

文章编号:1674-8190(2016)01-024-06

飞机起落架回转地面载荷特性研究

娄锐, 折世强, 黄海清

(中航飞机股份有限公司 长沙起落架分公司, 长沙 410200)

摘要: 计算地面回转工况下的回转力矩和回转机轮接地点地面载荷对起落架结构设计有重要意义, 以共轴双轮式起落架和四轮车架式起落架为研究对象, 通过假设轮胎与地面接触面为椭圆印痕, 并应用极坐标二重积分的计算方法, 推导出回转力矩计算公式和轮胎接地点地面载荷计算公式, 并结合算例将传统方法和本文方法的计算结果进行对比。结果表明: 回转力矩随着轮胎压缩量的增加而增加; 传统方法得出的回转力矩偏小; 对于共轴双轮和四轮车架式起落架, 轮胎接地点处的扭矩占回转力矩的比例很小, 同时接地点处存在较大的航向、侧向力。

关键词: 共轴双轮起落架; 四轮车架起落架; 回转力矩; 地面载荷

中图分类号: V226

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.01.004

Characteristic Research of Pivot Ground Torque for Aircraft Landing Gear

Lou Rui, She Shiqiang, Huang Haiqing

(Changsha Landing-gear Branch, AVIC Aircraft Corporation, Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: Pivot torque and tire contact point load calculation under pivot load case are of important significance for landing gear structure design. Twin wheels and twin tandem landing gears are taken as research objects. Contact patch between tire and ground is assumed to be elliptic impression. Double integral under polar coordinates is applied. Calculation expressions of pivot load and contact point ground load are deduced. Combined with calculation cases some useful results are gained. Results show that pivot torque is increasing as tire deflection increased, pivot torque calculated by traditional method is small, contact point torque is much less than pivot torque, and with regard to twin wheels and twin tandem landing gear, the contact point is of great longitudinal and lateral force.

Key words: twin wheels landing gear; twin tandem landing gear; pivot torque; ground load

0 引言

地面回转工况是一种地面操纵情况, 通常用于飞机原地转弯、调头使用, 民航规范和军机标准都对回转地面载荷有明确规定和要求。

CCAR 25.503 条规定^[1-2]: “假定飞机绕一侧主起落架回转, 且该侧的刹车刹住。限制垂直载荷系数必须为 1, 摩擦系数为 0.8”。

GJB 67.4A-2008 3.2.4.4 条规定^[3]: “飞机取

停机姿态。将一侧主起落架用刹车刹死, 飞机将绕此轮打转。当起落架为多轮时, 则将绕该起落架所有机轮接触面的形心打转。计算时, 飞机重心处的垂直载荷系数应取 1.0, 轮胎的摩擦系数应取 0.8”。

回转工况是起落架局部严重工况, 准确计算地面回转工况下的回转力矩和回转机轮接地点地面载荷对起落架强度计算具有重要意义。

文献[4]规定: “刹住的起落架上仅作用有回转扭矩和垂直载荷, 没有侧向载荷和航向载荷作用, 且规定回转扭矩的计算公式为 $M_p = 0.8V_M L/2$, 每个机轮接地点扭矩载荷大小等于总的回转力矩除以机轮数量, 其中, V_M 表示刹车机轮上所受的

垂直总载荷, L 对于共轴双轮式起落架为左右轮距, 对于车架式起落架为四轮接地点的对角线长度”, 本文将上述计算方法称为传统方法。姚念奎^[5]认为打地转应作为一类静力情况研究, 且打地转的扭矩以力偶的形式作用于共轴双轮起落架轮胎接地点上。文献[4]和文献[5]对回转力矩的产生有不同的认识, 文献[4]认为回转力矩由各个机轮的扭矩组成, 同时文献[4]的回转力矩计算公式与轮胎压缩量无关, 不符合工程经验, 而文献[5]认为回转力矩由作用于轮胎接地点的力偶产生并未给出计算公式。Norman S. Currey^[6]和高泽迺^[7]在计算前轮操纵力矩时认为前轮与地面之间的印痕为椭圆面。诸德培^[8]在对前轮摆振进行研究时认为轮胎在径向力作用下产生压缩量, 触地面形似一个椭圆。

