

工程控制系统设计与实践

彭侠夫 李福义 编著



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

工程控制系统设计与实践

彭侠夫 李福义 编著



厦门大学出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

工程控制系统设计与实践/彭侠夫,李福义编著. —厦门:厦门大学出版社,2016.6
ISBN 978-7-5615-4321-4

I. ①工… II. ①彭…②李… III. ①工程控制论 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 022789 号

出 版 人 蒋东明

责任编辑 陈进才

封面设计 李嘉彬

责任印制 许克华

出版发行 厦门大学出版社

社 址 厦门市软件园二期望海路 39 号

邮政编码 361008

总 编 办 0592-2182177 0592-2181406(传真)

营销中心 0592-2184458 0592-2181365

网 址 <http://www.xmupress.com>

邮 箱 xmupress@126.com

印 刷 三明市华光印务有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 16

字数 410 千字

版次 2016 年 6 月第 1 版

印次 2016 年 6 月第 1 次印刷

定价 42.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换



厦门大学出版社
微信二维码



厦门大学出版社
微博二维码

内容简介

本书从控制工程设计角度出发,围绕运动机电设备及伺服控制技术,系统详实地介绍了工程中伺服系统的设计与分析方法。内容包括:伺服控制系统基本概述、技术指标要求及海浪仿真与模拟方法,被控对象负载特性与系统输出特性,动力传动与机构分析,伺服控制系统性能分析与设计,测量数据的误差分析,测量装置的误差与精度分析及数据处理,系统调试基本方法及常规问题分析等。书中列举了一些典型应用工程分析与设计实例。

本书内容丰富,工程应用性强,可作为自动控制、测控技术及仪器、电气自动化等专业高年级学生专业课程教材,也可作为从事机电控制方面研究、设计与生产的工程技术人员的参考书。

前言

本书是在工程实践的基础上,结合相关理论编写的一部阐述如何应用理论指导完成控制系统设计与实现的著作,是编著者对自己几十年来的教学、科研及工程实践经验的一个理性归纳与总结。编写此书的目的是想向读者介绍将自动控制理论与方法用于工程实际的体会与实例。书中涉及的实际工程较多,内容较丰富。

本书的特点是理论联系实际。书中的介绍都是从实际工程应用中的问题出发,利用控制理论与方法进行有针对性的推导,把所得的结论应用于工程实际,并取得了有效的应用效果。通过解决控制系统设计与实现的实际问题,可以更加深刻地理解控制系统设计的理论与方法。读者阅读本书不仅应具备自动控制的基本理论知识,还应具备相关的专业知识。

本书共分九章。第1章对工程控制系统进行了概述,介绍了控制系统设计的技术指标及海浪仿真与模拟的方法。第2章介绍了被控对象负载特性和控制系统输出特性,对电动机、液压驱动这两类典型执行装置的输出特性进行了分析,并阐述了控制系统负载匹配的设计方法。第3章对动力传动与机构的传递关系、器件选择、参数计算以及振动问题进行了较为深入地分析。第4章介绍了伺服控制系统性能分析方法,以电控、液控为对象,结合调速、伺服系统各自的特点,详细阐述了典型系统数学模型、传动的结构柔度、系统误差及抗干扰等概念,并给出了工程实际中的应用方法。第5章讨论了伺服系统的动态综合,介绍了频域法的一般设计方法。第6章介绍了测量数据误差分析的基本概念、数据采样和谱估计方法,并对振动模拟装置进行了实例分析。第7章介绍了测量装置误差与精度的一般性概念和仪器标定与校准的工程方法,并结合实际工程应用,归纳、总结了数据的线性拟合、平滑与滤波方法。第8章介绍了伺服系统调试与实验过程,分析了系统调试中经常遇到的问题及解决办法。第9章给出了三种典型伺服系统设计 with 实现实例分析。

书中所介绍的控制系统设计与实现的方法都经过了实践的检验,被证明是行之有效的。

本书第1~5章和第9章由彭侠夫教授编写,第6~8章由李福义教授编写。

本书在编写过程中,得到了哈尔滨工程大学李文秀教授的大力支持与帮助,并对本书稿提出了许多极为宝贵的建议,在此表示衷心的感谢。

本书从工程应用角度阐述控制系统设计与实现问题,因此在理论推导方面存在一定的近似。限于作者的水平,本书在内容和文字表述方面难免存在错误和不妥之处,诚恳希望读者给予批评与指正。

