

小功率整流子电机的计算

〔苏联〕Н·П·叶尔莫林著

顾品山译

中国工业出版社

主 要 符 号

AS ——电枢的线负荷。

AW_g ——每对极的激磁安匝。

AW_q, AW_d, AW_k ——交轴，直轴和换向电枢反应的安匝。

AW_R ——总的电枢反应安匝。

$AW_\delta, AW_g, AW_d, AW_{nA}, AW_c$ ——气隙，电枢的齿及轭，极身和机座轭的安匝。

$aw_g, aw_d, aw_{nA}, aw_c$ ——同上，单位安匝。

$B_\delta, B_g, B_d, B_{nA}, B_c$ ——气隙，电枢齿及轭，极身和机座轭的磁感应。

B_r ——永久磁铁中的剩磁。

b ——实际极弧。

b_0 ——计算极弧。

b_n ——电枢槽宽。

b_{nA} ——极身宽。

b_k ——换向区宽。

b_{uq} ——换向器圆周方向的刷宽。

b_s ——换算到电枢圆周上的电刷离开中性线的位移。

C ——电机常数。

c ——电枢绕组常数。

D_a, D_k ——电枢和换向器的直径。

d_a, d_g ——电枢与激磁绕组导线的直径。

d_n, d_{nA} ——电枢槽与轴的直径。

E, E_H, E_B ——电枢的电势 (H ——低压, B ——高压)。

e_a ——短路元件内的电枢反应电势。

e_r ——元件内的平均自感电势。

e_p ——元件内总电势的平均值。

e_t ——元件內的变压器电势。

f ——电枢铁芯的交变磁化频率。

f_1 ——交流电网的频率。

f_0, f'_0 ——考虑到电枢槽內嵌線和激磁繞圈排列及繞制不整齐性的工艺系数。

f_n, f_{nu} ——裸導線与絕緣導線的电枢槽的填充系数。

$G_{ca}, G_{cs}, G_{ce}, G_{cn}$ ——电枢軛和齿, 机座和磁极的铁重。

H_c ——永久磁铁的矫頑力。

h_a, h_n, h_{na}, h_c ——电枢軛和槽, 极身和机座軛的高度。

h_{uq} ——电刷的高度。

I_a, I_g ——电枢和激磁电流。

i_a ——电枢电流对其額定值的相对值。

I_{am} ——启动电流对电枢額定电流的倍数。

j_a, j_g, j_{uq} ——电枢和激磁繞組導線及电刷的电流密度。

K ——換向片数。

k_1 ——卡氏系数。

L'_a ——电枢繞組的电感。

$L_o, L_g, L_\delta, L_{na}, L_c$ ——电枢軛和齿, 空气隙, 磁极和定子軛的磁路平均长度。

l_0, l_k, l_{na}, l_c ——电枢迭片, 換向器, 磁极和机座的軸向长度。

l_a ——电枢繞組導線的平均长度。

l_{cp} ——激磁繞組的平均匝长。

M ——电动机的有效轉矩。

M_{co} ——电动机鉄耗和机械損耗的阻力轉矩。

m_n ——最大启动轉矩对額定轉矩的倍数。

N ——电枢繞組的導線数。

n ——电机的轉速。

P ——电机的額定有效功率。

P_a —— 电机的計算功率。

$P_{\text{ад}}, P_{\text{мз}}, P_{\text{ук}}, P_c, P_{\text{мк}}$ —— 电枢和激磁繞組的銅耗, 电刷与換向器接触的电損耗, 电枢的铁耗与机械損耗。

