

机床设计手册

5 电力传动及控制系统设计

(上册)

机械工业出版社

机床设计手册

第五册

机床电力传动及控制系统设计

《机床设计手册》编写组 编



机械工业出版社

《机床设计手册》共分五册，各册主要内容如下：

第一册：通用标准资料。

第二册：机床零件设计。

第三册：机床部件、机构及总体设计。

第四册：机床液压和气动系统设计。

第五册：机床电力传动及控制系统设计。

第五册内容包括：一般设计资料；继电接触式控制系统；直流电机调速系统；可控硅整流器-直流电动机调速系统；电动机容量计算；仿形机床随动系统；机床数字控制系统；电加工机床电气系统；机床电力装备施工设计；常用直流稳压电源与半导体直流放大器；常用电机技术数据和试验方法；机床电器技术数据与基本试验方法；常用半导体及电阻、电容器件；常用电工材料。

《机床设计手册》可供从事机床设计的工人、技术人员使用，也可供其他有关专业人员和大专院校师生参考。

机 床 设 计 手 册

第五册 机床电力传动及控制系统设计

《机床设计手册》编写组 编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

广西民族印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 82⁹/₁₆·插页 4·字数 2,421千字

1979年8月广西第一版·1979年8月广西第一次印刷

印数 000,001—80,000·上、下两册定价 6.65元

统一书号：15033·4426

编写说明

本手册是在第一机械工业部机械研究院的组织和各省市机械局的支持下，由北京机床研究所、广州机床研究所、内江机床电器研究所和有关工厂、大专院校、科研单位的工人、技术人员、教师集体编写的。

第五册由内江机床电器研究所负责组织，参加编写的单位有：武汉重型机床厂、北京第二机床厂、上海机床厂、昆明机床厂、天津大学、西安交通大学、华中工学院、哈尔滨工业大学、内江机床电器研究所、北京机床研究所、江苏省电加工研究室。

在编写过程中，曾多次到有关的单位进行调查研究、征求意见，并请他们审校稿件。很多工厂、大专院校和科研单位对手册给予了大力支持和协助，我们在此表示深切的感谢。

由于我们水平有限，手册中可能还有不少缺点和错误，希望广大读者给予批评指正。

《机床设计手册》编写组

目 录

第十篇 机床电力传动及 控制系统设计

| | |
|--|----|
| 第一章 一般设计资料 | 7 |
| 一、机床电力装备的额定值 | 7 |
| (一) 额定电压及频率(根据 GB 156-59) | 7 |
| (二) 低压电器额定电流 | 7 |
| (三) 电机的额定功率、电压、转速 | 2 |
| 1. 0.6~100 kW 三相异步电动机(根 据 GB 761-65) | 2 |
| 2. 100~250 kW 三相异步电动机[根据 电(D)96-60] | 2 |
| 3. J 2、JO2 系列三相异步电动机额定 参数(根据 JB 742-66) | 2 |
| 4. JS、JR 系列三相异步电动机额定 参数(根据 JB 563-64 和 JB 564- 64) | 4 |
| 5. ZD 系列中型直流电动机(根据 JB 624-65) | 5 |
| 6. Z 2 系列小型直流电机(根据 JB 1104-68) | 5 |
| 二、机床电气控制系统常用的符号和标号 | 9 |
| (一) 机床电气系统图图形符号(根据 GB 312-64) | 9 |
| (二) 机床电气系统图文字符号(根据 GB 315-64) | 33 |
| 1. 常用基本符号 | 33 |
| 2. 常用辅助符号 | 33 |
| 3. 常用电器文字符号 | 34 |
| 4. 物理量符号 | 36 |
| (三) 机床电气系统图回路标号(根据 GB 316-64) | 36 |
| 三、电工产品通用技术条件 | 38 |
| (一) 普通电工产品基本使用环境条件 | 38 |
| (二) 电器绝缘的电气强度和绝缘电阻 | 38 |
| (三) 电器的电气间隙和漏电距离 | 39 |
| (四) 电器的允许温升 | 39 |
| (五) 电机的允许温升 | 40 |
| (六) 电机、电器和变压器用绝缘材料的耐 热等级(根据 JB 794-66) | 47 |
| 四、特殊气候对机床电力装备的要求 | 44 |
| (一) 气象、地理资料 | 44 |
| 1. 空气的湿度 | 44 |
| 2. 大气压力、温度与海拔高度的关系 (见表 10.1-62) | 44 |
| 3. 我国主要地区的海拔高度(见表 10.1-63) | 44 |
| 4. 热带用电器产品的环境条件 | 44 |
| 5. 热带国家和地区(见表 10.1-65) | 44 |
| (二) 用于热带地区的机床电力装备的设 计要求 | 44 |
| 五、常用的电工计算资料 | 53 |
| (一) 常用的电工计量单位 | 53 |
| (二) 三相每千瓦功率在不同功率因数下的 线电流 | 53 |
| (三) 常用的电工计算式 | 53 |
| 第二章 继电器接触式控制系统 | 67 |
| 一、机床控制系统设计的一般要求 | 67 |
| (一) 机床控制系统必须满足机床加工工艺 的要求 | 67 |
| (二) 机床控制线路的电流种类与电压数值 | 67 |
| (三) 控制线路工作的可靠性 | 67 |
| (四) 控制线路工作的安全性 | 63 |
| (五) 机床控制系统电气原理图的绘制 | 63 |
| 二、机床常用保护线路的设计与元件选择 | 63 |
| (一) 机床常用的保护线路 | 63 |
| (二) 保护线路电器元件的选择 | 63 |
| 三、机床用鼠笼型异步电动机的控制线路 | 70 |
| (一) 方案的选择 | 70 |
| 1. 起动方案的比较 | 70 |
| 2. 制动方案的比较 | 71 |
| 3. 低速运行方案的比较 | 72 |
| (二) 机床用鼠笼型异步电动机的起动、制动、 正反转和变速的控制线路 | 72 |
| (三) 线路参数的选择与设计注意事项 | 82 |
| 1. 能耗制动线路元件参数的计算 | 82 |
| 2. 控制线路设计中应注意的问题 | 84 |
| (四) 交流接触器的选择 | 84 |
| (五) 机床用电动机起动控制设备一览表 | 85 |
| 四、机床常用的其他控制线路 | 85 |
| (一) 机床常用的行程、电磁铁、电磁离合 | |

