

文章编号:1001-7372(2015)07-0115-06

基于遗传算法的液罐车侧倾稳定性模型

李显生, 于迪, 张景海

(吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为了研究液罐车罐体几何尺寸对整车侧倾稳定性的影响,基于准静态方法建立了椭圆形截面罐体内液体晃动的质心运动和整车倾覆力矩求解方程,并推导出液罐车侧倾响应动力学方程,将2种方程进行联合仿真,得到液罐车侧倾响应动力学模型。以不同充液比的液体质心高度和整车倾覆力矩为优化目的,运用改进型遗传算法对液罐车罐体进行优化。结果表明:椭圆形液罐车的侧倾稳定性较圆形截面更好;椭圆形截面液罐车罐体的最优几何尺寸为长轴1.64 m,短轴1.2 m;最优椭圆截面尺寸液罐车的侧倾稳定性较其他尺寸液罐车有所提高。

关键词:汽车工程;液罐车;侧倾稳定性模型;准稳态方法;遗传算法;罐内液体冲击

中图分类号:U469.61

文献标志码:A

Roll Stability Model of Tank Truck Based on Genetic Algorithm

LI Xian-sheng, YU Di, ZHANG Jing-hai

(School of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: In order to investigate the effect of geometry size of tank on vehicle roll stability, equations of mass center motion of fluid sloshing in elliptical tanks and overturning moment were established based on quasi-static(QS) method, and the response dynamic equation of roll stability was deduced. The two equations were joined to simulate for obtaining the response dynamic model of tank truck roll. With height of mass center of fluid and the overturning moment as the optimization goal under different fill levels, improved genetic algorithm was used to optimize the tank. The results show that the roll stability of elliptical tank truck is better than that of circular tank truck. The optimal geometry size of elliptical tank truck is 1.64 m as major axis, 1.2 m as minor axis. The roll stability of optimal elliptical tank truck is improved compared with that in other sizes.

Key words: automotive engineering; tank truck; roll stability model; quasi-static (QS) method; genetic algorithm; fluid sloshing in tank

0 引言

商用液罐车的侧翻事故是最常见的事故形式之一。通常液罐车装载的均为危险性液体,因此研究液罐车的稳定性显得尤为重要^[1]。由于液体特有的流动特性,液罐车在制动、弯道行驶或紧急避让时,

罐体运动引起罐内液体晃动,其晃动对罐体的冲击影响车辆的行驶稳定性,而弯道行驶时,罐内液体晃动对液罐车整车侧倾稳定性的影响尤为突出^[2]。对于液体货物而言,其晃动影响不同于固体货物的负载转移,液体货物冲击与车辆侧倾具有潜在动态耦合^[3],非满载液罐车的侧倾稳定性受罐内液体的质

收稿日期:2014-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51375200)

作者简介:李显生(1965-),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lixs@jlu.edu.cn。

心高度和侧向载荷转移量大小影响^[4]。国外学者为了优化椭圆形截面罐车尺寸参数,对基于液体质心高度的倾覆力矩进行了研究,研究表明改善倾覆力矩有利于提高车辆的侧倾稳定性^[5]。倾覆力矩是侧倾稳定性的重要影响指标,因此对其优化尤为重要。在提高液罐车侧倾稳定性的研究领域,大多数研究集中于借助防波板的设计和布置方式来提高车辆的侧倾稳定性,对于提高侧倾稳定性的罐体截面尺寸优化设计鲜有考虑。

本文基于准静态方法建立椭圆形截面罐体的质心运动和整车倾覆力矩的求解模型,分析罐体尺寸对2个模型的影响;建立了非满载液罐车侧倾响应动力学模型,与质心运动及倾覆力矩求解模型进行联合仿真;本文运用遗传算法的基本理论,设计了改进型遗传算法,可用来优化椭圆形截面罐体尺寸,进而提高非满载液罐车的侧倾稳定性。

1 液罐车罐内液体运动模型

椭圆形截面罐体所受倾覆力矩是由液体货物的侧向和垂直方向上位移的变化产生的,是车辆侧倾的潜在影响因素^[3]。因此,需推导椭圆形截面罐体质心的求解模型、整车倾覆力矩的准稳态方程和侧倾响应动力学模型。

1.1 椭圆形截面罐体内液体质心的求解

当非满载液罐车处于静止状态时,定义罐内液体自由液面高度为 h (图1),自由液面与罐体截面在第1象限焦点坐标为 (y_h, z_h) ,其中 $z_h = h - b_t$, m_c 为货物质量, a_y 为罐内液体所受侧向加速度, a_z 为罐内液体所受垂直加速度。 y_h 表达式为

$$y_h = a_t \sqrt{1 - \frac{(h - b_t)^2}{b_t^2}} = a_t \sqrt{1 - (2f - 1)^2} \quad (1)$$

式中: f 为充液比; b_t 为椭圆形罐体短轴长; a_t 为椭圆形罐体长轴长。

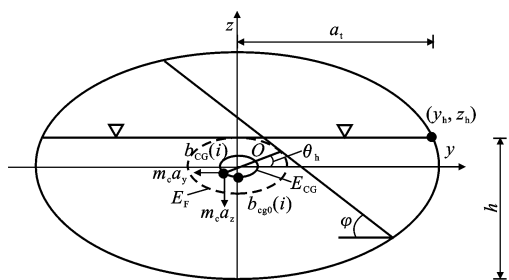


图1 在恒定侧向加速度作用下的椭圆形罐体横截面

Fig. 1 Cross Section of Elliptical Tank Under Steady Lateral Acceleration

在恒定的侧向加速度作用下,自由液面始终相切于一个与罐体相同长宽比的椭圆^[6],标记为 E_F ,其短轴为 b_F ,长轴为 a_F ,自由液面在 E_F 上的切点与质心连线跟 y 轴成 φ ,在数值上等于此状态下侧向加速度 a_y ,自由液面椭圆 E_F 和夹角 θ_h ,如图1所示。

液体质心的运动轨迹也是与罐体相同长宽比的椭圆,标记为 E_{CG} ,其短轴为 b_{CG} ,长轴为 a_{CG} ,比例系数为 r ,即

$$\frac{b_t}{a_t} = \frac{b_F}{a_F} = \frac{b_{CG}}{a_{CG}} = r \quad (2)$$

液体质心位置取决于液位自由液面斜率和罐体横截面形状等因素,忽略液体质心沿罐体纵轴的微小变化,认为各横截面上的质心位置相同,罐体内液体分布均匀,不存在密度差。在任意横截面上采用几何方法确定瞬时液体质心 (Y, Z) ,如式(3)所示^[6]

$$Y = \frac{\int\limits_{-\sigma}^{\sigma} y dy dz}{\int\limits_{-\sigma}^{\sigma} dy dz}, Z = \frac{\int\limits_{-\sigma}^{\sigma} z dy dz}{\int\limits_{-\sigma}^{\sigma} dy dz} \quad (3)$$

当 $h \in (0, b_t]$ 时,即充液比 f 在 $0 \sim 50\%$ 之间,令 $f = h/(2b_t)$,得质心椭圆尺寸 $b_{cg0}(h)$ 公式,即

$$A_F = 4fy_h + \frac{y_h}{a_t} \sqrt{a_t^2 - y_h^2} + a_t \arcsin\left(\frac{y_h}{a_t}\right) \quad (4)$$

$$b_{cg0}(h) = -\frac{2b_t[1 - (2f - 1)^2]^{3/2}}{A_F} \quad (5)$$

式中: A_F 为液面截面积。

当 $h \in (b_t, 2b_t]$ 时,即充液比 f 在 $50\% \sim 100\%$ 之间,质心运动椭圆尺寸公式为

$$A_F = \pi a_t b_t - \frac{y_h}{a_t} \sqrt{a_t^2 - y_h^2} - a_t b_t \arcsin\left(\frac{y_h}{a_t}\right) + 2y_h b_t (2f - 1) \quad (6)$$

