

ZHUIXING YIBU DIANDONGJI

锥形异步电动机

冯信华 著

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

锥形异步电动机/冯信华著

武汉:华中理工大学出版社,1996年8月

ISBN 7-5609-1299-0

I. 锥…

II. 冯…

III. 异步电动机 锥形

IV. TM343

锥形异步电动机

冯信华 著

责任编辑:傅良平

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:8.5 字数:210 000

1996年8月第1版 1996年8月第1次印刷

印数:1-2 000

ISBN 7-5609-1299-0/TM·62

定价:7.00元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

内 容 简 介

本书包括了锥形异步电动机的磁路、轴向磁拉力、变极调速、优化设计、设计的专家系统、启动与制动特性、控制、保护等内容,共八章。全书紧密结合工程实际,重点论述锥形异步电动机与普通圆柱形异步电动机不同的各个方面,有些内容是作者多年积累的研究成果。书中提供了实验数据、理论模型、计算和设计方法及有关结果,具有先进性,但又由浅入深,且具有教材的系统性与逻辑性,使读者有一个完整的概念,因此亦可作为大学本科和研究生的选修课教材。

本书适于电机与控制、自动化及机电一体化专业的师生和有关领域的工程技术人员与研究人员阅读。

前 言

本书总结了作者从事锥形异步电动机的研究成果。用不大的篇幅,较全面地叙述了锥形异步电动机的理论、设计、计算、控制、实验与维修。除了对一般的单速锥形异步电动机作了较详细的论述之外,还对远极数比双速锥形异步电动机所采用的变极方案作了较深入的分析。书中还介绍了近期作者从事的电机优化设计、专家系统及节能控制方面的科研和为工业服务取得的成就。书中所阐述的4种优化方法,均在工业中取得了经济效益,并且所开发的电机设计专家系统正移植工业实践。为了扩大我国锥形异步电动机的应用领域,提高运行质量,本书还以调速、节能及负载匹配为中心,对电动机高质量控制的概念,阐明了作者的看法与建议,并介绍了两类控制方法,提供的控制与保护方法多属简单可靠和具有实用性。本书作为专著,除了在科学性和先进性方面作了努力外,还结合了我国实际,注重了实用性。

作者自70年代开始,就与湖北咸宁市起重电机厂合作至今,科研工作得到原厂长的大力支持,本书的问世,得到该厂的鼓励与赞助。本书由林金铭教授主审原稿,提出了许多指导性意见。在编写过程中还得到北京起重机械研究所潘进工程师提供的有关资料以及我的研究生范进山、董胜利、李占春、管和昌等同学的帮助。在此,表示衷心的感谢!

最后对华中理工大学出版社的大力支持,作者在此表示由衷的感谢!由于作者水平有限,加之时间匆忙,书中不妥之处在所难免,诚望读者批评指正。

冯信华

1996年元月于武汉

目 录

第一章 概论

- 一、锥形异步电动机的工作原理及结构..... (1)
- 二、锥形异步电动机的用途及发展概况..... (5)
- 三、锥形异步电动机的使用特点 (10)

第二章 锥形异步电动机的磁路与轴向磁拉力

- 一、锥形异步电动机的磁路与磁化曲线 (14)
- 二、磁路各系数的分析与计算 (18)
- 三、分段法磁路计算举例 (22)
- 四、轴向磁拉力计算 (28)
- 五、有限元法计算轴向磁拉力 (32)
- 六、斜槽及其他因素引起的轴向磁拉力 (36)
- 参考文献..... (39)

第三章 锥形异步电动机的启动和制动

- 一、概 述 (40)
- 二、锥形异步电动机启动第一阶段的过渡过程 (42)
- 三、转子轴向拉入的时间计算 (47)
- 四、启动时锥形异步电动机的参数与轴位移的关系 (50)
- 五、启动时间计算 (53)
- 六、制动转矩及制动时间 (57)
- 参考文献..... (66)

第四章 双速锥形异步电动机

一、概述	(67)
二、极幅调制法	(70)
三、槽磁动势矢量图法	(74)
四、采用 Y- Δ 混合接法绕组变极	(82)
五、变极绕组的绕组因数	(88)
六、单位谐波漏磁导	(91)
七、双速锥形异步电动机性能预测	(94)
八、单绕组变极调速的应用	(100)
参考文献	(101)

第五章 锥形异步电动机的优化设计

一、概述	(103)
二、锥形异步电动机优化设计特点	(104)
三、锥形异步电动机的分析程序	(106)
四、适应性随机法	(113)
五、边界综合搜索法	(118)
六、最小-最大优胜原理法	(123)
七、模糊优化方法	(129)
八、几种优化方法的综合讨论	(135)
参考文献	(137)

第六章 锥形异步电动机的控制与保护

一、相控三相调压器及锥形异步电动机的特性	(139)
二、异步电动机的调压调速	(150)
三、异步电动机的调压节能	(158)
四、异步电动机的启动控制	(169)
五、锥形异步电动机的制动和保护	(186)
参考文献	(193)

第七章 锥形异步电动机试验及维修

- 一、锥形异步电动机的试验..... (194)
- 二、锥形异步电动机的型号及技术参数..... (201)
- 三、锥形异步电动机的维护与修理..... (208)

第八章 异步电动机设计专家系统

- 一、概 述..... (213)
- 二、专家系统的基本结构..... (215)
- 三、知识表示..... (218)
- 四、规则、框架及面向对象的知识表示 (220)
- 五、控制策略及冲突解除..... (226)
- 六、知识库管理系统、解释机制及用户界面 (230)
- 七、中型异步电动机设计专家系统..... (233)
- 参考文献 (239)

附录 鼠笼转子锥形异步电动机设计(计算实例)

- 一、电磁计算..... (240)
- 二、负荷制动过程计算..... (255)
- 三、轴危险断面疲劳强度校核..... (259)

第一章 概 论

锥形电动机因定子内腔和转子表面作成圆锥形状而得名,它是一种将电动机与制动器两项功能集于一体的电力驱动器具。锥形电动机有锥形旋转电动机和锥形直线电动机。锥形旋转电动机以锥形异步电动机和锥形直流电动机为常见,本书着重讨论锥形异步电动机。

一、锥形异步电动机的工作原理及结构

锥形异步电动机与普通异步电动机的主要不同之处是,除了其内表面呈圆锥形外,为了运行需要都带有附加的机械装置如弹簧、齿轮及摩擦机构等。图 1-1 所示为其电磁系统和弹簧等核心结构。当定子三相绕组接通电源,在气隙中将产生一旋转磁场,当旋转磁场切割呈闭路的转子导体时,将在其中感应电势及电流,导体电流与气隙磁场相互作用产生切向电磁力,使电机旋转。此外,定、转子导体中电流各自建立磁场,两磁场相对静止,还产生相互吸引的作用力。在常规电动机中,该作用力垂直于定、转子表面,即沿径向作用。如果气隙均匀且磁路中不出现任何会引起磁路不对称的情况,则径向力的总和为零,即不会引起任何不平衡磁拉力,相反则产生径向不平衡磁拉力,引起转轴的附加挠度,对于锥形异步电动机,垂直作用于转子表面的作用力 F (见图 1-1),可分解为径向分力 F_1 和轴向分力 F_2 。如果定、转子磁路对称、气隙均匀,径向分力也将互相抵消,但 F_2 则使转子产生从左至右的轴向位移,致使

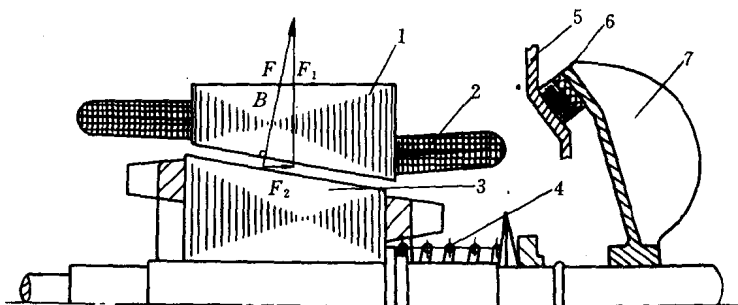


图 1-1 锥形异步电动机工作原理

1—定子；2—定子绕组；3—转子；4—弹簧；5—后端盖；6—静止制动环（固定在后端盖上）；7—风扇制动轮（由制动摩擦环与风扇组成）

风扇制动轮 7 与静止制动环 6 松开，同时压紧了轴上的弹簧 4。当断电时，力 F_2 消失，在弹簧力的作用下，转子向左移动，使连在轴上的风扇制动轮向后端盖上的静止制动环压紧，由于二摩擦块的作用，转子立即停止转动。

图 1-2 所示为用于电动葫芦上的鼠笼转子锥形异步电动机的结构，由定子、转子及端盖等几部分组成。定子包括铁心、定子绕组及机座；转子包括铁心、转子绕组、转轴和装于轴上的风扇制动轮。端盖包括前端盖和后端盖，前端盖与普通电动机的端盖一样，后端盖上装有制动环，与制动轮一起组成制动器。定子和转子间的气隙长度在电动机启动前和启动后是不同的。

由上述可知，锥形异步电动机结构具有如下几个特点：

1) 锥形异步电动机与同规格的普通圆柱形异步电动机相比，其气隙较大，相应的性能指标有所下降，与对应规格普通异步电动机相比，损耗要大 10%~18%，功率因数要低 10% 左右。

2) 定子铁心由 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成，为使定子内腔成锥形，制造时，定子每张冲片的内圆直径沿电动机长度方向按所需锥度角变化。冲剪时，多采用单冲工艺，定、转子冲片冲槽时，须

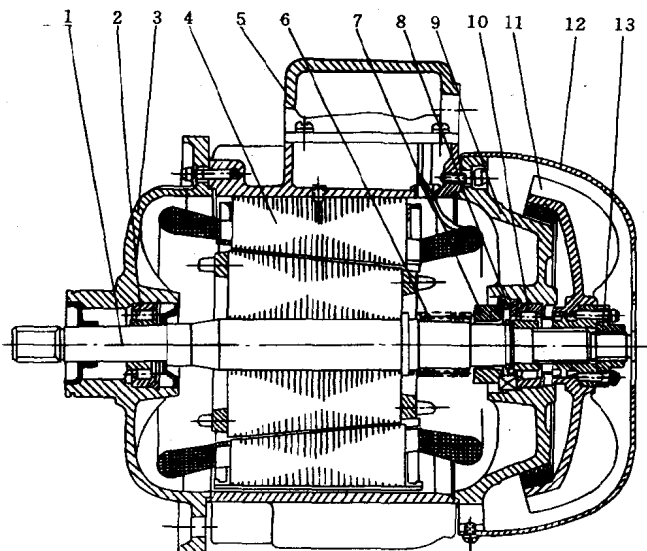


图 1-2 锥形异步电动机结构

1—转子；2—前轴承；3—前端盖；4—定子；5—出线盒(或断电阻器)；6—压力弹簧；7—支承圈；8—径向推力球轴承；9—后端盖(带制动环)；10—后轴承；11—风扇制动轮；12—风罩；13—锁紧螺母

在专用的带分度装置的冲床上冲制，以保证定、转子冲片逐渐按要求的锥度角变化。当定、转子压装后，其锥面还须经过磨削。故锥形异步电动机加工的工时和加工成本都相应增加了。定子绕组可为单层或双层绕组，绕组嵌好后，再将定子压入机座。机座有铸铝和铸铁两种。在国外，电机中心高 160mm 以下的采用铝压铸件；中心高 160mm 以上采用铸铁结构。

3) 转子包括转子铁心、绕组、转轴及风扇制动轮。转子铁心由 0.5mm 厚硅钢片叠压而成。转子绕组分鼠笼型和绕线型两种。风扇制动轮由制动圆盘和制动摩擦环组成，并与风扇连成一体。若如图 1-2 所示，制动圆盘与制动摩擦环装在风扇内侧，则称为内刹式

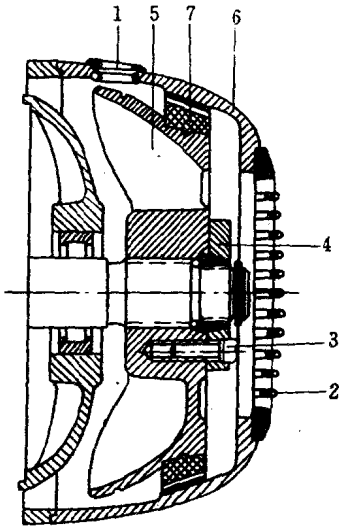


图 1-3 外刹式锥面制动结构

- 1—观察孔；2—通风窗；3—锁紧螺钉；
4—螺帽；5—制动轮（整体式风扇）；
6—制动器端罩；7—制动环

锥面制动。若制动圆盘与制动摩擦环装在风扇外侧，则称为外刹式锥面制动，如图 1-3 所示。一般锥形异步电动机在 13kW 以上的采用外刹式锥面制动结构；13kW 以下的采用内刹式。将电动机的轴承端盖与风扇制动轮制成一体，不仅减少了零部件数，而且防止了制动器发出的热量直接进入电动机内部。采用外刹式锥面制动结构的锥形异步电动机，定子接通电源后，轴向磁拉力将使风扇制动轮连同转子自右向左移动，故转子上的弹簧需装在轴的另一端（即驱动端）。

4) 注意安装场合，若将水平工作的锥形异步电动机垂直安装，需要更换制动弹簧，否则电动机不能正常运行。

5) 某些型号的锥形异步电动机，其轴向窜动量要求为(3~4) mm，这就无法保证传动轴的刚性连接，从而限制了这种电动机的使用范围。

6) 为了承受转子移动时的轴向冲击，一般在径向球轴承的一边装有一个径向推力球轴承，以承受制动时的冲击，径向推力球轴承的内圈装在与制动盘一起转动的凸缘上。在德国德马克 (DEMAG) 公司生产的锥形电动机铭牌上注有 GL 字样时，说明在此电动机上采用了特种耐磨青铜滑动轴承，供无噪音场合使用。

二、锥形异步电动机的用途及发展概况

1924年,德马克公司将锥形异步电动机与制动器结合在一起,组成一种新的起重驱动装置,并获得了专利。由于该装置具有质量轻、结构紧凑、价格便宜、运行可靠等优点而闻名于世,很快在各个领域也得到推广应用。图1-4即为德马克公司生产的电动葫芦。由图可见,该葫芦除将锥形异步电动机与制动器组成一体外,还连同减速装置一起同装于一只卷筒内,结构十分紧凑。

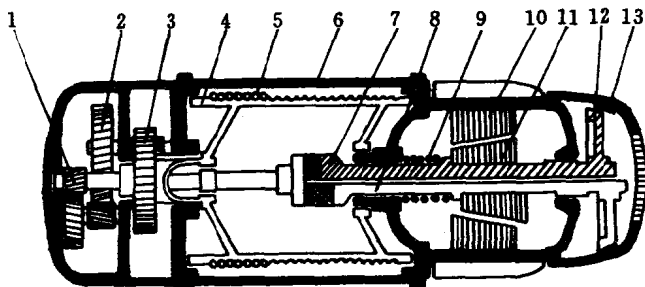


图1-4 电动葫芦示意图

- 1,2,3—齿轮;4—滚筒;5—钢绳;6—外壳;7—转轴(通电位置);
8—转轴(断电位置);9—弹簧;10—定子铁心;11—转子铁心;
12—风扇轮;13—制动环

锥形异步电动机的最初问世,只是为了解决起重机械上用的电动机和制动器结构上的统一问题,但由于锥形异步电动机本身结构和性能等方面所具有的优点,使它的应用范围逐步扩大,归纳起来有如下几方面的用途:

1)在起重设备方面,如绞车、升降机、皮带运输机、锅炉炉门的启闭机构、剪切机、升降平台等机械中作为快速制动用传动装置。

2)在机床或组合机床中,如车床、铣床、磨床、钻床、动平衡机

等之中作为能快速制动的传动装置。

3)在要求精确定位的刀具和工作台中,如刨床、弯管机、多头攻丝机床、弹簧试验机、印刷机、齿条机之中能提供精确定位和及时制动的传动。

4)作为防止事故用于机械上的紧急刹车驱动装置,如打包机、洗瓶机、木材加工机、食品加工机、医疗机械等。

60年代初期,德马克公司生产的锥形电动机有30余种型号及规格,产量较大的有以下4种:

- 1) L型是全封闭无外通风鼠笼型锥形异步电动机;
- 2) K型是全封闭扇冷式鼠笼型锥形异步电动机;
- 3) S型是全封闭扇冷式绕线型锥形异步电动机;
- 4) J型是全封闭扇冷式锥形直流电动机。

70年代初期,德马克公司在汉诺威(HANOVER)博览会上展出了一种新型的BK系列(绕线型锥形异步电动机)。该系列有不同电压等级、两种电源频率(50Hz及60Hz)、单速和双速。80年代,该公司又推出了如下新系列:

- 1) KBA系列是标准鼠笼转子锥形异步电动机;
- 2) SBA系列是标准绕线转子锥形异步电动机;
- 3) KBF系列及KBV系列是起重机械中作运行用的鼠笼转子锥形异步电动机;
- 4) SBS系列是绕线转子力矩制动锥形异步电动机。

近年来,德马克公司不断更新其产品系列,改进电动机性能、改变安装尺寸并向国际IEC标准靠拢,而且使通用性与互换性与普通异步电动机基本系列的情况一致。该公司一直在国际市场享有盛誉,有40多个子公司,一百多个销售点分布于世界各地。此外,德国还有斯达勒(STAHL)公司,该公司以生产防爆电动葫芦、环链葫芦及其所用锥形异步电动机闻名。我国已有德国上述两公司的引进技术及产品。除德国之外,在前苏联、法国、意大利、瑞士、西班牙、日本、保加利亚、英国等12个国家中都有生产锥形电动机

的厂家。

我国从1952年开始引进前苏联产品,1964年引进德马克公司的电动葫芦及锥形异步电动机。1966年开始自行设计,并且形成了我国的锥形异步电动机ZD、ZDY系列(均为鼠笼型转子),与电动葫芦和起重运输机械配套。ZD系列用于提升,ZDY系列为起

表 1-1 ZD,ZDY 系列锥形异步电动机的性能指标

型 号	ZD		ZD		ZD		ZD		ZDY		ZDY		
	11-4	12-4	21-4	22-4	31-4	32-4	41-4	51-4	11-4	12-4	21-4	31-4	
额定功率/kW	0.2	0.4	0.8	1.5	3.0	4.5	7.5	13	0.2	0.4	0.8	1.5	
负载持续率/(%)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	
额定电压/V	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	
额定频率/Hz	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
额定电流/A	0.7	1.3	2.2	4	7	10	16.5	28	0.7	1.3	2.2	4	
额定转速/(r/min)	1380	1380	1380	1380	1380	1380	1400	1400	1380	1380	1380	1380	
效 率/(%)	65	67	73	74	80	82	82	83	65	67	73	74	
功率因数	0.67	0.70	0.75	0.76	0.81	0.83	0.84	0.85	0.67	0.70	0.75	0.76	
轴 向 磁 拉 力 /N	额定电压时		98	147	235	421	686	902	1303	1764	98	147	235
	90%额定电压时		78	118	186	343	549	730	1058	1431	78	118	186
初始启动电流/A	4	7	13	24	45	65	110	180	4	7	13	24	
启动转矩倍数	2.0	2.0	2.5	2.5	2.7	2.7	3.0	3.0	2.0	2.0	2.5	2.5	
最大转矩倍数	2.0	2.0	2.5	2.5	2.7	2.7	3.0	3.0	2.0	2.0	2.5	2.5	
转动惯量/(kg·m ²)	0.006		0.036		0.130		0.390		—		—		
	0.007		0.045		0.160		1.300		—		—		
制动力矩/(N·m)	1.96	4.9	10.78	19.6	42.14	62.72	98	184.2	—	—	—	—	
质 量/kg	16	18	30	38	60	70	115	195	16	18	30	38	

重时行走用。表 1-1 列出湖北咸宁市起重电机厂生产的 ZD, ZDY 系列锥形异步电动机的性能指标。

1985 年,机械工业部委托佳木斯防爆电机研究所组织了对原 ZD、ZDY 系列的更新换代工作。修订了 YEZ, YEZR 新系列的技术标准及技术任务书,该系列的功率范围为(0.25~45)kW。YEZ 系列为鼠笼型转子锥形异步电动机,中心高为(71~180)mm, YEZR 为绕线型转子锥形异步电动机,中心高为(90~225)mm。工作方式为 S_2, S_3, S_4 和 S_6 四种,基准工作方式为 S_3 。有 2, 4, 6, 8 四种极数,中心高在 112mm 以下者,机座采用铝合金结构,超过 112mm 的机座采用灰铸铁。

表 1-2 SBA 系列绕线转子锥形异步电动机的性能指标

型 号	100B2	112B2	125B2	140B2	100B4	112B4	125B4	140B4	*	*	*
									160B4	180B4	225B4
额定功率/kW	2.5	3.6	5.5	9.5	2.1	3	4.6	8.0	15	20	40
负载持续率/(%)	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
额定电压/V	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
额定频率/Hz	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
额定电流/A	5.9	10.4	13.3	22.5	9.8	12.0	15.0	25.0	33.0	44.0	80.0
额定转速/(r/min)	2760	2825	2840	2870	1380	1415	1410	1420	1430	1445	1465
效 率/(%)	76	75	77	80	65	71	73	77	84	85	85
功率因数	0.85	0.70	0.82	0.80	0.51	0.53	0.64	0.63	0.81	0.80	0.83
最大转矩倍数	2.75	3.90	4.10	3.30	4.70	4.70	3.90	4.05	3.70	4.25	3.90
转子开路电压/V	206	240	235	218	—	192	175	168	260	292	330
制动力矩/(N·m)	16.0	32.0	43.0	63.0	38.0	51.0	69.0	130	200	280	540
转动惯量/(kg·m ² ×10 ⁻³)	13.8	24.4	46.4	74.1	13.8	24.4	46.4	74.1	169	310	700
质 量/kg	40	53	76	114	40	53	72	112	205	290	495

* 号表示不能用于提升驱动。

此外,我国还有采用双电动机变速的锥形异步电动机组 ZDS 系列,功率为(0.4~30)kW,其减速器轴端的转速为(5~280)r/

min,共六个规格。在锅炉吹灰器、印刷机上也采用了直线锥形异步电动机。近年来,我国又引进了德马克和斯达勒公司的SBA新系列及PK环链葫芦用锥形异步电动机新系列。表1-2和表1-3分别列出了SBA系列的单速和双速锥形异步电动机参数。

表 1-3 SBA 系列双速锥形异步电动机的性能指标

型 号	112B 4/2	125B 4/2	140B 4/2	112B 8/2	* 125B 8/2	* 140B 8/2	* 160B 8/2
额定功率/kW	0.9/1.8	1.5/3.0	2.5/5.0	0.44/1.80	0.75/3.00	1.2/5.0	2.0/8.0
负载持续率/ (%)	40	40	40	40	40	40	40
额定电压/V	380	380	380	380	380	380	380
额定频率/Hz	50	50	50	50	50	50	50
额定电流/A	3.9/5.7	4.8/9.4	9.5/16.2	3.3/4.9	4.5/8.0	7.5/12.7	11.6/17.2
额定转速/ (r/min)	1455/2680	1465/2615	1470/2865	665/2780	670/2860	655/2870	695/2930
效 率/(%)	62/63	71/64	69/69	42/69	51/72	48/74	54/77
功率因数	0.57/0.77	0.67/0.77	0.58/0.67	0.5/0.8	0.5/0.79	0.49/0.79	0.48/0.91
最大转矩倍数	2.8/2.8	3.35/2.60	3.20/2.95	2.75/3.85	2.00/3.75	2.20/3.25	3.30/3.35
转子开路电压/V	80	176	212	176	138	200	200
制动力矩/ (N·m)	16	28	41	16	24	38	57
转动惯量/ (kg·m ² ×10 ⁻³)	22	41	63	23.8	43	68	161
质 量/kg	53	72	112	53	76	114	205

* 号表示用于提升驱动时,只能用少数制制动。

对比先进国家,我国在生产和应用锥形异步电动机方面都存在一定差距,主要表现在:

1)推广应用的范围比较小,在许多可以应用的领域尚无相应的配套产品。

2)制造水平仍处于国外 60 年代水平(根据 1985 年调查报告)。锥形异步电动机的体积比国外同类产品的要大,消耗原材料多,安装尺寸及功率等级的对应关系都落后于先进国家。

3)品种规格少。原来生产的单速锥形异步电动机仅有一种极数(4极),而国外有2,4,6,8多种极数。国外有多种安装方式,而我国仅有两种。

4)功率等级及安装尺寸不符合国际标准。

5)锥形异步电动机工作制不全。国外有连续运行及负载持续率为15%,25%,40%,60%等工作制,而我国原来仅有负载持续率为25%一种工作制。近年来才发展了多种工作制。

6)锥形异步电动机性能指标落后于国外同类产品。

随着我国现代化建设的需求,锥形异步电动机的应用将会逐步扩大到工业的其他有关领域。为赶上世界先进水平,在机械工业部的组织领导下,多次组团赴国外考察,并召开全国行业会议,分析国内外状况,找差距。有计划地引进,并将我国发展锥形电动机新系列列入发展规划。相信在不久的将来,我国锥形电动机的水平将与其他产品一样,跨入世界先进行列。

三、锥形异步电动机的使用特点

带有自制动的锥形异步电动机,其使用上有如下特点:

1)断续周期性工作制。目前,我国电动机上锥形异步电动机所用的是断续周期性工作制,其负载持续率有40%和60%(对于多速锥形异步电动机的低速电动机取15%或20%)。工作时的功率负载 $P=f_1(t)$ 及温升曲线 $\tau_Q=f_2(t)$ 如图1-5所示。在这种工作制中,工作时间 t' 和停歇时间 t'' 轮流交替,每个工作周期为10min。由于时间短,电机温升来不及达到连续工作时的稳定温升 τ_w' ;停歇时温升下降,也来不及降至环境温度,但每经过一周,起始时温升 τ_Q 会有所上升[图1-5(a)],最后在其稳定工作状态时,温升将在某一范围内波动,且最大值 τ_w 一般 $\tau_w < \tau_w'$,如图1-5(b)所示。