| | | | |
|-----------------------|-----|--|-----|
| 器、检测与信号控制线路 | 85 | 1. 性能特点及主要参数 | 142 |
| (二) 电磁铁的主要特点 | 102 | 2. 调整试验及时间常数的测取 | 142 |
| (三) 电磁离合器的技术数据 | 102 | 3. 空载特性 | 144 |
| (四) 自动测量仪的技术数据 | 103 | 4. 负载特性 | 144 |
| 1. 电动测量仪 | 103 | (二) 交磁放大机-直流电动机典型调速系统的比较 | 146 |
| 2. 气动测量仪 | 103 | (三) 具有转速负反馈调速系统的静特性 | 146 |
| (五) 电磁吸盘的控制线路 | 104 | (四) 调速系统中主要元件的选择 | 150 |
| 1. 电磁吸盘的励磁电路 | 104 | 1. 交磁放大机及控制绕组 | 150 |
| 2. 可控硅退磁线路 | 104 | 2. 测速发电机 | 150 |
| 3. 其他退磁线路 | 110 | 3. 调速电位器 | 150 |
| (六) 机床控制线路电源变压器的计算与选择 | 112 | (五) 具有转速负反馈及半导体放大器的交磁放大机-直流电动机调速系统设计举例 | 151 |
| 五、机床典型控制系统举例 | 113 | 1. 结构原理 | 151 |
| (一) MB 8240 A型半自动曲轴磨床 | 113 | 2. 主要元件的选择 | 152 |
| (二) 龙门刨床横梁移动控制线路 | 115 | 3. 系统的动特性及校正装置 | 154 |
| 六、电磁吸盘的设计 | 116 | 4. 系统的调整 | 158 |
| (一) 电磁吸盘的工作特点 | 116 | 四、交磁放大机-直流发电机-电动机调速系统 | 159 |
| (二) 电磁吸盘的结构设计 | 118 | (一) 系统反馈结构的选择 | 159 |
| 1. 磁路的计算 | 118 | (二) 具有电压负反馈、电流正反馈的调速系统静特性计算 | 160 |
| 2. 绕组的计算 | 119 | 1. 系统静特性方程 | 160 |
| 3. 盘面磁极的决定 | 120 | 2. 主要系数值的确定 | 162 |
| (三) 设计举例 | 121 | 3. 交磁放大机控制绕组的选择 | 162 |
| 附录 控制线路图解设计法 | 125 | 4. 电位器的选择 | 163 |
| (一) 问题的提出 | 125 | 5. 静特性计算举例 | 163 |
| (二) 图解设计法 | 125 | (三) 系统常用的校正环节 | 167 |
| 1. 确定控制系统的主令信号 | 126 | 1. 动态特性指标 | 167 |
| 2. 执行元件工作信号的组成 | 126 | 2. 系统常用的稳定校正环节 | 170 |
| 3. 转换元件输入信号的组成 | 128 | 3. 校正环节及其参数 | 170 |
| (三) 应用举例 | 128 | 第四章 可控硅整流器-直流电动机调速系统 | 172 |
| 第三章 直流电机组调速系统 | 132 | 一、可控硅整流元件 | 172 |
| 一、机床传动系统的特点与调速方案的选择 | 132 | (一) 可控硅额定电压和额定电流的选择 | 172 |
| (一) 机床传动系统的特点 | 132 | (二) 可控硅元件的串并联连接 | 174 |
| (二) 选择机床调速方案的原则 | 132 | (三) 可控硅元件的过电压保护 | 178 |
| (三) 机床无级调速方案的选择 | 132 | (四) 可控硅元件的过电流保护 | 179 |
| 1. 机床常用的调速方案 | 132 | (五) 可控硅整流装置的失压保护 | 182 |
| 2. 恒转矩调速和恒功率调速 | 132 | (六) 防止可控硅误动作的方法 | 182 |
| 3. 机床无级调速方案 | 134 | (七) 可控硅元件的故障检测 | 183 |
| 4. 调速方案与电机容量的关系 | 134 | 二、可控硅整流电路 | 186 |
| (四) 机床调速方案选择的实例 | 137 | (一) 可控硅整流电路的类型 | 186 |
| 1. 铣镗床调速方案的选择 | 137 | (二) 单相半波可控整流电路 | 186 |
| 2. 龙门刨床调速方案的选择 | 137 | (三) 单相桥式半控整流电路 | 188 |
| 二、他励直流电动机调速系统 | 138 | | |
| (一) 机械特性的计算 | 138 | | |
| (二) 常用的反馈环节 | 140 | | |
| 三、交磁放大机-直流电动机调速系统 | 142 | | |
| (一) 交磁放大机的工作特性 | 142 | | |