本文分别以共轴双轮式起落架和四轮车架式起落架为研究对象, 假设轮胎与地面为椭圆形印痕且印痕压强均布, 利用极坐标计算二重积分的方法, 推导出绕形心的回转力矩计算公式和轮胎接地点地面载荷计算公式, 并结合算例将传统方法和本文方法的计算结果进行对比。

1 共轴双轮起落架回转地面载荷研究

共轴双轮起落架的回转力矩为两椭圆印痕绕轮轴中心的滑动摩擦力矩^[9]。其受力如图 1 所示,

P 点为轮轴中心, P_1 和 P_2 为轮胎接地点, 阴影部分为轮胎与地面间印痕, P_1 和 P_2 同时为印痕的几何形心。

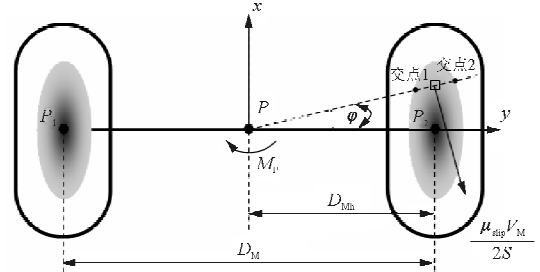


图 1 共轴双轮起落架回转力矩示意图

Fig. 1 Pivot torque sketch of twin wheels landing gear

以右边椭圆印痕为研究对象, 其椭圆方程如式(1)所示, 椭圆的长半轴 A 和短半轴 B 的计算公式分别如式(2)和式(3)所示^[7]。

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{(y - D_{Mh})^2}{B^2} = 1 \quad (1)$$

$$A = 0.85 \sqrt{\delta(D_0 - \delta)} \quad (2)$$

$$B = \sqrt{\delta(W - \delta)} \quad (3)$$

式中: δ 为轮胎压缩量; D_0 为轮胎初始直径; W 为轮胎断面宽度。

以 P 为原点, 作 φ 角度的射线, 射线方程为 $x = \tan\varphi \times y$, 射线与印痕边界的交点 1 和交点 2 的坐标为

$$x_{1,2} = \frac{A^2 D_{Mh} \tan\varphi \mp AB \tan\varphi \sqrt{B^2 \tan^2\varphi + A^2 - D_{Mh}^2 \tan^2\varphi}}{B^2 \tan^2\varphi + A^2} \quad (4)$$

$$y_{1,2} = \frac{A^2 D_{Mh} \mp AB \sqrt{B^2 \tan^2\varphi + A^2 - D_{Mh}^2 \tan^2\varphi}}{B^2 \tan^2\varphi + A^2} \quad (5)$$

交点 1 的极半径 $\rho_1(\varphi) = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$, 交点 2 的极半径 $\rho_2(\varphi) = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$ 。

当 $B^2 \tan^2\varphi + A^2 - D_{Mh}^2 \tan^2\varphi = 0$ 时, 射线与印痕边界只有一个交点, 并求得 φ 的边界。

$$\varphi_1 = -\tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{D_{Mh}^2 - B^2}} \quad (6)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{D_{Mh}^2 - B^2}} \quad (7)$$

进行极坐标变换 $x = \rho \cos\varphi$, $y = \rho \sin\varphi$, 印痕微面积滑动摩擦力矩为

$$dM_P = \frac{\mu_{slip} V_M}{2S} \sqrt{x^2 + y^2} dx dy = \frac{\mu_{slip} V_M}{2S} \rho^2 d\rho d\varphi \quad (8)$$

式中: μ_{slip} 为摩擦系数; S 为单个椭圆印痕面积。

利用极坐标计算二重积分的方法^[10]对右印痕面域积分, 根据对称性得出的回转力矩为

$$\begin{aligned} M_P &= 2 \iint \frac{\mu_{slip} V_M}{2S} \rho^2 d\rho d\varphi \\ &= \frac{\mu_{slip} V_M}{\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 d\rho \right) d\varphi \\ &= \frac{\mu_{slip} V_M}{3\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [\rho_2^3(\varphi) - \rho_1^3(\varphi)] d\varphi \quad (9) \end{aligned}$$

式(9)适用于轮胎有压缩量的共轴双轮起落架回转力矩计算;若轮胎没有压缩量,则回转力矩的计算公式为 $M_P = \mu_{\text{slip}} V_M D_{\text{Mh}}$, 没有轮胎压缩量的计算公式和传统方法是一致的。

右印痕微面积滑动摩擦力向 x 方向投影

$$dF_x = -\frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{2S} \cos\varphi dx dy = -\frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{2S} \cos\varphi \rho d\rho d\varphi \quad (10)$$

对右印痕面域积分,得出 x 方向的合力为

$$\begin{aligned} F_x &= -\iint \frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{2S} \cos\varphi \rho d\rho d\varphi \\ &= -\frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{2\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos\varphi \left(\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho d\rho \right) d\varphi \\ &= -\frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{4\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos\varphi [\rho_2^2(\varphi) - \rho_1^2(\varphi)] d\varphi \end{aligned} \quad (11)$$

y 方向载荷关于轮胎接地点原点对称,所以 y 方向合力为 0,即 $F_y = 0$ 。

共轴双轮起落架回转工况下轮胎接地点的载荷如图 2 所示。

则载荷向轮胎接地点 P_2 的简化结果为

$$\begin{cases} F_{P2x} = F_x \\ F_{P2y} = F_y = 0 \\ M_{P2z} = \frac{M_P - 2|F_{P2x}|D_{\text{Mh}}}{2} \end{cases} \quad (12)$$

根据机轮布置对称性,载荷向轮胎接地点 P_1 的简化结果为

$$\begin{cases} F_{P1x} = -F_x \\ F_{P1y} = F_y = 0 \\ M_{P1z} = M_{P2z} \end{cases} \quad (13)$$

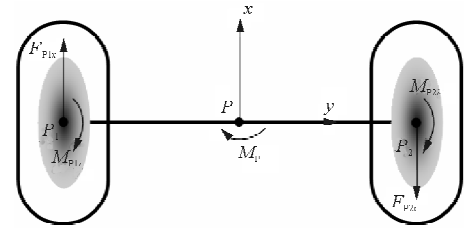


图 2 共轴双轮起落架轮胎接地点载荷

Fig. 2 Tire contact point load of twin wheels landing gear

某型飞机配置共轴双轮式起落架,双轮半间距 $D_{\text{Mh}} = 359 \text{ mm}$, 轮胎尺寸 $D_0 \times W = 1\ 016 \text{ mm} \times 368 \text{ mm}$, 轮胎压缩量 $\delta = 73 \text{ mm}$, 主起落架垂直载荷 $V_M = 230\ 000 \text{ N}$, 摩擦系数 $\mu_{\text{slip}} = 0.8$, 根据式(2)~式(3), 长半轴 $A = 223 \text{ mm}$, 短半轴 $B = 147 \text{ mm}$ 。分别使用传统方法和本文方法,应用 MATLAB 编程^[11]计算回转地面载荷,结果如表 1 所示。

表 1 共轴双轮起落架回转工况结果

Table 1 Pivot load case result of twin wheels landing gear

方法	M_P/Nm	P_1 载荷			P_2 载荷		
		F_{P1x}/N	F_{P1y}/N	M_{P1z}/Nm	F_{P2x}/N	F_{P2y}/N	M_{P2z}/Nm
传统方法	66 056	0	0	33 028	0	0	33 028
本文方法	69 180	87 801	0	3 069	-87 801	0	3 069

从表 1 可以看出:对于共轴双轮起落架,传统方法和本文方法所计算的回转力矩 M_P 差别不大,误差为 $(69\ 180 - 66\ 056)/66\ 056 \approx 4.73\%$;轮胎接地点扭矩和接地点航向力的差别较大,本文方法得到的轮胎接地点扭矩约占回转力矩的 8.87% ($2 \times 3\ 069/69\ 180 \approx 8.87\%$)。

