

工业企业 无功负荷的合理补偿

〔苏联〕Л·В·利特瓦克著

韓承鈞譯

84

中国工业出版社

工业企业 无功負荷的合理补偿

〔苏联〕Л·В·利特瓦克著

韓承鈞譯

中国工业出版社

本书阐述工业企业提高功率因数的問題。着重介绍工业企业电力装置的无功负荷补偿技术及其技术经济指标。

这本书是作者原著“工业企业功率因数提高問題”一书的修訂第三版。新版本是根据苏联现行提高功率因数的新导則重新改写的，对导則中的新規定作了解释，并用具体例子說明各种提高功率因数方法的应用。

本书可供工业企业和电力系统中的供电設計人員、供用电运行人員和高等院校的电力专业学生参考。

Л. В. Литвак

**РАЦИОНАЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ
НАГРУЗОК НА ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Издание третье

Переработанное и дополненное
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ—1963

* * *

工业企业无功負荷的合理补偿

韓 露 鈞 譯

水利电力部办公厅图书編輯部編輯 (北京阜外月坛南首房)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路四10号)

北京市書刊出版业营业許可証出字第116号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $3^{3/8}$ · 字数177,000

1965年3月北京第一版 · 1965年3月北京第一次印刷

印数0001—7,170 · 定价(科六)1.10元

*

統一书号: 15165 · 3744(水电-495)

目 录

引 言	1
第一章 工业企业的最佳功率因数	3
1. 功率因数最佳值的确定	3
2. 功率因数的标准值	12
第二章 工业企业是无功功率的用户	19
3. 无功功率与各种因素的关系	19
4. 无功功率的经济当量	23
5. 无功功率的主要耗用设备	26
6. 工业企业的无功负荷	44
第三章 用改进设备工况的方法降低无功负荷	49
7. 正确选择工作机械传动装置用的感应电动机的 额定容量	49
8. 将负荷轻的感应电动机的结线由三角形改为星形	67
9. 在感应电动机的操作结线中采用空载限制器	77
10. 感应电动机的检修质量对功率因数的影响	86
第四章 同期电动机——解决合理提高功率因数问题的 关键	96
11. 同期电动机与感应电动机的比较	96
12. 同期电动机直接起动	103
13. 同期电动机的补偿能力	121
14. 电压对同期电动机补偿能力的影响 强行励磁	123
15. 同期电动机的最佳功率因数	132
16. 无电机励磁式的同期电动机	150
17. 同期调相机	160
第五章 静电电容器	163

IV

18. 靜电电容器的特性	163
19. 低压电容器最佳容量的計算	171
20. 靜电电容器的使用期限	174
21. 关于电容器的額定电压問題	180
22. 靜电电容器及关于負荷樞紐的穩定性問題	181
23. 电容器在主干线路和分支线路中的分配	184
24. 电容器装置的自动控制	204
第六章 补偿式水銀整流机組	210
25. 基輔工学院制定的結线图	210
26. 基輔工学院所制結线图的运行經驗	217
27. 基輔工学院所制結线方式作为补偿裝置的經濟性	219
第七章 纵联电容补偿	221
28. 线路中的电压損失和纵联补偿	221
29. 线路中的电压損失和横联补偿	225
30. 纵联补偿的經濟性	229
31. 纵联补偿的可靠性	232
第八章 感应电动机的同期化	234
32. 同期化感应电动机的过負荷能力	234
33. 同期化感应电动机的有功功率損耗率	236
附录	242
1. 感应电动机在无負荷时的无功功率正常值的計算数据	242
2. 各种型式的感应电动机的空气間隙的設計数值	248
3. 統一系列的CДН型同期电动机的技术数据	252
4. CДН型新系列同期电动机用于补偿的平均有功功率 損耗率(瓦/千乏)	258
参考文献	262

引 言

感应电动机（在工业企业无功負荷的整个平衡中占一半以上）的运行經驗和試驗結果証明，改进这些电动机的运行方式和提高功率因数，有很大的可能性。

近些年来，通过接在交流网络的水銀整流变电所来使用直流电流的电力用戶（鋁厂、化工厂、铁路运输及其他等）所占比重大大地增加了。

这类变电所的无功負荷的补偿措施，可以采取装設靜电容器的办法，并按基輔工学院制定的結綫方式来結綫。基輔工学院制定的結綫方式經受了充分的实际考驗，其运行結果良好（1962年授予了列宁奖金）。

