

对感应电动机转子导条材料选择的一些评论

(加拿大) J·H·戴蒙德 等著

黄振坤译 秦全兴 周维良校

简介——在感应电动机鼠笼的设计中，几乎任何一种金属材料都能使用。显而易见，铅因为熔点太低，镁由于燃点太低而都不能使用。其他材料则或者由于成本太高、强度不够、电阻大、导热性差等原因，或者由于包括焊接的工艺性原因而不能使用。这个选择基本上落到了两种材料：铝和铜以及它们的合金上。从制造的最低成本，尤其是从成批生产的角度来考虑，铝的优越性胜过铜。为了确定这两种材料中哪一种更好，这要采用电气、机械、冶金工程师的综合技能。本文在转子导条材料的选择上进行了一些探讨。

1.0 引言

Bonnett和Soukup〔1〕讨论了笼型感应电动机转子故障，包括其原因和影响，并且为了防止出现严重故障，提出了实用的维修方法。然而他们没有就铝及其合金与铜及其合金比较的相对优点进行讨论。Craggs〔2〕，和Harland〔3〕提出了考虑铝的理由，包括在大型感应电动机上使用铝的理由。Craggs对于材料的导电率变化范围和材料的强度范围，尤其是在高温状态下的情况，进行了评论。答案是，由于在这些情况下在导条中发生了较高温度，铝的转子导条不宜在高滑差电机中使用，也不宜在加速极高的惯性负载的电机中使用。比较一下回火和退火后的材料，铝合金的设计温升极限一般低于铜合金。回火后的铜合金通常得到一个几乎两倍于退火后的铝合金的温度范围。然而，回火后的铝得到的温度范围是退火后的铜的两倍。

最近，Lomax〔4〕对于感应电动机鼠笼的疲劳寿命进行了考察。Lomax注意到，在过分不平衡振动期间在高温下，铜导条（还有铝导条）中发生的蠕变故障。他还叙述了由于在持续的加速期间内，由高惯性负载加速引起的故障类型，尤其是T型转子导条的这类情况。Lomax叙述了这样的状况，在起动时，由于导条发生很高的热量，随后是冷却和作为结果而产生的应力状态，从而在连接板顶部开始出现裂缝扩展的现象。在每一次连续起动中，裂缝朝着弓起部扩展。在连接板根部，也许会发生开裂，由于离心力作用，当该连接板被抛入气隙时，就会引起严重故障。负序不平衡会加重振动故障问题〔5〕。甚至一次5%的小的电压不平衡也能造成很大的电流不平衡（达50%），引起转子导条发生过热，和几乎2倍同步频率的振动。

1.1 预测性比较

我们可以从比较分别有铝合金和铜合金转子导条的电机的相应性能开始。图1显示了这两种材料的导条的典型设计。电阻率能够通过合金材料加以调整，使两种转子电阻相似。这样就可以对具有相同的定子机座，但分别具有铜合金或铝合金转子结构的电机转子进行比较了。

我们选了两台具有相同定子机座的电机进行比较。额定容量为10 440KW，13.2KV，60Hz及506A。定子设计温升为60°，而转子设计温升为80°，转子铁心长度为1.27米，直径为1.083米，转子有86条槽。定子外径为1.676米，72槽。铝转子有 $5.45\mu\Omega\text{cm}$ 的电阻率，而铜转子电阻率为 $6.00\mu\Omega\text{cm}$ 。除转子导条材料和槽形之外，这两种转子是相同的。该电机是为应用于压缩机而设计的。

配有铝转子的电机，使用了11年之后，在工作条件下出了故障。接着，装配上了铜转子的电机立刻发运给用户。从那时以来，这台电机又成功地运行了8年以上。已经得到了铝转子电机的一些试验结果。然而，铜转子电机的试验数据尚未得到。

