

六足靴式气垫车的结构参数优化

贺登博, 马聪, 喻凡, 罗哲

(上海交通大学机械与动力工程学院)

5 **摘要:** 软地面恶劣复杂环境下车辆的通过性一直是非路面车辆动力学及其控制领域的研究热点及难点。课题组在前期对半履带气垫车研究的基础上, 提出一种以六个气垫靴作为行走机构的新型软地面概念车。该车通过驱动机构实现其纵向运动, 而足的垂向运动则通过充放气实现。在本文中, 先简单介绍了这种新型车辆的结构和工作原理, 然后针对其结构和工作原理, 分析确定了其所应当具备的约束条件。使用约束条件, 建立标准化的数学表达式, 利用 matlab 软件进行多约束优化设计, 最终确定靴式气垫车的各项结构参数。

关键词: 软地面车辆; 气垫靴; 结构设计; 多约束优化

中图分类号: U273 **文献标识码:** A

15 **Parameter Optimization of the Six-Air-Cushion Boots Walking Concept Vehicle**

HE Dengbo, MA Cong, YU Fan, LUO Zhe

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

20 **Abstract:** It has been a difficult but hot subject to improve the vehicle trafficability in some complex soft-terrain environments in the research area for off-road vehicle dynamics and control. Based on previous study for a semi-tracked air-cushion vehicle, a novel soft-terrain concept vehicle with a walking mechanism by using six air-cushion boots is proposed. The vehicle motion is realized by a driving-gears while the boots vertical motion is realized by air charging or discharging. In this paper, the structure and working principle of the vehicle are described firstly. Then the constraint conditions are proposed according to the structure and working mechanism of the new walking concept vehicle. With the constraint conditions, the mathematical equations are established and the multiple-constraint condition optimization is conducted in matlab in order to determine the structure parameters of the six-air-cushion boots walking concept vehicle.

25 **Key words:** Soft-terrain vehicle; Air-cushion boot; Structure design; Multiple-constraint condition design

0 引言

软地面恶劣复杂环境下车辆的通过性一直是非路面车辆动力学及其控制领域的研究热点及难点[1]。课题组根据前期对半履带气垫车[2-6]这种软地面车辆所积累的研究经验, 并进行了相关的文献查阅[7-8], 认为气垫技术结合腿式独立行走机构能够结合两者的优点, 35 进一步提高软地面车辆在湿软、不平地面条件下的通过性及适应性, 并为特殊要求的非常规车辆开拓一种新的结构形式及设计思路。在此基础上提出了一种新型的软地面车辆结构——气垫靴式步行概念车, 该车辆可能的优点有: 1) 在有效降低车辆对地面的接触压强的同时提高仿形性; 2) 非常规行走机构的运用保证了车辆具有较好的越障性能。

40 为验证该新型概念车设计方案的可行性, 需要对该新型车辆进行初步的运动学分析, 而其首要任务之一就是确定车辆的结构参数。本文首先简要介绍该新型车辆的结构及其工作原理, 然后通过理论分析得到车辆结构约束条件, 并对约束条件进行数学建模, 最后使用 matlab 软件, 结合所获得的约束条件数学模型, 进行多约束问题求解, 获得车辆设计的具体结构参数。

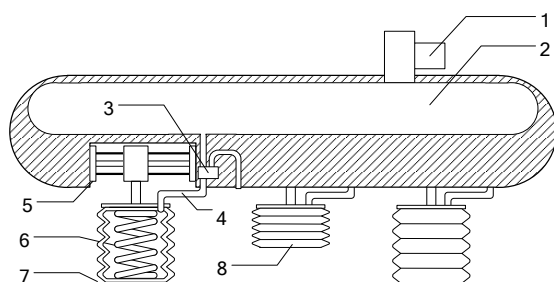
基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100073110063)

作者简介: 贺登博(1990-), 男, 硕士在读, 车辆系统动力学及其控制

通信联系人: 罗哲(1959-), 男, 教授, 非路面车辆动力学及控制方法. E-mail: luozhe@sjtu.edu.cn

45 1 新型软地面车辆简介

本文所涉及的新型软地面车辆为气垫靴式步行概念车，其结构如图 1 所示。在该车的设计中，步行机构由六个类似于膜式空气弹簧、气压独立可控的气垫靴（7-为落靴时的进气状态；8-为抬靴时的放气状态）组成，并纵向对称分布于车体下方的左右两侧。车体内密闭的高压气室（2），其压强由空压机及驱动电机（1）根据设计的控制算法保持于某一适当范围内。六个三相电磁阀（3）通过气道（4）连接分别与相应每一个气垫靴相连并对其进行气压控制，通过相位的改变以实现气垫靴的保持、充气 and 放气状态（其中相位一为连通气垫靴和高压气室、相位二为封闭状态、相位三为气垫靴连通大气）。当电磁阀处于相位一时，高压气源将向气垫靴充气，通过伸张气垫靴来实现其落靴动作；当电磁阀处于相位三时，由于气垫靴内拉簧作用，使靴内气体排出以实现抬靴动作；当气垫靴完成预定动作后，电磁阀回归到相位二，气垫靴保持气压并足以支撑车体重量。此外，也可考虑增设一个车载减压室，同时将三相电磁阀改为四相，使第四相为气垫靴与减压室的连通状态，以保证在特殊工况（如草地足受限的情况下）气垫靴仍具有足够的抬靴（拔靴）动力。



1-空压机及控制电机 2-高压气室 3-电磁阀 4-气道
5-气垫靴纵向驱动机构 6-弹簧（拉伸状态）
7-气垫靴（充气状态） 8-气垫靴（放气状态）

图 1 原理示意图

Fig.1 Schematic diagram

2 目标函数确定

图 2 为气垫车的俯视示意图，图中平行的六条黑线表示气垫足的行程范围，其中 L , W , D_1 , D_2 , D_3 为需要确定的结构参数。作为设计的一个基准，可以首先设定车身的长度为 2 米，也就是 $L = 2m$ ，其他四个参数为需要优化的参数。且整车上下、左右均关于其中轴线完全对称。为了对四个参数进行优化，首先应当确定优化目标函数。综合考虑车辆的设计目标以及结构特点，选取了步长、接地比压、稳定性作为设计的目标函数，具体分析如下。

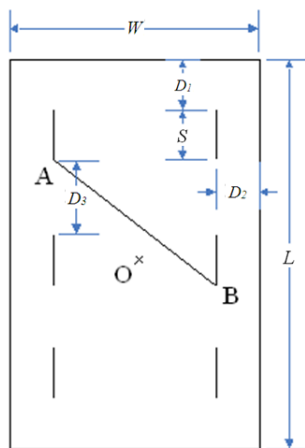


图 2 气垫车俯视示意图

Fig.2 Overlook sketch of Air cushion vehicle

70

2.1 步长

75 步长 S ，即每一个气垫靴在纵向上单次移动的最大距离。由图 2 可知，步长 S 可用下式计算得到：

$$S = \frac{L - 2(D_1 + D_3)}{3} \quad (1)$$

为了确保车辆前进时具有一定的速度，我们需要步长尽可能的长。由于 L 作为设计基准已经设定为 2m，因此关于步长的约束条件为：

$$\max S = \frac{2 - 2(D_1 + D_3)}{3} \quad (2)$$

80 2.2 接地比压

接地比压被定义为车所受重力与车辆接地面积的比值。接地比压比常规轮式车辆小是本靴式气垫车的主要优点之一。

85 降低车辆的接地比压可以通过车辆的轻量化设计和优化车辆的结构参数两个方面来实现，且两者是互相独立的。由于本文主要工作为车辆结构参数进行设计，在此只考虑对车辆进行结构参数优化来减小车辆接地比压。

假设车辆的重量跟车辆的投影面积成正比。引入系数 K_1 表示车辆单位面积的重量。于是车辆的重量可以由下式来表示：

$$G_v = K_1 W L \quad (3)$$

90 另一方面，车辆各足之间在任何步态下都不能发生干涉，于是足的半径不能超过图 2 所示两足最近距离的一半，即。于是可以取足的半径为：

$$R = \frac{K_2 D_3}{2} \quad (4)$$

其中 K_2 为待定的安全系数，是一个小于 1 的正实数，此处令 $K_2=0.87$ ，由式(4)，可以计算得单足的接地面积为下式：

$$A_2 = \pi \left(K_2 \cdot \frac{D_3}{2} \right)^2 \quad (5)$$

95 于是，该六足靴式气垫车的总接地面积为：

$$A_t = 6\pi \left(K_2 \cdot \frac{D_3}{2} \right)^2 \quad (6)$$

于是由式(3)，式(6)可以得到该车接地比压为：

$$P = \frac{G_v}{A_t} = \frac{K_1 W L}{6\pi \left(\frac{K_2 D_3}{2} \right)^2} \quad (7)$$

100 为了提高车辆在软路面上的通过性能，我们希望车辆的接地比压尽可能地小，且由基准条件 $L=2m$ ，于是可以得到关于接地比压的约束条件为：

$$\min P = \frac{G_v}{A_t} = \frac{K_1 W}{3\pi \left(\frac{K_2 D_3}{2} \right)^2} \quad (8)$$

2.3 行驶稳定性

因为车辆依靠六个气垫足支撑，如果足的接地点（立足点）设计不合理，车辆在行走中有可能发生倾覆。为了避免这种情况的发生，一方面，可以合理设计车辆步态控制算法；另

105 一方面, 还要在车辆结构参数设计上考虑到车辆的稳定性, 尽可能地减小倾覆发生的可能。其中后者是本文需要解决的问题。

首先, 定义重心到可能的任意两立足点连线距离的最小值为车辆的稳定度。由定义可知, 稳定度为重心到任意一足行程路径所在直线的距离及重心到图 2 中 AB 两点连线距离中的较小值。易知, 稳定值为一个正值, 且稳定值越大车辆越稳定。由图 2, 重心到任意一足行程路径所在直线的距离可以表示为:

$$d_1 = \frac{W}{2} - D_2 \quad (9)$$

重心到 AB 两点连线的距离可以通过解析几何的方式计算获得。以车辆的左边缘作为 y 轴, 下边缘作为 x 轴建立平面直角坐标系 (右手系), 则:

整车重心 O 坐标为:

$$115 \quad \left(\frac{W}{2}, \frac{L}{2}\right) \quad (10)$$

点 A 的坐标为:

$$\left(\frac{D}{2}, L - D_1 - S\right) \quad (11)$$

点 B 的坐标为:

$$(W - D_2, S + D_1 + D_3) \quad (12)$$

120 重心到线段 AB 距离为:

$$d_2 = \frac{|(y_A - y_B)x_o + (x_B - x_A)y_o + x_A y_B - x_B y_A|}{\sqrt{(y_A - y_B)^2 + (x_B - x_A)^2}} \quad (13)$$

其中 $x_A, x_B, y_A, y_B, x_o, y_o$, 分别为 A, B, O 点的坐标值。由图 2 可知式子中的绝对值内的数值为负。所以式(13)可以写为:

$$d_2 = -\frac{(y_A - y_B)x_o + (x_B - x_A)y_o + x_A y_B - x_B y_A}{\sqrt{(y_A - y_B)^2 + (x_B - x_A)^2}} \quad (14)$$

125 由此可以确定关于行驶稳定性的目标函数为:

$$\max T = \min \{d_1, d_2\} \quad (15)$$

为了计算的简便, 在这里将, 作为两个目标函数同时进行优化:

$$\max T_1 = d_1 \quad (16)$$

$$\max T_2 = d_2 \quad (17)$$

130 3 确定约束条件

首先, 如图 2 中, 各个距离值与长度值均应大于等于 0, 另外, 考虑到加工可能性以及车辆整体外形的要求 D_1, D_2, D_3 , 均应大于某个值。此处, 根据实际情况, 该值设定为 0.2m。另一方面, 从实际设计的角度考虑, 车辆的长宽比也具有一定的要求。于是综合分析可以确定以下 6 个约束条件:

$$135 \quad D_1 \geq 0.2 \quad (18a)$$

$$D_2 \geq 0.2 \quad (18b)$$

$$D_3 \geq 0.2 \quad (18c)$$

$$0.5L \leq W \leq L \quad (18d)$$

$$D_1 + D_3 \leq 1 \quad (18e)$$

140
$$D_2 \leq \frac{W}{2} \tag{18f}$$

4 目标函数及约束条件标准化

令 $D_1=x_1, D_2=x_2, D_3=x_3, W=x_4$, 将(2), (8), (16), (17)式改写为以 x_1, x_2, x_3, x_4 为参数的标准形式以方便 matlab 求解运算。

4.1 目标函数标准化

145 式(1)可以标准化为:

$$\max f_1 = S = \frac{2 - 2(x_1 + x_2)}{3} = \frac{2}{3}(x_1 + x_2 - 1) \tag{19}$$

等价于:

$$\min f_1 = x_1 + x_2 - 1 \tag{20}$$

式(8)可以标准化为:

150
$$\min f_2 = P = \frac{4K_1x_4}{3\pi K_2^2x_3^2} \tag{21}$$

等价于:

$$\min f_2 = \frac{x_4}{x_3^2} \tag{22}$$

式(16)可以标准化为:

$$\max f_3 = d_1 = \frac{x_4}{2} - x_2 = -0.5(2x_2 - x_4) \tag{23}$$

155 等价于:

$$\min f_3 = d_1 = 2x_2 - x_4 \tag{24}$$

式 (17) 可以标准化为:

$$\max f_4 = d_2 = -\frac{(y_A - y_B)x_o + (x_B - x_A)y_o + x_A y_B - x_B y_A}{\sqrt{(y_A - y_B)^2 + (x_B - x_A)^2}} \tag{25}$$

其中: $x_o = x_4 / 2, y_o = 1, x_A = x_2, y_A = (4 - x_1 + 2x_3) / 3,$

160
$$x_B = x_4 - x_2, y_B = (2 + x_1 + x_3) / 3$$

化简计算后得:

$$d_2 = -\frac{3x_3(x_4 - 2x_2)}{2\sqrt{4 - 8x_1 + 4x_3 + 4x_1^2 - 4x_1x_3 + x_3^2 + 9x_4^2 - 36x_4x_2 + 36x_2^2}} \tag{26}$$

可以得到标准化后的最优函数为:

$$\min f_4 = -d_2 \tag{27}$$

4.2 约束条件标准化

将式 (18) 各约束条件标准化得:

$$x_1 \geq 0.2 \tag{28a}$$

$$x_2 \geq 0.2 \tag{28b}$$

$$x_3 \geq 0.2 \tag{28c}$$

170
$$1 \leq x_4 \leq 2 \tag{28d}$$

$$x_1 + x_3 \leq 1 \quad (28e)$$

$$x_2 - \frac{x_4}{2} \leq 0 \quad (28f)$$

5 matlab 求解最优化结果

175 在获得了目标函数，即式(20)、式(22)、式(24)、式(27)及约束条件式(28)之后，可以使用 matlab 软件中的 fgoalattain 函数获得多目标最优化的结果并取整如下：

$$x_1 = x_2 = 0.2 \quad (29a)$$

$$x_3 = 0.46 \quad (29b)$$

$$x_4 = 0.32 \quad (29c)$$

180 此时，由式(1)，(15)可以得到其步长 $S=0.226m$ ，稳定度 $P=0.18m$ ，足的式(4)计算可得为 $R=0.2m$ 。

6 结论

185 本文通过分析靴式气垫车辆的设计目标，合理确定了该车辆的设计参数优化目标，并通过车辆的简化模型分析，将设计参数设计目标转换为目标函数数学表达式。另一方面，综合考虑车辆的实际情况，如车身长宽比例等因素以及加工难度等限制条件，确立了最优化求解过程中的约束条件。结合多目标最优化目标函数以及约束条件，使用 matlab 软件进行数学建模分析，得到车辆结构设计最优化结果以及相应的重要结构参数值。

后阶段，将结合结构参数以及实际加工工艺，具体化模型的结构设计并对最优化参数进行可能的修改与再计算，最终确立该靴式气垫车的结构设计，为接下来车辆的步态控制提供重要基础。

190

[参考文献] (References)

- [1] M.G.Bekker. Introduction to terrain-vehicle systems[M]. The university of Michigan press,1969.
- 195 [2] Z. Luo, F. Yu, B. C. Chen. Design of a novel semi tracked air-cushion vehicle for soft terrain[J]. Int. J. of Vehicle Design, 2003, 31(1):112-123.
- [3] D. Xie, Z. Luo, F. Yu. The computing of the optimal power consumption for semi-track air-cushion vehicle using hybrid generalized extremal optimization [J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(6):2831-2844.
- [4] D. Xie, C. Ma, Z. Luo, et al. Pitch control for a semi-track air-cushion vehicle based on optimal power consumption [J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2009, 2(1):1136-1142.
- 200 [5] 许烁,周科,罗哲,喻凡.半履带气垫车滑转率控制仿真[J].上海交通大学学报,2008,42(6):892-895.
- [6] 谢东,马聪,罗哲等.半履带气垫车气垫特性的试验与仿真研究[J].机械工程学报,2012,48(4):120-128.
- [7] F. Michaud, D. Letourneau, M. Arsenault, et al. Multi-modal locomotion robotic platform using leg-track-wheel articulations[J]. Autonomous Robots, 2005, 18(2):137-156.
- 205 [8] 程刚, 杨杰, 柴洪友等. 一种新型复合构型月球车的越障特性分析[J]. 航天器工程, 2007, 16(6):39-45.