为了有效地解决提高功率因数問題，使功率因数达到新导則（参考文献2）所規定的标准，除了进行与进一步提高运行技能有关的經常工作以外，必須从根本上改变措施，即在国民經济中大量使用同期电动机和保証更广泛地采用电容器。

在这方面，技术政策的基本方針应当是，在每一具体情况下决定选择补偿方法时，要使每千乏-小时的計算費用少到最低限度。

計算費用可按苏联国家科学技术委员会規定的方法来計算（参考文献3）。有了这项計算方法的規定之后，对于先前（1955年）頒布的功率因数提高导則的修訂工作起了促进作用，因为新規定的方法与該項导則之間有許多很不一致的内容，例如：

全苏联统一的电損价值規定为1.2戈比/度（戈比——卢布的百分之一。——譯注）。

由于未考虑补偿装置基建投資的折旧提成，因而在补偿装置实际年度費用中有許多很不真实之处；

补偿装置的功率不是根据技术經濟計算，而是根据所有工业企业的功率因数加权平均值等于0.92~0.95来确定的，不論供电結綫方式的同異。

編写本书的目的，是根据新导則的内容來說明与工业企业无功負荷补偿有关的各項技术經濟問題。

著者向編校本书时作了很大努力和有益工作的И.Б. 格列泽尔工程师表示真誠的謝意。

第一章 工业企业的最佳功率因数

1. 功率因数最佳值的确定

最佳的或称最有利的功率因数可根据以下两个条件来确定：

1. 由于减少了电力网的无功负荷所引起的电能损失而获得年度的最大的节约。

2. 由于进行无功负荷补偿而得到利用电力网（线路及变压器）中所增加的送电能力。

各项计算表明，当结线方式中有两级或更多级变压时，不论上述原始条件《1》和《2》如何，功率因数的最佳值几乎相等，并且实际上接近于1。

如果企业的供电方式是直接由发电厂母线用发电机电压来供电（以下简称“发电厂直配线供电”——译注），则当按条件《1》进行计算时，最佳功率因数决定于输电线路的长度，其变化范围很大——由接近于1到无功负荷人为补偿（利用补偿装置）的经济性不存在时的数值；当按条件《2》进行计算时，在这种供电方式的情况下（即无中间变压时），最佳功率因数也接近于1。

鉴于不是任何时候均能保持条件《2》（因为一方面不是任何时候都可使电力网的负荷达到功率损耗在补偿前后均保持不变的程度，而另一方面，当电力网的送电能力不足时，也不是任何时均可局限于装设补偿装置），以后在确定合理补偿范围时，将仅以条件《1》作为原始条件。

在最佳功率因数的确定方法中，在原则上适用于任何供

电結綫方式的前提下，可利用关于綫路的等效长度的概念作为基础；在等效长度的綫路中，无功負荷所引起的有功功率損耗等于实际供电电力网中的有功損耗。

最佳功率因数决定于工业企业的供电結綫方式和供电綫路的参数（电压、綫路长度、电阻率）。

可由最简单的情況——工业企业由发电厂直配綫供电（图1）来着手分析。

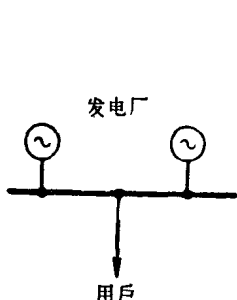


图1 发电厂对用户最简单的供电方式

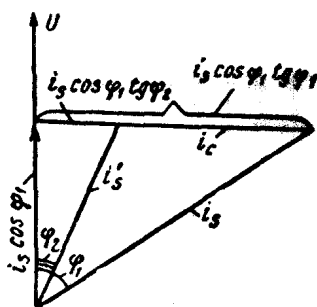


图2 计算最佳功率因数的矢量图

当进行无功負荷补偿时，有功損耗的减少額如下（图2）：

$$\Delta P = 3 i_s^2 \xi^2 l \rho s - 3 i_c'^2 \xi^2 l \rho s = 3 i_s^2 \xi^2 \cos^2 \varphi_1 (\operatorname{tg}^2 \varphi_1 - \operatorname{tg}^2 \varphi_2) l \rho s, \quad (1)$$