p —— 电机的极对数。

q —— 电枢表面的单位热負荷。

q_a, q_c —— 电枢和激磁繞組裸導線的横截面。

$R_{\text{ук}}$ —— 电刷的平均接触电阻。

r_a, r_c —— 电枢和激磁繞組的电阻。

S_a —— 电枢槽的截面积。

$S_{\text{н.л}}, S_c$ —— 极身和机座的截面积。

$S_{\text{ук}}$ —— 电刷的截面积。

S_g —— 放置激磁繞組的窗孔面积。

S_1, S_2, S_3, S_4 —— 相应于激磁繞組的冷却表面。

S'_c, S''_c —— 机座內外的冷却表面。

S_a, S_{κ}, S_0 —— 电枢, 換向器和激磁繞組的冷却表面。

s_a —— 电枢每槽內的導線数。

s_1, s_2 —— 特征方程式的根。

T —— 电枢元件中电流的換向周期。

T_a, T_g, T_c —— 电枢, 基本激磁繞組和串激繞組迴路的时间常数。

$T_{\text{аг}}$ —— 电枢和激磁繞組串联迴路总的時間常数。

$T_{\text{м}}$ —— 电动机电枢的电气机械時間常数。

T_p, T_n —— 电枢发热和冷却的时间常数。

t_m —— 电动机启动电流到达极大值的时间。

t_1, t_2 —— 电枢齿頂和齿根齿距。

U, U_H, U_B —— 电机的額定端电压。

u —— 电动机瞬时端电压对其額定值的相对值。

$u_{\kappa}, u_{\text{II}}, u_B$ —— 电枢槽內每层元件的边数。

v_a, v_{κ} —— 电枢和換向器的圓周速度。

W_c —— 激磁繞組每极的匝数。

w_o —— 电枢繞組一个元件的匝数。

w_{ca}, w_{ca} ——电枢绕组铜和铁的比损耗。

y, y_1, y_2 ——电枢绕组元件的全节距，第一节距和第二节距。

y_n, y_k ——电枢绕组的槽距和换向片节距。

z ——电枢槽数。

z_1, z_{min} ——电枢齿的最大和最小的宽度。

α ——极弧系数。

α' ——在静止介质中电枢表面的散热系数。

α_a ——电枢旋转时其表面的散热系数。

α'_c, α'_s ——机座内外表面的散热系数。

α_k, α_j ——换向器和激磁线圈表面的散热系数。

$\alpha'_0, \beta'_0, \gamma'_0$ ——电枢电流，有效磁通和电枢角速度的初始相对值（对其额定值）。

β ——从铜到电枢槽壁总的绝缘厚度。

ΔU_{uc} ——电刷的接触电压降。

δ ——电机的单边气隙长度。

$\varepsilon, \varepsilon_a, \varepsilon_{uc}, \varepsilon_g$ ——在额定情况下电动机压降的相对值。

$\varepsilon_{mo}, \varepsilon_m$ ——在额定情况下电动机转矩的相对值。

η ——电机的效率。

ξ —— $\frac{l_0}{D_0}$ 的比值。

η', ξ', ζ' ——电枢电流，有效磁通和电枢角速度稳态后的相对值（对其额定值）。

λ ——电枢绕组元件漏磁的单位磁导。

λ' ——匝间和槽绝缘的导热系数。

s, ν ——特征方程式的根。

σ ——电机的漏磁系数。

Φ_a ——磁极的有效磁通。

φ ——有效磁通对其额定值的相对值。

ω ——电枢角速度对其额定值的相对值。

θ ——电枢的惯性转矩。

τ ——极距。

目 次

主要符号

緒論	1
----------	---

第一部份 小功率直流电机

第一章 对小功率电机提出的要求及其設計構成	4
-----------------------------	---

1. 电动机	4
2. 发电机	6
3. 設計任务书	8

第二章 电机的主要尺寸	9
-------------------	---

4. 电机的計算功率	9
5. 电机在負載时的电枢电流与电势	12
6. 电机常数	14
7. 电枢直径和計算长度	15
8. 电枢的圓周速度	16
9. 极距与計算的极弧	16
10. 电枢鋼片的交变磁化頻率	17

第三章 电枢繞組	17
----------------	----

11. 电机在負載时磁极的有效磁通	18
12. 电枢繞組的导綫数	18
13. 电枢的槽数	18
14. 換向片数	19
15. 电枢繞組元件的匝数	19
16. 电枢每槽导体数	20
17. 电枢繞組元件和換向器节距	20