编著者

2016年5月于厦门

目 录

第 1 章 工程控制系统概述	1
§ 1.1 控制系统	1
§ 1.2 综合控制系统	2
§ 1.3 控制系统的技术指标	4
1.3.1 基本技术要求	4
1.3.2 参数控制范围与精度要求的可实现性分析	7
1.3.3 快速性指标分析	9
1.3.4 其他技术要求分析	10
§ 1.4 海浪仿真与模拟方法	11
1.4.1 长峰波随机海浪仿真理论介绍	11
1.4.2 摇摆台仿真模拟	14
§ 1.5 控制系统设计方面的一些问题	14
第 2 章 被控对象负载特性与控制系统输出特性	16
§ 2.1 典型负载特性介绍	16
2.1.1 典型负载特性的一般描述	16
2.1.2 非典型负载特性	21
§ 2.2 控制系统的输出特性	24
2.2.1 电动控制系统的输出特性	25
2.2.2 液压控制系统执行元件输出特性	28
§ 2.3 控制系统的负载匹配设计方法	31
第 3 章 动力传动与机构分析	34
§ 3.1 传动方式的选择	34
3.1.1 传动方式	34
3.1.2 齿轮传动比的选择原则	34
§ 3.2 控制系统形式的比较	36
§ 3.3 动力元件选取步骤	37
§ 3.4 伺服系统传动机构设计应注意的问题	38
§ 3.5 控制系统的振动问题	39
§ 3.6 传动结构的振动问题	41
3.6.1 机械振动的基本概念	42
3.6.2 传动结构的谐振估算	43
3.6.3 振动测量介绍	50
§ 3.7 传动机构的一些参数计算	52

第4章 伺服控制系统性能分析	56
§ 4.1 伺服控制系统的构成	56
§ 4.2 电控调速系统传递函数	57
4.2.1 直流调速系统	57
4.2.2 交流调速系统	61
§ 4.3 电控位置伺服系统的数学模型	63
§ 4.4 液压位置伺服系统的数学模型	64
4.4.1 阀控型式电液位置伺服系统数学模型	64
4.4.2 典型的系控型式电液位置伺服系统数学模型	66
§ 4.5 双自由度系统的数学模型	68
4.5.1 考虑传动结构柔度的电控系统分析	68
4.5.2 考虑结构柔度的电液阀控位置伺服系统分析	70
§ 4.6 伺服控制系统的误差	73
4.6.1 控制系统的原理性误差分析	73
4.6.2 系统的干扰误差分析	77
4.6.3 非线性误差与噪声误差	78
4.6.4 减小系统误差、干扰误差的方法	79
第5章 伺服控制系统的动态综合	82
§ 5.1 概 述	82
§ 5.2 伺服系统的动态性能指标	82
5.2.1 时域动态性能指标	82
5.2.2 闭环频域动态性能指标	83
5.2.3 开环频域动态性能指标	84
§ 5.3 动态性能指标与典型系统频率特性关系	84
5.3.1 二阶系统与动态性能指标间的关系	85
5.3.2 高阶系统与动态性能指标的关系	86
5.3.3 频段分析及预期开环频率特性曲线的绘制	93
§ 5.4 频域法串联校正	104
5.4.1 比例-微分校正(PD 校正)	105
5.4.2 比例-积分校正(PI 校正)	106
5.4.3 比例-积分-微分校正(PID 校正)	108
§ 5.5 频域法并联校正	114
5.5.1 并联校正	114
5.5.2 校正装置的联结	121
5.5.3 串联校正与并联校正的比较	122
5.5.4 两种校正方法的综合应用	123
5.5.5 提高系统品质的其他措施	124
第6章 测量数据的误差分析理论简介	129
§ 6.1 数据误差分析的一般概念	129
6.1.1 一般概念介绍	129

6.1.2 数据平均值的计算	131
6.1.3 数据的平滑方法	133
6.1.4 平均值的精度评判	133
6.1.5 误差概念的一些归纳	137
§ 6.2 测量数据	137
6.2.1 一些概念	137
6.2.2 测试的随机数据四个方面的用途	137
6.2.3 动态测试与香农定理	139
6.2.4 数据处理中的非香农定理方法	139
6.2.5 随机理论及工程应用	140
§ 6.3 随机过程及其特征	140
6.3.1 随机过程函数	140
6.3.2 随机过程的特征量	140
§ 6.4 随机过程的性质与特征量估计	143
6.4.1 平稳随机过程	144
6.4.2 各态历经随机过程	145
6.4.3 一般随机过程	145
6.4.4 谱估计方法简介	146
6.4.5 振动模拟装置的频谱设计方法介绍	147
第 7 章 测量装置的误差与精度分析及数据处理	149
§ 7.1 测量器件的误差与精度的概念	149
§ 7.2 仪器的标定与校准的工程方法	153
§ 7.3 线性拟合方法	155
§ 7.4 平滑与滤波	160
7.4.1 试验曲线的平滑处理	160
7.4.2 滤波	163
第 8 章 伺服系统的调试与试验	169
§ 8.1 概 述	169
§ 8.2 伺服系统静态调试	170
8.2.1 零位校准	170
8.2.2 相位校准	171
8.2.3 反馈极性的校准	171
8.2.4 反馈系数的校准	172
§ 8.3 伺服系统动态调试	172
8.3.1 元件动态参数的测试	173
8.3.2 频率特性的测试	175
§ 8.4 典型非线性对系统的影响	177
8.4.1 非线性因素对系统性能的影响	178
8.4.2 消除非线性因素常用的方法	184
§ 8.5 机械谐振问题分析	188

