

第1章 绪 论

1.1 电动机及电力传动

电能是世界上应用最广泛的二次能源，它具有便于生产、传输、变换和控制等优点，利用电动机实现电力拖动是工业中完成加工工艺和生产过程的关键手段。电动机借助于内部电磁场进行能量转换，是一种机电能量转换装置。

交流电动机有诸多优点，如结构简单，制造、使用和维护方便，运行可靠，成本低，效率高等，所以它在国民经济各行业的应用非常普遍。随着现代工业生产规模的不断扩大，交流电动机的容量也增至数千千瓦。三相异步交流电动机的主要作用是拖动各种生产机械旋转。

从能量角度看，旋转电动机是一种机电能量转换装置。电动机借助内部电磁场将输入的电能为机械能输出。因此，电磁场在电动机内部起到了相当重要的作用。为了熟悉和掌握电动机的运行理论与特性，就必须熟悉有关电磁学的基本知识与电磁学定律。

一般来讲，对于电磁场进行分析采用两种方法：一种是场的分析方法；另一种是路的方法。后者是一种宏观分析方法，它将闭合磁力线所经过的路径看作由几段均匀磁路组成，然后将磁路问题等效为电路问题，最终统一求解电路。尽管这种方法在准确性方面存在一定的限制，但由于其计算简单，计算精度也足以满足大部分工程实际需要，因而得到了广泛应用。

要想实现电动机与生产机械的合理匹配，首先就需要对电动机本身的运行机理进行深入研究。电动机主要是借助磁路和电路的耦合而工作的，依据电磁感应原理实现电能到机械能的转换。在实际工程中，对于电磁场的研究，采取场路结合的方法进行电磁场仿真。由于其计算简单，计算精度也能满足工程需要。

由电动机带动生产机械运动的系统称为电力拖动系统。对电力拖动系统的评价，首先取决于对生产机械的要求是否得到了充分的满足，电力拖动系统的工作状态取决于电动机和负载机械特性之间的比较，所以正确地分析电动机和拖动系统负载的机械特性是关键。

电力传动技术的发展受电力电子技术发展的影响很大。晶闸管和直流斩波器是电力传动中比较常见的电力电子器件。目前直流脉宽调速技术依托 GTO、GTR 等全控型器件和 PWM 技术获得普遍应用。而全控型器件和 PWM 技术的发展，也为交流调速系统提供了强有力的支撑。PWM 技术中以 SPWM 技术应用最多。除了电力电子技术以外，电力传动技术的发展还和德国科学家首次提出的矢量控制的基本思想密切相关，矢量控制技术和后来出现的直接转矩控制技术的成功运用，使得交流传动系统获得了可与直流传动系统相媲美良好性能。变频调速技术得到了广泛应用。

电力传动有直流传动和交流传动两大类。此外，它还可以分为以速度为控制目标的调速系统和以位置为控制目标的位置随动系统。

直流电动机的结构复杂，特别是存在机械换向器和电刷，具有容易产生火花的缺点，所以交流电动机占据了更多的应用领域。随着交流变频调速性能、启动制动性能，以及高效率、

高功率电力电子技术和自动控制技术的不断成熟,交流电动机传动应用已成为主流。

电动机是传动系统的核心驱动设备,使机械设备按照生产工艺要求完成生产任务就是电力传动。常见的电力传动系统组成包括电动机、传动机构、控制设备和电源。利用电动机的旋转将电能转换为机械运动,让机械按照要求的工艺过程完成特定的生产任务。电源为传动系统提供必需的能量。因为电动机的转轴速度较高,所以它与工作轴之间通常需要通过联轴器或齿轮等传动和减速机构来连接。

电动机在国民经济中起着举足轻重的作用。它以电磁场作为媒介将电能转变为机械能,实现旋转或直线运动;或将机械能转变为电能,给用电负荷供电。因此,电动机是一种典型的机电能量转换装置。

电动机的种类繁多,除了传统的直流电动机、交流电动机及功率在 1kW 以下的驱动微电动机之外,还有一类是以实现信号转换为目的的电动机,这类电动机又称为控制电动机。控制电动机包括伺服电动机、测速发电机、力矩电动机、旋转变压器、自整角机、直线电动机及超声波电动机等。

随着相关技术的发展,电力拖动系统的功能也越来越完善。它不仅可以实现生产机械的速度调节,而且可以实现位置的跟踪控制。具有跟踪控制功能的系统也称为位置伺服系统或随动系统。

现代制造业水平的不断提高,要求电动机的设计和制造水平也不断提高。电动机的制造发展趋势有以下三点。

(1) 大型化。复杂设备的驱动需要单台电动机的容量不断扩大。

(2) 微型化。精密的小型设备或伺服电动机控制设备,电动机的体积不断减小,电动机的控制精度要求不断提高,质量也越来越轻。

(3) 采用新原理、新工艺、新材料的特种高性能电动机出现,如无刷直流电动机、开关磁阻电动机、直线电动机、超声波电动机等。

随着电力电子技术、控制理论、可以实现各种软算法的微处理器技术、电气与机械信号检测技术、数字信号处理技术及永磁材料等方面的迅猛发展,电动机领域也面临着前所未有的机遇与挑战。一方面,这些技术和理论对电动机领域的综合渗透改变了传统电动机采用固定频率、固定电压的供电模式,从而为各类电动机提供了更加灵活的供电电源和控制方式,大大提高了电力拖动系统的动、静态性能;另一方面,也使得仅以处理正弦波为基础的传统电机学理论受到挑战。于是,能够建立各类电动机数学模型的电机统一理论便应运而生。以此为基础,采用统一矢量变换理论的矢量控制技术在伺服系统和变频调速系统中得到了广泛应用。这一迹象表明,电机学理论与技术进入了一个全新的发展阶段。

从结构上看,电力拖动系统经历了最初单台电动机拖动一组机械、单台电动机拖动单台机械到单台设备中采用多台电动机几个阶段。每一阶段生产机械所采用电动机的数量有所不同。从系统上看,电力拖动系统经历了最初仅采用继电器-接触器组成的断续控制系统,到后来普遍采用由电力电子变流器供电的连续控制系统两大阶段。连续控制系统包括由相控变流器或斩波器供电的直流电力拖动系统,以及由变频器或伺服驱动器供电的交流调速系统两大类。后者包括由绕线式异步电动机组成的双馈调速系统、由异步与同步电动机组成的变频调速与伺服系统等。

随着电力电子技术、控制理论及微处理器技术的发展,电力拖动系统的性能指标也上了

一个大台阶。它不仅可以满足生产机械快速启动、制动及正、反转的要求，而且还可以确保整个电力拖动系统工作在较高的调速、定位精度和较宽的调速范围内。这些性能指标的提高使得设备的生产率和产品质量大大提高。除此之外，随着多轴电力拖动系统的发展，过去许多难以解决的问题也变得迎刃而解，如复杂曲轴、曲面的加工，机器人、航天器等复杂空间轨迹的控制与实现等。

目前，电力拖动系统正朝着网络化、信息化方向发展，包括现场总线、智能控制策略及因特网技术在内的各种新技术、新方法均在电力拖动领域得到了应用。电力拖动的发展真可谓日新月异。考虑到电力拖动系统是各类自动化技术和设备的基础，其理论与技术的发展必将对我国当前的现代化进程起到巨大的推动作用。

电动机控制技术是随着生产力的发展而发展的。19 世纪末，电动机逐渐代替蒸汽机作为拖动生产机械的原动机。一个多世纪以来，虽然电动机在基本结构上并没有大的变化，但是电动机的类型却得到了很大发展，在运行性能、经济指标等方面也都有了很大的改进和提高。而且，随着自动控制理论和电力电子技术的发展，形成了多种类型的电动机控制系统。电动机控制系统一般由控制器、电动机、传动机构、负载和电源五部分组成，如图 1.1 所示。

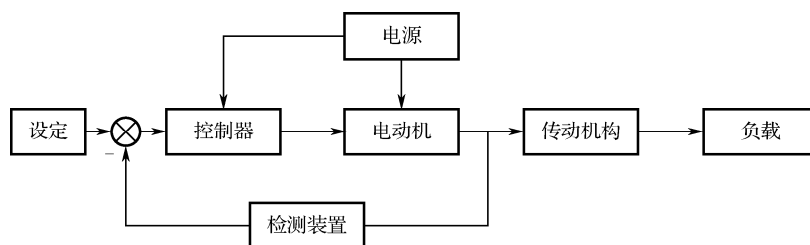


图 1.1 电动机控制系统组成

1. 电源

电源为被控对象电动机和控制器提供能源，有交流电源和直流电源两种。其中，直流电源分为以下三种类型。

- (1) 旋转变流机组。用交流电动机和直流发电机组成机组，以获得可调的直流电压。
- (2) 静止式可控整流器。采用静止式的可控整流器，以获得可调的直流电压。
- (3) 直流斩波器或脉宽调制变换器。用恒定直流电源或不可控整流电源供电，利用电力电子开关器件斩波或进行脉宽调制，以产生可变的平均电压。

2. 设定

设定值与检测装置的反馈值比较后，会产生控制电动机转速的偏差控制量，作为控制器的输入。

3. 控制器

控制器是电动机控制系统的核心。它能够把检测装置的反馈信号和其他输入信号进行分析、处理，然后按照预先设定的程序向控制对象发出控制指令，使整个电动机控制系统完成一定的生产任务。

4. 电动机

电动机是整个控制系统的被控对象，它严格按照控制器发出的指令运行，以完成不同要求的生产任务。

5. 传动机构

传动机构是在电动机与生产机械的负载之间传递动力的装置，如齿轮箱、传送带、联轴器设备等。

6. 检测装置

检测装置的功能是对电动机的转速信号及系统的电压、电流等物理量信号进行检测，并将这些物理量信号转变为相应的电信号反馈到控制器。

1.2 负载特性及系统运动方程

1.2.1 生产机械的负载特性

电力拖动系统是电动机和生产机械组成的可以完成一定生产工艺的整体。单轴电力拖动系统的运动方程表明了电动机的电磁转矩 T 与生产机械的负载转矩 T_L 和系统转速 n 之间的关系。负载的机械特性反映同一转轴上转速与负载转矩之间的函数关系，也就是 $n=f(T_L)$ 。通常情况下，生产机械的负载特性一般可以分为以下三类。

1. 恒转矩负载特性

该类负载的机械特性表现为负载转矩 T_L 的大小与转速 n 无关。按照负载转矩的方向是否与转向有关，恒转矩负载进一步分为两类，即反抗性和位能性。

1) 反抗性

该类负载转矩的大小恒定不变，而负载转矩的方向总是与旋转的方向相反，即负载转矩始终是阻碍运动的，如起重机的行走机构、皮带运输机等。如图 1.2 所示，对于桥式起重机行走机构的行走车轮，其在轨道上的摩擦力总是和运动方向相反的。根据转矩正方向的约定可知，反抗转矩恒与转速 n 取相同的符号。即 n 为正方向时 T_L 为正，特性曲线在第一象限； n 为负方向时 T_L 为负，特性曲线在第三象限。

2) 位能性

该类负载不仅负载转矩的大小恒定不变，而且负载转矩的方向也不变，与运动方向无关，即在某一方向阻碍运动而在另一方向促进运动。属于这一类的负载有起重机的提升机构，如图 1.3 所示，卷扬机起吊重物时，由于重物的作用方向永远向着地心，所以，由它产生的负载转矩永远作用在使重物下降的方向。当电动机拖动重物上升时， T_L 与 n 的方向相反；当重物下降时， T_L 和 n 的方向相同。对应的机械特性曲线位于第一象限和第四象限内。

2. 恒功率负载特性

该类负载转矩与转速的乘积为一常数，即负载功率常数，也就是负载转矩 T_L 与转速 n 成

反比。它的机械特性是一条双曲线，如图 1.4 所示。

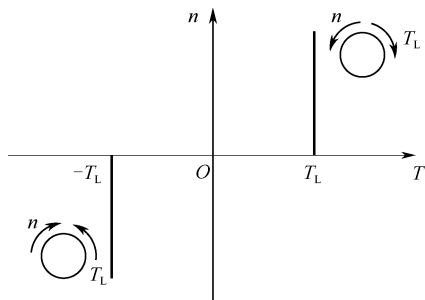


图 1.2 反抗性负载转矩与旋转方向的对应关系

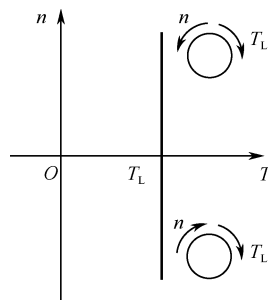


图 1.3 位能性负载转矩与旋转方向的对应关系

在机械加工工业中，有许多机床（或车床）在粗加工时，切削量比较大，切削阻力也大，为了满足加工精度的要求，通常采用低速运行。而在精加工时，宜采用高速运行。这就使得在不同情况下，负载功率基本保持不变。需要指出，恒功率只是机床加工工艺的一种合理选择，并非必须如此。另外，一旦切削量选定以后，当转速变化时，负载转矩并不改变，在这段时间内，应属于恒转矩性质。