| | | | |
|----------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| (四) 用一只可控硅的单相桥式整流电路 | 193 | 七、可控硅整流元件与互感器的技术参数 | 277 |
| (五) 三相桥式半控整流电路 | 195 | (一) 可控硅整流元件 | 277 |
| (六) 单相全控整流电路 | 198 | (二) LQG 系列交流互感器 | 278 |
| (七) 三相零式半波整流电路 | 202 | (三) BLZ 系列直流互感器 | 278 |
| (八) 三相桥式全控整流电路 | 206 | (四) DS 9 型直流快速自动开关 | 281 |
| 三、可控硅触发电路 | 212 | 附录 整流变压器、电抗器及脉冲变压器设计 | |
| (一) 可控硅对触发电路的要求 | 212 | 计算 | 284 |
| (二) 单结晶体管触发电路 | 212 | (一) 整流变压器 | 284 |
| (三) 具有阻容移相特性的触发电路 | 216 | 1. 主要参数的计算 | 284 |
| (四) 同步信号为锯齿波的触发电路 | 218 | 2. 三相整流变压器结构计算 | 285 |
| (五) 密勒积分式锯齿波触发电路 | 220 | (二) 电抗器 | 291 |
| (六) 正弦同步电压垂直控制的触发电路 | 224 | 1. 对电抗器的要求及安排 | 291 |
| (七) 带尖脉冲的正弦同步电压垂直控制的 | | 2. 电感量的计算 | 292 |
| 触发电路 | 225 | 3. 结构计算 | 293 |
| (八) 正弦同步电压的触发电路 | 226 | 4. 空心电抗器的计算 | 296 |
| (九) 可控硅串并联时的触发电路 | 228 | (三) 脉冲变压器 | 297 |
| (十) 带脉冲分配器的触发电路 | 231 | 1. 一般要求 | 297 |
| (十一) 同步信号与主电源的同步问题 | 234 | 2. 窄脉冲用的脉冲变压器 | 297 |
| 四、单相可控硅整流器-直流电动机调速系统 | 235 | 3. 宽脉冲用的脉冲变压器 | 298 |
| (一) 采用电压电流反馈的调速系统 | 235 | 4. 计算举例 | 299 |
| (二) 采用速度反馈的调速系统 | 237 | 第五章 电动机容量计算 | 300 |
| 1. 采用内同步式触发电路的调速系统 | 237 | 一、确定机床电动机容量的依据 | 300 |
| 2. 采用外同步式触发电路的调速系统 | 237 | (一) 概述 | 300 |
| 五、三相半控桥式整流电路-直流电动机调速 | | (二) 机床电力传动系统的运行条件 | 300 |
| 系统 | 240 | (三) 电动机容量受发热的限制 | 300 |
| (一) 结构原理 | 240 | (四) 电动机容量受过载能力和起动转矩的 | |
| (二) 参数的选择 | 242 | 限制 | 301 |
| (三) 系统静态放大系数的计算 | 245 | 二、电动机的有关技术标准(根据 GB 755—65) | 301 |
| 六、可控硅整流器-直流电动机可逆调速系统 | 246 | (一) 电动机的定级标准 | 301 |
| (一) 可逆系统的最佳控制问题 | 246 | (二) 电动机的一般技术要求 | 301 |
| (二) 采用三相桥式反并联有环流整流电路的 | | 三、各种负载下电动机容量的计算方法 | 303 |
| 可逆调速系统 | 248 | 四、电动机容量的校验 | 305 |
| 1. 有环流可逆控制系统的主回路 | 248 | 五、电动机容量的计算实例 | 308 |
| 2. 环流及限制环流方法 | 248 | (一) 龙门刨床工作台传动电动机在不同切削 | |
| 3. 有环流控制系统的特点 | 252 | 条件下所允许的最大切削力的计算 | 308 |
| 4. 三相桥式反并联有环流可逆调速系统的 | | (二) C5250 立车主传动电动机容量的计算 | 310 |
| 设计 | 252 | (三) X3932 铣镗床主传动电动机容量的计算 | 317 |
| (三) 采用三相反并联无环流整流电路的可逆 | | 第六章 仿形机床随动系统 | 314 |
| 调速系统 | 257 | 一、仿形机床进给系统的工作原理及特点 | 314 |
| 1. 无环流控制的要求和特点 | 257 | (一) 连续控制式双座标不对称随动系统仿 | |
| 2. 采用三相零式反并联无环流整流电 | | 形机床的工作原理 | 314 |
| 路的可逆调速系统 | 258 | (二) 连续控制式双座标对称随动系统仿形 | |
| 3. 脉冲切换式反并联无环流可逆调速 | | 机床的工作原理 | 315 |
| 系统 | 273 | (三) 断续控制式仿形机床的工作原理 | 316 |
| (四) 主回路换接的可逆调速系统 | 276 | (四) 各种仿形机床的特点 | 317 |

| | | | |
|------------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 二、仿形机床随动系统的主要参量 | 317 | 插补器 | 367 |
| (一) 仿形机床进给机构的变速范围 | 317 | 二、机床数字控制系统中数的表示方法 | 367 |
| (二) 控制信号对随动系统的快速性提出的要求 | 318 | (一) 二进制数的表示法 | 367 |
| (三) 仿形误差、随动系统的静差与随动系统 | | 1. 二进制数的表示法 | 367 |
| 开环放大系数间的关系 | 319 | 2. 十进制与二进制的互相转换 | 368 |
| 三、仿形机床随动系统的构成 | 320 | 3. 数的原码、补码、反码 | 370 |
| (一) 仿形机床随动系统的分类 | 320 | (二) 十进制数的二进制编码 | 371 |
| (二) 仿形机床电随动系统的结构 | 320 | (三) 二进制数的四则运算 | 371 |
| (三) 连续控制式仿形机床进给控制系统介绍 | 324 | 三、逻辑代数 | 372 |
| 1. XB 4450 型连续控制卧式立体仿形铣床 | | (一) 基本逻辑电路 | 372 |
| 的进给控制系统 | 324 | (二) 逻辑代数的应用 | 373 |
| 2. 连续控制式平面电液仿形铣床的控制 | | 1. 逻辑函数的性质 | 373 |
| 系统 | 327 | 2. 开关电路的设计 | 375 |
| 3. XDF-4450 型连续控制立式仿形铣床 | | 3. 常用的逻辑代数运算式 | 376 |
| 的进给控制系统 | 332 | 四、机床数字控制系统的基本单元 | 376 |
| 4. 日本仿形铣床 MELDAS 2200 型双 | | (一) 常用的逻辑电路符号 | 376 |
| 座标控制系统 | 337 | (二) 集成电路基本单元 | 377 |
| 四、仿形机床随动系统调节器的设计 | 339 | 1. 集成门电路 | 377 |
| (一) 双座标对称随动系统调节器的设计 | 339 | 2. 固体触发器 | 386 |
| 1. 电流调节器的设计 | 341 | 3. 集成电路使用中应注意事项 | 390 |
| 2. 速度调节器的设计 | 343 | (三) 分立元件组成的基本单元 | 397 |
| 3. 确定速度控制系统的变速方式 | 345 | 1. 常用的门电路 | 397 |
| 4. 位移调节器的设计 | 345 | 2. 双稳态触发器 | 392 |
| (二) 双座标不对称随动系统调节器的设计 | 350 | 3. 单稳态触发器 | 393 |
| (三) 仿形机床双座标对称随动系统调节器 | | 4. 射极耦合触发器 | 396 |
| 设计举例 | 350 | 5. 射极跟随器 | 396 |
| 1. 已知条件 | 350 | 6. 脉冲信号发生器 | 397 |
| 2. 设计电流调节器 | 351 | 五、机床数字控制系统常用的逻辑部件 | 399 |
| 3. 确定调速方式和各种方式下的调速 | | (一) 寄存器和移位寄存器 | 399 |
| 范围 D_1 和 D_2 | 351 | 1. 触发器组成的寄存器 | 399 |
| 4. 设计速度调节器 | 352 | 2. 集成电路组成的寄存器 | 400 |
| 5. 设计位移调节器 | 353 | 3. 键延迟线寄存器 | 401 |
| 五、断续控制式仿形机床随动系统的特点和构成 | 353 | (二) 计数器 | 402 |
| (一) 断续控制随动系统的稳定性 | 354 | (三) 半加器 | 402 |
| (二) 断续控制式仿形机床进给控制系统介绍 | 355 | (四) 全加器 | 403 |
| 附录 I 双座标对称随动系统的分析 | 358 | (五) 加法器 | 405 |
| 附录 II 利用描述函数法近似地求非线性自 | | (六) 减法器 | 407 |
| 振荡的周期解 | 362 | (七) 乘法器 | 407 |
| 附录 III 双座标不对称随动系统的分析 | 363 | (八) 除法器 | 407 |
| 附录 IV 摩擦片电磁离合器传递函数的求取 | 364 | (九) 译码器 | 408 |
| 第七章 机床数字控制系统 | 366 | (十) 脉冲环形分配器 | 409 |
| 一、机床数字控制系统的基本类型与特点 | 366 | (十一) 机械传动链间隙补偿信号发生器 | 410 |
| (一) 机床数字控制系统的基本类型 | 366 | 六、机床数字控制系统常用的机电部件 | 410 |
| (二) 机床数字控制系统的特点 | 366 | (一) 光电输入机 | 410 |
| (三) 连续式机床数字控制系统常用的 | | (二) 步进电机 | 413 |
| | | 1. 步进电机的结构原理 | 413 |

| | | | |
|----------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 2. 步进电机的主要参数 | 413 | 5. 直线与圆弧插补运算的专用指令 | 457 |
| 3. 常用的步进电机的技术数据 | 414 | (三) 运算器的逻辑结构 | 460 |
| 4. 常用的步进电机功率放大器 | 414 | 1. 运算器的逻辑方框图 | 460 |
| (三) 电液伺服阀 | 417 | 2. 寄存器的容量和运算信号 | 460 |
| (四) 检测反馈装置 | 417 | 3. 变补与 $\times 10$ 以及偶数位校验逻辑电路 | 462 |
| 1. 光栅检测装置 | 417 | 4. 全加器与补偶逻辑电路 | 463 |
| 2. 感应同步器 | 422 | (四) 主控制器 | 464 |
| 3. 磁尺 | 431 | 1. 运算信号发生器 | 464 |
| 4. 旋转变压器 | 434 | 2. 插补器的运算次序 | 465 |
| 5. 光电盘检测装置 | 434 | 3. O 循环计数器 | 466 |
| (五) 机床数控系统的执行机构 | 435 | 4. S 循环计数器 | 469 |
| (六) 滚珠丝杠螺距误差补偿装置 | 437 | 5. C 循环计数器 | 470 |
| (七) 自动回原点装置 | 438 | 6. 运算终点的判别 | 470 |
| 七、点位直线式机床数字控制系统 | 440 | 7. 运算方向的判别与运算脉冲的分配 | 472 |
| (一) 方案比较 | 440 | 8. 光电阅读机与 O、S 计数器的起动 以及寄存器的清除信号 | 473 |
| 1. 工件对点位直线式数控系统的要求 | 440 | 9. 进给脉冲发生器 | 475 |
| 2. 点位直线式数字控制系统的方案 | 440 | (五) 输入寄存器及译码器 | 475 |
| (二) 逻辑结构 | 441 | 1. 程序代码 | 475 |
| 1. 补码计数式三座标闭环点位直线 数控系统 | 441 | 2. 刀具半径 R 值的放数方法 | 475 |
| 2. 补码计数式三座标开环点位直线 数控系统 | 444 | 3. R 值的读入与 R^2 计算的控制信号 | 476 |
| 3. 可逆计数式三座标闭环点位直线 数控系统 | 444 | 4. 输入移位寄存器 | 478 |
| 4. 用拨码盘手动送数式闭环点位直线 数控系统 | 444 | 5. 纸带孔的奇偶校验 | 479 |
| 5. 工作寄存器 | 445 | 6. 数字代码的特征码与隔离代码 | 479 |
| 6. 指令寄存器与译码器 | 445 | 7. 速度、座标平面及指令代码 | 481 |
| 7. 主控制器 | 446 | 8. 曲线代码 | 482 |
| 八、比例乘法式直线插补器 | 448 | 9. 刀具半径分量的符号代码 | 483 |
| (一) 插值原理 | 448 | 10. 座标轴互换信号的译码 | 483 |
| (二) 逻辑结构 | 449 | (六) 子程序信号及运算门与输出门的控制 信号 | 484 |
| 1. 总体逻辑方框图 | 449 | 1. 子程序信号的产生 | 484 |
| 2. 分频器 | 449 | 2. 运算门控制信号的产生 | 484 |
| 3. 输入寄存器 | 450 | 3. 输出门控制信号的产生 | 486 |
| (三) 关于进给速度保持恒定问题 | 450 | (七) 逐点比较式直线与圆弧插补器逻辑 结构的改进方案 | 488 |
| 1. 问题的提出 | 450 | 1. 运算器的逻辑结构 | 490 |
| 2. 进给速度调制器 | 451 | 2. 主控制器 | 492 |
| 3. 脉冲发生器的工作频率 | 452 | 3. 子程序信号的产生 | 495 |
| 九、逐点比较式直线与圆弧插补器 | 454 | 十、数字积分式直线插补器 | 496 |
| (一) 总体逻辑方框图 | 454 | (一) 总体逻辑方框图 | 496 |
| (二) 插值原理 | 454 | (二) 空间直线的插值原理 | 496 |
| 1. 逐点比较式直线插补运算 | 454 | (三) 数字积分式直线插补器的逻辑结构 | 497 |
| 2. 逐点比较式圆弧插补运算 | 455 | 1. 逻辑结构的主要特点 | 497 |
| 3. 刀具半径的偏移计算及 R^2 的计算 | 455 | 2. 自循环式左移的逻辑结构 | 499 |
| 4. 象限的处理 | 457 | 3. 直接串行左移的逻辑结构 | 500 |
| | | 4. 进给速度的调制与输出通道的选择 | 501 |

