

# 涡流制动器 在起重机调速系统中的应用

陈岳声 编

国防工业出版社

# 涡流制动器 在起重机调速系统中的应用

陈岳声 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍一种附加涡流制动器的交流起重机调速工作原理、特点及其常用的控制线路,同时也涉及到有关涡流制动器的构造、安装与设计制造等方面的问题。书中着重讨论了涡流制动器设计计算的简化,闭环励磁控制的简化以及简化闭环调速特性的图解分析等。本书可供从事起重机的设计、研制与维修的工程技术人员及工人阅读,也可供有关专业师生教学参考。

## 涡 流 制 动 器 在起重机调速系统中的应用

陈岳声 编

\*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 2 46千字

1981年8月第一版 1981年8月第一次印刷 印数: 0,001—1,600册

统一书号: 15034·2210 定价: 0.23元

## 前 言

就调速性能而言,直流电机虽然比较优越,但其设备复杂,投资及维护费用较大,故大多数起重机仍采用比较简单的交流绕线式异步电动机,通过其转子绕组串接不同电阻来调速。这种异步电动机用在静阻力矩变化不大的平移机构上,调速问题一般还不太大。但如用在提升机构或单臂架变幅机构上,因有下降重物的位能负载,单纯采用改变转子外接电阻的方法是不能调速的。早期设计的起重机控制屏,广泛采用反接制动来获得荷重下降停车前的低速,虽有一定效果,但机械特性太软,尤其当空钩或轻载下降时,往往会违背司机意图而上升,严重时还会造成意外事故。因此起重机的交流调速,便成为有关工厂和科研设计单位长期以来研究的课题。经过我国广大工人和工程技术人员共同努力,曾经试验研究并在实际上采用过多种多样的交流调速线路:如能耗制动、单相制动、液压推杆制动、饱和电抗器或可控硅交流调压调速以及串激调速、感容调速等,都取得了不同程度的效果,但也还不够理想,如有的性能不够稳定,有的线路过于复杂不易维修,有的则因电流不平衡或产生高次谐波而对电机与电网带来不利影响,因而使其推广应用受到一定限制。

第六机械工业部第九设计研究院在1959~1960年间,为了满足某垂直-斜面升船机的起、制动平稳及准确停车的要求,曾设计采用过一种附加涡流制动器的交流调速方案,以代替原来的直流方案。这种调速方案在六十年代以后已实际应用到来门座起重机和其他起重机上。经过十多年来生产实践,证明它是一种比较简单可靠、经济实用、易于维护和用户满意的交流调速方案。近年因承担某船坞起重设备的设计任务,又对上述附加涡流制动器的

交流调速方式作了进一步试验研究和改进。近年来在上海制造的门座起重机和塔式起重机已有 40 台以上采用了这种调速方式。全国各地正在建造和准备建造的起重机中将有更多台数采用这种调速方式。由于应用单位越来越多，而目前国内又缺乏介绍这方面知识的书籍，所以，我们把以前在实践中取得的点滴经验编写成这本小册子，以供有关人员参阅。

本书主要介绍附加涡流制动器的起重机调速工作原理、特点、控制线路及有关涡流制动器的构造、安装与设计方面的经验。为了便于普及推广，书中避免了比较繁琐的公式推导，而着重讨论了涡流制动器的简化设计计算与简化的闭环励磁控制线路。

本书在编写中曾得到有关单位及有关专业技术人员的大力支持与密切配合，在此谨表感谢。由于技术水平有限，编写时间仓促，如有错漏之处，请读者指正。

# 目 录

|                   |    |
|-------------------|----|
| 一、调速工作原理及其特点      | 1  |
| 二、涡流制动器的结构型式及安装方式 | 4  |
| 三、主要外形尺寸的确定       | 6  |
| 1. 涡流制动器的转矩公式     | 6  |
| 2. 空气隙的选择         | 8  |
| 3. 气隙磁通密度的选择      | 9  |
| 4. 磁极对数的选择        | 9  |
| 5. 主要外形尺寸的确定      | 10 |
| 四、磁路计算与激磁绕组设计     | 13 |
| 1. 磁极结构形式比较       | 13 |
| 2. 磁路计算           | 14 |
| 3. 电枢反应及激磁绕组磁势的确定 | 17 |
| 4. 激磁绕组磁势计算的简化    | 18 |
| 5. 激磁绕组设计         | 19 |
| 五、涡流制动器的机械特性曲线    | 22 |
| 六、控制线路            | 27 |
| 七、闭环励磁控制线路的简化     | 35 |
| 八、闭环调速特性的图解分析     | 39 |
| 九、涡流制动器在各种起重机上的应用 | 45 |
| 十、附录              | 49 |
| 1. 附表             | 49 |
| 2. 附图             | 54 |
| 参考文献              | 57 |

