

# 汽輪发电机的發展概況

上海电机厂技术报导組編著



机械工业出版社

## 序

汽輪发电机的生产是目前各国工业水平的重要标志之一。介放后不久，在党的领导下和苏联等兄弟国家的帮助下我国电机工业从修配基础迅速轉向自行設計和制造。

从1954年制成我国第一台6000瓩汽輪发电机，到目前仅仅四年中我国已能制造25000瓩及以下的。現正向赶上和超过英国的生产水平而努力。今年是我国开始全面大跃进的第一年，由于钢铁元帅升帳，电力和机械的先行，特别是发电設備的生产迫不及待，全国在制造汽輪发电机方面也将遍地开花。同时我們还要响应党的号召，爭取在五年内赶上国际水平。为了使全国不久将生产和試驗研究的工厂、学校、发电站、人民公社等单位，对汽輪发电机的生产技术的发展，有較全面的了解和掌握，編著者在跃进关键年元旦前，将所收集到的有关資料編写成書，以供参考，并向解放十周年元旦献礼。祈望我国不久将生产出超过国际水平的汽輪发电机和生产出数量超过所有資本主义国家的汽輪发电机。

本書分成九章；第Ⅰ章介紹了汽輪发电机74年发展过程中的重要事例。第Ⅱ至Ⅳ各章綜述了汽輪发电机所突出的規格、性能、材料、結構、工艺和檢驗等方面的重要发展概况。从以上四章中讀者略可从中了解汽輪发电机怎样开始掌握生产、进行試驗研究并找出发展方向，注意关键性的問題加以解决。第Ⅴ至Ⅷ各章分別介紹了苏联及一些資本主义国家在汽輪发电机产品上較近代的发展和新型产品，及一些发展見解，藉此供我們探討和研究。最后一章对汽輪发电机中二个重点計算問題，其在苏联获得介决的成就和計算方法作了介紹，以供从事設計計算上的参考和分析。

本書內容，由于我們的水平有限，不够完整全面，可能还有錯漏，尚請讀者不吝指正。

上海电机厂技术报导組

1958年11月30日

# 目 次

## 序

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| I. 发展簡史: .....                                                  | 1  |
| 1. 发明前夕, 1833—1903 年                                            |    |
| 2. 空气冷却式的诞生和发展, 1904—1925 年                                     |    |
| 3. 空气冷却式发展达到极限容量和氢冷式的诞生和发展, 1926—1950 年                         |    |
| 4. 氢冷式发展达到极限容量和内部冷却式的诞生和发展, 1951—1958 年                         |    |
| II. 經濟指标和性能的比较 .....                                            | 4  |
| 1. 容量。                                                          |    |
| 2. 型式。                                                          |    |
| 3. 冷却介质及方式。                                                     |    |
| 4. 散热与温升。                                                       |    |
| III. 基本数据和极限容量 .....                                            | 9  |
| 1. 三相二极的基本数据举例。                                                 |    |
| 2. 苏联汽輪发电机的比較数据                                                 |    |
| 3. 电流密度。                                                        |    |
| 4. 磁通密度。                                                        |    |
| 5. 轉子机械应力。                                                      |    |
| 6. 极限容量。                                                        |    |
| IV. 特种材料、结构、工艺和檢驗 .....                                         | 12 |
| 1. 特殊材料, 冷却解质, 定轉子导线及本身材料, 絕緣材料。                                |    |
| 2. 特殊结构和工艺、防振、防膨、轉子鍛造、护环加工、滑环接綫和散热、端压板的防止发热、繞組浸胶、引綫和排列。         |    |
| 3. 特种檢驗方法、轉子中心孔、磁粉檢驗, 超音波、紅外綫、真空管平衡探伤; 超速、热平衡試驗、冲击短路試驗等。        |    |
| V. 苏联关于汽輪发电机发展的討論 .....                                         | 25 |
| 1. 概述。 2. 强行提高容量的汽輪发电机。 3. 强行提高容量的汽輪发电机电的机参数。 4. 科学研究工作。 5. 結論。 |    |
| VI. 苏联氢冷式大型汽輪发电机的实验研究結果 .....                                   | 32 |
| 1. 概述。 2. 汽輪发电机技术数据。 3. 电气試驗。 4. 温升試驗。 5. 通风試驗。 6. 效率。 7. 結論。   |    |
| VII. 苏联氢冷式小型汽輪发电机的結構和試驗数据 .....                                 | 39 |
| 1. 概述。 2. TBC-30 型汽輪发电机的主要数据。 3. 結構。 4. 提高氢压的試驗。 5. 結論。         |    |
| VIII. 最近資本主义国家各工厂制成的内部冷却式汽輪发电机的結構和性能. ....                      | 46 |
| 1. 阿利斯却茂。 2. 西屋。 3. 奇昇(氢内冷)。 4. 奇导(油内冷)。                        |    |
| 5. 葛益其。 6. 勃郎鮑維利。                                               |    |
| IX. 汽輪发电机重点性能計算 .....                                           | 51 |
| 1. 汽輪发电机的发热計算。 2. 汽輪发电机的轉子护环机械計算。                               |    |
| 参考文献 .....                                                      | 82 |

# I. 发展簡史

## 1. 发明前夕, (1833—1903年)

- (1) 1833年俄国楞次总结了法拉第电磁感应定律, 进一步阐明了可逆原理, 并証明了电磁感应与迴轉密切联系着, 此后又証明感应电动势与导线直徑及金属无关。
- (2) 1834年俄国亚哥比制成了第一台迴轉电机(直流、船用)。
- (3) 1840年俄国楞次和亚哥比研究了磁矩与磁化力的关系, 楞次肯次二者的正比例关系, 并确定了电磁作用定律。
- (4) 1884年第一台直流汽輪发电机誕生(英国派生 7.5 瓩 100 伏 25 A, 18000 轉/分)
- (5) 1888年英国派生制成直流 75 瓩 4800 轉/分的。
- (6) 1889年英国派生制成直流 60 瓩 100 伏 6000 轉/分 直流汽輪发电机及单相, 75 瓩 100 伏 4800 轉/分 80 赫交流的。
- (7) 1890年俄国多利沃——多勃罗利沃斯基发明了三相交流电流。
- (8) 1891年 1000 伏 100 瓩单相 80 赫 4800 轉的汽輪发电机制成(英国派生)
- (9) 1900年英派生已生产 1000 瓩单相 50 赫 1500 轉/分的, 1901年瑞士勃郎施維利公司(BBC)制成 5000 瓩 750 轉/分的, 1902年又制出 1500 瓩三相 40 赫 1200 轉/分的。
- (10) 1903年哈特非(英)发明的不老化的硅鋼片开始生产, 同时美国奇异公司(GE)制成 5000 瓩的汽輪发电机(总重达 102 吨)。

