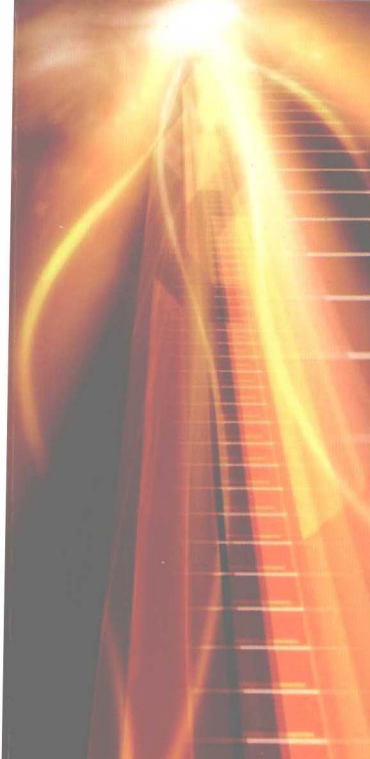




Weapons Servo System Engineering Practice

武器伺服系统 工程实践

陈明俊 李长红 杨 燕 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

TJ03
3

武器伺服系统工程实践

陈明俊 李长红 杨燕 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍了武器伺服系统的设计输入;战术技术指标和被控对象特性;给出经过多个产品验证的伺服系统的实用设计方法及达到主要战术技术指标的技术手段;详述了Ⅲ型 ITAE 最优伺服系统、自整定方法、模型参考自适应控制(MRAC)、智能 PID、分数阶控制等先进控制方法的工程设计途径及成功应用的实例;分析了伺服系统设计者要关注的共性问题——数字控制技术、齿隙、结构谐振;本书还介绍了永磁同步电机(PMSM)驱动和构成具有自整定功能的一体化跟踪伺服系统产品的技术及应用;介绍了一体化开关磁阻电机(SRM)定位系统的研发;最后介绍了压制兵器定位控制及解耦、防空兵器射击线稳定及光电火控武器大系统中多伺服系统组合方法和对综合设计的研究。

本书适用于从事伺服系统研发、生产、鉴定、维护、使用的工程技术人员,也可供高校相关专业的教师、研究生、高年级学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

武器伺服系统工程实践/陈明俊,李长红,杨燕编著. —北京:
国防工业出版社,2013.5
ISBN 978-7-118-08700-0

I. ①武... II. ①陈... ②李... ③杨... III. ①武器—伺服系统—研究 IV. ①TJ03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 087231 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 20 字数 353 千字

2013 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序

《武器伺服系统工程实践》一书与广大读者见面了,这是陈明俊研究员与他带领的年轻技术骨干共同完成的一部学术专著。陈明俊研究员是中国兵器第二零二研究所的一名火炮自动控制专家,我几年前就听说他有一个愿望,就是把自己和同事们数十年从事武器伺服系统设计的经验和工程实践编成一本书,以供年轻的工程设计人员学习和参考。这本书的出版体现了一名老专家对祖国武器事业发展的使命感和责任感,同时我们也欣喜地看到年轻一代技术人员的成长。

伺服系统是多种武器系统的重要单体,其性能对作战效能有重要影响。伺服系统又是一种典型的自动控制系统,其技术进步离不开控制理论指导,其实践又丰富着控制理论。

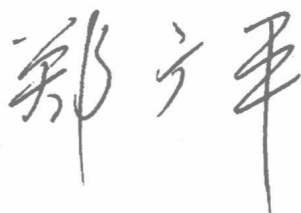
随着对武器系统综合性能和信息化能力要求的不断提高,以及控制理论、计算机技术、电力电子技术的发展,伺服系统的设计、试验、制造、检测能力不断提升,近些年陈明俊研究员及其技术团队在控制理论应用上不断研究和创新,研制的伺服系统产品技术先进,成功地列装于多个国家重点型号产品中。他们曾成功研制了我军第一个定型列装的火炮数字伺服系统、第一个总线控制伺服系统,为武器数字化、信息化创造了必要的条件;在国内外第一个成功实现 ITAE 最优Ⅲ型伺服系统并用于武器系统,解决了重点型号研制中的关键技术问题,在控制领域中,对高阶无差度最优控制系统的实现和应用取得了突破性进展。陈明俊研究员及其团队还不断拓展研究领域,开展电机及其驱动新技术,特别是永磁同步电机和开关磁阻电机驱动的研究,成功研制了全面满足陆军军用环境要求的永磁同步电机驱动器,覆盖了陆军武器的电压、功率范围,装备了多种规格数百台产品,初步形成了产品系列,且性能可靠,技术先进。具有自整定功能的一体化伺服控制——驱动器,使伺服系统的设计、调试、检验发生根本变革,使其更智能、便捷、高效。

