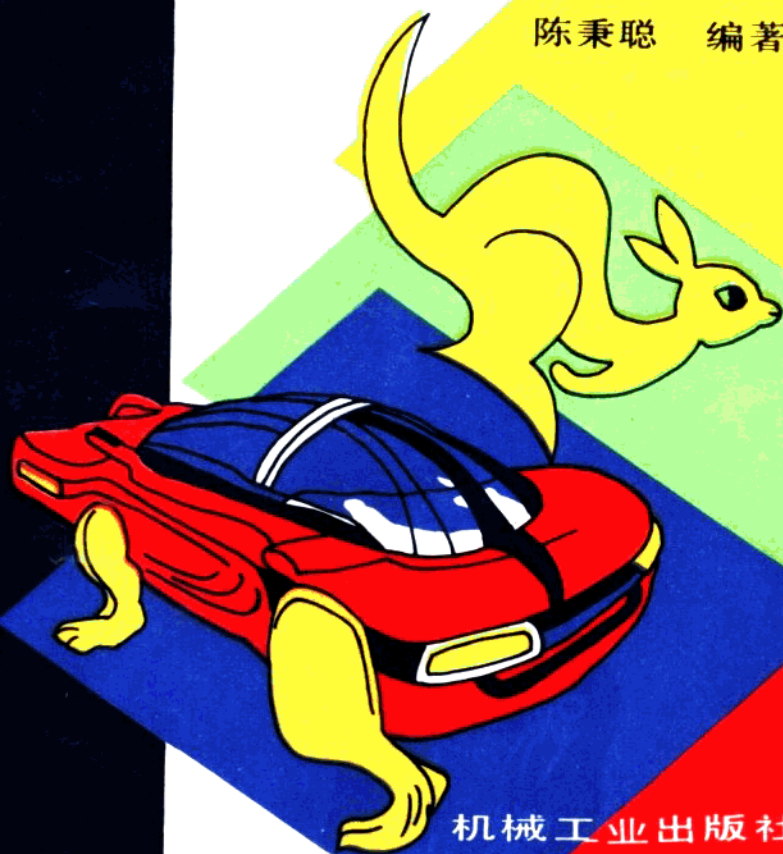


步行车辆理论 及脚踝设计

陈秉聪 编著



机械工业出版社

序 言

步行车辆是近几十年来发展起来的新兴学科。虽然早在1893年 Rygg 就设计了机械马, 1913年 Bechtolsheim 又设计了四腿步行机。但由于过去对步行的步法、步行车辆的控制、腿及传动系的设计还缺乏深入的了解, 因而几十年来, 它始终处在试验研究阶段。

由于对动物步法的深入了解及现代电子计算机的迅速发展, 特别是微型计算机技术已经渗透到科学研究的各个领域, 这些都促进了步行车辆的发展, 使步行车辆的复杂控制成为可能。

目前, 几乎所有地面车辆的行走装置仍采用轮式(包括刚性轮及气胎轮)和履带式(严格地说, 履带车辆可当作携带和铺设自己道路的轮式车辆)。在水田及沼泽地区的作业中, 车辆的行走装置尽管有些变型: 如水田叶轮、镶塑齿水田轮、网格式水田轮、高花纹轮胎、低压或超低压轮胎、宽履带行走装置等, 但仍属于轮式及履带式两种基本型式。

经验证明, 上述两种行走装置, 不能适应松软及不规则地面的行驶, 需要提出一个新的装置来解决这一问题。

地球上约有50%的陆地不适于使用常规的轮式或履带式车轮。在我国水田面积约4.5亿亩, 目前仍在不断发展。水稻产量占全国粮食总产量的一半以上, 我国南方许多地区每年种二季或三季稻, 水田作业任务困难又繁重。

黄淮海区1亿多亩地需要改造, 东北三江平原浅沼泽

IV

地，黄河、长江、珠江等河套三角洲和滩涂地等数亿亩湿地的开发，西北地区的沙漠地带，均急需解决车辆的行走装置，以提高其行走效率和通过性能。步行车辆将是解决这一问题的有效途径。它的研究对我国农业工程、工程机械、运输机械、军事机械等都有广阔的应用前景。

本书参考国外有关资料，特别是美国俄亥俄（Ohio）大学 Shin-Min Song 博士的有关论文，结合编者多年从事步行机构理论的研究及指导博士研究生的经验，根据我国实际情况编写而成。

由于步行车辆的理论与设计在我国尚属首次介绍，有些专用名词虽经编者再三斟酌，几易其名，但还不够满意，只有在今后的实践中逐步修改定名。

由于仓促草成，错误之处一定不少，希望读者提出修正意见。

全书由中国农业机械化研究院王瑞麟高级工程师审校，谨致谢意。

吉林工业大学研究生部、科研处及土壤-车辆力学研究室提供了出版资助费用；学报编辑室周玉德主任对本书出版给予很大的支持与帮助，特在此一并表示感谢。

陈秉聪 1990年2月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 为什么要发展步行车辆	1
1.2 本书的目的和内容	3
1.2.1 本书的目的	3
1.2.2 本书的内容	7
第二章 步行机构研究综述	10
2.1 引言	10
2.2 步行车辆的评述	11
2.3 步法研究的评述	16
2.4 小结	18
第三章 步法分析——水平行走的步法	21
3.1 引言	21
3.2 步法分析的数学知识及图解方法	26
3.2.1 步法分析的基本定义和定理	26
3.2.2 步法分析的图解法	31
3.3 步行机的步法选择	36
3.4 水平步行步法	40
3.4.1 波动步法	40
3.4.2 等相步法(EPH 步法)	58
3.4.3 向后落脚周期步法	68
3.4.4 不连续跟踪(FTL)步法	75
3.4.5 连续 FTL 步法	84
3.5 小结	97
第四章 非正常地面上的步法分析	99
4.1 引言	99

4.2 步行在斜坡上的步法	100
4.2.1 用调整步行高度和/或车体高度步行在斜坡上	101
4.2.2 用调整行程的开始及结束时间在坡路上行走	114
4.3 沟渠逾越	116
4.3.1 用周期步法逾越沟渠	116
4.3.2 大障碍步法(缩写 LOG)的介绍	118
4.3.3 用 LOG 逾越沟渠	121
4.3.4 大障碍逾越与步行量的关系	124
4.4 垂直台阶的逾越	124
4.4.1 垂直范围	124
4.4.2 腿和车体运动	129
4.4.3 下台阶	136
4.4.4 台阶逾越能力与步行量的关系	139
4.5 独立墙的逾越	142
4.5.1 一般方法	142
4.5.2 窄墙的逾越	143
4.5.3 墙逾越能力与步行量及车体结构的关系	145
4.6 ASV 的总步行量	145
4.7 小结	146
第五章 用四连杆合成进行腿的设计	148
5.1 引言	148
5.2 RECSYN 程序的介绍	153
5.2.1 程序的作用	153
5.2.2 程序的操作	155
5.3 4-杆腿的设计	156
5.3.1 设计规格	156
5.3.2 基本的几何设计	161
5.3.3 腿连杆的最优化	167
5.3.4 轴承载荷、主主动器的安装位置及作动转矩	184

5.3.5 干扰	187
5.3.6 外伸与内缩	187
5.4 7-杆腿的设计	189
5.4.1 设计位置的计算	190
5.4.2 小腿连杆设计	191
5.5 小结	196
第六章 缩放式腿的设计	199
6.1 引言	199
6.2 缩放式机构的运动特性	201
6.2.1 缩放式机构的术语	201
6.2.2 二维(2D)缩放式机构	202
6.2.3 三维(3D)缩放机构	208
6.3 缩放机构腿的设计	212
6.3.1 设计规格	212
6.3.2 设计步骤	213
6.3.3 支承载荷及干扰的研究及应力分析	217
6.4 平面缩放机构腿的步行包络线分析研究	220
6.4.1 运动极限方程的形成	221
6.4.2 步行包络线的最优化	227
6.5 7-杆及缩放机构腿的比较	230
6.6 小结	232
第七章 脚踝设计	233
7.1 引言	233
7.2 刚性脚及具有踝铰链的脚	234
7.3 主动踝系统	236
7.4 被动踝系统	237
7.4.1 平行连杆系统	237
7.4.2 液压主-伺服踝系统	239
7.5 小结	245

VIII

第八章 步行车辆转向方式及原理	246
8.1 引言	246
8.2 步行车辆的转向方式	247
8.2.1 差速转向方式	247
8.2.2 分部转向方式	247
8.2.3 全方位精确转向方式	247
8.3 步行机理想的转向方式应满足的条件	248
8.4 新的转向机构	249
8.4.1 全方位精确转向方式	253
8.4.2 全方位准精确转向方式	255
8.4.3 全方位广义转向方式	257
8.5 小结	260
参考文献	261

第一章 绪 论

1.1 为什么要发展步行车辆

人类陆地运输的历史，可由下列经历标记。最初，人用自己的腿来作运输，几乎在同一时间，人训练了动物，使它携带人或货物作为运输工具。这样，几个世纪以来，动物成为人类最重要的运输工具。后来发明了轮子，它被认为是人类运输史上最大的发明，从而大大提高了运输效率。车辆装上了轮子，用人或马牵引，这在许多世纪里成为最有效的陆地运输工具。为了提高轮式车辆的效率，建筑与铺设了道路系统。大约在两世纪前，热机的发明，引起了产业革命。此后，由发动机驱动的车辆代替了由动物及人牵引的车辆。公路及铁路系统也进一步得到了发展。到了20世纪的今天，轮子的应用似乎达到了顶点。人们原来用腿运输的方法已成为长途运输的极为次要的方法。

目前，几乎所有地面车辆的行走装置基本上有轮式（包括刚性轮及气胎轮）和履带式（履带车辆可当作携带和铺设自己道路的轮式车辆）两种。在水田及沼泽地区的作业中，车辆与拖拉机的行走装置尽管有些改变，如水田叶轮、镶塑齿水田轮、网格式水田轮、高花纹窄胎体水田轮、低压轮胎、星型行走机构、宽履带行走装置等，但仍是轮式和履带式两种基本型式。

经过几个世纪的经历证明，轮式车辆在公路上，特别是

在高速公路上是最有效的运输工具。它平稳、高速、机动灵活。在相对平坦的自然地面上，轮式和履带车辆（特别是履带车辆），也具有容许作为越野车辆使用的性能。因此，轮式车辆广泛地被人们采用并经久不衰，这是很自然的事情。自然界的土壤十分松软，地形又很复杂，但自然也给了人和动物一种灵活机动的腿作为运输工具。

然而，国内、外试验证明，从1924年以来，几十年中间，轮式或履带车辆在各种土壤上的牵引性能没有很大的改进。编者已在“土壤—车辆系统力为^[65]”一书中指出：“目前，增加车辆的（挂钩牵引力/重量）及通过性能的有效途径，现在虽然还有人在尝试，但实际上已被堵塞，这就是行走装置面临一个停滞局面的原因。因此，要在现有车辆概念中，对车辆性能作彻底的改进是不可能的。取决于目前概念的重量、尺寸、形状间的关系已达到了极限。如果不放弃传统的做法，改用新的车辆概念，行走装置或车辆的性能就不可能有很大的变化。”

当然，有些人对这个观点还有不同的看法，但大量试验证明，特别是编者通过多年来拖拉机行走装置下水田和沼泽地区的试验证明，在现有车辆的概念内，对车辆性能的某些调整与改进虽然是可能的，但不是很大的。

美国学者培克(M. G. Bekker)在参考文献[1]中指出，车辆在表面不平的、硬的地面上行驶，履带车辆的平均速度为8~16 km/h，对于轮式车辆为4.8~8 km/h，而动物的最高速度可达56 km/h。同样，在具有33 cm厚松软土层的地面，如我国的深泥脚水田土壤，对于履带式车辆推进所需的功率是7.45 kW/t(10 hp/t)，对于轮式车辆是11.2 kW/t(15 hp/t)，但对于腿式行走机构，则只需5.22 kW/t(7 hp

/t)。

培克在参考文献[2]中,应用土壤力学的理论,解释动物腿的运动比轮式或履带车辆有更高的机动性,即轮子或履带沉陷入松软土壤中产生轮辙,在行走中需要连续地向上爬,而腿只形成离散的脚步,当脚向后滑移时,挤压土壤,可增加牵引力。

在不规则地面上行驶时,腿的平稳性也有利于体重的运输。根据我们的经验和观察,在同一不平度的地面上,用同样速度运动,骑在马背上比坐在振动的轮式或履带式车辆上要舒适得多。

因此,从上述论点可以得出结论,即步行车辆比起轮式或履带式车辆,至少有以下四个优点:

- 1) 较高的速度;
- 2) 较好的燃料经济性;
- 3) 较大的机动性和越障能力;
- 4) 较好的舒适性。

除了上述这些优点外,还有一个理由,就是在地球上大约有50%的陆地不适于用常规的轮式或履带车辆^[3]。步行机构能通过轮式或履带车辆通过时效率低的、困难的地面。可能只有步行车辆才能运载宇航员通过火星表面的沙丘、陡坡和坑洼。因而,在商业上、科学上、农业上、军事上……,步行车辆是非常有用的。特别是在军事上已被认为是21世纪的先进手段。

1.2 本书的目的和内容

1.2.1 本书的目的

在人们了解步行车辆的上述优点之前,有些科技工作者

就在梦求一些步行车辆，最突出的两个例子是：1893年，Rygg 由于设计一个机械马而得到了专利(参阅图1-1)，但无法证明他是否真正制造了这样一部机器。1931年，Bechtolsheim 由于设计四腿机器得到专利(参阅图1-2)，同样无制造此机器的报告。

机械马，专利于1893年2月14日

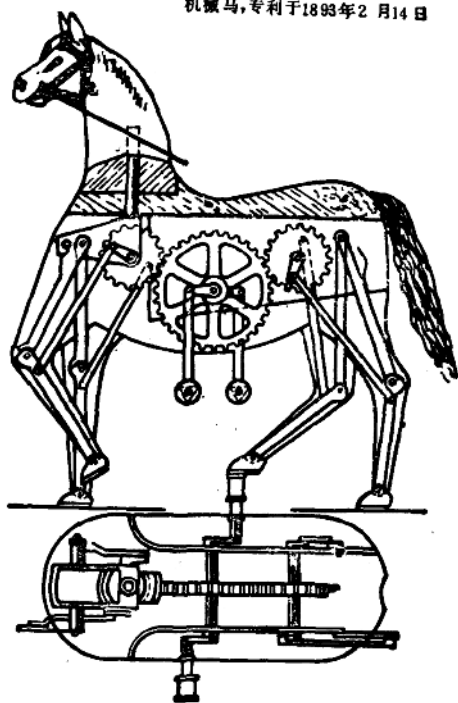


图 1-1 1893年机械马的专利图

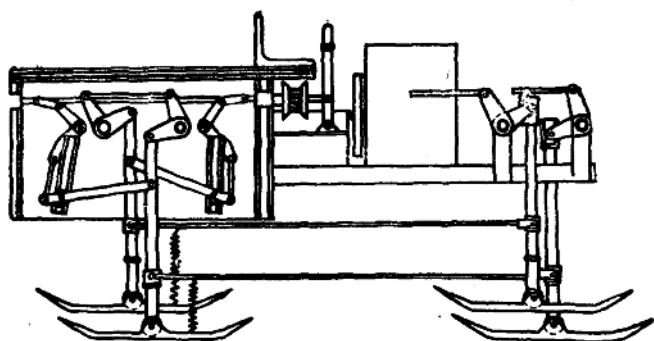


图 1-2 1913年步行车辆的专利图

1950年中期,一些研究小组开始系统地研究与发展步行机。大约10年以后,步行机开始由不同小组在实验室内设计制造。据作者所知,直到现在约有十几个这样的机器制造成功^{[4]~[21]}。虽然有些机器能在实验室内行走,并在一定场合表现出某些机动性能,但所有这些步行机应该说仍处于萌芽状态,实际上尚不能表现上述一些优点。

这种进程缓慢的原因,主要是由于腿协调控制的复杂性,对步法(Walking Gaits)的了解有限,以及缺乏实用步行机械腿的发展所致。然而,基于以前科研的努力和机器人(Robotics)、计算机等现代技术的发展,可望在不久的将来,具有腿的步行机械将有较大的改进。

现在,美国俄亥俄州立大学制订了一个研究规划,并借助于其它一些科研小组^①研制发展了设备齐全的、自动选择

① 威斯康星(Wisconsin)大学负责研究飞轮功率供应系统。(Flywheel Power Supply System),以及密西根(Michigan)环境研究所(ERIM)负责研究电视地面扫描系统(Video Terrain-Scanning System),这是两个较主要的支持小组。

地面的六腿步行机(Six-legged Walking Machine)。这个步行机称为自适性悬架车辆 ASV(Adaptive Suspension Vehicle)，一人操作，可携带 226.8 kg 净载 (Payload)，并希望能证明其燃料经济性及机动性在不平地面优于常规的轮式及履带车辆。图 1-3 示出 ASV 最新型式的艺术家的构思。

为了更完整地了解 ASV，设计的详细说明[⊖]如表 1-1 所示。

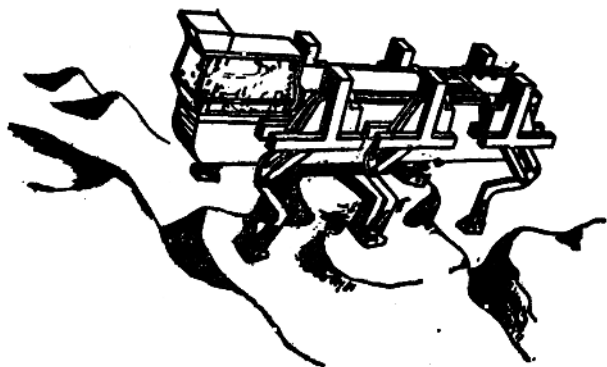


图 1-3 ASV 的艺术家的构思

可以看到，一个可以选择落脚点以增加牵引力、减小侧倾和跨越障碍的 ASV，是科学家和工程师们长期追求的目标。为达此目标，在计算和控制领域的研究、步法的研究、腿的几何形状以及功率传递及驱动方面的研究，已成为设计

⊖ ASV 设计的详细说明已在新的计划中修正。

表 1-1 ASV设计的详细说明

尺 寸	长 4.87 m 高 3 m 轨距 2 m
重 量	净重 (Dry Weight) 272.16 kg 净载 (Payload) 2224.91 N
速 度	巡航速度 (Cruise Speed) 8 km/h 冲刺速度 (Sprint Speed) 13 km/h
持续时间	10 h
爬坡能力	大于 60% 坡度 70% 横跨坡度
机 动 性	越沟 1.83 m 越过垂直台阶 1.67 m 越过独立墙 1.37 m 涉水 (Fording) 深度 1.22 m
燃料经济性	在不平路面上优于常规车辆

ASV 的理论基础。其它方面的研究，如地面扫描系统的发展、人-机工程、传感技术 (Sensing Techniques) 等，也有利于这个设计。

本书的主要目的，是研究步行机腿的运动学及其全部几何学。在以后诸章中将讲解能量效率及机动性与腿几何学的密切关系。为了有助于腿的几何设计，将对步法及机动性进行充分分析。因此本书的主要目的是研究步行机构的基本原理，研究步行机构中腿的运动学、几何形状及设计方法。