8.5.1 机械谐振产生的原因	188
8.5.2 消除或减少机械谐振影响的措施	192
§ 8.6 系统性能测试	192
8.6.1 静差测量	192
8.6.2 K_v 的测量	192
8.6.3 K_a 的测量	193
8.6.4 系统调试举例	193
8.6.5 回路增益的确定和调试	196
第9章 典型系统设计举例	198
§ 9.1 陀螺平台稳定系统设计与实现	198
9.1.1 单轴陀螺稳定平台	198
9.1.2 三轴陀螺稳定平台的解耦	204
§ 9.2 船舶减摇鳍电液伺服系统设计与实现	206
9.2.1 减摇鳍电液伺服系统的组成	207
9.2.2 航速灵敏度调节和浪级灵敏度调节	210
9.2.3 减摇鳍电液伺服系统的分析与设计	213
§ 9.3 舰载平台 PWM BDCM 位置伺服系统设计	221
9.3.1 引 言	221
9.3.2 PWM BDCM 伺服系统构成方案与稳态设计	222
9.3.3 PWM BDCM 伺服系统数学模型建立	226
9.3.4 PWM BDCM 伺服系统动态设计	229
9.3.5 PWM BDCM 伺服系统鲁棒性分析	233
9.3.6 PWM BDCM 伺服系统台面试验结果	233
附录1 共锥度测量及精度评估	237
附录2 铰链力矩测量误差分析	242
参考文献	244

第1章 工程控制系统概述

§ 1.1 控制系统

随着科学技术的发展,自动控制技术越来越深入科学技术的各个领域,自动控制系统已经成为现代工业以及人们生活中重要而不可缺少的部分。

随着自控理论与实践的发展,自控理论的思想已经为人们所认识和接受。例如“反馈”与“控制”的概念,把一些零散的器件组成装置的“系统”思想,使人们认识到世界上众多事物间的联系以及它们之间的“系统”,或曰“整体”性。这样,人们在研究问题时就多了一种“整体”思维以及“系统”的考虑,对问题的认识就会更深、更全面,更符合实际。

自控技术的发展,不仅给出了获得更好的控制系统品质、性能的方法,而且使高性能的自动控制系统、控制方法及器件应用愈来愈广泛,大大提高了产品质量,提高了劳动生产率,提高了娱乐的质量,并使以前不可为的事成为可为了。

自控技术已成为工业与科技发展中不可或缺、广泛认同的技术,自动控制系统装置广泛应用于工业生产和科技研究场所。

工程技术中,自动控制系统按其控制方式可分为闭环控制系统和开环控制系统两大类。闭环控制系统可用一般框图(图 1-1)来说明。

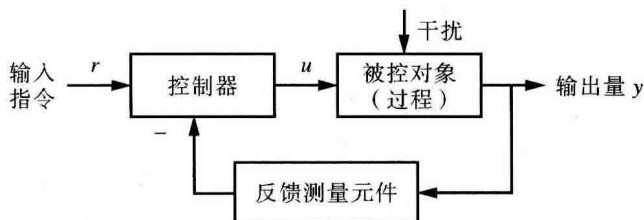


图 1-1 闭环控制系统

从图 1-1 中可以看出,闭环控制系统有一个由测量元件组成的负反馈信息环,控制器是由输入指令与检测到的输出量共同操纵的。因此,被控对象的表现(输出量)由输入指令和输出量的测量值(即输出量的信息)共同来决定,其目的是使输出量被限制在被输入指令及允许偏差所确定的某个稳定的范围内。

闭环控制系统实际是一个负反馈控制系统。即输出量与输入指令(输入量)一样对系统的控制作用有直接影响,这就是闭环控制系统即反馈控制系统的含义。

自动控制系统只采用负反馈。正反馈系统表现复杂且不稳定。这种特性不是工程控制系统所需要的。

图 1-1 所示“干扰”有系统外干扰和系统内干扰,无论内、外干扰都会使系统输出偏离输入

指令的控制要求。

闭环控制(即反馈控制系统)使用合适的控制方式不仅可以使系统表现为工程的稳定,减少或消除干扰对系统输出的影响,而且控制精度较高。也就是闭环控制可以大大提高控制系统输出的精确程度,使对输出对象的控制变得轻松且精确。但是闭环系统存在一个失稳的问题,因此需要对不同的被控对象研究使用不同的控制器和控制方法,才能既保证系统稳定,又保证达到要求的控制精确度。

开环控制系统可用一般框图(图 1-2)来说明。

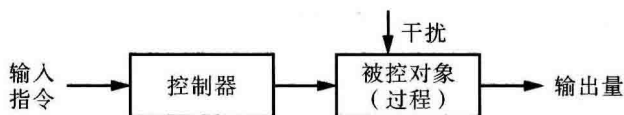


图 1-2 开环控制系统

由图 1-2 可看出,在控制器的控制作用方面没有输出量的影响,不存在一个反馈的输出量信息回路。开环控制系统不需要对输出量进行测量与反馈。输出量是按控制器设定的要求、程序输出和改变的。即对每一个输入指令,便有一个固定的工作状态和要求与之对应。输出的精确程度完全取决于系统中各器件的运行精度和初始校准的精确度。

开环系统无法减少或消除干扰对系统输出的影响,只能用于没有干扰或者干扰固定不变场合,因此控制精度较差。开环控制系统没有失稳的问题,系统结构简单,维护方便。

闭环负反馈控制系统,是将输出量与参考输入量进行比较,利用其偏差来进行对输出量的控制与修正,以力图使输出量与参考输入量保持设定的关系。也叫偏差控制系统。

反馈控制方法应用广泛。工程上的反馈控制系统有随动系统、自动调整系统和过程控制系统等。

随动控制系统是一种反馈控制系统,其主要特征是输出物理量只随参考输入量的改变而改变。与闭环控制系统一样有抑制或消除干扰影响的能力,控制精度较高。现代工业中广泛应用随动控制系统。

在自动调整反馈控制系统中,输入量保持常值或随时间缓慢变化,其目的是要保持输出物理量不受干扰影响而保持常值或缓慢变化,使之不超过允许的偏差值。

过程控制系统的输入量是事先按要求的规律编制好的工作程序(时间序列),输出量紧随其预先制订的规律和程序变化。例如热油加热与散热的控制等。大多数过程控制系统都应含有随动系统。有一些过程控制系统依程序使输出量改变运动大小和方向。在执行某种运动程序的过程中,系统运动是开环的,该程序过程受到结束或改变指令的控制,且运动变化进入下一个程序过程。过程控制在工业中应用广泛。

§ 1.2 综合控制系统

这里所讲的控制系统,主要以随动系统为研究对象。工程中,控制系统随处可见,例如炉膛的压力、温度控制,汽轮、水轮发电机的轮机转速控制,游艺机的转速与位置控制等。

随动系统控制的对象多种多样。但是,控制的最终物理量不外乎温度、流体流量和压力、工作机构的位移(直线或角位移)、运动速度、加速度或力(或力矩)。

电流、电压一般不作为最终的被控物理量。在电力供电系统中,电压是被稳定调节的。这些被控物理量中,温度可以直接检测,但无法直接控制,只能控制其被控温度空间的进燃油量和供气量,或者控制其冷却流体的流量来达到控制空间温度的目的。

其余物理量既可以直接测量也可以直接控制。

一般来说,不能被检测的量是不能被控制的。但是可以采用间接测量的办法实现间接控制。然而,间接测量的量必须与被测的实际物理量有确定的关系。

工程中很多自动控制装置都是由多个自动控制系统组合而成的,其中包括一些参数检测系统等。这些自控系统相互独立又相互联系,称为综合控制系统。

如游艺场所的飞盘游戏机,多个手臂围绕中轴回转,每个手臂可上下摆动,手臂前端有一带座椅的圆盘可独立地左右回转,形成一个三自由度的运动系统。每个自由度都是独立的自控系统,它们可协调相互间的运动。

六柱并联机构实现的摇摆平台如图 1-3 所示。这种平台可以作六自由度的运动(三轴位移和三轴回转),因此,很多实验室广泛用来作为负载模拟器使用,如船舶摇摆模拟器等。它由 6 个相互独立的液压阀控制的油缸式位置随动系统并联而成。每个油缸活塞的伸缩位移是独立的闭环控制系统。6 个油缸的运动必须按规律协调一致才能实现六自由度的平台运动,否则有可能使运动失控或设备损坏。当然,这些综合控制系统主要是在控制信号方面的协调,而信号之间的协调关系又与各油缸的机构运动及机构的设计有关。

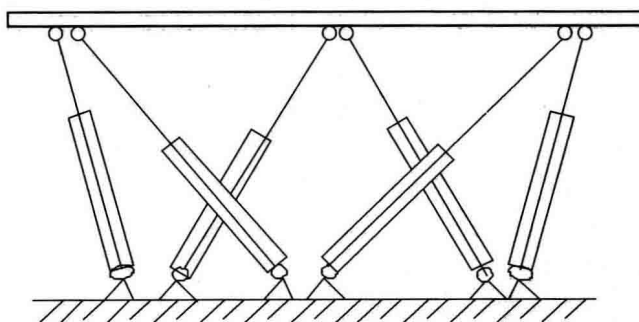


图 1-3 六柱并联机构平台

现在,计算机已经普遍应用于各个方面,当然包括自动控制系统,尤其是各种综合控制系统。若无计算机参与其控制,就无法实现其自动控制的任务。例如上述的六柱并联机构的摇摆台,其参数检测信号输入计算机,各油缸间的运动解耦计算由计算机完成,各油缸的运动的时序信号也是由计算机给出,甚至平台运动状态的管理与显示(或图形模拟)均只能由计算机来适时完成。