| | | | |
|----------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 十一、机床数字控制系统的可靠性 | 503 | 3. 电-机械转换器主要参数计算举例 | 547 |
| (一) 在系统设计方面应采取的措施 | 503 | (二) 线电极电火花加工机床的控制系统 | 543 |
| (二) 对元件进行筛选处理 | 505 | 1. 电仿形控制系统 | 543 |
| (三) 提高制造与焊接工艺水平 | 506 | 2. 光电跟踪控制系统 | 544 |
| (四) 加强测试与调整工作 | 506 | 3. 数字控制系统 | 546 |
| 附录 I. 国外常用的代码 | 506 | 四、电解加工机床直流稳压电源的设计 | 547 |
| (一) 代码表 | 506 | (一) 可控硅调压稳压系统 | 547 |
| (二) 纸带程序安排形式 | 506 | 1. 工作原理 | 547 |
| 附录 II. 二次曲线插补器方案 | 509 | 2. 典型线路举例 | 548 |
| (一) DDA 式圆弧插补器 | 509 | 3. 主要参数的确定 | 549 |
| (二) 二进制比例乘法式圆弧插补器 | 510 | (二) 饱和电抗器控制的直流稳压电源 | 552 |
| (三) 二次曲线插补器 | 510 | 1. 扼流式饱和电抗器调压稳压系统 | 552 |
| 附录 III. 直线插补器的数据输入型式 | 510 | 2. 自饱和式电抗器调压稳压系统 | 552 |
| (一) 输入数据的传递时间 | 510 | 第九章 机床电力装备施工设计 | 557 |
| (二) 数据输入的型式 | 511 | 一、机床电力装备施工设计的一般步骤 | 557 |
| 第八章 电加工机床电气系统 | 512 | (一) 机床电力装备总体布置方案的拟定 | 557 |
| 一、电火花加工基本特征 | 512 | (二) 机床电气控制装置的结构设计 | 557 |
| (一) 基本原理 | 512 | (三) 绘制电气控制装置的电器布置图 | 557 |
| (二) 主要特点及应用 | 512 | (四) 绘制电气控制装置的接线图 | 557 |
| (三) 对电气系统要求 | 513 | (五) 绘制各部件的电器布置图 | 557 |
| 二、电火花加工机床的脉冲电源 | 513 | (六) 绘制机床内部接线图 | 557 |
| (一) 弛张式脉冲电源 | 513 | (七) 绘制机床外部接线图 | 557 |
| 1. RLCL 弛张式脉冲电源 | 513 | (八) 编制机床电力装备技术资料 | 557 |
| 2. RLC-LC 弛张式脉冲电源 | 514 | 二、机床电力装备施工设计与安装的一般要求 | 558 |
| (二) 双闸流管独立式脉冲电源 | 514 | (一) 总则 | 558 |
| 1. 简要工作原理 | 514 | (二) 机床电力装备施工设计和安装的一般 | |
| 2. 典型线路及其工艺指标 | 516 | 要求 | 558 |
| 3. 主要参数的确定 | 516 | (三) 设计和绘制机床电气装配图的要求 | 560 |
| (三) 四电子管独立式脉冲电源 | 518 | (四) 设计和绘制机床电气接线图的要求 | 560 |
| 1. 简要工作原理 | 518 | (五) 电线管路的设计与安装 | 562 |
| 2. 典型线路及其主要工艺指标 | 518 | (六) 弱电元件的安装工艺要求 | 564 |
| 3. 脉冲变压器设计 | 518 | (七) 机床电力装备明细表的编制 | 566 |
| (四) 晶体管脉冲电源 | 521 | (八) 机床电力装备的总装验收 | 566 |
| 1. 自振式脉冲电源 | 521 | 三、机床电气控制装置的结构设计 | 567 |
| 2. 复式脉冲电源 | 527 | (一) 装在床身上的控制板与操纵面板 | 567 |
| 3. 等脉冲式脉冲电源 | 533 | (二) 操纵台与悬挂操纵箱 | 567 |
| (五) 可控硅脉冲电源 | 534 | 1. 操纵台的结构特点及外形尺寸 | 567 |
| 1. 350 A 可控硅脉冲电源 | 534 | 2. 悬挂操纵箱的结构特点及外形尺寸 | |
| 2. 200 A 可控硅脉冲电源 | 536 | (见表 10.9-13) | 571 |
| 3. 80 A 可控硅脉冲电源 | 538 | 3. 操纵台、悬挂操纵箱面板的布置 | |
| 4. 小功率精加工脉冲电源 | 539 | (见表 10.9-14) | 571 |
| 三、电火花加工机床的控制系统 | 541 | 4. 现有统一设计的操纵台与悬挂操纵 | |
| (一) 电液压伺服控制系统 | 541 | 箱的结构 | 579 |
| 1. 工作原理 | 541 | (三) 电气控制柜 | 582 |
| 2. 典型系统举例 | 541 | 1. 机床电气控制柜(台)发展的主要特点 | 582 |

| | | | |
|-----------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 2. 现有统一设计的控制柜结构 | 582 | 5. 设计计算举例 | 681 |
| 3. DK 系列电气控制柜 | 590 | 二、半导体直流放大器 | 683 |
| 4. 其他控制柜结构 | 592 | (一) 晶体管直流放大器 | 683 |
| 5. 机床数字控制装置 | 597 | 1. F-2 I 型六管直流放大器 | 683 |
| (四) 可控硅的安装及通风冷却 | 599 | 2. F-2 J 型八管直流放大器 | 684 |
| 1. 可控硅的安装结构 | 599 | (二) 集成电路运算放大器 | 690 |
| 2. 可控硅的通风冷却 | 599 | 1. 集成电路运算放大器的结构特点 | 690 |
| (五) 插件结构与印刷电路的设计 | 602 | 2. BG 301 型集成电路运算放大器 | 691 |
| 1. 设计的一般原则 | 602 | 3. 8 FC2 型集成电路运算放大器 | 693 |
| 2. 插件结构形式 | 611 | 4. 集成电路运算放大器技术指标的 含义和测试方法 | 693 |
| 3. 印刷电路板 | 611 | 5. 在使用集成电路运算放大器时 常遇到的几个问题 | 693 |
| (六) 辅助设备结构设计 | 615 | 三、比例、积分、微分(PID)调节器 | 699 |
| 1. 门锁 | 615 | (一) 比例(P)调节器 | 700 |
| 2. 拉手 | 617 | (二) 积分(I)调节器 | 700 |
| 3. 起动电阻箱 | 617 | (三) 比例积分(PI)调节器 | 700 |
| 四、机床电力装备施工设计常用的图形 符号及零部件 | 617 | (四) 比例微分(PD)调节器 | 701 |
| (一) 机床操纵面板的图形及像形符号 | 617 | (五) 比例、积分、微分(PID)调节器 | 702 |
| (二) 机床电气设备接线图图形符号 | 622 | (六) 比例、积分、微分(PID)调节器 应用举例 | 703 |
| (三) 机床电气设备常用的紧固件及标准件 | 629 | 1. 用 PD 调节器补偿惯性 | 703 |
| 1. 螺钉螺母 | 629 | 2. 用 PI 调节器补偿惯性 | 704 |
| 2. 管接头 | 636 | 第十一章 常用电机技术数据和试验方法 | 705 |
| 3. 管夹 | 647 | 一、交流三相异步电动机 | 705 |
| 4. 其他零件 | 650 | (一) 各类异步电动机的特点 | 705 |
| 五、机床电力装备施工设计举例 | 654 | (二) J 2、JO 2 系列小型三相异步电动机 | 706 |
| (一) 机床电力装备施工设计的依据 | 654 | (三) JO 3 系列小型三相异步电动机 | 713 |
| (二) 施工设计 | 656 | (四) JO 4 系列小型三相异步电动机 | 721 |
| 第十章 常用直流稳压电源与半导体 直流放大器 | 662 | (五) JHO 2、JHO 3 系列三相高转差率异步 电动机 | 724 |
| 一、直流稳压电源的设计 | 662 | (六) JDO 2 系列小型变极式多速异步 电动机 | 726 |
| (一) 直流稳压电源的类型与主要参数 | 662 | (七) JZT 系列小型电磁调速电动机 | 728 |
| 1. 稳压电源的特性指标(见表10.10-1) | 662 | (八) JZZ 小型锥形转子制动电动机 | 730 |
| 2. 稳压电源的质量指标(见表10.10-2) | 662 | (九) JS 系列中型鼠笼转子异步电动机 | 730 |
| (二) 并联式直流稳压电源的设计 | 662 | 二、直流电机 | 731 |
| 1. 并联式直流稳压电源元件的选择 | 662 | (一) 各类直流电机的特点 | 731 |
| 2. 设计举例 | 666 | (二) Z 2 系列小型直流电机 | 732 |
| (三) 串联式直流稳压电源 | 666 | (三) ZT 2 型广调速直流电动机 | 746 |
| 1. 提高稳定度的方法 | 666 | (四) 龙门刨床用直流电机 | 747 |
| 2. 串联式稳压电源的过电流保护 | 668 | (五) ZD 2 型中型直流电机 | 748 |
| 3. 串联式稳压电源的实用电路 | 670 | 三、电机扩大机 | 749 |
| (四) 串联式直流稳压电源的设计 | 678 | (一) ZKK 系列电机扩大机的特点 | 749 |
| 1. 确定输入电压 | 678 | (二) 技术数据 | 749 |
| 2. 基准电压和取样环节 | 679 | | |
| 3. 比较放大器 | 679 | | |
| 4. 调整环节 | 680 | | |

| | | | |
|----------------------------|-----|-------------------------|------|
| (十) 干式舌簧管与继电器 | 887 | 6. 单结晶体管(双基极二极管) | 958 |
| 五、牵引电磁铁 | 882 | 7. 光敏二极管 | 961 |
| 六、机床控制变压器与照明变压器 | 884 | 8. 双向二极管 | 964 |
| (一) 控制变压器 | 884 | 9. 硒整流片 | 965 |
| (二) 照明变压器 | 885 | (三) 半导体三极管的主要参数 | 967 |
| (三) 硅整流电源装置 | 885 | 1. 半导体三极管的术语定义 | 967 |
| 七、其他电器元件 | 886 | 2. 半导体三极管的参数符号 | 967 |
| (一) 信号灯 | 886 | 3. 低频小功率三极管 | 969 |
| (二) 机床照明灯 | 887 | 4. 低频大功率三极管 | 990 |
| (三) 插销 | 888 | 5. 高频小功率三极管 | 1003 |
| (四) 接线板 | 889 | 6. 高频大功率三极管 | 1060 |
| (五) 电阻器 | 890 | 7. 开关三极管 | 1076 |
| 1. ZG 11 系列管形电阻器 | 890 | 8. 场效应晶体管 | 1105 |
| 2. BG 1 系列旋臂滑线式变阻器 | 892 | 9. 光敏三极管 | 1108 |
| 3. ZG 3-H 系列电阻 | 894 | (四) 硅可控整流元件的主要参数 | 1108 |
| 4. ZK 3 系列电阻 | 895 | 1. 硅可控整流元件的术语定义 | 1108 |
| 5. ZX 10 电阻器 | 895 | 2. 硅可控整流元件的参数符号 | 1109 |
| 6. JZBY 型(ZB 2)板形电阻片 | 896 | 3. 3 CT、3 CTK 系列硅可控 | |
| 7. RXY 固定式珐琅被釉线绕电阻器 | 897 | 整流元件 | 1109 |
| 8. RXYC 固定式耐潮被釉线绕电阻器 | 898 | 4. 硅对称开关元件 | 1116 |
| 9. RXYC-T 半可调式耐潮被釉线 | | 5. 平板型硅可控整流元件 | 1119 |
| 绕电阻器 | 899 | 6. 可关断式硅可控整流元件 | 1119 |
| (六) 交流电流互感器 | 899 | (五) 半导体器件的外形尺寸、特性曲线与 | |
| (七) 常用的电工仪表 | 900 | 使用说明 | 1120 |
| 八、机床电器的基本试验方法 | | 1. 半导体器件的外形尺寸 | 1120 |
| (根据 GB 998-67) | 901 | 2. 半导体器件特性曲线选录 | 1130 |
| (一) 一般检查 | 901 | 3. 半导体器件使用说明与检测方法 | 1137 |
| (二) 动作值的测定 | 901 | (六) 国内外半导体型号对照 | 1147 |
| (三) 发热试验 | 902 | 1. 国内外半导体器件型号对照表 | 1147 |
| (四) 绝缘试验 | 903 | 2. 国外半导体器件型号命名方法 | 1154 |
| (五) 接通能力与分断能力试验 | 904 | 二、电阻器 | 1158 |
| (六) 动稳定与热稳定试验 | 907 | (一) 固定电阻器 | 1158 |
| (七) 寿命试验 | 907 | 1. 固定电阻器的规格标注方法 | 1158 |
| 第十三章 常用半导体及电阻、电容器件 | 909 | 2. 固定电阻器的阻值系列表 | 1159 |
| 一、半导体器件 | 909 | 3. 炭膜电阻器 | 1160 |
| (一) 半导体器件型号命名方法与 | | 4. 金属膜电阻器 | 1164 |
| 新旧型号对照 | 909 | 5. 线绕电阻器 | 1166 |
| 1. 型号命名方法 | 909 | 6. 热敏电阻器 | 1170 |
| 2. 新旧型号对照 | 910 | (二) 电位器 | 1171 |
| 3. 半导体器件常用单位及其符号 | 914 | 1. 电位器的规格标注方法 | 1171 |
| (二) 半导体二极管的主要参数 | 915 | 2. 电位器阻值变化曲线的形式 | 1172 |
| 1. 半导体二极管的术语定义 | 915 | 3. 电位器的结构形式 | 1173 |
| 2. 半导体二极管的参数符号 | 915 | 4. 炭膜电位器 | 1173 |
| 3. 普通二极管 | 917 | 5. 高负荷炭膜电位器 | 1176 |
| 4. 稳压二极管 | 931 | 6. 线绕电位器 | 1180 |
| 5. 开关二极管 | 947 | 三、电容器 | 1184 |

| | | | |
|-------------------------|------|------------------------|------|
| (一) 固定式电容器的类型及标称值 | 1184 | 6. 矩形密封电解电容器 | 1250 |
| (二) 瓷介电容器 | 1187 | 第十四章 常用电工材料 | 1257 |
| (三) 云母电容器 | 1197 | 一、导电材料 | 1257 |
| (四) 聚苯乙烯薄膜电容器 | 1202 | (一) 裸电线 | 1257 |
| (五) 纸介电容器 | 1203 | (二) 电磁线 | 1260 |
| 1. 纸介电容器的典型标注方法 | 1203 | (三) 安装线及引出线 | 1267 |
| 2. 密封纸介电容器 | 1204 | (四) 工业用铜 | 1275 |
| 3. 小型纸介电容器 | 1209 | 二、导磁材料 | 1281 |
| 4. 穿芯式密封纸介电容器 | 1210 | (一) 软磁材料 | 1281 |
| 5. 塑料壳纸介电容器 | 1215 | (二) 铁氧体软磁材料 | 1287 |
| 6. 筒形纸介电容器 | 1216 | 三、绝缘材料 | 1288 |
| 7. 保护式密封纸介电容器 | 1217 | (一) 绝缘纤维 | 1288 |
| 8. 其他纸介电容器 | 1218 | (二) 绝缘层压制品 | 1293 |
| (六) 金属化纸介电容器 | 1219 | (三) 热塑性塑料型材 | 1300 |
| (七) 玻璃釉电容器 | 1229 | 四、用于湿热带电工产品的主要材料 | 1304 |
| (八) 常用电解电容器 | 1230 | (一) 适用于湿热带电工产品的 | |
| 1. 电解电容器典型标注方法 | 1230 | 主要绝缘材料 | 1304 |
| 2. 电解电容器 | 1230 | (二) 适用于热带电工产品的电磁线、引出线 | |
| 3. 筒形电解电容器 | 1241 | 和开关板的二次线 | 1308 |
| 4. 小型电解电容器 | 1245 | (三) 防霉剂 | 1309 |
| 5. 筒形密封电解电容器 | 1247 | | |

第十篇 机床电力传动及 控制系统设计

第一章 一般设计资料

一、机床电力装备的额定值

(一) 额定电压及频率 (根据 GB 156-59)

交流电压的额定频率为 50Hz

(1) 额定电压 100 V 以下, 主要用于电器元件、半导体器件、安全照明、信号装置及电磁离合器的操作电源, 如表 10.1-1 所示。

表 10.1-1 (V)

| | | | | | |
|---------|-----|----|----|----|----|
| 直 流 | 6 | 12 | 24 | — | 48 |
| 单 相 交 流 | 6.3 | 12 | — | 36 | — |

(2) 额定电压高于 100 V 而低于 500 V, 主要用于机床电力传动及控制系统, 如表 10.1-2 所示。

表 10.1-2 (V)

| 直 流 发电机 | 受 电 设 备 | | | 变 压 器 | | | | |
|------------|---------|---------|-------|------------|---------|---------|---------|---------|
| | 直 流 | 三 相 交 流 | | 单 相 交 流 | 三 相 | | 单 相 | |
| | | 线 电 压 | 相 电 压 | | 一 次 线 圈 | 二 次 线 圈 | 一 次 线 圈 | 二 次 线 圈 |
| 115 | 110 | — | — | 110 | — | — | — | 115 |
| 230 | 220 | — | — | 220 | — | — | — | 230 |
| — | — | 380 | 220 | — | 380 | 400 | 380 | 230 |
| 460 | 440 | — | — | — | — | — | — | — |

(二) 低压电器额定电流

(1) 刀开关及刀形转换开关、组合开关、自动开关的额定电流如表 10.1-3 所示。

表 10.1-3 (A)

| | | | | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| — | — | — | — | — | — | — | — | 6 | — |
| 10 | — | 15 | — | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | — |
| 100 | — | 150 | 200 | 250 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 |

(2) 接触器、主令电器的额定电流如表 10.1-4 所示。

表 10.1-4 (A)

| | | | | | | |
|-----|-----|----|-----|-----|---|-----|
| 1 | — | — | 2.5 | — | 5 | — |
| 10 | 15 | 20 | 25 | 40 | — | 60 |
| 100 | 150 | — | 250 | 400 | — | 600 |

(3) 熔断器的熔体额定电流如表 10.1-5 所示。

表 10.1-5 (A)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | — | — | 2.5 | 3 | — | 4 | — | 5 | — | 6 | — | — | — | |
| 10 | — | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | — | 60 | — | 80 | |
| 100 | 120 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 | 700 | 800 | 900 |

761-65)

