



晶体管典型偏置电路的剖析

——谈谈工作点稳定的问题

北京师范大学物理系无线电教研室

晶体管的基本用途是制作放大器。晶体管放大器的基本单元电路是晶体管电路的基础。讨论晶体管放大器电路一般又从工作点的偏置和稳定问题开始，这是因为不解决工作点问题就不能真正作成放大器。

工作点问题有两点主要内容：一，晶体管放大器必须正确设置静态工作点；二，必须设法保持工作点的稳定。

所谓正确设置静态工作点，即通常所说将工作点 Q 选在输出特性曲线的线性工作区中央位置，其目的是创造条件，克服晶体管的非线性和放大讯号不失真的要求之间的矛盾。正确设置工作点的最简单最基本的电路是固定偏置电路（见图1）。这些大家都很熟悉，这里不再介绍。

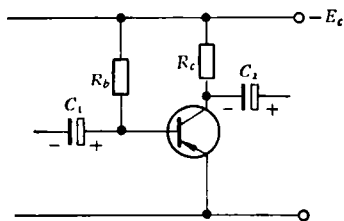


图1 固定偏置电路

作为晶体管电路的入门知识，本文着重谈谈工作点的稳定问题。为此，我们以“分压式电流负反馈偏置电路”作为典型（以下简称为“典型电路”）进行一些剖析。

“典型电路”即图2所示电路，它是共射极放大电路，具有较大的增益。但其最大优点是工作点稳定，所以有人称之为“稳定的偏置电路”。这一优点使它成为目前应用最广的晶体管偏置电路，例如半导体收音机里的前置低放电路就普遍采用这种型式（其余各级电路也是

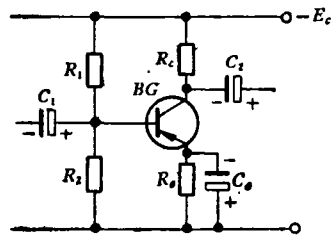


图2 典型电路

是在它的基础上稍加变化而成）。电路图中， R_1 和 R_2 分别是基极上、下偏置电阻，它们串联起来跨接在直流电源 E_c 两端，组成一个分压器，用来决定晶体管基极

电位和基极电流。 R_c 是发射极反馈电阻，它既串联在输入回路中，又串联在输出回路中。当输出电流 I_c 流过 R_c 时，在 R_c 上产生一个反馈电压 $U_o = I_c R_c \approx I_e R_c$ 。 U_o 起着削弱输入电压 U_{be} 的作用，故称负反馈，它是一种直流负反馈。 U_o 产生于输出电流 I_c ，故称电流负反馈。这就是“分压式电流负反馈”这一名称的由来。

U_o 既来自 I_c ，故对 I_c 的变化最敏感，若用 R_c 的反馈作用来控制 I_c 的变化，显然是方便而有效的，下面将要谈到，控制 I_c 的变化正是我们要考虑的重要问题，而这个问题是固定偏置电路所无法解决的。

在介绍“典型电路”的稳定作用之前，有必要简要说明温度等因素对静态工作点的影响。

温度对工作点的影响

静态工作点选定之后，不是一劳永逸的，当环境温度改变时或者更换晶体管时，晶体管某些重要参数将随着改变，因而引起静态工作点 I_c 和 U_o 的改变，即工作点 Q 将沿着负载线上下移动，称为工作点漂移， Q 点偏离负载线中点的位置将导致交流讯号在放大时产生失真，这是设置工作点后发生的一个新矛盾。

我们这里主要说明温度对工作点的影响，因为更换晶体管所引起的后果是很类似的。

我们知道，晶体管的导电特性是载流子参与导电，因此几乎晶体管的所有参数都和温度有关系。其中随温度变化而变化最显著的是 I_{cbo} （集电极—基极反向饱和电流）、 U_{be} （发射结正向压降）和 β （电流放大系数）这三个参数。

晶体管 β 值随温度升高而增大的现象是大家熟悉的。测量晶体管 β 值时，天冷和天热所测得结果就不一样。一般锗晶体管当温度由 25°C 升高到 65°C 时， β 值将增大40%左右。 β 增大，就意味着 I_b 不变而 I_c 增大了。 β 值随温度升高而增大反映了载流子能量随温度升高而增大的现象。

同样，载流子能量增加了，穿过发射结阻挡层就比较容易，产生同样大小的 I_e ，就只需要较小的 U_{be} 。因此晶体管的 U_{be} 随温度升高而减小。一般说来，无论是

硅管或者锗管,温度每升高1°C, $|U_{be}|$ 将下降2.5mV左右。图3是在不同温度下晶体管发射结正向压降 $|U_{be}|$ 和 I_e 的关系曲线。由图可知,当温度升高后,若 I_e 不变, $|U_{be}|$ 将减小。反过来,如果保持 U_{be} 不变, I_e 就增大, I_c 随之也增大。

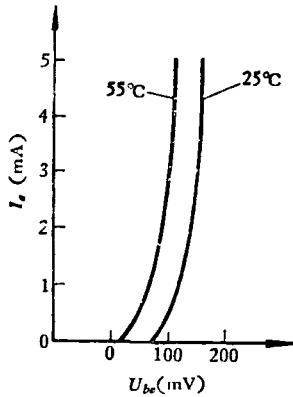


图3 $|U_{be}|$ 和 I_e 关系曲线

下面着重谈谈 I_{cbo} 的变化对 I_c 的影响。

I_{cbo} 是由集电区的少数载流子构成的,所以它受温度的影响很大。 I_{cbo} 随温度按指数函数的规律而变化。

图4为典型的小功率锗、硅晶体管的 I_{cbo} 与温度的关系曲线。一般说来,锗管温度每升高10°C,它的 I_{cbo} 数值约增一倍;硅管温度每升高8°C,它的 I_{cbo} 约增一倍。但硅管的 I_{cbo} 比锗管小得多,硅平面管的 I_{cbo} 可以小到几个毫微安,所以对硅管来说, I_{cbo} 随温度的变化常常不是主要问题。

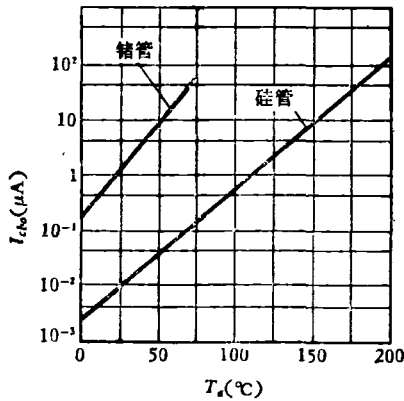


图4 小功率锗、硅晶体管的 I_{cbo} 与温度关系曲线

温度升高后, I_{cbo} 的增大对 I_c 的影响怎样呢?以PNP晶体管为例简单说明如下:

从物理过程来说,当温度升高时,集电区少数载流子电子更多地进入基区,即 I_{cbo} 增大。结果造成基区电子积累(电子过剩),由于基极电流 I_b 保持恒定,故过剩电子难于通过基极流出再回到集电极,于是引起发射区空穴大量注入基区。空穴的一小部分和过剩电子复合,复合电流就是 I_{cbo} 。大部分空穴将扩散到集电结,被集电区吸引而成为扩散电流,其数值等于 βI_{cbo} 。或者说,由于 I_b 是固定的(基极串联着一个很大的 R_b), I_{cbo} 将被迫流过发射结,在发射结产生一个正向压降的增

量 ΔU_{be} ,好像 I_{cbo} 是从发射结输入的一个电流一样,结果在集电结就产生了一个放大的输出电流 βI_{cbo} 。这样一来, I_c 就包含了三个电流: βI_b 、 I_{cbo} 和 βI_{cbo} ,即

$$I_c = \beta I_b + (1 + \beta)I_{cbo} = \beta I_b + I_{ceo} \quad (1)$$

如图5所示,式中 I_{ceo} 是穿透电流。

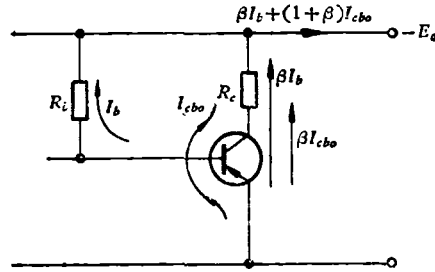


图5 $I_c = \beta I_b + (1 + \beta)I_{cbo} = \beta I_b + I_{ceo}$

(1)式是一个重要的关系式,它表明当温度升高后 I_{cbo} 的增大将使 I_c 有更多的增长。这就引起工作点Q沿负载线上升(漂移)。

设25°C时某放大器 $I_b = 20 \mu A$, $I_{cbo} = 4 \mu A$, 锗晶体管BG的 $\beta = 50$ 。这时

$$I_c = 50 \times 20 \times 10^{-6} + 51 \times 4 \times 10^{-6} = 1.2(\text{mA})$$

当温度升高到55°C时, I_{cbo} 增加了 $2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$ 倍(温度每升高10°C, I_{cbo} 增加一倍),即 I_{cbo} 变成 $8 \times 4 \mu A = 32 \mu A$ 了,这时

$$I_c = 50 \times 20 \times 10^{-6} + 51 \times 32 \times 10^{-6} = 2.6(\text{mA})$$

I_c 比25°C时增加了一倍有余。

可见在高温工作状态下, I_{cbo} (或 I_{ceo})对 I_c 的控制作用大大超过了 I_b 的控制作用。值得注意的是, I_{cbo} 随温度升高而增大,引起 I_c 的增大, I_c 增大引起集电结温度升高,结果又使 I_{cbo} 增大,造成恶性循环。集电结是加有反向偏压的,它的结电阻很大(高达 10^6 欧姆以上),电流在晶体管产生的热量主要集中在集电结上,温度的无限制升高最终要把集电结烧毁(锗晶体管和硅晶体管的最高结温分别为80°C和150°C左右)。

用 I_{ceo} 大的次品晶体管作功放管的半导体收音机,热天收听时常发生音量忽然降低而且沙哑,触摸功放管外壳感到烫手,测量总消耗电流显著增大的现象。

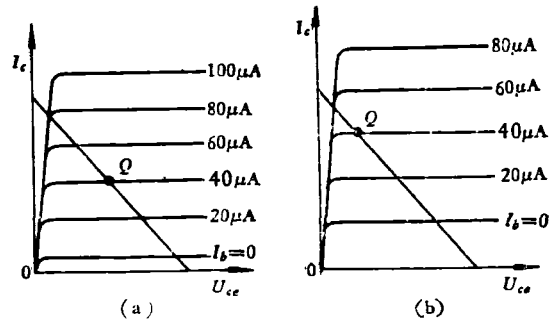


图6 Q点的位置:(a)正常温度下;(b)温度上升后。

如断开电源使管子冷却后再打开,又可正常收音,但很快又出现上述现象,这就是因为 I_{cbo} 增大引起 I_c 增大,工作点发生漂移。

图 6(a) 是正常温度下 Q 的位置,图 6(b) 是温度升高后 Q 点的位置。这里的特点是,温度升高后 I_b 没有变而 I_{cbo} 增大了, I_{cbo} 的增大推动整个输出特性曲线上升,带动 Q 点向上漂移, I_c 增大。

“典型电路”稳定工作点的作用

如上所述,当温度变化或更换晶体管而引起晶体管某些参数的变化,最终都导致 I_c 的变化,因此设法稳定 I_c (或者确切地说,使 I_c 随温度变化不超过允许范围)就成为主要的课题。我们已知固定偏置电路中

$$I_c = \beta I_b + (1 + \beta) I_{cbo},$$

βI_b 和 $(1 + \beta) I_{cbo}$ 两个量,即 I_c 包含当 I_c 随温度升高而增大时,如果设法同时减小 I_b 和 I_{cbo} ,不就可以有效地牵制 I_c 的增长,使之稳定了吗?

