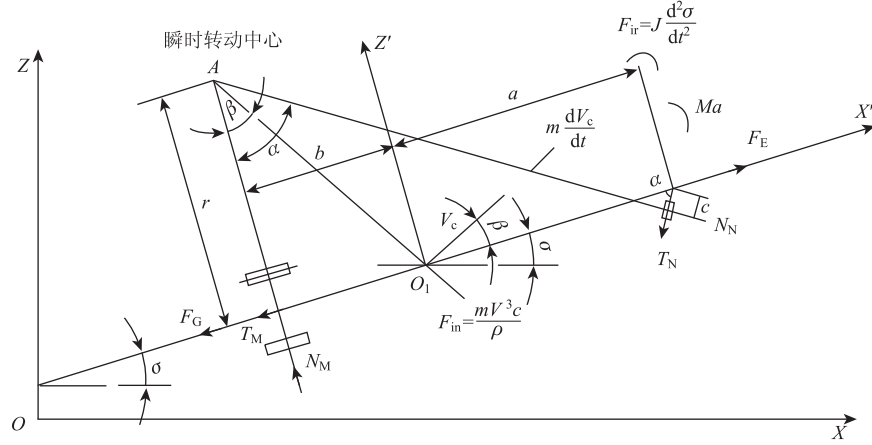


图3 前三点式飞机转弯力学分析图

Fig. 3 Mechanical analysis of tricycle arrangement aircraft turning movement

1.3 飞机转弯滑行运动学分析

飞机稳态转弯时, 前轮操作角 α 为常数, 即 $\frac{da}{dt}$, 通过几何方程与运动方程, 前轮起落架侧向总荷载为:

$$N_N = \frac{d\alpha}{dt} \frac{V_c \cos^2 \beta}{L \cos^2 \alpha \varphi_1(\alpha)} + T_N \frac{\varphi_2(\alpha)}{\varphi_1(\alpha)} + (F_E - F_G - T_M) \frac{\varphi_3(\alpha)}{\varphi_1(\alpha)} + \frac{mV_c^2}{b} \sin \beta \frac{\varphi_4(\alpha)}{\varphi_1(\alpha)}, \quad (1)$$

前轮操作角 α 为常数, 即

$$d\alpha/dt = 0, N_N = T_N \frac{\varphi_2(\alpha)}{\varphi_1(\alpha)} + (F_E - F_G - T_M) \cdot \frac{\varphi_3(\alpha)}{\varphi_1(\alpha)} + \frac{mV_c^2}{b} \sin \beta \frac{\varphi_4(\alpha)}{\varphi_1(\alpha)}, \quad (2)$$

由外力在飞机重心轨迹法线方向投影总和为零可知:

$$-N_M \cos \beta + \frac{mV_c^2}{b} \sin \beta - N_N \cos(\alpha - \beta) + T_N \sin(\alpha - \beta) + (F_E - F_G - T_M) \sin \beta = 0, \quad (3)$$

由式 (3) 建立 N_M 表达式如下:

$$N_M = \left[\frac{mV_c^2}{b} \sin \beta - N_N \cos(\alpha - \beta) + T_N \sin(\alpha - \beta) + (F_E - F_G - T_M) \sin \beta \right] / \cos \beta, \quad (4)$$

其中,

$$\varphi_1(\alpha) = \frac{a \cos \alpha - e + b}{J} + \frac{\sin \beta \cdot \sin \alpha}{bm} +$$