为了保持所研发伺服系统的先进性,陈明俊研究员和他的团队关注控制技术前沿,把握技术发展趋势,积极开展预先研究,增加新技术储备,在型号研制立项时即可形成工程应用,通过试验验证并进一步完善,使之更加成熟,藉此不断提升产品性能,从而形成了技术创新、产品研发的良性互动,保证与专业技术进

步保持同步,此书即为他们从事伺服系统研究与工程实践的经验总结。因此,此书更侧重于实际产品的设计方法和工程实现。书中给出的伺服系统工程设计方法简明、有效、实用,经过多个产品的实际验证;从更广的角度,有针对性地分析了需关注的技术难点和相应解决方法;详细介绍了在伺服系统设计中具有实效的多种先进控制方法的机理及应用技巧;书中较多的工程实例,说明出现的问题、现象、解决方案、物理解释,列举出经验数据。

希望这本专著能为相关技术人员提供一个理论通向实际的便捷通道,也希望专著提供的方法、思路和经验能对同行的工作有所启发和帮助,起到伺服技术进步阶梯作用。

兵器工业第二零二研究所所长

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '郑' (Zheng), '方' (Fang), and '平' (Ping), written in a cursive style.

2012 年 10 月

前 言

《武器伺服系统工程实践》一书的背景是作者及同事们多年的产品研制和预先研究工作,内容所及均针对实际应用。

本书共分 10 章,内容分为武器伺服系统的工程设计方法、先进控制方法的应用、新型驱动技术、与总体相关的伺服技术四大部分。

书中给出的伺服系统工程实用设计方法基于两个考虑:一是特定性,只依据具体“设计输入”,即战术技术指标、负载特性;二是物理约束,按武器机电系统的相关物理概念、实践经验给出线性区工作和非线性区工作的界定条件,按动力学约束估计系统带宽、计算执行元件功率。方法包括:线性区关键时间常数 T_{Ω} 及其确定方法,基于 T_{Ω} 的伺服系统工程设计,伺服系统基型,系统校正的解析法。在多个产品研发中应用,验证可行。对提高跟踪精度的复合控制方法、大角度调转、射击冲击误差三大最重要的战术技术指标的达标提出成熟的解决方法和相关分析。

对某些特定的要求,当上述传统控制方法不足以解决某些技术难题时,先进控制方法,可作为上述伺服系统设计手段的有效补充。

本书系统论述了“三阶 ITAE 最优Ⅲ型伺服系统的设计方法”,该方法已成功应用在列装武器系统中,这是Ⅲ型伺服系统在国内首次成功实现和应用。此外,还介绍了模型参考自适应控制系统(MRAC)、智能 PID 控制的实用方法及其成功应用,基于被控对象参数辨识的伺服系统控制参数自整定实用方法及特点,控制领域近年来研究的热点“分数阶控制”(FOC)。在介绍各类设计方法后,对伺服系统设计需充分关注的共性关键技术问题——数字控制技术、传动间隙与多电机消除、结构谐振及影响,做了专门的论述和分析,提供了经验和方法。

执行电机及其驱动器是伺服系统运动控制的基础环节,近年来,永磁同步电机(PMSM)及其驱动技术对推动高性能运动控制系统的发展起了重大作用。本书介绍了作者通过国防预先研究,在 PMSM 驱动器设计上,提出并实现的最大转矩电流比控制,提高了力能指标;针对军用伺服的发展,将位置控制与驱动控制设计为一体,特别是加入基于相关辨识的自整定功能,启动上位机系统,通过人机交互界面输入技术要求和铭牌参数,可直接面向电机和被控对象,自动整

定系统的电流环、速度环、位置环参数,并完成性能自动检验,直到满足全部技术指标,这种针对位置跟踪的自整定功能在国内外驱动器产品中具有独到之处。上述技术为产品智能化、通用化、系列化打下基础,是军用伺服技术长足的进步。

书中还介绍了为压制兵器开发的“一体化开关磁阻电机(SRM)定位伺服系统”。这种本质是步进的电机及其驱动方式,具有结构简单、可靠性高、力能指标高的优点。所设计的定位控制策略不同于传统定位原理,更简单而具有更好的鲁棒性和精度。在定位伺服系统中采用开关磁阻电机及驱动是实用、经济、可靠的新技术途径。

与武器总体密切相关的技术本书主要介绍三种:

(1) 压制兵器自动操瞄。是伺服技术的一个新应用领域。本书对压制兵器自动操瞄调炮误差作了全面分析,并介绍了为提高在大地坐标系下调炮精度而产生的“二次调炮”方法;为提高快速反应能力而采用捷联惯导的“一次调炮”方法及其关键——解耦方法。

(2) 射击线稳定。书中讨论了不同路况下射击线稳定对伺服系统的高要求及产生的相关技术问题和折衷思路。

(3) 多伺服环跟踪瞄准大系统。单一伺服系统只是武器控制系统中的一个环节,一个好的武器伺服系统工作者,应对全系统各个部件、环节的相互联系、耦合和约束有深入了解,以在全系统层面对单体伺服系统的要求加深理解。本书介绍的自行高炮多伺服系统跟踪瞄准的大闭环结构和综合,提出了比现行方法更优越的新方法及其分析、验证。

作为工程实践,实际工作者往往偏重实验、经验得到的方法,不待严格证明就将其应用于产品,它的局限性是显然的;从理论上证明应用的根据及适用范围才是严密的,要比应用本身困难很多,这就是为什么说理论高于实践,更具有普遍性,更有生命力。丰富的实践提出的问题,或许会引起有些理论工作者的兴趣。

本书的读者需具备自动控制理论、电机及驱动、微机技术、伺服系统原理等方面的基础,对从事伺服系统研制、设计、生产、调试、实验、使用、维护的实际工作者较为适用。本书的着眼点是把握本质,提供实用、简明的控制方法和较多的实例,以及对方法和现象的物理解释。

目前,在相关的参考书目中,针对伺服系统的具体工程实践题材的较少,此书可供自动化类专业的高年级学生和研究生参考,以了解这类典型自动控制系统的任务、具体构成和特点,理论与应用的接合点,解决问题的思路,对研究方向、内容的选题也会有所启迪。

本书由陈明俊构思、确定全书内容和结构并参与编写统稿,其中,第5章的

目 录

第 1 章 武器伺服系统的分类与设计输入	1
1.1 武器伺服系统的分类	1
1.2 武器伺服系统的技术指标	2
1.2.1 位置跟踪伺服系统	2
1.2.2 定位伺服系统	4
1.3 被控对象特性	5
1.3.1 负载特性	5
1.3.2 传动特性	8
1.3.3 火炮动力学与伺服系统	8
1.4 数学模型	9
1.4.1 伺服系统的构成	9
1.4.2 执行电机—被控对象模型	10
1.4.3 伺服系统模型	12
第 2 章 伺服系统的基础环节设计	16
2.1 负载转速、转矩和惯量的计算	16
2.2 工作循环与功率均方根值、最优速比	18
2.2.1 典型运行工作循环	18
2.2.2 等效正弦工作循环	19
2.2.3 最优减速比	21
2.3 电机的类型和特性	22
2.3.1 伺服电机的主要类型	22
2.3.2 伺服电机的主要参数	22
2.4 电机的选取和校核	24
2.4.1 位置跟踪伺服系统电机的选取	25
2.4.2 定位伺服系统电机的选取	29
2.5 动力传动箱的结构及参数	31
2.6 输出角度的测量	32