## 2. 空气冷却式的誕生和发展, (1904—1925年)

- (1) 1904年欧洲第一台 1250 瓩, 二极 3000 轉的汽輪发电机制成。
- (2) 1907年英国派生公司制出 5000 瓩 1200 轉/分, 瑞士勃郎施維利公司制出 5000 瓩 1600 轉/分的。
- (3) 1909年沙弗利(德), 此后 1912年西門子公司在英国、1918年呂登堡(德)先后提出了三种内部冷却结构。1911年派生公司制成 20000 瓩 750 轉/分的。1915 舒勒(德)提出了大型汽輪发电机采用氦冷的建議。
- (4) 1918年各国对六极汽輪发电机开始停止生产, 虽然美国在 1928 年及 1929 年还造了 7.5 及 12.5 万瓩的各一台, 但此后各国均停止生产(參閱第 4 頁单个容量增长纪录表)。英国派生公司制成 10000 瓩 2400 轉/分的。
- (5) 提高工作温度至 110°C 的汽輪发电机进行試制, 同时开始采用縱向分段通风, 使风耗减少, 效率及功率提高。
- (6) 1922年韦脱納(美国奇异公司), 建議汽輪发电机中采用氦冷。
- (7) 1923年美国奇异公司制出 45000 瓩四极的。
- (8) 1924年苏联电力工厂制成了第一台 500 瓩, 3000 轉的汽輪发电机, 同年又制成

了1500瓩的。美国奇异公司制出5万瓩1800轉/分的,总重为21吨。

(9) 1925年轉子材料和絕緣材料的改进,使大型的由6极改为4极。苏联电力工厂制造了一台3000轉10000瓩的,3000轉的共制成八台。

(10) 1927年瑞士勃郎施維利公司已制成单只4极16万瓩的,美国制成第一套复并联的总容量为20万8千瓩的。

### 3. 空气冷却式发展到达极限容量和氢冷式的 的誕生和发展(1926—1950年)

(1) 1926年美奇异公司制成了6万瓩1500轉/分25赫的,而苏联电力工厂制造出7台10000瓩的。

(2) 1928年第一台氢冷式的迴轉电机(同步补偿器)制成,容量为15000仟伏安,900轉/分,同时又制成了2万仟伏安的。

(3) 1930年苏联旧型的汽轮发电机开始改型,并于1933年完成了T型系列产品。此后在第二个五年计划期中又改进成T2型,由T型改为T2型节省主要材料这20—25%(見第6頁以25000瓩为例所进行的經濟指标的比较)。

(4) 1931年美国随欧洲之后也制成了单只16万瓩4极的空气冷却式汽轮发电机,电压为16.5仟伏,功率因数0.8,1800轉/分。

(5) 1932年第一台戶外按装式汽轮发电机制成,容量为6000瓩,使设备和维护费降低并提高了电站总效率。至1940年戶外氢冷20000瓩,3600轉,13.8仟伏的亦制造成功,至1947年又制成60000瓩的。

(6) 1933年采用电子管自动控制励磁15000瓩4.15仟伏900轉/分的試制成功。

(7) 1934年苏联哈尔科夫厂开始生产成套汽轮发电机,并在1935年生产5万瓩1500轉的机组。至1937年該厂已制成1500轉欧洲最大的空气冷却式100000瓩的。电力工厂也制成了当时最大的10万瓩3000轉(单位容量总重为2.2公斤/瓩)。

(8) 1935年16万5千瓩,1800轉,13.8仟伏60赫空气冷却式的在美国制成。

(9) 1937年氢冷式40000瓩(西屋),25000瓩(奇异),3600轉,功率因数0.8的在美国制成。

(10) 1939年加装气体冷却器50000瓩的氢冷式汽轮发电机在美国制成,氢压为0.035公斤/公分<sup>2</sup>。

(11) 1940年全世界氢冷式共制造了37台,总容量达200万瓩,苏联已在电力工厂生产3万瓩的,美国制造了10台,所制成的氢冷式的总容量为50万瓩。

(12) 1941年冷板压的石理化硅鋼片开始应用,但此后并未广泛采用在汽轮发电机上。

(13) 1943年苏联开始試制10万瓩2极氢冷式的,至1945年試制成功并自1946年开始生产。

(14) 1949年美国氢冷式二极11万瓩的制成,氢压0.5磅/方吋,129500仟伏安,13.8仟伏。是年美国自24年以来氢冷式汽轮发电机生产总容量最多的一年,共50万瓩。美国自1924年以来平均每年生产約15万瓩的氢冷式汽轮发电机。同时大容量的轉子导线开始采用康达尔铝合金(Cond-Al),使轉子本身重量減輕、应力减小。

#### 4. 氢冷式发展达到极限容量和内部直接冷却式的诞生和发展, (1951—1958年)

(1) 1951年大型内部直接氢冷式的制成(美 Allis-Chalmers 公司), 是年制成最大的为 8 万瓩, 0.8 功率因数, 氢压已提高到 30 磅/方吋。

(2) 1952年苏联电力工厂开始生产 15 万瓩氢冷式的, 功率因数 0.9, 氢压为 0.5 大气压(以前用 0.035), 效率已达 99%。美国在汽轮发电机励磁系统上开始采用磁扩大器。

(3) 1953年氢压已采用到 45 磅/方吋, 如美西屋 10 万瓩的, 同时定转子绝缘已普遍改用 B 级, 而对通风方法改进很多, 如奇异公司 12.5 万瓩的纵向用气隙散热方法 "Air-gap pickup"。由于采用转子带有杓形通风槽的内部冷却, 使温差降低, 容量增大。

(4) 1954年 10 万瓩以下的中型汽轮发电机开始用内部氢冷式代替一般氢冷式。美国是年内部氢冷式的已制成 16 台, 总容量达 300 万千瓦伏安, 其中最大的为 30 万瓩 (35.2 万千瓦伏安), 氢压为 45 磅/方吋的, 当时氢压在试验上已达 90 磅/方吋。采用内部冷却当时已能制造 30 万瓩的, 如 10 万瓩以上氢压为 30—45 磅/方吋, 定转子重量可减少一半, 转子直径可小 15%, 并有可能制造 35 万瓩的, 苏联是年开始制造 20 万瓩内部氢冷式的。美国西屋公司开始用无接触的静电压调整励磁机 (Mag-a-Stat), 当时已有六台大型的采用着。我国上海电机厂制成第一台 6000 瓩 3000 转/分汽轮发电机。

(5) 1955年苏联电力工厂制成了 3 万瓩转子绕组氢内冷的。美国奇异公司在定子绕组中开始采用内部油冷式, 制成了 20.8 万瓩, 26 万千瓦伏安, 3600 转, 18 千伏的。据估计可制成 45 万瓩的, 西屋公司内部氢冷式还制成了 25 万瓩, 3600 转, 24 千伏的。

(6) 1956年英国茂伟及电气公司制成定子水冷式 3 万瓩 11.8 千伏的。美国奇异公司开始制造二台 45 万瓩定子用油转子用氢的内部直接冷却式的机组, 据计算整个电厂效率可从 1955 年的 37.5% 提高到 41%。我国上海电机厂制成 12000 瓩 3000 转汽轮发电机, 同时开始成批生产 12000 瓩以下的汽轮发电机。

(7) 1957年苏联 20 万瓩氢内冷式的试制成功。我国这一年共生产了 750—12000 瓩的共 29 台 12.5 万瓩。苏联和美国正在研究无方向性的晶体硅钢片, 对汽轮发电机的发展将会起很大影响。

(8) 1958年苏联正在制造 30 万瓩的和研究 60 万瓩新型冷却结构的, 美国西屋公司正在设计 385 兆伏安的英国正在设计 30 万瓩氢内冷液冷式的。我国 25000 瓩的同时在上海电机厂及哈尔滨电机厂制成。年底并将制成 5 万瓩的, 并准备制造 10—20 万瓩的和超国际水平的新型汽轮发电机, 而年产量预计不久的二三年中将超过英美等国。

从以上 74 年汽轮发电机的发展历史中可以了介以下的二个较重点的问题, 这二个问题对掌握现代型的汽轮发电机的生产技术是不可缺少的, 也是值得研究和进一步发展的:

(1) 现代型的同步交流三相 (或六、九、十二相) 汽轮发电机都是大型高速的 (二级的), 因此转子及护环的机械应力和振动较突出, 须从结构和材料性能上加以解决和改进。

(2) 大型电机中单位体积中所发热量相对地较小型的要大, 因此冷却介质、冷却结构和方法显得特别重要。此外高速下转子导线及其绝缘以及导磁材料也是值得研究的。这些都决定着汽轮发电机的生产技术水平, 尤其是影响着它的技术经济指标和产量。

## II. 經濟指标和性能的比較

### 1. 容 量

(1) 历年各国汽輪发电机单个容量增长記錄(1904—1957)

| 年份/轉速 | 容量( 1000 瓩) |      |            |                  |         |                      |
|-------|-------------|------|------------|------------------|---------|----------------------|
|       | 1000        | 1200 | 1500       | 1800             | 3000    | 3600                 |
| 1904  | 6.3         | —    | —          | —                | 1.25    | —                    |
| 1905  | 21.4        | —    | 3.6        | —                | —       | —                    |
| 1906  | 29.5        | —    | —          | —                | —       | —                    |
| 1911  | 55          | —    | 12         | —                | 4.4     | —                    |
| 1913  | —           | —    | 25         | —                | 6.25    | —                    |
| 1920  | —           | —    | 36         | 31               | 20      | 7.5                  |
| 1922  | —           | —    | 45         | —                | —       | —                    |
| 1924  | —           | 50   | —          | —                | —       | —                    |
| 1925  | —           | —    | 60         | 50               | —       | 12                   |
| 1927  | —           | —    | 100<br>160 | 62<br>76         | 40      | —                    |
| 1928  | —           | 75   | —          | *10(氫)<br>*16(氫) | —       | —                    |
| 1929  | —           | 125  | —          | 75               | —       | 12.5                 |
| 1930  | (六极的停止生产)   |      | —          | 105              | —       | 15                   |
| 1931  | —           | —    | —          | 160              | 50      | 18                   |
| 1935  | —           | —    | —          | 165              | —       | —                    |
| 1937  | —           | —    | —          | —                | 100     | 25.40(氫)<br>50       |
| 1938  | —           | —    | —          | —                | —       | 53                   |
| 1939  | —           | —    | —          | —                | —       | 60(氫)                |
| 1942  | —           | —    | —          | —                | —       | 65(氫)                |
| 1944  | —           | —    | —          | 147(氫)           | —       | —                    |
| 1945  | —           | —    | —          | —                | 100(氫)  | —                    |
| 1947  | —           | —    | —          | —                | —       | 90                   |
| 1948  | —           | —    | —          | —                | —       | 100                  |
| 1949  | —           | —    | —          | —                | —       | 110(氫), 150          |
| 1951  | —           | —    | —          | —                | —       | 80(氫直)               |
| 1952  | —           | —    | —          | —                | 150(氫)  | —                    |
| 1953  | —           | —    | —          | —                | —       | 100(氫直)              |
| 1954  | —           | —    | —          | —                | 30(轉直)  | 208(氫直油直)<br>300(氫直) |
| 1955  | —           | —    | —          | —                | —       | 250(氫直)              |
| 1956  | —           | —    | —          | —                | 30(氫水)  | —                    |
| 1957  | —           | —    | —          | —                | 200(氫直) | —                    |

注: \* 同期电容器; 有(氫)指氫冷, 有(氫直)指定子导綫氫内部直接冷却, 有(轉直)指轉子导綫氫内部直接氫冷式。有(氫水)指氫冷定子水內冷式, 其他为空气冷却式。

(2) 苏联和美国汽轮发电机单个容量增长速度的比较(1924—1958)

| 年份   | 苏 联                  |    |      | 美 国                |        |              |
|------|----------------------|----|------|--------------------|--------|--------------|
|      | 瓩                    | 极数 | 冷却方法 | 瓩                  | 极数     | 冷却方式         |
| 1922 | 500                  | 2  | 空气冷却 | 4,500              | 4      | 空气冷却         |
| 1924 | 1,500                | 2  | 空气冷却 | 48,000             | 4      | 空气冷却         |
| 1925 | 8,000                | 2  | 空气冷却 | 50,000             | 4      | 空气冷却         |
| 1926 | 4,000                | 2  | 空气冷却 | —                  | —      | —            |
| 1927 | 5,000 (6,000)        | 2  | 空气冷却 | 60,000             | 4      | 空气冷却         |
| 1928 | 10,000 (12,000)      | 2  | 空气冷却 | 75,000             | 6      | 空气冷却         |
| 1929 | 24,000 (25,000)      | 2  | 空气冷却 | 125,000<br>75,000  | 6<br>4 | 空气冷却         |
| 1931 | 50,000(100,000)      | 4  | 空气冷却 | 160,000            | 4      | 空气冷却         |
| 1937 | 50,000               | 2  | 空气冷却 | 50,000             | 2      | 氢冷           |
| 1938 | 100,000              | 4  | 空气冷却 | 60,000             | 2      | 氢冷           |
| 1946 | 100,000              | 2  | 氢冷   | —                  | —      | —            |
| 1949 | —                    | —  | —    | 150,000<br>110,000 | 2<br>2 | 空气冷却<br>氢冷   |
| 1952 | 150,000              | 2  | 氢冷   | —                  | —      | —            |
| 1953 | —                    | —  | —    | 100,000            | 2      | 氢内冷          |
| 1954 | —                    | —  | —    | 208,000<br>300,000 | 2<br>2 | 油及氢内冷<br>氢内冷 |
| 1955 | —                    | —  | —    | 250,000            | 2      | 氢内冷          |
| 1956 | —                    | —  | —    | (开始试制氢内冷式机组 45 万)  |        |              |
| 1957 | 200,000              | 2  | 氢内冷  | —                  | —      | —            |
| 1958 | (开始研究 40—60 万瓩新型的机组) |    |      | (开始设计 385 兆伏安的)    |        |              |

(3) 英国汽轮发电机单个容量及经济指标提高比较(1924—1955 年)。

| 年份   | 兆伏安  | 转子每兆伏安重量(吨) | 转子重量(吨) | 转子直径(吋) |
|------|------|-------------|---------|---------|
| 1924 | 25   | 0.75        | 18      | 33      |
| 1930 | 37.5 | 0.56        | 21      | 35      |
| 1937 | 50   | 0.52        | 26      | 35      |
| 1943 | 75   | 0.42        | 32      | 38      |
| 1952 | 12   | 0.34        | 43      | 39      |
| 1955 | 2.5  | 0.20        | 43      | 39      |

(4) 汽轮发电机容量与每瓩安装费用的比较(以苏联 T 2 型为例)

| 容量(台数×瓩)  | 每瓩安装费%(以 10 万瓩为标准,100%) |
|-----------|-------------------------|
| 4× 25,000 | 165                     |
| 4× 50,000 | 138                     |
| 4×100,000 | 100                     |

## 2. 型 式

(1) 苏联旧型与新型系列汽轮发电机经济指标的比较(以 25000 瓩 3000 轉的为例)

| 型式       | 冷却方式 | 瓩      | 总 重<br>(不包括励磁机,吨) | 铜 重<br>(吨) | 铁 重<br>(吨) | 损 耗<br>(%) | 总 重<br>(公斤/瓩) |
|----------|------|--------|-------------------|------------|------------|------------|---------------|
| T2270/98 | 空气冷却 | 24,000 | 91.6              | 6.25       | 32.6       | 4.0        | 3.4           |
| T-25-2   | 空气冷却 | 25,000 | 79.0              | 5.25       | 33.2       | 3.2        | 3.2           |
| T2-25-2  | 空气冷却 | 25,000 | 66.0              | 4.60       | 26.5       | 2.5        | 2.7           |
| TBC-30-2 | 氢冷   | 30,000 | 82.5              | 3.08       | 27.6       | 1.7        | 3.1           |
| TB2-30-2 | 氢冷   | 30,000 | 72.6              | 3.72       | 21.4       | 1.7        | 2.42          |
| TBΦ-30-2 | 氢内冷  | 30,000 | 51.9              | 3.00       | 15.0       | 1.7        | 1.73          |

(2) 苏联空气冷却(T-2)氢冷(TB-2)与氢内冷(TBΦ-2)型汽轮发电机的经济指标比较。

| 容量(万瓩) |      |       | 功率因数 |       |       | 总重(吨) |              |       | 效率(%) |                 |       |
|--------|------|-------|------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-----------------|-------|
| T-2    | TB-2 | TBΦ-2 | T-2  | TB-2  | TBΦ-2 | T-2   | TB-2         | TBΦ-2 | T-2   | TB-2            | TBΦ-2 |
| 2.5    | (3)  | 3     | 0.8  | (0.8) | 0.8   | 74    | (83)         | 52    | 97.6  | (98.3)          | 98.3  |
| 5      | (5)  | —     | 0.85 | (0.8) | 0.8   | 140   | (159)        | —     | 97.7  | (98.5)          | —     |
| —      | 6    | 6     | —    | 0.8   | 0.8   | —     | 122          | 88    | —     | 98.56           | 98.5  |
| 10     | 10   | 10    | 0.9  | 0.85  | 0.85  | 261   | 218<br>(258) | 143   | 97.8  | 98.78<br>(98.7) | 98.76 |
| —      | 15   | 15    | —    | 0.9   | 0.85  | —     | 324          | 213   | —     | 98.9            | 98.85 |
| —      | —    | 20    | —    | —     | 0.85  | —     | —            | 274   | —     | —               | 98.82 |

(3) 空气冷却和氢冷式汽轮发电机性能的比较,(以苏联 TB 2—150—2 型为例)

| 試驗确定值<br>名 称 | 空气冷却, 0.0 大气压 |        | 氢冷, 0.05 大气压 |         |
|--------------|---------------|--------|--------------|---------|
|              | 冷却器用水冷        | 冷却器用气冷 | 冷却器用水冷       | 冷却器用气冷  |
| 功率, 瓩        | 90,000        | 90,000 | 150,000      | 150,000 |
| 功率因数         | 0.9           | 0.9    | 0.9          | 0.9     |
| 风耗, 瓩        | 1,012         | 1,000  | 141          | 139.2   |
| 轴承磨耗, 瓩      | 245           | 245    | 245          | 245     |
| 铁耗, 瓩        | 570           | 632    | 570          | 632     |
| 定子铜耗, 瓩      | 53.6          | 53.6   | 148.5        | 148.5   |
| 附加损耗, 瓩      | 58.8          | 55.8   | 163          | 154.8   |
| 励磁耗, 瓩       | 151           | 151    | 242          | 242     |
| 总耗, 瓩        | 2,090.4       | 2137.4 | 1,507        | 1,561.5 |
| 效率, %        | 97.73         | 97.68  | 99.0         | 98.97   |
| 額定效率, %      | 97.7          | —      | 98.98        | —       |

### 3. 冷却介质及冷却方式

(1) 冷却介质、压力、冷却方式与容量的比较:

| 冷却介质 | 压力(大气压)   | 冷却方式         | 容量%(以氢压0.5磅氢冷为标准) |
|------|-----------|--------------|-------------------|
| 空气   | 1.00      | 普通           | 75                |
| 氢    | 0.03      | 普通           | 100               |
| 氢    | 0.50      | 普通           | 110               |
| 氢    | 1.02      | 普通           | 115               |
| 氢    | 2.04      | 普通           | 125               |
| 氢    | 0.51      | 内部直接         | 135               |
| 氢    | 1.02      | 内部直接         | 150               |
| 氢    | 2.04      | 内部直接         | 175               |
| 氢    | (氢压影响可略去) | 油内冷(4大气压油压降) | 200               |
| 氢    | (氢压影响可略去) | 水内冷(1½大气压水头) | 310               |
| 氢    | (氢压影响可略去) | 水内冷(4大气压水头)  | 420               |

(2) 氢内冷式功率、氢压与性能的比较,(以西屋公司10万瓩为例)

| 功率<br>(瓩) | 氢压<br>(磅/方吋) | 功率因数<br>(%) | 短路比  | 端电压<br>(千伏) | 定子电流<br>(安) | 转子电流<br>(安) | 损耗%<br>(以8万为标准) |
|-----------|--------------|-------------|------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| 80,000    | 30           | 0.8         | 0.9  | 13.8        | 4185        | 2360        | 100             |
| 100,000   | 45           | 0.8         | 0.72 | 13.8        | 5231        | 2750        | 106.8           |
| 110,000   | 60           | 0.8         | 0.66 | 13.8        | 5754        | 2915        | —               |

(3) 空气冷却式和氢冷式氢压与转子励磁增加倍数的比较,(内部冷却转子槽内以槽形导线为例和普通矩形导线二侧通风为标准)

| 压力(大气压) | 空气冷却 | 氢冷  |
|---------|------|-----|
| 1       | 1.4  | 1.7 |
| 2       | 1.8  | 2.2 |
| 3       | 2.2  | 2.6 |
| 4       | 2.45 | 2.9 |

(4) 定子导线间接气冷与直接水内冷时工作温度的比较(以茂伟公司3万瓩的为例)

|           | 定子导线 | 线槽间 | 齿部 | 铁心 | 进风 | 冷却水  |
|-----------|------|-----|----|----|----|------|
| 间接空气冷(°C) | 80   | 70  | 64 | 64 | 26 | 16.5 |
| 直接水内冷(°C) | 30   | 43  | 50 | 58 | 21 | 16.5 |

## 4. 散热与温升

(1) 各种冷却流质散热能力的比较:

| 流质   | 压力<br>(磅/方吋) | 相对比热  | 相对密度  | 相对体积  | 相对散热能力 | 流速<br>(公尺/秒) | 散热率<br>(%) |
|------|--------------|-------|-------|-------|--------|--------------|------------|
| 空气   | 0            | 1.0   | 1.6   | 1.0   | 1.0    | 30—40        | 3.3—4.0    |
| 氢    | 0.5          | 5.25  | 0.138 | 1.0   | 0.75   | —            | —          |
| 氢    | 30           | 14.35 | 0.21  | 1.0   | 3.0    | 40           | 13         |
| 氢    | 45           | 14.35 | 0.28  | 1.0   | 4.0    | —            | —          |
| 变压器油 | —            | 2.09  | 848   | 0.012 | 21.0   | 2            | 360        |
| 不燃性油 | —            | 1.09  | 1510  | 0.012 | 20.0   | —            | —          |
| 水    | —            | 4.16  | 1000  | 0.012 | 50.0   | 2            | 840        |

(2) 用各种冷却气体与汽轮发电机绕组温升的比较(以3125伏安, 3600轉的为例),

| 冷却气体       | 空气 | 二氧化碳 | 氢    | 氢    | 氢    | 氢    |
|------------|----|------|------|------|------|------|
| 压力(相对大气压)  | 0  | 0    | 0.03 | 0.03 | 1.05 | 1.76 |
| 轉子繞組温升(°C) | 90 | 88   | 65   | 55   | 44   | 40   |
| 定子繞組温升(°C) | 54 | 54   | 39   | 34   | 25   | 22   |

(3) 内部直接冷却式用气隙散热(Air-gap pick-up)与普通纵向通风轉子繞組温升方面的比较(以奇异公司10万瓩为例)。最高值与平均值之比各为1.28与2。

|                  |    |      |    |      |    |      |      |
|------------------|----|------|----|------|----|------|------|
| 在轉子一端至中間的繞組长处(%) | 0  | 15.8 | 22 | 26.3 | 35 | 42.1 | 50   |
| 气隙散热的温升(°C)      | 50 | 64   | 50 | 38   | 58 | 38.5 | 58.5 |
| 普通纵向通风的温升(°C)    | 25 | 43   | 50 | 53   | 64 | 75   | 100  |

(4) 导线直接油冷和水冷的温升比较)1/4吋方空心銅线孔1/8吋方, 长333吋)

| 电流密度<br>(安/方公厘) | 流速(呎/秒)<br>雷诺值 | 油(粘度7分泊) |      |      | 水(粘度1分泊) |      |      |
|-----------------|----------------|----------|------|------|----------|------|------|
|                 |                | 1        | 2.5  | 5    | 1        | 2.5  | 5    |
| 7.8             | 压降(磅/方吋)       | 7.4      | 18.5 | 37   | 1.1      | 5.8  | 18   |
|                 | 液体温升(°C)       | 63       | 25   | 12.5 | 25       | 10   | 5    |
|                 | 表面温升(°C)       | —        | —    | —    | —        | 0.6  | 0.35 |
| 11.6            | 液体温升(°C)       | 140      | 56   | 28   | 56       | 22.5 | 11.5 |
|                 | 表面温升(°C)       | —        | —    | —    | —        | 1.34 | 0.78 |
|                 |                | 42       | 31   | 25   | 17       | 12.5 | —    |
| 15.6            | 液体温升(°C)       | —        | 100  | 50   | 100      | 40   | —    |
|                 | 表面温升(°C)       | —        | —    | —    | —        | 2.4  | 1.4  |
|                 |                | —        | 56   | 45   | 30       | 22   | —    |

### III. 基本数据和极限容量

#### 1. 三相二极汽轮发电机的基本数据举例

| 型 号       | 制 造 厂  | 功 率<br>(瓩) | 电 压             | 功 率 因 数 | 效 率  | 每 瓩 总 重<br>(公斤) | 转 子 直 径<br>(公尺) | 转 子 长 度<br>(公尺) | 转 子 重<br>(吨) | 周 速<br>(公尺/秒) | 气 隙<br>(公厘) |
|-----------|--------|------------|-----------------|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|---------------|-------------|
| T2-0.5-2  | 苏联电力工厂 | 500        | 4,23,525        | 0.8     | 92.0 | 14.0            | 0.45—0.55       | 0.50—0.70       | 1.5          | —             | —           |
| T2-1-2    | 苏联电力工厂 | 1000       | 4,23,525        | 0.8     | 93.6 | 8.0             | 0.45—0.55       | 0.50—0.70       | 1.8          | —             | —           |
| T2A-1.5-2 | 苏联电力工厂 | 1500       | 4,23,525        | 0.8     | 94.3 | 6.65            | 0.60            | 1.00            | 2.3          | 90            | 1.25        |
| T2-3-2    | 苏联电力工厂 | 3000       | 6.3, 8.15       | 0.8     | 95.0 | 5.33            | 0.55—0.65       | 0.80—1.2        | 3.5          | —             | —           |
| T2-6-2    | 苏联电力工厂 | 6000       | 6.3, 8.15       | 0.8     | 96.0 | 4.33            | 0.65—0.75       | 1.20—1.5        | 6.2          | —             | —           |
| T2-12-2   | 苏联电力工厂 | 12000      | 10.5, 6.3, 3.15 | 0.8     | 96.6 | 3.25            | 0.60            | 1.75            | 9.5          | 86            | 2.5         |
| T2-25-2   | 苏联电力工厂 | 25000      | 10.5, 6.3       | 0.8     | 97.2 | 2.68            | 0.87            | 2.70            | 17.5         | 128           | 2.8         |
| TBC-30-2  | 苏联电力工厂 | 30000      | 10.5, 6.3       | 0.8     | 98.3 | 2.75            | 0.87            | 2.70            | 16.5         | 156           | —           |
| T2-50-2   | 苏联电力工厂 | 50000      | 10.5            | 0.85    | 97.6 | 2.50            | 1.075           | 3.1             | 28           | 134           | 4.25        |
| T2-100-2  | 苏联电力工厂 | 100000     | 15.75           | 0.90    | 97.8 | 2.20            | 1.095           | 6.35            | 47           | 148           | 5.25        |
| —         | 英 国    | 200000     | —               | (0.8)   | —    | 1.25            | 0.99            | —               | 43           | 104           | —           |
| —         | 美 国    | 250000     | 60周波            | (0.8)   | —    | —               | 1.092           | —               | —            | 115           | —           |
| —         | 法 国    | 150000     | —               | —       | —    | —               | 2.0定子外圆         | 4.0             | —            | —             | —           |

上表中有( )的为氢冷式或氢内冷式。短路比,苏联采用0.6—0.8,美国采用1.0—0.8,欧洲采用0.5—0.6,故苏联汽轮发电机的静力超负荷能力为:

12000 瓩及以下为 2.0 倍      10000—25000 瓩为 1.8 倍      150000 瓩 为 1.7 倍

## 2. 苏联电力工厂 TB2 与 TBΦ 系列汽輪发电机的比較数据

| 汽輪发电机<br>型 号 | 功率 电压<br>(千瓦)(伏) | $\cos\phi$ | 短路比  | 定子重量<br>(吨) | 轉子重量<br>(吨) | 轉子总重<br>(公尺) | 轉子直徑<br>(公尺) | 临界轉速<br>轉/分 | 銅重<br>公斤/瓩 | 硅鋼片重<br>公斤/瓩 | 总重<br>公斤/瓩 | 效 率   |
|--------------|------------------|------------|------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|------------|--------------|------------|-------|
| TB2-30-2     | 30               | 6.3        | 0.8  | 66          | 17          | 7.7          | 814          | 887/2600    | 0.124      | 0.714        | 2.42       | 98.3  |
| TBΦ-30-2     | 30               | 6.3        | 0.8  | 38          | 12          | 6.6          | 750          | 2000/5400   | 0.10       | 0.50         | 1.73       | 98.3  |
| TB2-60-2     | 60               | 10.5       | 0.8  | 99          | 31          | 8.5          | 990          | 1920/3900   | 0.109      | 0.635        | 2.04       | 98.56 |
| TBΦ-60-2     | 60               | 6.3        | 0.8  | 72          | 18          | 7.4          | 920          | 1600/4700   | 0.090      | 0.47         | 1.47       | 98.5  |
| TB2-100-2    | 100              | 13.8       | 0.85 | 160         | 46          | 10.5         | 1000         | 1100/8740   | 0.11       | 0.765        | 2.18       | 98.78 |
| TBΦ-100-2    | 100              | 10.5       | 0.85 | 106         | 32          | 8.4          | 1000         | 1470/4220   | 0.0395     | 0.416        | 1.43       | 98.76 |
| TB2-150-2    | 150              | 18.0       | 0.9  | 222         | 59          | 11.7         | 1075         | 960/8380    | 0.106      | 0.78         | 2.16       | 98.9  |
| TBΦ-150-2    | 150              | 10.5       | 0.85 | 180         | 42          | 9.5          | 1075         | 1200/3800   | 0.030      | 0.45         | 1.42       | 98.85 |
| TBΦ-200-2    | 200              | 11.0       | 0.85 | 256         | 51          | 11.1         | 1075         | 1100/3560   | 0.077      | 0.466        | 1.87       | 98.82 |

### 3. 电 流 密 度

(1) 空气冷却式: 轉子繞組  $S_2 = 3-4$  安/方公厘, 定子繞組  $S_1 = 2.5-3.5$  安/方公厘。

(2) 氫直接冷却式: 当氫流速为 50—300 公尺/秒时相应的增加 3.55 至 7.3 倍, 一般氫流采用 80—100 公尺/秒, 氫压 2—3 大气压时  $S'_1 = 11.3-16.6$  安/方公厘,  $S'_2 = 9-10$  安/方公厘(定子每公分綫負荷为 250—700 安)。

### 4. 磁 通 密 度

定子鉄軛  $B_{a1} = 14-15(16)$  仟高斯, 轉子鉄軛  $B_{a2} = 15.5-16.5(17.5)$  仟高

齿部  $B_{z1} = 21.5$  以下仟高斯

齿部  $B_{z2} = 16-17.0(17.5)$  仟高斯

$B_{z1} = 14-15.5$  仟高斯

$B_{z2}'' = 23.0$  以下仟高斯

气隙  $B_g = 5-7$  仟高斯

### 5. 轉子机械应力

二极, 3000 轉汽輪发电机轉子机械应力按所用繞組导綫为銅綫或鋁綫分別比較如下:

| 轉子直徑(公尺)   | 0.5 | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  | 1.1  | 1.2  |
|------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 每公分长重量 銅   | 8.4 | 12.0 | 16.3 | 21.2 | 26.7 | 33.0 | 39.9 | 47.4 |
| (公尺) 鋁     | 6.8 | 9.8  | 13.2 | 17.1 | 21.6 | 26.7 | 32.4 | 38.3 |
| 中心孔应力 銅    | 565 | 782  | 1047 | 1348 | 1680 | 2056 | 2485 | 2940 |
| (公斤/方公分) 鋁 | 489 | 682  | 907  | 1170 | 1460 | 1785 | 2125 | 2560 |
| 超速試驗时应力 銅  | 813 | 1110 | 1510 | 1940 | 2420 | 2960 | 3580 | 4230 |
| (公斤/方公分) 鋁 | 704 | 980  | 1305 | 1680 | 2200 | 2560 | 3060 | 3690 |
| 护环应力 額定轉速  | 680 | 1020 | 1440 | 1960 | 2570 | 3290 | 4130 | 5070 |
| 超速試驗时      | 980 | 1470 | 2070 | 2920 | 3700 | 4740 | 5950 | 7300 |

注: 超速試驗轉速为額定轉速的 120% 即 3600 轉。

### 6. 极 限 容 量

电站中采用的汽輪发电机除了采用高速的二极的外, 采用的容量不断提高, 采用大容量的汽輪发电机組有以下一些优点:

(1) 电站总效率高, 机組容量越大, 效率越高, 虽然大容量的汽輪发电机效率可能会降低如 30 万瓩的效率反比 15 万瓩的低 0.5—0.7%, 但整个机組的效率却仍旧提高, 例如 25 万瓩的机組效率比 15 万瓩的高 1.5%。

(2) 机組少, 电站服务人員少。

(3) 厂房小, 基建工作量小。

(4) 汽輪发电机的生产量及生产能力高。

最近电力系统不断增长, 容量的儲备就并无困难, 采用了强行励磁能快速反应的靜励

磁设备,汽轮发电机采用氢压较高的内部直接氢冷或油冷方法,采用耐热、绝缘、导热机械性能优良的热弹性不飽和聚乙烯脂、环氧树脂、硅有机绝缘、石理化或晶体的硅鋼片,鋁合金的轉子导綫。定子采用多相繞組,以及其他結構措施,工艺改进,和超音波探伤等技术的提高,短路比在大型的加以适当降低,都有可能使容量大大提高,根据各国学者所发表的意見,对极限容量的結論列举如下:

(1) 苏联柯馬尔(E. T. Комар): 如轉子鍛件屈服点强度为 60 公斤/方公厘,护环材料为 100 公斤/方公厘,安全系数用 1.8。如轉子用銅綫的超速 20% 計,轉子极限直徑在 1.1 公尺左右,长度为 6.5 公尺,相当的极限容量为 20 万瓩,但如用内部氢冷则为 40 万瓩,倘再降低短路比至 0.3 容量达 45 万瓩(50 周波)。

(2) 西德維特蒙(E. Wiedmann): 目前轉子直徑最大的为 1.18 公尺,最长的达 7.5 公尺,二者如合并可达 30 万瓩左右。由于熔接技术,超音波探伤,采用鋁导綫,故直徑可能达 1.3 公尺,长度达 7.5 公尺,則容量可达 50 万瓩伏安,(50 周波)。

(3) 美国开朋(C. E. Kilbourne)和好来(C. H. Holley):

油內冷式的繞組热的极限容量如为 3600 轉的汽輪发电机的定子繞組,可达 50 万瓩伏安,并还有可能提高,目前 40 万的及以上用 30 磅/方吋氢压的实际上已在採用(60 周波)。

目前氢压已有采用 60 磅/方吋的,轉子可用康达尔等鋁合金,故极限容量可达 50 万瓩极限容量的发展可分下列五个阶段:

(1) 1908—1928 年空气冷却式,容量达 20 兆瓩安。

(2) 1929—1940 年氢压为 0.5 磅/方吋,氢冷式的,容量达 100 伏安。

(3) 1941—1947 年氢压为 15 磅/方吋,氢冷式的,容量达 125 兆伏安。

(4) 1948—1952 年氢压为 30 磅/方吋,氢內冷式的,容量达 187.5 兆伏安。

(5) 1953—1956 年氢压为 45 磅/方吋,氢內冷式的,容量达 352 兆伏安。

最近有 45 万瓩(美国奇异)机組的已正在开始制造,385 兆瓩安的汽輪发电机(美国西屋)也开始設計,由于液体內冷式的采用,60 万瓩的机組(苏联)也正在研究,故最近还有可能发展。

## IV. 特种材料、結構、工艺和檢驗

### 1. 特 种 材 料

#### (1) 冷却介质:

汽輪发电每公斤平均要发热量 5—8 瓦, 較其他电机高, 因此冷却較重要, 通风地位亦占得較大, 目前已采用的冷却介质有下列三种:

a. 空气 汽輪发电机容量在 25000 瓩以下一般均用空气冷却。空气通风每小时所需空气量很大, 几等于发电机本身重量, 例如苏联 T2-50-2 型的本身重 125 吨, 每小时就需冷却空气达 120 吨, 同时必須采用封閉或循环冷却方式。因空气中如含有固体当大量空气通过风道使通风槽恶化, 空气阻力損耗占整个汽輪发电机总耗达 30—60%, 例如苏联 T2-25-2 型达 33%, T2-50-2 型达 53%, T2-100-2 型达 54%, 如 TB2-150-2 型用空气冷却时容量为 9 万瓩而空气損耗达 48%。采用空气冷却, 汽輪发电机的結構較简单, 在 25000 瓩以下的重量亦較輕, 过去亦有容量达 16 万瓩 (1500 轉) 和 15 万瓩 (3600 轉) 的, 但因太不經濟目前已不制造。

b. 氩 在 30000 瓩及以上虽用氩冷却, 增加了結構的复杂性, 但在技术經濟指标上可以得到补偿, 故 3 万瓩及以上的都逐步采用氩冷式了。采用氩和其他气体可从下表与其他气体比較而且有較大的优点 (以空气为标准):

| 特 性  | 空气 | A    | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | He   | H <sub>2</sub> |
|------|----|------|-----------------|----------------|-----------------|------|----------------|
| 导热系数 | 1  | 1.08 | 0.64            | 0.87           | 1.29            | 6.40 | 6.70           |
| 散热系数 | 1  | 1.03 | 1.13            | 1.23           | 1.43            | 1.18 | 1.35           |
| 比 重  | 1  | 0.96 | 0.52            | 0.59           | 0.55            | 0.14 | 0.07           |
| 燃烧情况 | 助燃 | 不燃   | 不燃              | 不燃             | 自然, 不助燃         | 不燃   | 自然, 不助燃        |

氩的最大缺点是如与空气混和达一定比例就要爆炸, 因此在充气或放气时要采用 CO<sub>2</sub> 等缓冲气体。就是当充氩时先用 CO<sub>2</sub> 充入将空气排出再充入氩将 CO<sub>2</sub> 排出, 在放气时先用 CO<sub>2</sub> 充入将氩排出再讓空气进去, 虽然增加了一点麻煩但可保証安全可靠。最近内部冷却式的由于結構上的改进, 如气体冷却器的清扫就无须放出氩, 故在維護上亦就較方便, 但密封的結構还是比較复杂而須可靠。采用氩冷却的优点, 主要的有下列几点:

(a) 氩比重小, 气体阻耗小, 理論上为空气的 7%, 实际上因氩中含有 5% 空气, 故为空气的 10%, 且电刷磨耗亦减少, 氩冷的总損耗仅为空气的一半左右。例如苏联 5 万瓩的氩冷的总損耗为空气的 52%, 10 万的为 51%, 因此整个发电机效率可提高 0.7—1.2%。例如 10 万的提高 1%, 每年可节省煤 4320 吨, 如使用六年, 所省的电量及維持費用将近一台汽輪发电机的价錢, 而且氩冷却的气体阻力小, 风扇可直接装在軸上。

(b) 氩的导热性比空气大 7.4 倍, 从热体表面傳热到氩中比空气要大 30—35%, 因此气体冷却器可减小一半, 所用冷却水也可少 60% 的消耗。

(c) 如温升相同, 气体压力相同, 氩冷的容量可大 25% 以上, 如容量及气体压力相同, 則繞組温升可降低, 例如 5 万及 10 万瓩的定子繞組可降低 24—25°C°, 轉子繞組可降低 18°C°。

(d) 繞組在氫中可减少电量,即使有电量亦无臭氧产生,因此对絕緣、漆、及侵蝕层較安全,繞組寿命长,工作电压亦可提高。

最近用氫的内部直接冷却式将氫通入鉄心或导綫槽内直接与导綫等热体接触且发挥了以下一些优点:

(e) 容量更可提高,例如氫压达 4 大气压时較普通空气冷却的容量可大約 3 倍,主要的因风道截面可减少到 30—40%, 极限容量达 40—45%。

(f) 轉子长度可縮短一半,机組可横向安装,厂房面积可减少,并縮短了厂房跨距。

(g) 重量比一般氫冷式的还要輕 25%,轉子重量也可減輕 50% 以上,因此起重设备,亦可减小。

c. 液体 在 15 万瓩以上的汽輪发电机,虽轉子齿部外加冷却槽,或加大氫压和氫的流速,但仍不能提高容量时,除了氫冷外在繞組中通入油管用油的直接内部冷却或导綫内通入水或油,使容量还可提高。目前采用的为变压器油和蒸馏水,其他如氯代联苯(不燃性油),矽素有机油、磷酸酯、碳酸酯、聚乙稀醇等亦可用,用液体冷却的比氫冷的优点列举如下:

1. 槽内散热截面可减少 10—20%, 相应地可增大导綫截面而增大容量,因为油的散热能力要比空气大 21 倍,比两个大气压的氫大近 7 倍。用 6.6 大气压 300 公尺/秒流速的氫散热降温的效果相当于用 0.65 公尺/秒流速的油的一样,而且油泵所消耗的效率仅几瓩,而用氫风扇为几百瓩。以水冷的更佳但須解决絕緣及結構問題。

2. 极限容量因而提高,可达 50 万瓩伏安以上。

目前轉子的液体循环回路,在密封上还正在研究,并将有可能广泛采用在轉子繞組中。

## (2) 轉子导綫:

为了防止导綫收縮和膨脹,普通电解銅在 130—140°C 时会发生不允許高的热应力。为了保証在工作温度下长期运行时保持了弹性,因此采用了高硬度銅綫和高硬度鋁綫,这些导綫与普通銅綫性能較略如下:

| 名 称    | 比 重<br>(公斤/立方公分) | 导电率<br>(%) | 电阻温度<br>系数(C°) | 綫膨脹系数<br>(C°) | 极限强度<br>(公斤/方公厘) | 延伸率<br>(%) | 勃氏硬度  |
|--------|------------------|------------|----------------|---------------|------------------|------------|-------|
| 标准軟銅綫  | 8.89             | 100        | 0.00393        | 0.0000171     | 20—24            | 40—55      | 40—45 |
| 普通硬拉銅綫 | 8.9              | 97.2—96.2  | 0.00378        | —             | 32               | 16         | —     |
| 高硬度銅綫  | 8.9              | —          | —              | —             | 38               | 7.5        | 95    |
| 高硬度鋁綫  | 2.7              | 55—62      | 0.0036         | 0.000023      | 35               | 6.5        | 88    |

高硬度銅綫已采用的有含銀 0.06—0.1% 的硬拉銅綫; 还有含錫 0.9% 的极限强度可达 73 公斤/方公厘,含銀的可达 135 公斤/方公厘,但电率仅为銅的 83—90%,故一般均采用含銀的。最近为了減輕轉子重量和应力,提高汽輪发电机的极限容量,采用高硬度鋁綫,如阿利斯却茂及奇昇公司所采用的康特爾(Cond-Al)鋁綫是含有鎂 0.32%、硅 0.1%、鉄 0.43% 的鋁合金,略如苏联奧特來(Алпрей)鋁綫为含鎂 0.3—0.4%、硅 0.4—0.7%、鉄 0.2—0.3% 的鋁合金。现在这种鋁合金也不經热处理使硅化鎂分化而直接制成。轉子繞組的变形是由于离心力超过材料弹性极限或工作温度高出材料在压缩应力下的蠕变极限。目前已制成的高温高电导的銅或鋁的低合金中,如銅鋁合金可以得出在压缩应力 8.5