在主起落架垂直载荷保持不变的前提下,共轴双轮起落架回转力矩随轮胎压缩量的变化曲线如图 3 所示,回转力矩随着轮胎压缩量增加而增加,符合工程经验。

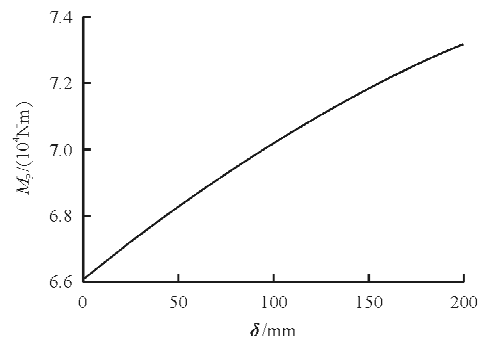


图 3 共轴双轮起落架回转力矩随轮胎压缩量变化关系
Fig. 3 Relation between pivot torque of twin wheels landing gear and tire deflection

2 四轮车架起落架回转地面载荷研究

大型民机^[12]和需要在简易跑道上使用的军用运输机普遍配置四轮车架式主起落架,代表机型有空客 A330 系列飞机、波音 787 飞机和我国的运 8 系列运输机。

四轮车架起落架的回转力矩为四个椭圆印痕绕车架中心的滑动摩擦力矩。其受力如图 4 所示, P 点为车架中心, $P_1 \sim P_4$ 为轮胎接地点, 阴影部分为轮胎与地面间印痕。

以右上方椭圆印痕为研究对象, 其椭圆方程为

$$\frac{(x - L_{Mh})^2}{A^2} + \frac{(y - D_{Mh})^2}{B^2} = 1 \quad (14)$$

射线与印痕边界的交点 1 和交点 2 的坐标分别为

$$x_{1,2} = \frac{(A^2 D_{Mh} \tan \varphi + B^2 L_{Mh} \tan^2 \varphi) \mp AB \tan \varphi \sqrt{(B^2 - D_{Mh}^2) \tan^2 \varphi + 2L_{Mh} D_{Mh} \tan^2 \varphi - (L_{Mh}^2 - A^2)}}{B^2 \tan^2 \varphi + A^2} \quad (15)$$

$$y_{1,2} = \frac{(A^2 D_{Mh} + B^2 L_{Mh} \tan \varphi) \mp AB \sqrt{(B^2 - D_{Mh}^2) \tan^2 \varphi + 2L_{Mh} D_{Mh} \tan \varphi - (L_{Mh}^2 - A^2)}}{B^2 \tan^2 \varphi + A^2} \quad (16)$$

当 $(B^2 - D_{Mh}^2) \tan^2 \varphi + 2L_{Mh} D_{Mh} \tan \varphi - (L_{Mh}^2 - A^2) = 0$ 时, 射线与印痕边界只有一个交点, 为 φ 的边界。

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{L_{Mh} D_{Mh} - \sqrt{B^2 L_{Mh}^2 - A^2 B^2 + A^2 D_{Mh}^2}}{D_{Mh}^2 - B^2} \quad (17)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \frac{L_{Mh} D_{Mh} + \sqrt{B^2 L_{Mh}^2 - A^2 B^2 + A^2 D_{Mh}^2}}{D_{Mh}^2 - B^2} \quad (18)$$

印痕微面积滑动摩擦力矩为

$$dM_p = \frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \sqrt{x^2 + y^2} dx dy = \frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \rho^2 d\rho d\varphi \quad (19)$$

对右上方印痕面域积分, 根据对称性得出的回转力矩为

$$\begin{aligned} M_p &= 4 \iint \frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \rho^2 d\rho d\varphi \\ &= \frac{\mu_{slip} V_M}{\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left(\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho^2 d\rho \right) d\varphi \\ &= \frac{\mu_{slip} V_M}{3\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} [\rho_2^3(\varphi) - \rho_1^3(\varphi)] d\varphi \quad (20) \end{aligned}$$

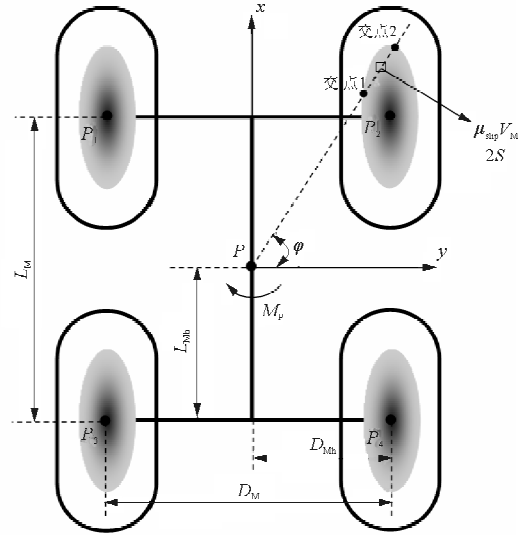


图 4 四轮车架起落架回转力矩示意图

Fig. 4 Pivot torque sketch of twin tandem landing gear

式(20)适用于轮胎有压缩量的四轮车架式起落架回转力矩计算。若轮胎没有压缩量, 则回转力矩的计算公式为 $M_p = \frac{\mu_{slip} V_M \sqrt{D_M^2 + L_M^2}}{2}$, 无轮胎压缩量的计算公式和传统方法是一致的。

印痕微面积滑动摩擦力分别向 x 方向、 y 方向投影

$$dF_x = -\frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \cos \varphi dx dy = -\frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \cos \varphi \rho d\rho d\varphi \quad (21)$$

$$dF_y = \frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \sin \varphi dx dy = \frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \sin \varphi \rho d\rho d\varphi \quad (22)$$

x 方向载荷

$$\begin{aligned} F_x &= -\iint \frac{\mu_{slip} V_M}{4S} \cos \varphi \rho d\rho d\varphi \\ &= -\frac{\mu_{slip} V_M}{4\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi \left(\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho d\rho \right) d\varphi \\ &= -\frac{\mu_{slip} V_M}{8\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi [\rho_2^2(\varphi) - \rho_1^2(\varphi)] d\varphi \quad (23) \end{aligned}$$

y 方向载荷

$$\begin{aligned}
 F_y &= \iint \frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{4S} \sin\varphi \rho d\rho d\varphi \\
 &= \frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{4\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin\varphi \left(\int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho d\rho \right) d\varphi \\
 &= \frac{\mu_{\text{slip}} V_M}{8\pi AB} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin\varphi [\rho_2^2(\varphi) - \rho_1^2(\varphi)] d\varphi
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

四轮车架起落架回转工况下轮胎接地点的载荷如图 5 所示。

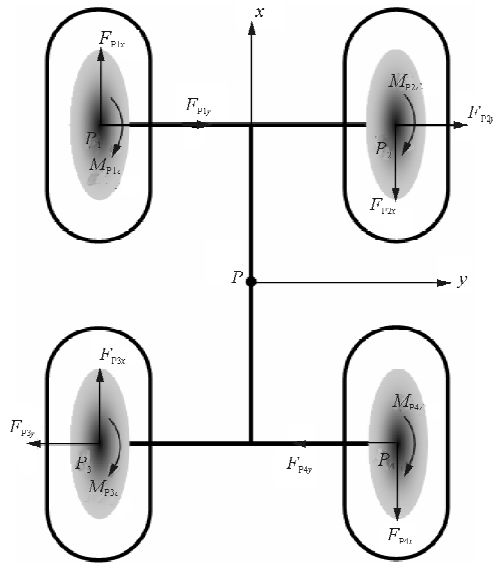


图 5 四轮车架起落架轮胎接地点载荷

Fig. 5 Tire contact point load of twin tandem landing gear

载荷向轮胎接地点 P_2 的简化结果为

$$\begin{cases}
 F_{P2x} = F_x \\
 F_{P2y} = F_y \\
 M_{P2z} = \frac{M_P - 4|F_{P2}|D_{Mh} - 4|F_{P2y}|L_{Mh}}{4}
 \end{cases}
 \tag{25}$$