1.2.2 本书的内容

本书的内容主要可分为两部分。

1. 步法分析

它研究在水平步行时，使用的步法及其越障能力，以及车辆的机动性与腿的步行量(Walking Volume)的关系。

2. 腿几何形状的设计

设计最佳腿几何形状，它将提供根据步法分析需要的步行量、较好的能量效率，结构的简单性和机械可靠性。

各章内容如下：

第二章 对前人的工作进行了简单的回顾，并着重记述了步行机构的机械结构及步行的步法。

第三章 提出了对步法分析的数学方法及图解法。讨论了在不同类型地面上，步行机构的步法选择问题。对在水平地面上步行时所选用的主要步法进行了详细的研究。这些主要步法是：波动步法(Wave Gaits)，等相位步法(Equal Phase Gaits)，向后周期步法(Backward Periodic Gaits)，不连续跟踪步法(Discontinuous Follow-the-leader Gaits)及连续跟踪步法(Continuous Follow-the-leader Gaits)。对步法平稳与腿步行量之间的关系也进行了讨论。

第四章 对于在坡度上步行的步法及改进稳定性的方法进行了研究。同时，也讨论了可用以横越三个主要障碍的步法。三种主要障碍的型式是：沟壕，垂直台阶，独立墙壁。并研究了每种情况下车辆机动性与腿步行量之间的关系。

第五章 对四连杆机构的腿几何形状的设计进行了讨论。介绍了连杆优化的主要技术。其他设计方面包括：承载载荷，作动力，作动器的安装位置，干涉问题，以及考虑了应力分析。这个设计结果是一个四连杆和七连杆腿。

第六章 根据缩放机构原理(Principle of Pantograph Mechanism)，对不同腿几何形状的设计进行了研究。首先

给出了缩放仪运动特性的理论基础；然后主要用计算机-辅助绘图法进行设计。开展了对缩放腿步行量的分析研究。

第七章²对腿设计中其它一些有关项目进行了讨论，并介绍了脚-踝系统 (Foot-ankel System)，概念的被动脚-踝系统 (Conceptual Passive Foot-ankel System)；其次用数值方法去寻找对于四-有限的-分离的-位置-综合问题的最短曲柄 (four-finitely-seperated-position-synthesis)。最短曲柄常常在曲柄摇杆 (Crank Rocker) 中形成，它是在许多应用中最有希望的连杆。

第八章 讨论了步行车辆的转向问题，利用三维缩放机构原理，提出一种新的全方位转向机构。该机构可实现三种转向方式，可不依赖计算机的帮助，实现较理想的转向，并具有转向速度快、运动可靠、操纵简便等优点。

第二章 步行机构研究综述

2.1 引言

本章对有关步行机构过去的研究工作进行回顾,给出两个方面的主要成果:一个是硬件方面的制造,它着重在腿的结构;另外一方面是步法的研究。这些综述是根据报告和论文的年代顺序给出的,这样可以使我们了解步行机构发展的趋势。

在综述以前,应该指出在过去的工作中,虽然完成的工作是显著的,但实际步行机构的设计是不成功的。根据作者的观察,主要由于在三个方面缺乏知识,即控制、步法和作动以及腿设计。若这三方面中任何一个的发展不能完全满足实际步行机的需要,则成功将会受到限制。

过去,步行车辆的控制最为困难,并受到了极大的重视,几乎所有的步行机构均有控制的研究,然而控制的许多方面需要进行更多的研究。特别是静不定运动的控制。

步法最初是由动物学家研究的,他们企图了解动物的运动。20年前,工程师没有系统研究过这个问题。在ASV计划开始前开展了步法的研究,包括对动物运动的研究、周期性步法的研究。在非正常地面上六足行走的某些计算机模拟、在平滑地面上行走的少数步法的研究。至于所有地面实际步行机器的需要,还应进行更多的研究以增强车辆在恶劣地面的机动性和越障性能。