



# 车辆动力学

□ 王良曦 王红岩 编著 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书得到总装备部“1153”人才工程专项经费资助

# 车辆动力学

王良曦 王红岩 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

车辆动力学 / 王良曦, 王红岩编著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 9

总装备部研究生教育精品教材  
ISBN 978 - 7 - 118 - 04959 - 6

I. 车... II. ①王...②王... III. 军用车辆 - 动力学 - 研究生 - 教材 IV. TJ81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 003165 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 10 $\frac{1}{4}$  字数 296 千字

2008 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 内 容 简 介

本书全面讲述轮式车辆动力学和履带式车辆动力学的基本理论,内容包括车轮的纵向特性和横向特性,车轮、履带与地面相互作用时的阻力和牵引力;车辆直线行驶时的驱动力和行驶阻力,车辆的加速性和制动性;轮式车辆和履带式车辆不同的转向机理,轮式车辆的转向过渡过程,履带式车辆的转向牵引平衡;路面不平度的统计特性,描述车辆行驶振动的传递函数和状态空间方法,车辆被动悬架、半主动悬架和主动悬架的数学模型和计算机仿真;两栖车辆的浮性、稳性、阻力和推力;气垫车辆的类型,升力、阻力,以及悬置特性和方向控制。

本书为车辆工程硕士研究生和博士研究生教材,也可作为相关专业的教学科研人员、工程技术人员、车辆使用人员及研究生的参考书籍。

# 前 言

本书在参考一些经典的和近期的文献资料的基础上,结合作者的部分研究和教学体会编著而成,包括轮式车辆动力学和履带式车辆动力学的基本内容。

全书共分6章。第1章讲述车轮与地面、履带与地面间相互作用力学。车轮和履带与地面作用时的受力状况有其共同之处,无论是车轮还是履带,都需研究其阻力和牵引力。但二者也有不同之处,因而分节进行叙述。第2章讲述车辆直线行驶力学。车辆直线行驶时,无论是轮式车辆还是履带式车辆,都遵循相似的规律,因而讲述是综合性的。除行驶阻力和车辆行驶条件外,本章还叙述了牵引特性计算步骤,以及机械传动、液力传动车辆的加速性能计算方法。与履带式车辆相比,轮式车辆对制动有其特殊的要求,与轮式车辆制动性相关的内容在本章的最后进行了介绍。第3章讲述车辆转向运动学和动力学。由于轮式车辆和履带式车辆通常具有完全不同的转向机构和转向机理,故分节进行叙述。第4章是车辆行驶振动动力学的内容。首先是简述路面不平度的统计特性,因为路面的不平是引起车辆行驶振动的根本外因。随后是汽车悬架系统的简化数学模型,单自由度线性系统的自由振动和强迫振动,二自由度模型及拉氏变换和状态方程的求解方法。接下来是二轴车辆悬架系统平面模型和多轴车辆悬架系统的三维模型。作为示例,本章中还叙述了扭力轴和单摆臂悬架系统的等效刚度的计算方法,使读者能了解如何获得建立前述模型所需的等效刚度。最后,是有关半主动悬架和主动悬架的内容和计算机仿真方法。第5章叙述两栖车辆性能。除车辆浮心、浮态、浮力的计算方法外,还简要介绍了利用三维实体模型计算车辆浮态的方法,最后是有关两栖车辆阻力和推力的内容。第6章是气垫车辆概述,根据新的文献介绍其结构和力学性能。

由于历史的原因,各类车辆各有自己习惯的专业术语,例如,“悬架系统”和“悬挂系统”是具有同样功能的系统在轮式车辆领域和履带车辆领域中使用不同名称,为一致起见,统一使用了“悬架”的名称。但数学符号基本上沿用了各自原有专业领域的习惯表示,在出现时逐个说明,以便于阅读。

本书作为研究生教材使用时,可根据培养的目的和时间安排,按需增减教学内容。

由于水平所限,错误难免,敬请读者批评指正。

作者

# 目 录

第 1 章 车辆 - 地面相互作用力学	1
1.1 车轮 - 地面力学	1
1.1.1 车轮的滚动阻力	1
1.1.2 车轮的纵向特性	11
1.1.3 车轮的横向特性	13
1.2 履带 - 地面力学	18
1.2.1 履带的运动阻力	18
1.2.2 履带下的压力分布	20
1.2.3 履带的牵引力	21
思考题	29
第 2 章 车辆直线行驶力学	31
2.1 车辆的驱动力和行驶阻力	31
2.1.1 车辆的驱动力	31
2.1.2 车辆的行驶阻力	33
2.1.3 车辆行驶条件	37
2.2 车辆直线行驶牵引计算	38
2.2.1 动力装置特性	38
2.2.2 车辆的牵引特性	42
2.2.3 牵引计算步骤	43
2.3 机械传动车辆的加速性能	44
2.3.1 发动机稳态运行时车辆的加速性	44
2.3.2 发动机非稳态运行时车辆的加速性	51
2.4 安装液力传动车辆的直线行驶牵引计算	54
2.4.1 液力传动车辆特点	54



2.4.2	液力变矩器的原始特性 .....	54
2.4.3	液力变矩器与发动机共同工作特性 .....	56
2.4.4	综合式液力传动车辆牵引计算 .....	62
2.4.5	综合式液力传动车辆的加速性能 .....	64
2.5	车辆的制动性能 .....	74
2.5.1	制动性能指标 .....	74
2.5.2	轮式车辆的制动性能 .....	76
2.5.3	制动防抱死装置 .....	84
	思考题 .....	85
<b>第3章</b>	<b>车辆转向运动学和动力学</b> .....	<b>87</b>
3.1	轮式车辆转向 .....	87
3.1.1	转向运动学 .....	87
3.1.2	稳态转向 .....	90
3.1.3	转向过渡过程 .....	98
3.1.4	转向稳定性 .....	105
3.2	履带式车辆转向 .....	108
3.2.1	基本概念和术语 .....	108
3.2.2	转向运动学 .....	111
3.2.3	低匀速转向动力学 .....	118
3.2.4	高匀速转向动力学 .....	137
3.2.5	履带车辆的反转向 .....	140
3.2.6	转向功率 .....	145
3.2.7	转向单位牵引力 .....	151
3.2.8	转向牵引平衡图 .....	155
	思考题 .....	167
<b>第4章</b>	<b>车辆行驶振动力学</b> .....	<b>170</b>
4.1	路面状况的统计特性 .....	170
4.1.1	空间频率谱密度 .....	170
4.1.2	时间频率谱密度 .....	173
4.1.3	路面不平度的高斯分布特性 .....	174



4.2 汽车悬架系统简化模型 .....	176
4.2.1 分离质量简化方法 .....	176
4.2.2 单自由度系统 .....	178
4.2.3 二自由度系统 .....	199
4.3 车辆悬架系统模型 .....	206
4.3.1 二轴车辆悬架系统平面模型 .....	207
4.3.2 多轴车辆悬架系统三维模型 .....	215
4.4 悬架的等效刚度 .....	223
4.4.1 扭力轴悬架的等效刚度 .....	223
4.4.2 单摆臂悬架的等效刚度 .....	225
4.5 主动悬架和半主动悬架 .....	227
4.5.1 主动悬架 .....	228
4.5.2 半主动悬架 .....	233
4.5.3 1/4 汽车半主动悬架性能仿真 .....	236
4.5.4 1/2 汽车主动悬架性能仿真 .....	237
思考题 .....	242
<b>第5章 两栖车辆性能</b> .....	<b>244</b>
5.1 主要术语 .....	244
5.1.1 基本平面 .....	244
5.1.2 吃水和干舷 .....	245
5.1.3 浮性和浮态 .....	245
5.2 正浮态浮心计算 .....	246
5.2.1 纵向分割法 .....	246
5.2.2 竖向分割法 .....	248
5.2.3 数值计算方法 .....	250
5.3 两栖车辆稳性 .....	255
5.3.1 小倾角稳性 .....	255
5.3.2 大倾角稳性 .....	258
5.3.3 两栖车辆自由振动 .....	262
5.4 三维实体模型预测车辆浮态 .....	262

5.4.1	构建车辆三维实体模型 .....	263
5.4.2	正浮态时浮力和浮心的计算 .....	263
5.4.3	非正浮态时浮力和浮心的计算 .....	264
5.5	两栖车辆行驶阻力和推力 .....	264
5.5.1	行驶阻力 .....	264
5.5.2	推力 .....	275
	思考题 .....	282
<b>第6章</b>	<b>气垫车辆概述</b> .....	284
6.1	气垫系统的主要类型和升力 .....	284
6.1.1	压力室式 .....	285
6.1.2	周边喷嘴式 .....	292
6.2	气垫车辆的阻力 .....	296
6.2.1	动量阻力 .....	297
6.2.2	纵倾阻力 .....	298
6.2.3	裙边接触阻力 .....	298
6.2.4	陆上总阻力 .....	300
6.2.5	兴波阻力 .....	303
6.2.6	湿溅阻力 .....	305
6.2.7	波浪阻力 .....	305
6.2.8	水上总阻力 .....	306
6.3	气垫系统的悬置特性 .....	307
6.3.1	升降(跳动)刚性和阻尼 .....	307
6.3.2	侧倾刚性 .....	311
6.4	气垫车辆的方向控制 .....	313
6.4.1	常用方向控制分类 .....	313
6.4.2	带面接触装置的方向控制 .....	315
	思考题 .....	316
	参考文献 .....	318

# 第 1 章 车辆 - 地面相互作用力学

## 1.1 车轮 - 地面力学

车轮是轮式车辆区别于履带式车辆的典型部件。当前的轮式车辆所采用的车轮外层都有橡胶轮胎,橡胶轮胎与地面接触所产生的力是保证车辆行驶、制动和操纵的重要因素。

### 1.1.1 车轮的滚动阻力

尽管有轮胎的车轮都具有弹性,但对于不同性质的路面,轮胎弹性的影响程度会有很大的差别。以下分硬路面和软路面两种情况进行讨论。

#### 1. 车轮在硬路面上的滚动阻力

弹性车轮在硬路面上滚动时,可认为路面不发生变形而仅轮胎发生变形,滚动阻力产生的主要原因是轮胎变形滞后引起的能量损失。试验表明,在车辆行驶速度为  $128\text{km/h} \sim 152\text{km/h}$  的范围内,滚动阻力的  $90\% \sim 95\%$  来源于轮胎变形滞后的能量损失,而轮胎与路面间的滑动摩擦仅占  $2\% \sim 10\%$ ,轮胎内外的空气阻力仅占  $1.5\% \sim 3.5\%$ 。

车轮垂直变形  $h$  和相应的垂直载荷  $W$  的关系如图 1-1 所示。图中  $OBA$  为加载曲线,  $ACD$  为卸载曲线,二者不相重合。面积  $OBACDO$  为一个加载卸载循环的能量损失。由图可见,对于相同的垂直变形  $\delta$ ,加载时的力大于卸载时的力。

当车轮向前滚动时,轮胎接地段的前半部压缩,为加载,而后半部舒展,为卸载,故前后部所受的地面垂直力的分布是不对称的,接地段前半部的垂直力大于后半部的垂直力。地面的垂直反力的合力  $F_z$  与垂直载

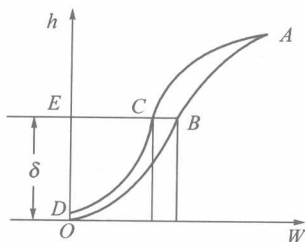


图 1-1 车轮轮胎垂直变形

荷  $W$  的大小相等, 方向相反, 但  $F_z$  的作用点向车轮前部偏离, 距车轮中心垂线一段距离  $a$ , 如图 1-2 所示。对车轮中心取矩有  $F_x r = F_z a$ ,  $r$  为车轮的滚动半径, 从而可得  $F_x = F_z a / r$ ,  $F_x$  即为滚动阻力。

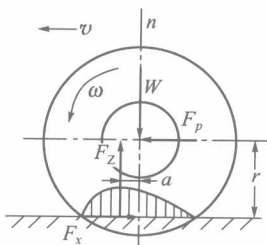


图 1-2 弹性车轮在硬路面上滚动时的受力状况

滚动阻力与车轮垂直载荷之比, 即  $f = F_x / W$ , 定义为滚动阻力系数。滚动阻力系数也可定义为地面作用于轮胎的垂直力向前偏离车轮垂直中心线的距离和车轮滚动半径之比, 即  $f = a / r$ 。滚动阻力系数与路面的性质、轮胎的材料和结构等因素有关。一些斜交轮胎的滚动阻力系数如表 1-1 所列。

表 1-1 斜交轮胎的滚动阻力系数

车辆类型	路面		
	水泥路面	中等硬土壤	砂地
轿车	0.015	0.08	0.30
货车	0.012	0.06	0.25
拖拉机	0.02	0.04	0.20

此外,车辆的行驶速度也影响滚动阻力系数的大小。以轿车为例,有的文献采用如下经验公式计算滚动阻力系数

$$f = f_0 + f_s \left( \frac{v}{100} \right)^{2.5} \quad (1-1)$$

式中  $v$ ——车轮前进的速度(km/h);