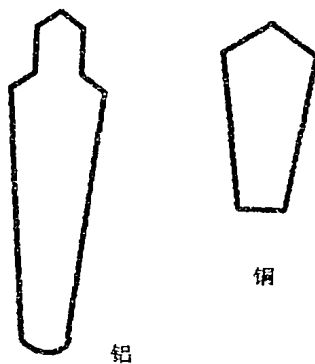


图1: 典型的转子导条形状

人们已研究出了一个预测性程序并作了报导〔6〕。为了确保该模式的准确性，必须预先以很高的精确度确定定子电流。这意味着一切可能会冲击定子电流的作用都必须予以考虑，例如端部漏磁，以及自电流和互电流分量，还有，在定子上反映出来的一切有功分量，以及损耗电流分量。然后定子电流被用作为一个有限元程序的输入，以便能够对转子和定子部件内的磁通进行计算。而且这方法可以重复进行直至取得最终的解答。

对于电压驱动的电机来说，一般可以算得平均磁通值。然而，由于事先不知道磁通分布，也不知道等量的平均值，因此，使用这个算得的系数的过程可能出现大的误差。

作为一种替代，我们使用了开发电路的Nürnberg方法，来获得基本电路模式

[7]。然而，我们的基于Poloujadoff的开发的模式 [8]，考虑到了谐波和可变的互感参数。

正如实验验证所发现的那样，我们的电路法得到了定子电流的一个精确的估计。随着时间而变化的合成电流，被用作向一个二维的有限单元模式的输入，以求得磁通分布。本文的目的并不在于要提供该方法的一种定量分析来获得这些参数，而是要利用该模式来预示两种比较用转子结构的性能。

我们将定子边缘与滑环边缘连系起来的方法是，在瞬息的时空中，将铁心区域和在气隙区域的一个两层的网络连接起来。另外，网络贯穿电机周围整个360°，而不是只复盖一个部分。求解所增加的计算时间并没有增加很高的成本。概念上的简化，通过在一个具有不同材料常数的单个区域里有效地求解，而使该问题变得易于处理。

1.2 转子数据比较

有铝转子或铜转子的电机之间的比较数据在表1中列出。正如人们所注意到的那样，两种导条材料的电机都能够设计得基本上给出相同的运行特性。

表 1

参 数	铝		铜
	test	program	program
满负载			
线电压	13, 200	13, 200	13, 200
功 率	14, 000HP	14, 000HP	14, 000HP
效 率	N/A	96.1%	95.8%
功率系数	N/A	0.933	0.940
电 流	N/A	509A	507A
转 / 每分钟	N/A	1794	1790
无负载			
无负载电流	82.8A	100.5A	92.1A
无负载损耗	254.4KW	260.0KW	260.2KW
热运行			
线电压	5298	5298	5298
输入功率	3759KW	3980KW	4055KW
电 流	514A	514A	514A
转 / 每分钟	1773	1782	1770
锁定转子			
线电压	4278	4278	4278
电 流	880A	957A	963
转 矩	3440N · m	3640N · m	4112N · m

试验数据不是为铜导条转子而取的。

两种转子的转矩转速曲线在图2表明。就最大转矩、在额定速度时的额定转矩和起动转矩而言，这两条曲线是非常相似的，由此可知它们是同个群体的组成部分。所以，笼型感应电动机鼠笼转子导条材料的选择，有赖于除电压、电流、转矩

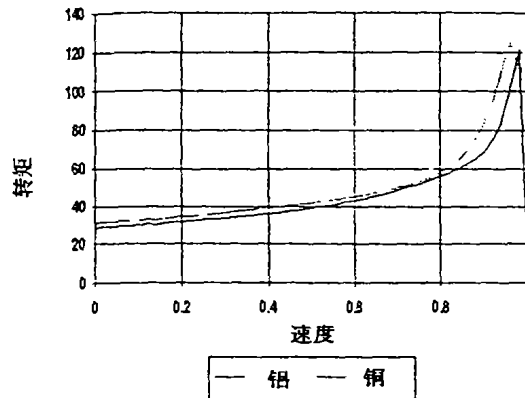


图2: 两种转子的转矩—速度曲线

和额定功率以外的因素。这种选择一般将以下列因素为基础:

- 1、效率
- 2、环境
- 3、应用，例如，工作周期
- 4、起动负载，包括起动频率，负载转动惯量
- 5、电源谐波
- 6、成本

2.0 导条材料选择中的决定因素

人们按照不同的马力、车速和电压制造各种类型的电动机。举例来说，电动机范围可以分成3个部分；小于250马力，250至2500马力，以及大于2500马力。这些是随意的划分，但是一般来说，在失速状态期间，在批量生产的经济性确定使用铸铝转子绕组的地方，由于热容量的影响，大多数小于250马力的电动机有受到定子限制的趋势。处于250至2500马力之间的电动机生产的数量是如此之大，以至于转子组的浇铸是一个经济上的考虑因素，但是，对于这个范围，转子绕组通常是失速容量的决定因素。也可以采用装配式转子鼠笼结构，来经济地制造这样大小的电动机组。大于2500马力的电动机几乎都是采用装配式转子鼠笼结构制造的。装配式鼠笼结构是指模压成型的或者切削加工的铝、铜或者合金导条嵌进转子槽中，然后，端环或短路环不是焊接在就是钎焊在导条上。

如果效率是唯一的考虑，而且高起动电流和低起动转矩都是可接受的，那么纯铜导条和短路环将会产生最高效率的设计。如果要求有较高的起动转矩和较低的起动电流，那么既可使用铜合金，也可以使用铝合金，这尤其适用于大型2极和4极电动机。

一切金属都容易遭受在它们周围空气中的元素的侵蚀。铜和铝都会受到化学环境的侵蚀，但是它们各有不同的易损性窗口。铝会形成一层坚硬的铝氧化物，它可以抵抗大部分化学物对铝的侵蚀，但却抵御不了酸溶液、苛性碱和弱碱以及非氧化性酸的腐蚀。另一方面，铜会受到氨生成物、氧化性酸、盐、硫、硫化物和大多数有机化合物的侵袭。因此，化学环境对材料选择的影响程度可能比效率要大。

也许，影响转子导条材料的选择的单个最大因素，并且最少予以考虑的因素就是应用本身。对于不合乎要求并且引起本文作者之一注意的一些转子故障部件所进行的长达25年的论证工程表明，设计者和用户的误用是大多数故障的主要原因。这里所说的误用，是指设计者和用户没有充分理解 (a) 负载周期，因也就不能充分理解热力的、动力学的和机械的载荷，以及由此产生的应力，(b) 环境及其对材料的影响，(c) 谐波及其对一些转子设计的影响。这种认识上的缺乏导致了材料选择的不当，支撑或固定不当，热老化和疲劳损坏，热超载以及不合理的使用。

对于普通类型的转子鼠笼故障的评审，应有助于读者正确估计应用上的失误达到的程度。比较常见的故障有以下形态：

- 1、有裂缝的钎焊
- 2、有裂缝的焊接
- 3、断裂的导条
- 4、拱起的导条
- 5、熔化的导条
- 6、伸长的断裂导条
- 7、断裂短路环
- 8、喇叭形短路环
- 9、锈蚀

有裂缝的钎焊一般总是钎焊技术差、预加工差，材料质量差或是热应力及/或机械应力太高所造成的。钎焊裂缝也能够由高离心力、不相容材料的钎焊，或者导条材料剥层所引起，这些也都作为不良钎焊出现。例如，图3显示了不良钎焊使导

条电流逐渐通过铁心，由于离心力而引起了铜导条故障。短路环与导条接头和约束力的良好设计，应能消除由于离心力而造成的故障。只有事先对材料和联接技术进行检测，才能防止选择不相容的材料。对于导条和事先的联接测试的检验，将能预防导条裂层问题。细心设计和谨慎选择材料，会减少热的和机械的故障之发生。

428

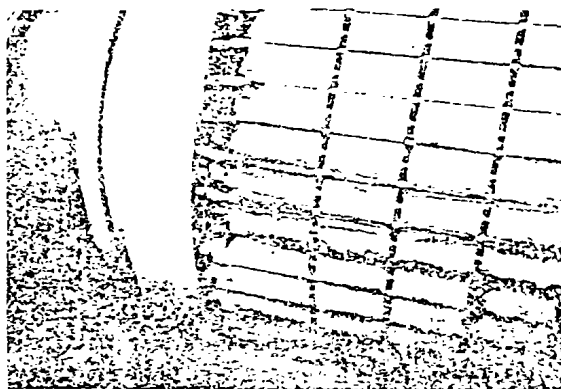


图3：由于不良钎焊，铜导条在离心力作用下发生故障

有裂缝的焊接是由于对材料、焊条、表面准备以及工艺步骤的选择不当引起的。这些故障类型一般可通过遵循以下措施：开发联接结构、合适的工艺规程，材料的相容性，以及在使用之前的机械加工方法来予以防止。不良的根部焊道常常是有裂缝的焊接的起点，而机械循环和热循环起了加速开裂的作用。对于导条和短路环的截面来说，小的焊接面积会由于起动之际的高热，而成为故障点。高热会使焊接点成为塑性状态，而降低它在起动期间承受机械应力的能力。

断裂的导条显露在铁心本身之内，如果切削加工或锻加工在整个导条顶端已产生一个应力梯度时，就更是如此。在起动之际，当电流集中在导条顶端时，只要导条项端的任何地方有损伤之处，电流密度就在该处增强起来。这就造成这一区域局部发热，引起较高的温度。温度升高，材料强度就降低，屈服到较低应力水平。电动机每起动一次，这材料就弯曲一点，直到开始出现裂缝，使问题变得更严重，随后，裂缝呈指数扩大。该导条最终由于疲劳而断裂，在发生断裂之前，电流就在叠片中传导以填补空白。这样就造成了叠片烧坏。

如图4所示，由于切削加工导致的应力集中，导条也会在短路环和导条接触处

产生裂缝。这里，每次起动的热循环，引起短路环膨胀，并使导条朝外弯曲。离心力加剧了这种状况，就会发生疲劳断裂。在每次起动时，短路环热膨胀和收缩会使约束在铁心之处的导条产生疲劳断裂。

如果在短路环——导条接触面或在铁心端部的导条裂缝未被检测出，在电动机起动时，槽内的导条会发生振动。这种振动引起电弧和叠片铁心的逐渐烧环。由于铁心被进一步产生的电弧燃烧，离心力使导条向外移动，进入气隙。因此，隆起的导条是第二阶段的故障，而不是初期的故障。

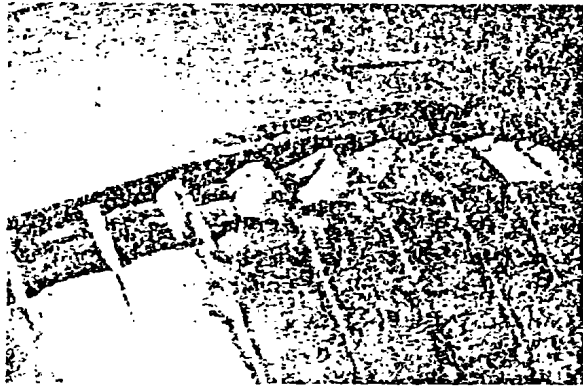


图4: 在铁心外断裂的铜导条

转子导条的熔化，随之熔化金属流入气隙，这是我们只在没有径向风道的电机铝转子绕组上才会遇见的一种现象。它倾向于发生在循环型的应用上，这样的电机使用深鼠笼条，机组须经受高达160%至200%的快速过载，和随后的快速减少的负载。这些电机也许通过一个离合器无载起动，然后强烈地过载一段时间，来起动被驱动的设备。该设备或许也是在一个长的传送装置上，在这里，当传送装置在负载下长距离下滑时，可能象高滑差感应发电机那样运行。在每一种情况下，都有高滑差的快速过载。在这些情况下，导条顶部电流密度大大地增加，导致快速发热。如果这种现象频繁发生，那么在导条顶部的热量就不会被传导出去，温度也不会下降到足以应付下一次应用。其结果便是温度继续上升，直到材料熔化、膨胀，挤到铁心间隙处。在铁心产生裂缝，熔化的铝溅入气隙之前，这种状况会发生多次。与此同时，在每一次冷却和起动程序期间，铝可能已经改变了导条顶部的形状。这既会影响电机平衡，又会影响电机性能。对于在这种类型的周期性负荷期间导条发生的物理现象有了比较透彻的了解，就可以通过设计较大的导条热容量，以及在这些应用中使用熔点几乎是铝的两倍的铜来防止这类故障。光是使用铜并不能完全解决问题，因为热量产生和冷却的变化率仍然会造成铜导条的疲劳开裂，或者引起鼠笼的

膨胀，以致于使转子永久性地变得不平衡。

第二种现象看来只是和制造好的铝鼠笼有联系。在风道处的导条横截面缩小了，随后就出现了裂缝和飞弧。这种现象发生在很深的导条和设计成提供起动转矩形状的导条上。电机机组再一次应用于可能经常存在周期性负荷及接近于失速状态的场合，以及在电源中同时存在谐波的情况。周期性负荷再次使导条顶部发热，直至它们在转子铁心的铁质部分中处于一种塑性状态。

在风道中的气流使风道保持冷却。在离心力作用下，迫使塑性金属贴住铁心槽的顶部并且膨胀起来，填充了槽与导条原来的形状之间的间隙。当铝在铁心槽中冷却时，保持了新的槽形，收缩时就使在风道中的较冷的部分处于应力之下。在多次循环之后，风道中的铝开始在横截面上收缩，因为随着发热到塑性状态的每一个循环，铝发生蠕变，不能恢复到它原来的形状。而且每个发热循环都降低了铝的疲劳强度。其结果是产生裂缝，随后由于起动和高滑差时产生的飞弧而迅速劣化。解决的办法仍然是在设计，热容量以及耐高温铜方面作周密考虑。

短路环开裂比较少见，然而确实会发生。它们一般是焊接或钎焊产生裂缝后所发生的故障情况。裂缝沿导条向下扩展，并且进入短路环，很少有短路环会因为离心力的缘故而发生损坏，除非短路环的设计在机械方面有欠缺。如果短路环尺寸过小，并且存在有机应力冒口，短路环就会在高温中由于机械应力而发生损坏。离心力是通过使用钢的或玻璃丝绑扎的护环来加以控制的。热/机械的故障可通过设计合适的短路环热容量，并且保证有适当的通风，使短路环温度缓慢上升来加以控制。

喇叭形短路环，是热和离心力扩张，使环的材料承受过大的应力的结果，每一次都造成了一点小的弯曲。由于环不能恢复到原先的形状，它就逐渐变大，过了一段时间，其直径会增大。妥善的短路环和导条设计，和/或者使用护环，可以控制这个问题。

腐蚀问题与化学侵袭有关系。鼠笼材料与钎焊材料一样，也会受到侵袭。这个问题可通过对适合环境的材料的选择，以及在鼠笼上使用耐高温涂层来控制。

正如我们对于常见的故障类型的考察中所见到的，大部分故障或者与设计者有关，或者与用户不知道、不理解用途有关，所以，对于鼠笼的选择、设计和结构上的考虑，都要妥善周到。

一台大型感应电动机的每一次起动，都会对转子导条造成一种巨大的能量输入。因此，当起动频率太高，或者起动间隔相互太近，起动频率就会成为严重的问题。一般来说，加速期越长，传输给转子鼠笼的能量就越高。如果鼠笼不能够足够快地耗散这个能量，那么，温度峰值就会随着每次连续起动而上升。因为铝的塑性阶段温度比铜低，所以在相同的应用中，铝比铜先受到应力和疲劳损坏的影响，除非铝笼设计成能减低发热速率，或者其规格可承受较高的热容量。频繁起动机组驱动高惯性负载会导致这种类型的故障。不能严格地坚持起动周期期间起动和过量负载之间定时的规定，就形成了滥用电机的情况。

在向感应电动机供电的电源中的谐波，会影响该电动机的性能。谐波会引起定子、转子绕组中和铁心中的额外损耗。额外损耗意味着额外发热和较高温度。有些电机结构比其他电机更容易受到某些谐波的影响。尤其在高滑差状态下，当电流密集在导条顶部时，深导条鼠笼会具有较高的趋肤效应损耗。这意味着导条顶部最终会到达塑性阶段，而且正如前面所叙述的那样，由于疲劳破坏而可能发生变形。此外，由于铝较低的塑性温度，铝出现故障的风险更大。图5显示了一个铝导条的转子，由于高滑差和电源中过多的谐波含量的综合因素，造成深导条热疲劳损坏。解决这个问题的办法是使用品质高的电源，或者使用那些被设计成能将预期的谐波影响减至最低限度的电动机。

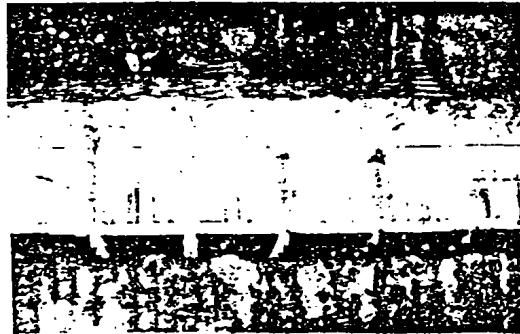


图5：在热疲劳中发生故障的铝导条转子

3.0 结论

很清楚，电动机必须和它的用途相配，这意味着，为该用途进行的恰当设计固然会增加生产成本，但是这样可以降低因用错电动机而进行修理的停机成本。铜由于有较高的耐温性能和较高温度中的应力性能而比铝优越，然而，要是设计、使用

得当，铝可以遍及大部分应用。铝结构的生产成本通常要比铜低。铜的使用防止不了由于设计不当、错用或滥用电动机所造成的故障。

参考文献

5.0 References

- [1] A.H.Bonnett and G.C.Soukup, "Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction Motors, IEEE Trans. IA-24, Nov./Dec., 1988, pp 1124-1130.
- [2] J.L.Craggs, "Fabricated Aluminum Cage Construction in Large Induction Motors," IEEE Trans. IA-12, May/June, 1976, pp 261-267.
- [3] E.C.Hartung, "Fabricated Aluminum Rotor Construction for Induction Motors," IEEE Conf. Pub. 0-7803-2028-x-June, 1994.
- [4] I.D.Lomax, "Assessment of Induction Motor Cage Fatigue Life," 5th International Conference on Electrical Machines and Drives, 11-13 Sept., 1991, London, UK, IEE Pub. 341, pp 281-284.
- [5] J.Brandolino and R.D.Findlay, "Practical Measurement of Symmetrical Component Currents in Induction Motors," Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Halifax, NS, Canada, Sept. 25-28, 1994, 4 pages.
- [6] R.D.Findlay, B.Szabados, S.Lie, S.Spencer, R.Eelmans and M.Poloujadoff, "Placement of Vents to Reduce Shaft Flux in Two Pole Induction Motors, with a Comment on Heating Effects," IEEE Trans. Energy Conversion, Sept., 1992, pp 483-490.
- [7] W.Nürnberg and R.Hanitsch, Die Prüfung Elektrischer Maschinen; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg and New York, 1987.
- [8] M.Poloujadoff, "The Theory of Three Phase Induction Squirrel Cage Motors" Electric Machines and Power Systems, Vol. 13, 1987, pp 245-264.

译自: IEEE Transaction on Energy Conversion,
Vol. 10, No. 3 September 1995