2.6.1	传感器精度	32
2.6.2	测角精度	33
2.6.3	两种双通道测角结构	34
第3章	伺服系统的工程实用设计	37
3.1	对数频率特性	37
3.1.1	希望开环对数幅频特性	38
3.1.2	串联和并联校正	42
3.2	线性区关键小时间常数 T_{Ω} 及其确定方法	43
3.2.1	关键小时间常数概念的引入	43
3.2.2	T_{Ω} 的确定	45
3.3	基于关键小时间常数 T_{Ω} 的伺服系统设计	50
3.3.1	一阶无差度伺服系统	50
3.3.2	二阶无差度伺服系统	52
3.3.3	伺服系统“开环基型”	53
3.3.4	伺服系统设计的解析方法	56
3.4	对扰动的响应	59
3.4.1	对扰动的响应与对主令响应的关系	59
3.4.2	扰动响应分析	60
3.5	复合控制	62
3.5.1	复合控制的设计	62
3.5.2	一阶无差度系统的前馈补偿	63
3.5.3	二阶无差度系统前馈补偿的设计	65
3.5.4	复合控制的跟踪精度的估算	67
3.6	大角度调转	70
3.6.1	基本准则	71
3.6.2	$\sqrt{e}$ 控制律	72
3.6.3	“柔化”的 Bang - Bang 控制	74
3.7	火炮伺服系统射击误差分析	75
3.7.1	射击力矩描述	75
3.7.2	线性区工作的射击误差分析(频率法)	76
3.7.3	非线性区(饱和)的射击误差分析	79
3.7.4	射击误差的补偿	82

第4章	三阶 ITAE 最优Ⅲ型伺服系统的设计及工程实践	84
4.1	ITAE 最优调节律	84
4.1.1	目标函数	84
4.1.2	典型传递函数	85
4.2	三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统	86
4.2.1	三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统的标准形式	86
4.2.2	三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统分析	87
4.2.3	ITAE 最优Ⅲ型系统的性能仿真	89
4.3	三阶 ITAE 最优Ⅲ型系统的工程设计	90
4.3.1	技术要求与方案分析	90
4.3.2	典型伺服系统的基本固有结构	91
4.3.3	ITAE 最优Ⅲ型系统的工程设计	93
4.4	数字化 ITAE 最优Ⅲ型系统结构与控制律的实现	99
4.4.1	系统实现	99
4.4.2	台架实验结果	101
4.5	三阶 ITAE 最优Ⅲ型数字伺服系统的工程实践	102
4.5.1	结构谐振	102
4.5.2	电机扩大机转速波动的影响	103
4.5.3	跟踪平稳性	104
4.5.4	静阻摩擦力	104
第5章	自整定、自适应控制与智能控制、分数阶控制	106
5.1	伺服系统的控制参数自整定	106
5.1.1	相关辨识法的基本原理	107
5.1.2	相关辨识法的 PMSM 速度环自整定	113
5.1.3	相关辨识法的位置环自整定	119
5.1.4	继电特性自整定	123
5.2	模型参考自适应控制	125
5.2.1	最简结构	126
5.2.2	自适应控制律的求取	126
5.2.3	MRAC 伺服系统的实现	129
5.2.4	实验结果	131
5.3	智能 PID 控制	136

5.3.1	常规 PID 的物理过程分析	136
5.3.2	智能 PID 的分析	137
5.3.3	误差线性区的智能积分	138
5.3.4	智能 PID 的实际应用	141
5.4	位置伺服系统的分数阶 PI^α 控制	142
5.4.1	分数阶微积分的基本概念	142
5.4.2	位置伺服系统的分数阶 PI^α 控制器设计	144
5.4.3	分数阶 PI^α 控制器设计的数字实现	147
5.4.4	仿真研究	149
5.4.5	试验研究	158
5.4.6	结论	161
第 6 章	伺服系统共性技术问题	162
6.1	数字伺服系统关注的几个问题	162
6.1.1	采样与同步	162
6.1.2	离散化方法与采样频率	165
6.1.3	数值处理	167
6.1.4	数据通信与可靠性	171
6.2	传动间隙与多电机驱动消除	173
6.2.1	传动间隙对伺服系统性能的影响	174
6.2.2	工程设计中对传动间隙的考虑	175
6.2.3	多电机传动	176
6.2.4	双电机消除	177
6.3	机械结构谐振及影响	181
6.3.1	电机与负载惯量间的弹性耦合	182
6.3.2	两种伺服系统传动结构	184
6.3.3	结构谐振对速度环的影响	185
6.3.4	结构谐振对系统性能的影响	188
6.3.5	ITAE - III 型伺服系统对结构谐振的适应能力分析	189
6.3.6	陷波器	190
第 7 章	一体化永磁同步电机位置伺服驱动器	193
7.1	永磁同步电机数学模型	193
7.1.1	永磁同步电机及坐标系	193

7.1.2	电压与电流的三相 ABC 系到两相 dq 系的变换	194
7.1.3	电压与电流的 dq 系到 ABC 系的变换	196
7.1.4	永磁同步电机在 dq 坐标系下的方程	197
7.2	永磁同步电机矢量控制电流环的设计	198
7.2.1	两种坐标系下的电流环	198
7.2.2	基于 dq 坐标系下的永磁同步电机电流环的解耦设计	201
7.3	永磁同步电机调速系统原理	206
7.3.1	PWM	206
7.3.2	永磁同步电机矢量控制系统	214
7.4	永磁同步电机调速系统最大转矩电流比控制	215
7.4.1	最大转矩电流比控制原理	215
7.4.2	最大转矩电流比工程近似算法	218
7.4.3	仿真研究	220
7.4.4	实验研究	221
7.5	调速系统驱动器的实现	222
7.5.1	全数字调速系统控制器	223
7.5.2	主回路动力单元	225
7.6	一体化、通用化与智能化位置伺服驱动器的研制	225
7.6.1	DSP 伺服控制器	226
7.6.2	智能位置传感器	227
7.6.3	上位机人机界面与参数整定软件	228
7.6.4	实验结果	231
第 8 章	一体化开关磁阻电机定位伺服系统	235
8.1	开关磁阻电机驱动原理	235
8.1.1	开关磁阻电机的基本结构	235
8.1.2	开关磁阻电机的工作原理	236
8.1.3	开关磁阻电机驱动	239
8.1.4	开关磁阻电机运行状态分析	242
8.2	开关磁阻电机定位伺服系统的实现	246
8.2.1	系统的组成与结构	246
8.2.2	控制器	247
8.2.3	功率主回路及其驱动电路	248

8.2.4	控制系统软件结构	249
8.3	大惯性负载定位控制策略及运动特性分析	252
8.3.1	五段定位控制方法	252
8.3.2	制动段分段参数计算	255
8.4	实验装置运行实例	256
8.4.1	实验平台	256
8.4.2	定位过程控制量—时间曲线	257
第9章	压制兵器自动瞄准	261
9.1	将大地坐标系诸元转为火炮坐标系下诸元的 自动调炮(二次调炮)	261
9.1.1	定义	261
9.1.2	误差分析与重要规律	262
9.1.3	二次调炮方法	264
9.1.4	调炮误差估算	266
9.2	在大地坐标系下的直接调炮(一次调炮)	267
9.2.1	在大地坐标系下的直接调炮的解耦	268
9.2.2	按坐标转换进行的解耦调炮	270
9.2.3	按四元数法解耦调炮	274
9.3	压制兵器中的定位伺服系统	279
9.3.1	伺服定位误差	279
9.3.2	定位伺服系统控制无差度的选择	279
第10章	射击线稳定与多伺服环大系统的跟踪瞄准	282
10.1	自行高炮行进间的射击线稳定	282
10.1.1	车体运动扰动频谱及信号特征	282
10.1.2	系统带宽与功率	283
10.1.3	惯性器件与射击线稳定	285
10.1.4	对基座运动的扰动分析	290
10.2	多伺服环大系统的跟踪—瞄准	291
10.2.1	一种成功应用的光电跟踪多伺服环自行高炮闭环结构	292
10.2.2	一种光电跟踪多伺服环闭环的新结构	297
参考文献		304

第1章 武器伺服系统的分类与设计输入

1.1 武器伺服系统的分类

伺服系统的输入主令是随时间变化的函数。系统将输入信号和输出反馈信号经求差、校正综合后,产生放大的功率,通过执行机构控制被控对象,以一定的精度复现要求的状态输出。按输出状态是被控对象的速度或位置,伺服系统可分为速度伺服系统和位置伺服系统。

随着武器系统自动化程度的提高,速度伺服系统已从前期的半自动人机瞄准的应用扩展到外能源自动机变射速控制,供输弹和自动装填控制等方面,考虑到它与位置伺服系统的共性,本书不单独论述。

武器位置伺服系统属于机械运动控制,输出状态是武器的瞄准线或射击线的角位置。按输入主令的不同,伺服系统可分为位置跟踪系统伺服系统和定位伺服系统。

1. 位置跟踪伺服系统

输入的位置主令随时间任意变化,即需要跟踪、瞄准运动的目标,对车载和舰载武器伺服系统,则还需补偿载体运动造成的目标偏离,即具备稳定功能以保证行进间的瞄准和跟踪。此类伺服系统的位置主令含有位置的一阶、二阶乃至高阶导数,就其控制要求而言,最为复杂,难度最大。它主要应用于防空反导武器、舰载武器、坦克装甲车辆、稳定平台、炮瞄雷达,以及可见光、红外、夜视等光电跟踪系统。

2. 定位伺服系统

输入主令是不随时间改变的常量,多用于间瞄武器、压制兵器,对静止目标射击(就控制问题而言,属于工业控制中广泛应用的调节器问题)。近年来,人们对压制武器自动操瞄技术予以很大关注,以提高信息化能力和快速反应能力,大量原来用人工或半自动操炮的武器开始应用自动定位技术,例如大口径加榴炮、迫榴炮、火箭炮等。这类武器系统的工作方式、技术要求、被控对象显著有别于位置跟踪伺服系统,因而将它单列出来叙述。

1.2 武器伺服系统的技术指标

1.2.1 位置跟踪伺服系统

1. 最大速度 Ω_M 和最大加速度 ε_M

最大速度 Ω_M 和最大加速度 ε_M 是伺服系统最基本的指标。从简氏武器年鉴上看,国外的位置跟踪伺服系统,如防空高炮,只列出这两项作为伺服系统技术指标,国内产品常列出更详细的多项技术指标。

最大速度 Ω_M 的重要性在于它反映了系统的运动能力,即从某一角度调到另一角度可达到的最大速度。通常,考核最大速度时并不考核其跟踪精度,它是一种追踪能力。伺服系统在高速运动中,或因大的力矩突然扰动(如射击力矩),或因主令突然的增加(如提前量的加入),均会造成角度的滞后。此时,伺服系统必须能产生更高的速度追赶,方能克服此滞后,以保证精度。

最大加速度 ε_M 则决定了系统的动态性能的优劣,因为它反映了系统的加速能力。实际上,它确定了系统带宽的上限,从而也决定了系统的跟踪精度,因而这是伺服系统最重要、最关键的指标。

2. 跟踪误差 e (密位)

伺服系统跟踪误差是由全武器系统误差分配而来的。按毁歼概率确定全系统的误差均方差,然后分解为火控系统均方差、火力系统均方差、伺服系统均方差误差(均为随机变量)。在自行武器系统中,此项可列入火控系统再向下分解。系统总体工作人员按伺服系统工作特点、状态、经验将该均方差值转为允许的误差最大值,即为确定性的值,以利系统调试和性能检验。它们分为:

1) 静态误差

即在系统工作范围内各点的定位角误差,这项精度要求的实际意义是用于武器系统静态标定,在各类误差允许值中其值最小。

2) 等速跟踪误差

即主令角按恒定速度变化时(斜坡输入)给定伺服系统允许的最大跟踪误差值。通常,给定最大跟踪速度 $\Omega_{\max}$ 之值,要求系统在等于、小于此值运动时误差小于等于给定最大跟踪误差值。 $\Omega_{\max}$ 也称为保精度的最大跟踪速度,注意此值低于系统最大速度 Ω_M 。一般给定的等速跟踪误差略大于静态误差,常对低、

中、高三种速度进行检验。

3) 加速度跟踪误差

即主令角按恒定加速度变化时(抛物线输入),伺服系统允许的最大跟踪误差。通常给定最大跟踪加速度 $\varepsilon_{\max}$,要求在等于小于此值运动时,误差小于等于允许的最大跟踪误差。 $\varepsilon_{\max}$ 也称保精度的最大加速度值,注意:此值低于系统最大加速度 ε_M 。一般加速度允许跟踪误差大于等速跟踪允许误差,在实际产品中,按等效正弦误差检验此项误差。

4) 正弦跟踪误差

将给定的最大跟踪速度 $\Omega_{\max}$ 和跟踪加速度 $\varepsilon_{\max}$ 折算成输入等效正弦规范,即系统输入主令角按折算的单振幅 A (密位)和运动的圆频率 ω (rad/s)工作。系统的误差允许最大值称为正弦跟踪误差,其值一般大于等速跟踪误差。对这项误差检验时按小、中、大振幅分别进行,通常代替加速度跟踪误差检验。等效正弦规范的折算公式如下:

由

$$\theta(t) = A \sin \omega t \quad (\text{输入角 } \theta)$$

$$\Omega = \dot{\theta}(t) = \omega A \cos \omega t$$

$$\varepsilon = \ddot{\theta}(t) = -\omega^2 A \sin \omega t$$

可得

$$\omega = \frac{\varepsilon_{\max}}{\Omega_{\max}} \quad (1.1)$$

$$A = \frac{\Omega_{\max}^2}{\varepsilon_{\max}} \quad (1.2)$$

周期为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi \cdot \Omega_{\max}}{\varepsilon_{\max}}$$

正弦跟踪是对伺服系统变速、变加速运动跟踪性能的全面考核(用正弦考核)。 ω 值很重要, $\omega=1$ 是分界点,当 $\omega < 1$ 时,运动的高阶导数幅值是递减的;而当 $\omega > 1$ 时,运动的高阶导数幅值是递增的,即输入项及对应的误差不仅有速度、加速度,还有加加速度,甚至更高阶信号,而且幅值按 ω 的倍数递增,难度大于单一的等速、等加速度输入,而较高频率等效正弦输入时达到高精度是很困难的。

5) 冲击扰动误差(密位)

武器射击或发射时对伺服系统产生冲击力矩干扰造成的伺服系统跟踪误差

应小于此值。对低射速武器,在下一发击发前,误差应减小至此值;对高射速武器,扰动造成的误差带均应小于此值。射击允许误差一般为正弦跟踪误差的1.5倍~2倍。

高炮武器的毁歼机理主要是靠高射速弹丸形成的弹幕,弹幕的散布并非越小越好,例如,美国“火神”防空系统,特意将20mm加特林机关炮的身管偏置,得到较大的散布以提高连发命中率。当然,对于受弹面积小的目标,散布与精度要求就高,例如,美国近程反导系统“密集阵”其散布小于1密位,跟踪精度要求就高。

之所以提到这些看似题外的话,是希望读者能了解“误差”的由来,考虑它的随机性,在遇到方案选取时,有一个正确的导向。例如,一个原则是“在满足战技指标的前提下,并非误差越小的方案越好,要综合考虑性能”。以射击误差而言,对于一个点射,前几发的误差最重要,而后几发的误差,0.4密位的误差未必就比1.2密位的优越,因为都远高于6密位~8密位的技术要求,此时要比较其他的性能来决定方案选取,不作纯学术的考量。

3. 最低平稳跟踪速度(度/秒)

武器伺服系统在跟踪远距离目标时,对应的跟踪速度极低,且要求跟踪平稳,无爬行。最大跟踪速度与最低平稳跟踪速度的比值通称为调速范围,一般应大于1000以上。位置跟踪伺服系统的调速范围大多低于它包含的速度环单独运行的调速范围。

4. 大角度调转时间 T_{DZ} (秒)

伺服系统完成一个给定大角度 θ_{DZ} 起始误差值的调转时间,即从启动到其误差减小到进入允许误差带时所用的时间 T_{DZ} 。对 360° 工作范围的系统,此大角度值 θ_{DZ} 多为2800密位;对运动范围有限的系统,运动范围略小,如高低系统多定为1000密位。对压制兵器也按此原则具体规定,有的产品还规定了允许的最大超调量。对自行高炮则一般要求近于无超调。这个指标关乎系统的快速反应能力,因而十分重要。

5. 环境适应性

高低温、振动冲击、电磁兼容等,由总体单位根据相应的国军标,参照产品特点、工作环境参数确定和适当裁剪。其中以电磁兼容性难度最大。

6. 可靠性、可维修性

可靠性、可维修性需参考专门的规定。

1.2.2 定位伺服系统

1. 定位精度(密位)

总体最终考核的定位精度是身管基线在大地坐标系下的指向角位精度,因