18. 电枢的线负荷.....	21
第四章 齿、槽和电枢绕组导线的尺寸	21
19. 电枢绕组电流密度的初步选择.....	23
20. 电枢绕组导线的截面积与直径.....	31
21. 电枢绕组最终的导线电流密度.....	32
22. 电枢槽的截面积.....	32
23. 槽满率.....	33
24. 电枢槽与齿的尺寸.....	34
25. 电枢绕组导线的平均长度.....	36
26. 75°C热态时电枢绕组的电阻.....	37
27. 满负载时电枢绕组的电压降.....	37
第五章 换向器、刷握和电刷	37
28. 换向器直径的初始值	39
29. 换向片宽	39
30. 换向器的最终直径和其周速	40
31. 电刷的品种及其电流密度	40
32. 电刷的截面积及其尺寸	40
33. 电刷最终的电流密度	42
34. 换向器的长度	42
35. 换向的验算	42
第六章 电机的磁路	45
36. 极下的气隙长度	46
37. 电枢轭的高度	46
38. 磁极的尺寸	47
39. 机座的尺寸	48
40. 电机的磁路草图 (按比例)	48
41. 气隙安匝	49
42. 电枢齿安匝	49

43. 电枢轭的安匝.....	50
44. 极身的安匝.....	50
45. 机座轭的安匝.....	51
46. 可卸磁极与机座轭之间接縫处的气隙安匝.....	51
47. 电机的空载特性.....	51
48. 电枢的反应安匝.....	52
49. 负载时电机一对极总的激磁安匝.....	56
第七章 激磁繞组的計算	57
A. 串激电动机	57
50. 每极激磁繞组的匝数.....	57
51. 激磁繞组导线的截面和直径.....	58
52. 激磁繞组导线中的最终电流密度.....	58
53. 75°C热态时激磁繞组的电阻.....	58
54. 激磁繞组的电压降落.....	59
55. 负载时电枢电势值的驗算.....	59
56. 在磁极上放置激磁繞组所需窗孔的面积.....	59
57. 放置激磁繞组的窗孔的实际面积.....	60
B. 并激的电动机和发电机	60
58. 激磁繞组导线的截面和直径.....	60
59. 激磁繞组的电流密度.....	60
60. 每极激磁繞组的匝数.....	61
61. 激磁繞组在极身上的放置.....	61
62. 在75°C热态时激磁繞组的电阻.....	62
第八章 电机的損耗与效率	62
63. 电枢与激磁繞组的銅損耗.....	62
64. 电刷与换向器接触的电損耗.....	63
65. 电枢铁心的磁滞和涡流損耗.....	63
66. 电机的机械損耗.....	64

67. 滿負載時电机的总損耗	66
68. 电机額定負載時的效率	66
69. 电动机的工作特性	68
70. 电动机最大启动轉矩的倍数	70
71. 电动机的电气机械時間常数	73
72. 并激发电机的外特性	73
第九章 小功率直流电动机的无阻启动及其反轉过程的計算	74
A. 激磁繞組事先与电网相接的他激及并激电动机的无阻启动及反轉的計算	76
73. 电枢繞組的电感	76
74. 电枢稳定的角速度	77
75. 电动机的鉄耗和机械損耗的阻力轉矩	77
76. 电动机軸上的有效負載轉矩	77
77. 电枢的飞輪轉矩	77
78. 电枢繞組常数	77
79. 額定情况下电枢压降的相对值	78
80. 額定情况下軸上阻力轉矩的相对值	78
81. 額定情况下电动机的時間常数	78
82. 电动机电枢电流及角速度的初始值	78
83. 計算公式的系数	79
84. 电动机电流及角速度的穩定值	79
85. 电动机启动及反轉时电流及角速度的方程式	80
86. 方程式(16a)及(16b)的系数	80
87. 到达启动电流最大值的時間及其数值	81
B. 电枢繞組及激磁繞組同时接入电网的并激及复激电动机的无阻启动及反轉的計算	82
88. 基本方程式	82

89. 电动机启动及反轉时电流、有效磁通及角速度的計算.....	82
B. 串激电动机的无阻启动及反轉的計算.....	84
90. 基本方程式.....	84
91. 电动机在启动及反轉时电流及角速度的計算.....	85
第十章 小功率直流电动机的系列計算及其容量等級	87
92. 連續工作状态电动机的容量等級.....	90
93. 短期工作状态电动机的容量等級.....	91
94. 系列的电枢槽数及槽形的选择.....	92

第二部份 直流小功率变流机

第十一章 变流机的主要尺寸.....	96
95. 变流机的計算功率.....	96
96. 負載时电枢的电流及电势.....	96
97. 电机常数.....	97
98. 电枢的直径及計算长度.....	97
99. 电枢周速.....	98
100. 极距及計算极弧.....	89
101. 电枢鉄心的交变磁化頻率.....	98
102. 电枢繞組.....	98
103. 电枢的齿、槽及繞組导綫的尺寸.....	99
104. 換向器、刷握及电刷.....	99
第十二章 变流机的磁路	99
105. 变流机磁路的計算.....	99
106. 激磁繞組的計算	101
107. 变流机的損耗及效率	101

第三部份 小功率通用整流子电动机

第十三章 电动机的主要尺寸	104
---------------------	-----

108. 电动机的计算功率	105
109. 负载时的电枢电流和电势	105
110. 电机常数	107
111. 电枢的直径和计算长度	107
112. 电枢周速	108
113. 极距和计算极弧	108
114. 电枢钢片的交变磁化频率	108
第十四章 通用整流子电动机的电枢	109
115. 电枢绕组	109
116. 齿、槽和电枢绕组导线的尺寸	110
117. 换向器、刷握和电刷	110
第十五章 通用整流子电动机的磁路	111
第十六章 通用整流子电动机的激磁绕组	112
A. 交流激磁绕组的计算	112
118. 每极的匝数	112
119. 激磁绕组导线的截面和直径	112
120. 激磁绕组的最終电流密度	113
121. 激磁绕组在75°C热状态下的电阻	113
122. 激磁绕组的有效电压降	113
123. 极上放置激磁绕组所需的窗孔面积	113
124. 考虑到直流附加绕组所占的地位时窗孔的实际面积	114
125. 极下气隙值的驗算	114
126. 在交流电网下工作时电动机的电阻压降	115
127. 电动机的漏磁电抗压降	115
128. 由于电枢反应交轴磁通的脉振在电枢绕组中所产生的 自感电势	116
129. 由于磁极主磁通的脉振在激磁绕组中产生的自感电势	116
130. 由变压器电势引起的电流在电枢绕组换向元件内产生	

的銅耗	117
131. 电动机机座、磁极、电枢轭和齿的铁重	117
132. 电动机机座、磁极和电枢中的磁滞及涡流损耗	118
133. 激磁电流与磁通之间的夹角	119
134. 电动机的功率因数	119
B. 附加的直流激磁绕组	120
135. 电动机在直流电网下工作时电枢的电流和电势	120
136. 电动机在直流电网下工作时磁极的有效磁通	120
137. 每对极总的直流激磁安匝	121
138. 每极附加激磁绕组的匝数	121
139. 附加激磁绕组导线的截面和直径	121
140. 附加激磁绕组的最終电流密度	122
141. 在75°C热状态下附加激磁绕组的电阻	122
142. 电动机在直流电网下工作时在两个激磁绕组上的电压降	122
143. 电动机在直流电网下工作时电枢电势值的驗算	122
144. 放置附加激磁绕组所需的窗孔面积	123
第十七章 通用整流子电动机的損耗和效率	123

第四部份 直流永磁小功率电机

第十八章 永磁电机的計算	125
145. 永久磁铁的特性	125
146. 永磁式小功率电机磁路的结构	129
147. 永磁电机的电枢反应	130
148. 永磁直流小功率电机的計算步骤	131
149. 电机磁极永久磁铁长度的确定	132

第五部份 小功率电机的热計算

第十九章 热計算的基础	135
-------------------	-----

150. 概述	135
151. 电枢的温升	133
152. 换向器的温升	137
153. 激磁绕组的温升	138
第二十章 小功率电机的简化热计算	142
154. 电枢的温升	142
155. 换向器的温升	142
156. 激磁绕组的温升	143

附 录

1. 小功率电动机的计算例题	144
2. 直流小功率单枢变流机的计算例题	172
3. 绕组用圆铜线的尺寸ГОСТ 2773-51及6324-52 及ВТУ МЭП 647-49	195
4. 直流电动机40瓦, 27伏, 6000转/分	197
5. 无线电发电机100/200瓦, 15/750伏, 2200转/分	198
6. 通用整流子电动机50瓦, 120/110伏, 3000转/分	198
参考文献	199

緒 論

电机設計包括电机的計算和結構設計。电机的計算在数学上通常是一个多解的不定課題，因为待定的未知数多于其方程数。因此，在电机的計算过程中，必須依据制成电机的經驗預先給出若干电磁和結構量的已定的初始值。由于这个緣故，在設計新的电机时往往作出其若干計算的方案，从中选取最合适的。

只有在中大型的电机設計中，計算的結果才与試驗值有足够的吻合。在此情况下，計算的数据可能与已制成电机的相应試驗值平均相差 $\pm 10\%$ （空載特性、損耗、激磁电流和交流电动机的空載电流等等）。电机計算与試驗数据之間的差異，主要是由于采用的磁性材料和在制造过程中不可避免的工艺偏差而引起的。

至于从零点几瓦到几百瓦的小功率电机的計算，那就更加不精确了，因为在这种电机里不能加以全部精确計算的附帶現象（压降，各部分的損耗等等）都相对地增多了。小型电动机的損耗为輸入功率的 $40\sim 95\%$ ，就足以表明这一情况。

此外，与生产大、中容量电机不同，当制造小功率电机时在更大程度上体现出工艺过程的偏差。因此为了减小这些偏差，在生产上述电机时，对零件的加工和装配采用高精度等級的方法。

虽然也有某些特殊装置采用小功率的发电机和变流机，

但是实际上小功率电机主要是用作电动机的。

例如，在許多工业部門和特殊用途的裝置中，由于控制工作过程及机械的自动化，功率从几瓦到几百瓦的各种不同的小功率电机获得了广泛的应用。其中直流的小功率电动机更具有重大的意义。

能在交直流电网上工作的小功率通用整流子电动机，实际上也得到各种不同的应用。例如，它們广泛地用于电报机，自动裝置及遙控裝置，钟表工业等等。通用整流子电动机在日常的家庭生活中的应用也很广泛，例如：用在电风扇，縫紉机，吸尘器等。

然而，上述小功率电动机除了广泛地用于实际目的之外，在許多技术設備中，也采用功率为数十瓦至数百瓦的直流小功率发电机和变流机。属于这类設備的有：例如，有綫通訊及无綫电等等的某些裝置。

本书的目的是介紹功率范围从数瓦到数百瓦的直流小功率电动机及发电机，通用整流子电动机及直流单枢变流机的系統的計算方法。为了便于計算这些电机起見，其每一計算阶段分成一个跟着一个合理順次編排的小节。

书中研討了对被設計小功率电机型式提出的主要要求，对其結構特点作了簡要的敘述，介紹了計算公式、必要的曲綫和有相应說明的图表，最后还列有电动机及单枢变流机的計算示例。

为了有可能来計算小功率电机，电机設計者應該具有給定的任务书或技术要求作为計算用的原始数据。

被設計的小功率发电机，电动机或单枢变流机的計算书，除計算数据外还应包括：

1. 按比例の有繞組与絕緣的电枢槽截面的草图；
2. 电枢繞組的展开图；
3. 按比例的电機磁路的草图；
4. 电机的工作特性。

完成了滿足要求的結構圖紙之后，这类电机的設計工作便算結束。

第一部份

小功率直流电机

第一章 对小功率电机提出的 要求及其设计构成

1. 电动机

功率从数瓦到数百瓦的小功率直流电动机广泛地用作各种自动装置中的机械传动。对这些电动机，根据它们的运行条件提出了工作状态、起动和工作特性方面的各种各样的要求。

在许多情况下，这些电动机是在短期或是工作周期为1~5分钟的重复短期以及突然反转的状态下工作的。此外，它们往往应该具有较大的启动转矩和尽可能小的电气机械时间常数。

在其他情况下，例如：在陀螺装置中，风扇，警笛，电钻的传动中，需要在恒定的转速下长期工作的小功率直流电动机。

对这些电动机既提出一般的，也提出专门的技术要求。后者是按该类电动机专门用途所提出的订货特殊技术条件来确定的。

对小功率直流电动机最主要的一般要求是：

- a) 在一切运行条件下，工作完全可靠；