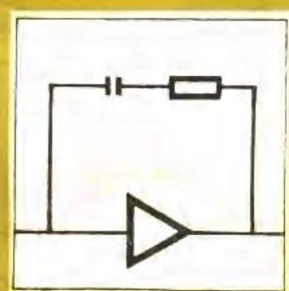
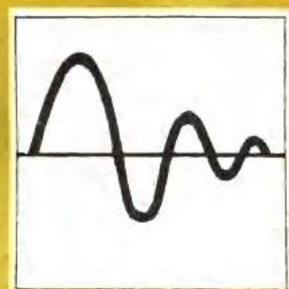
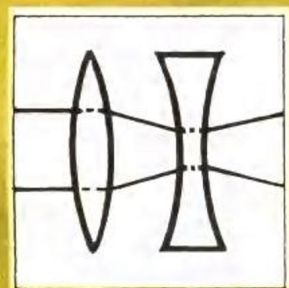
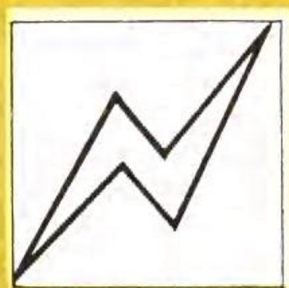


高等学校试用教材



工厂供电

陕西机械学院苏文成 主编



机械工业出版社

前 言

本教材是根据1978年4月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会确定的计划及同年5月在安徽黄山召开的工业电气自动化专业会议制定的《工厂供电》教学大纲编写的。

本书以工厂电力设计为纲,加强了理论基础,结合实际,全面、系统地阐述了有关工厂供电的基本原理,工程设计计算和运行维护方面的基本知识,还反映了诸如供电系统电压质量讨论,高次谐波的分析与消除,晶体管继电保护及电子计算机在工厂供电设计中的应用等。

本书主要内容除绪论外共包括以下十章:(1)工厂电气负荷的计算,(2)导线与电缆的选择,(3)工厂供电系统,(4)短路电流的计算及其对设备选择的校验,(5)工厂供电系统的保护,(6)工厂供电系统的防雷及接地,(7)工厂供电系统提高功率因数及电能节约,(8)工厂电网的电压质量,(9)工厂照明,(10)电子计算机在工厂供电设计中的应用等。

为了使读者学习工厂电力设计计算的思路、步骤和方法,达到理论联系实际的目的,本书中选作了部分例题,并在附录中编入工厂高压供电系统,车间低压配电系统,车间照明等教学设计示例,它可以作为工科大学工业电气自动化专业学生《工厂供电》课程的教材,也可以作为从事工厂电力设计及运行人员的参考。

由于高压电气设备的结构及其简要原理可以通过参观和实习解决。实践证明这样作完全可以满足教学要求,效果较好。因此,在本书中未作阐述。

本书由陕西机械学院苏文成副教授主编,一机部洛阳第十设计院谢善洲工程师协编。其中第一章部分内容,第九章和附录部分主要由谢善洲同志执笔,合肥工业大学陆廷信副教授撰写了第十章。

本书由陆廷信副教授主审,华北电力学院杨以涵教授,武汉水利电力学院解广润副教授,西安交通大学葛耀中副教授,一机部第七设计院张杰工程师及陕西机械学院张永生、程少庚等同志审定了部分章节。在编写过程中,一机部工厂电力设计情报网,第八设计院,第十设计院给予了大力支持;马祥林、王增尧、王洪权等工程师提供了资料。还参考、引用了国内一些高等学校《工厂供电》的教学讲义,编者在此表示由衷的感谢。

编者虽试图在教学工作的基础上,总结我国建国以来工厂电力供应、设计及运行的经验,结合国内外资料编写出符合我国生产实际的《工厂供电》教材,但因水平有限,而供电内容又比较广泛,资料浩繁,挂一漏万,缺点错误在所难免,请读者批评指正。

1980年3月

目 录

绪论	1	的计算	114
第一章 负荷计算	8	* 不对称短路的计算	117
§ 1-1 计算负荷的意义和计算的目的	8	§ 4-7 短路电流的效应	128
§ 1-2 用电设备的分类及常用设备的主要特征	9	§ 4-8 电气设备的选择及校验	133
§ 1-3 电力负荷曲线	10	第五章 工厂供电系统的保护	149
§ 1-4 计算负荷的估算法	16	§ 5-1 继电保护装置的概念	149
§ 1-5 求计算负荷的方法	17	§ 5-2 继电保护装置的操作电源	154
* 'ABC' 法公式	25	§ 5-3 电流互感器的误差曲线及接线方式	159
§ 1-6 负荷计算方法的应用范围及评价	35	§ 5-4 工厂供电系统单端供电线路的保护	163
§ 1-7 电能的测量	36	* 方向过电流保护的概念	186
§ 1-8 供电系统的功率损耗和能量损耗	40	§ 5-5 变压器保护	190
§ 1-9 全厂功率因数的确定	42	§ 5-6 母线的保护	205
第二章 导线与电缆的选择	43	§ 5-7 工厂供电系统的备用电源自动投入及自动重合闸装置	209
§ 2-1 供电网络的结构	43	§ 5-8 工厂低压系统的保护	217
§ 2-2 按发热选择导线截面	47	第六章 工厂供电系统的防雷与接地	228
§ 2-3 按容许电压损失选择导线截面	49	§ 6-1 雷电冲击波的基本特性	229
§ 2-4 按经济电流密度选择导线截面	57	§ 6-2 防雷装置	236
* 按照电晕条件选择导线截面	61	§ 6-3 工厂供电系统架空线路的防雷保护	242
§ 2-5 导线截面选择小结	61	§ 6-4 变电所的防雷	247
第三章 工厂供电系统	64	§ 6-5 工厂建筑物低压进线对高电位引入的防护	252
§ 3-1 电压的选择	64	§ 6-6 内过电压的概念	253
§ 3-2 变电所位置及变电所中变压器容量及数量的选择	68	§ 6-7 接地和接零的目的和作用	256
§ 3-3 变电所的接线图	79	§ 6-8 接地电阻及其计算	260
§ 3-4 工厂厂区高压配电网	88	§ 6-9 防雷装置的接地	271
§ 3-5 工厂供电系统的方案比较方法	93	§ 6-10 接地电阻的测量	272
§ 3-6 工厂380V以下配电系统	99	§ 6-11 零线的选择	274
第四章 短路电流的计算及其对设备选择的校验	102	第七章 工厂供电系统提高功率因数及电能节约	279
§ 4-1 概述	102	§ 7-1 工厂的功率因数及其对电力系统的影响	279
§ 4-2 短路过程的简单分析	103	§ 7-2 工业企业常用的功率因数	279
§ 4-3 计算短路电流的方法	107	§ 7-3 无功功率经济当量	280
§ 4-4 无穷大功率电源条件下短路电流的计算	110		
§ 4-5 异步电动机对短路电流的影响	113		
§ 4-6 1000V以下低压电力网中短路电流			

IV

§ 7-4 提高自然功率因数	281
§ 7-5 功率因数的人工补偿	294
* 感应电动机的同步化	308
§ 7-6 工厂企业中的电能节约	309
第八章 工厂供电系统的电压质量	314
§ 8-1 电压的偏移及调节	314
§ 8-2 电压波动及其抑制	321
§ 8-3 供电系统中高次谐波的消除	333
第九章 工厂照明	341
§ 9-1 工厂照明概述	341
§ 9-2 人工照明的照度标准	342
§ 9-3 电光源及其选择	345
§ 9-4 灯具的选择和布置	346
§ 9-5 照明方式与照明种类的确定	353
§ 9-6 照度计算	354
§ 9-7 厂区照明	364
§ 9-8 照明配电系统	366

第十章 电子数字计算机在工厂供电设计中的应用

§ 10-1 前言	368
§ 10-2 程序设计简介	369
§ 10-3 算法语言	377
§ 10-4 供电系统电气负荷计算程序	397
§ 10-5 按允许电压损失计算导线截面的 计算程序	402
§ 10-6 短路电流计算的计算程序	406
§ 10-7 车间供电自动化设计系统	410

附录 1 ××机械制造厂供配电设计示例 (教学参考用)

附录 2 部分电器产品技术数据

参考书目

[注]小节标题前有(*)号者为选读部分

绪 论

一、电力系统的概念

工厂供电系统是电力系统的主要组成部分，它是电能的主要用户，根据几个工业国家的统计，工厂用电量约占国家电力资源的50%甚至70%以上。

绝大多数的工厂都是由国家电力系统供电，图 0-1 为电力系统的示意图。所谓电力系统，就是包括不同类型的发电机、配电装置、输、配电线路，升压及降压变电所和用户，它们组成一个整体，对电能进行不间断的生产和分配。组成电力系统的目的是：

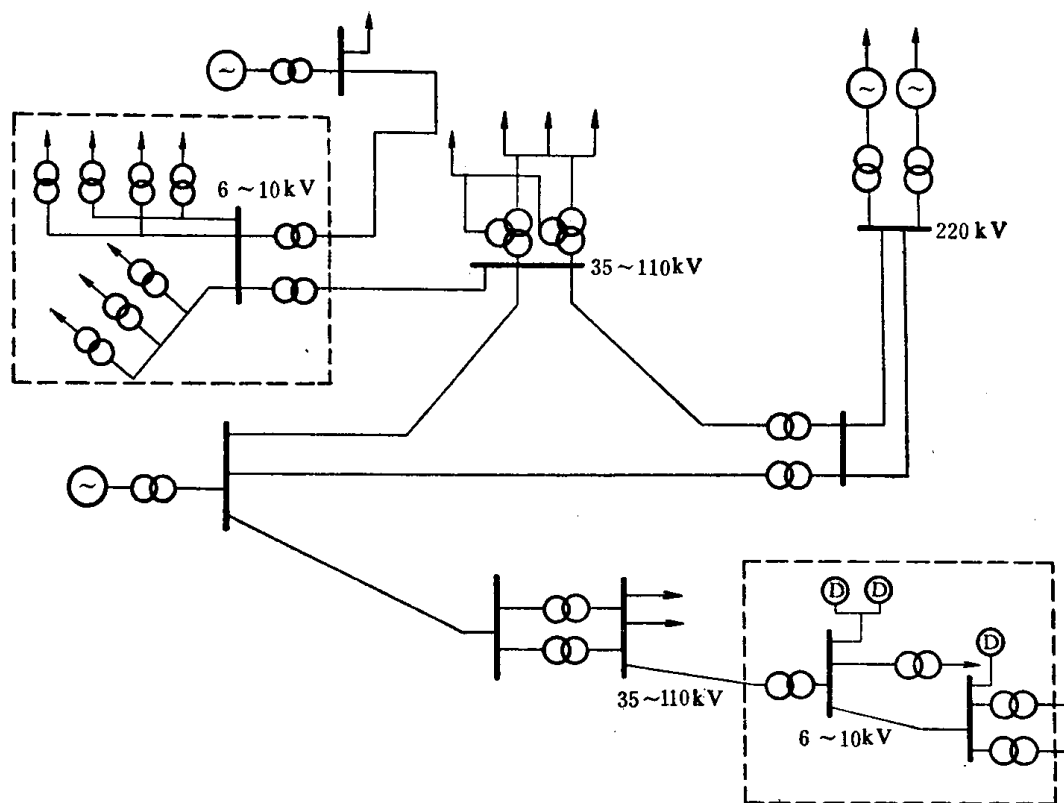


图0-1 电力系统示意图

（1）不受地方负荷的限制，可以增大单位机组的容量，而大容量的机组比小容量的机组效率高；

（2）可以充分利用地方资源（水、燃料），减少运输工作量，降低电能成本；

（3）利用电厂工作的特点（水电站的多水与枯水季节，火电厂热能的充分利用等），合理地分配负荷，使系统在最经济的条件下运行；

（4）在减少备用机组的情况下，能增加对用户供电的可靠性。例如在局部系统发生故障时，可用切除部分次要负荷的办法，保证主要用户不间断供电的可能。

随着大型水、火电厂的建设和送电距离的增加，送电电压逐步提高，六十年代末期，若干工业国家的电压业已达到 750 kV，目前，有的国家正在研究 1000~1500 kV 超高压交流送电技术。我国在1975年建成了第一条330kV 高压送电线路，根据国民经济发展的需要，更高电压的送电线路的研究和设计正在进行中。

提高送电电压将增大送电容量和距离，节约有色金属，降低线路造价，减少电压损耗，提高电压质量，降低送电线路功率及能量损耗。但是否采用高一级电压等级，是根据发展中的送电容量及距离、高压技术、高压设备的制造能力等因素，进行技术经济比较而决定的。

二、电网的额定电压

电网额定电压的等级，是根据国民经济发展的需要，技术经济上的合理性，以及电机电器制造工业的水平等因素，经全面研究分析，由国家制定颁布的，额定电压的等级不宜太多，否则送变容量重复较多，使线损及无功损失大，不易实现电机、变压器及其它用电设备的标准化生产，电网的接线也比较复杂零乱。我国 1956 年公布的标准额定电压列表如下：

表0-1 第一类额定电压（100 V 以下，主要用于安全照明，
蓄电池，断路装置及开关设备的操作电源）

直 流 (V)	交 流 (V)	
	三 相 (线电压)	单 相
6	—	—
12	—	12
24	—	—
	36	36
48	—	—

表0-2 第二类额定电压（大于100 V，小于1000 V，主要用于电力及照明设备）

受电设备			发电机		变压器			
直流(V)	交流三相(V)		直流(V)	交流三相 线电压 (V)	交流(V)			
	线电压	相电压			三相		单相	
					一次绕组	二次绕组	一次绕组	二次绕组
110	—	—	115	—	—	—	—	—
—	(127)	—	—	(133)	(127)	(133)	(127)	(133)
220	220	127	230	230	220	230	220	230
—	380	220	—	400	380	400	380	—
440	—	—	480	—	—	—	—	—

注：本表列入括号内的电压，只用于矿井下或其它保安条件要求较高之处。

表0-3 第三类额定电压

受电设备额定电压(kV)	交流发电机线电压(kV)	变 压 器 电 压 (kV)	
		一 次 绕 组	二 次 绕 组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
—	15.75	15.75	—
35	—	35	38.5
60	—	60	66
110	—	110	121
154	—	154	169
220	—	220	242
330	—	330	363

注：如证明在技术经济上有特殊优点时，水轮发电机额定电压允许采用非标准电压。

额定电压就是受电设备(电动机、白炽灯等)、发电机和变压器正常工作时具有最好技术经济指标的电压,显然,对受电设备来说,它的额定电压应和电网的电压一致。那么,发电机的额定电压和变压器一次绕组和二次绕组的额定电压又是根据什么决定的呢?

发电机的额定电压高于电网和受电设备的额定电压值是因为考虑到线路在输送负载电流时必然产生电压损失,发电机的额定电压比电网电压高5%便是为了补偿网路上的电压损失,例如电网的额定电压为10 kV,则发电机的额定电压为10.5 kV。

至于变压器的二次额定电压高出电网和用电设备的额定电压10%,其原因是变压器的二次额定电压是指空载电压而言,当变压器通过额定负载电流时,变压器绕组的电压损失约为网路额定电压的5%,和发电机一样,它仍应比用电设备电压高5%左右,以补偿网路上的电压损失。另外,由于变压器的一次绕组都联接在对应于某一级额定电压网路的末端,性质上属于电网的一个负载,所以它的额定电压与用电设备的额定电压相同。但如果变压器接在发电机的引出端(例如升压变压器),其一次绕组的电压应与发电机的额定电压相适应,即高于电网额定电压5%。

用电设备的额定电压虽然规定得与电网的额定电压相一致,但电网中由于电压损失的影响,处处电压是不一样的,如图0-2所示。

而且由于负荷的变化,电压损失也不可能维持在一个恒定的数值,所以要使加于用电设备处的电网电压与用电设备的额定电压始终相同,既很困难,也无必要,所以一些国家规定低压用户供电电压变动不超过 $\pm 5\sim 6\%$,高压用户根据负荷大小的不同,一般不超过 $\pm 5\sim 7\%$,这也就是电源电压维持比网路电压高+5%的原因,因为在这种情况下,所有接在该级网路的用电设备,都能够在其额定电压相接近的情况下工作。

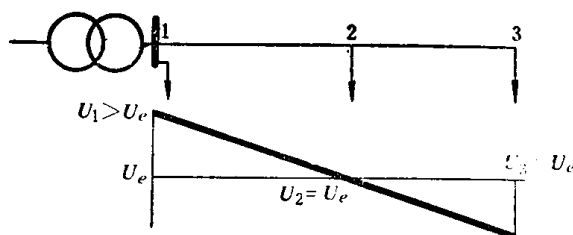


图0-2 供电线路上的电压变化

有时供电电压的变动值超过了上述规定,其主要原因是:用户的负荷由发电机通过电网供给,当电流流经各级送变电设备时,产生了较大的电压降,其次,电网中缺乏运行中调压的设备,由于电力潮流的变化,也会造成电网和用户的电压过低。

三、工厂供电系统的特点和决定供电质量的主要指标

工厂变电所是终端降压变电所。

工厂电网一般是110 kV及以下的地方电网(图0-1中虚线所示部分)。

工厂的电源绝大多数是由国家电力网供电的,但在下述情况时,也可以建立工厂自用发电厂:

- (1) 距离系统太远;
- (2) 本工厂生产及生活需要大量热能;
- (3) 本工厂有大量重要负荷,需要独立的备用电源;
- (4) 本工厂或所在地区有可资利用的能源。

对于重要负荷不多的工厂,作为解决第二电源的措施,发电机的原动机可利用柴油机或其它小型动力机械。大型工厂,若符合上述条件时,一般建设热、电并供的热电厂、机组台数不超过两台,容量一般不超过25000 kW/台。

决定工厂用户供电质量的指标为：(1)电压；(2)频率；(3)可靠性。

1. 电压 加于用电设备端的网路实际电压与用电设备的额定电压差别较大时,对用户设备的危害很大,以照明用的白炽灯为例,当加于灯泡的电压低于其额定电压时,发光效率降低,发光效率的降低使工人的身体健康受影响,也会降低劳动生产率。当电压高于额定电压时,则使灯泡经常损坏,例如某工厂由于夜间电压比灯泡额定电压高5~10%,致使灯泡损坏率达30%以上。表0-4列出端电压与灯泡光通量和寿命的关系。

表0-4 白炽灯光通量与寿命和端电压的关系

网路实际电压 灯泡额定电压 (%)	110	105	100	95	90
实际光通量 额定光通量 (%)	135	120	100	82	68
实际使用时数 额定使用时数 (%)	30	55	100	150	360

其他电光源当电压降低时,也发生类似情况,如电压降低10%,日光灯亮度约减少10%,水银荧光灯亮度减少10~30%,日光灯寿命缩短10%以上。又如电压降低20%,日光灯不能启动,水银荧光灯启动频繁,使用寿命缩短。

对电动机而言,当电压降低时,转矩急剧减小。例如当电压降低20%,转矩将降低到额定值的64%,电流增加约20~35%,温度升高约12~15℃,转矩减小,使电动机转速降低,甚至停转,导致工厂产生废品甚至招致重大事故,感应电动机本身,也将因为滑差增大致使有功功率损耗增加,线圈过热,绝缘迅速老化,甚至烧坏。

某些电热及冶炼设备对电压的要求非常严格,电压降低使生产率下降,能耗显著上升,成本增高。

电网容量扩大和电压等级增多后,保持各级电网和用户电压正常是比较复杂的工作,因此,供电单位除规定用户电压质量标准外,还进行无功补偿和调压规划的设计工作,以及安装必要的无功电源和调压设备,并对用户用电和电网运行也作了一些规定与要求。

以上谈到的是供电电压的量上的要求,还有由于供电电压畸变,不是正弦波形的问题。

近年以来,由于大型可控整流装置的利用,引起供电系统中电压、电流出现高次谐波。这种高次谐波产生的谐波压降,使发电机的端电压波形畸变,增加附加损耗,促使绝缘老化,从而使维护管理工作量增加之外,对工厂用户产生严重的影响。如由于高次谐波电流使电网电流有效值增加,电阻也因集肤效应的影响而相应增大,致使网路中产生附加的功率及能量损失;高次谐波电流加大了旋转电机、变压器、电缆等电气元件中绝缘介质的电离过程,使其发热量增加,寿命降低;特别是对静电电容器,高频电流使其发热量超过正常值,绝缘老化过程加速,例如5%的高次谐波电流,使介质损失角 $\text{tg}\delta$ 一年增加到两倍以上。由于消弧线圈不能全部补偿系统中的电容电流,元件绝缘的老化,使单相接地比较容易地发展为两相接地,降低了用户用电的可靠性。高次谐波电流除对电气设备产生不良影响之外,而且也波及到自动化、远动、通讯,使它们的质量和在工作都受到干扰和破坏。

目前，作为抑制供电系统高次谐波的重要措施有：

- (1) 采用多相整流的整流装置；
- (2) 限制系统中接入的整流装置最大功率；
- (3) 在整流装置高压侧加 $L-C$ 谐振回路，使整流器产生的高次谐波电流大部分流入谐振回路等。

2. 频率 我国工业上的标准电流频率为 50 Hz，除此而外，在工厂的某些方面有时采用较高的频率，以减轻工具重量，提高生产效率，加热零件。如汽车制造或其他大型流水作业的装配车间采用频率为 175~180 Hz 的高频工具，某些机床采用 400 Hz 的电机以提高切削速度，锻压、热处理及熔炼利用高频加热等。

电网低频率运行时，所有用户的交流电动机转速都将相应降低，因而许多工厂的产量和质量都将不同程度的受到影响。例如频率降至 48 Hz 时，电动机转速降低 4%，冶金、化工、机械、纺织、造纸等工业的产量相应降低，有些工业产品的质量也受到影响，如纺织品断线，毛疵，纸张厚薄不匀，印刷品深浅不规律，计算机发生误计算和误打印，信号误表示等。

频率的变化对电力系统运行的稳定性影响很大，因而对频率的要求要比对电压的要求严格得多，一般不得超过 $\pm 0.5\%$ 。

由电力系统变电所供电的工厂，其频率是由电力系统保证的，即在任一瞬间：

$$P_f = P$$

P_f ——电源发出的有效功率 (kW)；

P ——用户负荷所需的有效功率 (kW)。

当重大事故发生时， $P_f \neq P$ ，以致影响到频率的质量，电力系统往往按照频率的降低范围，切除某些次要负荷，这是一套自动装置，称为在故障情况下，自动按频率减负荷装置。

3. 可靠性 可靠性即根据用电负荷的性质和由于事故停电在政治、经济上造成损失或影响的程度对用电设备提出的不中断供电的要求。用电负荷分为下列三级：

(1) 一级负荷

突然停电将造成人身伤亡危险，或重大设备损坏且难以修复，或给国民经济带来重大损失者；

(2) 二级负荷

突然停电将产生大量废品，大量减产，损坏生产设备等，在经济上造成较大损失者。

(3) 三级负荷

停电损失不大者。

另外，根据民用建筑的重要性，其电力负荷分为下列三级：

1. 一级负荷

因停电会造成不良影响的，有重大政治意义的建筑物（如大型体育馆，大会堂，重要宾馆），或突然停电会造成人身伤亡危险的建筑物（如重要医院的手术室）。

2. 二级负荷

突然停电会造成经济上较大损失的建筑物（如某些实验室），或人员密集的重要公共建筑物（如大型影剧院、大型百货公司等）。

3. 三级负荷

停电影响或损失不大的一般建筑物。

各级用电负荷的供电方式，应根据地区供电条件，按下列条件考虑决定：

一级负荷应由两个独立电源供电，有特殊要求的一级负荷，两个独立电源且应来自不同的地点。

二级负荷一般由两回线供电。当取得两回线路有困难时，允许由一回专用线路供电，但对人员密集的重要公共建筑物，允许由一回线路供电。对重要的二级负荷，其二回电源线路应引自不同的变压器或母线段。

三级负荷对供电电源无特殊要求。独立电源的定义是：若干电源中，任一电源发生故障或停止供电时，不影响其它电源继续供电，这些电源均称为独立电源。

同时具备以下两个条件的发电厂、变电所的不同母线段均属独立电源。

(1) 每段母线的电源来源于不同的发电机；

(2) 母线分段之间无联系，或虽有联系，但在其中一段发生故障时，能自动将其联系断开，不影响另一段母线继续供电。

负荷分级问题非常复杂，同样的生产机械，但不同容量，或设置于不同工厂，其分级就可能不同，某些一级负荷也可以有极小间隙停电的可能，因此，必须对各个工厂，不同设备的使用情况进行实事求是的调查分析。

四、工厂供电设计的主要内容

工厂供电设计是按照国家对工厂所规定的产品纲领，根据工艺、公用所提供的资料进行的。

设计一般分为两个阶段即：扩大初步设计阶段及施工图设计阶段，扩大初步设计的主要内容有：

- (1) 按照工艺、公用设计所提供的资料计算车间及全厂的计算负荷；
- (2) 根据车间环境及计算负荷数字选择车间变电所位置及变压器容量、数量；
- (3) 根据负荷等级，全厂计算负荷，选定供电电源、电压等级及供电方式；
- (4) 选择总降压变电所（配电所）位置、变压器台数及容量；
- (5) 确定总降压变电所（配电所）接线图和厂区内的高压配电方案；
- (6) 选择高压电气设备及配电网路载流导体的截面，必要时，并需进行短路条件下力稳定及热稳定的校验；
- (7) 选择继电保护及供电系统的自动化方式，进行参数的整定计算；
- (8) 提出变电所和工厂建筑物的防雷措施，接地方式及接地电阻的设计计算；
- (9) 确定提高功率因数的补偿措施；
- (10) 选定高压变电所的控制及调度方式；
- (11) 核算建设所需器材与总投资。

扩初设计是工厂供电系统设计的主干，需经设计领导机关的批准，至于施工图设计，则是按照批准后的扩大初步设计，进行包括车间供电系统及照明等单项的施工图纸的绘制。

在本世纪内要把我国建设成为农业、工业、国防和科学技术现代化的伟大的社会主义强国。工厂供电是工业电气自动化的一个有机组成部分。作为培养一个工业电气自动化技术人员的要求来说，不只应当熟悉怎样以电气手段，实现生产设备和生产过程的自动化，而且，也必须了解怎样才能可靠、安全地获得电能，怎样才能合理、经济地利用国家的电能资源。

工厂供电系统既是电力系统的一个组成部分，必然要反映电力系统各方面的理论和要求

是如何恰当地运用在工厂供电的设计、维护运行之中的，它当然要受到电力系统工作情况的影响和制约。但工厂供电系统和电力系统不同，它主要反映工厂用户的特点和要求。如工厂的电力负荷如何计算，怎样才能实现电能的利用和节约；减少用地面积的新型变电所结构；大型及特种设备的供电问题；低压供电系统的结构；厂内采用集中控制和调度技术的合理性问题等等，这些问题中有的对电力系统的安全和经济运行关系密切，有的则和保证用户高质量用电，便于快速施工等有关。因此，无论为设计机构，工厂企业，培养大批技术人员，从事工厂供电方面的研究、设计和维护管理工作，是非常必要的。

工厂供电的内容比较广泛，因此，本教材针对工厂供电系统的主要问题，作较全面的介绍，以供电设计为主，着重从基本原理、基本工程计算方法叙述，其目的要使读者全面了解工厂供电系统的主要内容和设计步骤，能正确地选择设备，载流导体及保护装置，并能熟悉供电系统运行维护的主要问题，提出改善的途径和措施、对工厂供电急待研究解决的方向性问题，也能有所了解。

第一章 负荷计算

§ 1-1 计算负荷的意义和计算的目的

工厂进行电力设计的基本原始资料是工艺部门提供的用电设备安装容量,但是这种原始资料要变成电力设计所需要的假想负荷——称为计算负荷,从而根据计算负荷按照允许发热条件选择供电系统的导线截面,确定变压器容量,制订提高功率因数的措施,选择及整定保护设备以及校验供电电压的质量等,是一件较为复杂的事。

电力装备设计部门对机械设备进行电气配套设计时总有一定的裕度,即使电动机功率完全符合机械计算的配套要求。在工厂中使用情况不同,也会影响到电力负荷的大小,如不同的生产阶段,不同的材料,不同的熟练程度,不同的时期,电气负荷都是有差别的,它的变化与很多随机因素有关。

但是这种电气计算负荷还必须认真地确定,因为它的准确程度,直接影响整个工厂供电设计的质量。如计算过高,将增加供电设备的容量,浪费有色金属,增加初投资。计算过低则可能使供电元件过热,加速其绝缘损坏,增大电能损耗,影响供电系统的正常运行。还会给工程扩建带来很大的困难。更有甚者,由于工厂企业是国家电力的主要用户,以不合理的工厂计算负荷为基础的国家电力系统的建设,将给国民经济带来很大的浪费和危害,例如由于计算结果的偏大,我国不少工厂企业投产后的三~五年内,在已达到其正常产量的条件下,变压器的负荷率仍不足50%,这除意味着变压器安装容量被积压了50~60%以外,还使有色金属消耗量增加75~100%。浪费了大量开关设备和电缆、导线,积压了物资和资金,而且使电力系统的建设和运行质量受到影响,给国民经济带来很大损失。

由于求计算负荷意义重大,卅年代初期就已成为国外学者和设计人员从事研究的主要课题,政府和国家有关业务部门都给予关切和鼓励,在以下的三个方面取得了一致的结论:

1. 为便于分析计算,按照不同性质的用电设备进行分类,例如按电流、频率、工作制、用途、可靠性要求等分类,这种分类方法使人们便于测定同一类型用电设备的工作特征和用电之间的关系特点,找出安装容量与使用容量的比例关系,进一步为设计工作提供参考数据。

2. 现有工厂的负荷曲线是检验计算结果是否准确的依据,同时,研究现有负荷曲线,得出表征不同用电状况的各项系数,从理论上推算负荷值的大小,再放在实践中检验修正。

3. 现行数理统计和概率论的方法是研究复杂的、随机变化着的负荷的重要手段,实际上,利用概率论求计算负荷的方法国外30年代初期的文献上已有记载,40年代则又转入数理统计条件的讨论研究上,如负荷测定时间是否合理,分类是否恰当,数值是否准确,50年代初期才逐渐研究设备台数与用电负荷之间的关系,60年代根据不同性质用电设备参预最大负荷的概率,求证了等效台数与最大负荷之间的关系,并于60年代中期得出了一些理论上的结果。目前,求计算负荷的研究工作国外仍在进行。我国建国初期从国外引进大量资料进行工厂建设所取得的经验证明,组织各方面的力量,结合我国国情进一步研究确定各项系数数值是非常必要的,在国家有关部门的统一组织下,深入研究负荷计算的方法;大力测定负

荷计算系数；广泛进行企业负荷调查，是我国广大供电工作者的重要任务。

§ 1-2 用电设备的分类及常用设备的主要特征

工厂中用电设备按电流可分为直流与交流，而大多数设备为交流；按电压可分为低压与高压，1000 V 及以下属低压，高于 1000 V 属高压；按频率可分为低频（50Hz 以下）、工频（50Hz）、中频（50~10000Hz）和高频（10000Hz 以上）。绝大部分设备用工频。

按工作制分有连续运行，短暂运行和反复短时运行三类，由于它与负荷计算关系较大，现将其性质和设备的主要特征叙述如下：

1. 连续运行工作制 是指使用时间较长、连续工作的用电设备，如各种泵类、通风机、压缩机、输送带、机床、电弧炉、电阻炉、电解设备、照明装置等等。

泵、通风机、压缩机等用电设备的负荷稳定，即 30 分钟出现的最大平均负荷与最大负荷班的平均负荷相差不大；平均负荷与安装容量的比称为利用系数 K_L ，其值约为 0.5~0.6；功率因数约为 0.8；容量大时（250kW 以上的）为提高功率因数，一般常选用同步电动机。机床用电动机，容量小至 1 kW 以下，大至数百 kW，供电电压为交流 50Hz、380/220 V，机床用电设备大多属三级，负荷，负荷不平稳，且变化与生产批量、流水程度、零件加工工艺，工作制等都有关系，所以半小时出现的最大平均负荷比最大负荷班的平均负荷差别较大，对于大批生产，流水作业的金属冷加工机床来说，负荷的利用系数要比小批生产的为高，重工作制要比轻工作制的高，热加工机床（如锻压设备）比冷加工机床高，详见表 1-9，由表中可见，大批生产的热加工机床的利用系数为 0.2，对应的功率因数为 0.65，一般工作制小批生产的冷加工机床利用系数为 0.1~0.12，功率因数为 0.5。它们的负荷利用系数虽都不高，但在许多工业部门，特别是在机械工业中，由于设备数量多、总容量大，因而对全企业的负荷，往往起决定作用，又由于它们的功率因数普遍较低，所以在负荷计算中，是很值得注意的一类设备。电弧炼钢炉用电特点是容量大达 10000 至 25000kW，熔炼期间负荷变动很大，电流可达额定值的 3~3.5 倍，引起电压波动很大，功率因数为 0.8 以上，频率 50Hz，供电电压为 6~35kV，利用系数 0.5~0.65，一般以专用变压器高压供电。正是由于它的耗电量大，对电网的供电影响大，所以认真取得它的工作负荷曲线，并按此曲线进行负荷分析是有必要的。电阻炉有三相和单相之分，电压在 380 V 以下，容量一般不超过 2000kW，功率因数 0.95。

2. 短暂运行工作制 是指工作时间甚短，停歇时间相当长的用电设备，如金属切削机床用的辅助机械（横梁升降、刀架快速移动装置等），又如水闸用电机。它们的利用系数低，耗电量少，占整个用电设备的数量也少。

3. 反复短时工作制 是指时而工作，时而停歇，如此反复运行的用电设备，如吊车用电动机及电焊用变压器等，为表征其反复短时的特点，用它们一个整个工作周期里的工作时间与整个周期时间的比值来描述，这比值称为暂载率（JC）

$$JC\% = \frac{t_g}{t_g + t_x} \times 100\%$$

式中 t_g ——工作时间；

t_x ——停歇时间；

$t_g + t_x$ ——整个周期时间，不应超过 10 分钟。

对这类设备，在负荷计算时，从发热的观点来看，显然要将其铭牌功率按下式换算为暂载率 $JC = 100\%$ 时的额定持续功率[⊖]

对于电动机

$$P_e = P'_e \sqrt{JC} \quad (1-1)$$

对于电焊变压器

$$P_{se} = P'_{se} \sqrt{JC} \quad (1-2)$$

式中 JC ——铭牌暂载率；

$P'_e (P'_{se})$ ——换算前的铭牌额定容量 kW (kVA)。

吊车、起重机、卷扬机等电动机，通常为三相交流 380 V，利用系数为 0.15~0.2，功率因数约为 0.5。交流电焊设备大多以 50Hz，380 V 或 220 V 单相变压器供电，功率因数在 0.35~0.6 之间，利用系数约为 0.25~0.3。

由于目前积累的负荷计算的数据都是按照一定的性质分类方法测定的，所以在利用这些系数时，首先要对用电设备按不同工作制进行分类，对具有不同暂载率的反复短时工作制设备的容量，需要按照规定进行换算，然后再对需要计算的所有用电设备，按照不同的用电特征进行分组，并查出它们相应的负荷计算系数，按一定的计算步骤和方法进行负荷计算。因此，掌握设备分类和按照设备的用电特征进行分组，是供电工作者在负荷计算工作中必须首先建立的基本概念。

§ 1-3 电力负荷曲线

一、负荷曲线的概念

以一定的时间间隔，根据电力负荷的变化绘制的曲线称为负荷曲线。负荷曲线可以绘制成全厂的，也可以绘制成某一性质用电设备组的，可以绘制有功和无功的，也可以绘制年、日或工作班的。图 1-1 为全厂日有功负荷曲线，它是用接于全厂总供电线路上的自动记录有功功率表直接绘出的，更普遍的则是通过一定时间 (Δt)，读取有功电度表的读数，求 Δt 时间内的平均值加以记录作出，如图 1-1 的负荷曲线，则是按照每一小时为间隔绘制出来的。

曲线下的面积 $\int_0^t p(t) dt$ 是全日电能的消耗量，为便于计算，通常将曲线绘成梯形，此时

$$\int_0^t p(t) dt = p_1 t_1 + p_2 t_2 + p_3 t_3 + \cdots + p_n t_n = \sum_{1}^n p_n t_n$$

式中 p_n 代表 t_n 时间间隔内的平均负荷。

当

$$t_1 = t_2 = t_3 = \cdots = t_n = \Delta t \text{ 时}$$

$$\int_0^t p(t) dt = \sum_{1}^n p_n \Delta t$$

某一时间的平均负荷，显然为

⊖ 在后面讲到的需要系数法及二项式系数法中电动机应换算为 $JC = 25\%$ 时的额定功率。

$$P_{pj} = \frac{p_1 t_1 + p_2 t_2 + \cdots + p_n t_n}{t_1 + t_2 + \cdots + t_n}$$

当 $t_1 = t_2 = t_3 = \cdots = t_n = \Delta t$ 时

$$P_{pj} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \Delta t}{n \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (1-3)$$

当电力系统发电机组的安装容量与负荷比较，其富裕量不大时，系统总要求工厂的最大负荷最好不要与系统的最大负荷时间相重叠，工厂的日负荷曲线可借以分析最大负荷发生的时间和原因，采取措施进行调整，以满足电力系统经济运行的目的。

根据日有功负荷曲线可以作出年有功负荷曲线，制作时必须利用一年中具有代表性的冬、夏季全日负荷曲线，图 1-2 表示制作这种负荷曲线的方法，图 1-2 c) 中横座标是一年中从 0 到 8760 小时数，纵座标是负荷的千瓦数，制作本图采取的用电时间冬期为 213 日，夏期为 152 日。这一时间是根据本地区的地理位置而定的。

绘制时从功率最大值开始，依功率递减的次序进行，为此经过两条全日负荷曲线需作若干水平线，其间距离由所需准确度决定。如图所示：功率 P_1 所占全年时间系根据冬日曲线为 $t_1 + t'_1$ ，夏日曲线为零而得 $T_1 = (t_1 + t'_1) \times 213$ 。将 T_1 值按一定比例标于全年曲线的横轴上，得 a 点。同样，功率 P_2 占全年时间为 $T_2 = (t_2 + t'_2) \times 213 + t''_2 \times 152$ ，对应于全年曲线上的 b 点。如此类推，逐点计算，标定，则得到如图 1-2 c) 所示的阶梯式年有功负荷曲线。

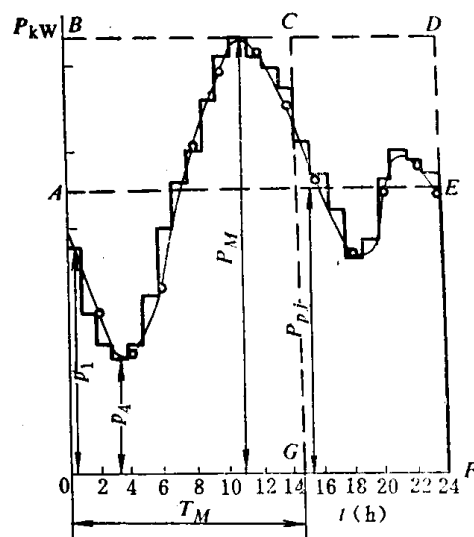


图1-1 全厂日有功负荷曲线

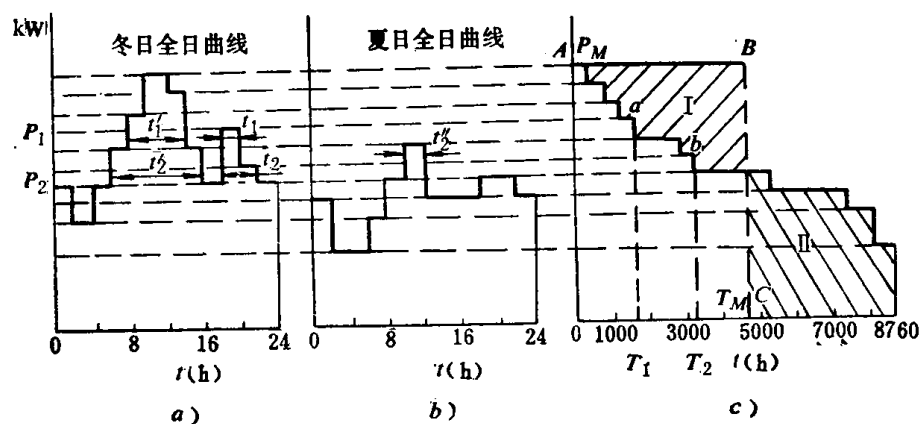


图1-2 全年负荷曲线

曲线包含的面积就是工厂年电能消耗量，除以 8760 小时，就是工厂的年平均负荷。如果由最大负荷 P_m 引出与横座标平行的直线 AB ，与由时间座标轴 T_m 引出与纵座标平行的直线 CB 相交而形成的 $ABCO$ 矩形，在使面积 I = 面积 II 的条件下，则对应于 C 点的 T_m 称为年

最大有功负荷利用小时数。 T_M 是标志工厂年有功负荷是否均匀的一个指标,这一概念在计算线路电能损耗时将要用到,也是在已知平均负荷条件下初步估算最大负荷的一个重要数据,它将在工厂建设的初步规划中对地区电力的要求起到参考的作用。

类似有功负荷曲线,也可利用无功电表作出无功负荷曲线,并且得出上述类似的指标和概念。

图1-3、1-4、1-5是根据多年运行经验作出的典型负荷曲线示例,纵坐标以最大负荷百分数表示。

从图(1-3)~(1-5)可以看出:

(1) 工作班制对负荷曲线的影响很大;

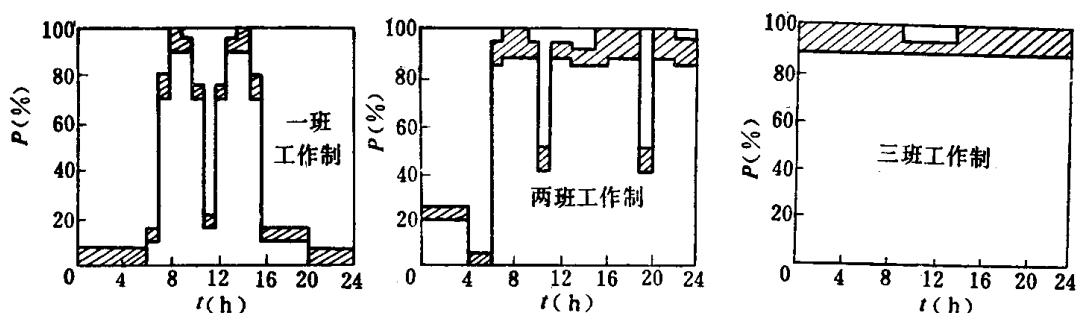


图1-3 工业企业的典型日有功负荷曲线 (图中斜线部分表示电网中的功率损耗)

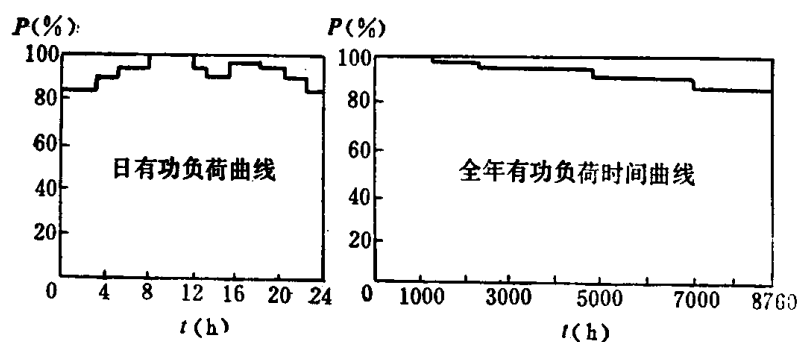


图1-4 黑色冶金工厂的负荷曲线

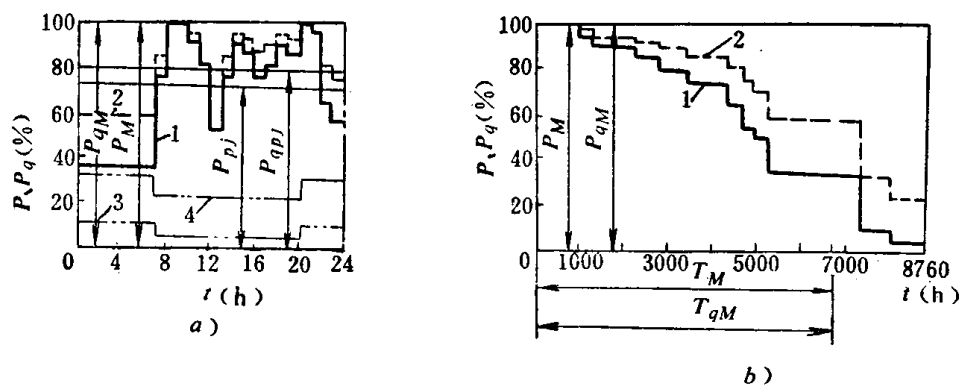


图1-5 机械工厂的负荷曲线

a) 日有功、无功负荷曲线 b) 年有功、无功负荷曲线

1—工作日和工作年的有功负荷 2—工作日和工作年的无功负荷

3—假日的有功负荷 4—假日的无功负荷

(2) 无功负荷曲线较有功负荷曲线的变化平缓，因此，年无功最大负荷利用时数较年有功负荷利用时数大；

(3) 虽然负荷变化的随机因素很多，但各种工业生产终究是有它自己的规律性，典型的年负荷曲线能确定典型的 T_{μ} 值。典型的班、用电设备组负荷曲线就有可能作为制定负荷计算必要数据的基本依据。

二、利用负荷曲线确定系数

确定计算负荷各项系数所使用的负荷曲线是负荷最大工作班的负荷曲线，所谓负荷最大工作班当然不应该是负荷偶然出现的某一个工作班，一般规定，这种工作班在一个月內最低应当出现 2~3 次。

如果利用电度表作负荷曲线，必须确定记录读数的间隔时间，目前规定为 30 分钟，因此，计算负荷也称之为 30 分钟平均最大负荷，‘平均’表示电度表读数用 1/2 小时除后求得的平均值，‘最大’则表示出现的最高的那个负荷值，显然，这也不应当选取偶然出现的值。

30 分钟平均最大负荷的符号是 P_{30} ，是从负荷曲线上量得的，计算负荷的符号是 P_{js} ，是根据负荷曲线确定的系数求得的，二者本来应当是一个数值，只不过 P_{js} 的来源是 P_{30} 的统计值而已。

有时在计算时把 P_{js} 写成为 P_{μ} ，这是从‘最大’的观点出发，并没有什么本质上的差别。

应当指出，以 30 分钟最大负荷作为计算负荷是造成目前导线、变压器容量不能得到充分利用的重要原因之一，因为 30 分钟是从较小截面的允许发热为前提规定的，下表列出不同截面导线的发热时间常数，从表可以看出，如果按照 P_{30} 所得出的电流作为允许载流量、按照发热的观点选择导线截面，由于导线达到其额定稳定温升为 3~5 τ ，则 50mm² 以上的导线则永远也达不到它的稳定温升，对于变压器则更是如此。但是，由于我国现有资料大多自国外引进，一时尚拿不出有足够理论根据和科学实验的数据来加以改变，因此，必须开展负荷计算的研究工作，逐步解决这一重大的、影响国民经济建设计划的巨大课题。

表1-1 导线和电缆发热时间常数 τ

导线和电缆发热 时间常数 τ (分)	导线和电缆截面 (mm ²)					
	35	50	70	95	120	150
导线和电缆型式						
架空明敷橡皮绝缘导线	9	12	15	18	21	21
同上，穿管敷设	19	23	27	32	36	40
纸绝缘电缆	15	20	25	30	35	60

现在讨论几个与负荷计算有关的系数：

1. 平均负荷 (P_{pj}) 与利用系数 (K_L)

与利用系数 K_L 有关的平均负荷 P_{pj} ，是指在最大负荷工作班內，某组用电设备的平均负荷。求 P_{pj} 的方法非常简单，只要上、下班记录电度表各一次，求出该组用电设备的电能消耗量，除以工作时间就可以得到。

类似的方法求出无功功率 P_{qpi} ，就可以得出该组用电设备的功率因数。