$f_0, f_s$ ——与轮胎气压  $p$  有关的系数。

通常  $f_0$  和  $f_s$  随轮胎气压的增加而降低,如图 1-3 所示。

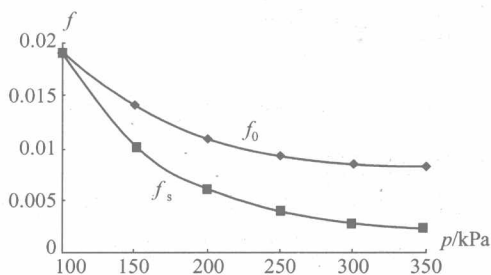


图 1-3 轮胎气压对滚动阻力系数的影响

有的文献采用不同的滚动阻力经验公式,对于斜交轮胎

$$f_{r,r} = 0.0136 + 0.4 \times 10^{-7} v^2 \quad (1-2)$$

相应的曲线如图 1-4 所示。

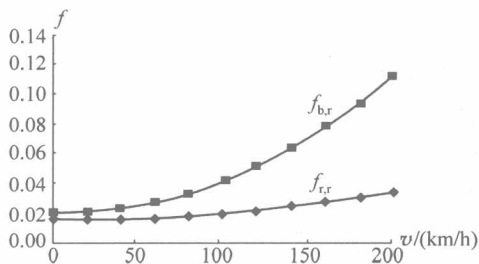


图 1-4 斜交轮胎的滚动阻力系数

对于子午线轮胎

$$f_{b,r} = 0.0169 + 0.19 \times 10^{-6} v^2 \quad (1-3)$$

相应的曲线如图 1-5 所示。

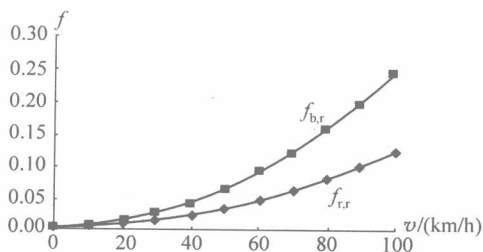


图 1-5 子午线轮胎的滚动阻力系数

## 2. 车轮在软路面上的滚动阻力

车轮在软路面上产生滚动阻力的原因主要是车轮沉陷时土壤的变形,以及在某些情况下同时出现的轮胎弹性变形。

### 1) 刚性车轮

刚性车轮在软路面上沉陷时的受力情况如图 1-6 所示。根据贝克的压力-沉陷关系,车轮压力  $p$  与沉陷量  $z$  的关系为

$$p = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (1-4)$$

式中  $n$ ——沉陷指数;

$k_c$ ——土壤的黏附模量;

$k_\phi$ ——土壤的摩擦模量;

$b$ ——车轮的宽度。

被牵引的车轮的力平衡方程为

$$\begin{cases} R_c = b \int_0^{\theta_0} \sigma \gamma \sin \theta d\theta \\ W = b \int_0^{\theta_0} \sigma \gamma \cos \theta d\theta \end{cases} \quad (1-5)$$

式中  $R_c$ ——滚动阻力;  
 $W$ ——垂直载荷;  
 $\sigma$ ——法向应力;  
 $\gamma$ ——土壤密度;  
 $\theta_0$ ——与最大沉陷深度  $z_0$  相对应的车轮扇形角。

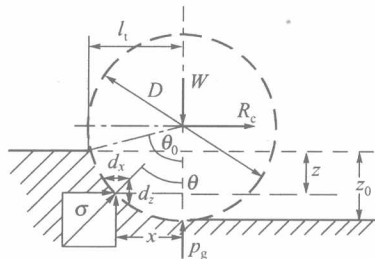


图 1-6 刚性车轮沉陷时的受力情况

沉陷深度  $z$  处的法向应力为  $\sigma$ , 相应的垂直压强为  $p$ , 二者的关系为  $\sigma \gamma \sin \theta d\theta = p dz$  和  $\sigma \gamma \cos \theta d\theta = p dx$ 。故滚动阻力为

$$R_c = b \int_0^{\theta_0} \sigma \gamma \sin \theta d\theta = b \int_0^{z_0} p dz$$

垂直载荷为

$$W = b \int_0^{\theta_0} \sigma \gamma \cos \theta d\theta = -b \int_0^{z_0} p dx$$

将式(1-4)代入以上两式得

$$R_c = b \int_0^{z_0} \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n dz = b \left[ \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \right] \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \quad (1-6)$$

$$W = -b \int_0^{z_0} \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n dx \quad (1-7)$$

又由图 1-6 可知如下几何关系

$$x^2 = [D - (z_0 - z)](z_0 - z) \quad (1-8)$$



式中  $D$ ——车轮直径。

对小的沉陷,有  $x^2 \approx D(z_0 - z)$ ,微分得  $2x dx = -D dz$ ,故有

$$dx = \frac{-D dz}{2x} = \frac{-D dz}{2 \sqrt{D(z_0 - z)}} = \frac{-\sqrt{D} dz}{2 \sqrt{z_0 - z}}$$

代入式(1-7)有

$$W = b \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \int_0^{z_0} \frac{z^n \sqrt{D}}{2 \sqrt{z_0 - z}} dz \quad (1-9)$$

又令  $z_0 - z = t^2$ ,则  $dz = -2t dt$ ,代入式(1-9)得

$$W = b \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \sqrt{D} \int_0^{\sqrt{z_0}} (z_0 - t^2)^n dt \quad (1-10)$$

取展开式  $(z_0 - t^2)^n = z_0^n - z_0^{n-1} t^2 + \dots$  的前两项,于是有

$$W \approx \frac{b \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \sqrt{z_0 D}}{3} z_0^n (3 - n) = \frac{b(3 - n) \sqrt{D}}{3} \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z_0^{\left( \frac{2n+1}{2} \right)} \quad (1-11)$$

由上式可解得如下沉陷量计算公式

$$z_0 = \left[ \frac{3W}{b \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \sqrt{D} (3 - n)} \right]^{\frac{2}{2n+1}} \quad (1-12)$$

式中  $b$ ——车轮的宽度(m);

$D$ ——车轮的直径(m);

$W$ ——车轮的垂直负荷(N);

$k_c$ ——土壤的黏附模量( $\text{kN/m}^{n+1}$ );

$k_\phi$ ——土壤的摩擦模量( $\text{kN/m}^{n+2}$ );

$n$ ——沉陷指数。

应当注意的是,当车轮的接地长度  $l < b$  时,应以  $l$  取代  $b$  进行计算,即选择  $l, b$  中的较小者进行计算。

将式(1-12)代入式(1-4),可得出最大沉陷量为 $z_0$ 处,即车轮最低点处土壤的压力

$$p_g = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z_0^n = \left( \frac{k_c}{b} + k_\phi \right)^{\frac{1}{2n+1}} \left[ \frac{3W}{b(3-n)\sqrt{D}} \right]^{\frac{2n}{2n+1}} \quad (1-13)$$

将式(1-12)代入式(1-6),得滚动阻力的如下计算公式

$$R_c = \frac{(3W)^{\frac{2n+2}{2n+1}}}{(n+1)b^{\frac{1}{2n+1}}D^{\frac{n+1}{2n+1}}(3-n)^{\frac{2n+2}{2n+1}}\left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right)^{\frac{1}{2n+1}}} \quad (1-14)$$

一些地面的特性参数列于表 1-2。表中, $c$  为黏附系数; $\phi$  为内部剪切阻力角。

表 1-2 地面特性参数

地 面	湿度/%	$n$	$K_c/(\text{kN/m}^{n+1})$	$K_t/(\text{kN/m}^{n+2})$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\circ)$
干砂土(LLI)	0	1.1	0.95	1523.43	1.04	28
砂质腐质土(LLI)	15	0.7	5.27	1515.04	1.72	29
	22	0.2	2.56	43.12	1.38	38
砂质腐质土 (Strong, Buchele)	11	0.9	52.53	1127.97	4.83	20
	23	0.4	11.42	808.96	9.65	35
砂质腐质土(Hanamoto)	26	0.3	2.79	141.11	13.79	22
	32	0.5	0.77	51.91	5.17	11
黏性土(泰国)	38	0.5	13.19	692.45	4.14	13
	55	0.7	16.03	1262.53	2.07	10
重黏土(水道试验站)	25	0.13	12.7	1555.95	68.95	34
	40	0.11	1.84	193.27	20.69	6
贫黏土(WES)	22	0.2	16.43	1724.69	63.95	20
	32	0.15	1.52	119.61	13.75	11
雪(Harrison)		1.6	4.37	196.72	1.03	19.7
		1.6	2.49	245.9	0.62	23.2