

第 22 篇 机电一体化系统设计

主 编 张健民
编写人 张健民
唐水源
冯淑华

第 1 章 总 论

“机电一体化”是微电子技术向机械工业渗透过程中逐渐形成的一个新概念，是各相关技术有机结合的一种新形式。可以说，机电一体化是机械技术、微电子技术相互融合的产物（图 22.1-1）。它具有“技术”与“产品”两方面的内容，首先是机电一体化技术，主要包括技术原理使机电一体化产品（或系统）得以实现、使用和技术。其次是机电一体化产品，主要是机械系统（或部件）与微电子系统（或部件）相互置换和有机结合，从而赋予新的功能和性能的新一代产品。

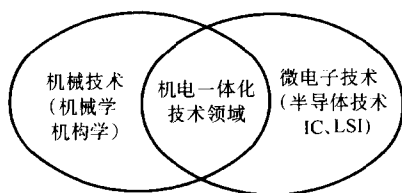


图 22.1-1 机电一体化涵义

机电一体化技术的发展有一个从自发状况向自为方向发展的过程。早在“机电一体化”这一概念出现之前，世界各国从事机械总体设计、控制功能设计和生产加工的科技工作者，已为机械与电子的有机结合自觉不自觉地做了许多工作，如电子工业领域的通信电台的自动调谐系统、计算机外围设备和雷达伺服系统、天线系统，机械工业领域的数控机床，以及导弹、人造卫星的导航系统等，都可以说是机电一体化系统。目前人们已经开始认识到机电一体化并不是机械技术、微电子技术以及其它新技术的简单组合、拼凑，而是有机地相互结合或融合，是有其客观规律的。简言之，机电一体化这一新兴学科有其技术基础、设计理论和研究方法，只有对其有了充分理解，才能正确地进行机电一体化工作。

1 机电一体化系统的要素及功能构成

机电一体化系统由机械系统（机构）、电子信息处理系统（计算机）、动力系统（动力源）、传感检测系统（传感器）、执行元件系统（如电机）等五个子系统组成，如图 22.1-2 所示。通过传感器直接检测目标运动并进行反馈控制的系统为全闭环系统（图 a）。而通过传感器检测某一部分（如同步电机等）运动并进行反馈、间接控制目标运动的系统为半闭环系统（图 b）。机电一体化系统的基本特征是给“机械”增添了头脑（计算机信息处理与控制），因此是要求传感器技术、控制用接

口元件、机械结构、控制软件水平较高的系统。其运动控制不仅仅是线性控制，还有非线性控制、最优控制、学习控制等各种各样的控制。

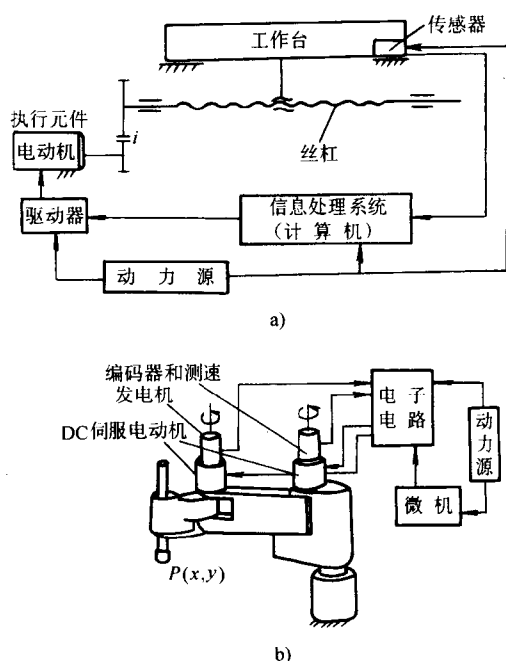


图 22.1-2 系统基本构成

机电一体化系统（或产品）是由若干具有特定功能的机械与微电子要素组成的有机整体，具有满足人们使用要求的功能（目的功能）。根据不同的使用目的，要求系统能对输入的物质、能量和信息（即工业三大要素）进行某一处理，输出所需要的物质、能量和信息。

因此，系统必须具有以下三大“目的功能”：①变换（加工、处理）功能；②传递（移动、输送）功能；③储存（保持、积蓄、记录）功能。图 22.1-3 为系统目的功能图。以物料搬运、加工为主，输入物质（原料、毛坯等）、能量（电能、液能、气能等）和信息（操作及控制指令等），经过加工处理，主要输出改变了位置和形态的物质的系统（或产品），称为加工机。例如：各种机床（切削、锻压、铸造、电加工、焊接设备、高频淬火等）、交通运输机械、食品加工机械、起重机械、纺织机械、印刷机械、轻工机械等。

以能量转换为主，输入能量（或物质）和信息，输

出不同能量(或物质)的系统(或产品),称为动力机。其中输出机械能的为原动机,例如电动机、水轮机、内燃机等。

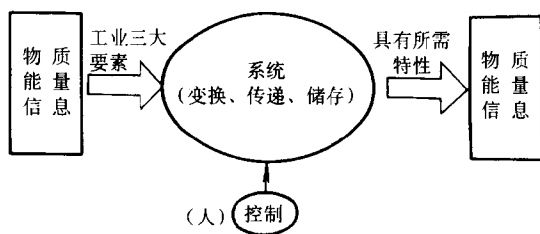


图 22.1-3 系统目的功能

以信息处理为主,输入信息和能量,主要输出某种信息(如数据、图像、文字、声音等)的系统(或产品),称为信息机。例如各种仪器、仪表、电子计算机、电报传真机以及各种办公机械等。

不管哪类系统(或产品),系统内部必须具备图 22.1-4 所示的五种内部功能,即主功能、动力功能、检测功能、控制功能、构造功能。其中“主功能”是实

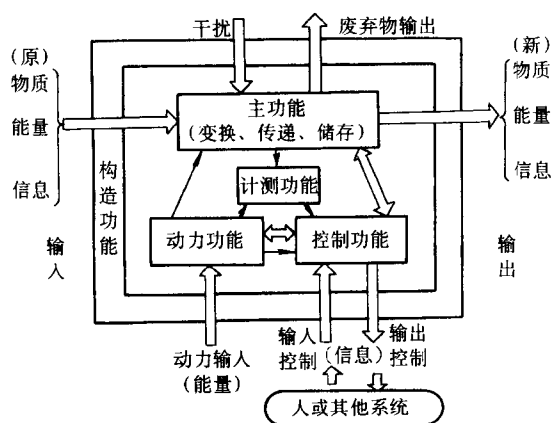


图 22.1-4 系统内部功能

现系统“目的功能”直接必需的功能,主要是对物质、能量、信息或其相结合进行变换、传递和存储。“动力功能”是向系统提供动力、让系统得以运转的功能。“检测功能和控制功能”的作用是根据系统内部信息和外部信息对整个系统进行控制,使系统正常运转,实施“目的功能”。而“构造功能”则是使构成系统的子系统及元、部件维持所定的时间和空间上的相互关系所必需的功能。从系统的输入/输出来看,除有主功能的输入/输出之外,还需要有动力输入和控制信息的输入/输出。此外,还有因外部环境引起的干扰输入以及非目的性输出(如废弃物等)。例如汽车的废气和噪音对外部环境影响,从系统设计开始就应予以考虑。图 22.1-5 是 CNC 机床内部功能构成实例。

