

绪 论

“机械控制工程”是一门技术学科,它研究控制论在机械工程中的应用,是一门跨控制论与机械工程学科的边缘学科。机械控制工程论是研究以机械工程技术为对象的控制论问题。机械工程科技的研究与发展,不仅是促使机械控制工程的理论得以产生和发展的内在推动因素,而且也是机械控制工程的广阔应用天地。

顾名思义,控制论是关于控制的理论。“用计算机控制机床运动”、“控制室内温度”、“控制物价上涨”等已成为人们习以为常的口语了。如果我们仔细分析各种不同的控制过程,虽然“机床控制”、“室内温度控制”、“物价上涨控制”的控制对象不同,但作为控制过程,有两点却是它们共有的:

(1) 被控制的对象必须存在着多种发展的可能性。如果事物的未来只有一种可能性,就无所谓控制了。比如光在真空中的传播速度是确定的,每秒 299 793km,既不会高于这个速度也不会低于这个速度,只有一种可能性。因此人们不能说“控制了光在真空中传播的速度”之类的话。

(2) 被控制的对象不仅必须存在多种发展的可能性,而且,人可以在这些可能性中通过一定的手段进行选择,才谈得到控制。比如一座火山,它在下一时刻面临着爆发或不爆发两种可能性,但目前人类的能力还不能在这两种可能性中选择。所以,我们也不能说“控制了火山爆发”这样的话。所谓我们不能控制,就是无法选择或不存在选择的余地。

由此可见,控制的概念与事物发展的可能性密切相关。我们将事物发展变化中面临的各种可能性集合称为这个事物的可能性空间,它是控制论中最基本的概念。对对象的控制过程,就是使其可能性空间不断缩小的过程。每实行一次控制后,事物发展的可能性空间就缩小了。可能性空间缩得越小,标志着我们的控制能力越强。例如,高水平的篮球运动员可以在远处准确地将篮球投入到篮网中,而一般人则很难做到。这说明高水平的篮球运动员可以将篮球运动的轨迹控制在较小的可能性空间内,具有较强的篮球控制能力。在实际对象控制过程中,对于绝大多数的控制过程,人们并不是把事物的可能性空间精确地缩小到某个唯一的状态,而只是把可能性空间缩小到一定的范围就达到控制的目的了。例如,任何恒温箱都只能把温度控制在一个目标值附近的小区间内。虽然恒温箱内的温度每一时刻有一个特定的值,但是这个值究竟是多少并不是我们事先确定的,只要温度值在确定的区间之内,就算实行了控制。同样的道理,任何机械加工都必须规定出一定的误差范围。

控制论是机械控制工程的技术理论方法论的基础。它的引入,使人们对于机械工程的认识从经验性阶段上升到理论性阶段,它提供理论与方法,使各种机械工程对象、系统或过

程能够实现各种形式和多层次技术水平的控制,能够逐步实现机械工业生产与管理过程的高水准的自动化;它使结构形态或机理复杂的机械对象与过程也能实现辨识与建模,进行动态分析、设计和优化;对于某些古典的机械工程问题,如机械振动、动态特性及机械精密度等,应用它有可能揭示出更深刻的本质,找到改进或控制其性能的更有效途径与方法。

1.1 机械控制工程的研究对象与任务

机械控制工程论实质上是研究机械工程技术中系统的动力学问题。它研究的是机械工程系统在一定的外界条件(即输入或激励)作用下,从系统的初始状态出发,所经历的由其内部的固有特性所决定的整个动态历程,研究这一系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

从系统、输入、输出三者之间的关系出发,根据已知条件与求解问题的不同,机械工程控制论的任务可以分为以下4个方面:

- (1) 已知系统和输入,求系统的输出,即系统分析问题;
- (2) 已知系统和系统的理想输出,设计输入,即最优控制问题;
- (3) 已知输入和理想输出,设计系统,即最优设计问题;
- (4) 已知系统的输入和输出,求系统的结构与参数,即系统辨识问题。

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1),解决系统的分析问题。

1.2 控制的方法

本小节主要讨论一下控制的方法问题。为了达到控制的目的,人们可以根据控制对象的不同、控制要求的不同,而采取不同的控制策略与方法。常见的控制方法有随机控制、负反馈调节控制等,它们是一切复杂控制方法的基础。

1. 随机控制

人们遇到棘手的科学问题时,即使对解决问题所必需的条件完全不了解,对于对象的性质一无所知,仍然可以采用随机控制的方法来找到问题的答案。比如我们要进一个上了锁的房间,手里有一大串钥匙,但不知道其中哪一把钥匙能把锁打开。人们所采用的最通常的方法就是“一个一个地试试看”,不行就换一把钥匙,直到把锁打开。

因此在科学发展的某些阶段,尤其当人们对某一个领域的研究刚刚开始,还不能用其他方法来控制对象时,随机控制往往就成为人们唯一可以采用的方法。例如,古代的时候,人们没有任何科学知识,没有仪器,对疾病的本质和药物的性质都一无所知,我们的祖先如何对付疾病呢?祖先们是从“尝”开始了解药物对人体的作用的。人得了病,就用各种树皮草根来试着服用。通过无数次的随机选择草药试吃开始了对药物治疗作用的了解,这样就形成了控制。

2. 负反馈调节控制

台球运动中,为了将目标球精确地送入袋口,首先要根据目标球与袋口的相对位置,确定瞄准点,即应该将母球向什么方向击出才能将目标球击进袋,其次是运杆击球,将目标球精确地击向瞄准点。在机械传动控制中,为了控制步进电机旋转 60° 的角度,可根据其步距角的大小(例如步距角为 3°)以及步进电机的通电方式(例如三相双三拍),确定向步进电机发送 20 个控制脉冲。根据步进电机的控制原理,一个控制脉冲可以使其旋转一个步距角(即 3°),20 个控制脉冲即可使其旋转 60° 的角度。

但是,如果我们选择了某一目标,但我们所具备的控制方法达不到所需要的控制能力又怎么办呢?例如二次大战前后,随着科学技术的发展,飞机的速度越来越快,性能越来越好,用老式高射炮来击落飞机也就越来越困难了。人们发现,无论怎样提高发射炮弹的准确性,控制能力总是有限的。飞机飞行的轨道因驾驶员动作的随机性几乎是不能预先求出的,经典的思想方法暴露出一些根本的缺点。其实,这一类被工程师视为极困难的问题我们可以从自然界不少动物身上找到答案。鹰击长空,不但能准确地扑到固定目标,甚至连飞速躲避的兔子、老鼠也不能逃脱。显然,鹰没有也不可能事先计算自己和目标的运动方程。鹰不是按照事先计算好的路线飞行的。鹰发现兔子后,马上用眼睛估计一下它和兔子的大致距离和相对位置,然后选择一个大致的方向向兔子飞去。在这个过程中它的眼睛一直盯着兔子,不断向大脑报告自己的位置跟兔子之间差距。不管兔子怎么跑,大脑作出的决定都是缩小自己跟兔子位置的差距。这种决定通过翅膀来执行,随时改变着鹰的飞行方向和速度,调整鹰的位置,使差距越来越小。直到这个差距为 0 时,鹰的爪子就够着兔子了。

我们来仔细分析一下这个控制过程。这个控制系统主要由眼睛、大脑和翅膀三部分组成,眼睛在盯住兔子的同时,也注意到了自己的位置,并把这两者作一个比较。经过比较以后的信号代表鹰的位置跟兔子位置的差距,通常称为目标差,眼睛主要是接收这种目标差信息,并把它传递到大脑。大脑指挥着翅膀改变鹰的位置,使鹰向目标差减小的方向运动,这个控制重复进行,就构成了鹰抓兔子的连续动作。这里最关键的一点是大脑的决定始终使鹰的位置向减小目标差的方向改变,控制论中把这类控制过程称为负反馈调节控制。负反馈调节的本质在于设计了一个目标差不断减少的过程,通过系统不断把自己的控制结果与目标作比较,使得目标差在一次一次控制中慢慢减少,最后达到控制的目的。负反馈调节是扩大控制能力的有效方法,它把有限的控制能力累积起来,从而扩大了控制能力。每一次反馈,实际都是将上一次作为输出的可能性空间作为输入,让控制机构在这个已被缩小了的范围内进行新的选择。

1.3 自动控制系统的几种分类

所谓控制系统,是指系统的输出,能按照要求的参考输入或控制输入进行调节的系统。控制系统的分类方式很多,这里仅按系统是否存在反馈,将系统分为开环系统和闭环系统。

1. 开环系统

开环系统是指系统的输出量对系统无控制作用,或者说系统中无反馈回路的系统。例如洗衣机,它按洗衣、清水、去水、干衣的顺序进行工作,无须对输出信号即衣服的清洁程度进行测量;又如简易数控机床的进给控制,输入指令通过控制装置和驱动装置推动工作台运动到指定位置,而位置信号不再反馈。这些都是典型的开环系统,开环系统的方框图如图 1-1 所示。

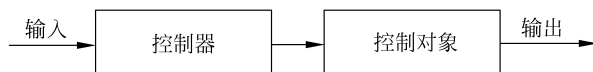


图 1-1 开环系统的方框图

2. 闭环系统

闭环系统是指系统的输出量对系统有控制作用,或者说系统中存在反馈回路的系统。例如,数控机床中为了实现高精度的导轨运动位置控制,可在直线移动导轨机构上安装线位移光栅传感器,用于导轨移动量的测量,控制系统根据该测量结果控制伺服电机的运动位置。闭环系统的方框图如图 1-2 所示。

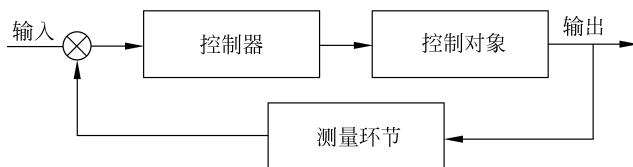


图 1-2 闭环系统

1.4 对控制系统性能的基本要求

评价一个控制系统好坏的指标是多种多样的,但对控制系统的基本要求一般可归纳为稳定性、准确性和快速性。

(1) 系统的稳定性: 由于闭环控制存在反馈,系统又存在惯性,当系统参数匹配不当时,将会引起系统的振荡乃至越来越远离平衡位置而失去工作能力。稳定性就是指系统抵抗动态过程振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。

(2) 响应的准确性: 在调节过程后输出量与给定的输入量之间的偏差程度,这一偏差也称为静态精度,这也是衡量系统工作性能的重要指标。

(3) 响应的快速性: 当系统输出量与给定的输入量之间产生偏差时,消除这种偏差的快速程度。

稳定性要求是系统工作的必要条件,响应的准确性和快速性是在系统稳定的前提下提出的。系统的稳定性、准确性和快速性是相互制约的,快速性好,可能引起强烈振荡;而改善系统的稳定性又可能减小快速性,控制精度也可能变差。由于被控对象的具体情况不同,

各种系统对稳定性、准确性和快速性的要求各有侧重,应视被控对象的具体要求,综合确定控制系统的性能指标。

1.5 机械工程系统中典型的几个控制问题

实际中的控制系统,分为单输入单输出系统和多输入多输出系统。经典控制理论主要研究单输入单输出系统的控制问题。而现代控制理论以状态的概念,研究复杂的多输入多输出系统的控制问题。本书只涉及经典控制理论所解决的控制问题,即单输入单输出系统的控制问题。

从机械工程控制理论应用的角度,其解决的典型问题分为控制系统分析与控制系统的设计问题。

1. 控制系统的分析问题

所谓系统分析问题,就是已知系统和输入,求系统的输出问题。这里我们以汽车振动系统分析为例,说明此类问题的解决方法。

把汽车作为一个系统来研究时,可看作一个具有质量、弹簧和阻尼的振动系统。由于汽车内部各部分的固有频率不同,汽车在行驶中常因路面不平,车速和运动方向的变化,车轮、发动机和传动系统的不平衡,以及齿轮的冲击等各种外部和内部的激振作用而极易产生整车和局部的强烈振动。汽车的这种振动会使汽车的动力性能变差,同时还要影响乘坐的舒适性。因此分析汽车的振动问题对于改进汽车设计是十分必要的。

对于汽车振动系统分析,引起汽车振动的输入量主要是路面不平所导致的颠簸、汽车本身的发动机激励和传动轴激励。为了分析这些振动源对汽车振动的影响,可分别测试汽车在不同道路上(例如沥青、砂石、山路等)、不同车速情况下,座椅和车身地板的垂直振动加速度。然后通过功率谱分析法对发动机工作产生的振动和路面不平度引起的振动信号进行功率谱密度分析,这种分析能够反映引起振动的各频率成分的能量,从而找到对乘员产生影响最大的频段。由于人体最敏感的频段为 $4\sim 8\text{Hz}$,当所测试振动信号的频率成分接近该频段时,说明这个车人的乘坐舒适性不好,否则可认为汽车具有较好的平顺性能。

如果以上测试结果表明,部分振动信号在人体最敏感的频段 $4\sim 8\text{Hz}$ 附近的振幅较大,说明这部分振动信号将导致汽车乘坐的舒适性。那么如何改进设计,去除 $4\sim 8\text{Hz}$ 附近的振动信号,这就是控制系统设计所需要解决的问题。

2. 控制系统的设计问题

所谓系统设计问题,就是已知输入和理想输出,进行系统设计的问题。本书所要介绍的传递函数是在拉氏变换的基础上,以系统本身的参数描述的线性定常系统输入量与输出量的关系式。它表达了系统内的固有特性,而与输入量或驱动函数无关,反映了系统对信号的传递特性。传递函数不同,在给定的输入情况下,其输出就不同。因此,上述改进汽车振动性能的设计问题,就成为一个如何改变汽车系统的传递函数,使汽车振动信号远离人体最敏感的频段 $4\sim 8\text{Hz}$ 的问题。

通过功率谱分析法可以分析引起振动的各频率成分的能量,然后根据汽车的机械结构分析,确定接近人体最敏感频段 $4\sim 8\text{Hz}$ 的振源,并对该振源的机械结构进行优化设计,并确定其传递函数。建立一个机械系统的传递函数,是一件较为困难的事情,但随着计算机技术的发展,一些专用的软件系统(如机械系统动力学自动分析软件 ADAMS),可辅助用于传递函数的计算。这样,在已知振动激励信号(输入信号)和汽车系统传递函数的情况下,即可分析计算出系统的输出信号,从而对改进的设计结构能否满足汽车舒适性的要求进行性能评价,直至找到一种保证乘坐人员舒适性的设计方案。

1.6 本课程学习内容及其知识所能解决的问题

机械控制工程是利用控制论的理论与方法解决机械工程实际问题的一门技术科学,本书所论述的内容主要是机械控制工程的基本理论与方法,所学习的内容主要包括以下几点。

1. 系统的数学模型

系统建模是经典控制理论和现代控制理论的基础,数学模型可以有許多不同的形式,例如微分方程、传递函数、单位脉冲响应函数等。本书主要介绍适用于单输入单输出线性定常系统动态特性描述的传递函数的概念以及数学模型的建立方法。

2. 系统的瞬态响应及误差分析

一个实际的系统,在建立系统的数学模型之后,就可以采用不同的方法来分析和研究系统的动态性能。研究的方法主要分为时域分析与频域分析。时域分析法是一种直接分析法,它是根据所描述系统的微分方程式或传递函数,求出系统的输出量随时间的变化规律,并由此来确定系统的性能。因此,通过这部分内容的学习,重点掌握了系统动态性能的时域评价方法。

3. 系统的频率特性分析

在机械工程科学中,有许多问题需要研究系统与过程在不同频率的输入信号作用下的响应特性。例如,机械振动学主要研究机械结构在受到不同频率的作用力时产生的强迫振动和由系统本身内在反馈所引起的自激振动,以及与其有关的共振频率、机械阻抗、动刚度、抗振稳定性等概念。这实质上就是机械系统的频率特性。通过这部分内容的学习,重点掌握系统动态特性的频域分析方法。

4. 系统的稳定性

稳定性要求是系统工作的必要条件,也是机械工程系统的重要性能指标之一。通过这部分内容的学习,重点掌握判定一个系统是否稳定的方法以及评价系统稳定程度的指标。

5. 系统的综合与校正

上述内容都是在系统结构和参数已知的情况下分析和评定系统的稳定性、快速性和准

确性。而系统的综合与校正所要解决的问题,却是在预先规定了系统的各项性能指标,如何选择适当的环节和参数使系统满足这些性能指标要求。通俗地说,就是如何改善系统的控制性能的方法。

总之,本书所介绍的内容主要是为从事机械控制技术的人员提供一些基本的概念与方法,而不涉及具体的控制算法。

第 2 章

系统的数学模型及传递函数

描述系统运动特性的数学表达式,称为系统的数学模型。连续时间系统常用的数学模型有微分方程、传递函数及状态变量表达式。系统各元件间的连接和因果关系也可用方块图与信号流图表示,由它们可方便地求出系统的传递函数。

数学模型是对系统进行定量计算和定性分析的基础,因此建立系统的数学模型是分析研究系统的首要工作。建立系统数学模型的方法有两种,即分析法和实验辨识法。分析法是从元件或系统所遵循的有关定律出发,建立相应的数学模型,主要用于对系统结构及参数的认识都比较清楚的简单系统。实验辨识法是根据元件或系统对某些典型信号的响应或其他实验数据建立其数学模型。由于实际工程问题的复杂性,实际中多采用实验辨识法建立系统的数学模型。

无论是机械系统、电气系统、液压系统、热力系统还是经济系统、生物系统,只要是确定的系统都可以用数学模型描述其运动特性。但是,要建立一个系统的合理数学模型并非是一件容易的事。所谓合理的数学模型是指它具有最简化的形式,但又能正确反映所描述的系统特性。在工程上,常常是做一些必要的假设和简化,需要正确处理模型简化和模型精度的辩证关系,忽略对系统特性影响小的因素,并对一些非线性关系进行线性化处理,建立一个比较准确的近似数学模型。

2.1 微分方程

微分方程是在时域中描述系统(或元件)动态特性的数学模型,或称为运动方程。利用它可得到描述系统(或元件)动态特性的其他形式的数学模型。

建立系统的微分方程,通常按以下三个步骤进行:

- (1) 确定系统(或元件)的输入量和输出量;
- (2) 根据系统(或元件)遵循的有关定律列出原始微分方程式;
- (3) 消去中间变量,最后得到只包含输入量和输出量的微分方程式,即系统(或元件)的输入-输出微分方程式。

下面举例说明建立微分方程的步骤与方法。

例 2.1 图 2-1 所示 RLC 无源网络中的 R 、 L 、 C 均为常值, $u_i(t)$ 为输入电压, $u_o(t)$ 为输出电压,试列写其运动方程。

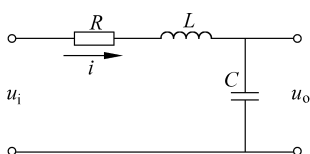


图 2-1 RLC 无源网络

解：根据克希荷夫定律，有

$$L \frac{di}{dt} + iR + u_o = u_i \quad (2-1)$$

式中， i 为回路电流。电容 C 两端的电压为

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2-2)$$

于是有

$$i = C \frac{du_o}{dt} \quad (2-3)$$

将式(2-3)代入式(2-1)，并整理得

$$LC \frac{d^2 u_o}{dt^2} + RC \frac{du_o}{dt} + u_o = u_i \quad (2-4)$$

以上通过一个电路方程说明了系统微分方程的建立方法。而在机械系统分析中，常见的部件运动形式有直线运动、转动或二者兼有，列写系统微分方程通常根据达朗贝尔原理。该原理为：作用于每一个质点上的合力，同质点惯性力形成平衡力系，用公式可表达为

$$-m_i \ddot{x}_i + \sum f_i = 0 \quad (2-5)$$

式中， $\sum f_i$ 为作用在第 i 个质点上力的合力； x_i 为第 i 个质点的位移量； $-m_i \ddot{x}_i$ 为质量 m_i 的质点的惯性力。

下面介绍机械动力学分析中，常见的刚体作直线运动与定轴转动情况下，系统微分方程的表示方法。

1. 直线运动

直线运动中包含的要素是质量、弹簧和黏性阻尼。如图 2-2(a)所示的系统，初始状态重力 mg 与初始弹簧拉力 kx_0 平衡，图 2-2(b)表示在外力 f 作用下，取质量 m 为分离体的受力分析，应用达朗贝尔原理，可列写该系统的运动微分方程

$$m \ddot{x} + B \dot{x} + kx = f \quad (2-6)$$

式中， m 为质量，kg； x 为振动位移，为系统的输出，m； B 为黏性阻尼系数， $N \cdot s \cdot m^{-1}$ ； k 为弹簧刚度， $N \cdot m^{-1}$ ； f 为激振力，为系统的输入，N。

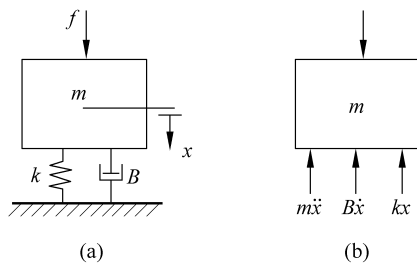


图 2-2 质量-弹簧-阻尼系统及受力分析

2. 定轴转动

回转运动所包含的要素有：惯量、扭转弹簧、回转黏性阻尼。图 2-3 为在扭矩 T 作用下的转动机械系统，外加扭矩和转角间的微分方程为

$$J \ddot{\theta} + B_J \dot{\theta} + k_J \theta = T \quad (2-7)$$

式中， J 为转动惯量， $N \cdot m^2$ ； θ 为转角，rad； B_J 为回转黏性阻尼系数， $N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$ ； k_J 为扭转弹簧刚度， $N \cdot m \cdot rad^{-1}$ ； T 为扭矩， $N \cdot m$ 。

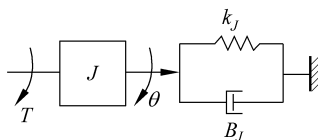


图 2-3 回转机械系统

下面以铣削过程颤振现象分析为例,说明应用上述方法建立微分方程的方法。刀具与工件间的切削颤振,将导致加工表面粗糙度增加,刀具寿命减少,已成为影响加工精度的主要因素之一。减小切削振动通常以牺牲加工效率为代价,通过降速或减小切深等方法进行振动抑制。机床切削时,从稳定切削到发生颤振存在着明显的界限,这个界限就是稳定性的极限,或者称为机床切削稳定性的条件。要实现无振动稳定切削,首先要判断系统在什么样的情况下出现振动,即根据稳定切削临界条件判别稳定和不稳定切削区域。建立切削过程的数学模型是分析切削稳定性的基础。

由于 Z 轴刚度很大,铣削加工动力学模型可以假设为相互垂直的两个自由度(X 方向和 Y 方向)的弹性阻尼系统,如图 2-4 所示。铣削动力学模型可简化为

$$\begin{aligned} m_x \ddot{x} + B_x \dot{x} + k_x x &= f_x \\ m_y \ddot{y} + B_y \dot{y} + k_y y &= f_y \end{aligned} \quad (2-8)$$

式中, x 和 y 分别表示系统在 X, Y 方向上刀具的振动位移; m_x, B_x, k_x 分别表示机床结构在 X 方向上的质量、阻尼和刚度; 而 m_y, B_y, k_y 分别表示机床结构在 Y 方向上的质量、阻尼和刚度; f_x, f_y 为三向铣削力在 X 方向和 Y 方向上的分量。

根据式(2-8)所示的铣削动力学模型,利用第 5 章所介绍的系统稳定性判据,即可确定如图 2-5 所示的切削稳定性极限图,图中的横坐标 n 为主轴转速(单位: r/min),纵坐标 h 为铣削深度(单位: μm)。根据该图选择的工艺参数,即可保证稳定的切削过程。

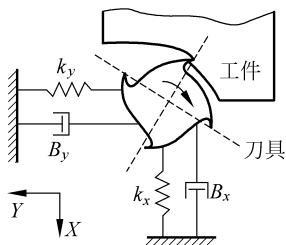


图 2-4 两自由度铣削振动模型

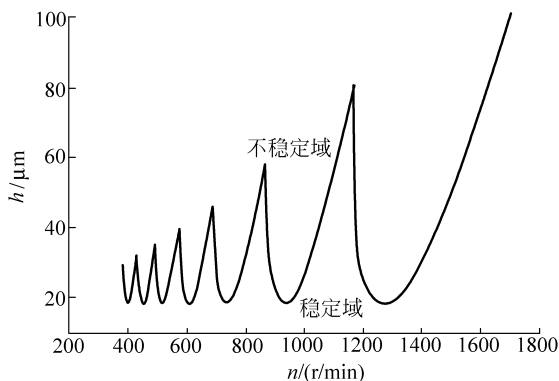


图 2-5 切削稳定性极限图

2.2 传递函数

传递函数是经典控制理论中最常用的一种数学模型。传递函数的概念是建立在拉氏变换基础之上的,只适用于线性定常系统。后面几章讲到的频率特性、系统稳定性等都以传递函数为基础。所以传递函数是一个极其重要的概念。

1. 传递函数的定义

对于线性定常系统(即描述线性系统的微分方程的系数是常数,称为线性定常系统),当