

郭馬尔著

汽 輪 發 電 机 設 計 問 題

机 械 工 業 出 版 社

汽輪發電機設計問題

郭 馬 尔 著

陈 中 基 譯



机械工業出版社

1957

出版者的話

本書敘述設計現代汽輪發電機的一些專門問題，研究發電機各別參數間的關係，並提出選擇最好方案的根據。本書還詳盡地研究了設計氫氣內部冷卻的汽輪發電機的有关問題。

這本書是專供從事汽輪發電機設計、製造和使用方面工作的電機工程師參考，也可作為電工及動力高等學校高年級學生的參考書。

蘇聯 Е. Г. Комар 著 ‘Вопросы проектирования турбо-генераторов’ (Госэнергоиздат 1955 年第一版)

*

*

*

NO. 1505

1957 年 8 月第一版 1957 年 8 月第一版第一次印刷
850×1168 1/32 字數 278 千字 印張 10 7/8 0,001—1,400 冊
機械工業出版社(北京東交民巷 27 號)出版
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 號 定價(10) 2.00 元

目 次

緒 論.....	7
第一章 有效部分的尺寸	12
1-1 概述.....	12
1-2 比值 $\frac{l}{D}$ 变化时有效鉄心的重量.....	17
1-3 比值 $\frac{l}{D}$ 变化时定子和轉子的銅重.....	18
1-4 比值 $\frac{l}{D}$ 变化时汽輪发电机中的損失.....	22
1-5 比值 $\frac{l}{D}$ 的选择.....	37
1-6 空气隙数值的选择.....	39
1-7 定子槽数的选择.....	46
1-8 定子繞組短距的选择.....	50
1-9 定子槽形尺寸的选择.....	55
1-10 轉子槽数的选择.....	61
1-11 选择轉子尺寸的一般見解.....	63
1-12 在齿根部磁通密度和机械应力一定的条件下轉子所能保 証的磁勢.....	64
1-13 一定容量的汽輪发电机所需要的轉子最小直徑.....	68
1-14 依靠轉子外表面冷却时轉子繞組中电流密度的选择.....	73
1-15 采用轉子鉄心内部冷却时轉子繞組中电流密度的选择.....	77
1-16 轉子繞組銅綫的直接冷却.....	84
1-17 轉子繞組銅綫采用直接冷却时汽輪发电机有效部分的尺寸 和重量的减小.....	92
1-18 采用繞組銅綫直接冷却的轉子通风系统时單个汽輪发电机 的极限容量.....	97
1-19 汽輪发电机有效部分基本电磁負載的选择.....	98

第二章 定子的有效鉄心	104
2-1 概述	104
2-2 电工鋼片厚度的选择	105
2-3 电工鋼片种类的选择	109
2-4 有效鉄心的絕緣	113
2-5 有效鉄心扇形片的剪裁	119
2-6 冲剪有效鉄心的一些問題	122
2-7 有效鉄心的冷却	125
2-8 冷却气体在通风槽內的运动	134
2-9 在軸向通风系統的情况下通风槽的尺寸和数目	140
2-10 在徑向通风系統的情况下有效鉄心叠片組的寬度	147
2-11 在徑向通风系統的情况下通风槽的寬度	149
2-12 有效鉄心在定子机座內的固定	153
2-13 压裝有效鉄心的一些問題	164
第三章 机座、端盖和定子的其他零件	169
3-1 焊接的結構和鑄造的結構	169
3-2 定子机座的結構特点	170
3-3 定子筋条的数目和尺寸	172
3-4 有效鉄心双倍频率的振动	175
3-5 定子机座的橫向壁	179
3-6 定子机座的外壳	182
3-7 空气冷却时定子机座內的通风槽	184
3-8 設計气体冷却器的一些問題	193
3-9 气体冷却器在定子机座中的放置	208
3-10 定子的端盖	213
第四章 設計定子繞組的一些問題	215
4-1 概述	215
4-2 設計現代高压大型电机定子繞組絕緣的結構工艺原則	215

4-3 絕緣的厚度	225
4-4 定子繞組絕緣中的溫度降	230
4-5 外部冷却时定子繞組銅排的高度	232
4-6 依靠銅排表面冷却时定子繞組中的电流密度	233
4-7 轉子銅繞內部冷却时定子繞組不宜采用一般冷却系統	234
4-8 定子繞組銅排的內部冷却	235
4-9 銅排內部冷却时定子繞組銅排的高度	237
4-10 銅排內部冷却时定子繞組中的电流密度	241
4-11 定子繞組銅排內冷却气体的速度	243
4-12 內部冷却时定子繞組中銅排的电流密度和溫升	245
第五章 轉 子	248
5-1 概述	248
5-2 轉子本体	248
5-3 激磁繞組的額定电压	250
5-4 轉子繞組的槽部絕緣	258
5-5 轉子繞組槽部絕緣套管的厚度	260
5-6 轉子繞組端接部分的絕緣	264
5-7 应用鋁及其他金屬来制造轉子繞組	267
5-8 在轉子繞組中发生殘余变形的条件	277
5-9 轉子零件的热配合	290
5-10 轉子大齿的存在所引起的机械性質的現象	297
5-11 在反复載荷下轉子零件的机械强度	305
5-12 有关轉子振动的一些問題	329
5-13 軸頸	340

序 言

本書說明設計現代大型汽輪发电机的一些個別問題，包括电气計算、机械計算和通风計算，以及結構和工艺問題，但不涉及电机的計算方法，不系統地敘述現代发电机的結構，也不研究同步电机的理論，因为假定本書的讀者都已知道这些問題了。

本書提出了設計汽輪发电机时選擇最好的計算方案和結構工艺方案的一些理論上的和数学上的根据。

作者是以結構师的身分提出自己的建議，向結構师們說明了并論証了在相应的場合下常常被直接采用的一些解决办法。这也就說明了本書有它自己的一些特点，这些特点是由于本書材料的选择和組織，以及敘述上的特点所帶來的。

本書將有助于从事汽輪发电机設計、制造和运用方面工作的电机工程师們。同时，也可供高等学校电工及动力專業的学生們研究电机时参考。

作者

緒 論

每一台电机通常都可以分为有效部分和結構部分。所謂有效部分就是有效鉄心(导磁体)及定子和轉子的繞組。

电机中发生的基本的电磁过程是在有效部分中进行的, 結構部分則起着輔助的作用, 它們支持和固定有效部分, 使有效部分与基础及原动机的轉軸连接起来, 構成通风槽, 支持风扇和冷却器, 引出电流, 保护电机使它不受损坏等。

把一台电机的各个部分这样划分成有效部分和結構部分在很大的程度上是一种粗略的划分, 因为在这二个部分中間职能上沒有明显的界限。大家知道, 所謂有效部分在很大的程度上起着結構部分的作用。例如: 汽輪发电机轉子的有效部分承受着巨大的机械載荷, 而轉子中所产生的机械应力和电机的基本的电磁过程沒有任何共同之点。轉子有效部分的尺寸, 因而整个电机的尺寸, 一般講来, 在很大的程度上就决定于轉子的这个特点。

通风的条件在定子有效鉄心的結構上留下了痕跡, 并在很大的程度上决定着定子的尺寸。

虽然电机的有效部分和結構部分有着这种一致性。但是这样的划分是存在的, 不得不加以考虑。

相应地, 設計电机的工程师也划分成設計电机有效部分的工程师和設計电机結構部分的工程师。第一类通常称为計算工程师, 或簡單地称为計算員, 第二类則称为結構师。計算員开始設計电机的工作, 而結構师完成这个工作。計算工程师用所謂电气計算的方法决定电机的有效尺寸, 而結構师根据規定的尺寸决定电机的結構部分, 并繪制工作图紙。

在所有的工厂和所有的公司中历史上所形成的这样狹窄的專业化, 对于設計工程师能有一定的熟練程度是必要的, 有益的。实际上, 計算工程师應該很好地掌握电机的理論、普通电工学和电机試驗的理論, 并具有計算方面的專門技能。而結構师, 除了关于电

机理論的一般概念以外,还應該掌握一般机器制造的知識、結構方面的專門技能和完善的工艺學識。

一般講来电机是最复杂的机器。实际上,整个电机是由要求鑄、鍛、焊、冲及机床机械加工的金属所組成的。电机具有机械方面应力很大的零件、复杂的焊接和鑄造的部件及在整个机器制造部門中所遇到的其他元件。

电机結構师,象一般机器制造的結構师一样,應該精通焊接、鑄造、机械加工、冲剪等工艺。此外,电机結構师同样應該很好地掌握空气动力学、温升計算、彈性理論、絕緣材料的特殊工艺及在一般机器制造中所不会遇到的其他問題。

对于电机結構师講,所有这些問題的學識,比之深入电机有效部分中所发生的电磁現象的學識更为重要。一般講来,上述範圍的問題对电机工程师是不平常的。計算工程师在設計科中可以繼續深入和利用自己在电工学院中所获得的學識,而担任結構师工作的电机工程师,他所必要的智識的很大部分不得不在自己实际工作的过程中重新获得。經驗指出,机械工程师在电机制造工厂的設計科中工作了几年以后,常常成为优秀的电机結構师。

必須仔細地研究过去設計的电机的运行情况,則对于計算工程师和結構师是共同的。电机的設計者應該在若干年内仔細地观察所制产品的运行过程,并在設計新电机时考虑运行时发生的所有現象。設計人員和使用人員間應該有非常密切的連系。

在設計电机时所遇到的許多各种各样的問題,首先是工程知識領域不同、彼此相隔較远的一些問題,引起了上面所指出的專業化,將設計人員划分为計算員和結構师。

但是,这样的划分,仅对設計人員的熟練程度还在低級和中級階段时是合理的和允許的。而对于主任工程师,特别是对于設計科的領導人員和总設計師,这种專業化就成为有害的而不能允許的了。

电气計算和結構設計并不是彼此独立无關的,而象电机的有

效部分和結構部分一樣是緊密地互相結合的。電機設計——這是一個統一的創造性的過程，把它劃分成獨立的、機械連系的二個過程是不可能的。因此，電機製造廠設計科的領導者應該同樣地精通電氣計算和結構設計的問題。

實際經驗指出，要掌握一個熟練的設計人員所有必要的知識，和領導者是否已通過結構設計或計算工作來達到自己的熟練程度無關。

本書試圖將計算上和結構上的問題綜合成一個體系。從各个方面並考慮到每個元件在電機中所發生的各種作用來研究電機製造的每個元件。

在工廠中電機計算分成二個階段——選擇有效部分的尺寸和所選方案的校驗計算。通常認為：第一階段是和任何規律性無關的，在選擇有效尺寸時僅僅是計算工程師的熟練程度和敏感起着主導作用。第二階段，即校驗計算，則由實際上已成規範的精確的計算方法所決定的。校驗計算是由有規律性的方法所嚴格規定的機械的運算。

類似的情況亦出現在結構師的創造性的工作中。這裡，設計的第一階段，與電氣計算相比在更大的程度上是結構師的經驗、熟練技能、甚至個人愛好的結果。

本書試圖用數學上和理論上的規律性來決定這設計的第一階段，並且指出，電機有效尺寸的選擇及電機方案的選擇並不是自發的創造性的過程；而是由嚴格的明顯的規律性所決定的。

本書要使讀者了解：為什麼在每一個我們所研究的場合下宜在許多可能的解決辦法中採取這個結構方案，為什麼採用這樣的電機尺寸和電機元件的尺寸是合理的，並提出自己的觀點和論及一定的解決辦法，雖然不同的公司過去採用過和現在採用着許多其他的可能的方案和許多其他的結構。

據我們所知道：電機設計的著作（當然，電機學教科書和理論性的著作除外）都是在上面所指出的狹窄的專業化的特徵下所寫

成的。这些著作的一部分是所謂电气計算和机械計算的方法，在这些著作中引用了許多公式，計算工程师就用这些公式来得到他所需要的数值和尺寸。

电气計算的技术本身是很复杂的，掌握它是要有許多知識和經驗。因此，綜合計算工作經驗的著作显然是有很大的价值的。

另一部分著作是描写各著名公司的电机結構，并附有工作圖紙和机械計算、通风計算及电机結構方面的其他計算的方法。

在这一类著作中，和在說明电气計算的著作中一样，通常沒有詳細地分析原因，使設計者无法从許多可能的解答中选择一定的方案。應該考虑到設計者的敏感只有在工厂設計科的条件下来長期的实际工作才能养成。設計者了解設計[邏輯]要比电气計算和結構設計的技术迟得多。

但是这种設計[邏輯]的經驗是能够而且應該加以說明的。本書也作了这样的嘗試。

由于許多公开出版的著作已經研究了电气計算方法和描述了电机的結構，也由于任何一本电机学教科書中都已詳細地研究了这些問題，所以，本書就不再詳細介紹电气計算和描述电机的結構。仅仅在为了說明一些数值和另外一些数值間的关系及为了确立选择方案的一定的見解而需要它們时，才引用这些計算公式，这些公式是根据[电力]工厂的計算方法及其他来源而得到的。

本書并不詳尽地叙述电机的結構，也不提供工作圖紙。圖紙和結構的叙述仅仅是作为概念的說明，作为在选择最合适的方案时能指出各种不同方案的資料。本書也不研究电机制造的理論問題。所有这些問題假定讀者都已知道了。

本書试图將計算和結構方面的問題綜合成統一的过程来揭露設計者的創造性的技能。書中采用电机制造厂所用的实用單位，長度用公分来測量，磁通密度以高斯為單位，磁通則以馬克士韋尔為單位。在采用其他單位的場合，預先特別聲明。

×

×

×

本書特別注意轉速3000轉/分、單個容量達20萬到30萬仟瓦的大型汽輪發電機的設計問題。製造這種電機的必要性是作為我國重工業和所有國民經濟發展基礎的動力基地的大力增長的任務所直接引起的。對於現代的動力系統，容量達20萬、30萬甚至40萬仟瓦的機組並不是過分大的單位，它們的採用能在短時期內大大地增加電能的生產。

重要的是，容量為10萬仟瓦的汽輪發電機和容量達40萬仟瓦的強迫通風的機組的尺寸實際上差別很小。由於這個原因，電站機器房的建設規模幾乎保持不變，建設其他部分的耗費也小於容量增長的倍數。機組的價格和製造的工時也變化很小。電站的效率則提高了。

要求製造最大容量的機組是汽輪發電機製造方面現代技術的基本發展方向之一。

第一章 有效部分的尺寸

1-1 概 述

选择电机有效部分的尺寸是电机設計的第一階段。

在工厂中，选择有效部分的尺寸并不是象电机学教科書中通常所說明的那样来进行的。在工厂中，計算工程师只进行电机的校驗計算，而电机的所有尺寸早已决定并选择好了。有时要对数十个方案进行校驗計算，一直到从这些方案中找到最好的方案为止。直觉、經驗和所造电机的試驗結果——所有这一切使設計者可能正确地选择有效部分的尺寸和寻找这些尺寸間最有利的比例。

大家知道，决定电机有效部分的主要尺寸是一个解答无穷多的不定式的問題。

实际上，对于已知的容量和轉速及所取的电磁負載，定子內徑 D 和有效鉄心長度 l 可用下面的关系連系起来：

$$l/D^2 = \text{常数}。$$

这个方程式可以用随便多少个 D 和 l 值来满足。計算工程师應該选择 D 和 l 間最好的比例。这样，計算者就得到一定的而且是唯一的解答。

在选择有效鉄心的直徑和長度时，設計人員不但要利用自己工厂所造电机的經驗，而且要利用許多公司的經驗。通常計算工程师要知道各个公司的汽輪发电机的有效尺寸。設計人員要从汽輪发电机每一个已知的容量联想到該电机完全一定的尺寸，并且要知道一个公司根据什么理由采用和其他公司不同的尺寸。

工厂从来也不生产單个的汽輪发电机，每一个电机是整个系列的組成部分。容量、电压、功率因数、效率和轉速都被标准所規定了。

例如，現行苏联国家标准 ГОСТ 533-51 規定了表 1-1 和

表 1-2 所列空气冷却和氦气冷却的汽轮发电机的等级。

表 1-1 的等级是在苏联汽轮发电机制造过渡到氦气冷却的时期中所订立的，因此，空气冷却的汽轮发电机规定造到 50000 仟瓦，容量为 100000 仟瓦的汽轮发电机不再做成空气冷却的了。

表 1-1

有效功率 (仟瓦)	电 压 (伏)	当冷却空气的温度为						
		40°C		30°C			20°C	
		视在功率 (仟伏安)	功率因数 $\cos\varphi$	效 率 $\eta(\%)$	视在功率 (仟伏安)	功率因数 $\cos\varphi$	视在功率 (仟伏安)	功率因数 $\cos\varphi$
750	230 400 525 6300	938	0.8	93.5	985	0.76	1010	0.74
1500	400 525 3150 6300	1875	0.8	94.5	1975	0.76	2025	0.74
2500	3150 6300	3125	0.8	95.0	3290	0.76	3380	0.74
4000	3150 6300	5000	0.8	96.0	5270	0.76	5400	0.74
6000	3150 6300	7500	0.8	96.4	7900	0.76	8100	0.74
12000	6300 10500	15000	0.8	97.0	15800	0.76	16250	0.74
25000	6300 10500	31250	0.8	97.4	32900	0.76	32900	0.76
50000	10500	58800	0.85	97.6	62500	0.8	62500	0.8

表 1-2 的等级重复了表 1-1 所示等级的一部分。例如，容量为

25000 仟瓦和 50000 仟瓦的汽輪发电机可以做成空气冷却的，也可以做成氬气冷却的。

表 1-2

有效功率 (仟瓦)	电 压 (伏)	当冷却氬气的温度为				
		40°C		30°C 和 20°C		
		功率因数 $\cos\varphi$	視在功率 (仟伏安)	效 率 $\eta, \%$	視在功率 (仟伏安)	功率因数 $\cos\varphi$
30000	6300; 10500	0.8	37500	98.3	39500	0.76
25000	6300; 10500	0.7	35700	98.0	37300	0.67
50000	10500	0.8	62500	98.5	65800	0.76
100000	15750	0.85	117500	98.7	125000	0.8

根据表 1-1 和表 1-2 的数据而制造的工厂系列已列入苏联国家标准中。系列中所有的电机通常是同时或者是在不很长的时间内設計的。它們不仅作为单个电机有着自己的結構工艺性的特征，而且部分結構对于二个或若干个电机有着共同的尺寸。

定子内徑 D 的选择具有特殊的意义。工厂中很少而且仅仅是在系列根本修改时才不得不采用新的直徑。整个系列的直徑的等級在很多年内是保持不变的。通常整个汽輪发电机系列的直徑的数目是不多的，仅 4 ~ 6 个，因为要使許多零件（轉子护环，定子压板等）可以通用迫使所选直徑的数目减少。

轉子直徑的数值則和材料中的机械应力有关，因而和所选材料的質量有关。轉子直徑的数值和损失的数值、发电机的效率及电机結構上的特点等也有关系。

轉子直徑还和鍛压設備的大小、車床的尺寸、定子鉄心的冲模、定子有效鉄心压板的木模等有关。另一方面，电机有效鉄心的长度是受車床頂針間的距离、定子繞組浸膠罐的长度以及工厂的其他設備所限制。

虽然每一个公司都有它自己的有效尺寸的等級，但是这些尺寸一般講来是变动不大的。表 1-3 中提供了各种容量的汽輪发电

机的基本尺寸的变动范围。

表 1-3

发电机的容量 (千瓦)	定子内径(公厘)		有效铁心长度(公厘)	
	从	到	从	到
750	450	550	500	700
1500	450	550	800	1200
2500	550	650	800	1200
4000	550	650	1000	1400
6000	650	750	1200	1500
12000	750	800	1500	2000
25000	850	950	2400	3000
50000	950	1100	3000	3500
100000	1000	1200	4500	6500

现在,转子的最大直径是 1100 公厘左右。此时,在转子中的机械应力,特别是在保护转子绕组端接部分的护环中的机械应力达到现代冶金水平所能允许的最大数值。

从 12000 和 25000 千瓦的汽轮发电机开始,各个主要工厂现在都已采用氦气冷却。采用氦气冷却能显著地提高转子直径的出力。在空气冷却时占总损失很大一部分的空气摩擦和通风损失在氦气冷却时已不起什么作用了。但是空气冷却和氦气冷却的汽轮发电机的有效部分的尺寸都是在表 1-3 所示的范围内。

应该指出,当电机的容量变化达 200 倍时(500 和 100000 千瓦),直径仅变动二倍。最小直径约 450~500 公厘,而最大直径近乎 1000 公厘。转子直径的下限是由结构上的见解所决定的。主要是由于转子本体尽头的轴径和转子外径间的环状空间内安放激磁绕组的困难。

在汽轮发电机制造中所采用的转子的最大直径,上面已经讲到,是受转子本体,特别是转子护环中机械强度的限制。

每个公司和每个工厂的汽轮发电机有它自己独有的结构上的特点。除了每个公司的特点以外,现代汽轮发电机还有许多几乎为各个公司所采用的无可争辩的结构上的解决办法。例如,现在四

极汽輪发电机实际上已經不造了。苏联国家标准 ГОСТ 533-51 規定只有 3000 轉/分的二极发电机。

某些工厂所生产的四极汽輪发电机是用于二个汽輪机所連成的机組。一个是高压的,另一个是低压的。那末, 1500 轉/分的发电机就与低压的汽輪机联接起来。

要求对任何容量都采用二极汽輪发电机完全是由經濟上的見解所决定的。并且,主要是因为汽輪机材料利用率的显著提高。可以粗略地認為 1500 轉的汽輪机要比同样容量的 3000 轉的汽輪机重一倍。由容量 50000 仟瓦、1500 轉/分的汽輪机和发电机所連成的机組在发电站中所占的地方和容量 100000 仟瓦、3000 轉/分的机組完全一样。

隨了轉速的增加整个机組的效率也显著地增加。对于发电机本身,从四极变为二极結構时,轉子鍛件要輕一半。減小了发电机的銅重和制造发电机的总工时。

改用氬气冷却时,更可以察覺到高速汽輪发电机的优点。

應該指出,所有的公司都采用双层短距的定子繞組。这种繞組能得到最接近于正弦波的定子繞組电势,因而附加損失最小。

所有的公司都希望采用每槽二根导綫的繞組,这样的方法可以不要匝間絕緣。此时,每根銅排是由一根包有对地絕緣的导綫所組成的。这样的絕緣結構容易檢查。絕緣的厚度很厚,机械强度很高,因而繞組是极可靠的。

实际經驗指出,当一根銅排內含有彼此絕緣、处于不同电压下的数根导綫时,大部分定子繞組的损坏是由于匝間絕緣的破坏所引起的。在現代汽輪发电机中定子繞組的端接部分在結構上是布置成一个圓錐面。端接部分布置成圓錐形可以节省銅 30%,并降低附加損失。端接部分弯成直角、布置在与轉軸垂直的平面上的老式結構現在几乎都已不用了。

表1-1和表1-2所提供的汽輪发电机的标准电压等級也在电机的結構上,首先是它的繞組上留下了痕跡。在計算电机时規定的电