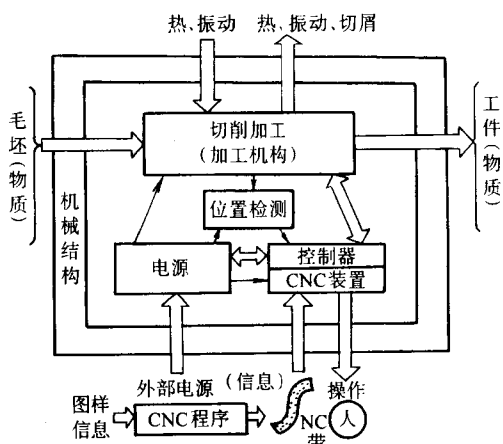


图 22.1-5 CNC 机床的内部功能构成

综上所述,机电一体化系统的五大要素及其相应的五大功能如图 22.1-6 所示。

机电一体化系统五大要素实例如图 22.1-7 所示。

表 22.1-1 列出了机电一体化系统构成要素与人体构成要素的对应关系。

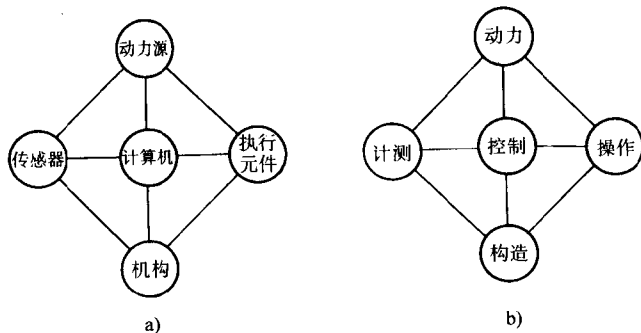


图 22.1-6 机电一体化系统的五大要素与功能

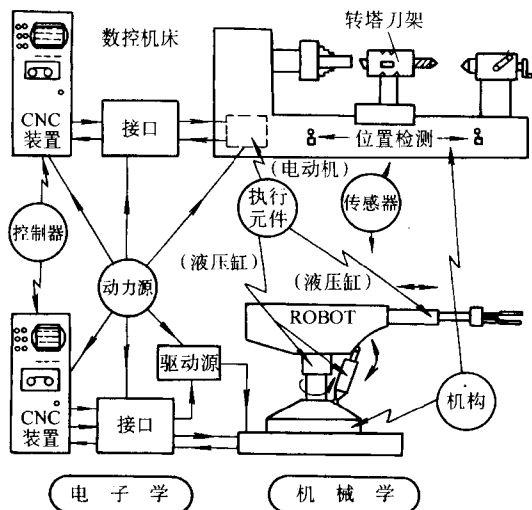


图 22.1-7 机电一体化系统五大要素实例

表 22.1-1 机电一体化系统要素与人体要素的对应关系

机电一体化系统要素	功 能	人体要素
控制器 (计算机等)	控制 (信息存储 处理 传送)	头脑
检测传感器	计测 (信息收集与变换)	感官
执行元件	驱动 (操作)	肌肉
动力源	提供动力 (能量)	内脏
机构	构造	骨骼

2 机电一体化系统构成要素的联接

机电一体化系统由许多要素或子系统构成,各要素或子系统之间必须能顺利进行物质、能量和信息的传递与交换,为此,各要素或各子系统相接处必须具备一定的联系条件,这些联系条件就可称为接口(interface)。如图 22.1-8 所示,从系统外部看,机电一体化系统的输入/输出是与入、自然及其它系统之间的接口;从系统内部看,机电一体化系统是由许多接口将系统构成要素的输入/输出联系为一体的系统。从这一观点出发,系统的性能在很大程度上取决于接口的性能,各要素或各子系统之间的接口性能就成为综合系统性能好坏的决定性因素。机电一体化系统是机械、电子和信息等功能各异的技术融为一体的综合系统,其构成要素或子系统之间的接口极为重要,在某种意义上讲,机电一体化系统设计就是接口设计。

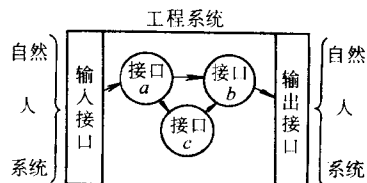


图 22.1-8 系统内部与外部接口

广义的接口功能有两种,一种是输入/输出;另一种是变换、调整。根据接口的变换、调整功能,可将接口分成以下四种:

- 1) 零接口,不进行任何变换和调整、输出即为输入,仅起连接作用的接口,称为零接口。例如:输送管、插头、插座、接线柱、传动轴、导线、电缆等。
- 2) 无源接口,只用无源要素进行变换、调整的接口,称为无源接口。例如:齿轮减速器、进给丝杠、变压器、可变电阻器以及透镜等。
- 3) 有源接口,含有有源要素、主动进行匹配的接口,称为有源接口。例如:电磁离合器、放大器、光电耦合器、D/A、A/D 转换器以及力矩变换器等。
- 4) 智能接口,含有微处理器,可进行程序编制或可适应性地改变接口条件的接口,称为智能接口。例如:自动变速装置,通用输入/输出 LSI (8255 等通用 I/O LSI)、GP-IB 总线、STD 总线等。

根据接口的输入/输出功能,可将接口分为以下四种:

- 1) 机械接口,由输入/输出部位的形状、尺寸 精度、配合、规格等进行机械联接的接口。例如:联轴节、管接头、法兰盘、万能插口、接线柱、插头与插座及音频盒等。

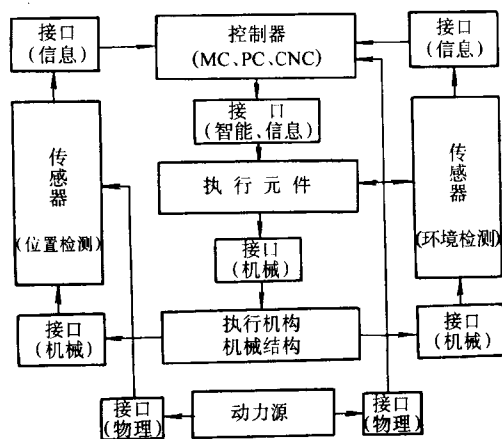


图 22.1-9 机电一体化系统组成要素之相互联系

- 2) 物理接口,受通过接口部位的物质、能量与信息的具体形态和物理条件约束的接口,称为物理接口。例如:受电压、频率、电流、电容、传递扭矩的大小、

气体成分（压力或流量）约束的接口。

3) 信息接口, 受规格、标准、法律、语言、符号等逻辑、软件约束的接口, 称为信息接口。例如: GB、ISO、ASCII 码、RS232C、FORTRAN、C、C++ 等。

4) 环境接口, 对周围环境条件（温度、湿度、磁场、火、振动、放射能、水、气、灰尘）有保护作用和隔绝作用的接口, 称为环境接口。例如: 防尘过滤器、防水连接器、防爆开关等。