3. 风机与泵类负载特性

转矩随转速而变化的其他负载有风机、水泵、油泵等，这种变化规律可以归结为负载转矩与转速的平方成正比，即 $T_L \propto kn^2$ ，其中 k 是比例常数。这类机械的负载特性是一条抛物线，如图 1.5 中曲线 1 所示。

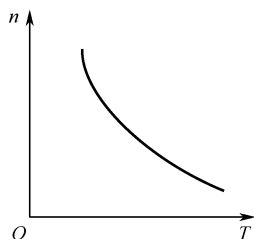


图 1.4 恒功率负载特性曲线

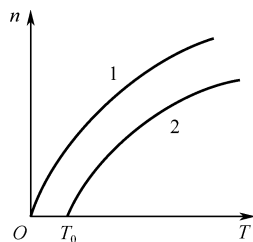


图 1.5 风机与泵类负载特性曲线

除了上述三种典型的负载特性外，实际生产中有些复杂负载可以近似看成上述三种负载的合成。例如，对于鼓风机这种负载，其机械特性以风机负载为主，如图 1.5 中的曲线 1 所示；因为轴上还存在较小的摩擦转矩 T_0 ，所以实际运行中的鼓风机特性是两种特性的合成，即 $T_L = T_0 + kn^2$ ，如图 1.5 中的曲线 2 所示。

1.2.2 电力拖动系统运动方程

1. 电力拖动运动方程

电力拖动运动方程描述了系统的运动状态。如图 1.6 所示为单轴电力拖动系统的示意图，系统的运动状态取决于作用在原动机轴上的各种转矩，如果忽略电动机的空载转矩，则由牛顿第二定律可知电力拖动系统的运动方程为

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

其中，转动惯量 J 为

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (1.2)$$

机械角速度 ω 与转速 n 之间满足 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，得到

$$T_{\text{em}} - T_{\text{L}} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1.3)$$

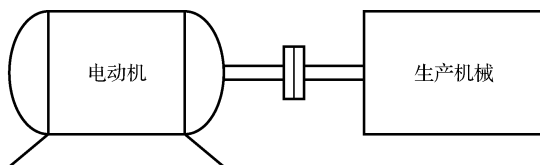


图 1.6 单轴电力拖动系统的示意图

2. 运动方程中转矩正、负号的确定

(1) 对于实际电力拖动系统，考虑到以下几种情况。

- ① 电动机可能正、反转运行。
- ② 电动机可能运行在电动机或发电机运行状态。
- ③ 负载转矩也可能由上升过程中的制动性变为下降过程中的驱动性转矩。

(2) 使用式 (1.3) 时需注意正、负号问题。正、负号一般按如下惯例选取。

- ① 首先取转速的方向为正方向。
- ② 对于电磁转矩，若与转速方向相同，则取“+”；反之，若与转速方向相反，则取“-”。
- ③ 对于负载转矩，若与转速方向相反，则取“+”；反之，若与转速方向相同，则取“-”。

(3) 根据上述正、负号选取规则，式 (1.1) 计算结果存在下列三种情况。

① 满足 $T_{\text{em}} > T_{\text{L}}$ 时， $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ，系统做加速运动，电动机把从电网吸收的电能转变为旋转系统的动能，使系统的动能增加。

② 满足 $T_{\text{em}} < T_{\text{L}}$ 时， $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ，系统做减速运动，系统将放出的动能转变为电能反馈回电网，使系统的动能减小。

③ 满足 $T_{\text{em}} = T_{\text{L}}$ 时， $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ， $n = \text{常数}$ （或 $n=0$ ），系统处于恒转速运行（或静止）状态，系统既不放出动能，也不吸收动能。

1.3 电动机控制基础

1.3.1 自动控制系统

电动机的控制规律符合自动控制系统的控制规律，都是将系统的给定量或给定量与反馈

量的差值送到控制器中，由控制器处理后将控制信号输出出来控制被控对象。

自动控制系统结构如图 1.7 所示。按照是否有输出信号反馈到输入端来分类，有开环控制系统和闭环控制系统两种类型。

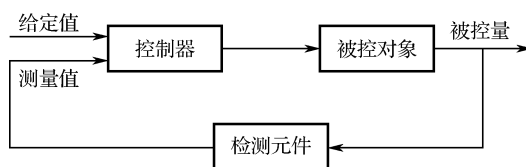


图 1.7 自动控制系统结构

1. 开环控制系统

开环控制系统结构如图 1.8 所示，可以看出，开环控制系统的输入端没有输出端的反馈信号，控制过程信号是单向流动的，无抗干扰能力，所以控制精度不高，实际生产中使用较少。

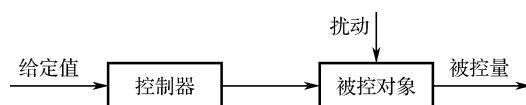


图 1.8 开环控制系统结构

2. 闭环控制系统

闭环控制系统结构如图 1.9 所示，闭环控制系统的输入端有输出端的反馈信号，这样可以自动调节给定值和测量值之间的偏差，抗干扰能力强，控制精度较高，实际生产中使用广泛。

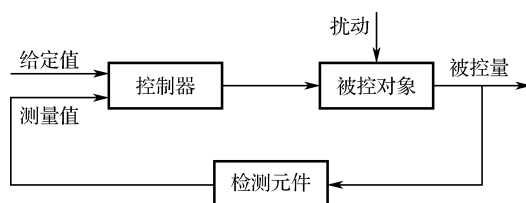


图 1.9 闭环控制系统结构

1.3.2 电动机的控制技术

19 世纪末，在电动机控制技术中，交流和直流两种控制方式都有其应用场合。随着交流电动机技术的成熟和发展，交流电力拖动的应用越来越多，基本上能够满足当时的生产需求。然而，随着一些精密机械加工的进一步发展，对电力拖动在启动、制动、正反转及调速精度与范围等静态特性和动态响应方面提出了更高的要求，在此期间，交流电力拖动在技术上不能满足这些要求。这个阶段处于直流拖动为主的发展时期。

20 世纪以来，直流电动机电刷与换向器经常出现故障，此时，用交流可调拖动取代直流可调拖动的研究取得了一定的进展，所以这个时期交流拖动控制系统成为主要研究方向。

20 世纪 70 年代以来，电力电子技术和计算机控制技术的发展，为交流电力拖动的广泛应用提供了极大的可能。交流电动机的串级调速，各种类型的变频调速、无换向器电动机调速

等,使得交流电力拖动具有调速范围宽、稳态精度高、动态响应快及在四象限可逆运行等良好的技术性能,因此逐步取代了直流电力拖动。

当前,电力电子器件和各种控制算法的出现,使得电动机控制技术丰富多样,特别是交流传动系统矢量控制,可以实现较好的控制效果。例如,启动、制动、反转和调速的控制简单、方便、快速且效率高。各种特种新型电动机的出现,要求运行中达到不同的运行特性来满足生产工艺的各项指标,传感器技术和信号变换与传送技术的进一步发展,为将一些智能算法引入电动机的控制提供了可能。因此,电动机的交流智能化控制将成为未来电动机拖动控制技术的发展方向。

矢量控制通过对电流、磁链的间接控制来达到控制转矩的目的,而直接转矩控制则是直接对电动机转矩进行控制的。1985年,由德国鲁尔大学 M.Depenbrock 教授首次提出了直接转矩控制的理论,采用空间矢量的分析方法,在静止两相坐标系中对电动机电磁转矩和定子磁链进行控制,并借助 Bang-Bang 控制直接对逆变器的开关状态进行最优控制。随后,日本学者 Taka-hashii 提出了圆形磁链的直接转矩控制,1987年把它推广到弱磁调速范围。直接转矩控制的思想是将矢量控制中的以转子磁通定向更换为以定子磁通定向,通过转矩偏差和定子磁通偏差来确定电压矢量,不需要解耦控制。与矢量控制技术相比,直接转矩控制在很大程度上解决了矢量控制三相感应电动机的特性易受电动机参数变化影响这一问题。但使用直接转矩控制,电动机低速时电流和转矩脉动明显,带积分的磁链电压积分模型准确性较差,制约了速度控制系统的调速范围。

通常,永磁同步伺服系统必须具有较宽的调速范围和稳定的转矩输出特性。为了满足实际需要,在额定转速以下,电动机按恒转矩运行;在额定转速以上,电动机按恒功率运行。随着电动机转速的上升,电动机定子绕组中感应电动势不断增加,当电动机转速上升到一定程度时,逆变器输出电流将不能跟踪电流给定,电动机输出转矩下降,性能变差。为提高高速时电动机的转矩输出能力,需要对电动机实施弱磁控制。然而,永磁同步电动机的磁场是由永磁体产生的,不能像直流电动机和异步电动机那样进行控制。为了实现弱磁,在电动机电枢绕组中加入直轴电流,利用电动机直轴电枢反应抵消永磁体产生的磁场,从而提高永磁同步电动机的高速运行性能。

1.4 电动机仿真分析

1.4.1 电动机的有限元设计仿真

为了实现对电动机的有效控制,在电动机控制系统建模和仿真过程中,必须知道电动机的定/转子电阻、绕组互感和漏电感等参数。对于常规电动机而言,这些参数可以通过样机的测试获得;但是,对于一些结构比较特殊的电动机而言,样机本身的设计就相对困难了,所以,这时就需要借助有限元仿真软件来对电动机本体结构进行设计,同时利用仿真软件的数值计算功能,来得到控制系统仿真需要输入的参数,这样可以使电动机的控制容易实现。另外,采用有限元仿真分析除了可以获得电动机的绕组电阻和电感参数外,还可以对电动机的电磁转矩、转速和电动机内部电磁场分布进行计算和输出。

电动机有限元仿真软件主要有 Ansoft、Magnet、EasiMotor 和 Infolytica 等。有限元仿真

软件通常可以进行以下领域的仿真分析。

(1) 电磁仿真。电磁仿真在电动机和电器设计中扮演着非常重要的角色，它可以预测电磁转换的效率、各个部件的损耗和发热量、电磁力/力矩等参数，是进一步进行热仿真和结构仿真的基础。

(2) 电场仿真。随着电气设备容量和工作电压的提高，电场仿真的必要性更加迫切，它能够预测设备的绝缘性、放电和击穿的可能性等性能指标。

(3) 热仿真。过热会使电动机的可靠性降低，甚至会烧毁电动机，因此热分析与热设计在电动机和电器设计中非常重要，热分析可以优化冷却方案，改善冷却效果。

(4) 结构强度、疲劳仿真。利用结构分析软件研究电动机和电器在机械载荷和热载荷作用下的强度、刚度、振动和疲劳寿命，可提高设备的可靠性。

(5) 噪声分析。模拟结构振动噪声和电磁噪声。

1.4.2 电动机控制的计算机数字仿真

随着电气化和产品智能化水平的提高，电动机、变压器及高低压电器在各种装备和生活中的应用越来越多，电动机和电器朝着容量大型化、体积小型化及智能化的方向发展。现今的电动机和电器设计面临着更为复杂的技术挑战，只有充分运用现代工程仿真技术才能应对这些挑战。

交流异步电动机的设计和分析，一般步骤为：首先，利用有限元建立电动机本体模型；然后，可以利用矢量控制理论或其他电动机控制理论，在 MATLAB/Simulink 中搭建异步电动机的数学模型；最后，在此基础上，可以建立电动机矢量控制系统的仿真模型，并进行仿真分析，得到电动机的输出性能。

永磁同步伺服系统一般采用矢量控制技术进行控制。表贴式永磁同步电动机使用 $i_d=0$ 矢量控制方法，通常采用 PI 控制器进行控制能达到很好的解耦效果。

在电动机的本体设计和控制系统设计中，都需要进行仿真辅助设计，这样可以满足电动机及其传动系统在制造之前检验一下系统的各项指标是否满足设计的要求。如果不满足，可以调整或修改系统的参数，直到能够满足设计要求为止。