根据机轮布置对称性, 载荷向轮胎接地点 P_1 、 P_3 、 P_4 的简化结果为

$$\begin{cases}
 F_{P1x} = -F_x \\
 F_{P1y} = F_y \\
 M_{P1z} = M_{P2z}
 \end{cases}
 \tag{26}$$

$$\begin{cases}
 F_{P3x} = -F_x \\
 F_{P3y} = -F_y \\
 M_{P3z} = M_{P2z}
 \end{cases}
 \tag{27}$$

$$\begin{cases}
 F_{P4x} = F_x \\
 F_{P4y} = -F_y \\
 M_{P4z} = M_{P2z}
 \end{cases}
 \tag{28}$$

某型飞机主起落架为四轮车架式, 主轮纵向半间距 $L_{Mh} = 615 \text{ mm}$, 侧向半间距 $D_{Mh} = 246 \text{ mm}$, 轮胎尺寸 $D_0 \times W = 1\ 050 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 轮胎压缩量 $\delta = 80 \text{ mm}$, 主起落架垂直载荷 $V_M = 300\ 000 \text{ N}$, 根据式(2)~式(3), 长半轴 $A = 236 \text{ mm}$, 短半轴 $B = 132.5 \text{ mm}$ 。分别使用传统方法和本文方法计算回转地面载荷, 结果如表 2 所示。

表 2 四轮车架起落架回转工况结果

Table 2 Pivot load case result of twin tandem landing gear

方法	M_P/Nm	P_1 载荷			P_2 载荷			P_3 载荷			P_4 载荷		
		F_{P1x}/N	F_{P1y}/N	M_{P1z}/Nm	F_{P2x}/N	F_{P2y}/N	M_{P2z}/Nm	F_{P3x}/N	F_{P3y}/N	M_{P3z}/Nm	F_{P4x}/N	F_{P4y}/N	M_{P4z}/Nm
传统方法	158 970	0	0	39 743	0	0	39 743	0	0	39 743	0	0	39 743
本文方法	160 020	22 558	55 150	539	-22 558	55 150	539	22 558	-55 150	539	-22 558	-55 150	539

从表 2 可以看出: 对于四轮车架起落架, 传统方法和本文方法所计算的回转力矩 M_P 差别不大, 误差为 $(160\ 020 - 158\ 970)/158\ 970 \approx 0.66\%$; 传统方法接地点只有较大的扭矩作用, 而本文方法得到的轮胎接地点扭矩约占回转力矩的 1.35% ($4 \times 539/160\ 020 \approx 1.35\%$), 但是有很大的航向、侧向力作用, 导致轮胎接地点载荷差别较大。

在主起落架垂直载荷保持不变的前提下, 四轮车架起落架回转力矩随轮胎压缩量的变化曲线如图 6 所示, 回转力矩随着轮胎压缩量增加而增加, 符合工程经验。

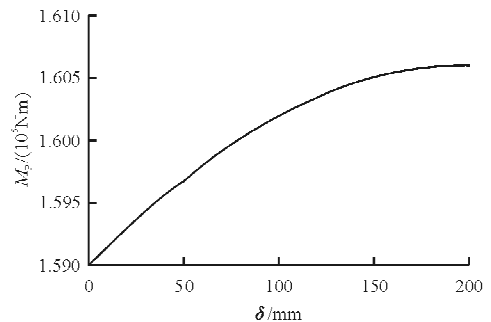


图 6 四轮车架起落架回转力矩随轮胎压缩量变化关系
Fig. 6 Relation between pivot torque of twin tandem landing gear and tire deflection

3 结 论

本文方法和传统方法得到的回转力矩误差较小,共轴双轮式起落架约为 4.73%,四轮车架式起落架约为 0.66%,表明本文提出的回转力矩计算方法是正确的。本文引入参数 A 和 B ,综合考虑了轮胎印痕和轮胎压缩量对回转力矩的影响,而传统方法未考虑压缩量的影响。回转力矩随着轮胎压缩量增加而增加,传统方法得到的回转力矩偏小。

传统方法认为接地点没有航向、侧向载荷,只有扭矩载荷,并且扭矩载荷等于回转力矩除以机轮数量。本文方法发现轮胎接地点存在较大的航向、侧向载荷,并且多轮起落架轮胎接地点扭矩较回转力矩小得多(共轴双轮起落架的比例约为 8.87%,四轮车架起落架的比例约为 1.35%),则回转力矩绝大部分由接地点航向、侧向载荷共同作用产生。

本文仅为飞机起落架回转地面载荷特性的理论研究,所得的理论分析结果应通过实验或者工程实例进行证明。

参 考 文 献

- [1] 中国民用航空局. CCAR-25-R4-2008 运输类飞机适航标准[S]. 北京:中国民用航空局,2008.
Civil Aviation Administration of China. CCAR-25-R4-2008 Airworthiness standards; transport category airplanes[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2008. (in Chinese)
- [2] 冯振宇. 运输类飞机适航要求解读:第 2 卷——结构[M]. 北京:航空工业出版社,2013.
Feng Zhenyu. Transport category airplane airworthiness standard interpretation; Vol. 2—Structure[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [3] 马祝林,沈航,苏开鑫,等. GJB 67.4A-2008 军用飞机结构强度规范:第 4 部分——地面载荷[S]. 北京:国防科学技术工业委员会,2008.
Ma Zhulin, Shen Hang, Su Kaixin, et al. GJB 67.4A-2008 Military airplane structural strength specification; Part 4—Ground loads[S]. Beijing: State Commission of Science and Technology for National Defense Industry, 2008. (in Chinese)
- [4] 解思适. 飞机设计手册:第 9 分册——载荷、强度和刚度[M]. 北京:航空工业出版社,2001:143-144.
Xie Sishi. Aircraft design manual; Part 9—Load strength & stiffness[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 143-144. (in Chinese)
- [5] 姚念奎. 串列多支柱主起落架布局飞机的起飞载荷研究[J]. 飞机设计,2009,29(4):26-30.
Yao Niankui. Take-off ground loads for aircraft main landing-gear with tandem multiple struts[J]. Aircraft Design, 2009, 29(4): 26-30. (in Chinese)
- [6] Norman S Currey. Aircraft landing gear design: principles and practices[M]. Washington, D. C.: AIAA, 1988: 202.
- [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,2002:80-81.
Gao Zejiang. Aircraft design manual; Part 14—Take off & landing system design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 80-81. (in Chinese)
- [8] 褚德培. 摆振理论及防摆措施[M]. 北京:国防工业出版社,1984:33.
Zhu Depei. Shimmy theory and anti shimmy measures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 33. (in Chinese)
- [9] 折世强,娄锐,黄海清. 单轮前起落架前轮静态地面操纵力矩特性研究[J]. 航空工程进展,2015,6(2):183-188.
She Shiqiang, Lou Rui, Huang Haiqing. Characteristic research of static steering ground torque for aircraft single nose wheel[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(2): 183-188. (in Chinese)
- [10] 同济大学应用数学系. 高等数学:下册[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2002:86-90.
Department of Mathematics, Tongji University. High mathematics; Vol. 2[M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 86-90. (in Chinese)
- [11] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003:238-249.
Zhang Zhiyong. Master MATLAB 6.5 [M]. Beijing: Beihang University Press, 2003: 238-249. (in Chinese)
- [12] 张庆伟. 世界民用飞机手册[M]. 北京:航空工业出版社,2009.
Zhang Qingwei. The world civil aircraft handbook [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:

娄锐(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:起落架缓冲性能和载荷分析。

折世强(1968—),男,研究员。主要研究方向:起落架缓冲性能和载荷分析。

黄海清(1975—),男,高级工程师。主要研究方向:起落架强度计算与设计。

(编辑:赵毓梅)