$$b_{cg0}(h) = -\frac{2a_t b_t [1 - (2f - 1)^2]^{3/2}}{3A_F} \quad (7)$$

液体质心在 y 轴和 z 轴的坐标取决于自由液面椭圆 E_F 和夹角 θ_h ,液体质心运动椭圆尺寸 $b_{cg0}(h)$,如图1所示。自由液面椭圆 E_F 上各点坐标 (y_F, z_F) ,质心坐标 $(y(h), z(h))$ 的表达式为

$$y_F = a_F \cos(\theta_h), z_F = b_F \sin(\theta_h) \quad (8)$$

$$y(h) = a_{cg0}(h) \cos(\theta_h) \quad (9)$$

$$z(h) = b_{cg0}(h) \sin(\theta_h) \quad (10)$$

由式(10)可知,质心坐标 $(y(h), z(h))$ 表达式可表示为

$$y(h) = b_{cg0}(h) \cos[\arctan(-r/a_y)] \quad (11)$$

$$z(h) = a_{cg0}(h) \sin[\arctan(-r/a_y)] \quad (12)$$

1.2 罐体内液体质心坐标数值计算结果分析

选取椭圆形和圆形截面罐体,进行质心运动轨迹数值仿真,作如下设定:当 $h \in (b_t, 2b_t]$ 时,即充液比 f 在 50%~100%,车身侧倾角 5° 保持不变,等截面面积。质心横纵坐标随侧向加速度 a_y 变化,如图 2 所示。仿真结果表明:在不同充液比条件下,2 种截面罐体内液体质心高度和侧向位移随 a_y 增加而增大;在较高充液比条件下,液体质心高度增加幅度较小,变化比较平稳。相比于圆形,椭圆形截面罐体内液体质心高度更低。圆形截面液体质心横纵坐标值一直保持在较高水平,由此可见,在同等充液比的条件下,椭圆形截面液罐车罐内液体质心较低,拥有较好的侧倾稳定性。

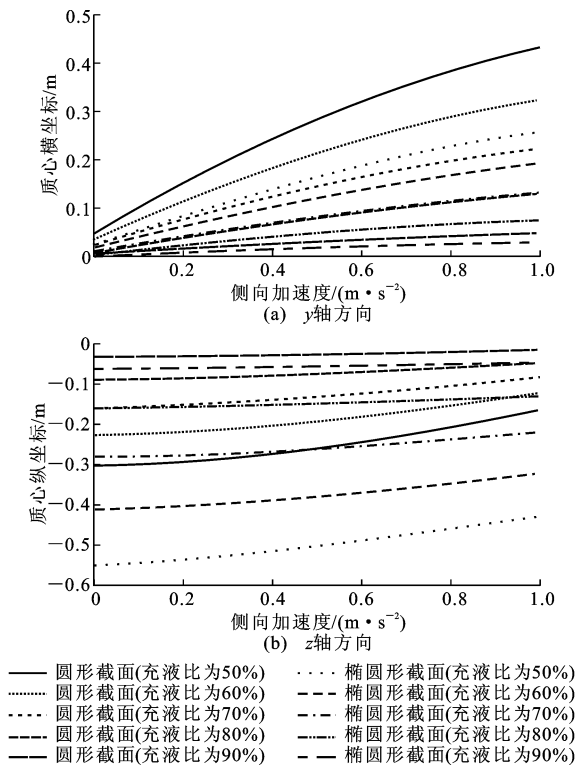


图 2 椭圆形截面罐体液体质心坐标随 a_y 变化曲线
Fig. 2 Variation Curves of Mass Center Coordinate of Elliptical Tank with a_y

1.3 固有晃动频率

对于理想不可压缩液体,液体表面运动速度 k 是一个关于波长 λ 的方程,即 $k=2\pi/\lambda$ 。一般来说,矩形罐体内液体的固有晃动频率 c 的计算公式^[3]为

$$c=\lambda f=(\frac{g}{k}\tanh(kh))^{1/2}\tag{13}$$

对于一阶晃动模态, L 为液体自由液面的长度,即 $L=\lambda/2$ 。对于非矩形罐体内液体固有晃动频率计算公式可由等效液面深度 h_{eq} 进行等效替换^[7]。

对充液比在 50%~100%,等截面面积的椭圆形和圆形罐体内液体固有晃动频率求解模型进行仿真,结果如图 3 所示。由图 3 可知:随着充液比增加,2 种截面罐体内液体固有晃动频率都随之减少,在充液比为 50%~85%的情况下,圆形罐体内液体固有晃动频率大于椭圆形罐体内液体的固有晃动频率,但充液比在 85%以上时,2 种罐体内液体的固有晃动频率数值上非常接近,原因在于罐内液体自由液面长度随充液比的增加而逐渐减小,当充液比大于 97%,其长度几乎为 0。

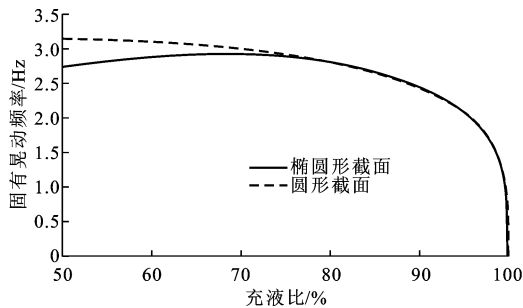


图 3 固有晃动频率随充液比变化
Fig. 3 Variation of Inherent Sloshing Frequency with Fill Level

2 改进型遗传算法

本文选用遗传算法对侧倾稳定性模型进行优化。通过对适应度值标定和群体多样化两方面的考虑,提出改进型遗传算法。设 f' 为标定后的适应度值, f 为原适应度值, f_{\max} 为适应度函数值的上界, f_{\min} 为适应度函数值的下界, δ 为开区间 $(0,1)$ 内的一个正实数。针对适应度值标定的计算公式如下^[7]

$$f'=\frac{1}{f_{\max}+f_{\min}+\delta}(f+|f_{\min}|)\tag{14}$$

在遗传算法中,突变率决定了优化结果的准确性和收敛速度。为了研究突变率和个体数量对优化椭圆形截面罐体尺寸的影响,突变率选取 0, 2%, 4%, 6%, 8%和 10%,个体数量选取 20~180 进行对比。研究中,针对 2 种不同的充液比(70%和 80%)进行仿真试验。算法的设计参数,如表 1 所示。目标函数为 M_z 和 Z_{cg} ,其中 M_z 为倾覆力矩, Z_{cg} 为质心高度。

改进遗传算法流程如图 4 所示。

3 液罐车侧倾响应动力学模型建立

对液罐车整车进行受力分析(图 5),建立了简化四自由度车辆模型来研究液体货物晃动对车辆侧

表 1 遗传算法要素

Tab. 1 Elements of Genetic Algorithm

变量	遗传算法要素
目标函数	M_z 和 Z_{cg}
罐体尺寸变量	椭圆长轴长度 ($2a$)
	椭圆短轴长度 ($2b$)
优化非线性约束	$A=\pi ab\leqslant 14\text{ m}^2$
优化线性约束	$1.4\text{ m}\leqslant a\leqslant 2.4\text{ m}$
	$1.2\text{ m}\leqslant b\leqslant 2.2\text{ m}$

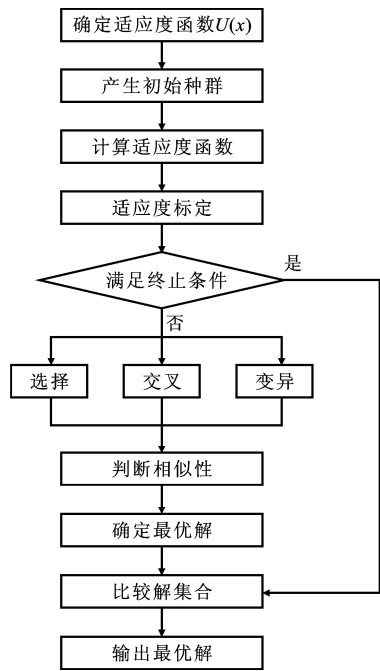


图 4 改进遗传算法流程

Fig. 4 Flowchart of Optimization GA

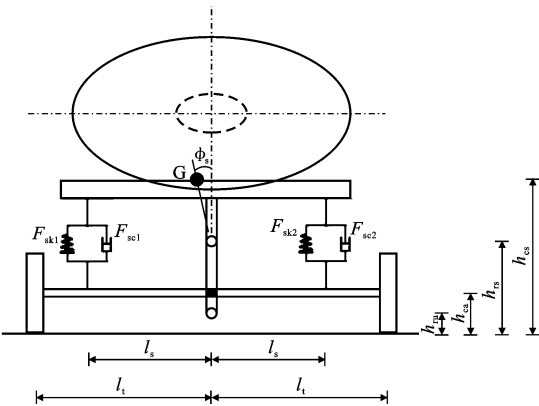


图 5 罐车侧倾平面受力分析

Fig. 5 Force Analysis of Tank Truck Roll Plane

倾稳定性的影响,液罐车稳态转向时,罐体内液体质心 G 和簧载质量转动质心的连线与 z 轴成 φ_s 。设 m_s 和 m_u 分别为簧载质量和非簧载质量; z_s 和 ϕ_s 分别为簧载质量的垂直位移和侧倾角; z_u 和 ϕ_u 分别为

非簧载质量的垂直位移和侧倾角; k_s 为悬架侧倾刚度; k_t 为轮胎侧倾刚度; c_s 为悬架阻尼系数; c_t 为轮胎阻尼系数; l_s 为单侧悬架与转动中心距离; l_t 为单侧车轮与转动中心距离; F_{sc1} 和 F_{sk1} 分别为簧载质量受到左侧悬架产生的阻尼力和弹簧作用力; F_{sc2} 和 F_{sk2} 分别为簧载质量受到右侧悬架产生的阻尼力和弹簧作用力; F_s 为簧载质量所受全部外力; F_u 为非簧载质量所受全部外力; M_s 为簧载质量所受全部外力矩; M_u 为非簧载质量所受全部外力矩; h_{cs} 为罐内液体质心高度; h_{rs} 为簧载质量转动中心高度; h_{cu} 为非簧载质量质心高度; h_{ru} 为非簧载质量转动中心高度。

侧倾响应动力学模型为

$$\left. \begin{aligned} F_s &= 2z(k_s + c_s) - \dot{m}_s g = m_s \ddot{z}_s \\ M_s &= 2l_s^2(k_s \phi_s + c_s \dot{\phi}_s) + m_s g z_s \phi_s (h_{cs} - h_{rs}) + M_z \\ F_u &= 2k_t z_u + 2c_t \dot{z}_u - 2z(k_s + c_s) - m_u g = m_u \ddot{z}_u \\ M_u &= 2(k_t z_u l_t + c_s l_s \dot{\phi}_s l_t - k_s l_s^2 \phi_s + c_s \dot{l}_s^2 \phi_s) + \\ &\quad m_u g z_u \phi_u h_{cu} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

