

# 伺服系统设计指导

金钰

胡祐德

李向春

编著



北京理工大学出版社

# 伺服系统设计指导

金 钰 胡祐德 李向春 编著

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本教材为电气伺服系统设计的指导教材。

本教材内容分两大部分：连续伺服系统设计和数字伺服系统设计。连续伺服系统设计包括连续伺服系统执行元件、检测元件的选择，静、动态设计计算及功率放大器的设计计算。数字伺服系统的设计包括数字控制器的软硬件设计，数字伺服系统的轴-角表示、检测以及轴角-数字变换器的应用等。根据编著者教学和科研实践，第7章用实例说明了连续伺服系统和数字伺服系统的设计。由于控制规律的复杂和高速、高性能控制的需要，本教材最后介绍了TMS320C24xDSP控制器。

本教材适用于自动控制专业、工业自动化专业、机-电一体化专业的大学生应用，也适用于从事自动控制工程的教学人员和科技人员设计伺服系统和自动控制系统时参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

伺服系统设计指导/金钰等编著. —北京：北京理工大学出版社，2000  
ISBN 7-81045-658-X

I. 伺… I. 金… Ⅲ. 伺服系统-设计-教材 N. TP275

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第70715号

责任印制：王 军 责任校对：陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行  
(北京市海淀区白石桥路7号)  
邮政编码100081 电话(010)68912824  
各地新华书店经售  
国防科工委印刷厂印刷

\*

787毫米×1092毫米 16开本 16.75印张 399千字  
2000年2月第1版 2000年2月第1次印刷  
印数：1—2000册 定价：25.50元

※图书印装有误，可随时与我社退换※

# 前 言

伺服系统设计是工程实践问题。但正确的设计计算可以指导具体的工程实践少走弯路,减少盲目性。为此,工程技术人员应该掌握基本的设计计算方法。这是理论与实践相结合的桥梁。

配合《反馈控制系统》、《计算机控制系统》的教学,更为配合《反馈控制系统》的课程设计及自动控制系统专业学生的毕业设计,就电气伺服系统设计问题编写此设计指导。

本书内容分两部分:连续伺服系统设计和数字伺服系统设计。

连续伺服系统设计包括连续伺服系统主要元件的选择、计算、典型线路的设计、常用元件型号产品的技术数据,伺服系统和调速系统的设计计算举例,使初学者把所学理论与解决工程实践的技术结合起来,求得举一反三的效果。

本书以介绍反馈控制系统的设计为主,适当介绍复合控制系统的设计,以适应现代工程实践的需要。

伺服系统设计主要是工程实践。本书只介绍所选器件的基本型号及技术参数。结合《反馈控制系统》课程的课程设计实践环节的要求,使自动控制专业、工业自动化专业的大学生,综合运用所学基础课程和有关专业知识,联系工程设计和实践要求,进行控制工程师的基本技能训练,使初学者掌握控制系统的计算方法和步骤。本书不可能介绍控制系统设计整个工程实践的各个方面,对初学者只起参考作用。

本书是配合教材编写的教学参考书,故有关的理论不再重复。图表及经验数据等本书不可能是包罗万象,这里仅就常用的小功率电气伺服系统和调速系统作简要介绍。

电气伺服系统和调速系统的设计计算,通常包含稳态计算、系统数学模型的建立和动态计算几个部分。设计从稳态计算开始,到动态计算结束。从而提供了一个完整的设计过程。

数字化是技术发展的必然趋势。现代伺服系统朝着高精度、快速方向发展,朝着功能强和更复杂的方向发展。为适应工业和国防现代化建设的需要,学习设计数字伺服系统是很重要的,也是基本的专业技能。本设计指导的第二部分是有关数字伺服系统设计的参考内容。

数字伺服系统的设计是基于连续伺服系统设计的基础,进一步解决实用数字控制器设计问题和解决数字伺服系统中的特殊问题。例如轴-角编码,轴角-数字转换,数-模和数字-轴角转换,采样周期选择,控制规律选择,控制软件设计等问题。除与连续伺服系统中同样选择和计算的部件外,大多数是接口和逻辑设计及选择合适的控制规律并实现软件编程问题。

数字信号处理控制器(DSP 控制器),继承了数字信号处理器(DSP)核心并将接口集成于单一器件之内,使得应用方便、造价低廉。本书第 8 章介绍了 TMS320 家族中的新成员 TMS320C24x 数字信号处理器控制器。应用优良的器件、先进的控制算法,精心设计出高性能的伺服控制系统是我们的希望。

本书是根据编者在教学、科研实践基础上,根据教学、科研中遇到和解决的问题编写的,不可能很全面。由于编者水平有限,经验和体会不一定完全正确,望请诸者批评指正。编者在此表示感谢。

本书适用于自动控制专业、工业自动化专业、机电一体化专业的大学生应用，也适用于上述专业的研究生设计实践中应用，及从事上述专业领域工作的工程技术人员参考。

本书第1章，第2章，第4章和3.1、3.3、7.2节由胡祐德执笔；3.2和7.1节由李向春执笔；第5章，第6章，第8章，2.4、3.4、3.5、7.3、和7.4节由金钰执笔。全书由金钰统编。书稿经北京工业大学肖春林教授仔细审阅，提出了许多宝贵意见。在此向肖春林教授表示衷心的感谢。并向所有给予关心和支持的同志表示感谢。

编著者

# 目 录

<b>第 1 章 伺服系统设计概述</b> .....	( 1 )
1.1 伺服系统及其基本构成 .....	( 1 )
1.2 对伺服系统的一般技术要求 .....	( 2 )
1.3 伺服系统设计的内容和步骤 .....	( 3 )
1.4 伺服系统设计方案的选择问题 .....	( 4 )
<b>第 2 章 执行电动机的选择</b> .....	( 6 )
2.1 执行电动机选择的基本依据 .....	( 6 )
2.2 单轴传动的执行电机选择 .....	( 9 )
2.3 多轴传动的执行电机选择 .....	( 13 )
2.4 步进电动机的选择 .....	( 17 )
<b>第 3 章 功率放大装置的设计与选择</b> .....	( 30 )
3.1 控制两相异步电动机的功率放大装置 .....	( 30 )
3.2 直流电动机的功率驱动 .....	( 32 )
3.3 直流脉冲宽度调制 (PWM) 线路 .....	( 43 )
3.4 无换向器电动机的功率驱动 .....	( 44 )
3.5 步进电动机的驱动 .....	( 53 )
<b>第 4 章 连续伺服系统中信号的检测、放大、转换及有源校正电路</b> .....	( 64 )
4.1 伺服系统中测角(位移)装置的设计 .....	( 64 )
4.2 伺服系统中角速度的检测 .....	( 66 )
4.3 伺服系统中的信号转换电路 .....	( 67 )
4.4 线性集成放大器在伺服系统中的应用 .....	( 73 )
<b>第 5 章 数字伺服系统设计</b> .....	( 95 )
5.1 数字伺服系统 .....	( 95 )
5.2 两种不同输入方式的数字伺服系统 .....	( 96 )
5.3 数字伺服系统中轴角的表示 .....	( 99 )
5.4 数字伺服系统中反馈信号的获取 轴角编码器 .....	( 102 )
5.5 速度单元及对速度单元的控制 .....	( 116 )
5.6 数字伺服系统中的状态与控制信号 .....	( 124 )
5.7 采样周期的选择 .....	( 128 )
5.8 数字伺服系统控制规律的选择 .....	( 129 )
5.9 数字伺服系统中的机械传动装置 .....	( 133 )
<b>第 6 章 数字控制器的设计</b> .....	( 146 )
6.1 伺服系统对数字控制器的要求 .....	( 146 )
6.2 微处理器的选择 .....	( 147 )
6.3 总线的选择 .....	( 154 )
6.4 数字控制器存储器配置 .....	( 165 )
6.5 并行接口的扩展 .....	( 169 )
6.6 实时时钟 定时器与计数器 .....	( 170 )

6.7	数字控制器的人-机接口 .....	(170)
6.8	中断控制 .....	(170)
6.9	伺服系统与上位机 .....	(176)
6.10	现场可编程外围芯片(PSD) .....	(187)
6.11	数字控制器的程序设计 .....	(187)
<b>第7章</b>	<b>设计实例 .....</b>	<b>(190)</b>
7.1	晶闸管电动机双闭环直流调速系统设计举例 .....	(190)
7.2	连续伺服系统设计举例 .....	(195)
7.3	步进电动机开环控制系统实例 数字控制器设计 .....	(206)
7.4	高精度快速数字伺服系统设计 .....	(214)
<b>第8章</b>	<b>数字信号处理器 .....</b>	<b>(221)</b>
8.1	数字信号处理器 .....	(221)
8.2	TMS320 系列 DSP .....	(224)
8.3	TMS320C24x DSP 控制器 .....	(229)
<b>附录一</b>	<b>电气图常用图形及文字符号表 .....</b>	<b>(258)</b>
<b>附录二</b>	<b>电气图常用图形及文字符号图 .....</b>	<b>(259)</b>
<b>参考书目</b>	<b>.....</b>	<b>(261)</b>

# 第 1 章 伺服系统设计概述

## 1.1 伺服系统及其基本构成

伺服系统(Servo system)亦称随动系统,属于自动控制系统中的一种,它用来控制被控对象的转角(或位移),使其能自动地、连续地、精确地复现输入指令的变化规律。它通常是具有负反馈的闭环控制系统,有的场合也可以用开环控制来实现其功能。

伺服系统服务的对象种类繁多,如机器人手臂各关节的运动控制,仿型铣床中铣刀与被加工工件之间相对运动轨迹的控制,电弧炼钢炉中电极的位置控制,跟踪雷达天线俯仰角、方位角的自动控制、电动控制阀门的位置控制、计算机的磁盘、光盘的驱动控制……等等,都需要伺服系统。伺服系统应成为所服务对象的有机组成部分,尽管各对象的机械结构、传动形式多种多样,对伺服系统的要求也有差别,但共同的一点是带动对象按需要的规律作机械运动。

伺服系统是由多种元、部件联接组成的,如图 1-1 所示,其中图(a)表示用步进电机及其驱动线路构成的开环伺服系统,图(b)则表示的闭环伺服系统,图中表示的各部分都是要传递信号参与控制的。本书将从系统总体出发,讨论各部分的设计、选择、相互间的联接与匹配并构成系统的问题。就实际伺服系统而言,除包含图中所示各部分外,还应该有为各部分提供能源的电源设备,以及系统的控制、检测显示……等装置。

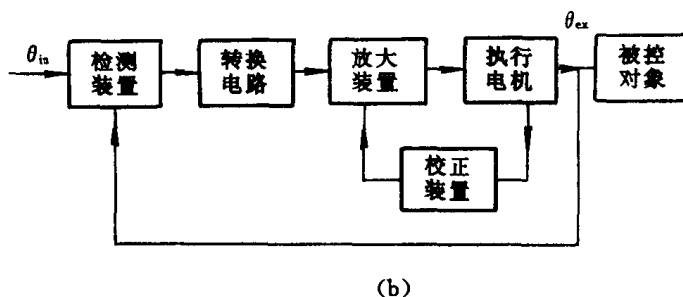
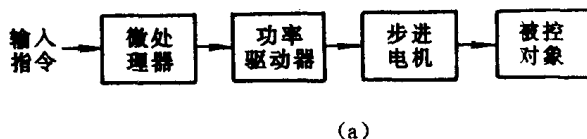


图 1-1 伺服系统的方块图

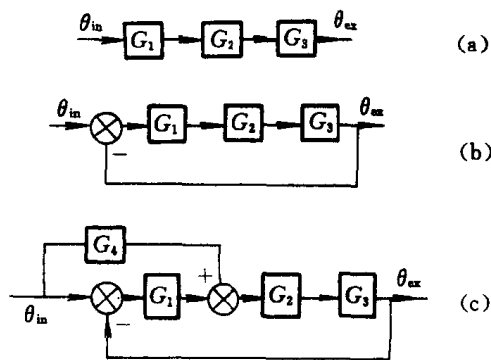


图 1-2 伺服系统的控制方式

从伺服系统组成元件的性质看,有全部由电气元件组成的电气伺服系统,有电气元件与液压元件组合成的电气-液压伺服系统,有电气元件与气动元件组合成的电气-气动伺服系统。本书仅以电气伺服系统为例,介绍系统的设计方法,并不失一般性。

伺服系统常用的控制方式可见图 1-2,其中图(a)为开环控制,图(b)为闭环控制,图(c)为开环与闭环的组合控制形式,简称复合控制。

本书 2.4 节和 3.5 节将讨论的步进电机作执行元件的开环伺服系统的设计问题,其余各章着重讨



论闭环伺服系统的设计问题(兼顾闭环调速系统——亦称速度伺服系统),至于复合控制伺服系统的设计,主要介绍它与闭环伺服系统不同的部分,在第7章通过设计举例予以讨论。

## 1.2 对伺服系统的一般技术要求

工程上对伺服系统的技术要求很具体,由于系统所服务的对象不同、用途殊异,因而对系统的要求也有差别。但可将技术要求归纳成以下几个方面:

- ①对系统基础性能的要求,包括对系统稳态性能和动态性能两方面的要求;
- ②对系统工作体制、可靠性、使用寿命等方面的要求;
- ③系统需适应的工作环境条件:如温度、湿度、防潮、防化、防辐射、抗振动、抗冲击……等方面的要求;

④对系统体积、容量、结构外型、安装特点等方面的限制;

⑤对系统制造成本、运行的经济性、标准化程度、能源条件……等方面的要求。

这些问题涉及面很广,限于篇幅,本指导只能针对对系统的基本性能要求,讨论系统设计的基本方法,为此,先将伺服系统稳态性能和动态性能的一般性要求简列如下。

伺服系统的稳态性能要求有:

①系统静误差  $e_s$  (其量纲是角度或长度)。对闭环控制的伺服系统而言,按线性理论分析应该是无静差系统,但实际系统的检测装置分辨率有限,系统带动被控对象运动总会承受干摩擦,这些都造成实际系统有静误差  $e_s$  存在。

②系统速度误差  $e_v$  (角度或长度)。系统处于等速跟踪状态时,系统输出轴与其输入轴作相等的匀速运动,在同一时刻,输出轴与输入轴之间的转角差。

③系统最大跟踪误差  $e_m$  (角度或长度)。系统输出轴在一定的速度和加速度范围内追随输入轴运动时,在同一时刻两轴之间最大的差值。

④系统最低平稳跟踪角速度  $\Omega_{\min}$  (或速度  $V_{\min}$  或转速  $n_{\min}$ ),是系统输出轴平稳追随输入轴作匀速运动时,系统输出轴不出现明显的步进现象所能达到的最低速度。

⑤系统最大跟踪角速度  $\Omega_{\max}$  (或  $V_{\max}$  或  $n_{\max}$ ),是系统输出轴平稳跟随输入轴,且不超过  $e_s$  的前提下,系统所能达到的最高速度。

⑥最大跟踪角加速度  $\epsilon_{\max}$  (或  $a_{\max}$ ) 是系统输出轴跟随输入轴,在不超过最大跟踪误差  $e_m$  的前提下,系统所能达到的最大角加速度。

⑦最大角速度  $\Omega_{\lim}$  (或  $V_{\lim}$  或转速  $n_{\lim}$ )、输出最大角加速度  $\epsilon_{\lim}$  (或者  $a_{\lim}$ ),均指不考虑跟踪精度的情况下,系统输出轴所能达到的极限速度和极限加速度。

当然,对系统稳态性能还可有其它的要求或其它的提法,如正弦跟踪状态下的误差,速度品质系数  $K_v$ , 加速度品质系数  $K_a$ , 连续调速范围  $D$ ……等等。

以上介绍稳态误差的时候,均提到系统输出轴跟踪系统输入轴运动,并以两轴之间的瞬时转角差作为系统的误差值,实际上有些伺服系统并没有实际的输入轴存在,输入信号不是依靠转动输入轴来产生,而是代表输入转角的信号电压或具体的数字代码。

伺服系统动态性能要求有:

①系统应是渐近稳定的,并应具有一定的稳定裕量。

②在典型信号输入下,系统的时域响应特性要满足规定的要求,用得最多的是系统处于

静止协调状态下(即零初始条件下),系统对阶跃输入信号的响应特性,通常取最大超调量 $\sigma\%$ 、协调时间(即过渡过程时间) $t_s$ 、振荡次数 $\mu$ 等特征量作定量的评价。

③系统的频域响应特性,通常用波德图表示出来,有时取最大振荡指标 $M_r$ 、系统的频带宽度 $\omega_b$ ……等特征量作指标。

④当系统稳态运行时(通常以等速跟踪状态下),系统输出轴承受负载力矩作阶跃变化或脉冲扰动变化时,系统的动态响应特性也是考核的内容,通常取系统动态过程中的最大误差 $e_1$ 、过渡过程时间 $t_{1s}$ ……等特征量来衡量。

⑤根据系统内部参数的可能变化范围、被控对象特性的变化范围、系统工作环境条件的变化范围,对系统性能的鲁棒性提出要求。

以上仅仅是简单概括对伺服系统性能要求的几个方面,随被控对象的不同,对伺服系统的性能要求差别很大。在着手设计系统时,必须注意用户对系统所提出的基本性能要求,并以此作为定量设计计算的依据。

在设计系统时,要注意综合考虑,因对伺服系统性能的要求是多方面的,每步设计要将相关问题都考虑到,要防止顾此失彼,要善于综合平衡。这些设计思想,在下面具体介绍每一步设计和每一个设计举例中,都要涉及到,请读者留意。

### 1.3 伺服系统设计的内容和步骤

设计伺服系统必须按照用户所提出的要求,主要是依据被控对象工作的性质和特点,明确对伺服系统的基本性能要求;同时要充分了解市场上器材、元件的供应情况,了解它们的性能质量、品种规格、价格与售后服务,了解新技术、新工艺的发展动态。在此基础上着手设计,以避免闭门造车。

系统设计的主要内容和步骤可分为以下几点:

#### (1) 系统总体方案的初步制订

首先根据需要与可能,对伺服系统的总体有一个初步的设想。是采用纯电气的,还是采用电气-液压的或是电气-气动的?在确定采用纯电气的方案时,是采用步进电动机作执行元件,还是采用直流伺服电动机、或是交流伺服电动机?系统控制方式是用开环的或是闭环的或是复合控制的?是采用模拟式的还是采用数字式的?整个系统应由哪几个部分组成?这些问题在制订方案时必须明确回答。当然可以订几个方案,以便进一步分析比较。

#### (2) 系统的稳态设计

总体方案仅仅是一个粗略的轮廓,必须进一步将系统的各部分具体化,通常先根据对系统稳态性能的要求,进行稳态设计,将系统各部分采用什么型号规格和具体参数值都确定下来。

系统的稳态设计也要分步骤进行,首先要根据被控对象运动的特点,选择系统的执行电机和相应的机械传动机构;接着可以选择或设计驱动执行电机的功率放大装置;再根据系统工作精度的要求,确定检测装置具体的组成形式,选择元件的型号规格,设计具体的线路参数。然后根据已确定的执行电机、功率放大装置和检测装置,设计前置放大器、信号转换线路等。在考虑各元、部件相互联接时,要注意阻抗的匹配、饱和界限、分辨率、供电方式和接地方式。为使有用信号不失真的、不失精度地有效传递,要设计好耦合方式。同时也要考

虑必要的屏蔽、去耦、保护、滤波……等抗干扰措施。

### (3) 建立系统的动态数学模型

经过系统的稳态设计，系统主回路各部分均已确定。但稳态设计依据的主要是系统的稳态性能指标，因此所构成的系统还不能保证满足系统动态性能的要求，为系统的动态设计作准备，需要对稳态设计所确定的系统作定量计算(或辅助实验测试)，建立它的动态数学模型，称之为原始系统的数学模型。

### (4) 系统的动态设计

根据被控对象对系统动态性能的要求，结合以上获得的原始系统数学模型，进行动态设计，要确定采用什么校正(补偿)形式，确定校正(补偿)装置具体线路和参数，确定校正装置在原始系统中具体联接的部位和联接方式。使校正(补偿)后的系统能满足动态性能指标要求。

### (5) 系统的仿真试验

根据校正后系统的数学模型进行仿真，以检验各种工作状态下系统的性能，以便发现问题，及时予以调整。

以上设计内容和步骤只是拿出一个定量的设计方案，工程设计计算总是近似的，只作为工程实施的一个依据，在具体实施时，要经过系统调试实验，方能将系统的有关参数确定下来，特别是校正(补偿)装置的参数，往往要通过系统的反复调试才能确定。因此，本指导所介绍的设计方法都不是万能的，它们只是便于工程设计定量，使设计者心里有数，为工程实施少走弯路、减少盲目性。

## 1.4 伺服系统设计方案的选择问题

在设计伺服系统时，首先要拟订一个设计方案，这个方案通常是个粗线条的、梗概性的描述，在此基础上才便于开展定量的工程设计计算及工程试验，使设计方案逐步具体化，以指导工程实践。

设计方案主要包含系统的构成及各主要元、部件采用什么类型，系统的输入采用什么形式，是机械位移(或转角)?是模拟电量?还是数码信号?相应的系统输出机械转角(或直线位移)采用什么类型的检测装置?系统的执行元件是采用交流伺服电机?还是直流伺服电机?或是采用液压马达?相应的功率驱动装置打算选用什么类型?系统位置闭环是采用模拟量比较?还是采用数字量比较?系统各主要元、部件之间相互连接的形式，以及信号传递、信号转换的形式。这些问题在制订方案时应有全盘的考虑。伺服技术发展很快，种类繁多，新元件、新方法在伺服系统中的应用层出不穷，可供设计者挑选的余地很宽。

伺服系统总是为某个具体的被控对象服务的，常是整个装置的一个组成部分，因此制订伺服系统设计方案时，不能脱离被控对象的实际情况，要仔细分析它对伺服系统的性能有哪些要求?伺服系统工作的环境条件，整个装置对伺服系统的结构尺寸、体积、重量、安装条件有哪些限制?为伺服系统所提供的能源条件等等。这些总是在制订系统方案时应充分考虑到。例如有些设备工作于露天野外环境，没有什么防护设备，它所需要的伺服系统应能经受风雪、雨淋，系统各组成部分(特别是检测元件、执行电机等需要运动的部件)均采用密闭性好的封闭型式，并具有在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下 ze 常工作的能力。

又例如有些设备只能为伺服系统提供直流低压(如 $30\text{ V}$ )电源，伺服系统主要消耗功率的

部分是执行电机及其功率驱动装置，低压的直流伺服电机有现成的产品系列可供选择，而选用交流伺服电机则要单独配置交流电源，若适应低压直流电源配置逆变器和相应的交流伺服电机，因无现成的产品而需新设计研究，这就增加了伺服系统研制的经费和研制周期。总之，进行伺服系统方案选择时，要考虑实际需要与实现的可能性，可以提出多个方案进行全面的分析对比，选一个更切合实际的方案。

从控制原理上考虑，制订设计方案时亦应明确：是设计成线性连续的系统？还是设计成数字式的？可变结构的？或是具有非线性特性的？就是明确了设计成线性连续的系统，还需要明确是设计成Ⅰ型系统？还是Ⅱ型的或更高型的系统？打算用PI调节器？还是采用前馈（即复合控制方式）？甚至对系统的补偿是打算用串联补偿？还是采用状态反馈？这些问题在制订方案时应有所考虑，事先考虑周到，整个设计工作会少走许多弯路，设计的结果会少一些缺陷。

此外，伺服系统的制造成本、系统的寿命与可维修性，系统组成的标准化程度……，这些也是选择方案时需要考虑的，特别是对有一定批量的产品，这些问题更显得突出。

制订系统设计方案是件综合平衡的工作，要求设计者作广泛地、深入地调整研究，仔细地分析实际需要，认真地探讨各种实现的可能性，对新元件、新技术的出现要敏感，要善于吸取，以推动伺服技术的发展。

## 第 2 章 执行电动机的选择

### 2.1 执行电动机选择的基本依据

伺服系统设计通常从选择执行电机开始。作为伺服系统的执行元件，应能方便地实现连续地、平滑地、可逆调速，对控制信号反应快捷，才能保证整个系统带动被控对象按所需要的规律运动。

伺服系统应看作是被控对象的一个组成部分，执行电机是伺服系统的一个重要组成部分，同时又靠它驱动被控对象，因此它是伺服系统与被控对象相联系的一个关键部件。执行电机必须适应被控对象工作的特点与环境条件，它的机械结构尺寸、安装固定方式，必须与被控对象紧密配合，以求得总体的合理配置，便于安装调整，便于使用维护。这些都关系到执行电机的选择。在伺服系统应用的许多场合，要想改换别种类型的执行电机，常会遇到机械结构、体积重量、使用环境条件、电源配备的种类、……等方面的限制，使设计难以实现。

可用作伺服系统执行元件的电机种类很多，从大的类别看：有直流伺服电动机（他激的或永磁的）、直流力矩电机、直流无刷电机、两相异步电动机、三相异步电动机、滑差电动机、同步电动机、各种步进电机……等等。由于它们调速方法不同、所需电源种类不同、驱动它们运转的功率放大装置更是多种多样，因而它们的机械特性、调速特性、过载能力、线路的复杂程度、驱动功率的大小、以及构成系统的总成本，都各不相同，需要认真地具体分析比较来确定。

选择执行电机不能只停留在确定电机的类别及其控制方式上，还必须确定具体型号与规格，需要作定量的核算。为此，要根据被控对象的运动形式（旋转或直线运动），运动的变化规律，运动负载的性质和具体数量，运行工作体制（是长期连续运行或短时运行或间歇式运行），结合系统的稳态性能指标要求，作定量的分析。

伺服系统带动被控对象运动，常常很难用简单的数学表达式来描述，为便于工程设计计算，需作合理的简化，首先应将被控对象运动负载作必要的典型分解，以转动形式为例，常见的典型负载有以下几种：

$$\textcircled{1} \text{ 干摩擦力矩 } T_c = |T_c| \text{sign} \Omega [\text{N} \cdot \text{m}]$$

式中  $\Omega [\text{rad/s}]$  表示负载转动的角速度； $\text{sign}$  为符号函数。

$$\textcircled{2} \text{ 惯性转矩 } T_J = J\epsilon [\text{N} \cdot \text{m}]$$

式中  $J [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  负载转动惯量，

$\epsilon [\text{rad/s}^2]$  负载角加速度；

$$\textcircled{3} \text{ 粘性摩擦力矩 } T_b = b\Omega [\text{N} \cdot \text{m}]$$

式中  $b [\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}]$  为粘性摩擦系数；

$$\textcircled{4} \text{ 重力力矩 } T_G = Gl [\text{N} \cdot \text{m}]$$

式中  $G [\text{N}]$  表示负载重量

$l [\text{m}]$  负载重心垂线到转动中心的距离；

$$\textcircled{5} \text{弹性力矩 } T_K = K\theta_m [\text{N} \cdot \text{m}]$$

式中  $K[\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}]$  为扭转弹性系数,

$\theta_m[\text{rad}]$  为负载转动角度;

$$\textcircled{6} \text{风阻力矩 } T_f = f\Omega^2 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

式中  $f[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2]$  为风阻系数。

尽管伺服系统的负载特性多种多样, 其中大多数系统可用  $T_c$  和  $T_f$  两种组合表示, 有的需三种或多种典型负载的组合来表示。

以上典型负载与其运动参数(角速度或角加速度或角度)有关, 如果被控对象的运动有规律, 其角速度  $\Omega(t)$ 、角加速度  $\epsilon(t)$ 、角度  $\theta_m(t)$  能用简单的数学形式来表述, 则定量分析系统负载的大小很方便。但多数被控对象的运动形态是随机性的, 很难用简单的确定的格式来描述, 工程上采取近似方法, 或选取几个有代表性的工况作定量分析计算。如长期运行时执行电机的发热状态, 短时超载或系统极限运行时执行电机的承受能力, 根据对系统动态性能的要求, 检验执行电机的响应能力。

显然, 被控对象的运动是与执行电机的运动同时进行的。执行电机除了要克服被控对象所形成的负载外, 还必须克服电机自身的干摩擦力矩  $T_{rc}[\text{N} \cdot \text{m}]$ 、电机转子的惯性转矩  $J_r \epsilon_r$  ( $J_r[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  电机转子转动惯量,  $\epsilon_r[\text{rad}/\text{s}^2]$  电机转动角加速度)。当执行电机与被控对象之间有变速传动装置时, 还需要考虑传动比  $i$ 、传动效率  $\eta$  和传动装置的等效转动惯量  $J_p[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$  等因素。

被控对象的运动参数及负载特性需由用户提出, 而电机的特性及其技术参数, 由生产厂家推出的产品目录来提供。但电机的种类多、型号多、生产厂家也多, 所提供的产品技术参数也不一致。所用量纲也不统一, 因此选执行电机作定量计算时, 必须作相应的换算。

例如本章附表 2-1 Ly 系列永磁式直流力矩电机产品目录, 列出电机的输出参数有: 峰值堵转力矩  $T_{mbl}$ 、最大空载转速  $n_{mo}$ 、连续堵转力矩  $T_{cbl}$ ; 对应的电机输入参数有: 峰值堵转电流  $I_{mbl}$  和电压  $U_m$ , 连续堵转电流  $I_{cbl}$  和电压  $U_c$ ; 电机自身的参数有: 电势系数  $C_e$ , 转子转动惯量  $J_r$ , 电磁时间常数  $T_i$ 。

需要指出的是: 表中  $n_{mo}$  是电枢电压为  $U_m$  时电机的实际空载转速, 不是理想空载转速  $n_{io}$

$$n_{io} = \frac{U_m}{C_e} \quad (2-1)$$

以  $n_{mo}$  和  $T_{mbl}$  可决定电压为  $U_m$  时的电机机械特性, 并可求出电机自身的摩擦力矩  $T_{rc}$

$$T_{rc} = \frac{T_{mbl}}{n_{io}} (n_{mo} - n_{mo}) \quad (2-2)$$

对附表 2-1 中 90LY54 电动机, 它的技术参数:  $U_m = 48 \text{ V}$ ,  $I_{mbl} = 1.5 \text{ A}$ ,  $n_{mo} = 450 \text{ r/min}$ ,  $I_{cbl} = 0.86 \text{ A}$ ,  $U_c = 27.4 \text{ V}$ ,  $C_e = 0.096 \text{ V}/(\text{r/min})$ ,  $T_i = 3 \text{ ms}$ ,

$$T_{mbl} = 14 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 0.14 \times 9.8 = 1.372 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$T_{cbl} = 8 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 0.784 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$J_r = 6 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2 = 6 \times 9.8 \times 10^{-5} = 5.88 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

将  $U_m$ 、 $C_e$  代入 (2-1) 式得

$$n_{io} = 500 \text{ r/min}$$

再由(2-2)式得

$$T_{rc} = \frac{1.372}{500} \times (500 - 450) = 0.1372 \text{ N} \cdot \text{m}$$

连接  $n_{io}$  和  $T_{mb1}$  直线, 如图 2-1 所示电压为  $U_m$  的机械特性, 它代表该电机特性的极限, 在横坐标  $T_{cm1}$  点作平行于第一条机械特性的平行线, 即得电压为  $U_c$  时的电机机械特性, 它的空载转速  $n'_o$  为

$$n'_o = \frac{U}{U_m} \times n_{io} = 285.4 \text{ r/min}$$

这两条机械特性就是电机定量计算的依据。

此外, 直流力矩电机电枢电阻  $R_a$

$$R_a = \frac{U_m}{I_{mb1}} \quad (2-3)$$

电机的反电势常数  $K_e$

$$K_e = 9.55 C_e [\text{V} \cdot \text{s}] \quad (2-4)$$

对应 90LY54 电机, 它的  $R_a = 32\Omega$ ,  $K_e = 0.9168 \text{ V} \cdot \text{s}$ , 它的电磁转矩常数  $K_m = 0.9168 (\text{N} \cdot \text{m})/\text{A}$ , 即  $K_m$  的数值等于  $K_e$ , 但量纲应是  $(\text{N} \cdot \text{m})/\text{A}$ 。这些数据在进行定量分析, 建立系统动态数学模型都是需要的。

例如附表 2-3 是 SZ 系列直流伺服电机的技术数据, 给出电机的输出参数有额定转矩  $T_{nom}$ 、额定转速  $n_{nom}$ 、额定功率  $P_{nom}$ , 输入参数有电枢额定电压  $U_{nom}$ 、额定电流  $I_{nom}$ , 激磁电压  $U_f$  和激磁电流  $i_f$ ; 电枢转动惯量  $J_r$ , 其它参数需用以下关系式估算。

$$\text{电枢电阻} \quad R_a = \frac{U_{nom} \cdot I_{nom} - P_{nom}}{2I_{nom}^2} \quad (2-5)$$

$$\text{电枢电感} \quad L_a = \frac{3.82U_{nom}}{n_p \cdot n_{nom} \cdot I_{nom}} \quad (2-6)$$

式中  $n_p$  为电机磁极对数。

$$\text{电势常数} \quad K_e = \frac{9.55(U_{nom} - I_{nom}R_a)}{n_{nom}} \quad (2-7)$$

$$\text{转矩常数} \quad K_m = |k_e| \quad (2-8)$$

在附表 2-4 所列 ZK 型封闭式直流伺服电机的技术数据中, 有额定功率  $P_{nom}[\text{kW}]$ 、额定电压  $U_{nom}[\text{V}]$ 、额定电流  $I_{nom}[\text{A}]$ 、额定转速  $n_{nom}[\text{r/min}]$ 、转子飞轮惯量  $GD^2[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ 。除需用以上关系式计算有关参数外, 还有

$$\text{额定转矩} \quad T_{nom} = \frac{9.55P_{nom}}{n_{nom}} \times 10^3 \quad (2-9)$$

因  $P_{nom}$  的量纲换算成  $[\text{W}]$  需乘  $10^3$ 。

$$\text{转子转动惯量} \quad J_r = \frac{GD^2}{4} \quad (2-10)$$

电机自身的摩擦力矩  $T_{rc}$  可用下式估算

$$T_{rc} = K_m I_{nom} - T_{nom} \quad (2-11)$$

在附表 2-5 列出 SL 系列两相异步电机的技术参数, 其中有电机输入参数: 频率  $f[\text{Hz}]$ ,

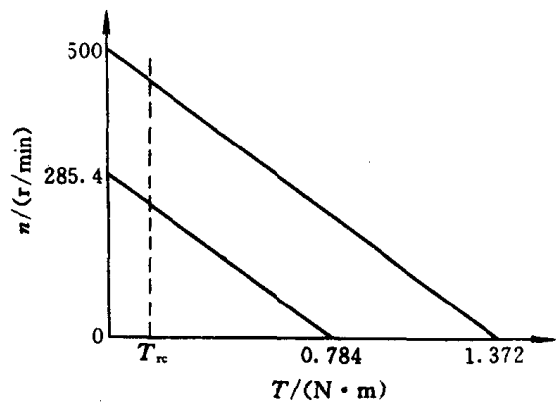


图 2-1 90LY54 的机械特性

注: 因产品目录所用量纲不统一, 需要若干非国家标准换算成国标, 例如  $1 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2 = 9.8 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

激磁电压  $U_i$  [V], 额定控制电压  $U_{nom}$  [V], 堵转电流  $I_{bl}$  [A], 每相输入功率  $P_\phi$  [W]; 电机输出参数有额定输出的功率  $P_{nom}$  [W], 空载转速  $n_0$  [r/min], 堵转转矩  $T_{bc}$  [g·cm]; 电机自身参数有极对数  $P$ 、电机时间常数  $T_m$  [s]。

两相异步电机自身磨擦力矩很小, 计算时可予以忽略, 其额定转矩  $T_{nom} = 1/2 T_{bc} \times 9.8$  额定转速

$$n_{nom} = \frac{9.55 P_{nom}}{T_{nom}} \quad (2-12)$$

电机转子转动惯量

$$J_r = \frac{9.55 T_m T_{bl} \times 9.8 \times 10^{-5}}{n_0} \quad (2-13)$$

从表中所列数据看出: 两相异步电机只适于功率很小的场合, 电机的体积不小但输出功率小, 由于控制线路简单, 构成系统的成本低, 仍应用很广泛。

可供伺服系统用作执行元件的直流电动机的类数很多, 其控制线路也比较简单, 加上直流电动机的调速特性线性, 实现可逆调速很方便, 过载能力较大, 因而在伺服系统中得到广泛的应用。

三相异步电机作伺服系统执行元件还是近十年才出现, 三相异步电机本身成本低, 性能稳定, 便于维护, 为获得较宽的调速范围, 需采用变频调速等较复杂的控制线路, 目前用异步机构成伺服系统的总成本比直流伺服系统高, 但在中等功率特别是大功率的应用场合, 交流伺服系统有逐渐替代直流伺服系统的趋势。

用步进电机构成伺服系统, 亦是用于小功率的场合, 用它构成开环系统十分简单。在负载比较小的场合, 用微处理器(或单片机)实现控制, 是一种运用较普遍的方案。

## 2.2 单轴传动的执行电机选择

执行电机轴直接与被控对象的转轴相联称为单轴传动, 此时, 电机的角速度与负载角速度相同, 两者的转角相等, 电机轴承受的总负载只需简单的相加便可得到。下面通过举例来说明单轴传动的执行电机如何选择? 以及定量核算的方法。

例1 某探测器需要一套方位角跟踪系统, 最大跟踪角速度  $\Omega_m = 120^\circ/\text{s}$ , 最大跟踪角加速度  $\epsilon_m = 120^\circ/\text{s}^2$ , 最大跟踪误差角  $e_m \leq 20'$ 。在零初始条件下, 系统对输入阶跃信号的响应时间  $t_s \leq 0.5 \text{ s}$ , 最大调转角加速度  $\epsilon_{lim} = 200^\circ/\text{s}^2$ 。探测器在机座上转动有干摩擦力矩  $T_c = 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 它的转动惯量  $J_1 = 4.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。这里先只考虑执行电机的选择问题。

先进行单位换算, 角度都用弧度 [rad] 表示

$$\Omega_m = 120^\circ/\text{s} = 2.09 \text{ 1/s}$$

$$\epsilon_m = 120^\circ/\text{s}^2 = 2.09 \text{ 1/s}^2$$

$$\epsilon_{lim} = 200^\circ/\text{s}^2 = 3.5 \text{ 1/s}^2$$

$$e_m \leq 20' = 0.0058 \text{ rad}$$

系统需要的角速度比一般直流伺服电机、交流异步电机的额定转速低许多, 只宜采用力矩电机才可能实现单轴传动。根据系统的负载和运动参数的要求, 从本章附表 2-1LY 系列中, 选出 250LY55 作该系统的执行电机, 需要依据电机的参数检验它能否满足系统的要求, 已



知 250LY55 的技术参数如下:

- 峰值堵转力矩  $T_{mbl} = 200 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 19.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,
- 峰值堵转电流  $T_{mbl} = 4.04 \text{ A}$ ,
- 峰值堵转电压  $V_m = 48 \text{ V}$ ,
- 最大空载转速  $n_{m0} = 80 \text{ r/m} = 8.38 \text{ 1/s}$ ,
- 连续堵转力矩  $T_{cbl} = 130 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 12.74 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,
- 连续堵转电流  $I_{cbl} = 2.63 \text{ A}$ ,
- 连续堵转电压  $U_c = 31.4 \text{ V}$ ,
- 电势系数  $C_e = 0.51 \text{ V}/(\text{r/m})$ ,
- 转子转动惯量  $J_r = 360 \text{ g} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2 = 0.03528 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ .

由(2-1)式可计算理想空载转速

$$n_{i0} = 48/0.51 = 94 \text{ r/min} = 9.84 \text{ 1/s},$$

根据  $n_{i0}$  和  $T_{mbl}$  画出该电机在  $U_m = 48 \text{ V}$  时的机械特性, 如图 2-2 中所示, 再由  $T_{cbl}$  作它的平行线, 即, 对应连续堵转的机械特性, 它对应的空载转速

$$n_0' = (U_c/U_m) \times n_{i0} = 6.4 \text{ 1/s}$$

由(2-2)式可求得电机自身的摩擦转矩  $T_{rc} = 2.9 \text{ N} \cdot \text{m}$

探测器探测的目标无既定的运动规律, 为适应连续跟踪的要求, 需检验伺服系统长期运行时 250LY55 的功率是否满足要求。即检验电机的发热与温升是否在容许条件内, 在此我们用等效正弦运动规律来计算执行电机所承受的等效转矩  $T_{rms}$

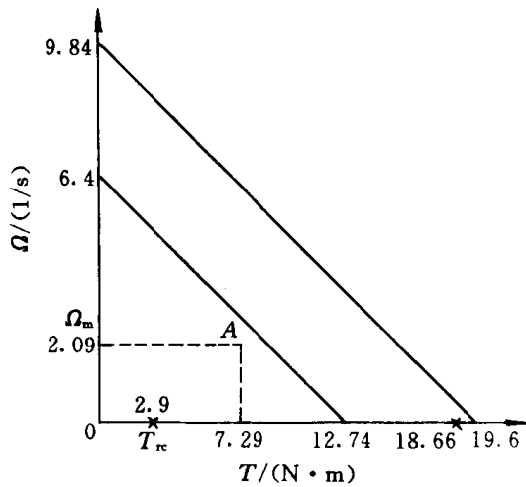


图 2-2 250LY55 的机械特性

$$T_{rms} = \sqrt{(T_c + T_{rc})^2 + \frac{1}{2}(J_L + J_r)^2 \epsilon_m^2} \quad (2-14)$$

将 250LY55 和被控对象的有关数据代入(2-14)式得  $T_{rms} = 7.29 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。根据  $T_{rms}$  和最大跟踪角速度  $\Omega_m$  在图 2-2 上确定长期运行的等效工作点 A, 它处在对应连续堵转的机械特性附近, 说明电机长期在 A 点运行时发热与温升都没有超过电机的允许值。

当伺服系统带动探测器以加速度  $\epsilon_{lim}$  作调转运行时, 电机轴上承受的总负载力矩:

$$\begin{aligned} T_{\Sigma} &= T_c + T_{rc} + (J_c + J_r)\epsilon_{lim} \\ &= 0.1 + 2.9 + (4.44 + 0.03528) \times 3.5 = 18.66 \text{ N} \cdot \text{m} < T_{mbl} \end{aligned} \quad (2-15)$$

小于该电机的峰值堵转力矩  $T_{mbl} = 19.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 说明电机能实现快速调转的要求。

最后还需要检验执行电机能提供的响应频率  $\omega_K$ , 是否符合系统动态性能的要求, 对力矩电机而言, 输出转矩不能超过  $T_{mbl}$ , 作为系统的执行电机所能提供的

$$\omega_K = \sqrt{\frac{T_{mbl} - (T_c + T_{rc})}{e_m(J_L + J_r)}} \quad 1/s \quad (2-16)$$