现在的自控系统普遍使用计算机,而且都是采用数字量解算或显示;很多传感器也已经数字化了,直接给出数字量进入计算机,全部由计算机控制。

由多个控制系统组合的控制装置,因计算机使其综合控制系统的控制变得容易而实际。故此类系统应用也很广泛。

一个炼铁高炉的控制便由多个控制系统组合而成。其中,有的是闭环随动系统,例如送风量、送油量的控制;有的是开环控制或手动控制,如投料量;有参数的检测,如风的成分检测、混合气检测与炉温检测等。检测与分析的参数进入计算机,经过计算给出各控制系统的输入指令,并不断检测参数和修改指令,完成对高炉炼铁整个过程的控制。

例 1-1 直升机旋翼动平衡试验台。

由一个立式大电机经联轴器与台上的旋翼头的中轴连接,以驱动直升机试验台的旋翼头旋转。转速可任意调整(最大转速 400 r/min)。

驱动该主轴(中轴)的是电机变频拖动系统。由变频器驱动 6 000 V 交流高压电动机按控制台设定的转速启动并稳定在设定转速上。

驱动该主轴运动的还有一个慢速拖动系统。方式是变频器-交流电动机-减速器方式,为不调速的开环控制系统。

总桨距控制系统(即总桨距顶升机构)。方式是双速电动机-减速机-蜗轮蜗杆顶升机构。由电机尾部的编码器测量电机转角,实现闭环控制,间接实现顶升位移控制,即总桨距控制。调节总桨距位移,通过旋翼头机构调整桨叶攻角。

铰链力矩测量系统。测量桨叶旋转过程中,桨叶中轴所受的回转力矩,即桨叶升力作用点不在桨叶的回转轴上而产生的操控阻力矩。检测方式为拉压力传感器-模数转换-电滑环传输-控制台。

共锥度测量装置。该装置是为了测量直升机旋翼在试验台上旋转过程中的叶片飞扬锥面角,即 3 个叶片的锥面角在测量点上的高度与高度差值。这是一套激光测量装置,两束直立激光,一束与上两直立激光交叉的斜向激光束;上面发射,下面接收。根据不同高度的桨叶划过三束激光的时间差,利用该时间差来测算叶片之间的高度差和振摆参数。

为了将桨叶送到试验台顶的平台,并安装在旋翼头的旋臂上,有一套液压的升降平台装置和安放在液压升降平台台面轨道上的小升降车。升降平台与小升降车由现场的控制盒操控,开环控制。升降台上、下位置设有限位开关与限位信号传输至检测台,并与控制信号联锁。

机械旋翼头装置。上面安装有铰力测量传感器和总桨距微调机构。所谓调总桨距即改变旋翼头下部静止大盘的高度位置(由总桨距顶升机构完成),通过带传感器的顶杆推拉,使旋翼臂改变回转角度,从而改变安装在旋臂上桨叶的攻角。

试验台上这些系统或装置既相互独立又相互联系。它们之间有一套操作联锁装置,任何一套系统需要运动(工作)都必须具备解锁(启动)条件,才能操作运行。试验台上的所有装置都必须具备抗御旋翼振动干扰的能力,不允许在试验时引起共振,以免造成测试不准或使机构或器件损坏。

所有的操作控制、参数计算与显示均集中在控制台上,控制台使用可编程控制器与计算机。还有若干集中了众多工业继电器电路的电控柜,实现各种操控功能。

系统机构通过计算机集成为一个整体,共同完成试验测试任务,该系统应当被称作综合控制系统。

在工程中,这样的综合控制系统是很多的。

§ 1.3 控制系统的技术指标

1.3.1 基本技术要求

工程上对伺服控制系统的技术要求是很具体的。这些要求规定了所要求设计的系统的各种性能指标,同时也是设计该系统的基本依据。对系统的技术要求一般以《设计任务书》或者以《技术规格书》的形式提出。由于实际伺服系统有着各种不同的用途和工作环境,因而其技术要求也不尽相同。我们不可能一一量说明每种伺服系统的技术要求,但可以用一两个典

型系统来说明这些技术要求的基本内容,同时还可以定性说明对一般伺服系统的共同技术要求。

1. 对调速系统的基本技术要求

(1)对被控对象运动速度的要求。指被控对象应能达到的最高转速 $n_{\max}$ (r/min)、最高角速度 $\Omega_{\max}$ (rad/s)、最高平稳线速度 $v_{\max}$ (m/s) 以及被控对象平滑运行时的最低转速 $n_{\min}$ (r/min)、最低角速度 $\Omega_{\min}$ (rad/s)、最低平稳线速度 $v_{\min}$ (m/s)。有时用调速范围 D 表示:

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}} = \frac{v_{\max}}{v_{\min}} \quad (1-1)$$