## 一、调速工作原理及其特点

起重机的交流调速方式，虽然种类繁多，但其基本原理都是要求在荷重下降时，能在电动机上产生一可调制动力矩以克服荷重的位能或负阻力矩。归纳起来，其制动力矩可分为两种不同形式：第一种是由拖动电动机自己产生的制动力矩。如反接制动、能耗制动及再生制动；或人为地将电动机定子三相电压造成不平衡，使其分解后的逆序制动力矩大于顺序的电动动力矩。如单相制动，用自耦变压器的不平衡下降制动，感容调速及单相饱和电抗器或单相可控硅交流调压调速也属这一种（但三相平衡的饱和电抗器或可控硅调压调速则大多利用电动机的反接制动或能耗制动）。第二种是在拖动电动机以外附加一可变的制动力矩。如液压推杆机械制动，双电机拖动中利用一合作能耗制动或反接制动。此外，也有在电动机轴上增设一台容量稍小（约60%）的交流或直流发电机作能耗制动。而附加涡流制动器的起重机调速方式就是属于后一种形式的发展。由于它比增加一台交流或直流发电机更简单、更经济、更易于控制，所以在国外也获得了较大的发展。下面就对这一调速方式的工作原理及其特点作一简要介绍。

图 1-1 是附加涡流制动器

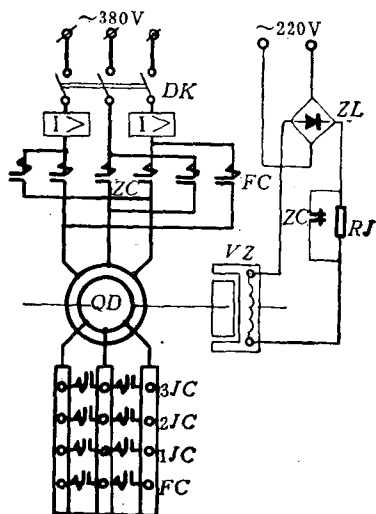


图 1-1 附加涡流制动器的起重机交流调速控制原理图

的起重机交流调速控制原理图。除一般绕线式异步电动机原有的换向及加速接触器和起调速电阻外，仅增加了一台涡流制动器及其励磁回路的整流、调节与保护元件。

图 1-2 是拖动电动机与涡流制动器二者机械特性迭加后的开环调速特性曲线。

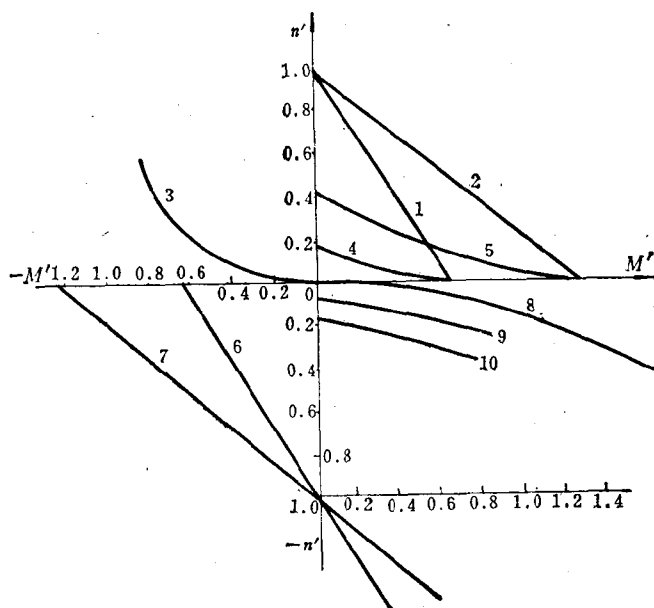


图1-2 机械特性迭加后的开环调速特性曲线

由图 1-2 可知，电动机两条人造的机械特性曲线 1、2（提升）或 6、7（下降），对于轻载提升或重载下降的速度都很快。但由于附加涡流制动器机械特性曲线 3（提升）或 8（下降）的存在，使其迭加后的调速特性曲线 4、5（提升）或 9、10（下降）变得硬多了。不过，这还是开环控制系统。如果进一步采取闭环控制，即涡流制动器的励磁电流随负荷或速度的变化而自动调节，则其合成后的调速特性曲线将会更好一些，这在后面还要作进一步介绍。

这种交流调速方式的主要优点是:

(1) 简单可靠。涡流制动器由普通低碳钢和漆包线做成, 坚固耐用, 寿命较长, 维护简便; 此外, 由于有了停车前的低速, 机械制动器的摩擦片与接触器的触头寿命相对延长, 可进一步减少维护工作并提高工作可靠性。

(2) 无失控区, 调速范围仅受涡流制动器低速制动力矩的限制, 一般在 1:10 左右。若改进电枢后, 则调速范围可达 1:20, 甚至更高。

(3) 经济价廉。它与同容量的直流发电机-电动机调速系统相比, 投资仅为其三分之一; 与同容量饱和电抗器交流调速相比, 投资仅为其二分之一<sup>(1)</sup>; 而与同容量的可控硅交直流调速相比, 则其经济性尤为显著。

(4) 新机订货及旧机改装都比较方便, 目前除涡流制动器须在起重机制造时一起加工外, 其他电气设备均与原来基本一样, 将来我国大量生产以后, 即可与起重电动机一样配套订货。

这种调速方式的主要缺点是:

(1) 低速时效率较低, 损耗较大; 如低速时间过长, 将引起电机、调速电阻及涡流制动器严重发热, 因此它不适用于需要长期低速工作的设备。

(2) 由于增加了一个转动部件, 它的  $GD^2$  比其他调速方式稍大 (约增加 20~40%), 安装尺寸也大些, 故不适用于特别频繁起制动的场合, 如港口起重机及抓斗起重机等。但由于  $GD^2$  大却带来了起动、制动平稳的优点, 对于要求低速准确停车或起动、制动平稳的场合: 如一般造船和机械制造工厂的安装起重机、铸造起重机以及电站和建筑工地的塔式起重机等却是非常适宜的。

此外, 由于涡流制动器控制线路的改进, 如下降第一档电动机不接入, 则下降时低速效率可以提高, 低速时间可以较长。

## 二、涡流制动器的结构型式及安装方式

涡流制动器的构造与电磁滑差离合器基本相同，由于不需滑环和炭刷，结构较为简单一些。如果把滑差离合器的感应器，即其磁极与线圈部分固定不动，则电枢转动后感应的涡流能使机轴产生强大的制动力矩。因此涡流制动器的结构主要由两部分组成：一是与电动机同轴转动的电枢；二是与电动机外壳或底座装在一起的感应器。电枢虽然也有采用圆盘形的，但我国很少采用，通常都做成圆筒形，它可以安装在感应器的里面或外面。感应器的磁极形状较多，但基本形式也只有凸极式、鸟啄式（或称装甲式）和感应式三种，如图 2-1 所示。