(三) 电机的额定功率、电压、转速

(1) 额定功率及转速如表 10.1-6 所示。

1. 0.6~100 kW 三相异步电动机(根据 GB

表 10.1-6

| | | 同 步 转 速 (r/min) | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----------------|---|------|-----|------|----|-----|----|-----|---|---|----|
| | | 3000 | | 1500 | | 1000 | | 750 | | 600 | | | |
| | | 额 定 功 率 (kW) | | | | | | | | | | | |
| — | 10 | — | — | 0.6 | 10 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 0.8 | 13 | — | — | 0.8 | 13 | 0.8 | 13 | — | — | — | — | — | — |
| 1.1 | 17 | — | — | 1.1 | 17 | 1.1 | 17 | — | — | — | — | — | 17 |
| 1.5 | 22 | — | — | 1.5 | 22 | 1.5 | 22 | — | — | — | — | — | 22 |
| 2.2 | 30 | — | — | 2.2 | 30 | 2.2 | 30 | — | — | — | — | — | 30 |
| 3.0 | 40 | — | — | 3.0 | 40 | 3.0 | 40 | 3.0 | 40 | — | — | — | 40 |
| 4.0 | 55 | — | — | 4.0 | 55 | 4.0 | 55 | 4.0 | 55 | — | — | — | — |
| 5.5 | 75 | — | — | 5.5 | 75 | 5.5 | 75 | 5.5 | — | — | — | — | — |
| 7.5 | 100 | — | — | 7.5 | 100 | 7.5 | — | 7.5 | — | — | — | — | — |
| — | 125 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

(2) 额定电压: 380 V。

96-60]

(3) 额定频率: 50 Hz。

(1) 额定功率、电压及转速如表 10.1-7 所示。

2. 100~250 kW 三相异步电动机[根据电(D)

表 10.1-7

| | | 同 步 转 速 (r/min) | | | | | | | | | | | | |
|-----|------|-----------------|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|---|
| | | 3000 | | 1500 | | 1000 | | 750 | | 600 | | | | |
| | | 额 定 电 压 (V) | | | | | | | | | | | | |
| 380 | 3000 | 380 | 3000 | 6000 | 380 | 3000 | 6000 | 380 | 3000 | 6000 | 380 | 3000 | 6000 | |
| | | 额 定 功 率 (kW) | | | | | | | | | | | | |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 55 | — | — |
| — | — | — | — | — | — | — | — | 75 | — | — | — | 75 | — | — |
| — | — | — | — | — | 100 | 100 | — | 100 | 100 | — | 100 | 100 | — | — |
| — | — | 125 | 125 | — | 125 | 125 | — | 125 | 125 | — | 125 | 125 | — | — |
| 160 | 160 | 160 | 160 | — | 160 | 160 | — | 160 | 160 | — | 160 | 160 | — | — |
| 200 | 200 | 200 | 200 | — | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | — | 200 | — | — |
| 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | — | 250 | 250 | — | 250 | 250 | — |

注: 功率 160 kW 及以下的 380 V 电压级为 220/380 V。

(2) 额定频率: 50 Hz。

50 Hz。

3. J2、JO2 系列三相异步电动机额定参数(根据 JB 742-66)

(2) 电动机在额定功率、额定转速、额定电压与额定频率下的效率及功率因数如表 10.1-8 所示。

(1) 电动机的额定电压为 380 V, 额定频率为

表 10.1-8

| 功 率 (kW) | J2 | | | | | | | | | | JO2 | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---------|------|------|------|------|---------|------|------|-----|-----|-------------|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|
| | 效 率、(%) | | | | | 功 率 因 数 | | | | | 转 速 (r/min) | | | | | 效 率、(%) | | | | | 功 率 因 数 | | | | |
| | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 |
| 0.6 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 0.8 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 77.5 | 76.5 | 75 | — | — | — | — | — | — | — | 0.85 | 0.77 | 0.70 | — | — |
| 1.1 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 79.5 | 79 | 77 | — | — | — | — | — | — | — | 0.85 | 0.79 | 0.72 | — | — |
| 1.5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 81 | 80.5 | 78.5 | — | — | — | — | — | — | — | 0.87 | 0.81 | 0.74 | — | — |
| 2.2 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 82.5 | 82 | 80.5 | 80.5 | 80.5 | — | — | — | — | — | 0.87 | 0.83 | 0.76 | 0.88 | — |
| 3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 84 | 83.5 | 82.5 | 82.5 | 82.5 | — | — | — | — | — | 0.88 | 0.84 | 0.78 | 0.72 | — |
| 4 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 85.5 | 85 | 84 | 84 | 84 | — | — | — | — | — | 0.88 | 0.85 | 0.79 | 0.75 | — |
| 5.5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 86.5 | 86 | 85 | 85 | 85 | — | — | — | — | — | 0.88 | 0.86 | 0.80 | 0.77 | — |
| 7.5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 87.5 | 87 | 86 | 86 | 86 | — | — | — | — | — | 0.88 | 0.87 | 0.81 | 0.78 | — |
| 10 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 87.5 | 87.5 | 87 | 87 | 87 | — | — | — | — | — | 0.88 | 0.87 | 0.82 | 0.80 | — |
| 13 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | — | — | — | — | — | 0.88 | 0.88 | 0.83 | 0.81 | — |
| 17 | 88.5 | 89 | 88 | 87.5 | 87 | — | — | — | — | — | 88.5 | 88.5 | 88.5 | 88.5 | 88.5 | 0.90 | 0.88 | 0.84 | 0.82 | 0.76 | 0.90 | 0.88 | 0.84 | 0.82 | 0.76 |
| 22 | 89 | 89.5 | 88.5 | 88.5 | 88 | — | — | — | — | — | 88.5 | 88.5 | 89 | 88.5 | 88 | 0.90 | 0.88 | 0.85 | 0.82 | 0.77 | 0.90 | 0.88 | 0.85 | 0.82 | 0.77 |
| 30 | 89.5 | 90 | 89.5 | 89 | 88.5 | — | — | — | — | — | 89.5 | 89.5 | 90 | 89.5 | 89 | 0.91 | 0.88 | 0.86 | 0.83 | 0.78 | 0.91 | 0.88 | 0.86 | 0.83 | 0.78 |
| 40 | 90.5 | 91 | 90.5 | 90 | — | — | — | — | — | — | 90 | 91 | 90.5 | 90 | 90 | 0.91 | 0.89 | 0.87 | 0.84 | — | 0.91 | 0.89 | 0.87 | 0.84 | — |
| 65 | 91 | 91.5 | 91.5 | — | — | — | — | — | — | — | 90 | 91.5 | 91.5 | 91.5 | 91.5 | 0.92 | 0.89 | 0.88 | — | — | 0.92 | 0.89 | 0.88 | — | — |
| 75 | 91.5 | 92 | — | — | — | — | — | — | — | — | 91 | 92 | — | — | — | 0.92 | 0.90 | — | — | — | 0.92 | 0.90 | — | — | — |
| 100 | 92 | 92.5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0.92 | 0.90 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 125 | 92.5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 0.92 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |