

机械原理讲义

Вя. А. 季諾維也夫講

高等教育出版社



机 械 原 理 讲 义

Вя. А. 季諾維也夫講

李华敏等譯

高 等 教 育 出 版 社

本讲义系根据苏联专家季诺维也夫 (Вя. А. Зно́вьев) 教授 1958 年在北京清华大学讲学时的讲稿译出, 它基本上符合于他本人所编的“机械原理”教科书(该书将于 1959 年在苏联出版)。

本讲义分为三大部分: 第一部分讲述机械的结构和运动学, 其中低副平面机构的运动分析一章的内容新颖, 适合于近代精密机械分析设计之用; 第二部分讲述机构的动力学, 其中第八章和第十章讨论机组的运动和调节问题, 比一般的机械原理教科书作了进一步的探讨; 第三部分讲述机构的设计, 其中用低副机构来实现已知函数和已知轨迹一章, 比较详细地讨论了复杂的低副机构设计问题。

本讲义可供高等工业学校机械类专业作为机械原理课程的参考书, 也可供其他专业的学生和一般机械工程人员参考之用。

本讲义系由李华敏、张世民、江裕金、祝毓琰、陆巩、张济川等翻译, 黄锡愷初校, 张世民复校。由于整理和翻译的时间较短, 仓促之中容有不妥或错误之处, 尚请读者指正, 以便再版时得以更正。

3080/21

机械原理讲义

Вя. А. 季诺维也夫讲

李华敏等译

高等教育出版社出版 北京宣武门内大街 27 号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 354 号)

京华印书局印刷 新华书店发行

统一书号 150105·746 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 13 $\frac{1}{16}$

字数 340,000 印数 0001—5,000 定价 7 角 1.80

1959 年 4 月第 1 版 1959 年 4 月北京第 1 次印刷

目 录

緒論	1
----	---

第一部分 机构的結構和运动学

第一章 运动鏈的結構	4
------------	---

§ 1. 构件及其約束	4
§ 2. 运动鏈	9
§ 3. 平面連杆机构的結構	15

第二章 平面摩擦机构及平面齿輪机构的运动学	25
-----------------------	----

§ 4. 平面三构件高副机构	25
§ 5. 单級摩擦机构和单級齿輪机构	32
§ 6. 普通多級摩擦机构和齿輪机构	33
§ 7. 行星机构和差动机构	36

第三章 低副平面机构的运动分析	41
-----------------	----

§ 8. 构件位置的确定	41
§ 9. 确定构件位置的例題	47
§ 10. 速度和加速度問題的求解	55
§ 11. 求解机构速度和加速度的例題	59

第四章 平面凸輪机构运动学的研究	71
------------------	----

§ 12. 三构件凸輪机构的类型	71
§ 13. 凸輪机构运动学的研究	75

第五章 某几种空間机构的运动分析	83
------------------	----

§ 14. 解析几何的基本知識	83
§ 15. 曲柄連杆机构	85
§ 16. 曲柄連杆机构的連杆运动規律的确定	89
§ 17. 曲柄搖杆机构	92

第六章 齿輪嚙合原理	100
------------	-----

§ 18. 齿輪傳动的基本参数	100
§ 19. 滿足齿輪嚙合基本定律的齿廓形状	103
§ 20. 渐开线齿廓的繪制	105

§21. 切齿的基本原理	109
§22. 两渐开线齿轮的啮合	116
§23. 斜齿齿轮的啮合	129
§24. 圆锥齿轮传动	134
§25. 交错轴之间的迴轉传动	141

第二部分 机构动力学

第七章 作用在机构上的力	149
§26. 驱动力和有用阻力	149
§27. 摩擦	152
§28. 惯性力	157
第八章 机器组合的运动研究	166
§29. 力和质量的转化	166
§30. 转化力和转化质量为位移函数时转化构件运动问题的解法	175
§31. 力为速度和时间函数时转化构件运动问题的解法	183
§32. 作用力为速度和位移函数时转化构件运动问题的解法	192
§33. 几种具有两个自由度的系统的动力学	195
第九章 机构力的分析	208
§34. 前言	208
§35. 运动副	209
§36. 机构的机械效率	219
§37. 摩擦机构	222
§38. 齿轮啮合时的摩擦损失	233
§39. 具有平行轴的齿轮机构	239
§40. 具有不平行轴的齿轮机构	252
§41. 低副机构	257
§42. 凸轮机构	267
第十章 机组运动速度的调节	271
§43. 前言	271
§44. 确定飞轮转动惯量的方法	277
§45. 自动调节的基本知识	291
第十一章 机构及其构件的平衡	307
§46. 迴轉构件的平衡	307
§47. 机构在基座上的平衡	316

第三部分 机构设计

第十二章 保証傳遞定傳动比轉动的机构	323
§48. 設計的基本問題.....	323
§49. 摩擦机构和齿輪机构.....	323
§50. 行星齿輪机构.....	337
第十三章 能分級調整傳动比的机构	349
§51. 帶傳动.....	349
§52. 變速箱.....	351
第十四章 具有變傳动比的机构	359
§53. 凸輪机构.....	359
§54. 棘輪机构和馬尔他机构.....	386
§55. 按从动构件的給定行程來設計低副机构.....	389
§56. 按給定的行程速度变化系数設計低副机构.....	396
第十五章 用低副机构來實現已知函数和已知軌迹	400
§57. 根据主动构件和从动构件的已知位置設計机构.....	400
§58. 保証實現函数与已知函数在已知位置相切的机构.....	414
§59. 實現已知軌迹的机构設計.....	418

緒 論

机构是一种用来复演所需运动的机械系統。对于各种不同目的來說,都須要复演运动,例如:在生产过程中以及在物体的运输或把某种能量轉变为机械功的过程中完成有效功,完成操縱作用(各种型式的調节装置),运动系統的自动控制,各种指示器和仪器等等。

在生产过程中以及在物体运输或能量轉变的过程中用来实现有效功的机构称为机器。

用来将某一种能量轉变为机械功的机器称为发动机,而完成前述有效功的机器則称为工作机。仅仅用来产生所需运动的装置称为执行机构。

发动机、工作机及执行机构是多种多样的。目前应用得最广泛的有电动机、蒸汽机、燃气机、水力发动机及风力发动机等。在工业及农业上所应用的工作机也是多种多样的:金属切削机床、木工机床、紡織机、制鞋机、印刷机、食品加工机械、农业机械等。常見的各种类型的执行机构有:测量仪器及檢查仪器,将工作器从一个位置挪动到其他位置的装置(如电車的轉轆器),計算和解算装置,钟表等。

与工作机或执行机构相連接的发动机称为机組。不要人直接操縱即能完成全部动作的工作机称为自动机。

在很多情况下,形状复杂的零件常常是通过几个不用人直接操作的循序加工的联合机器来加工的,这些机器的总合称为自动綫。几个自动綫連合在一起組成自动車間或自动工厂。

近代的自动工厂里充满着种类繁多的装置,这些装置有机械的、电力的、气动的、液动的等等。机械原理課程仅研究由互相連接在一起的物体所組成的系統。

机組在工作的时候要引起阻止运动的力，这种力称为阻力。机組中的发动机克服所引起的阻力。发动机产生的力作用于物体上促使物体加速运动的力称为驅动力，該物体称为机組的驅动器。而承受机組在完成有效功时所产生的阻力的物体則称为工作器。在一般情况下，驅动器和工作器用若干个中間物体連接起来，組成一个統一的相关系統。

上述的相关系統的特征是多种多样的，但是它們的結構都服从于机械原理課程的“机构的結構”一章中所討論的一定規律。机构具有这样的性質，即：組成物体的各个質点的运动学参数——位移、速度和加速度之間有一定的規律关系，这些关系将在机械原理課程的“机构运动学”一章中讲到。

作为机构組成部分的物体是在力的作用下克服运动阻力的，因此在設計时，必須求出它們的强度尺寸。但这只是在作用于机构上的力的大小、方向和作用点为已知的条件下才有可能。机构上各个作用力之間的关系将在“机构的力的計算”一章中确定。

驅动力和阻力都服从一定的規律；这些力的作用影响到所产生的运动。为此在机械原理課程的“外力作用下机构的运动”一章中将研究这样的問題：机构的运动学参数如何随着作用于机构上的外力的变化規律而改变。

上述各个在机械原理課程中所研究到的問題的組合，构成了課程的第一部分，即現有机机构的分析。課程的第二部分所討論的關机构綜合的問題。在綜合机构时，必須解决如何决定机构的某些参数以产生所需运动的問題。为此就要进行机构簡圖的選擇，并决定組成該机构的各物体的基本尺寸。在机构綜合这一章中講到了設計机构簡圖的問題，至于确定机构中各物体的合理結構尺寸和强度尺寸的問題，在机械原理課程中是不講的。

从上面所述可以得到結論，即：机械原理是一門結合分析和綜合的

研究机械的結構、运动学及动力学的科学。这门科学主要应用“刚体力学”课程中所讲的方法来解决工程上所提出的問題。由于机构在一般情况下是一种复杂的互相連系着的系統，所以在机械原理中提出了一系列的問題，这些問題就用本课程所固有的方法来解决。这主要涉及“机构的結構”一章，在这一章中闡明关于組成机构的各物体之間的約束問題，以及为了产生所需运动可以采用何种刚体相关系統的問題。此外，在研究机构时，还发生一些直接用“刚体力学”的方法不能解決的問題，因此为了解决这些問題就必须研究出在“刚体力学”中所沒有講到的新方法。例如在解决关于外力作用下机构的运动問題时就必須用这种方法来解决，还有在本課程的第二部分里也是如此，其中談到了关于机构的設計問題。

因此，机械原理既应用刚体力学的方法，也应用它本身所固有的方法，来解决机构設計中和机构分析中所發生的問題。

第一部分 机构的结构和运动学

第一章 运动链的结构

§ 1. 构件及其约束

1° 用来复演所需运动的互相联系着的质点系称为机构。

由于机构是按已知方式互相联系着的质点系，所以我们很有理由利用力学中“质点系动力学”一章所阐述的基本原理来研究机构。

系统中各个质点的相对位置及其位移服从于几何特性的条件，因此，机构可以称为具有几何约束的系统。几何约束可以用数学方法以机构各质点坐标之间的方程式形式来表示。这种约束因为与时间无关，所以称为固定约束。

在求系统中各个质点（因而也就是求机构中各个质点）的位置时可以采用广义坐标的方法。

所研究系统的广义坐标是指一些互不相关的独立参数，借助于这些参数可以求出该系统的位置，并通过这些参数表示出系统中所有质点的坐标。

这些独立参数的数目决定于所研究系统的自由度数。

如果以挂钟的摆为例，则可以把摆对任一事先规定的方向（如垂直方向）所倾斜的角度看成是广义坐标。由于摆的位置仅用一个广义坐标即可决定，所以这个系统只有一个自由度。

具有固定点的物体有三个自由度，因为它的位置要由三个欧拉角来确定。

在直线轨道上滑动的物体具有一个自由度，因为它唯一的广义坐标表示由物体到轨道上事先指定的点之间的距离。

广义坐标可以用两点之间的相应距离来表示，也可用两个方向线之间夹角的大小来表示。

广义坐标可给以任意值(这些值是独立的,互不相关的),但所给的这些值即完全确定了它们所属的质点系的位置。系统的位置可以用方程式来确定,借助于这些方程式可以得到各个质点的坐标与广义坐标之间的关系。

2° 下面我们要研究的机构是这样的,其中所有的质点都可划分成组,每一组中的质点完全相互联系着。这样的质点组是不会变化的刚体,称为构件。因此我们将讨论由刚体(构件)所组成的机构,而不讨论那些同时利用刚体和液体及气体来重演所需运动的机构。实际上,构件在一般情况下是由若干个互相刚性联结在一起的刚体(零件)所组成的,从而得到一个不变的系统,这种不变的系统在机械原理中视为一个整体。例如图1所示的活塞式发动机中称为连杆的构件,是由若干个刚性联结的零件所组成的。

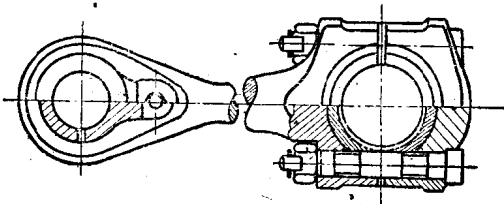


图 1.

机构的各个构件也是互相联系着的,但这种联系与零件在构件中的联系不同。构件间的约束是不完全的约束,因为其中一个构件可以对另一个构件作相对运动。

两个直接接触的构件的可动联结称为运动副。

运动副中两构件的直接接触条件由接触部分的几何形状来保证。

例如图 2 所示的运动副是以构件的圆柱形部分来保证两构件直接接触的。构件上互相接触的部分称为运动副元素。

如果构件以面相接触，则它们所形成的运动副称为低副。如果运动副的构件是以线或点相接触，则称为高副。因此图 2 所示的运动副属于低副一类，而图 3 所示的运动副则为高副。图 3 上部分所示为两构件以线接触的运动副，而下部分则是以点相接触的运动副，因为在一种情况下球体与锥体是沿圆周相接触的，而在第二种情况下则是球体与平面以点相接触。

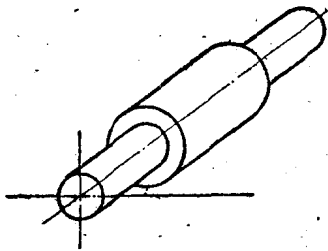


图 2.

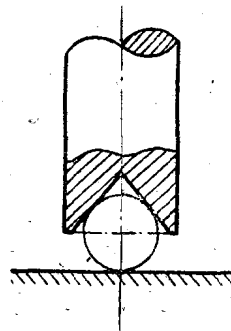


图 3.

运动副又可分为几何闭式的和开式的两种。图 2 所示的为闭式运动副，因为它的两个构件是不能分开的。如果所研究的运动副的包围元素为半圆柱的形式，则运动副是开式的。图 3 所示的就是开式运动副，因为这些运动副的几何元素可以分开。为了消除这种分开的可能性，人们常利用其中一个构件的重量或弹簧的压力使两构件保持接触。

图 4 所示为应用最广的运动副及其在机构简图上的习惯表示法。图 4, a 是一球面运动副，图 4, b 是一带突销的球面运动副，图 4, c 是一圆柱形运动副，图 4, d 是转动的运动副，图 4, e 是移动的运动副，图 4, e 是螺旋的运动副，图 4, ж 是两个以线接触的构件的运动副。

上边所看到的最前一种运动副为高副，其余的均为低副。此外，两个构件以线或点相接触的运动副是几何开式的，而所有其他形式的运

动副则均为几何闭式的。

3. 为了研究组成运动副的构件的约束问题，应注意构件相对于固定直角坐标系的位置是由六个参数来决定的：构件上任一点 A 的三个坐标 x_A, y_A, z_A ，通过构件上点 A 的任意直线 AB 对固定坐标系的三个倾角 $\alpha_{AB}, \beta_{AB}, \gamma_{AB}$ 中的两个倾角，以及构件绕直线轴 AB 的迴转角 φ_1 (图 5)。

必须记住角度 $\alpha_{AB}, \beta_{AB}, \gamma_{AB}$ 之间的关系是：

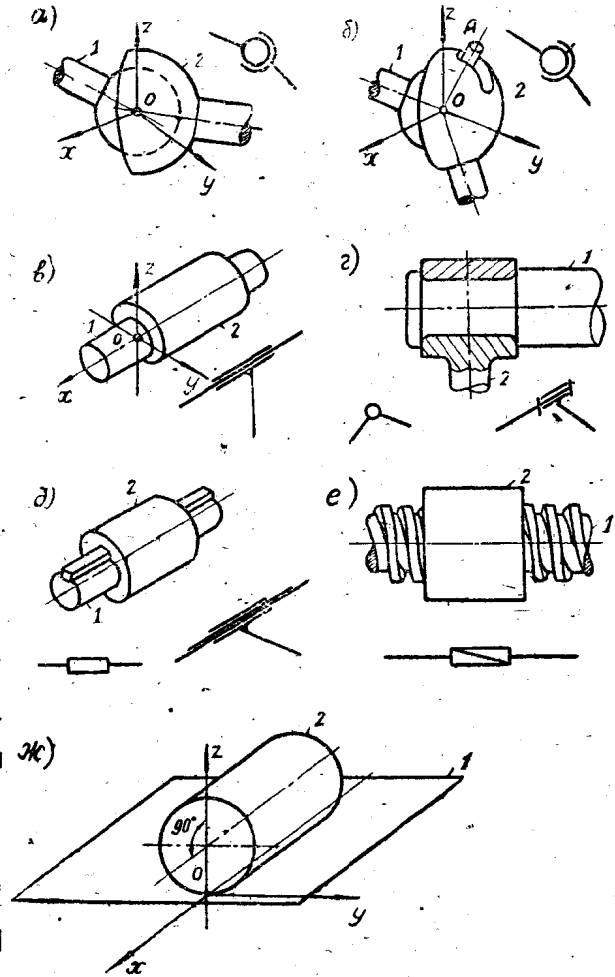


图 4.

$$\cos^2 \alpha_{AB} + \cos^2 \beta_{AB} + \cos^2 \gamma_{AB} = 1, \quad (1.1)$$

因此可以从其中两个角度求出第三个角度。

两个构件联接成运动副之后就建立了约束，这种约束可以用数学的方法表示出来。表示这种约束的数学式子叫做约束条件（或限制条件）。在确定运动副对构件的相对运动所加的约束条件数时，其中一个

在移动副中(图4, d), 只有确定构件2在其本身轴綫上的位置的綫坐标是自由的, 而其余的参数則都是受到約束的。

在螺旋副中(图4, e), 与圓柱副中相同的綫坐标和角坐标用一定的关系互相約束着, 这两个坐标按照这种約束关系互相成比例地改变。因此, 加在螺旋副构件上的約束条件不象圓柱副那样是四个, 而是五个。

由上得知: 轉动副、移动副和螺旋副都可以由圓柱副加上相应的附加約束而获得。

图4, α 表示高副, 在这个高副中, 圓柱2与平面1相接触。圓柱2轴綫上的任一点的垂綫坐标以及該轴綫对垂直坐标軸的 90° 傾角都是受約束的。

§ 2. 运动链

1. 用运动副連接的許多构件的总和称为运动链。組成运动链的最少构件数可以等于三, 因为两个直接联接的构件組成一个运动副。图6表示由四个构件組成四个轉动副的运动链。該运动链系用构件强度計算时所必須的結構形式表示出来的。对于机械原理課程的研究而

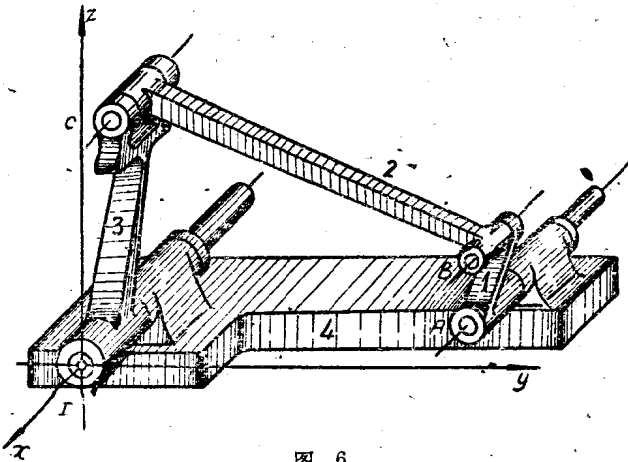


图 6.

論, 这种表示方法并非必要, 故用运动簡图来代替。

在上节中我們看到了构件在空間的位置由六个参数来决定: 构件上任一点的三个坐标, 通过該点的任一直綫对坐标軸的两个傾角, 和构件繞該直綫旋轉的轉角。因此, 构件在簡图上可用直綫段来表示, 直綫段的两个端点为該构件与相邻构件联接处的特性点。在一般情况下, 除此之外, 还应作出与上述直綫段相交的第二个直綫段, 以便度量构件繞其本身軸綫的轉角。

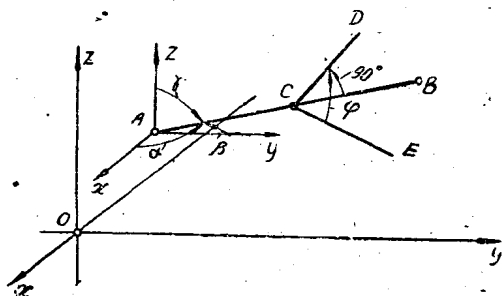


图 7.

图 7 所示的构件簡图是通过两个以直角相交的綫段 AB 和 CD 的形式表示的, 同时, 此处构件繞 AB 軸的轉角 φ 是相对于平行于平面 Oxy 的 CE 方向綫来度量的。

2° 在图 6 中我們可以看出运动鏈的各个构件不能繞其本身的軸綫迴轉, 所以和图 7 中綫段 CD 相类似的綫段已无必要。此外, 由于所有构件的点均在平行于同一平面的各个平面中运动, 因此这种运动鏈可以如图 8 一样来表示。在图 8 中, 构件 4 的固定端划有剖面綫。此处我們得到所謂平面运动鏈(其各构件只可以在平行平面中运动)。图 9 所示为一空間运动鏈的簡图, 其中构件 1 和构件 2 构成轉动副, 2 和

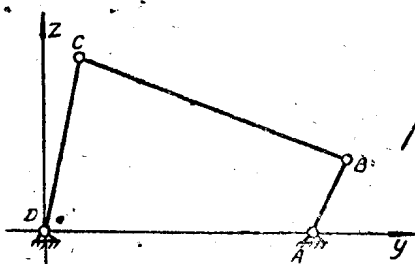


图 8.

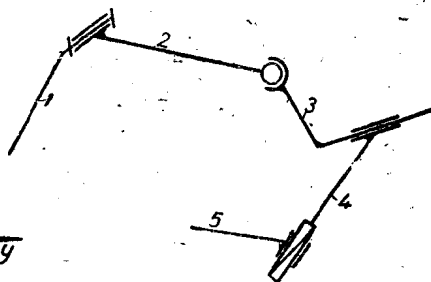


图 9.

3 构成球面副, 3 和 4 构成圆柱副, 4 和 5 构成螺旋副。

运动链分为闭式和开式两种。如果该运动链中每个构件与其他构件所组成的运动副不少于两个, 则该运动链称为闭式运动链。如果运动链的某几个构件中每个构件只参与一个运动副, 则称为开式运动链。在工程上主要采用闭式运动链。运动链中作为固定的构件称为机架。在图 6 和图 8 中构件 1 为机架。

3. 上面我们已经看到, 运动副各构件的相对位置随它们所参与的运动副的不同而在不同程度上约束着。在一般情况下, 运动链的约束不仅仅与各个运动副所加的约束有关, 而且还与它们是以何种组合形式参与运动链有关。由于这个缘故, 运动副所加的总约束数有时不等于加在运动链上的真实约束数。根据这个理由, 我们只计算加在运动链上的约束数而不计算运动副所加的总约束数。

应当注意到, 闭式运动链应服从于封闭条件, 因此, 其多边形简图的各个边在直角坐标轴上的投影之和等于零。为了利用这一条件, 需要给出上述多边形各边的方向, 亦即将它们用向量的形式表示出来。一般说来, 上述方向的选择可以是任意的, 但通过下面的分析即可清楚看出: 向量的始点宜确定在一固定点上。例如在我们所熟悉的四杆运动链的简图中(图 10), 多边形各边的方向是这样规定的: 使向量 l_1 和 l_3 从两个固定点引出。向量 l_2 和 l_4 的方向可以任意给定。

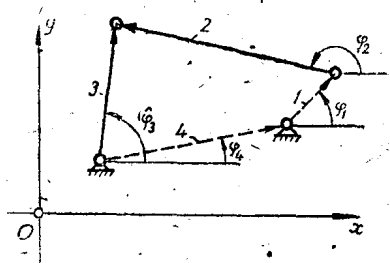


图 10.

封闭条件可以用向量的形式写出, 也可以用投影方程式的形式写出。在写这些方程式的时候, 应按任意选择的方向绕多边形的周界, 对于与选定的循序方向相反的向注以负号(-)。在这种情况下, 封闭向量方程式如下列形式: