

伺 服 机 械 结 构

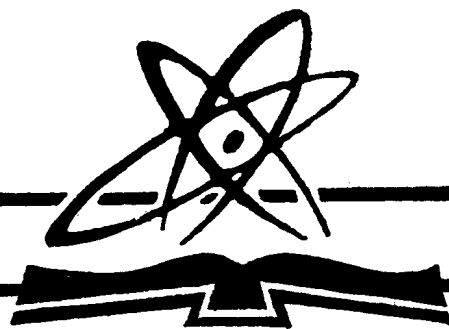
第 二 分 册

伺 服 机 械 传 动 装 置

上 海 科 技 大 学

龚 振 邦 陈 守 春

国 防 工 业 出 版 社



伺 服 机 械 结 构

第 二 分 册

伺 服 机 械 传 动 装 置

上 海 科 技 大 学

龚 振 邦 陈 守 春

国 防 工 业 出 版 社

伺服机械结构

第二分册

伺服机械传动装置

上海科技大学

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

解放军第七二二六工厂印刷 内部发行

*

787×1092¹/₁₆ 印张 19 450 千字

1980 年 8 月第一版 1980 年 8 月第一次印刷 印数 1-5,000 册

统一书号: N15034(四教 20) 定价 1.95 元

内 容 简 介

本书为《伺服机械结构》一书的第二分册。

伺服机械传动装置的设计，与通用机械传动装置或一般仪器仪表传动装置相比，有许多类同之处，也有不少特殊之处，本分册就其特殊之处作一较为系统的论述。主要内容有：典型的载荷分析、伺服电动机和总传动比的选择、传动机构及传动链级数和各级传动比的选择、位置检测装置和读数机构、传动链的传动精度、传动链若干性能参数的测量等。

本书可供高等院校“无线电设备结构设计”专业作为教材（试用），亦可供其它有关专业及从事伺服机械结构设计的技术人员参考。

前 言

《伺服机械结构》一书系高等院校“无线电设备结构设计”专业统编教材（试用）。

全书分三个分册。第一分册为《伺服系统基本原理》，第二分册为《伺服机械传动装置》，第三分册为《天线座结构设计》。全书三个分册由上海科学技术大学龚振邦统编。

本书为全书的第二分册，主要内容有：典型的载荷分析、伺服电动机和总传动比的选择、传动机构及传动链级数和各级传动比的选择、位置检测装置和读数机构、传动链的传动精度、传动链若干性能参数的测量等。

对上述内容的具体教学实施，各院校可按本专业的具体要求而有所侧重。

第二分册的主编为上海科学技术大学龚振邦。参加编写的人员和分工如下：龚振邦（第一章至第六章）、陈守春（第七章）。主审为西北电讯工程学院吴凤高副教授。

西北电讯工程学院、成都电讯工程学院、南京工学院及上海科学技术大学等院校的有关教师参加了本教材的审定，提出了许多宝贵意见；在编审过程中还曾得到有关厂、所的热情支持，特在此一并致谢。

限于编者水平，谬误之处在所难免，诚望读者批评指正。

编 者

1979年9月

目 录

第一章 引言	(1)
§ 1.1 作用和分类	(1)
§ 1.2 设计要求	(4)
§ 1.3 设计步骤	(6)
第二章 典型的载荷分析	(8)
§ 2.1 风载荷	(9)
2.1.1 基本计算公式	(9)
2.1.2 圆抛物面的风载荷 (静态风载荷)	(24)
2.1.3 反射体回转对风载荷的影响 (动态风载荷)	(24)
2.1.4 结构物的干扰效应	(26)
2.1.5 设计风速	(27)
2.1.6 减小风载荷的若干措施	(30)
§ 2.2 惯性载荷	(32)
2.2.1 基本计算公式	(32)
2.2.2 典型的运动分析	(33)
2.2.3 转动惯量的计算	(37)
2.2.4 减小惯性载荷的若干措施	(41)
§ 2.3 摩擦载荷	(41)
2.3.1 基本计算公式	(41)
2.3.2 接触式旋转密封装置上的摩擦力矩	(44)
2.3.3 滚动轴承上的摩擦力矩	(46)
2.3.4 特大型转盘轴承上的摩擦力矩	(50)
2.3.5 减小摩擦载荷的若干措施	(60)
§ 2.4 载荷的综合及负载的力矩特性	(61)
第三章 伺服电动机和总传动比的选择	(68)
§ 3.1 直流伺服电动机及其转矩特性	(68)
3.1.1 普通直流伺服电动机	(68)
3.1.2 高性能直流伺服电动机	(71)
3.1.3 直流伺服电动机的转矩特性	(74)
§ 3.2 交流伺服电动机及其转矩特性	(77)
3.2.1 普通交流伺服电动机	(77)
3.2.2 高性能交流伺服电动机	(82)
3.2.3 交流伺服电动机的转矩特性	(83)
§ 3.3 力矩电动机	(85)
§ 3.4 总传动比的选择——伺服电动机与负载的匹配	(88)

3.4.1	最佳总传动比的概念	(88)
3.4.2	伺服电动机的初选	(91)
3.4.3	总传动比的选择	(92)
第四章	传动机构及传动链级数和各级传动比的选择	(102)
§ 4.1	普通齿轮机构及其应用	(102)
4.1.1	圆柱齿轮机构	(102)
4.1.2	圆锥齿轮机构	(104)
4.1.3	变位齿轮机构	(104)
4.1.4	蜗杆蜗轮机构	(105)
4.1.5	应用举例	(105)
§ 4.2	行星齿轮机构及其应用	(107)
4.2.1	差动齿轮机构	(107)
4.2.2	普通行星齿轮机构	(113)
4.2.3	渐开线少齿差行星齿轮机构	(116)
4.2.4	摆线针轮行星齿轮机构	(119)
4.2.5	谐波行星齿轮机构	(122)
§ 4.3	其它型式的传动机构	(128)
4.3.1	螺旋传动机构	(128)
4.3.2	同步齿形带传动机构	(128)
§ 4.4	传动链级数和各级传动比的选择	(129)
4.4.1	“折算转动惯量小”的原则和方法	(130)
4.4.2	“折算转角误差小”的原则和方法	(135)
4.4.3	“重量轻”的原则和方法	(136)
4.4.4	确定级数和各级传动比的综合考虑	(139)
第五章	位置检测装置和读数机构	(139)
§ 5.1	自整角机系统和旋转变压器系统	(142)
5.1.1	自整角机系统	(142)
5.1.2	旋转变压器系统	(145)
5.1.3	机械变比的粗精通道	(147)
5.1.4	多极检测元件和电变比粗精通道	(152)
§ 5.2	感应同步器	(153)
5.2.1	感应同步器的工作原理	(153)
5.2.2	圆盘式感应同步器	(155)
5.2.3	直线式感应同步器	(156)
§ 5.3	光学编码器	(156)
5.3.1	增量式光学轴角编码器	(157)
5.3.2	绝对式光学轴角编码器	(164)
§ 5.4	读数机构	(167)

第六章 传动链的传动精度	(170)
§ 6.1 传动误差和回程误差的概念	(170)
§ 6.2 传动误差的分析和综合	(172)
6.2.1 影响传动误差的诸因素	(172)
6.2.2 单个齿轮传动误差的数字特征	(176)
6.2.3 传动链传动误差的统计计算	(179)
§ 6.3 便于频谱分析的传动链传动误差的统计计算	(182)
§ 6.4 回程误差的分析和综合	(188)
6.4.1 影响回程误差的诸因素	(188)
6.4.2 齿轮副回程误差的数字特征	(195)
6.4.3 传动链回程误差的统计计算	(203)
6.4.4 环境温度的影响	(206)
6.4.5 弹性变形的影响	(209)
§ 6.5 提高传动精度的结构措施	(211)
6.5.1 适当地提高零部件本身的精度	(211)
6.5.2 合理地设计传动链	(212)
6.5.3 采用机械校正或机械反馈机构	(216)
6.5.4 采用消隙机构	(218)
第七章 传动链若干性能参数的测量	(235)
§ 7.1 转动惯量的测量	(235)
7.1.1 物理摆振动法	(235)
7.1.2 扭转振动法	(236)
7.1.3 平行线悬挂法	(237)
7.1.4 落体观察法	(238)
7.1.5 时常数测定法	(239)
§ 7.2 摩擦力矩的测量	(241)
7.2.1 重力法和弹簧称法	(242)
7.2.2 测矩仪法	(243)
7.2.3 自由回转法	(248)
7.2.4 电测法	(248)
§ 7.3 传动误差的测量	(249)
7.3.1 动态测量	(249)
7.3.2 静态测量	(254)
§ 7.4 回程误差的测量	(266)
7.4.1 机械的方法	(267)
7.4.2 光学的方法	(268)
7.4.3 电气的方法	(269)
附录 A 有关的概率论与误差论提要	
附录 B 交流伺服电动机转矩——转速特性的推导	
主要参考资料	

第一章 引言

近数十年来，随着伺服控制技术的发展和，伺服机械已在许多军事装备、机械设备和仪器仪表上得到了广泛的应用，诸如雷达和火炮的自动瞄准、舰艇方向舵的自动操纵、飞机的自动驾驶、导弹的控制、机床工作台面的自动定位、数控绘图仪的自动定位、射电望远镜的自动瞄准以及工业机械手、机器人的执行机构等等，都有应用伺服机械的实例。工程实践表明，伺服性能的进一步提高，不仅有赖于各种控制理论和元件性能的进一步完善，还在很大程度上取决于伺服机械结构。机械结构上的问题，经常会使整个伺服系统的性能受到限制。

伺服机械传动装置是伺服机械结构设计的一个重要方面，它和通用机械传动装置或一般仪器仪表传动装置相比，有许多类同之处，也有不少特殊之处，本分册试就其特殊之处作一较为系统的论述。

§ 1.1 作用和分类

在伺服系统中的机械传动装置称为“伺服机械传动装置”，它往往是整个伺服系统的一个组成环节。

图 1.1 所示为典型的雷达天线位置手控伺服系统，它是一种闭环伺服系统。图中 a 为原

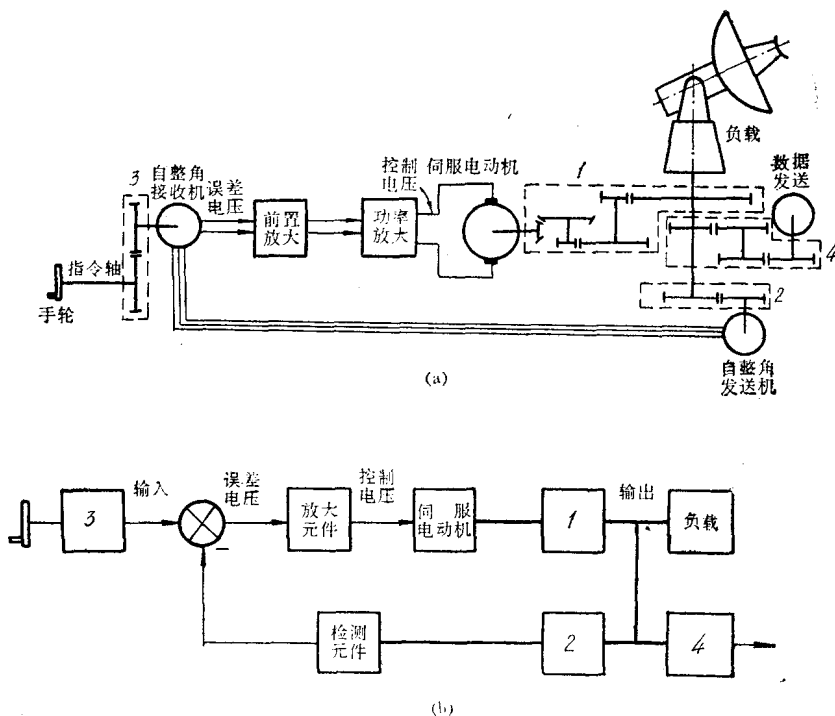


图 1.1 位置控制伺服系统（机电式）

理图, b 为对应的方框图, 该图有意突出了传动装置的地位。这种伺服系统能借助功率足够的执行元件(如伺服电动机), 通过传动装置 1 来驱动负载(如天线座和天线)。负载的指令位置与其实际位置之间的误差, 是由一套位置检测装置来检测的。该套检测装置是一套自整角发送机——自整角接收机系统, 其中包括一套对应的传动装置 2 和 3。检测装置输出与位置误差成比例的误差电压, 放大元件将误差电压予以前置放大和功率放大, 并输出控制电压。伺服电动机在控制电压的作用下, 通过传动装置, 驱动负载朝减小误差的方向运动, 直至负载的实际位置跟指令位置一致, 误差消失为止。为了将负载实际位置对应的数据显示出来, 或传递到其它设备上去, 该系统还使用了传动装置 4。

类似雷达天线位置控制那样的伺服系统, 所用的执行元件, 除了可选择伺服电动机外, 还可选择液压伺服马达。一般将选用伺服电动机的伺服系统称为机电伺服系统; 将选用液压伺服马达的伺服系统称为电液伺服系统。电液伺服系统的方框图如图 1.2 所示。

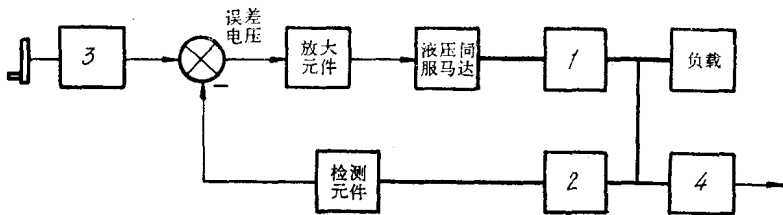


图 1.2 电液伺服系统方框图

图 1.3 为某雷达天线位置数据复现伺服系统, 它也是一种闭环伺服系统。图中 a 为原理

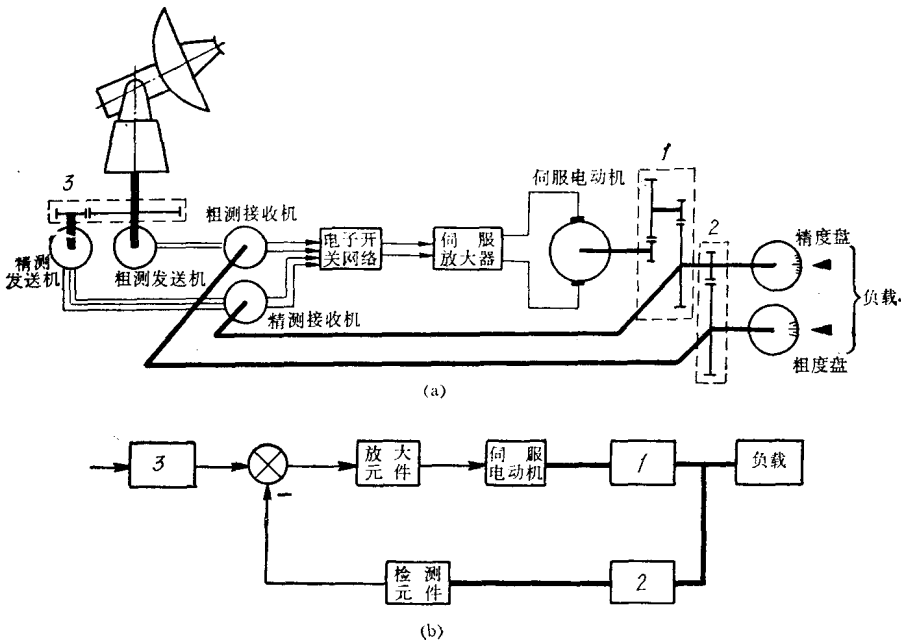


图 1.3 数据复现伺服系统

图, b 为对应的方框图。

在上面所列举的一些伺服系统中, 传动装置 1 的作用是传递转矩和转速, 并使执行元件和负载之间在转矩和转速上得到匹配。这是因为普通的伺服电动机或液压伺服马达, 在其输出轴上往往是高转速、低转矩, 而负载轴要求的却往往是低转速、高转矩, 所以在执行元件和负载之间需要耦合传动装置 (通常是齿轮减速箱), 以降低转速, 升高转矩, 使执行元件和负载得到匹配。由于这类传动装置是传递动力 (功率) 的, 故统称为“动力传动装置”。

动力传动装置根据所传递功率的大小常分为两类: 一类称为“大功率传动装置”, 它所传递的功率一般超过 100 瓦; 一类称为“小功率传动装置”, 它所传递的功率一般在 100 瓦以下。

大功率传动装置的设计, 既要考虑强度、刚度, 也要考虑精度、惯量、摩擦等因素。用作大功率传动装置的齿轮通常属于中模数或大模数。其典型结构类似图 1.4 所示。

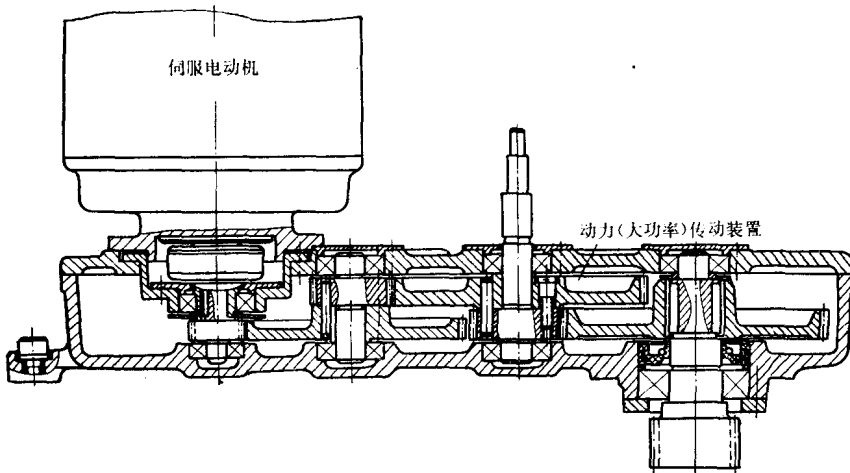


图 1.4 大功率传动装置的典型结构

小功率传动装置的设计, 主要考虑精度、惯量、摩擦、刚度等因素, 强度通常不成问题。用作小功率传动装置的齿轮大多属于小模数。其典型结构类似图 1.5 中自伺服电动机至同步机 A 这一条传动链。

在图 1.1 至图 1.3 所列举的伺服系统中, 传动装置 2 和 3 跟自整角接收机和发送机一起, 完成实际位置数据的反馈、指令数据的输入以及两者之间的比较这一任务。传动装置 4 的作用是使数据得以显示或传递到其它设备上去, 故统称这些传动装置为“数据传动装置”。

数据传动装置无需专门的执行元件, 传递的功率很小。具体设计时, 主要考虑精度, 其次是惯量、摩擦以及刚度, 强度通常不成问题。用作数据传动装置的齿轮大多为小模数齿轮。其典型结构类似图 1.5 中与同步机 B、电感器 C 有关的那些传动链。

由于小功率传动装置和数据传动装置大多采用小模数齿轮, 这两种传动装置又常常装配在一个箱体内, 因此, 习惯上可将这两种传动装置统称为“仪器传动装置”。

综上所述, 伺服机械传动装置的分类如下:

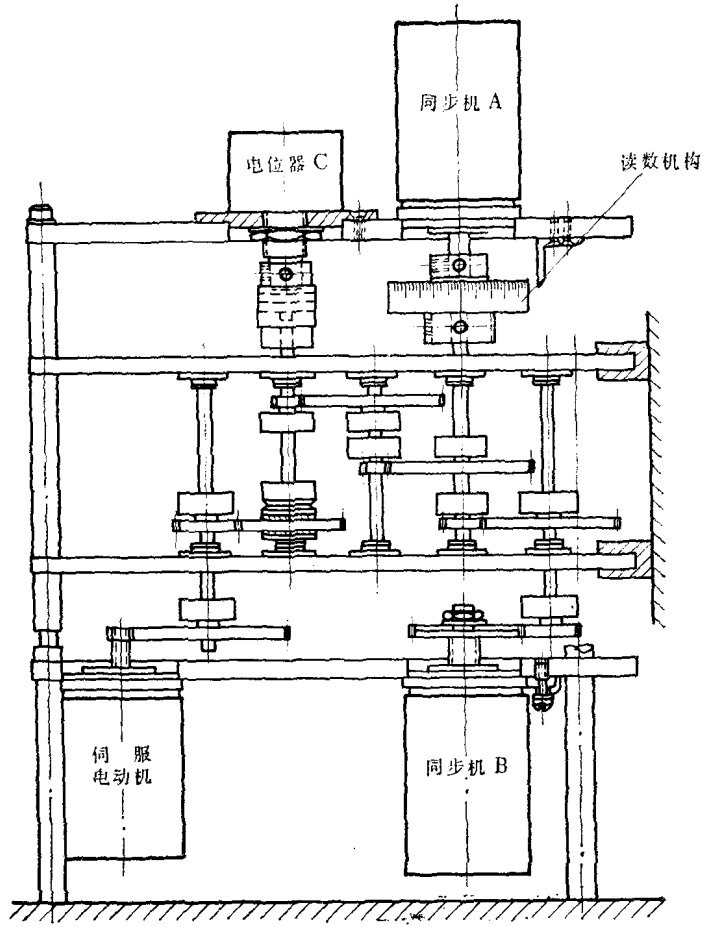


图 1.5 仪器传动装置

伺服机械传动装置 { 大功率传动装置 } 动力传动装置
 { 小功率传动装置 } 仪器传动装置
 { 数据传动装置 }

§ 1.2 设计 要 求

伺服机械传动装置，从其结构型式上来看，与通用机械传动装置或一般仪器仪表传动装置并无显著的区别，但是，在设计要求上，伺服机械传动装置有不少特点。例如，通用机械传动装置或一般仪器仪表传动装置，在设计时往往主要考虑强度或精度，而伺服机械传动装置则不仅如此。拿大功率传动装置来讲，强度固然是一个必须满足的要求，更重要的还是刚度，对精度、惯量、摩擦等也不容忽视。拿小功率传动装置来讲，精度固然重要，刚度、惯量、摩擦等也不容忽视，而强度则往往不成问题。之所以会如此，主要是由于伺服机械传动装置除了和通用机械传动装置或一般仪器仪表传动装置一样，要传递动力和运动外，它们还是整个伺服系

统的一个组成环节，传动装置的性能对伺服系统的性能有很大影响。在设计时必须考虑伺服性能对传动装置提出的要求。

伺服机械传动装置的设计要求，大致可归纳为下面几个方面：

1. 要有足够的强度，保证动力和运动能自传动装置的输入轴可靠地传递至输出轴。此外，还经常要考虑动力和运动的最佳传递。

2. 要有足够的刚度，传动时的弹性变形要限制在一定范围内。这不仅是因为弹性变形将影响传动精度（主要是回程误差），更重要的是弹性变形将降低整个系统的结构谐振频率，限制伺服带宽，给伺服系统的稳定性、动态响应和伺服精度造成不利的影响。

3. 传动精度要高，主要是传动误差和回程误差要小。这是因为传动误差将程度不等地影响伺服精度，而回程误差则有可能引起系统的振荡或降低精度。不过要注意，对处在伺服系统中不同环节上的传动装置，如第一分册所述，传动误差或回程误差对伺服性能的影响有所不同，因此，应区别对待。

此外，还要求传动装置的传动平稳性要好，噪音要小。

4. 在大多数情况下，要求惯量小。这是因为惯量小有利于伺服系统的稳定性、动态响应和伺服精度。惯量小还有利于减小用于克服惯性载荷的功率损耗。

5. 传动效率要高，在大多数情况下，摩擦要小。这不仅因为摩擦载荷将增加功率损耗，还因为摩擦将降低系统的静态精度，并容易引起低速爬行现象。但是，适当的摩擦阻尼有时对抑制伺服系统的振荡有有利的一面。

6. 结构紧凑、重量轻，以满足安装空间和重量方面的限制。经常为了满足这一条设计要求，而宁可降低些其它设计要求。

7. 满足使用环境提出的各种要求，诸如润滑和密封性能要好，抗腐蚀性强等。

8. 结构工艺性要好，便于制造，装配和维修。

9. 满足“标准化、系列化、通用化”方面的要求，以提高产品质量、缩短设计和制造、装配的周期。

10. 成本要低，经济性要好等等。

应当指出，对上面罗列的这些设计要求，不同的传动装置有不同的侧重。举例来说，即使同样是动力传动装置，设计要求的侧重面也不尽相同。

如图 1.6 所示，a、b、c 都是动力伺服系统：a 表示的是闭环系统，检测装置对负载位置直接进行检测，并进行反馈和比较；b 表示的是开环系统，它没有检测装置，不对负载位置进行检测和反馈；c 表示的亦是一种闭环系统，它虽具有检测装置，但与 a 不同，不是对负载位置作直接检测，而是通过传动装置的一部份来对负载位置作间接检测，然后反馈、比较。

图 1.6a 中的传动装置完全处于伺服回路之内，其结构谐振频率和回程误差将影响伺服系统的稳定性，而传动误差的低频分量（指频率低于伺服带宽的那部份传动误差）却可得到校正。b 却不然，传动装置的传动误差和回程误差直接影响整个系统的精度，但它不存在稳定性方面的问题。在 c 中，落在伺服回路之内的前面一部份传动装置 1 和 a 的情况一样；落在伺服回路之外的后面一部份传动装置 2 和 b 情况一样。由此可见，同样是动力传动装置，在设计要求上却有不同。

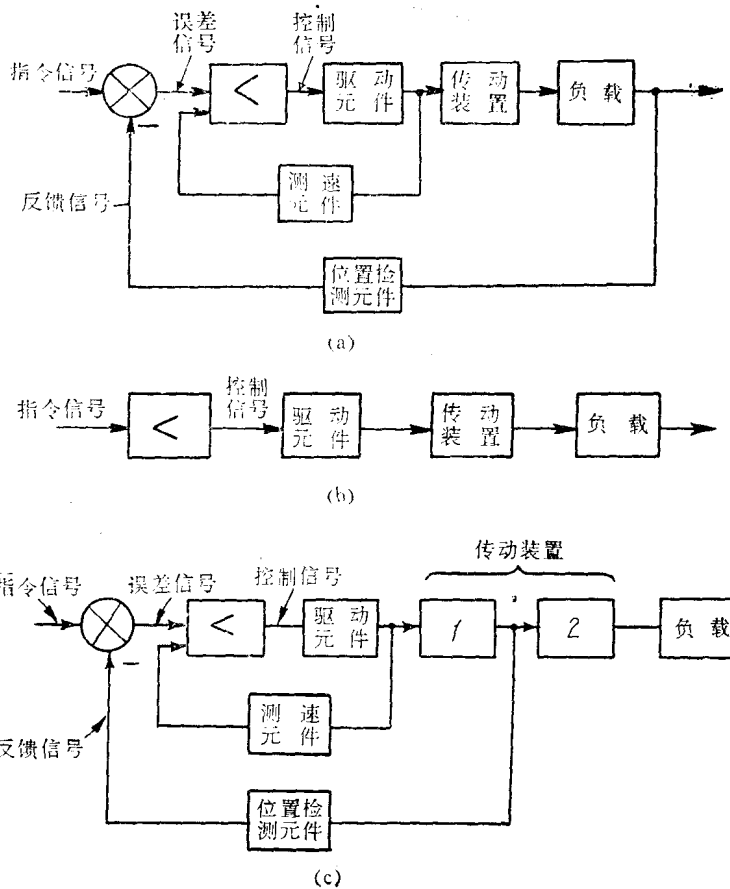


图 1.6 三种伺服系统中的传动装置

§ 1.3 设计步骤

伺服机械传动装置的设计步骤，以动力传动装置为例，大致如下：

一、设计准备阶段

这一阶段实际上是一个学习和调研的过程：

1. 了解所设计的传动装置在整机中的作用，确切理解结构总体对该装置所提的设计要求和技术指标，明白设计上的侧重点和难点；
2. 搜集、参考和分析国内外有关资料以及同类型产品的设计图纸、技术总结，必要的话，还需至有关单位调查研究。

二、方案拟订阶段

这一阶段常称为系统设计阶段，这时要：

1. 根据受载情况，进行载荷估算；
2. 与伺服系统的电气设计人员共同协商，选择执行元件，并在此基础上，选择总传动

比；

3. 选择传动机构的型式；
4. 确定级数和各级传动比；
5. 对关键零部件进行初步的强度估算，并合理配置传动链；
6. 对传动链进行精度估算（包括传动误差和回差）；
7. 估算传动装置的刚度和结构谐振频率；
8. 进行必要的工艺性和经济性分析；等等。

这一阶段最好能同时构思几个方案，以便论证时进行比较。方案论证前，除了要准备好一系列设计计算外，还要绘制好方案草图（包括传动链简图和结构布局草图）。方案论证时要虚心征求生产、使用部门以及有经验的设计人员的意见。方案确定后要经过必要的审批手续。

三、图纸绘制阶段

这一阶段又称结构设计阶段，这时要根据修改后的方案草图，认真地绘制装配图和零件图。

四、技术文件拟制阶段

技术文件一般包括设计计算说明书、装配图、零件图等，有时还包括使用和维修说明书等其它文件。

设计计算说明书包括该传动装置的功能、载荷的分析与计算、选择执行元件的依据、总传动比的确定、各种传动方案的比较、级数和各级传动比的确定、主要零部件的强度校核、传动链的精度校核、刚度和结构谐振频率的估算以及结构上的种种其它考虑等内容。

技术文件拟制完毕后交结构总体审核，然后由生产部门试制。

五、试制鉴定阶段

新产品的的设计，往往需要经过试制鉴定阶段，以便对样机进行各种性能的考核。

试制鉴定阶段中经常会发现一些问题，对这些问题应及时予以解决，并对图纸和其它技术文件作必要的修改。

样机鉴定后就可交生产部门正式制造，并对技术文件进行最后的整理和归档。

本书将按上述设计程序，对载荷的分析和估算、执行元件（伺服电动机）的选择、总传动比的确定、传动机构的选择、级数和各级传动比的确定、传动精度的估算、传动链若干性能参数的测量等内容作逐一的介绍。由于强度计算方面的内容已在“机械设计基础”课程中详细介绍过，故这里就不予重复；由于传动装置的结构谐振频率往往跟天线、天线座合成一个系统来估算，故这部分内容放在第三分册中列为一个专题来介绍。

对数据传动装置，原则上亦可按上述设计步骤来进行，但是它的计算内容要少一些，譬如它无需专门的执行元件，而总传动比则经常是给定的（1:1，36:1或40:1、25:1等等），强度通常亦不成问题。在实际产品上，经常把数据传动装置和各种位置检测元件、读数机构等合称为“数据传递系统”，本书专门列一章（第五章）来介绍各种常用的位置检测元件和读数机构，这一章内容有助于数据传动装置的设计。

第二章 典型的载荷分析

载荷是传动装置设计计算的一项重要的原始数据。

图 2.1 为某 1.5 米口径的雷达天线，图 2.2 为某 30 米口径的卫星通讯地面站天线，均在露天工作。作用在它们的动力传动装置上的典型载荷有：风载荷（最主要的一项）、惯性载荷、摩擦载荷，对俯仰还经常存在重力不平衡载荷。

图 2.3 为某 46 米口径的雷达天线，整个天线覆有圆顶天线罩。

作用在它的动力传动装置上的载荷，主要是惯性载荷、摩擦载荷，对俯仰来说，还存在重力不平衡载荷（如果天线对俯仰的重力平衡不理想的话）。

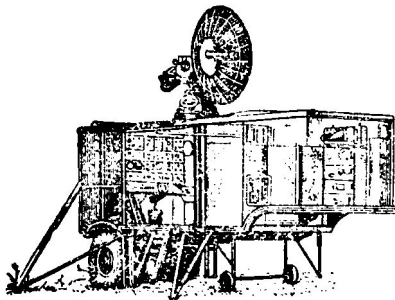


图 2.1 某 1.5 米口径的雷达天线

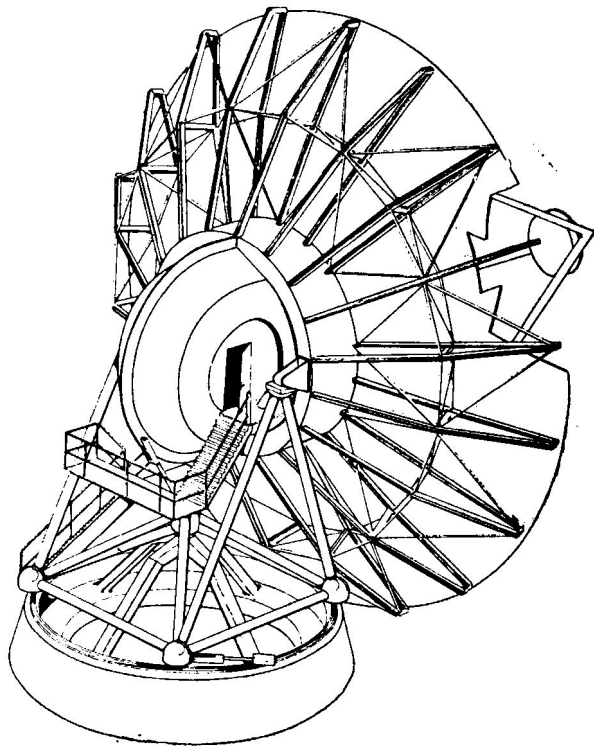
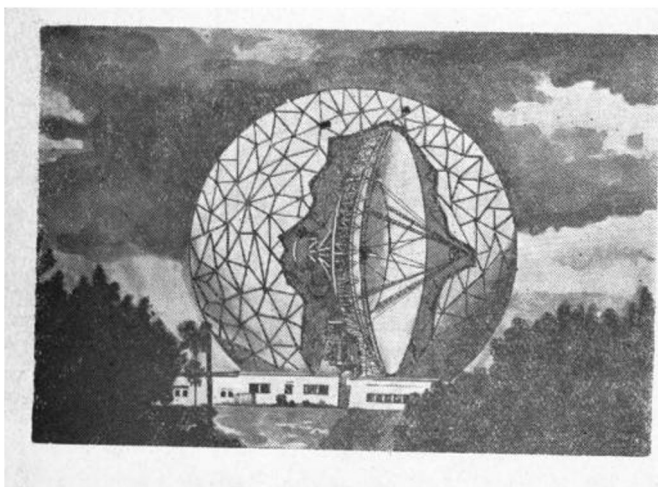


图 2.2 某 30 米口径的卫星通讯地面站天线



如图 1.5 所示那样的仪器传动装置，作用在上面的载荷主要有惯性载荷、摩擦载荷。

下面介绍一些典型载荷的计算方法。

图 2.3 某 46 米口径的雷达天线

§ 2.1 风 载 荷

2.1.1 基本计算公式

风载荷是由于物体与气流之间存在相对运动而产生的。以风水平吹向倾斜平板为例(图 2.4)。当稳恒气流以速度 V 水平吹向倾斜平板时,在平板的边缘处,气流发生分离,在平板后面出现了一段涡区,在这段涡区内,气流被扰动,这里气流已不是稳恒流动的了。在涡区内,压力急剧下降,在平板的向风面和背风面各对应点上的压力就不相等,从而形成压差。

设平板向风面和背风面各对应点上的压力(即单位面积上的压力——压强)分别为 p_w 和 p_1 ,这时各对应点上的压差 Δp 为

$$\Delta p = p_w - p_1 \quad (2.1)$$

流体力学中定义动压头 q 为

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.2)$$

式中 ρ ——空气密度;

V ——气流速度,即风速。

定义压差系数 $C_{\Delta p}$ 为

$$C_{\Delta p} = \frac{\Delta p}{q} \quad (2.3)$$

从而有

$$\Delta p = C_{\Delta p} q \quad (2.4)$$

压差系数 $C_{\Delta p}$ 可按式(2.3)由实验测得。一般来说,平板上各点的压差系数是不等的,因而各点上的压差亦不等。

风吹向平板时,各点压差 Δp 在整个面积 A 上的积分就是平板所受的风力 F 。如图 2.4,空心箭头代表风力 F 。可以想象,在图示的姿态上,平板顶缘背面涡区压力的下降甚于底缘背面涡区压力的下降,因此空心箭头作用在平板中心 o 的上面。该力可向中心 o 简化为一个力 F 和一个力矩 M ,实线箭头代表风力 F 和风力矩 M 。

风力 F 为

$$F = \int_{(A)} \Delta p \cdot dA = q \int_{(A)} C_{\Delta p} dA$$

引入面积 A 上的平均压差系数 $\bar{C}_{\Delta p}$, 令

$$\bar{C}_{\Delta p} = \frac{\int_{(A)} C_{\Delta p} dA}{A} \quad (2.5)$$

则

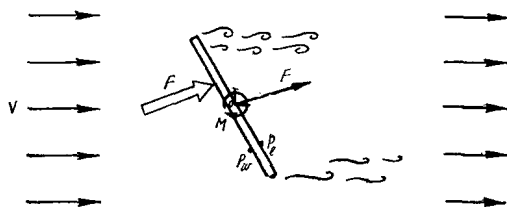


图 2.4 风水平吹向倾斜平板(1×b)