“典型电路”增加了一个反馈电阻 R_e 和一个下偏置电阻 R_2 ,正是从这个考虑出发,双管齐下来解决问题的。请看:

(1) 在图 7 中, I_1 和 I_2 分别为流过 R_1 和 R_2 中的电流,由图可知 $I_1 = I_2 + I_b$ 。只要 R_1, R_2 选取适当,可以使 $I_2 \gg I_b$,具体说使 $I_2 = (5 \sim 10) I_b$ 。于是 $I_1 \approx I_2$,即把流过 R_1 和 R_2 中的电流看作同一个电流 I_2 。这样一来,基极对地电位 $U_b = I_2 R_2 \approx \frac{R_2 E_c}{R_1 + R_2}$ 就是一个固定的数值而与 I_b 无关了。

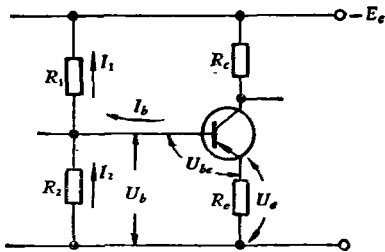


图 7 典型电路增加反馈电阻 R_e 和偏置电阻 R_2

(2) 如图所示, $U_b = U_{be} + U_e$, 其中 $U_e = I_e R_e$ 是发射极反馈电阻上的压降,显然当 I_c 随温度升高而增大时, U_e 也随着增大,因为固定了 U_b ,所以 U_e 增大就使 U_{be} 减小,即 U_e 起着削弱 U_{be} 的作用。 U_{be} 减小了, I_b 和 I_c 也都减小,达到了减小 I_b 以稳定 I_c 的作用。在实用上一般设 $U_b = (5 \sim 10) U_{be}$, 即 $U_b \gg U_{be}$, 则

$$I_c \approx I_e = \frac{U_b - U_{be}}{R_e} \approx \frac{U_b}{R_e}$$

(此时可见 $U_b \approx U_e$)。 U_b 既然固定了, I_c 也就固定了, I_c 和 β, U_{be}, I_{cbo} 等几乎无关。这是一重稳定作用。

(3) I_{cbo} 增长的条件是基区电子积累引起发射区

空穴的源源注入。现在在基极对地之间连接了一个较小电阻 R_2 (同时发射极串联了一个电阻 R_e , 使发射极对地电阻增大了),这样就给基区电子积累开了另一条通路,让电子流过 R_2 入地,只有一部分 I_{cbo} 流过发射结而被放大,如图 8 所示。这就破坏了 I_{cbo} 不断增长的条件使它大为减小,最后也就限制了 I_c 的增长。这是另一重稳定作用(图中 $-I_{cbo}$ 代表电子流)。

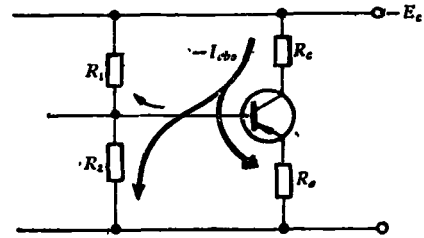


图 8 另一重稳定作用

(4) 综上所述,最重要的一点就是使工作点 I_c 只决定于线路电阻 R_1, R_2 和 R_e ,基本上与 I_{cbo}, β, U_{be} 等参数无关。放大器的工作状态也就只由 R_1, R_2, R_e, R_c 等所决定,不受参数的影响。这是“典型电路”的实质所在。

由于 R_1, R_2, R_e 的存在,放大器损失了一部分交流能量和直流能量,造成增益降低,这是取得稳定性的代价。显然, R_1 和 R_2 越小, I_2 越大, U_b 也就越稳定,但 R_1 和 R_2 过小则消耗直流、交流能量太多,故 R_1, R_2 不能太小。另外, R_e 越大,稳定性也越高,但如 R_e 过大,则管压降 U_{ce} 将过分减小,也影响放大器工作。

稳定系数 S

以上着重从物理过程方面分析了“典型电路”的稳定作用。为了对电路的稳定程度作一些数量分析,我们引入稳定系数 S 。

稳定系数 S 表示集电极电流 I_c 的变化与 I_{cbo} 变化之比,即

$$S = \frac{dI_c}{dI_{cbo}}$$

换句话说, I_{cbo} 的某个增量 dI_{cbo} 能引起 I_c 的多大增量 dI_c ,例如 $S = 5$ 即表示当 I_{cbo} 有任何变化时,所引起的 I_c 的变化相当于 I_{cbo} 变化的 5 倍(如 I_{cbo} 增大了 $1 \mu A$, I_c 只允许增大 $5 \mu A$)。所以 S 是用来规定工作点漂移的允许范围的量。国产半导体收音机的前置低放级,多使 $S \leq 10$ 。 S 值越大,稳定性越差; S 值越接近于 1,稳定性越好。

固定偏置电路中 $I_c = \beta I_b + (1 + \beta) I_{cbo}$, 可知对于每一个 dI_{cbo} , $dI_c = (1 + \beta) dI_{cbo}$, 所以 $S = 1 + \beta$ 。所以固定偏置电流的稳定性是很差的。要改变 S 值时,非更换晶体管(选取合适的 β 值)不可,晶体管的 β 值

越大,稳定性越差。

推算“典型电路”的 S 值的公式是比较复杂的,在这里也没有必要。因此我们直接引用这个公式如下:

$$S = \frac{1 + \frac{R_e}{R_1} + \frac{R_e}{R_2}}{1 - \alpha + \frac{R_e}{R_1} + \frac{R_e}{R_2}} = \frac{1 + R_e \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}{1 - \alpha + R_e \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}, \quad (2)$$

式中 α 是晶体管共基极电流放大系数。(2)式表明, R_1 和 R_2 越小, S 就越接近于 1, 即电路稳定性越好。 R_e 越大, S 也越接近于 1。但上面说过, R_1, R_2 不能过小, R_e 也不能过大。若 $R_e = 0$, 则

$$S = \frac{1}{1 - \alpha} = 1 + \beta,$$

稳定性也变差了。

为了进一步研究 S 值和 R_1, R_2, R_e 的关系, 常常应用等效电源定理(戴维宁定理)把“典型电路”化成图 9(b) 那样的等效电路形式。在这个等效电路中, E_b 是 A, B 两点间的开路电压, 即把电路从 A 点断开, 然后从 A, B 向左看过去的电压。 R_b 是 E_b 和 A, B 两点间短路电流之比。这样可得

$$E_b = \frac{R_2 E_c}{R_1 + R_2}, \quad (3)$$

$$R_b = \frac{E_b}{\frac{E_c}{R_1}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 // R_2. \quad (4)$$

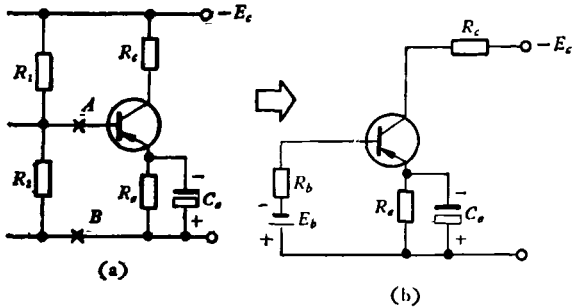


图9 等效电路

将 R_b 的值代入(2)式, 得到

$$S = \frac{1 + R_e/R_b}{1 - \alpha + R_e/R_b} \approx \frac{R_b}{R_e} + 1 \quad (\because 1 - \alpha \approx 0).$$

一般说来, S 比 1 大很多, 故上式可进一步简化为

$$S \approx \frac{R_b}{R_e}. \quad (5)$$

这是一个很有用的关系式, 它表明稳定系数 S 只与 R_b 和 R_e 有关, 即和 R_1, R_2, R_e 有关, 而和 R_c 无关, 因而和工作点 I_c 无关。所以工作点的设置和稳定是分别控制的。这是“典型电路”的一个优点。

“典型电路”的 S 值, 一般是 $5 \leq S \leq 10$, 超过 10 以后稳定性就差了。 S 值一经确定, 就可据以求出 R_1

和 R_2 的数值。其步骤如下:

(1) 确定电源 E_c (例如国产收音机通常 $E_c = 6V$), 并根据晶体管输出特性曲线选好静态工作点 I_b, I_c 和 U_{ce} ;

(2) 选定 R_e 的值 (一般为 $510\Omega \sim 1k\Omega$);

(3) 根据 $E_c = I_c R_c + U_{ce} + I_e R_e$ 的关系求出 R_c ;

(4) 选定 S 值 ($5 \leq S \leq 10$);

(5) 根据 $S = \frac{R_b}{R_e}$ 求出 $R_b = S R_e$;

(6) 利用 $E_b = I_b R_b + U_{be} + I_e R_e$ 的关系求出 E_b (注意一般锗管 U_{be} 约为 $0.2V$, 硅管 U_{be} 约为 $0.6V$);

(7) 根据上述(3), (4)两式,

$$E_b = \frac{R_2 E_c}{R_1 + R_2}, \quad R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

代入 E_c, E_b 和 R_b 的数值即可求出 R_1 和 R_2 , 即

$$R_1 = \frac{E_c R_b}{E_b} \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{E_c R_b}{E_c - E_b}. \quad (7)$$

我们还可以根据 $I_e = (5 \sim 10) I_b$ 和 $U_b \approx U_{ce}$ 的已知条件, 不用 S 值而估算出 R_1, R_2 的值(可参阅有关著作, 这里不作介绍了)。实际上, 我国工人师傅和技术工作者早已在实践中对“典型电路”总结出若干典型数据, 例如从大批国产七、八管半导体收音机的第一低放级所用“典型电路”可以看到如下规律:

| 元 件 | 通 用 数 值 | 条 件 |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| R_1 | 几 $k\Omega$ | $E_c = 6V$ $I_c \leq 1mA$ |
| R_2 | 几 $k\Omega$ | |
| R_c | 几 $k\Omega$ | |
| R_e | $500\Omega \sim 1000\Omega$ | |
| $C_1 \cdot C_2$ | $5\mu F$ 或 $10\mu F$ | |
| C_e | $20\mu F \sim 100\mu F$ | |

用得较多的一组数据是:

$$\begin{aligned} E_c &= 6V, & R_c &= 3.3k\Omega, \\ R_1 &= 22k\Omega, & C_1 &= C_2 = 10\mu F, \\ R_2 &= 5.1k\Omega, & C_e &= 50\mu F, \\ R_e &= 1k\Omega. \end{aligned}$$

其中交连电容 C_1, C_2 和射极旁路电容 C_e 的数值, 本是根据通过信号频率的大小和频率响应的要求而确定的; 但在低放电路中, 这些数值基本上已定型化, 出入不大, 一般不需计算了。

综上所述, 本文通过对“典型电路”稳定工作点过程的剖析阐述了以下几点:

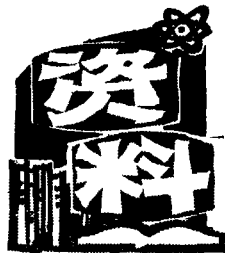
(1) 由于晶体管具有参数不均一性和热敏性的缺点, 我们必须研究温度变化或更换晶体管对晶体管参

数的影响以及如何解决由此带来的问题。

(2) 利用负反馈等方法制作适合需要的晶体管偏置电路,尽可能使电路工作状态主要决定于线路电阻,而基本上与晶体管参数无关,用以达到稳定工作点,减小失真的目的。这是一个重要的出发点。

(3) 由于晶体管参数不均一性很大(例如同一型

号的晶体管其 β 值可以相差一倍乃至几倍),再加上受温度影响变化剧烈,所以对晶体管电路的计算,片面追求高精度是不必要的,反而会带来不便。在实际应用中广泛采用近似计算。这些近似计算一般是抓住主要矛盾忽略次要矛盾,因而能够满足实际要求。这一点对于分析晶体管电路也是很重要的。