(2)速度调节的连续性和平滑性要求。即系统带动负载在调速范围内,是有级调速还是无级调速,系统是可逆的还是不可逆的。

(3)对动态性能的要求。也就是对阶跃信号输入下系统的响应特性。第一种指标是系统在阶跃信号作用下系统的最大超调量、过渡过程时间以及振荡次数等。第二种指标是在正弦信号输入作用下,控制系统的通频带和振荡度等。第三种指标是提出控制系统的剪切频率、相角裕度和增益裕量。

(4)静差率 δ 或转速降 Δn (或 $\Delta\Omega, \Delta v$)。转速降是指控制信号一定的条件下,系统理想空载转速 n_0 与满载转速 n_R 之差,即

$$\Delta n = n_0 - n_R \quad (\text{或 } \Delta\Omega = \Omega_0 - \Omega_R) \quad (1-2)$$

静差率是指控制信号一定时, Δn 与 n_0 的百分比,即

$$\delta = \frac{n_0 - n_R}{n_0} \times 100\% = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

(5)负载扰动作用下系统的响应特性。负载扰动对系统动态过程的影响是调速系统的重要技术指标之一。衡量抗扰能力一般取大转速降(升) $\Delta n_{\max}$ 与响应时间 t_{sf} 来度量。

(6)对元件参数变化的敏感性要求。指控制系统本身各项元件参数的变化所引起的误差。通常如不提出要求,则应包含在系统精度和稳定性要求之内。

(7)对系统工作制(有长期连续运行、间歇循环运行和短时间运行之分)、MTBF (Mean Time Between Failure, 即平均无故障时间)、可靠性以及使用寿命的要求。

(8)对系统的环境温度、湿度、“三防”(防潮、防腐蚀、防辐射)、抗振动、抗冲击的要求。

(9)对系统的体积、重量、结构外形、安装特点等的限制。

(10)对系统生产成本、元部件通用性、标准化程度、能源利用率、维护使用以及对系统电源条件(电源种类、规格、容量)等的限制。

2. 对随动系统的基本技术要求

(1)系统静态误差 e_0 (简称“系统静差”)。通常指系统输入指令为常值时,输入与输出之间的误差。位置控制系统一般设计成无静差系统。理论上系统静止协调时没有位置误差。实际上,系统的测量元件(亦称“敏感元件”)的分辨率有限,系统输出端承受干摩擦造成“死区”,这些均可造成系统静误差。

(2)速度误差 e_v 和正弦跟踪误差 $e_{\sin}$ 。当位置控制系统处于等速跟踪状态时,系统输出轴与输入轴之间的瞬时位置误差(角度或角位移)称为速度误差 e_v 。当系统作正弦摆动跟踪时,输出轴与输入轴之间瞬时误差的振幅值称为正弦跟踪误差 $e_{\sin}$ 。

(3)最大跟踪角速度 $\Omega_{\max}$ 、最低跟踪角速度 $\Omega_{\min}$ 。最大跟踪角速度是指系统跟踪误差不超过允许值时所达到稳定运行的最大输出角速度。最低跟踪角速度是指系统控制对象作匀速跟

踪时所能达到的最低平稳角速度。

(4)最大跟踪角加速度 $\epsilon_{\max}$ (线加速度 $a_{\max}$)。是指系统跟踪误差不超过允许值时,系统输出轴所能达到的最大角加速度。

(5)速度品质系数 K_v 和加速度品质系数 K_a 。速度品质系数是指输入斜坡信号时,系统稳态输出角速度 Ω_0 (或线速度 v_0) 与速度误差 e_v 的比值:

$$K_v = \Omega_0 / e_v \quad (1-4)$$

而加速度品质系数 K_a 是以抛物线函数信号(等加速度信号)输入时,系统稳态角加速度 ϵ_0 (或线加速度 a_0) 与其对应的系统稳态误差 e_a 的比值:

$$K_a = \epsilon_0 / e_a \quad (1-5)$$

(6)振荡指标 M_r 和频带宽度 ω_b 。随动系统闭环幅频特性 $A(\omega)$ 的最大值 $A(\omega_0)$ 与 $A(0)$ [由于随动系统为无静差系统,故 $A(0) = 1$] 的比值,称为振荡指标 M_r 。当闭环幅频特性 $A(\omega_b) = 0.707$ 时,所对应的角频率 ω_b 称为系统的带宽。

(7)系统对阶跃信号输入的响应特性。当系统处于静止协调状态(零初始状态)下,输入阶跃信号时,系统的最大允许超调量 $\sigma\%$ 、过渡过程时间 t_s 和振荡次数 N 均应有具体限制。

(8)等速跟踪状态下,负载扰动引起的系统响应特性。系统作等速跟踪时,负载扰动(阶跃或脉冲扰动)所造成系统最大瞬时误差 e_{mf} 和过渡过程时间 t_{sf} 均应有具体要求。

此外,调速系统的(7)(8)(9)(10)项要求,对随动系统也适用。

综合控制系统的功能各不相同,技术指标也各不一样的。但技术指标的要求是类同的。一般的技术指标应当说明用户希望实现什么,实现到什么水平,并提出具体的技术、功能要求及在每一项功能下的运动范围、控制精度和实现的方式等。

3. 例 1-1 动平衡试验台项目的基本要求

首先提出该装置的总的要求,然后分项提出各不同功能要求。以例 1-1 动平衡试验台项目为例,其技术要求指标如下:

(1)总体目标:提供一套满足载荷 $\times \times$ 吨直升机桨叶动平衡试验的试验台,并在总功率和旋翼头强度方面尽可能兼顾 $\times \times$ 吨直升机。试验台技术要求将随着设计工作的进展进一步完善。在设计建造时,要充分考虑环保的要求。

(2)旋翼动平衡试验的正常工作环境条件:气温, $\pm 40^\circ\text{C}$; 风力, 4 级 (12 m/s) 以下。

(3)主要技术要求:主轴转速 180~400 r/min, 电机输出功率 1 500 kW, 旋翼旋转平面高度不低于 6 m, 防护网直径 32 m, 高约 10 m。

(4)旋翼动平衡台主要包括几个部分:拖动系统、试验台体、旋翼头、共锥度测量、铰链力矩测量、初始安装角控制测量、总距控制测量、周期桨距控制测量、试验台体振动测量、控制系统、润滑系统以及其他辅助设施等。简略说明如下:

①拖动系统

主轴转速分高速和低速,其高速转速范围 180~400 r/min。高速状态时,试验台由 1 500 kW 调速电机拖动;主轴以 0.5~5 r/min 低速状态时,试验台由另一台电机拖动。变频电源采用罗宾康公司的无谐波交流变频器。

②控制系统

监控各部分系统的工作状态。只有各部分系统都正常时,才允许试验台开始试验,并实时监控,显示各部分的工作状态。

设定旋翼的转速 (180~400 r/min)、升速时间 (60~100 s)、超速报警范围等。转速控制精

度为 $\pm 1 \text{ r/min}$ 。要求消耗功率显示和存储等。

对于 $0.5 \sim 5 \text{ r/min}$ 的低速状态,其转速控制精度为 $\pm 0.1 \text{ r/min}$,设有试验台的安全保护联锁装置,并具有应急停车功能。

完整全面地分析技术要求的内容,研究其可行性与可实现方法,制订较详细的实施方案和系统的技术指导意见是系统设计前的最主要工作。

在例1-1技术要求中,就拖动系统而言,给出的要求是运动范围 $180 \sim 400 \text{ r/min}$,实际是 $0 \sim 400 \text{ r/min}$,控制精度为 $\pm 1 \text{ r/min}$,低速情况转速范围 $0.5 \sim 5 \text{ r/min}$,控制精度为 $\pm 0.1 \text{ r/min}$ 。

这要求明确给出该参数的控制范围和精度。

1.3.2 参数控制范围与精度要求的可实现性分析

在不同的控制系统中,控制对象是不同的,控制参数的物理量也不同,参数的控制范围与精度要求也是各不相同的。

实际上,例1-1中的转速控制范围是 $0 \sim 400 \text{ r/min}$,可凋控制精度为 $\pm 1 \text{ r/min}$ 。这里的控制精度指的是峰-峰值,是一种绝对误差形式的精度要求,即转速波动或控制的转速与理论要求差值的最大值。也就是说,控制台屏幕输入 300 r/min 的要求,实际数显表所显示测量的转速应当在 $(300 \pm 1) \text{ r/min}$ 范围之内。这里并没给出检测方式的要求。

参数范围(量程)、检测精度与检测方式是三个重要的相互制约、相互联系的因素,决定着实现的可行性。

在这三个因素中,检测精度有着峰-峰值要求、平均值要求或均方根值要求,其实际内涵是不一样的。另外,还有绝对误差要求或相对误差要求,这也是有较大差别的。

工程上一般用峰-峰值,即最大绝对误差,要求如同上例。也有用均值或均方根值绝对误差要求的。按均方根误差要求,一般其误差的峰值(最大值误差)应为要求的均方根误差的3倍左右。因此按最大绝对值误差要求是最严的一种情况。

以上的精度要求是以绝对误差形式出现的,而检测仪器的精度一般以相对误差形式给出。

仪器的相对误差以百分比给出,即

$$\delta(\%) = \frac{\text{绝对误差}}{\text{仪器量程}} \times 100\% \quad (1-6)$$

在考虑选用仪器仪表时,应换算成绝对误差与技术要求中的精度要求比较,以衡量选取什么样的测试仪器或传感器用于控制系统中。

从式1-6中可看出,在绝对误差一定的情况下,量程愈大,精度愈高。

也有技术要求精度以相对误差的形式给出。例如,要求复现正弦的失真度小于5%,加力控制误差小于10%最大量程等。考虑这样的问题时,一般应换算成绝对误差的要求。绝对误差在控制系统中容易检测校验,检测的是实值。