1.2 机体坐标系与地面坐标系

建立机体坐标系 $X'OZ'$ 和地面惯性坐标系 XOZ , 飞机进入曲线段之前的初始位置重心在地面投影为坐标原点 O , 过 O 点的地面垂线为 OZ 轴, 机体坐标轴在地面投影作为 OX' 和 OZ' 轴, 如图 3 所示。

$$\frac{\sin^2 \beta}{bm} (1 - \cos \alpha), \quad (5)$$

$$\varphi_2(\alpha) = [a \sin \alpha + b \sin(\alpha - \beta)] / J - [\sin \beta \cdot \cos \alpha + \sin^2 \beta \cdot \sin \alpha - \sin^2 \beta \cdot \sin(\alpha - \beta)] / bm, \quad (6)$$

$$\varphi_1(\alpha) = \frac{b \sin \beta}{J} + \frac{\sin \beta}{bm} + \frac{\sin^3 \beta}{bm}, \quad (7)$$

$$\varphi_1(\alpha) = \frac{b}{J} + \frac{\sin^2 \beta}{bm}, \quad (8)$$

式中, N_N 为前起落架轮胎侧向荷载; N_M 为主起落架轮胎侧向荷载; T_N 为前起落架轮胎滚动摩擦荷载; T_M 为主起落架轮胎滚动摩擦荷载; V_c 为飞机重心的速度; α 为前轮操作角; β 为飞机重心的速度与飞机中心线的夹角; m 为飞机质量; a 为飞机重心站位到前轮胎中心距离; b 为飞机重心站位到主轮胎中心距离; L 为前起落架到主起落架的距离; J 为飞机惯性矩; F_E 为发动机推力; F_G 为飞机迎面阻力。

轮胎与道面的滚动摩擦系数取 0.02, 由于飞机转弯滑行时速度均不超过 7 m/s, 属于低速转弯, 飞机迎面阻力 F_G 可忽略, 推力取发动机最大推力的 1/8 作为计算值。

2 大型飞机有效荷载分配方法

B777-300ER 机型的起落架轮胎组成为三轴双轮形式, 大型飞机转弯荷载的初步计算获得起落架竖向和侧向总荷载, 为了得出各个轮胎的有

效荷载,前三点式起落架的荷载对不同位置的轮胎加以分配,分配顺序是主起落架荷载→多轮荷载→从动主轮荷载。起落架各个轮子上的阻力荷载、侧向荷载的分配比例与竖向荷载的分配比例相同^[14]。

2.1 左右两侧起落架荷载分配

左右两侧起落架的荷载根据近心端与远心端的位置实际产生不同情况:(1)本次转弯计算不计飞机机身与重心的侧倾,故左右两侧起落架竖向荷载相同;(2)近心端起落架侧向荷载大于远心端,利用式(9)近似计算主起落架的分配比例。为了便于分析,计算时假设飞机向右转弯。

$$P_{\text{近}} : P_{\text{远}} = \frac{1}{R} : \frac{1}{R + L_w}, \quad (9)$$

式中, L_w 为两侧主起落架之间的距离; R 为瞬心半径。

2.2 多轮荷载分配

利用上文提到的方法计算出各起落架的侧向总荷载,根据式(9)的分配比例计算出左右主起落架的侧向总荷载,不同起落架的侧向总荷载与竖向荷载比值即为侧向力系数。《飞机设计手册》第9册给出了四轮小车式竖向荷载分配公式,据此推导出式(10)计算六轮小车式各排机轮竖向总荷载,再根据侧向力系数可得到各排机轮的侧向总荷载。由于铺砌跑道上起落架外侧与内侧轮胎分配理论比例为6:4^[15],因此可以求出各轮胎的侧向荷载。

$$P_3 : P_4 : P_5 = \left(\frac{N_B}{3} + \frac{f_B h_1}{l_q} \right) : \left(\frac{N_B}{3} \right) : \left(\frac{N_B}{3} - \frac{f_B h_1}{l_q} \right), \quad (10)$$

式中, N_B 为主起落架竖向荷载; f_B 为主滚动摩擦阻力; l_q 为六轮起落架前排至中间机轮的间距; h_1 为缓冲支柱端点与铰链点间距。

2.3 从动转弯的主轮荷载分配

波音 B777-300ER 六轮主起落架采用了后轮可偏转的轮架设计辅助机体地面转弯。轮架上安装的电控液动式驱动器能驱动后排两个主轮向左或右偏转最多达7°。当采用脚蹬操纵小角度转弯时,主轮不发生偏转,只有当手轮操纵前轮偏转13°时,主轮转弯系统随动偏转,而且当前轮达到最大偏转角70°时,主轮刚好达到最大偏角8°,转弯关系如图4所示。基于主轮转弯的特点,荷载分配服从先整体后局部的分配顺序,后排主轮偏转与整体主轮偏转分别进行受力分析,利用式(11)计算偏转

主轮的荷载。前轮编号设为0,其余轮胎编号见图5。

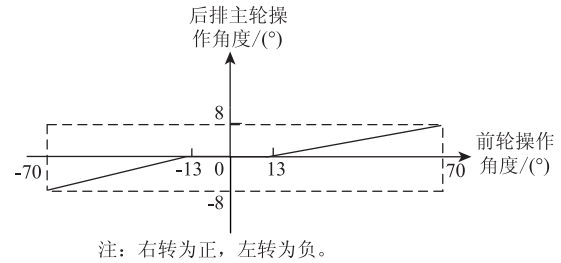


图4 B777 主轮转弯与前轮转弯操作角对应关系

Fig. 4 Angular relation between main wheel turning and nose wheel turning of B777 aircraft

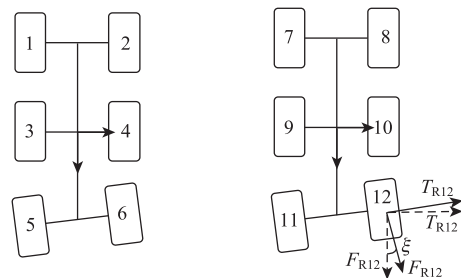


图5 B777 主轮编号与后排主轮转弯受力示意图

Fig. 5 Numbers of B777 aircraft main wheels and turning forces of rear main wheels

$$\begin{cases} T_{Ri} = T_{Ri}' \cos \xi + f_{Ri}' \sin \xi \\ f_{Ri} = f_{Ri}' \cos \xi - T_{Ri}' \sin \xi \end{cases}, \quad (11)$$

式中, T_{Ri} 为有效侧向荷载; f_{Ri} 为有效摩擦荷载; T_{Ri}' 为计算侧向荷载; f_{Ri}' 为计算摩擦荷载; ξ 为后排主轮操作角。

3 轮胎有效荷载分配

相关资料显示,国外某干线飞机的转弯滑行速度限制为18 km/h即5 m/s,支线飞机转弯滑行速度24 km/h即6.67 m/s,以确保转弯不致出现侧滑^[16]。波音公司针对B747、B777等机型的转弯测试过程中速度始终控制在7.56~27.36 km/h即2.1~7.6 m/s^[17]。据此,文中低速转弯滑行的速度选为3~7 m/s并且前轮操作角10°~50°以避免轮胎大偏角转弯侧滑现象,并利用上文的公式计算前轮起落架与主起落架的侧向总荷载。

3.1 B777-300ER 基本参数

(1) B777-300ER 其基本参数可见相应的技术手册中^[3]。飞机转弯分析中,重心位置与转弯惯量是飞机的基本参数。目前飞机重心^[18]通常采用% m. a. c 表示方法,重心后限荷载比例一般作为设计荷载比例;飞机转弯视为刚体转动,转动惯量是飞

机荷载计算、操稳特性分析不可缺少的原始数据,在缺少试验数据的情况下,采取估算的方法实现求解。借鉴飞机设计手册第8册提供的两种经验公式,基于起飞重量、尺寸等参数实现飞机转动惯性矩的估算,结果列于表1。不同估算公式获得结果差异性显著,但是由于缺少机型的实测数据难以进行准确性验证,本研究选取估算结果的算术平均值作为参数取值。

表1 B777-300ER的转动惯量及对应的不同起落架的竖向荷载

Tab.1 Inertia moment of B777-300ER aircraft and corresponding vertical loads of different landing gears

前轮/kN	左机翼/kN	右机翼/kN	转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
266.8	1 628.81	1 628.81	3.686E+07

(2) 转弯滑行参数:前轮操作角从 $10^\circ \sim 50^\circ$ 分别对应的 β 角与瞬心半径见表2。

表2 B777-300ER转弯参数表

Tab.2 Turning parameters of B777-300ER aircraft

前轮操作角度 $\alpha/(\circ)$	10	20	30	40	50
前轮操作弧度/rad	0.17	0.35	0.52	0.70	0.87
重心与瞬心夹角 β/rad	0.020	0.042	0.067	0.097	0.113
瞬心半径 R/m	92.83	71.36	54.15	37.92	27.51

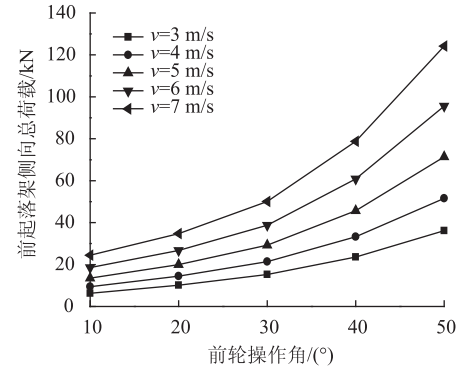
3.2 侧向总荷载计算结果

B777-300ER在滑行速度为 $3 \sim 7 \text{ m/s}$,前轮操作角为 $10^\circ \sim 50^\circ$ 情况下,前起落架和主起落架的侧向总荷载,分别见图6。

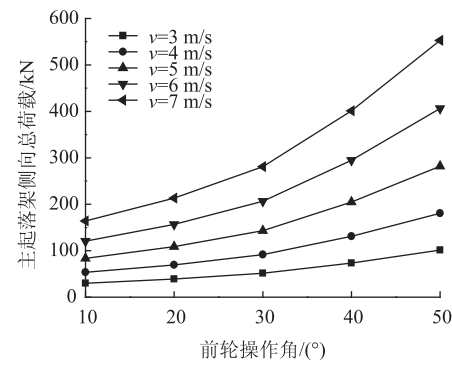
由图6可以看出:在同一速度线上,随着前轮操作角的增大,前起落架跟主起落架侧向总荷载均增大,且增大速率越来越大;同一操作角时,随着速度的增大,前起落架跟主起落架侧向总荷载均增大,增大速率也越来越大。因此,滑行速度和前轮操作角均对低速转弯侧向总荷载有影响,且随着速度跟前轮操作角的增大影响越来越显著。

3.3 侧向荷载分配及分析

通过上述介绍的荷载分配方法,对前三点式起落架在 $3 \sim 7 \text{ m/s}$ 并且前轮操作角 $10^\circ \sim 50^\circ$ 时的侧向荷载进行不同位置轮胎的有效分配。由于前轮操作角等于 13° 时,主轮即将发生偏转,处于临界状态,也列入分析中。轮胎按每列分组,同时统计组内最大侧向荷载。其中前轮编号为I;1,3,5编号为II;2,4,6编号为III;7,9,11编号为IV;8,10,12编号为V,具体分配结果见表3~表7。



(a) 前起落架侧向总荷载



(b) 主起落架侧向总荷载

图6 不同滑行速度时侧向总荷载

Fig.6 Lateral total loads gear during taxiing at different speeds

表3 $v=3 \text{ m/s}$ 时多轮侧向荷载分配计算结果

Tab.3 Calculated lateral load allocation of multi-wheel at 3 m/s speed

前轮操作角/ $(^\circ)$	组内最大侧向荷载/kN				
	I 轮组	II 轮组	III 轮组	IV 轮组	V 轮组
10	3.14	2.85(1)	1.90(2)	2.13(7)	3.19(8)
13	3.66	3.25(1)	2.17(2)	2.44(7)	3.67(8)
20	5.07	3.75(5)	2.50(6)	2.87(11)	4.30(12)
30	7.64	4.99(5)	3.32(6)	3.95(11)	5.93(12)
40	11.79	6.92(5)	4.61(6)	5.85(11)	8.77(12)
50	18.07	9.13(5)	6.08(6)	8.32(11)	12.47(12)

注:()内数字为各轮组内轮胎的具体编号,见图4,以下皆同。

分析表3可知:速度为 3 m/s 时,随着前轮操作角的增大,各轮组组内的最大侧向荷载均增大,且差距越来越大。当主轮不发生偏转时,主起落架各轮组组内最大侧向荷载均出现于前排轮胎,其中靠近转弯中心的8[#]轮胎的侧向荷载为主起落架轮胎最大侧向荷载;当主轮发生偏转时,主起落架各轮组组内的最大侧向荷载均出现于其后排的偏转主轮,靠近转弯中心的12[#]轮胎的侧向荷载为主起落架轮胎最大侧向荷载,但飞机起落架的轮胎最大侧向荷载

出现于前轮轮胎,且随着前轮操作角的增加,主起落架轮胎最大侧向荷载与前轮轮胎侧向荷载的差距越来越大。

表4 $v=4\text{ m/s}$ 时多轮侧向荷载分配计算结果

Tab. 4 Calculated lateral load allocation of multi-wheel at 4 m/s speed

前轮操作角/(°)	组内最大侧向荷载/kN				
	I 轮组	II 轮组	III 轮组	IV 轮组	V 轮组
10	4.73	5.08(1)	3.38(2)	3.78(7)	5.68(8)
13	5.40	5.45(1)	3.64(2)	4.10(7)	6.15(8)
20	7.22	6.56(5)	4.38(6)	5.03(11)	7.55(12)
30	10.69	8.61(5)	5.74(6)	6.86(11)	10.29(12)
40	16.62	11.90(5)	7.93(6)	10.12(11)	15.18(12)
50	25.78	15.65(5)	10.43(6)	14.40(11)	21.60(12)

分析表4可知:速度为4 m/s时,主起落架各轮组内最大侧向荷载变化规律类似速度为3 m/s。但当前轮操作角小于或等于20°时,飞机起落架的轮胎最大侧向荷载出现于主起落架轮组内;前轮操作角大于20°时,飞机起落架的轮胎最大侧向荷载出现于前轮轮胎,且与主起落架的轮胎最大侧向荷载差距越来越大。

表5 $v=5\text{ m/s}$ 时多轮侧向荷载分配计算结果

Tab. 5 Calculated lateral load allocation of multi-wheel at 5 m/s speed

前轮操作角/(°)	组内最大侧向荷载/kN				
	I 轮组	II 轮组	III 轮组	IV 轮组	V 轮组
10	6.77	7.94(1)	5.29(2)	5.92(7)	8.88(8)
13	7.62	8.53(1)	5.68(2)	6.41(7)	9.61(8)
20	9.99	10.19(5)	6.79(6)	7.82(11)	11.73(12)
30	14.61	13.28(5)	8.85(6)	10.60(11)	15.90(12)
40	22.83	18.69(5)	12.19(6)	15.62(11)	23.43(12)
50	35.69	24.04(5)	16.03(6)	22.22(11)	33.33(12)

分析表5可知:速度为5 m/s时,主起落架各轮组内最大侧向荷载变化规律类似速度为3 m/s,但当前轮操作角小于50°时,飞机起落架的轮胎最大侧向荷载出现于主起落架轮组内,且与前起落架的轮胎侧向荷载差距越来越小;当前轮操作角等于50°时,飞机起落架的轮胎最大侧向荷载出现在了前起落架轮胎。

分析表6可知:前轮操作角不大于20°时,主起落架各轮组内最大侧向荷载均出现于前排轮胎,其中靠近转弯中心的8[#]轮胎的侧向荷载为主起落架轮胎最大侧向荷载;当前轮操作角大于20°时,此时

主起落架各轮组内的最大侧向荷载均出现于其后排的偏转主轮,靠近转弯中心的12[#]轮胎的侧向荷载为主起落架轮胎最大侧向荷载。需注意的是,随着前轮操作角的增加,主起落架轮胎最大侧向荷载与前起落架轮胎侧向荷载的差距越来越小,当前轮操作角为50°时,前起落架轮胎侧向荷载超过了主起落架轮胎最大侧向荷载。

表6 $v=6\text{ m/s}$ 时多轮侧向荷载分配计算结果

Tab. 6 Calculated lateral load allocation of multi-wheel at 6 m/s speed

前轮操作角/(°)	组内最大侧向荷载/kN				
	I 轮组	II 轮组	III 轮组	IV 轮组	V 轮组
10	9.27	11.43(1)	7.62(2)	8.52(7)	12.79(8)
13	10.34	12.28(1)	8.19(2)	9.23(7)	13.85(8)
20	13.37	14.62(1)	9.75(2)	11.25(7)	16.87(8)
30	19.39	18.97(5)	12.65(6)	15.17(11)	22.75(12)
40	30.42	26.11(5)	17.41(6)	22.34(11)	33.51(12)
50	47.80	34.29(5)	22.86(6)	31.78(11)	47.67(12)

表7 $v=7\text{ m/s}$ 时多轮侧向荷载分配计算结果

Tab. 7 Calculated lateral load allocation of multi-wheel at 7 m/s speed

前轮操作角/(°)	组内最大侧向荷载/kN				
	I 轮组	II 轮组	III 轮组	IV 轮组	V 轮组
10	12.22	15.57(1)	10.38(2)	11.60(7)	17.41(8)
13	13.56	16.72(1)	11.15(2)	12.57(7)	18.85(8)
20	17.37	19.91(1)	13.27(2)	15.31(7)	22.97(8)
30	25.05	25.71(5)	17.14(6)	20.57(7)	30.85(8)
40	39.39	35.35(5)	23.57(6)	30.29(7)	45.44(8)
50	62.12	46.41(5)	30.94(6)	43.21(7)	64.81(8)

分析表7可知:当前轮操作角不大于20°时,主起落架各轮组内最大侧向荷载均出现于前排轮胎;当前轮操作角大于20°时,主起落架II、III轮组内最大侧向荷载出现于后排偏转主轮,IV、V轮组内最大侧向荷载出现于前排轮胎。值得注意的是,飞机起落架轮胎最大侧向荷载始终在8[#]轮,但随着前轮操作角的增加,8[#]轮侧向荷载与前起落架轮胎侧向荷载的差距越来越小。

4 结论

(1) 滑行速度和前轮操作角均对低速转弯荷载有影响,且随着速度和前轮操作角增加影响越来越显著。

(2) 转弯速度小于 6 m/s, 且主轮不发生偏转时, 主起落架各轮组组内最大侧向荷载均出现于前排轮胎, 其中靠近转弯中心的 8[#]轮胎的侧向荷载为主起落架轮胎最大侧向荷载; 当主轮发生偏转时, 主起落架各轮组组内的最大侧向荷载均出现于其后排的偏转主轮, 靠近转弯中心的 12[#]轮胎的侧向荷载为主起落架轮胎最大侧向荷载。

(3) 转弯速度为 6 m/s 或 7 m/s, 且前轮操作角不超过 20°时, 主起落架各轮组组内最大侧向荷载均出现于前排轮胎, 其中靠近转弯中心的 8[#]轮胎的侧向荷载为主起落架轮胎最大侧向荷载; 当前轮操作角大于或等于 20°时, IV、V 轮组组内最大侧向荷载位置由 6 m/s 时的偏转主轮变为 7 m/s 时的前排轮胎。

(4) 转弯速度较低时, 飞机起落架轮胎最大侧向荷载趋向于出现在前轮轮胎; 速度较大时, 飞机起落架轮胎最大侧向荷载趋向于出现在主起落架轮组内。

(5) 基于上述分析, B777-300ER 的最大侧向荷载可能出现在前轮或靠近转弯中心的主起落架外侧轮胎 (8[#], 12[#]轮)。因此, 应将这两者作为沥青道面极限侧向荷载的重点分析对象。

参考文献:

References:

- [1] 中国民用航空局. 《中国民用航空发展第十三个五年规划》[EB/OL]. [2016-09-09]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201702/P020170215609468223808.pdf>, 2016-12.
CAAC. Thirteenth Five Year Plan for the Development of Civil Aviation in China [EB/OL]. [2016-09-09]. <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/201702/P020170215609468223808.pdf>, 2016-12.
- [2] 游庆龙, 赵志, 马靖莲. 飞机稳态转弯滑行时起落架侧向荷载研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (12): 89-96.
YOU Qing-long, ZHAO Zhi, MA Jing-lian. Study of Lateral Loads on Pavement from Landing Gears during the Steady Taxiing Turn of Aircraft [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (12): 89-96.
- [3] 游庆龙. 机场沥青道面结构三维非线性力学响应研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
YOU Qing-long. Three-dimensional Nonlinear Mechanical Responses of Airport Asphalt Concrete Pavement [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [4] Boeing Commercial Airplane Group. 777-200/300 Airplane Characteristics for Airport Planning, Document D6-58329 [R]. Seattle: The Boeing Company, 2004.
- [5] 赵鸿铎. 适应大型飞机的沥青道面交通荷载分析方法及参数的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
ZHAO Hong-duo. Research of Oriented Traffic Load Analysis Method as well as Related Parameters of Flexible Airport Pavement Structure for Large Aircraft [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [6] 闫启坤. 复杂起落架荷载作用下沥青道面结构动态响应规律 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
YAN Qi-kun. Asphalt Pavement Structure Dynamic Responses under Complex Landing Gear Load [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [7] MH 5010—1999, 民用机场沥青混凝土道面设计规范 [S].
MH 5010—1999, Specification for Asphalt Concrete Pavement Design of Civil Airport [S].
- [8] VALLERGA B A, JEW A, NOKES W A. Case Study of an Innovative High Stability Asphalt Mix for Heavy Aircraft Wheel Loads [C] // 26th International Air Transportation Conference. San Francisco: ASCE, 2000.
- [9] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 (第 14 册): 飞机着陆系统设计 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
Aircraft Design Manual General Editorial Committee. Aircraft Design Manual (Volume 14): Aircraft Landing System Design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.
- [10] ALLE R W, ROSENTHAL T J, SZOSTAK H T. Steady Stat End Transient Analysis of Ground Vehicle Handling [C] // SAE International Congress & Exposition 1987. [S. l.]: SAE, 1987.
- [11] 朱天文. 飞机地面操纵转弯半径和转弯速度计算方法研究 [J]. 飞机设计, 2009 (3): 31-34.
ZHU Tian-wen. Study on Calculative Method of Aircraft Steering Turning Radius and Turning Velocity [J]. Aircraft Design, 2009 (3): 31-34.
- [12] 翁兴中, 蔡良才, 郑飞. 飞机滑行转弯对沥青道面作用的侧向力分析 [J]. 路基工程, 2009, 144 (3): 6-7.
WENG Xing-zhong, CAI Liang-cai, ZHENG Fei. Analysis on Lateral Force for Airplane Sliding and Turning Impacts on Asphalt Pavement [J]. Subgrade Engineering, 2009, 144 (3): 6-7.
- [13] 诸德培. 飞机前轮摆振及减摆器的若干问题 [J]. 航空学报, 1987, 8 (12): 557-562.
ZHU De-pei. Some Aspects of Nose-wheel Shimmy and Shimmy Damper of the Aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1987, 8 (12): 557-562.

(下转第 28 页)

- Institute, 2001.
- [9] 陈华. 交通荷载作用下公路路基的动力有限元分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004.
CHEN Hua. Dynamic Finite Element Analysis of Highway Subgrade under Traffic Load [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2004.
- [10] 银花, 李懿. 车辆-沥青路面耦合系统相互作用研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (20): 107-112
YIN Hua, LI Yi. Interaction in a Vehicle Asphalt Pavement Coupled System [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (20): 107-112.
- [11] 许海亮, 袁勇, 屈铁军, 等. 考虑路面平整度因素的车路耦合振动模型的建立 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (19): 152-156.
XU Hai-liang, YUAN Yong, QU Tie-jun, et al. Dynamic Model for a Vehicle-pavement Coupled System Considering Pavement Roughness [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33 (19): 152-156.
- [12] 邓学均, 孙璐. 车辆-地面结构系统动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
DENG Xue-jun, SUN Lu. Dynamics of Vehicle-pavement Structure System [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [13] 陈果. 车辆-轨道耦合系统随机振动分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2000.
CHEN Guo. Analysis of Random Vibration of Vehicle-track Coupling System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2000.
- [14] 王亚, 陈思忠, 郑凯锋. 时空相关路面不平度时域模型仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (5): 70-74.
WANG Ya, CHEN Si-zhong, ZHENG Kai-feng. Simulation Research on Time Domain Model of Road Roughness with Time-space Correlation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (5): 70-74.
- [15] 陆辉, 孙立军. 轮载作用下沥青路面三维非线性有限元分析 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (7): 64-67, 96.
LU Hui, SUN Li-jun. Analysis on Asphalt Pavement under Tyre Load by Three-dimensional Finite Element Method [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (7): 64-67, 96.
- [16] 郝大力, 王秉纲. 路面结构动力响应分析 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22 (3): 9-12.
HAO Da-li, WANG Bing-gang. Dynamic Response of Pavement Structure [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22 (3): 9-12.
- [17] 陈静. 车辆与路面相互作用的基础研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2002.
CHEN Jing. Research on Vehicle-pavement Interaction Basis [D]. Changchun: Jilin University, 2002.
- [18] 朱孔源. 车辆-柔性路面力学相互作用系统的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
ZHU Kong-yuan. Study on Interaction between Vehicle and Flexible Pavement System [D]. Beijing: China Agricultural University, 2001.

(上接第15页)

- [14] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 (第9册): 荷载、强度和刚度 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
Aircraft Design Manual General Editorial Committee. Aircraft Design Manual (Volume 9): Load, Intensity and Rigidity [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001.
- [15] GJB67.4—85, 军用飞机强度和刚度规范 [S].
GJB67.4—85, Military Airplane Strength and Rigidity Specification [S].
- [16] 金秀芬, 李凯, 于秀伟. 民用飞机地面转弯时重心侧向过载系数的分析与研究 [J]. 航空工程进展, 2012, 3 (3): 317-321.
JIN Xiu-fen, LI Kai, YU Xiu-wei. Research of Side Load Factor for Civil Aircraft Ground Turning [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3 (3): 317-321.
- [17] 赵科展. 新一代大型飞机转弯滑行对沥青道面有效荷载 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
ZHAO Ke-zhan. Effective Loads of New Generation Large Aircraft Turning Movements on Asphalt Concrete Airfield Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [18] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 (第8册): 重量平衡与控制 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1999.
Aircraft Design Manual General Editorial Committee. Aircraft Design Manual (Volume 8): Weight Balance and Control [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1999.