关于焦耳定律

戴念东

我们每天接触到的电灯、电炉、电熨斗以及工厂中使用的许多电热元件等,都是利用通电导体的热效应规律而设计的。通电导体的热效应规律一般称为焦耳定律^[1]。

继十八世纪末美国人伦福德(Rumford,即Count Thompson)发现机械功转变为热的规律之后,1840年英国的物理学家焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)在实验中又发现,不仅机械功能变为热,而且通电导体也有放热现象。同时他通过精密实验测得:通电导体所产生的热量,跟电流强度的平方、导体电阻和通电时间成正比例。经过反复实验,他将这些数据、结论和换算公式发表在1841年10月号《哲学杂志》(Philosophy Magazine)上。就将其论文《电流生热》在1840年12月寄给了英国皇家学会。因此,后人就把通体导体产生的热称为焦耳热、电流热,把这效应称为焦耳效应,把相应的规律称为焦耳定律。焦耳前后用了四十年时间,在机械功和热、电和热转换的基础上,做了数百次各种各样的实验,准确地测定了物理学上的重要常数热功当量^[2,3],从而为建立热力学第一定律即能量转换和守恒定律作出了贡献。可以说,焦耳已为这一定律的建立奠定了基础。为此,恩格斯曾给予高度的评价。

恩格斯指出:“迈尔在海尔布朗,焦耳在曼彻斯特,都证明了从热到机械力和从机械力到热的转化。热的机械当量的确定,使这个结果成为无可置疑的。”^[1]又指出“在热的机械当量的发现彻底清除了关于某种特殊的‘热素’的观念,并证明热是一种分子运动以后,接着就是用新的方法来研究电,并试图测定电的机械当量。这个尝试完全成功了。特别是焦耳、法夫尔和劳尔的实验,不仅确定了电流中的所谓‘电动力’的机械当量和热当量,而且还证明了它和电池中的化学过程所释放出来的能量或者和电解槽中所消耗的能量是完全等价的。”^[2]恩格斯还把“由热的机械当量的发现(罗伯

特·迈尔、焦耳和柯尔丁)所导致的能量转化的证明”^[3]列为十九世纪下半叶自然科学三大发现中的第一项。

在焦耳实验成功后两年,即焦耳的论文发表一年之后,亦即1842年10月2日,楞次(Heinrich Friedrich Emile Lenz, 1804—65)向俄国科学院报告了他关于电流热效应的研究结果。同年12月2日在俄国科学院作报告,1843年发表其论文《关于电流发热的规律》。在楞次向俄国科学院的报告中,讲到“所得的结果与焦耳的结果基本上是一致的”,并且还讲到:“我还是认为应该继续自己的工作,因为焦耳的实验可能遇到某些有根据的反对意见”^[4,5]。他起到了证实和宣传焦耳的研究成果的作用,也作出了自己的贡献。

虽然1833年楞次在“关于金属在不同温度下的导电性”的论文中,已经讲到“实验证明导体的受热与其导电性成反比”。不过,在楞次写此论文时,虽已有伏打电池能持续电流,但具有恒压电源的丹聂尔电池到1836年才发明,而电流恒量测量计也未具备,所以当时是缺乏实验条件的。因此,楞次的这句话,距离电热效应的规律尚远,只是焦耳定律的先导思想。

参考文献

- [1] 卫斯特发尔, W. H., 《高等物理学》中册, 周君适、姚启均译, 商务印书馆(1936), 495.
- [2] Florian Cajori, *A History of Physics*, Macmillan, (1928), 219.
- [3] 汤浅光朝, 《科学文化史年表》, 中央公论社(1950), 73, 74, 76.
- [4] Кудрявцев, П. С., Конфедероюв. И. Я., *История Физики и Техники*, Москва(1960), 249—250.
- [5] 朗斯尼齐基 Б. Н., 《爱弥里·赫斯齐安诺维奇·楞次——为纪念他逝世90周年而作》, 刘楚才译《物理通报》, —5(1957), 268.

1) 恩格斯,《自然辩证法》,人民出版社,(1971), 14.

2) 同上,第99—100页.

3) 同上,第175页.