应当注意,量测仪器与被测数据之间只有其绝对误差是相同的,其相对误差并不一致。拿测试仪器的相对误差衡量被测数据的相对误差并不正确,这与实际情况有关。因此建议:

1. 选用测试仪器时,尽量使用其全量程。

2. 应根据被测量要求的精度(绝对误差的大小)选择合适的量测仪器的精度等级,所使用的量测仪器的精度等级均要高于被测量要求的精度等级(相对误差表示的等级)。尤其在变更数据测量与传输形式时不可忽略此点。

如果认为数据信号本身是真实的,则数据的精度基本上取决于量测仪器的精度。量测仪

器如果未达到测量精度的要求,所得数据位数再多,也是不可信的数据。精度要求中,检测方式也是应当考虑的问题。

无论哪种形式的误差要求,有的可以直接测量,有的不能直接测量,而必须间接测量;有的参量可以直接测量,但只能间接控制;有的要求也可能在现实中无法实现。

例如一单位要设计实现一个六自由度摇摆台,要求六自由度绝对测量精度为 1 密位(3.6')以下。精度要求 1 密位是相对大地坐标,而且载重 6 t,就是现在实现也是很困难的。因为六自由度转台的空间角度还无法直接测量,只能间接测量每个通道上的位移量。按照一定公式,可计算出采样时刻的空间位置与角度。测量误差和计算误差最后变成空间位置的误差究竟多大,不经系统仿真难以估计的。特别是在系统还未开始设计之前,仿真是无法实现的。因此在分析这样的要求时一定要谨慎。

系统设计前,应对系统指标要求的可实现性,量程、精度要求,检测方式等参数的相互制约关系认真加以分析。

深潜器的潜水深度是不能直接测量的参数。只能通过压力测量来表征深潜器下潜的位置与海平面的平均位置之间的差距,即深度。下潜 1 000 m,相当于水压为 100 bar(10 MPa)。深潜器下潜深度是由压力传感器通过输出的电压来显示的,压力传感器需要用压力表来校准和标定。十多年前,我国引进英国的 ROV(有缆无人深潜器)在无锡验收时出现了一个问题。英国人在标定其深潜传感器时,使用自带的压力表(表面直径 $\phi 60$,最大量程 4 000 psi,最小格为 200 psi),压力表的精度等级为 5%,即相当于 5 级精度的压力表。中国国家标准要求上试验台的压力表必须精于 2.5 级的压力表。试验中,深潜器在 0.43 级精度压力罐中加压,压力罐上压力表才显示 53 bar,而控制室中屏幕已显示 600 m 水深。英方要求停止加压,中方认为未达到 600 m 深度的要求(60 bar 水压)。经分析,最后双方认同未达到 600 m 水深。此事说明,检测设备与传感器是需要校准的,且校准应符合国家标准。

举一例说明量程、精度要求间的制约关系。

例 1-2 某声纳基阵项目在项目论证时,要求基阵回转角为 $\pm 176^\circ$,控制精度 2 密位(7.2')。这里相对误差为 $7.2'/(60 \times 176^\circ) = 0.068\%$ 。当时,这种万分之七的精度在检测上是有困难的,要达到控制要求精度就更难了。最后,采用多级旋转变压器实现了检测与控制。当然,按照现在的检测传感器的水平,角检测达角秒级已不是什么难事了。

绝对误差不大,但量程太大,设备精度要求加大,这也是一个难以实现的问题。

在动平衡试验台铰链力矩检测项目的技术要求中,铰链力矩的标的要求为 $\pm 600 \text{ N} \cdot \text{m}$ $\pm 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$,相对精度为 0.08%。所用美国的拉压力传感器量程 1 000 $\text{N} \cdot \text{m}$,要达到绝对误差 $\pm 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的要求,则相对误差必须高于 0.05%,故使用传感器的相对精度为 $\pm 0.03\%$ 。当时考虑模数转换模块用 12 位,首位为符号位,有用位数 11 位,则转换精度为 $1/2\,048 = 0.05\%$,可以满足工程上铰链力矩信号的检测与传输要求。因此在控制台上是以 2 000 个数码对应 1 000 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。故此,在设计之前已大致确定了铰链力矩信号检测传输的可实现的方案。

这里,由于测量传感器量程大于所要求的量程,故在相同绝对精度下,测量仪器的相对精度由要求的 0.05% 提高到 0.03%。

工程实现中,信号在传递中的匹配也是一个值得注意的问题。动平衡试验台实现过程中,铰力传感器量程 $\pm 1\,000 \text{ N} \cdot \text{m}$,精度 $\pm 0.03\%$,输入直流电压 15 V,增益为 2 mV/V,最大量程的输出电压为 $\pm 30 \text{ mV}$,模拟转换器将其转换为 4~20 mA 电流传输到控制台。数字转换器的量程最小输入为 $\pm 50 \text{ mV}$,精度 0.05%。传感器以最大量程 $\pm 30 \text{ mV}$ 的信号输入给数字