式中 i_s ——綫路的平均电流密度，安/毫米²；

i_c' ——以电流 i_c 补偿后的平均电流密度；

$\xi \approx 1.05$ ——綫路电流密度均方根值与平均电流密度的比率；

l ——綫路长度，公里；

ρ ——綫路导綫的电阻率；

s ——綫路導綫截面；

φ_1 和 φ_2 ——补偿前和补偿后的相角。

由于进行补偿，年度费用相应地降低，其降低額的計算公式如下：

$$\Delta B_1 = \Delta P T_s B_{y.s} = 3i_s^2 \xi^2 \cos^2 \varphi_1 (\operatorname{tg}^2 \varphi_1 - \operatorname{tg}^2 \varphi_2) l \rho s T_s B_{y.s}, \quad (2)$$

式中 T_s ——补偿裝置的年工作小时数，小时/年；

$B_{y.s}$ ——每度有功电量的费用率（计划值或按現行费率），卢布/度。

由于进行补偿而額外增加的附加費用为：

$$\Delta B_2 = \sqrt{3} U i_s s \cos \varphi_1 (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) T_s B_{y.k}, \quad (3)$$

式中 U ——綫路电压，千伏；

$B_{y.k}$ ——每度无功电量的計算費用率，卢布/千乏-小时。

这样看来，当功率因数为 $\cos \varphi_2$ 时，年节约額为：

$$\begin{aligned} \Delta B = \Delta B_1 - \Delta B_2 = & 3i_s^2 \xi^2 \cos^2 \varphi_1 (\operatorname{tg}^2 \varphi_1 - \operatorname{tg}^2 \varphi_2) l \rho s T_s B_{y.s} - \sqrt{3} U i_s s \cos \varphi_1 \\ & \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) T_s B_{y.k}. \end{aligned} \quad (4)$$

若使导数 $\frac{d(\Delta B)}{d(\operatorname{tg} \varphi_2)}$ 等于零，則可得出最佳 $\operatorname{tg} \varphi$ 的簡單

計算公式：

$$\operatorname{tg} \varphi_{2.s} = \frac{\left(\frac{B_{y.k}}{B_{y.s}} \right) \left(\frac{U}{l} \right)}{3.46 i_s^2 \xi^2 \cos \varphi_1 \rho}. \quad (5)$$

求出 $\operatorname{tg} \varphi_{2.s}$ 后，可用以下公式求得相应的最佳 $\cos \varphi_{2.s}$ ：

$$\cos \varphi_{2.s} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2.s}}}.$$

例题：設某一 6 千伏线路向工业企业供电，其原始計算数据如下：

$$l=3\text{公里}; \cos \varphi_1=0.80; \rho=\frac{1}{32}\text{欧-毫米}^2/\text{米(铝线)};$$

$$i_s \bullet = 0.85\text{安/毫米}^2; \beta_{y,s}=0.012\text{卢布/度};$$

$$\beta_{y,k}=0.0002\text{卢布/千乏-小时(使用 6 千伏的静电电容器, 其 } T_s=6000\text{小时/年)}.$$

根据公式 (5) 可求出：

$$\operatorname{tg} \varphi_{2g} = \frac{\left(\frac{0.0002}{0.012} \right) \left(\frac{6}{3} \right) \times 32}{3.46 \times 0.85 \times 1.1 \times 0.8 \times 1} = 0.41.$$

$$\text{所以, } \cos \varphi_{2g} = \frac{1}{\sqrt{1+0.41^2}} \approx 0.92.$$

如果除线路长度 l 以外,使所有原始数据均保持不变时,則 $\cos \varphi_{2g} = f(l)$ 中的有关数值如下:

$l(\text{公里})$	$\cos \varphi_{2g}$
3.0	0.92
4.0	0.95
5.0	0.97
6.0	0.98

再看看比較复杂的情况,也就是經過变压供电(图 3)的情况。

若使 m 段具有与 n 段相同的参数,則应符合有功损耗不变的条件 (6) :

$$3i_{s,n}^2 \xi^2 l_m \rho_m s_m = 3i_{s,n}^2 \xi^2 l_n \rho_n s_n. \quad (6)$$

根据这一条件可以得出:

$$l_{sm} = \left(\frac{i_{sm}}{i_{sn}} \right)^2 \left(\frac{\rho_m}{\rho_n} \right) \left(\frac{s_m}{s_n} \right) l_n. \quad (7)$$