相对于椭圆形罐体底部 O 点的倾覆力矩 M_z ,其是由所载液体货物的载荷位移引起的,令 m_F 为液体货物质量, a_z 为重力加速度, $a_z = g$ 。计算式为^[3]

$$M_z(h) = m_F [(z(h) \cos(\phi_s) - y(h) \sin(\phi_s)) b_t + z(h) \sin(\phi_s) + y(h) \cos(\phi_s)] \quad (16)$$

由式(16)可知,倾覆力矩大小是由液体货物质量、侧向加速度和罐体的几何尺寸决定的。通过 M_z 考察车辆侧倾稳定性,对侧倾响应动力学模型进行数值仿真,假设:椭圆形罐体长轴为 1.6 m,短轴为 1.2 m,圆形罐体尺寸截面半径为 1.39 m,即 2 种不同截面形状罐体的截面面积相同。车辆速度由 0 匀加速度至 $80\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, M_z 仿真结果如图 6 所示。由图 6 可知:充液比在 50%~93%时,圆形罐体倾覆力矩 M_z 较椭圆形大,但充液比在 93%~100%时,椭圆形罐体倾覆力矩值较圆形增大,但幅度很小,两者侧倾力矩值比较接近。由此可见,在不同充液比条件下,不同截面形状罐体内液体的质心高度和自由液面长度也有所不同,间接影响了整车侧倾稳定性。

4 遗传算法优化结果分析

在遗传算法中,适应度方程分别为 M_z 和 Z_{cg} 的求解方程,个体数量和突变率作为变量,观察 2 个变量对适应度方程的影响,可得出使适应度达到最小时所对应椭圆形截面尺寸。优化结果如图 7~10 所示。

由图 7,8 可知:在充液比为 70%,个体数量为

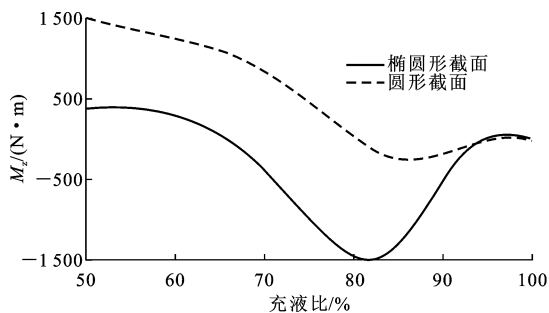


图 6 侧倾力矩随充液比变化情况

Fig. 6 Variation of Roll Moment with Fill Level

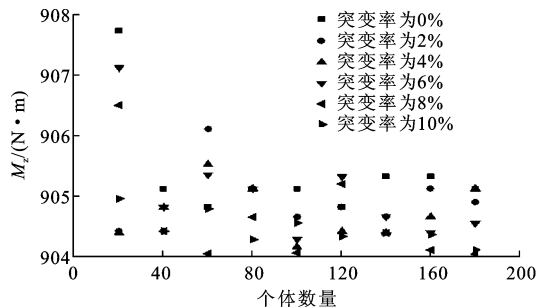


图 7 不同个体数量和突变率情况下
充液比为 70% 的倾覆力矩

Fig. 7 Overturning Moment in Different Population
Sizes and Mutation Rates Under Fill Level 70%

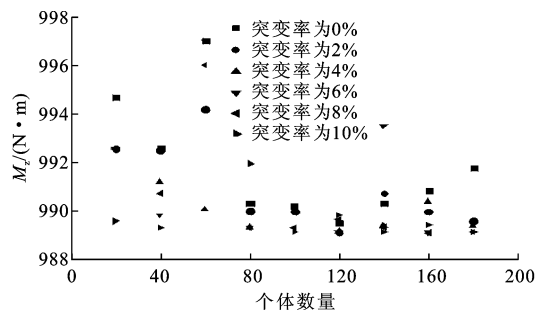


图 8 不同个体数量和突变率情况下
充液比为 80% 的倾覆力矩

Fig. 8 Overturning Moment in Different Population
Sizes and Mutation Rates Under Fill Level 80%

20 时,突变率分别为 0%,6% 和 8% 的适应度值较其他突变率大幅增加,而在个体数量大于等于 40 时,不同突变率的适应度函数值相差很小(图 7)。在充液比为 80%,个体数量为 60 时,突变率为 0% 和 10% 的适应度值相近且较其他突变率有所增加,而在个体数量大于 100 时,各种突变率相应的适应度值比较相近(图 8)。个体数量小于 40 或突变率小于 2% 或大于 10%,倾覆力矩的适应度函数与罐体自然振荡频率不兼容。因此,突变率中除了 0% 和 10%,其他结果均可行,并且个体数量应至少为

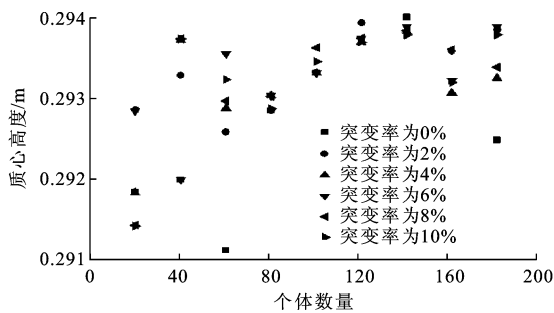


图 9 不同个体数量和突变率情况下
充液比为 70% 的质心高度

Fig. 9 Mass Center Height in Different Population
Sizes and Mutation Rates Under Fill Level 70%

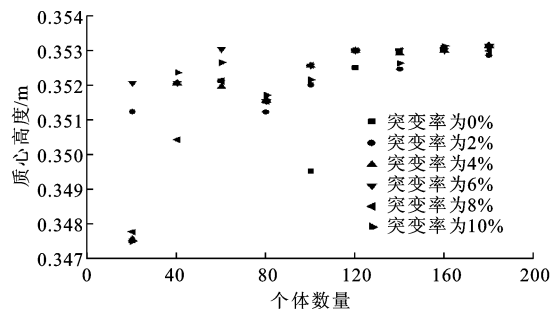


图 10 不同个体数量和突变率情况下
充液比为 80% 的质心高度

Fig. 10 Mass Center Height in Different Population
Sizes and Mutation Rates Under Fill Level 80%

40。当充液比为 70%,个体数量为 60,且突变率为 8% 时,运算至 51 代时达到最小,得到最优解 $a_1 = 1.64 \text{ m}$, $b_1 = 1.2 \text{ m}$;在充液比为 80%,个体数量为 120,且突变率为 4% 时,在运算至 53 代时达到最小,得到最优尺寸为 $a_2 = 1.44 \text{ m}$, $b_2 = 1.21 \text{ m}$ 。

由图 9,10 可知:在充液比为 70%,个体数量为 20,突变率在 8% 和 10% 时,适应度值最小,数值几乎相等,而在个体数量为 60,突变率为 0% 时,质心高度达到全局最小,但是规定突变率为 0% 和 10% 作为对比用途,不采纳适应度值。因此,可以观测到,当充液比为 70%,个体数量为 60,突变率为 2% 时,所对应的质心高度最小,在运算至 51 代时,达到最小,优化得到的尺寸为 $a_3 = 2 \text{ m}$, $b_3 = 1.4 \text{ m}$;在充液比为 80%,个体数量为 80,突变率为 2% 时,质心高度达到全局最小,在运算至 51 代时达到最小,优化得到尺寸为 $a_4 = 2.3 \text{ m}$, $b_4 = 1.9 \text{ m}$ 。

4 种优化尺寸结论为:① $a_1 = 1.64 \text{ m}$, $b_1 = 1.2 \text{ m}$;② $a_2 = 1.44 \text{ m}$, $b_2 = 1.21 \text{ m}$;③ $a_3 = 2 \text{ m}$, $b_3 = 1.4 \text{ m}$;④ $a_4 = 2.3 \text{ m}$, $b_4 = 1.9 \text{ m}$ 。

为验证优化结论的准确性,对 4 种优化结论进

行仿真分析,进一步选取最优尺寸,结果如图 11 所示。由图 11 可知:当充液比小于 60%,4 种优化尺寸的倾覆力矩比较相近,但结论③的优化尺寸所对应倾覆力矩值最大;当充液比大于 87%,4 种优化尺寸的倾覆力矩比较接近,但结论②的优化尺寸相对较大;特别是当充液比在 60%~85%时,结论④的优化尺寸所对应倾覆力矩最大,侧倾稳定性最差,而结论①的倾覆力矩值最小。对于不同充液比水平,结论①的倾覆力矩值一直处在较低的水平,由此可见,此罐体尺寸可作为最终优化尺寸。

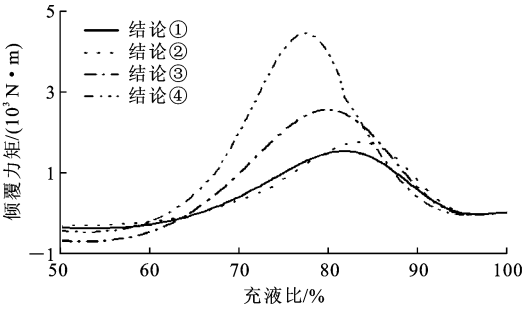


图 11 不同优化尺寸情况下的倾覆力矩
Fig. 11 Overturning Moment in Different Optimal Elliptical Tanks

5 结 语

(1)通过比较等截面面积椭圆形罐体与圆形罐体内液体固有频率变化趋势,得出在充液比 50%~85%条件下,椭圆形罐体内液体固有晃动频率较小,具有较好的侧倾稳定性结论。运用基于遗传算法的改进优化方法,获得倾覆力矩和罐内液体质心高度最优化的最佳椭圆形截面尺寸,并验证最佳罐体尺寸液罐车侧倾稳定性有所提高。此优化方法可以较为便捷地设计侧倾稳定性较好的液罐车罐体尺寸,为设计和制造液罐车罐体提供理论和试验基础。

(2)由于仅建立了线性激励下的整车侧倾稳定性模型,而非线性激励下罐内液体晃动对整车侧倾稳定性的影响未考虑,因此后续研究将扩展到改进方形等不同罐体形状。

参考文献:

References:

[1] ACARMAN T,OZGUNER U. Rollover Prevention for Heavy Trucks Using Frequency Shaped Sliding Mode Control[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(10): 737-762.

[2] ALIABADI S,JOHNSON A,ABEDI J. Comparison of Finite Element and Pendulum Models for Simulation of Sloshing[J]. Computers & Fluids, 2003, 32(4): 535-545.

[3] ROMERO J A, RAMIREZ O, FORTANELL J M, et al. Analysis of Lateral Sloshing Forces Within Road Containers with High Fill Levels[J]. Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(3): 303-312.

[4] KAUR A, BAKHSHI A K. Change in Optimum Genetic Algorithm Solution with Changing Band Discontinuities and Band Widths of Electrically Conducting Copolymers[J]. Chemical Physics, 2010, 369(2): 122-125.

[5] POPOV G, SANKAR S, SANKAR T S. Shape Optimization of Elliptical Road Containers Due to Liquid Load in Steady-state Turning[J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 25(3): 203-221.

[6] 李显生,郑雪莲,刘宏飞. 非满载罐式半挂汽车列车侧倾稳定性评价改进算法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42(5): 1089-1094.

LI Xian-sheng, ZHENG Xue-lian, LIU Hong-fei. Improved Algorithm on Roll Stability Evaluation of Partially Filled Tractor-tank Semitrailer[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(5): 1089-1094.

[7] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2010.

LEI Ying-Jie, ZHANG Shan-wen, LI Xu-wu, et al. MATLAB Genetic Algorithm Toolbox and Its Application[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2010.