

高等学校教学用书



机械原理

Л. Б. 列文松著

高等教育出版社

高等学校教学用书



机 械 原 理

机构运动学及动力学

Л. Б. 列文松著
朱铁保等译
孙可宗校

高等教育出版社

本書系根据苏联国立机器制造書籍出版社 (Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы) 出版、技术科学博士列文松 (Л. Б. Левенсон) 教授著“机械原理——机构运动学及动力学” (Теория механизмов и машин—кинематика и динамика механизмов) 一書 1954 年修訂第二版譯出。原書經苏联高等教育部审定为高等学校非机器制造專業教学参考書。

本書叙述了机构和机器的运动学和动力学的原理,介绍了理論的实际应用,并且举出了大量的数值例题,一部分并附有題解。

本書供非机器制造类高等工業学校学生作教学参考書用,亦可供函授高等工業学校学生及自修者参考。

参加本書翻譯的有朱鉄保、樊大鈞等,并由孙可宗校訂。

DT45/02

机 械 原 理

机构运动学及动力学

Л. Б. 列文松著

朱鉄保等譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号

(北京市书刊出版业营业許可證出字第 054 号)

上海大东集成联合印刷厂印刷 新华书店发行

统一书号 15010·697 开本 850×1168 1/32 印张 17 12/16

字数 426,000 印数 1—3,500 定价(10) 羊 2.60

1958 年 9 月第 1 版 1958 年 9 月上海第 1 次印刷

序

在为技术科学今后的进步而进行的斗争中，苏联科学起着巨大的作用，它已经胜利地解决了并且正在解决许多具有重大国民经济意义的问题。

苏联共产党第十九次代表大会关于发展苏联的第五个五年计划(1951—1955)的指令中，规定了要提高工业生产的水平约70%，这不仅是苏联机器制造业(见 §2, 3 等)及科学进步的最伟大的历史阶段，而且也是世界科学和技术进步的最伟大的历史阶段。

在本书修订过程中，鉴于技术上及工业上的一些新问题，扩充了摩擦和机构动力学等部分的篇幅[如效率、茹科夫斯基(Н. Е. Жуковский)的分离原理、及辅助杆方法等等]。书中例题的数目大大地增加了；这些例题具有实用的性质并系取自各种不同的技术部门。

本书主要的目的在于帮助非机器制造(主要是重工业)高等学校培养优秀的技术干部。

目 录

序	vii
---------	-----

第一篇 总 論

第一章 緒論	1
§ 1. 机器与机构	1
§ 2. 机器在技术上的作用	7
§ 3. 机构原理的發展簡述	10
§ 4. 本課程的學習方法	12
§ 5. 理論力學的基本公式	15

第二篇 机构运动学

第二章 关于机构的基本知識	22
§ 6. 运动副, 連件及运动鏈	22
§ 7. 机构	34
§ 8. 机构的綜合	43
§ 9. 机构的分类	54

第三章 平面机构中各点的軌迹、速度及加速度的繪制	58
§ 10. 軌迹的繪制	58
§ 11. 运动曲綫圖	65
§ 12. 求速度的簡化圖解法	69
§ 13. 速度平面圖(相似法)	75
§ 14. 矢量方程法	82
§ 15. 加速度平面圖	85
§ 16. 例題	93

第四章 鉸銷杠杆机构	105
§ 17. 概論	105
§ 18. 曲柄連杆机构	108
§ 19. 曲柄連杆机构的分析法研究	110
§ 20. 曲柄連杆机构的圖解法研究	118
§ 21. 曲柄滑槽机构	121

§ 22. 空間鉸鏈機構	124
§ 23. 例題	130
第五章 凸輪機構	131
§ 24. 概論	131
§ 25. 凸輪機構的理論	136
§ 26. 凸輪機構根據從動杆位移規律的綜合	141
§ 27. 凸輪機構根據從動杆的速度或加速度規律的綜合	154
§ 28. 凸輪機構根據壓力角的綜合	167
§ 29. 凸輪機構的設計	174
§ 30. 例題	184
第六章 旋轉運動機構(摩擦傳動和齒輪傳動)	188
§ 31. 概論	188
§ 32. 摩擦輪	195
§ 33. 齒輪	198
§ 34. 嚙合基本定律	205
§ 35. 齒廓及其切制	211
§ 36. 嚙合運動學	227
§ 37. 齒廓的修變	238
§ 38. 斜齒齒輪	243
§ 39. 圓錐齒輪	249
§ 40. 螺旋齒輪	254
§ 41. 蝸杆傳動	260
§ 42. 齒輪系	267
§ 43. 變速箱(變速傳動裝置)	271
§ 44. 周轉(行星)機構	275
§ 45. 周轉機構用分析法的研究	283
§ 46. 周轉機構用圖解法的研究	290
§ 47. 減速器	297
§ 48. 周期性轉動的機構	305
§ 49. 無級變速器	309
§ 50. 例題	313

第三篇 機構動力學

第七章 機器的運動與作功	325
§ 51. 機器中力的作用	325
§ 52. 機器的運動方程	328

§ 53. 机器的效率	332
§ 54. 例题	341
第八章 机器中的摩擦	343
§ 55. 机器制造业中的摩擦和磨损	343
§ 56. 机器中的干摩擦	349
§ 57. 平动副的摩擦	358
§ 58. 自锁(自行制动)	358
§ 59. 螺旋和螺母的摩擦	364
§ 60. 摩擦传动的摩擦	367
§ 61. 齿轮传动的摩擦	370
§ 62. 荷重在滚子和轮子上的运输	376
§ 63. 流体摩擦和润滑	382
§ 64. 轴颈和止推轴颈的摩擦	390
§ 65. 挠性物体的摩擦	397
§ 66. 例题	404
第九章 机构静力学	418
§ 67. 概论	418
§ 68. 力的解析求法	422
§ 69. 力的图解求法	430
§ 70. 曲柄连杆机构的静力学	444
§ 71. 机构中摩擦力的计算	447
§ 72. 例题	450
第十章 机构动力学	459
§ 73. 概论	459
§ 74. 质量和力的变换	467
§ 75. 曲柄连杆机构的动力学	472
§ 76. 机构连件中的动力应力	478
§ 77. 例题	482
第十一章 质量的平衡	490
§ 78. 概论	490
§ 79. 转动质量的平衡	502
§ 80. 平动质量的平衡	509
§ 81. 机器及其基础的稳定性	514
§ 82. 例题	518
第十二章 机器的调节	527

§ 83. 机器调节的目的和方法	527
§ 84. 切向力曲线	533
§ 85. 飞轮基本尺寸的确定	536
§ 86. 飞轮的解析算法	541
§ 87. 例题	544

参考書刊

中俄名詞对照表

第一篇 总 論

第一章 緒 論

§1. 机器与机构

机械原理(机构运动学与机构动力学、机械力学、应用力学)的主要目的是研究机构的各种运动特性和动力特性(任何机构在各种技术实践条件下应用得合理与否,主要取决于这些特性),机构的结构和分类,以及影响机构在机器中工作的各主要构造特性。

此种研究可按两条途径进行:

(1)按机构分析的途径,也就是研究已知机构的特性、优点及缺点;

(2)按机构综合的途径,也就是创造可以满足预定要求的新机构。

第一条途径——机构的分析——对于工艺专家(采矿及冶金学家等等)较为重要,而第二条途径——机构的综合——对于机器制造家较为重要。但是不仅对于机器的设计来说,而且对于机器的合理使用、对于及时排除机器正常运转中所发生的一切故障与损坏、对于修理后的调整等等来说,不單应该清楚地了解机器中发生的工艺过程,而且还应该清楚地了解组成机器的各个机构的工作原理及其主要的构造特性。

由此可知,机构原理课程虽然篇幅多少可以不同,但無論对于工艺师或机械师来说均屬必要:若不通曉現代苏联冶金工厂的車

間中或現代的苏联矿山中的机械設備和器械的基本工作原理，要想管理这些工厂的車間和矿山，那是不可能的。

機構原理研究現代机器制造業中所应用的各种機構的运动学方面与动力学方面的各个具体性質。所以按學習次序來說，本課程是在机器学（машиноведение）总名称下所包含的許多科学中的第一个科目，而且与机器制造業有密切的关系。因此不可能將本課程視作理論力学的延續或加深：機構原理是力学定律对机器制造業的应用；本課程的所有內容及叙述方法亦應該由此決定。

機構原理課程可分为两个主要部分：

1. 機構运动学——从事于确定機構中各点的軌迹、速度和加速度（機構分析），这是本課程的主要部分，此外并研究機構的綜合及結構的問題。

2. 機構动力学——此部分包括有关机器运轉的一般概念、阻力（其中主要是摩擦）的研究、機構各部分中的靜力及动力的确定、質量的平衡問題、以及机器运轉的調节。确定內力常常需要知道速度与加速度，因此运动学的研究應該放在动力学的研究之前。此外書中尚有总論——緒論——一篇列在此兩專門部分之前。

因此，學習機構原理使我們能够選擇或作出滿足已知工作条件的那种機構的簡圖，決定其各主要尺寸（連件的長度，見§7及8），以及決定其运动的規律和作用在機構各部分上的力。

机器零件的强度、耐久性等等的进一步計算，屬於材料力学、机器零件和其他課程的範圍。

在机器制造業的現代的發展和不断飞速进步的情况下，对于現有的种类繁多的机器作一簡單描述已經無用，而欲——研究它們則是不可能的。因此，对作为每一种机器运轉基础的一般原理作有系統的研究，亦即研究組成机器的各个機構，應該是機構原理的第一阶段。

显然,研究个别机构应该在研究复杂的组合机器(发动机,采矿及冶金机械等)之前。

关于“机器”和“机构”两概念的定义如下。由于机器的各种用途及科学技术的进步,有关机器的概念已经不断地有所改变,并且愈来愈明确了。

机器本身不能创造能量,而仅能利用能量或转变能量,因此机器的基本用途在于利用或转变机械能。今后所说的转变应理解为将运动的机械能转变为 he 种能量——电能、热能等,或者理解为将任何 he 种能量——电能、热能等转变为运动的机械能。

在科学的现今状态下,可以把机器下定义为具有一定运动的若干物体的人工组合,是用来完成有用机械功或转变机械能的。

因此,机器具有三个基本且必要的特征:

- (1) 起源于人类劳动结果的人工性;
- (2) 各部分运动的确定性;
- (3) 能够完成有用的机械功(工作机)或转变机械能(发动机)。

“有用的机械功”这一术语应广义地了解为完成任何我们所需要的工作或作用,例如,打字(打字机)、数字的加法(计算机)。

发动机这一名词应了解为只能在其中将某种能量转变为运动的机械能的这种机器(热机、电动机)。至于将运动的机械能转变为 he 种能量的机器,则属于工作机(如冷冻机),或者亦可属于介于发动机与工作机之间类型的机器(变能机或发电机)。

根据上述,机器系由若干物体所组成,所以单一的物体不能称为机器(或简单的机器)。

应该着重指出,机器的特征是其各部分有相对运动,整个机器本身(其机架)可以是不动的——固定的(柴油机、汽轮机、车床)或能动的(机车、飞机、桥式起重机)。能动的机器上那个能使自身直接获得运动的部分(轮船的螺旋桨、拖拉机的链轨),称为推进器。

若仅具有前两个特征——起源的人工性及运动的确定性，則摆在我們面前的將不是机器，而是機構。

因此，具有运动确定性的若干物体的人工組合，称为機構；機構(如鐘表)与人手所使用的工具(如錘，斧)的差別就在于运动确定性的有無。機構的主要用途——实现給定的运动、傳遞或轉变运动。至于傳遞运动时速度的变化，根据能量守恒定律，則將引起被傳遞力相应的变化[§ 68 中公式(409)]。

如果轉变并不涉及运动的机械能，而是与某些他种能量(化学能，热能等)有关，則該裝置称为器械(如蒸汽鍋爐)。最后，如果力不用于产生运动，而仅作为載荷来承受，則得到建筑物(如桥梁、房屋)，其特征正与机器的相反，而是各部分間無相对运动。但是整个建筑物可以是能动的(如車厢、輪船船身、升降机的吊籠)。

机器的特征在于它是在一定具有完成有用机械功这个目的的条件下，由若干機構組成的。把若干機構簡單地連接成复杂的機構(如鐘表)而沒有这个主要的特征，当然不是机器。至于機構則由各活动部分(連件)及構成机架(固定件)的一个或若干个不动的部分所組成。但是有时欲区分机器、機構、能动的建筑物等是很困难的。例如，自行車同鐵道搖車一样都是机器，而大車或普通的鐵路車厢就是能动的建筑物；至于用什么力使自行車或鐵道搖車运动起来——用人力或动物的体力抑或是机械力(摩托車)——却沒有关系。

因此，機構的主要功用在于傳遞或轉变运动，可是机器的主要功用則在于为了生产目的而利用或轉变机械能。

由于机器有运动的确定性，故可使机器工作部分的速度比人手所使用的簡單工具的速度大为增加，也就是使生产率增加，使产品的成本降低，并且大多数情况还可以使产品的质量得到改善。增加發动机的速度可使机器的尺寸及重量等减小(見 § 2)。

机器的主要連件——其主軸——很少作严格的匀速旋轉运

动。而常作所謂稳定的周期性运动，此时無論机器上所有各点的位置或其速度，均按固定而相等的时间間隔重复不已，該时间間隔称为机器的运动周期(循环)。机器的运动周期(以秒計)常常与机器中主要的連件——机器的主軸——一整轉的时间相同。至于速度的变化范围在数值上應該是預先知道的，并且不應該超过机器运轉条件所許可的限度(見 § 83)。

在能力循环期間內，机器运动的所有动力相(фаза динамики)重复不已；例如，在軋机中能力循环——被軋制的金屬条材經過一定軋槽的通过时间——可以長至相当于軋輥轉数几十次的时间，亦即在这种情况下机器的能力循环远較其运动周期为長。

因此，機構的特征是运动的确定性，而在許多情況下还有其周期性(循环性)(如所有的發动机、机床等)。但是機構常常不具有周期性这种特性(制圖機構、夾头及其他类似的夾具)。因此許多著者將夾头屬於機構；但是它亦可以屬於夾具。关于機構的分类，以后再予詳述(§9)。現在来討論机器的分类原理。

發动机是用来將某种能量轉变成机械能的；它們可分为兩类：

(1) 原發动机，利用自然界中現成型式的、所謂“自然力”的那种能量，——这类發动机如热机、風力發动机、部分的水力發动机(热力發动机將燃料的化学能轉变为运动的机械能)；

(2) 次發动机，本身需要能源，——这类發动机如电动机、气动(压缩空气)發动机、部分的水力發动机等。

上述發动机可称为机械發动机；利用动物肌肉的能量作为运动能源的工作机，較为少见。

有时还要区分出变能机(轉換机、發電机)，这类机器將运动的机械能轉变为他种能量，例如，轉变为电能(發電机)、气能(空气压缩机)等。这种机器常常用于原發动机与次發动机之間，例如，用于汽轮机或水轮机与电动机之間。

利用机械运动的能量来完成有用机械功的工作机械(工具机、机床),也可以分为两类:

(1) 变形机械, 用于改变被加工物体的形状、大小或形态, 以及使被加工物体彼此連合或分离(金屬加工机床、紡織机、織布机、印刷机、碎矿机、篩机等);

(2) 运输机械, 其主要用途仅在于使物体發生位移——对于固体的有吊車、起重機; 对于散粒狀物体的有輸送帶、輸送机、升降機; 对于液体的有泵; 对于气体的有通風机、鼓風机。

近来广泛地应用自动机床, 这类机床由技工調整好了以后, 不用人就能够完成整个工艺过程各工序的生产循环(夾住材料、用各种不同的工具將其加工、退出成品等)。

现在时常采用复合的机器(組合机器), 这些机器是多个不同类型机器的組合, 例如發动机和工作机的組合(如機車、电动卷揚机、渦輪發电机)。

現今机器制造厂广泛地应用自动工作机的組合机器, 形成机床的自动流水綫, 使車間甚或工厂全部自动化[94], ①[95], 例如, 汽車發动机活塞的自动化制造厂。

有时还要区分出由發动机將运动傳至工作机用的傳动机构或傳动裝置。

馬克思曾对于他同时代的机器裝置作了以下精湛的闡述: “一切發展了的机器[entwickelte Maschinerie]都由三个在本質上不同的部分——發动机, 傳动机构, 与工具机或工作机构成”。其后馬克思写道: “主动力的来源無論是人, 还是另一个机器——这絲毫不会影响問題的实質”②。

① 帶有方括弧的数字代表書末參考書刊的序号——編者注。

② 馬克思: 資本論, 第一卷, 郭大力譯, 人民出版社 1953 年版, 第 448—449 頁及 450 頁(此处譯文略有修改——譯者注)。

§2. 机器在技术上的作用

由前述可知, 机器运动的确定性由于能使其速度加快而带来了許多非常重大的利益, 以致促使机械發动机几乎有無限制的能力, 并能使工作的工艺过程自动化。对于这些重要問題, 我們將作較詳細的討論。

人在經常工作时, 仅能發出約 $\frac{1}{7} - \frac{1}{10}$ 馬力, 而人与工作所用的工具(手柄, 軸等)的重量至少約为 100 公斤。因此, 欲获得总共 1 馬力長時間的功率, 需要总重不小于 700 公斤的 7—10 人进行工作; 在利用动物的筋肉能量时, 也將得到大略相同的数据。

获得 1 馬力功率所需的机械發动机的重量, 約为几十公斤到 0.4 公斤。

經驗証明, 駕馭的馬匹数多于 70 匹是無用的: 它們的总效应由于工作不協調而不再增加。至于机械發动机的功率达到 50000—100000 千瓦, 是很平常的, 在个别的情况还可能更大。

唯有应用大能力的水泵和大型起重机, 才可能深入地下矿藏采掘煤、矿石及其他矿产, 这些矿藏在以往一直是不可能达到的区域。

所有这些已經使机械能的价值大大地降低了, 而机械能乃是技术进步的決定性因素之一; 机械能要比人与动物的筋肉能量价廉数百倍。

从大能力的机械發动机获得廉价能量的工作机, 使人免除了沉重的体力劳动。

下面引一些数字来証明这一点。牌号为 9III-14/65 的苏联巨型走动式挖土机, 重約 1300 吨, 具有功率为 0.5—1370 千瓦的电机 40 多个, 它們的总功率約为 7000 千瓦; 在 50—70 秒時間內它能挖出 14 立方公尺的土, 重約 25 吨, 深达 40 公尺, 并將其运至距离

150 公尺以外，高約 28 公尺的地方，从而代替了八千到一万个土工的劳动 [103]。一个吸土机（掏深机）可代替三万个挖土工人的劳动。唯一無二的苏联渦輪机其功率为 150000 千瓦，可代替 150 万工人，而当日夜工作时（按 8 小时的三班）可代替 450 万工人。

現時整个技术的发展与工業水平，均視工作过程的机械化程度（尤其是繁重的工作更是如此）及企业的动力装备即企业所装置的机械发动机的功率（以馬力或千瓦計）而定。

近代机器制造业发展的主要方向之一为提高运转速度（高速性）。

高速机器是指这样的机器，它的主要連件（主軸）具有大的角速度，大約高于 500—1500 轉/分，具体数值視机器的型式与尺寸而定。对于活塞式的机器（圖 242, 280 及 285），时常把活塞或滑塊的平均速度当作是判別高速的标准[見 § 19 公式(89)]。

当工作机有大的速度时，不仅可以增加其生产率，而且亦提高产品的質量。例如，冲压机的速度不大时就不能很好地冲出有肋条的零件。磨床軸（主軸）的轉数达到每分鐘 120000 轉，而高速离心机每分鐘达 150000 轉。

茲举出一些数字，以明显地說明机器的功率及高速性对其經濟指标的影响。功率为 50000 千瓦，轉速为 1500 轉/分的汽輪發电机，其重量与 100000 千瓦，即功率大一倍的汽輪發电机而轉速为 3000 轉/分的重量相同。2000 馬力，轉速 1500 轉/分汽輪机的安裝面积，仅为同样功率、而主軸轉速約为 100 轉/分的活塞式蒸汽机所需安裝面积的 1/40。此外，机器的功率愈大，一般說来机器在作功方面愈为有利（見 § 53 中表 11）。

近代机器制造业发展的另一方向——自动化——就是要在管理人員最少及工作的可靠性和安全性最大的条件下保証得到产品一致的和優良的質量。

在近代的機器製造業中還提出了其他的任務——盡量節約金屬和緊湊性，也就是減小機器的重量及外形尺寸；這兩者在相當大的程度上由機器的速度決定，這從上述數據已可以看出。此外，對於提高機器的耐用性，增加個別零件——齒輪、軸承等——的耐磨性，以及用非稀有的材料代替稀有的材料也是很重要的。

我國最廣泛地採用機械化和自動化，在先進的社會主義的工業國家里，對工人予以莫大的關懷，尤其在採煤及冶金工業，以及在大規模電站的建設中，工作過程有98—100%是機械化了的。

總之，無論對整個機器來說，或對單位產量或單位功率來說，在重量最小及尺寸最小的條件下，高速性、大功率及自動化乃是近代機器製造業的基本方向。因此，在近代機器製造業中必須應用完善的和複雜的機構，必須採用優質的材料并由優秀的工程師及工人幹部進行最妥慎的製造。

因此，機器能免除工人的沉重體力工作，而代之以看管機器的熟練勞動，因而就要求將工人的文化技術水平提高到工程技術人員的水平。

蘇聯近代機器製造業的進步表現在機械化（尤其在沉重的及繁重的工作方面）、自動化（個別的生產過程）及過渡到綜合的機械化，表現在廣泛地運用高速及連續的建造方法，表現在機器的高速性及金屬和能量的節約，表現在發明事業的普遍發展。僅於1952年一年之內，在工業、建築業及運輸業中已採用的工人和技術員的發明、改進和合理化建議（包括加快工作機的速度在內）約有800000件。

蘇聯的機器製造業，尤其是動力、冶金、採礦及煉油等設備的不斷增長是蘇聯所有國民經濟各部門高速發展和技術進步的基礎。