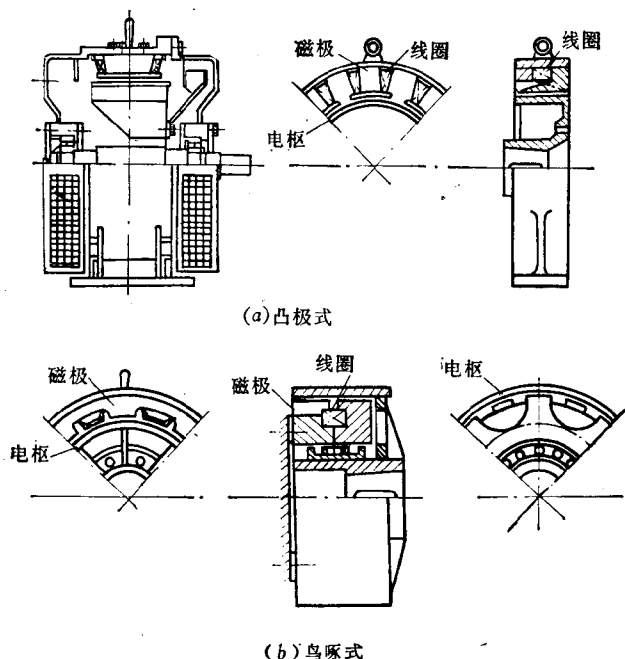


图2-1 涡流制动器的结构形式

凸极式可利用直流电机机壳及磁极，只需把比较复杂的直流电枢改为简单的钢质圆筒便成涡流制动器了，但其体积较大而材料消耗较多，目前日本和西德的系列产品大都是这种形式。鸟啄式的材料利用较好，与其他形式相比，体积与励磁功率均小，但磁极加工比较麻烦。如成批生产，磁极采取精密铸造较为合理，美国产品多用这种形式。感应式磁极加工方便，但气隙磁通密度应取较高数值，故励磁安匝数较大，铜线消耗较多。我国以前设计的涡流制动器大多为鸟啄式。它与我国已经系列化了的电磁滑差离合器构造相似。但是磁极交错布置的感应式涡流制动器也有一定的优越性，其技术性能介于鸟啄式和并列布置的感应式之间，磁极制造方便，易于推广，我国已开始用于较小功率的外电枢涡流制动器。凸极式一般用于功率达数百千瓦的大型涡流制动器。

涡流制动器的安装方式如图 2-2 所示。

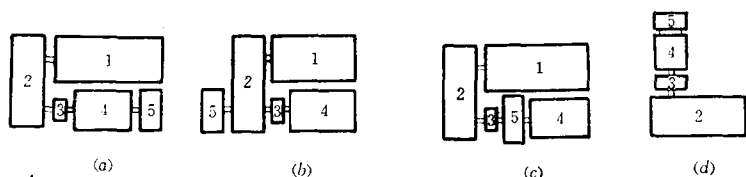


图 2-2 涡流制动器的安装位置

1—钢绳卷筒；2—减速箱；3—联轴器；4—电动机；5—涡流制动器。

考虑机械布置方便，涡流制动器可选择安装在电动机另一出轴端头，如图 2-2(a)；或减速箱外侧，如图 2-2(b)；或电动机与减速箱之间，如图 2-2(c)。近来我国新设计的某些门座起重机，其旋转机构广泛采用立式安装电动机，这时调速用的涡流制动器可安装在电动机上部出轴上，其中磁极部分通常固定在电机端盖上，如图 2-2(d)。此外也可参照图 2-2(c) 的方式安装在电动机与减速箱之间。

图 2-2(a) 和图 2-2(b) 的安装方式装拆比较方便，但电动

机或减速箱必须双头出轴。图 2-2(c) 的安装方式因联轴器、涡流制动器与机械制动器结合在一起, 比较紧凑, 材料消耗也少, 我国采用这种方式较多, 但装拆麻烦, 要求气隙加工误差小, 电枢同心度要求高, 安装前电枢应做平衡试验。装定后感应器应与基座牢牢固定, 否则, 若运行时间较长会发生电枢碰壳现象。对于中小容量的涡流制动器如按图 2-2(a)、图 2-2(b) 或图 2-2(d) 安装, 则感应器多装在电枢内, 并且固定在电动机或减速箱的外壳上。如能事先与电机制造工厂取得联系, 甚至可以与电机风扇一起安装在风罩之内。国内已经使用的 50 公斤·米鸟啄式及感应式涡流制动器的装配图分别见附录中的图 10-1 及图 10-2。国内立式安装的 20 公斤·米感应式涡流制动器装配图见图 10-3。

### 三、主要外形尺寸的确定

#### 1. 涡流制动器的转矩公式

整块钢电枢涡流制动器的工作原理和能耗制动状态下的鼠笼式异步电动机工作原理相同, 其制动力矩的大小都取决于转子中的铜损耗和铁损耗。但二者也有某些不同, 如电枢材料和磁极形状就不相同, 因此不能直接引用异步电动机的设计计算公式。涡流制动器不仅在结构上而且在设计原理上都与电磁滑差离合器基本相同, 而电磁滑差离合器作为传递转矩应用较早, 国外在理论与设计方面都已作过许多研究<sup>[2]</sup>。这种电机虽然结构简单, 但其计算公式的推导与应用仍旧比较烦琐, 主要是因为转差频率变化时, 整块钢电枢中的电流渗透深度不同, 磁场强度和导磁系数也是变化的。为了确定电枢中的涡流损耗, 必须知道电流密度与磁场强度沿整块钢电枢深度方向的分布。根据导电介质中马克斯威尔方程式, 在误差符合工程实用的条件下, 求解平面电磁波传播方程然后导出转矩公式及其他公式。但是以前有些计算公式为求简单, 曾把钢的导磁系数视为常数, 因而得出过错误的结果。

六十年代以后才开始纠正这一错误<sup>[2,3]</sup>。我国对电磁滑差离合器和涡流制动器的应用虽然较晚,但在设计计算方面却及时吸取了国外新的研究成果。例如在确定鸟啄式电磁滑差离合器主要外形尺寸的转矩公式(3-1)时就已经考虑了电枢钢中导磁系数的变化<sup>[4]</sup>。

$$D^2 l_0 = \frac{11.6M}{B_0 H_m \sin\left(\alpha_p \frac{\pi}{2}\right)} \quad (3-1)$$

其中  $H_m$  则由下式及钢的磁化曲线确定:

$$\sqrt{\mu} H_m = 0.153 \sin\left(\alpha_p \frac{\pi}{2}\right) B_0 D \sqrt{\frac{n_r}{p \zeta \rho_s}} \quad (3-2)$$

式中  $H_m$ ——空气隙磁场强度振幅值, 安/厘米;

$M$ ——对应于转差为  $n_r$  时的转矩, 公斤·米;

$D$ ——电枢直径, 厘米;

$l_0$ ——电枢有效长度, 厘米;

$B_0$ ——空气隙中磁通密度平均值, 高斯;

$\mu$ ——钢的导磁率, 马/安·厘米;

$\alpha_p$ ——极弧系数, 为磁极面平均宽度与极距之比;

$p$ ——极对数;

$n_r$ ——转差速度, 转/分;

$\rho_s$ ——温度为  $t$  °C 时电枢钢的电阻系数, 欧姆·厘米;

$\zeta$ ——电枢端部效应系数, 一般取 1.6~1.8。

式(3-1)和(3-2)同样可用作选择涡流制动器的外形尺寸。但是涡流制动器与电磁滑差离合器也有所不同, 它没有严格的额定转速与传递效率要求。为了克服下降重物的位能负载, 仅对其最大制动转矩有一定要求, 所以也有利用最大转矩公式来计算的。由于电磁滑差离合器和涡流制动器的最大转矩与电枢材料的电阻系数及导磁系数无关, 故可使计算公式及计算手续大为简化。

隐极感应器可得到近似正弦分布的线负荷  $\Delta$ ，并在空载状态形成正弦分布的气隙磁感应强度  $B_0$ ，从此出发最后导出显极电磁滑差离合器或涡流制动器的最大转矩公式为<sup>[6]</sup>：

$$M_{kp1} = 17 \times 10^{-9} \frac{Dl}{\delta} A_p (I_{\omega n})^2 \frac{\sin^2\left(\frac{pa}{D}\right)}{p\left(\frac{a}{D}\right)^2} \quad (3-3)$$

式中  $I_{\omega n}$ ——空气隙磁势一次谐波振幅值，等于  $1.6\delta B_{1m}$ ；

$A_p$ ——沿电枢电磁波传播方向导磁率变化的计算系数，其值为  $1.3 \sim 1.4$ ；

$a$ ——极间距离，其值应为气隙长度  $\delta$  的  $10 \sim 20$  倍。

$$\text{当 } \frac{a}{D} \rightarrow 0 \text{ 时, } M_{kp1} \rightarrow 17 \times 10^{-9} \frac{Dl}{\delta} p A_p (I_{\omega n})^2 \quad (3-4)$$

实际上如取  $A_p = 1.35$ ， $\frac{pa}{D} = 0.5$ ，则  $\sin^2\left(\frac{pa}{D}\right) / \left(\frac{pa}{D}\right)^2 = 0.9$ ，不会有较大误差，因此为了计算方便，在引用式 (3-3) 时，可进一步化简和改写为：

$$Dl = \frac{M_m \times 10^{11}}{52 p \delta B_{1m}^2} \quad (3-5)$$

式中  $\delta$ 、 $D$ 、 $l$ ——分别为涡流制动器的气隙长度，电枢直径及电枢长度，厘米；

$M_m$ ——最大制动转矩，公斤·米；

$p$ ——极对数；

$B_{1m}$ ——气隙磁通密度一次谐波振幅值，高斯。

## 2. 空气隙的选择

空气隙  $\delta$  是涡流制动器主要结构尺寸之一。从工艺上考虑气隙最好选得大些，但这样就必须增加励磁安匝数，并相应增大涡流制动器的尺寸和重量；另外气隙增大漏磁也相应增加，从而减少了有效磁通量，使制动转矩降低；而气隙太小，由于磁通密度饱和，最大制动转矩也会减小。一般 11 千瓦以下的涡流制动器

可取  $\delta = 0.4 \sim 0.65$  毫米, 11~125 千瓦则取  $0.65 \sim 2$  毫米。此外在选择气隙时还应考虑电枢发热温升后对实际气隙的影响, 故外电枢的空气隙应比内电枢稍小。当磁极较短, 如采用感应式时, 空气隙也应取较小值。

### 3. 气隙磁通密度的选择

由公式 (3-5) 可以看出: 涡流制动器的外形尺寸  $D$ 、 $l$  与气隙磁通密度一次谐波振幅值  $B_{1m}$  的平方成反比, 因此在磁路不饱和的情况下, 选择  $B_{1m}$  越大越好。但实际上由于受  $10^* \sim 15^*$  低碳钢磁极根部磁通密度的限制, 也不可能选得太大。一般鸟啄式涡流制动器的  $B_{1m}$  可选取 9000~11500 高斯 (对应的平均磁密为 6000~7500 高斯)。对于磁极较短的感应式涡流制动器, 因根部不易饱和,  $B_{1m}$  可选取达 20000 高斯的较高值。

### 4. 磁极对数的选择

一般交流电动机的极对数取决于供电电源频率及所需同步转速, 不能任意选择。而涡流制动器的极对数是可以根据电枢直径大小、机械特性要求以及材料消耗等技术经济指标合理地进行选择的。由公式 (3-5) 可知, 当外形尺寸一定时, 涡流制动器的最大转矩  $M_m$  与极对数  $p$  成正比。在一定范围内, 极对数  $p$  越大, 最大制动转矩也越大。

但是极对数过大则极间漏磁增加, 有效磁通量减少, 转矩不再增加, 技术经济性反而不好。就机械特性来说, 极对数较少则低转差时的转矩增大而高转差时转矩减小, 如图 3-1 所示。

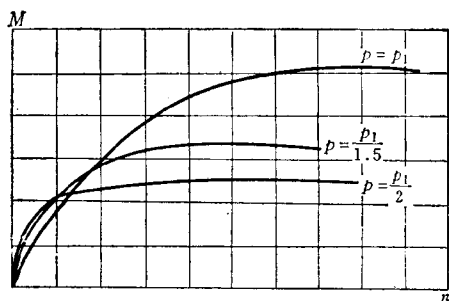


图 3-1 不同极对数时涡流制动器的机械特性

这是因为低转差时随着  $p$  的减小电枢电流渗透深度增加、电枢回路电阻减小, 故制动转矩随电枢电流增加而增加。当高转差率

时, 随着  $p$  的减少电枢反应的去磁作用增强, 使制动转矩降低。根据计算经验, 对于 5~125 千瓦起重电动机所配用的涡流制动器, 其电枢直径  $D = 28 \sim 72$  厘米, 其极对数  $p$  可取 8~18, 原则上  $D$  较大时  $p$  应取较大值, 并且最好能保持  $\frac{pa}{D} \leq 0.5$  ( $a$  为磁极间隙, 约等于  $10 \sim 20 \delta$ )。此外如  $\delta$  和  $B_{1m}$  选定后,  $D$  也可根据电机中心高及安装高度的可能性预先假定, 则最佳极对数  $p$  也可按以下近似公式估算:

$$\text{鸟啄式} \quad p \approx \sqrt{\frac{B_{1m} D^3 n_s}{3 \times 10^{10} \delta}} \quad (3-6)$$

$$\text{感应式} \quad p \approx \sqrt{\frac{B_{1m} D^3 n_s}{12 \times 10^{10} \delta}} \quad (3-7)$$

式中  $B_{1m}$ ——气隙磁通密度一次谐波振幅值, 高斯;

$n_s$ ——拖动电动机的同步转速, 转/分;

$D$ 、 $\delta$ ——电枢气隙处直径及气隙长度, 厘米。

### 5. 主要外形尺寸的确定

起重机调速用的涡流制动器必须具有足够的制动力矩。根据一般提升机构减速要求, 其最大制动力矩应等于或大于荷重位能负载的两倍, 或按以下公式计算:

$$M_m \geq M_N (1 + \eta^2)$$

$$\text{或} \quad M_m \geq \frac{975 P_N (1 + \eta^2)}{n_N} \quad (3-8)$$

式中  $M_N$ ——提升电动机的额定转矩, 公斤·米;

$P_N$ ——提升电动机的额定功率, 千瓦;

$n_N$ ——提升电动机的额定转速, 转/分;

$\eta$ ——提升电动机的机械总效率, 其值为 0.8~0.9。

对于旋转及行走等平移机构, 其制动力矩应按风力的负阻力矩大小来考虑, 一般对涡流制动器的最大制动力矩要求可以适当降低, 等于拖动电动机的额定转矩或稍大一些即已足够。

如拖动电动机的数据或对制动力矩的要求已知, 便可用前面几节方法选定气隙  $\delta$ 、气隙磁通密度  $B_{1m}$  和极对数  $p$  等数据一起代入公式 (3-5) 以确定涡流制动器的主要外形尺寸  $D$  及  $l$ 。

例如某门座起重机的副提升机构电动机的额定功率为:  $P_N = 22$  千瓦, 额定转速  $n_N = 710$  转/分, 机械总效率  $\eta = 0.8$ , 则所配涡流制动器必须具有的最大制动力矩为:

$$M_m = 975 P_N (1 + \eta^2) / n_N = 975 \times 22 (1 + 0.8^2) / 710 \\ \approx 50 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

按前述方法选取  $\delta = 0.15$  厘米,  $B_{1m} = 10000$  高斯,  $p = 10$ , 则鸟啄式涡流制动器的主要外形尺寸为:

$$Dl = \frac{M_m \times 10^{11}}{52 p \delta B_{1m}^2} = \frac{50 \times 10^{11}}{52 \times 10 \times 0.15 \times 10000^2} \\ = \frac{5000}{52 \times 0.15} = 640 \text{ 厘米}^2$$

根据拖动电动机中心高及安装方式等因素可预先选定直径  $D = 40$  厘米, 则  $l = 16$  厘米。

再按公式 (3-6) 核算极对数:

$$p \approx \sqrt{\frac{B_{1m} D^3 n_e}{3 \times 10^{10} \delta}} \approx \sqrt{\frac{10000 \times 40^3 \times 750}{3 \times 10^{10} \times 0.15}} \\ \approx \sqrt{\frac{64 \times 0.75}{3 \times 0.15}} \approx 10.3$$

故所选极对数与计算符合。如果相差不大, 例如不超过一对时可不作调整; 如果相差较大, 则应适当调整  $B_{1m}$ 、 $\delta$  或  $D$ 、 $l$  等数值。

当采用交错布置的感应式磁极结构时, 由于电枢的有效长度仅为鸟啄式的二分之一, 如  $D$  仍为 40 厘米,  $p$  仍用 10 对, 则同样外形尺寸要达到  $M_m = 50$  公斤·米, 必须使  $\delta \times B_{1m}^2$  之值增加一倍。例如选取  $\delta = 0.075$  厘米,  $B_{1m} = 20000$  高斯, 则按公式 (3-5) 计算求出之  $l_e$  即为感应式涡流制动器的有效长度。