图 22.1-9 为机电一体化系统各构成要素之间的相互联系图。

3 机电一体化系统的评价

系统的价值通常用表 22.1-2 所示的方法来评价。但是, 机电一体化的目的是提高系统的附加价值, 所以附加价值就成了机电一体化系统的综合评价指标。机电一体化系统的主要评价内容如图 22.1-10 所示。如果系统的目的功能未定, 那么其具体的评价项目也不好定, 此时系统的高性能化就成为主要评价项目。高可靠性和低价格化当然是对系统整体而言的。

表 22.1-2 系统的内部功能与系统的价值

系统内部功能	评价参数	系统的价值	
		高	低
主功能	系统误差	小	大
	抗干扰能力	强	弱
	废弃物输出	少	多
	变换效率	高	低
动力功能	输入能量 能 源	少 内 装	多 外 设
控制功能	控制输入/输出个数 手动操作	多 少	少 多
构造功能	尺寸、重量 强 度	小、轻 高	大、重 低
计测功能	精 度	高	低

机电一体化系统的一大特点是由于机电一体化系统的微电子装置取代了人对机械的绝大部分的控制功能, 并加以延伸和扩大, 克服了人体能力的不足和弱点。另一大特点是节省能源和材料消耗。这些特点正是实现机电一体化系统高性能化、智能化、省能省资源化及轻薄短小化的重要原因, 也正是对工业三大要素（物质、能量和信息）的具体贡献, 如图 22.1-11 所示, 机电一体化的三大效果是与我国工业发展方向相一致的, 也是我国机电一体化技术革命发展的重要原

因。

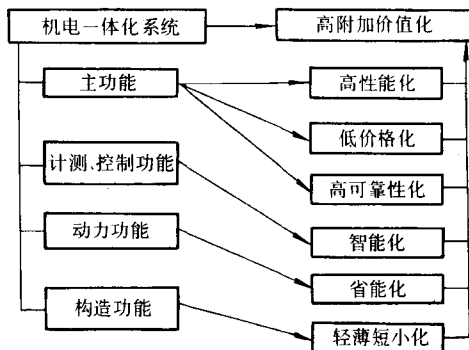


图 22.1-10 机电一体化系统的评价内容

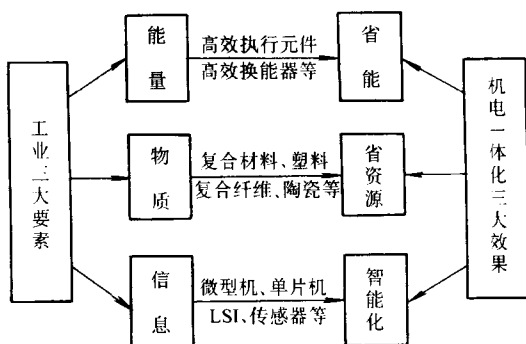


图 22.1-11 工业三大要素与机电一体化三大效果

4 机电一体化工程与系统工程

给定机电一体化系统（或产品）“目的功能”与“规格”后, 机电一体化技术人员利用机电一体化技术进行设计、制造的整个过程为机电一体化工程。实施机电一体化工程的结果, 既有新型的机电一体化产品, 也有习惯上所说的机械产品、电子产品, 如图 22.1-12 所示。

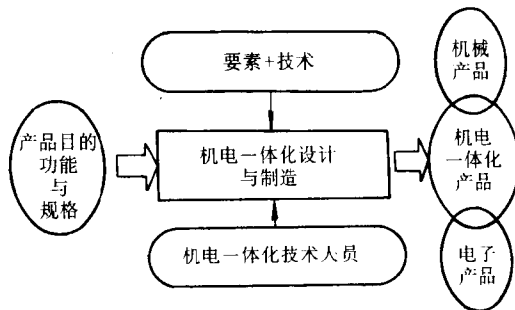


图 22.1-12 机电一体化工程

系统工程是系统科学的一个工作领域, 而系统科学本身是一门关于“针对目的要求而进行合理的方法学处理”的边缘科学。系统工程的概念不仅包括“系

统”，即具有特定功能的、相互之间具有有机联系的许多要素所构成的一个整体，也包括“工程”，即产生一定效能的方法。1978年，钱学森就曾指出：“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的科学方法”。系统工程是以大系统为对象、以数学方法和大型计算机等为工具，对系统的构成要素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析、设计、制造和服务，从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目标，以便充分发挥人力、物力和财力，通过各种组织管理技术，使局部与整体之间关系协调配合，实现系统的综合最优化。系统工程是数学方法和工程方法的汇集。

机电一体化工程是系统工程在机电一体化工程中的具体应用。机电一体化技术是从系统工程观点出发，应用机械、微电子等有关技术，使机械、电子有机结合，实现系统或产品整体最优的综合性技术。小型的生产、加工系统，即使是一台机器，也都是由许多要素构成的。为了实现其“目的功能”，还需要从系统角度出发，不拘泥于机械技术或电子技术，并寄希望于能够使各种功能要素构成最佳结合的柔性技术与方法。机电一体化工程就是这种技术和方法的统一。表22.1-3为系统工程与机电一体化工程的特点。

表 22.1-3 系统工程与机电一体化工程

	系统工程	机电一体化工程
产生年代	50年代(美国)	70年代(日本)
对象	大系统	小系统 机器
基本思想	系统概念	机电一体化概念 (系统及接口概念)
技术方法	利用软件进行 优化、仿真鉴定、 检查等	硬件的超精密定位、超精密 加工、优化设计、微机控制及 仿真等
信息处 理系统	大型计算机	微型计算机
实例	阿波罗计划 银行在线系统 日本新干线	CNC 机床 ROBOT (机器人) VTR (录像机)、 摄像机等
共同点	应用计算机 具有实用性、综合性、复合性	

5 机电一体化系统的设计思想及设计类型

(1) 机电一体化系统设计的考虑方法

机电一体化系统(或产品)的主要特征是自动化操作。因此，设计人员应从其通用性、耐环境性、可靠性、

经济性的观点进行综合分析，使系统(或产品)充分发挥机电一体化的三大效果。为充分发挥机电一体化的三大效果，使系统(或产品)得到最佳性能，一方面要求设计机械系统时应选择与控制系统的电气参数相匹配的机械系统参数，同时也要求设计控制系统时，应根据机械系统的固有结构参数来选择和确定电气参数，综合应用机械技术和微电子技术，使二者密切结合、相互协调、相互补充，充分体现机电一体化的优越性。

机电一体化系统设计方法通常有：机电互补法、结合(融合)法和组合法。其目的是综合运用机械技术和微电子技术各自的特长，设计最佳的机电一体化系统。

1) 机电互补法，也可称为取代法。该方法的特点是利用通用或专用电子部件取代传动机械产品(或系统)中的复杂机械功能部件或功能子系统，以弥补其不足。如在一般的工作机中，用可编程逻辑控制器(PLC)或微型计算机来取代机械式变速机构、凸轮机构、离合器、脱落蜗杆等机构，代替插销板、拨码盘、步进开关、时间继电器等，以弥补机械技术的不足，不但能大大简化机械结构，而且还可提高系统(或产品)的性能和质量。这种方法是改造传统机械产品和开发新型产品常用的方法。

2) 结合(融合)法，它是将各组成要素有机结合为一体构成专用或通用的功能部件(子系统)，其要素之间机电参数的有机匹配比较充分。某些高性能的机电一体化系统(或产品)，如激光打印机的主扫描机构——激光扫描镜，其扫描镜转轴就是电机的转子轴。这是执行元件与执行机构结合的一例。在大规模集成电路和微机不断普及的今天，随着精密机械技术的发展，完全能够设计出执行元件、执行机构、检测传感器、控制与机体等要素有机地融为一体的机电一体化新产品(或系统)。

3) 组合法，它是将结合法制成的功能部件(或子系统)、功能模块，像积木那样组合成各种机电一体化系统，故称组合法。例如将工业机器人各自由度(伺服轴)的执行元件、执行机构、检测传感元件和控制等组成机电一体化的功能部件(或子系统)，可用于不同的关节，组成工业机器人的回转、伸缩、俯仰等各种功能模块系列，从而组合成结构和用途不同的工业机器人。在新产品(或系统)系列及设备的机电一体化改造中应用这种方法，可以缩短设计与研制周期、节约工装设备费用，且有利于生产管理、使用和维修。

(2) 机电一体化系统(或产品)的设计类型

机电一体化产品的设计类型大致有以下三种：

1) 开发性设计，是没有参照产品的设计，仅仅是根据抽象的设计原理和要求，设计出在质量和性能方面满足目的要求的产品。最初的录像机、摄像机、电视

机的设计就属于开发性设计。

2) 适应性设计,是在总的方案原理基本保持不变的情况下,对现有产品进行局部更改,或用微电子技术代替原有的机械结构或为了进行微电子控制对机械结构进行局部适应性设计,以使产品的性能和质量增加某些附加价值。例如:电子式照相机采用电子快门、自动曝光代替手动调整,使其小型化、智能化;汽车的电子式汽油喷射装置代替原来的机械控制汽油喷射装置,电子式缝纫机使用电子控制就属于适应性设计。

3) 变异性设计,是在设计方案和功能结构不变的情况下,仅改变现有产品的规格尺寸,使之适应于量的方面有所变更的要求。例如,由于传递扭矩或速比发生变换而重新设计传动系统和结构尺寸的设计,就属于变异性设计。

机电一体化领域多变的设计类型,要求我们摸索一套现代化设计的普遍规律,以适应不断更新换代的需要。所有机电一体化设计都是为了获得用来构成事物(产品或系统)的有用信息。因此必须从信息载体中提取可感知的或不可感知的、真伪难辨的信息,促进机械—电子的有机结合,满足人们的多样化需求。

6 机电一体化系统设计与现代设计方法

(1) 设计程序

设计中一般采用三阶段法,即总体设计、部件设计和零件设计或初步设计、技术设计与工艺设计。在试验性设计与计算机辅助设计(CAD)中,多采用既分阶段又平行兼顾的设计即并行设计,以便相互协调。

总体设计程序为:

①明确设计思想;②分析综合要求;③划分功能模块;④决定性能参数;⑤调研类似产品;⑥拟定总体方案;⑦方案对比定型;⑧编写总体设计论证书。

总体设计中应注意的问题有:

①以机电互补原则进行功能划分,明确哪些功能由机械技术实现,哪些功能由电子技术的硬件和软件实现,以利于简化机械结构,发挥机电一体化效果;②用图表说明功能要求与动作顺序要求;③分析产品专用性与批量;④重点明确产品的简要特性;⑤分析产品的自动化程度及其适用性;⑥环境条件要求;⑦动力源特性分析;⑧机、电、液(气)传动的最佳匹配;⑨可靠性分析;⑩结构尺寸及空间布置分析;⑪特殊功能分析,低速稳定性、抖动要求,快速响应性与定位精度要求等。

(2) 设计准则

设计准则主要考虑人、机、材料、成本”等因素,而产品的可靠性、适用性与完善性设计最终可归结于,

在保证目的功能要求与适当寿命的前提下不断降低成本。以降低成本为核心的设计准则枚不胜数。产品成本的高低,70%决定于设计阶段,因此,在设计阶段可从新产品和现有产品改型两方面采取措施,一是从用户需求出发降低使用成本,二是从制造厂的立场出发降低设计与制造成本。从用户需求出发就是减少综合工程费用,它包括为了让产品在使用保障期内无故障地运行而提高功能率,延长MTBF(平均故障间隔,即到产品发生故障为止,或从一个故障排除后到下一个故障发生时的平均时间),减少因故障停机给用户造成的损失,进一步提高产品的工作能力。

(3) 设计规律

总结一般机械系统的设计,具有以下规律:根据设计要求首先确定离散元素间的逻辑关系,然后研究其相互间的物理关系,这样就可根据设计要求和手册确定其结构关系,最终完成全部设计工作。其中确定逻辑关系阶段是关键,如逻辑关系不合理,其设计必然不合理。在这一阶段可分二个步骤进行,首先进行功能分解,确定逻辑关系和功能结构,然后建立其物理模型、确定其物理作用关系。所谓功能就是使元素或子系统的输出满足设计要求。一般来说,不能用某种简单结构一下子满足总功能要求。这就需要进行功能分解,总功能可分解成若干子功能,子功能还可以进一步分解,直到功能元素。将这些子功能或功能元素按一定逻辑关系连接,来满足总功能的要求,这样就形成所谓功能结构。

功能结构的基本形式一般可分为以下三种:链状结构(串联),平行结构(并联)以及有反馈过程的闭式结构(反馈联接)。以这三种基本形式将子功能和功能元素连接成功能结构则可和总功能等效。在进行功能分解和功能综合时,常使用现代化的一些设计方法。

从逻辑角度考虑把总功能分解并连接成功能结构,使实现功能的复杂程度大大降低,因满足比较简单的功能元素的要求比满足总功能的高度抽象要求容易得多。如果将有关功能元素列成一个矩阵形式,则可得不同连接的数种或数十种系统方案,然后根据符号逻辑运算进行优化筛选,就可得到较理想的系统方案。

(4) 现代设计方法

机电一体化系统(或产品)的种类不同,其机械系统的设计方法也不同。现代设计方法与用经验公式、图表和手册为设计依据的传统设计方法不同。它是以计算机为辅助手段进行机电一体化产品或系统设计的有效方法。其设计步骤通常是:技术预测→信号分析→科学类比→系统设计→创造性设计→因时制宜的选择各种具体的现代设计方法(相似设计法、模拟设计法、有限元设计法、可靠性设计法、动态分析设计法、优化设

计法等)→机电一体化设计质量的综合评价。

上述步骤的顺序不是绝对的,只是一个大致的设计路线。但现代设计方法对传统设计中的某些精华必须予以承认,在各个设计步骤中,应考虑传统设计的一般原则,如价值分析、造型设计、市场需求、类比原则、冗余原则、自动原则(能自动完成目的功能并具有自诊断、自动补偿、自动保护功能等)、经验原则(考虑以往经验),以及模块原则(积木式、标准化设计)等。

计算机辅助设计(CAD)是设计机电一体化产品(或系统)的有力工具。用来设计一般机械产品的CAD的研究成果,包括计算机硬件和软件,以及图像仪和绘图仪等外围设备,都可以用于机电一体化产品的设计,需要补充的不过是有关机电一体化产品设计和制造的数据、计算方法和特殊表达的形式而已。应用CAD进行一般机电一体化产品的设计时,都要涉及机械技术、电子技术和信息技术的有机结合问题,从这种意义上来说,CAD本身也是机电一体化技术的基本内容之一。

7 机电一体化系统(或产品)的设计步骤

机电一体化系统(或产品)(以工作机为主)的设计流程如图22.1-13所示,其具体说明如下。

(1) 根据目的功能确定产品规格、性能指标

工作机的目的功能,不外乎是用来改变物质的形状、状态、位置尺寸或特性,归根到底必须实现一定的运动,并提供必要的动力。其基本性能指标主要是指实现运动的自由度、轨迹、行程、精度、速度、动力、稳定性和自动化程度。用来评价机电一体化产品质量的基本指标,是那些为了满足使用要求而必须具备的输出参数:

运动参数——用来表征机器工作运动的轨迹、行程、方向和起、止点位置正确性的指标。

动力参数——用来表征机器输出动力大小的指标,如力、力矩和功率等。

品质指标——用来表征运动参数和动力参数品质的指标,例如运动轨迹和行程的精度(如重复定位精度)、运动行程和方向的可变性,运动速度的高低与稳定性,力和力矩的可调性或恒定性等。

以上基本性能指标通常要根据工作对象的性质、用户要求,有时还要通过实验研究才能确定。因此,要以能够满足用户使用要求为度,不需要追求过高的要求,在满足基本性能指标的前提下,还要考虑如下一些指标。

工艺性指标,对产品结构提出的方便制造和维修

的要求,要做到容易制造和便于维修。

“人-机工程学”指标,考虑人和机器的关系,针对人类在生产 and 生活中所表现出来的卫生、体型、生理和心理等方面对产品提出的综合性要求。例如操作方便、噪声小等。

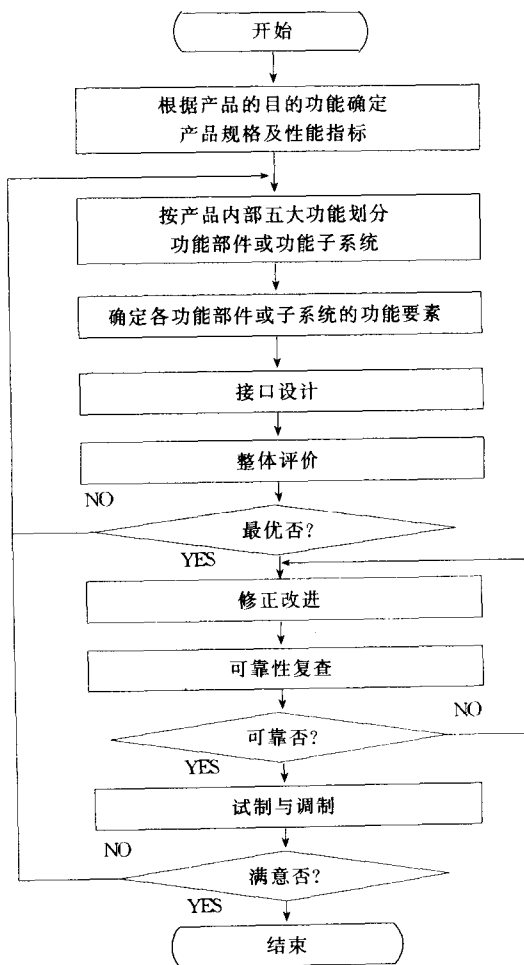


图 22.1-13 机电一体化系统设计流程

美学指标,对产品的外部性质,如仪容、风格、匀称、和谐、色泽,以及与外部环境的协调等方面提出的要求。

标准化指标,即组成产品的元、部件的标准化程度。

(2) 系统功能部件、功能要素的划分

工作机必须具备适当的结构才能满足所需性能。要形成具体结构,要以各构成要素及要素之间的接口为基础来划分功能部件、或功能子系统。复杂机器的运动常由若干直线或回转运动组合而成,在控制上形成若干自由度。因此也可以按运动的自由度划分成若干功能子系统,再按子系统划分功能部件。这种功能部件

可能包括若干组成要素。各功能部件的规格要求,可根据整机的性能指标确定。

功能要素或功能子系统的选用或设计是指特定机器的操作(执行)机构和机体,通常必须自行设计,而执行元件、检测传感元件和控制器等功能要素既可自行设计也可选购市售的通用产品。

(3) 接口的设计

接口问题是各构成要素间的匹配问题。执行元件与执行机构之间、检测传感元件与执行机构之间通常是机械接口,机械接口有两种形式,一种是执行元件与执行机构之间的联轴器和传动轴,以及直接将检测传感元件与执行元件或执行机构联结在一起的联轴器(如波纹管、十字接头)、螺钉、铆钉等,直接联结时不存在任何运动和运动变换。另一种是机械传动机构,如减速器、丝杠、螺母等;控制器与执行元件之间的驱动接口、控制器与检测传感元件之间转换接口,是电子传输、转换电路。因此,接口设计问题也就是机械技术和电子技术的具体应用问题。

(4) 综合评价(或整体评价)

根据第一章所述,对机电一体化系统(或产品)的综合评价主要是对其实现目的功能的性能、结构进行

评价。机电一体化的目的是提高产品(或系统)的附加价值,而附加价值的高低必须以衡量产品性能和结构质量的各种定量指标为依据。不同的评价指标可选用不同的评价方法。具体设计时,常采用不同的设计方案来实现产品的目的功能、规格要求和性能指标。因此,必须对这些方案进行综合评价,从中找出最佳方案。关于评价和优化的具体方法,可参考现代设计方法中的有关具体内容。

(5) 可靠性复查

机电一体化产品(或系统)既可能产生电子故障、软件故障又可能产生机械故障,而且容易受到电噪声的干扰,因此,可靠性问题显得格外突出,也是用户最关心的问题之一。在产品设计中,除采用可靠性设计方法外,还必须采取必要的可靠性措施,在产品初步完成之后,还需要进行可靠性复查和分析,以便发现问题及时改进。

(6) 试制与调试

样机试制是检验产品设计的制造可行性的重要阶段,并通过样机调试来验证各项性能指标是否符合设计要求。这个阶段也是最终发现设计中的问题以便及时修改和完善产品设计的必要阶段。

第 2 章 机械系统的部件选择与设计

1 概述

机电一体化系统的机械系统与一般的机械系统相比,除要求具有较高的定位精度之外,还应具有良好的动态响应特性,就是说响应要快、稳定性要好。一个典型的机电一体化系统,通常由控制部件、接口电路、功率放大电路、执行元件、机械传动部件、导向支承部件,以及检测传感部件等部分组成。这里所说机械系统一般由减速装置、丝杠螺母副、蜗轮蜗杆副等各种线性传动部件以及连杆机构、凸轮机构等非线性传动部件、导向支承部件、旋转支承部件、轴系及架体等机构组成。为确保机械系统的传动精度和工作稳定性,在设计中,常提出无间隙、低摩擦、低惯量、高刚度、高谐振频率、适当的阻尼比等要求。为达到上述要求,主要从以下几方面采取措施。

1) 采用低摩擦阻力的传动部件和导向支承部件,如采用滚珠丝杠副、滚动导向支承、动(静)压导向支承等。

2) 缩短传动链,提高传动与支承刚度,如用加预紧的方法提高滚珠丝杠副和滚动导轨副的传动与支承刚度;采用大扭矩、宽调速的直流或交流伺服电机直接与丝杠螺母副联接以减少中间传动机构;丝杠的支承设计中采用两端轴向预紧或预拉伸支承结构等。

3) 选用最佳传动比,以达到提高系统分辨率、减少等效到执行元件输出轴上的等效转动惯量,尽可能提高加速能力。

4) 缩小反向死区误差,如采取消除传动间隙、减少支承变形的措施。

5) 改进支承及架体的结构设计以提高刚性、减少振动、降低噪声。如选用复合材料等来提高刚度和强度,减轻重量、缩小体积使结构紧密化,以确保系统的小型化、轻量化、高速化和高可靠性。

上述的措施反映了机电一体化系统设计的特点。本章将在以下几节介绍较典型的传动部件、导向和旋转支承部件以及架体等的结构设计和选择的基本问题。

2 机械传动部件的设计与选择

2.1 机械传动部件及其功能要求

常用的机械传动部件有螺旋传动、齿轮传动、同步

带、高速带传动以及各种非线性传动部件等。其主要功能是传递转矩和转速。因此,它实质上是一种转矩、转速变换器。其目的是使执行元件与负载之间在转矩与转速方面得到最佳匹配。机械传动部件对伺服系统的伺服特性有很大影响,特别是其传动类型、传动方式、传动刚性以及传动的可靠性对机电一体化系统的精度、稳定性和快速响应性有重大影响。因此,应设计和选择传动间隙小、精度高、体积小、重量轻、运动平稳、传递转矩大的传动部件。

机电一体化系统中所用的传动机构及其传动功能如表 22-2-1 所示。从表中看出,一种传动机构可满足一项或同时满足几项功能要求。如齿轮齿条传动既可将直线运动或回转运动转换为回转运动或直线运动,又可将直线驱动力或转矩转换为转矩或直线驱动力;带传动、蜗轮蜗杆及各类齿轮减速器(如谐波齿轮减速器)既可进行升速或降速,也可进行转矩大小的变换。

表 22-2-1 传动机构及其功能

传动机构	基本功能	运动的变换			动力的变换	
	形式	行程	方向	速度	大小	形式
丝杠螺母	√				√	√
齿轮			√	√	√	
齿轮齿条	√					√
链轮链条	√					
带、带轮			√	√		
缆绳、绳轮	√		√	√	√	√
杠杆机构		√		√	√	
连杆机构		√		√	√	
凸轮机构	√	√	√	√		
摩擦轮			√	√	√	
方向节			√			
软轴			√			
蜗轮蜗杆			√	√	√	
间歇机构	√					

对工作机中的传动机构,既要求能实现运动的变

换,又要求能实现动力的变换;对信息机中的传动机构,则主要要求具有运动的变换功能,只需要克服惯性力(力矩)和各种摩擦阻力(力矩)及较小的负载即可。

随着机电一体化技术革命的发展,要求传动机构不断适应新的技术要求。具体讲有三个方面:

① 精密化——对于某种特定的机电一体化产品来说,应根据其性能的需要提出适当的精密度要求,虽然不是越精密越好,但由于要适应产品的高定位精度等性能的要求,对机械传动机构的精密度要求也越来越高。

② 高速化——产品工作效率的高低,直接与机械传动部分的运动速度相关。因此,机械传动机构能适应高速运动的要求。

③ 小型化、轻量化——随着机电一体化系统(或产品)精密化、高速化的发展,必然要求其传动机构小型轻量化,以提高运动灵敏度(响应性)、减小冲击、降低能耗。为与电子部件的微型化相适应,也要尽可能做到使机械传动部件短小轻薄化。

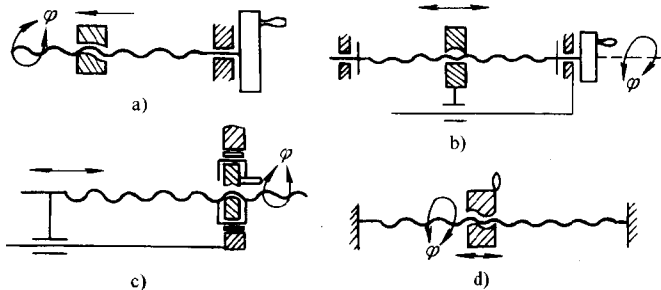


图 22.2-1 基本传动形式

只适用于行程较小的场合。

2) 丝杠转动、螺母移动如图 22.2-1b 所示,该传动形式需要限制螺母的转动,故需导向装置。其特点是结构紧凑、丝杠刚性较好。适用于工作行程较大的场合。

3) 螺母转动、丝杠移动如图 2-1c 所示,该传动形式需要限制螺母移动和丝杠的转动,由于结构较复杂且占用轴向空间较大,故应用较少。

4) 丝杠固定、螺母转动并移动如图 2-1d 所示,该传动方式结构简单、紧凑,但在多数情况下,使用极不方便,故很少应用。

此外,还有差动传动方式,其传动原理如图 22.2-2 所示。该方式的丝杠上有基本导程(或螺距)不同的(如 l_{01} 、 l_{02})两段螺纹,其旋向相同。当丝杠 2 转动时,可动螺母 1 的移动距离为 $s = n \times (l_{01} - l_{02})$,如果两基本导程的大小相差较少,则可获得较小的位移 s 。因此,这种传动方式多用于各种

2.2 丝杆螺母机构基本传动形式

丝杆螺母机构又称螺旋传动机构。它主要用来将旋转运动变为直线运动或将直线运动变为旋转运动。有以传递能量为主的(如螺旋压力机、千斤顶等)、也有以传递运动为主的(如工作台的进给丝杠)、还有调整零件之间相对位置的螺旋传动机构等。

丝杆螺母机构有滑动摩擦和滚动摩擦之分。滑动丝杆螺母机构结构简单、加工方便、制造成本低、具有自锁功能。但其摩擦阻力大、传动效率低(30%~40%)。滚动丝杠螺母机构虽然结构复杂、制造成本高,但其最大优点是摩擦阻力小、传动效率高(92%~98%),因此在机电一体化系统中得到广泛应用。

根据丝杆和螺母相对运动组合情况,其基本传动形式有以下四种,如图 22.2-1 所示。

1) 螺母固定、丝杠转动并移动如图 22.2-1a 所示,该传动形式因螺母本身起着支承作用,消除了丝杠轴承可能产生的附加轴向窜动,结构较简单,可获得较高的传动精度。但其轴向尺寸不易太长,刚性较差。因此

微动机构中。

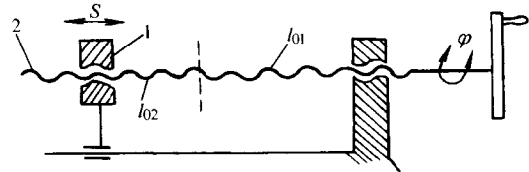


图 22.2-2 差动传动原理

2.3 滚珠丝杠传动部件

(1) 滚珠丝杠副的组成及特点

滚珠丝杠副是一种新型螺旋传动机构,其具有螺旋槽的丝杠与螺母之间装有中间传动元件——滚珠。图 22.2-3 为滚珠丝杠螺母机构组成示意图,从图可知,它由丝杠 3、螺母 2、滚珠 4 和反向器(滚珠循环反向装置)1 等四部分组成。当丝杠转动时,带动滚珠沿螺纹滚动,为防止滚珠从滚道端面掉出,在螺母的螺旋槽两端设有滚珠回程引导

装置构成滚珠的循环返回通道,从而形成滚珠流动的闭合通路。

滚珠丝杠副与滑动丝杠副相比,除上述优点外,还具有轴向刚度(即通过适当预紧可消除丝杠螺母之间的轴向间隙)、运动平稳、传动精度高;不易磨损,使用寿命长等优点。但由于不能自锁,具有传动的可逆性,在用作升降传动机构时,需要采取制动等措施。

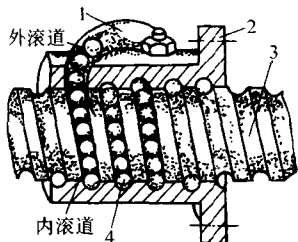


图 22.2-3 滚珠丝杠副构成原理

(2) 滚珠丝杠副的典型结构类型

滚珠丝杠副的结构类型可以从螺纹滚道的截面形状、滚珠的循环方式和消除轴向间隙的调整方法进行区别。

1) 螺纹滚道型面(法向)的形状及主要尺寸,我国生产的滚珠丝杠副的螺纹滚道有单圆弧型和双圆弧型,如图 22.2-4 所示。滚道型面与滚珠接触点之法线与丝杠轴向之垂线间的夹角 β 被称为接触角,一般为 45° 。单圆弧型的螺纹滚道的接触角随轴向载荷大小的变化而变化,主要由轴向载荷所引起的接触变形的大小而定。 β 增大时,传动效率、轴向刚度以及承载能力也随之增大。由于单圆弧型滚道加工用砂轮成型较简单,故容易得到较高的加工精度。单圆弧型面的滚道圆弧半径 R 稍大于滚珠半径 r_b 。国内采用的 R/r_b 有 1.04 和 1.11 两种。

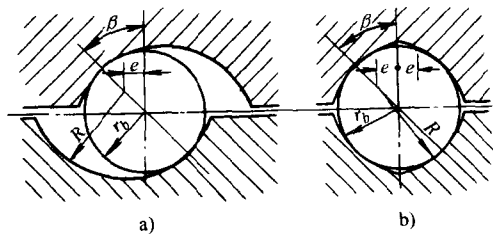


图 22.2-4 螺纹滚道法向截面形状

双圆弧型的螺纹滚道的接触角 β 在工作过程中基本保持不变。两圆弧相交处有一小空隙,可使滚道底部与滚珠不接触,并能存一定的润滑油以减少摩擦和磨损。由于加工其型面的砂轮修整和加工、检验均较困难,故加工成本较高。

2) 滚珠的循环方式,滚珠丝杠副中滚珠的循环方

式有内循环和外循环二种。

内循环。内循环方式的滚珠在循环过程中始终与丝杠表面保持接触。如图 22.2-5 所示,在螺母 2 的侧面孔内装有接通相邻滚道的反向器 4,利用反向器引导滚珠 3 越过丝杠 1 的螺纹顶部进入相邻滚道,形成一个循环回路。一般在同一螺母上装有 2~4 个滚珠用反向器,并沿螺母圆周均匀分布。内循环方式的优点是滚珠循环的回路短、流畅性好、效率高、螺母的径向尺寸也较小。其不足是反向器加工困难、装配调整也不方便。

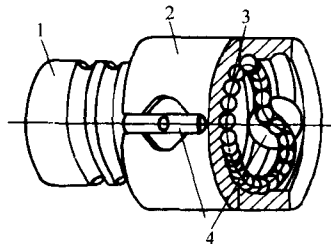


图 22.2-5 内循环

浮动式反向器的内循环滚珠丝杠副如图 22.2-6 所示。其结构特点是反向器 1 上的安装孔有 $0.01 \sim 0.015\text{mm}$ 的配合间隙,反向器弧面上加工有圆弧槽,槽内安装拱形片簧 4,外有弹簧套 2,藉助拱形片簧的弹力,如终给反向器一个径向推力,使位于回珠圆弧槽内的滚珠与丝杠 3 表面保持一定的压力,从而使槽内滚珠代替了定位键而对反向器起到自定位作用。这种反向器的优点是:在高频浮动中达到回珠圆弧槽进出口的自动对接,通道流畅、摩擦特性较好,更适用于高速、高灵敏度、高刚性的精密进给系统。

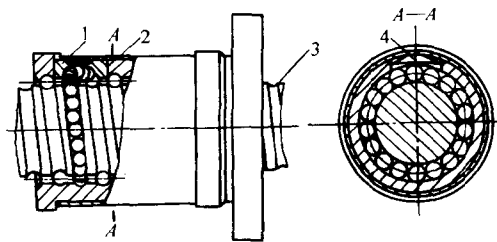


图 22.2-6 浮动式反向器的循环

外循环。外循环方式中的滚珠在循环返回时,离开丝杠螺纹滚道,在螺母体内或体外作循环运动。从结构上看,外循环有以下三种形式:

① 螺旋槽式,如图 22.2-7 所示。在螺母 2 的外圆表面上铣出螺旋凹槽,槽的两端钻出二个与螺纹滚道相切的通孔,螺纹滚道内装入二个挡珠器 4 引导滚珠 3 通过这二个孔,应用套筒 1 盖住凹槽,构成滚珠的循环回路。这种结构的特点是工艺简单、径向尺寸小、

4) 标注示例, 南京工艺装备制造厂标记方法: 40mm、基本导程为 8mm、承载滚珠圈数为 3.5 圈、C 级精度检查 1~3 项、右旋、丝杠全长 1400mm、螺纹入式法兰直筒组合双螺母垫片预紧、公称直径为 全长 1000mm。

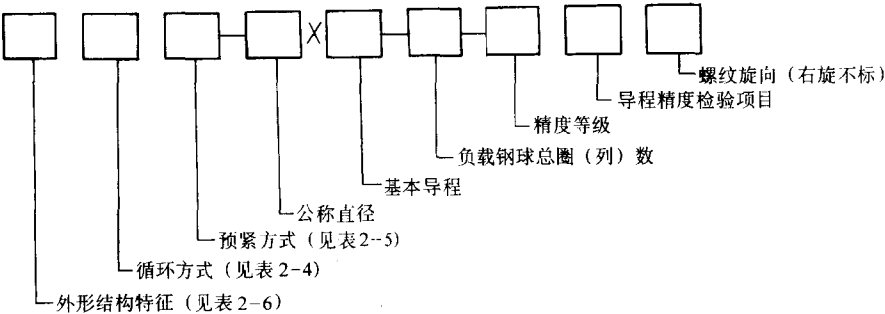


图 22.2-11 滚珠丝杠副标注方法例

表 22.2-2 滚珠丝杠副精度等级的导程误差 (JB2162.2—1982) (μm)

项目	基本导程 极限偏差	2π 弧度内 导程公差	任意 300mm 内导程公差	螺纹全长 内导程公差		导程误差曲线 的带宽公差	
代号	ΔI_0	$\delta I_{2\pi}$	δI_{300}	δI_s	K_1	δI_b	K_2
精度等级	C	±4	4	$\delta I_s = \delta I_{300} \times \left(\frac{I_s - 2I_0}{300} \right) K_1$	0.8	$\delta I_b = \delta I_{300} \times \left(\frac{I_s - 2I_0}{300} \right) K_2$	0.6
	D	±5	5		0.8		0.6
	E	±6	6		0.8		0.6
	F	—	—		0.8		0.6
	G	—	—		0.8		0.6
	H	—	—		1.0		—

注: 测量螺纹全长内导程误差时, 应在螺纹两端分别扣除 $I_0 = (2 \sim 4) l_0$ 。

表 22.2-3 导程精度选择检验项目

检验 项目号	检验内容	代号	检验项目选择标号				
			1	2	3	4	5
1	任意 300mm 螺纹长度内导程误差	ΔI_{300}	0	0	0	0	0
2	螺纹全长内导程误差	ΔI_s		0	0	0	0
3	导程误差曲线的带宽	ΔI_b			0	0	0
4	基本导程偏差	ΔI_0				0	0
5	2π 弧度内导程误差	$\Delta I_{2\pi}$					0

表 22.2-4 循环方式标记代号

循环方式			标记代号
内 循 环	浮动反向器式		F
	固定反向器式		G
外 循 环	插管式	埋入	CM
		凸出	CT
	端盖式		D
	螺旋槽式		L

表 22-2-5 预紧方式及其标记代号

预紧方式	标记代号
双螺母螺纹预紧式	L
双螺母齿差预紧式	Ch(或 C)
双螺母垫片预紧式	D
单螺母变位导程预紧式	B
单螺母无预紧方式	不标(或标 W)

表 22-2-6 型号(外型及循环方式与预紧)含义

型号 (例)	含 义
FF	内循环浮动反向器法兰单螺母无预紧
FFB	内循环浮动反向器法兰单螺母变位导程预紧
FFZD	内循环浮动反向器法兰直筒组合双螺母垫片预紧
CMF	插管埋入式法兰单螺母无预紧
CMFB	插管埋入式法兰单螺母变位导程预紧
CMFZD	插管埋入式法兰直筒组合双螺母垫片预紧
DGF	端盖式大导程法兰单螺母无预紧
DGZ	端盖式大导程直筒单螺母无预紧

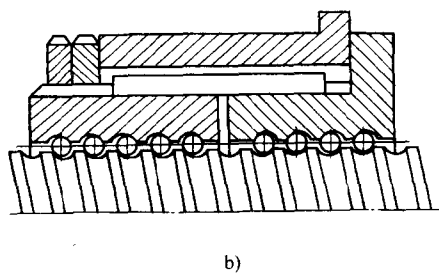
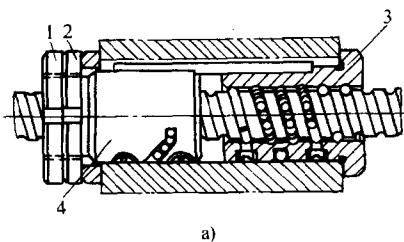


图 22.2-12 双螺母螺纹预紧式

2) 双螺母齿差预紧调整式,如图 22.2-13 所示,二个螺母的两端分别制有圆柱齿轮 3,二者齿数相差一个齿,通过二端的二个内齿轮 2 与上述圆柱齿轮相啮合并用螺钉和定位销固定在套筒 1 上。调整时先取下二端的内齿轮 2,当二个滚珠螺母相对于套筒同一方向转动同一个齿后固定后,则一个滚珠螺母相对于另一个滚珠螺母产生相对角位移,使二个滚珠螺母产生相对移动,从而消除间隙并产生一定的预紧力。其特点是可实现定量调整即可进行精密微调(如 0.002mm),使用中调整较方便。

3) 双螺母垫片调整预紧式,如图 22.2-14 所示,调整垫片 1 的厚度,可使两螺母 2 产生相对位移,以达到消除间隙、产生预紧拉力之目的。其特点是结构简单

汉江机床厂标记:“FCB-40×5-3-E2 左”表示法兰凸出式插管型、变位导程预紧、公称直径 40mm、基本导程 5mm、承载滚珠圈数为 3 圈、E 级精度、检查 1~2 项、左旋。

5) 推荐采用的精度等级,数控机床、精密机床和精密仪器等用于开环和半闭环进给系统,根据定位精度和重复定位精度的要求可选用 C、D、E (1、2、3) 级,一般动力传动可选 F、G (4、5) 级,全闭环系统可选 D、E、F (2、3、4) 级。

(5) 滚珠丝杠副轴向间隙调整与预紧

滚珠丝杠副在负载时,其滚珠与滚道面接触点处将产生弹性变形。换向时,其轴向间隙会引起空回,这种空回是非连续的,既影响传动精度,又影响系统的动态性能。单螺母丝杠副的间隙消除相当困难。实际应用中,常采用以下几种调整预紧方法。

1) 双螺母螺纹预紧调整式,如图 22.2-12 所示,其中,螺母 3 的外端有凸缘,而螺母 4 的外端虽无凸缘,但制有螺纹,并通过二个圆螺母固定。调整时旋转圆螺母 2 消除轴向间隙并产生一定的预紧力,然后用锁紧螺母 1 锁紧。预紧后两个螺母中的滚珠相向受力(如图 b 所示),从而消除轴向间隙。其特点是结构简单、刚性好、预紧可靠,使用中调整方便,但不能精确定量地调整。

刚度、预紧可靠,但使用中调整不方便。

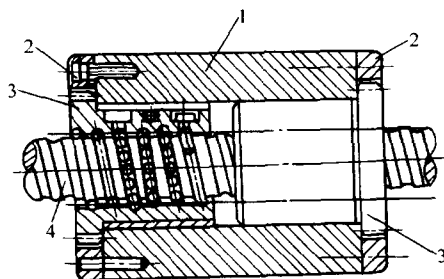


图 22.2-13 双螺母齿差预紧式

4) 弹簧式自动调整预紧式,如图 22.2-15 所示,双螺母中一个活动另一个固定,用弹簧使其之间产生轴向位移并获得预紧力。其特点是能消除使用过程中