(原文中遺漏 l_m ——譯注)

● 在最大負荷时的若干小时內, 經濟电流密度为 1.1安/毫米^2 。

可用 $\left(\frac{U_m}{U_n}\right)$ 代替公式 (7) 中的 $\left(\frac{s_m}{s_n}\right)$ 。根据简化的变压器等效图 (图 4) 可得出下列关系式 (参考文献 36) :

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_m &= -\dot{U}'_n \left(1 + \frac{z_k}{z'_i}\right) \\ \dot{I}_m &= -\dot{I}'_n + \dot{I}_0 \end{aligned} \right\} \quad (A)$$

及



图 3 经过变压器
对用户供电

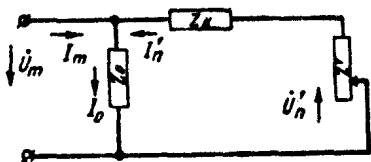


图 4 变压器等效结线图

为了简化计算,可省略励磁电流 I_0 和 $\frac{z_k}{z'_i}$, 因为影响比较小 (同时也可以在某程度上保证不至于过补偿, 因为将使等效长度 l_{sm} 减小, 虽然减小得不多), 这样, 根据 (A) 式可得:

$$U_m I_m = U_m \dot{i}_{sm} s_m \approx U'_n I'_n = U_n I_n = U_n \dot{i}_{sn} s_n, \quad (8)$$

由此可得出:

$$\left(\frac{s_m}{s_n}\right) \approx \left(\frac{\dot{i}_{sn}}{\dot{i}_{sm}}\right) \left(\frac{U_n}{U_m}\right). \quad (9)$$

将公式 (9) 代入公式 (7) 后, 可得出所需公式 (10), 利用这一公式不难将任何供电方式的结线图 (例如有两级或三级变压) 变换为图 1 所示的最简单的供电方式结

綫图:

$$l_{sm} \approx \left(\frac{i_{sm}}{i_{sn}} \right) \left(\frac{U_n}{U_m} \right) \left(\frac{\rho_m}{\rho_n} \right) l_m. \quad (10)$$

例題: 图 5 是有兩級变压的供电方式結线图。

这一結线图中的計算数据如下:

$U_{FEH}=6.0$ 千伏 (发电机电压); $U_1=110$ 千伏; $U_2=6$ 千伏;

$l_1=60$ 公里; $l_2=3$ 公里; $\cos\varphi_1=0.8$; $\rho_1=\rho_2=\frac{1}{32}$ 欧-毫米²/米;

$i_{s1}=0.77$ 安/毫米² (在最大負荷时的若干小时内, 經濟电流密度为 1.0 安/毫米²);

$i_{s2}=0.85$ 安/毫米²; $S_{HT1}=S_{HT2}=20000$ 千伏安;

$\rho_{T1}=\rho_{T2}=\frac{1}{57}$ 欧-毫米²/米; $i_{ST1}=i_{ST2}=3$ 安/毫米²;

$I_{HT1}=I_{HT2}=1930$ 安。

变压器綫卷中的額定功率損耗等于:

$\Delta P_{T1}=\Delta P_{T2}=163$ 瓩。

变压器的計算长度:

$$l_{T1}=l_{T2}=0.545 \text{ 公里 } \left(l_T = \frac{\Delta P_T \times 10^3}{3 I_{HT} i_{ST} \rho_T} \text{ 米} \right);$$

$\beta_{y.s}=0.012$ 卢布/度; $\beta_{y.k}=0.0002$ 卢布/千乏-小时 (靜电电容器, 电压为 $6 \sim 10$ 千伏, $T_B=6000$ 小时/年)

将图 5 变换为图 6。

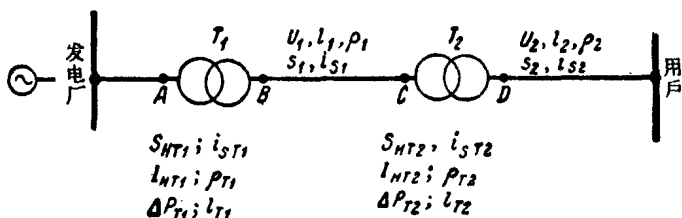


图 5 有兩級变压的供电結线图

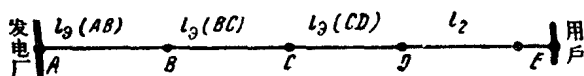


图 6 归算为线路等效长度的供电结线图

用公式 (10) 求出图 6 中每段线路的长度:

$$l_g(AB) = \left(\frac{3}{0.85} \right) \left(\frac{6}{6} \right) \left(\frac{32}{57} \right) \times 0.545 = 1.08 \text{ 公里};$$

$$l_g(BC) = \left(\frac{0.77}{0.85} \right) \left(\frac{6}{110} \right) \left(\frac{32}{32} \right) \times 60 = 2.94 \text{ 公里};$$

$$l_g(CD) = \left(\frac{3}{0.85} \right) \left(\frac{6}{6} \right) \left(\frac{32}{57} \right) \times 0.545 = 1.08 \text{ 公里};$$

$$l_g(DE) = 3 \text{ 公里};$$

$$l_g(AE) = 1.08 + 2.94 + 1.08 + 3 = 8.1 \text{ 公里}.$$

将等效长度 $l_g(AE)$ 值代入公式 (5) 可得出:

$$\lg \varphi_{2g} = \frac{\left(\frac{0.0002}{0.012} \right) \left(\frac{6}{8.1} \right) \times 32}{3.46 \times 0.85 \times 1.1 \times 0.8 \times 1} \approx 0.153,$$

即相当于 $\cos \varphi_{2g} \approx 0.99$.

用公式 (10) 进行的一些计算表明, 当 $U_n = 6$ 千伏时, 平均与每一级变压相应的线路等效长度大约为 3.5~4 公里。举例来说, 如果供电结线图中有三级变压: 6/110、110/35 和 35/6 千伏, 则等效长度接近于 10.5~12 公里。

如果 $U_n = 10$ 千伏, 则通过类同计算可看出与每一级变压相应的线路等效长度平均为 5~6 公里。

在表 1 中根据平均的条件, 针对不同的供电方式以及每瓩-小时和每千乏小时的费用率, 列出了最佳功率因数。

然而, 由于计算中用于平均条件的一些参数照例不是绝对准确的, 难免或多或少地产生误差, 因此, 在实际计算中适于求出这一误差的相对值对所寻求的最佳功率因数的修正关

系，以便在計算中予以考虑，避免在設置补偿装置时浪费多余的投資。为此可以运用 И. Б. 格伊列尔教授的建議（参考文献10）。如果需要研究函数 $3 = f(\cos \varphi_{2s})$ 的最小值（这一函数表示无功負荷的有功損耗所引起的总計算費用与 $\cos \varphi_{2s}$ 的关系，同时也是一个連續函数和具有一切导数的函数），則在寻求其最小值时，可将其展成台劳級数，并从下列公式中求出所需的修正值，而且計算的准确性是容許的，

$$\Delta |\cos \varphi_{2s}| = \sqrt{\frac{2\delta 3}{\frac{d^2 3}{d(\cos \varphi_{2s})^2}}}, \quad (11)$$

式中 δ —— 确定 3 值时的誤差相对值；

$\frac{d^2 3}{d(\cos \varphi_{2s})^2}$ —— 函数 3 的二次导数；

$\Delta |\cos \varphi_{2s}|$ —— 与誤差 δ 相应的 $\cos \varphi_{2s}$ 值的負的增量（修正值）。

如果针对无功負荷的有功損耗进行补偿，并使功率因数达到 $\cos \varphi_{2s}$ ，則这项有功損耗的总費用可根据下列公式(12)来求得，

$$3 = \frac{A}{\cos^2 \varphi_{2s}} + B \left(\operatorname{tg} \varphi_1 - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2s}}}{\cos \varphi_{2s}} \right), \quad (12)$$

式中 $A = 3 i_a^2 \xi^2 l_s \rho_s T_s 3_{v.s}$ 卢布/年；

$B = \sqrt{3} U i_a s T_s 3_{v.k}$ 卢布/年；

i_a —— 綫路的平均有功电流密度，安/毫米²；

l_s —— 綫路的等效长度，公里；

U —— 綫路的电压，千伏；

$\cos \varphi_{2s}$ —— 工业企业的最佳功率因数。

表 1

費 用 率 (戈比/度) (計劃值或 按現行价率)	供 电 方 式				6~10千伏电容器 的年工作小时数
	由发电厂直配綫供 电, 电压为 U (千 伏), 綫路单位长 度为公里	由110 ~ 220 千伏 地区电力 网供电	由 110~ 220 千伏 地区电力 网通过35 千伏綫路 供电 (三級 变压)		
	0.75 U 及以下	U	(兩級 变压)		
0.8	0.92	0.95	0.96	0.98	6000小时/年
1.0	0.95	0.97	0.97	0.99	$3_{y.k}=0.0002$
1.2	0.96	0.98	0.98	0.99	卢布/千乏-小时
1.4及以上	0.97	0.98	0.99	0.99	
0.8	0.85	0.91	0.93	0.97	4000小时/年
1.0	0.9	0.94	0.95	0.98	$3_{y.k}=0.0003$
1.2	0.93	0.96	0.96	0.98	卢布/千乏-小时
1.4及以上	0.94	0.97	0.97	0.99	

函数 3 的二次导数可用下列等式来表示:

$$\frac{d^2 3}{d(\cos \varphi_{2g})^2} = \frac{6A}{\cos^4 \varphi_{2g}} - \frac{2B}{\cos^3 \varphi_{2g} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2g}}} + \frac{B}{\cos \varphi_{2g} \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_{2g})^3}}.$$

以下用具体的例题来说明最佳功率因数修正值的計算。

例题: 对用户的供电方式是通过两級变压: 6/110和110/6千伏。

6 千伏线路的等效长度 l , 假定为 7 公里;

$\cos \varphi_{2g} = 0.97$ (見表 1); $i_a = 0.85$ 安/毫米²; $\xi = 1.05$;

$\rho = \frac{1}{32}$ 欧-毫米²/米; $s = 120$ 毫米²; $T_g = 6000$ 小时/年;

$3_{y.g} = 0.01$ 卢布/度; $3_{y.k} = 0.0002$ 卢布/千乏-小时;

$\operatorname{tg} \varphi_1 = 0.75$;

$$A = 3 \times 0.85^2 \times 1.1 \times 7 \times \frac{1}{32} \times 120 \times 6000 \times 0.01$$

=3740 卢布/年;

$$B = \sqrt{3} \times 6 \times 0.85 \times 120 \times 6000 \times 0.0002 = 1280 \text{ 卢布/年};$$

$$\beta = \frac{3740}{0.97^2} + 1280(0.75 - 0.25) = 4620 \text{ 卢布/年};$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2\beta}{d(\cos\varphi_{2g})^2} &= \frac{6 \times 3740}{0.97^4} - \frac{2 \times 1280}{0.97^3 \sqrt{1 - 0.97^2}} \\ &+ \frac{1280}{0.97 \sqrt{(1 - 0.97^2)^3}} = 25300 - 11700 \\ &+ 90000 = 103600. \end{aligned}$$

如果认为甚至在最好的情况下相对误差 δ 也应当不小于 0.02, 则可求出,

$$\Delta |\cos\varphi_{2g}| = \sqrt{2 \times 0.02} \sqrt{\frac{4620}{103600}} \approx 0.042.$$

因此, 带这种修正值的最佳功率因数将等于 $0.97 - 0.042 \approx 0.928$.

如果认为相对误差 $\delta = 0.05$, 则修正值为,

$$\Delta |\cos\varphi_{2g}| = \sqrt{2 \times 0.05} \sqrt{\frac{4620}{103600}} \approx 0.066.$$

而带这种修正值的最佳功率因数将等于 $0.97 - 0.066 = 0.904$.

2. 功率因数的标准值

鉴于功率因数的原始计算数据中有不可避免的误差, 同时电能成本和用户负荷又在随时变化, 在新的功率因数提高导则(参考文献 2)中不再有规定各类企业的功率因数最佳值(表 1 中的数值), 而以所谓功率因数的标准值来代替, 这种标准值根据向用户供电的接线方式之不同, 规定如下: