

● 栾茹 著

新型隔爆电动机 设计与应用

XINXING
GEBAO DIANDONGJI

SHEJI YU YINGYONG



化学工业出版社

“数据智能处理方法研究北京市重点实验室”资助出版

新型防爆电动机 设计与应用

● 栾茹 著



化学工业出版社

·北京·

本书侧重于研究一种与蒸发冷却技术相结合的新型隔爆电动机,详细阐述了该新型电动机的研究基础、工程设计推导、理论数值仿真、试验分析、发明创造等,目的是解决目前我国隔爆电动机存在的问题,最后本书简要介绍了该新型隔爆电动机的应用情况,以此来提高我国重型装备制造水平。

本书可供电动机制造企业的工程技术人员、冶炼或矿山机械工业的工程技术人员以及其他使用防爆电动机的工程研究设计人员等使用,同时,也可作为与电气工程学科相关专业的高等院校、科研机构教师、研究人员、研究生等学习专业知识、拓展专业视野的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新型隔爆电动机设计与应用/栾茹著. —北京:
化学工业出版社, 2018. 5
ISBN 978-7-122-31761-2

I. ①新… II. ①栾… III. ①防爆电机-电动机-研究 IV. ①TM357②TM32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 053029 号

责任编辑: 高墨荣

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 宋 夏

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京京华铭诚工贸有限公司

装 订: 北京瑞隆泰达装订有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 13½ 字数 222 千字 2018 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

前言

蒸发冷却是由我国独创的一种新型的冷却技术，目前研制成功的两台 840MV·A 蒸发冷却水轮发电机，在世界瞩目的三峡电站已经无故障运行累计五年以上，另外 50MW 蒸发冷却汽轮发电机，也在我国的电力工业发展史上书写了自主创新的精彩一页，这些投入运行的机组呈现出的突出业绩，赢得了国内外电机行业人士的密切关注和国内电站业主的高度评价。但是蒸发冷却技术目前仅止于大型及超大型发电机，距离其广泛应用到所有电机设备上，还有很长的路没走，况且国内的大、中、小型各种异步电动机在各行各业中广泛应用，数量远超大型及超大型发电机，其中最需要改进的隔爆电动机，市场需求量与研发学术价值最大。所以，电机界一直期待着能有科技工作者将蒸发冷却技术应用到这些大大小小的各种电动机上，推动我国具备完全自主知识产权的蒸发冷却技术往前再迈几大步、再走更远的路。正是在这样的背景下，本书应运而生。

本书在内容上，主要侧重于采用蒸发冷却技术的隔爆型异步电动机，包括电动机的冷却原理、运行原理、减振降噪原理以及与之相关的绝缘、传热技术等；从工程设计层面上，本书详细推导了采用蒸发冷却技术的新型隔爆电动机的电磁设计计算过程，并与常规结构的同类型电动机进行比较性设计，充分说明蒸发冷却技术是解决隔爆电动机所存在的问题的一个有效的手段；从理论研究层面上，本书阐述了解决蒸发冷却隔爆电动机定子密封腔体内形成的气、液、固三相绝缘系统的温度场、电场、流体场的仿真计算问题，以及这些工程物理场耦合后的仿真计算问题，这在学术上尚属首次，为定子绝缘结构与密封腔体设计提供了理论基础；从试验研究层面上，本书详细描述了局部放电试验、传热试验，分析并验证了蒸发冷却方式构成的绝缘与传热系统的合理性与可行性，为隔爆电动机的发

明创造奠定了坚实的基础。

本书在结构安排上，也是按照上述内容的前后顺序展开各章节的内容，研究背景为一个章节；研究基础为两个章节；工程设计为一个章节；理论研究为一个章节；试验研究为两个章节；紧随其后的六个章节是对隔爆电动机发明创造内容进行的阐述；最后一章节是对新型蒸发冷却隔爆电动机应用情况及价值的简介。

本书的主要内容出自笔者与中冶京诚湘潭重工设备有限公司的新产品开发部合作研究的项目，以及北京建筑大学主持完成的住房与城乡建设部面上科技计划项目。中冶京诚湘潭重工设备有限公司，是由世界 500 强的中国冶金科工集团有限公司和湖南华菱钢铁股份有限公司共同出资组建而成的中国重型装备制造业的典范。中冶京诚湘潭重工设备有限公司立足重型装备制造业，满足顾客在相关领域的需求，努力成为中国乃至世界重要的重型工业装备制造基地，公司自主创新研发的高端产品，如 EL 一系列矿用自卸车，居于国内领先水平。正是有了企业的自主创新、研发新产品的魄力与动力，才取得了本书所呈现的研究成果。书中所有的拍摄照片、电动机参数等均系中冶京诚湘潭重工设备有限公司的肖富凯总工程师以及新产品开发部人员提供，没有这些资料，无法完成本书，所以在本书问世之际，向这些合作者表示敬意和诚挚的谢意。本书在完成过程中，引用和参考了书后列出的参考文献，在此对这些作者表示真诚的谢意。

由于从事工程科学研究的资历还比较浅，水平有限，加之所整理的研究资料、成果等尚不够全面，书中难免有不足甚至不妥之处，敬请广大读者批评指正。

著者

目录

第1章 绪论	1
1.1 防爆电动机与蒸发冷却技术历史简介	1
1.2 隔爆电动机的定义	4
1.3 隔爆电动机的冷却方式	5
1.4 隔爆电动机的振动与噪声	7
1.4.1 电动机振动与噪声的来源	7
1.4.2 隔爆电动机振动噪声的严重性	8
参考文献	9
第2章 大型电机的蒸发冷却技术研究基础	11
2.1 引言	11
2.2 常规定子绝缘结构对蒸发冷却电机的限制	11
2.3 蒸发冷却介质简介	13
2.4 蒸发冷却定子绕组直线部分的绝缘与传热	14
2.5 1200kV·A 全浸式自循环蒸发冷却汽轮发电机的研制及运行	17
2.5.1 引言	17
2.5.2 1200kV·A 全 F-113 自循环蒸发冷却汽轮发电机介绍	18
2.5.3 发电机的试验及运行	19
2.5.4 结论	20
2.6 蒸发冷却电机定子绝缘结构的模拟试验及结论	21
2.6.1 本次试验目的和要求	22
2.6.2 试验装置	23
2.6.3 试验数据整理及曲线	25
2.6.4 试验结果分析	29
2.6.5 结论	30

2.7 定子绝缘材料的表面闪络试验	31
2.7.1 试验目的和要求	31
2.7.2 试验装置	32
2.7.3 试验数据整理	33
2.7.4 试验结果分析	34
2.7.5 结论	34
2.8 补充试验	35
2.8.1 补充试验说明	35
2.8.2 试验材料的具体信息	35
2.8.3 试验数据整理	35
2.8.4 结论	37
本章小结	37
参考文献	38

第3章 蒸发冷却电机定子绝缘体系及其传热的分析 40

3.1 引言	40
3.2 卧式蒸发冷却电机定子绝缘与传热系统的组成	41
3.3 电机蒸发冷却技术方案的种类	43
3.4 复合式绝缘系统的电场分布特点	43
3.4.1 复合式绝缘系统的介电常数和电场强度遵循的规律	43
3.4.2 提高耐电压水平的条件	45
3.5 定子大空间与复合式绝缘结构的传热规律	45
3.5.1 定子铁芯及绕组端部的传热	46
3.5.2 定子绕组直线部分的传热	46
3.6 卧式蒸发冷却电机定子绝缘结构的设计原则	47
本章小结	48
参考文献	48

第4章 大中型蒸发冷却隔爆电动机的电磁设计..... 50

4.1 引言	50
4.2 1120kW 蒸发冷却隔爆电动机概述.....	51
4.3 1120kW 蒸发冷却隔爆电动机的样机电磁设计.....	51
4.3.1 常规结构的 1120kW 隔爆电动机的电磁设计	51

4.3.2 1120kW 蒸发冷却隔爆电动机的电磁设计	58
4.3.3 新型隔爆电动机蒸发冷却空间的设计	82
4.4 1120kW 隔爆电动机的新型结构与常规结构的比较	84
本章小结	86
参考文献	86

第5章 新型隔爆电动机定子温度场、电场与冷凝器工效的研究 87

5.1 引言	87
5.2 浸泡式蒸发冷却定子温度场的数值计算	88
5.2.1 定子最热段三维温度场的仿真计算模型	88
5.2.2 计算定子中的热源分布	90
5.2.3 定子铁芯、绕组内涡流场与热场的耦合计算	91
5.2.4 表面沸腾换热系数和等效热传导系数的确定	93
5.2.5 浸泡式定子温度场的计算结果	94
5.2.6 新型电动机启动及过载后的温度分布情况	97
5.3 浸泡式定子槽内的电场数值计算	99
5.3.1 定子槽内二维电场的建模	99
5.3.2 浸泡式定子槽内的电场计算结果	101
5.4 风冷凝管内外三维流体场温度的数值计算	102
5.4.1 风冷管道流体场的建模	103
5.4.2 风冷管道流体场的温度分布结果	104
本章小结	110
参考文献	110

第6章 蒸发冷却定子主绝缘减薄的局部放电试验研究 ... 113

6.1 引言	113
6.2 蒸发冷却介质与绝缘质量的评定	114
6.3 试验中的定子模型	115
6.4 高压试验装置	117
6.5 试验实施过程	118
6.6 试验结果及现象的分析	118
6.6.1 主绝缘厚度为4mm的局部放电试验记录	118

6.6.2 主绝缘厚度为 2mm 的局部放电试验记录	120
6.6.3 主绝缘厚度为 1.8mm 的局部放电试验记录	121
6.6.4 主绝缘厚度为 1.6mm 的局部放电试验记录	122
6.7 试验研究结论	123
本章小结	124
参考文献	124
第 7 章 浸泡式蒸发冷却定子模型传热试验的研究	126
7.1 引言	126
7.2 试验设备及组成	127
7.3 传热试验过程与分析	129
7.3.1 传热试验记录之一	130
7.3.2 传热试验记录之二	132
7.3.3 传热试验记录之三	134
7.3.4 传热试验记录之四	135
7.3.5 传热试验记录之五	136
7.4 传热试验研究的结论	138
本章小结	140
参考文献	141
第 8 章 蒸发冷却隔爆电动机内置式冷凝结构	142
8.1 引言	142
8.2 现有冷凝器的弊端	143
8.3 现有蒸发冷却结构的局限性	145
8.4 内置式冷凝器的技术方案	145
8.4.1 内置式冷凝与密封的原理	146
8.4.2 内置式冷凝与密封的结构	147
8.5 内置式冷凝器的优势	148
本章小结	149
参考文献	149
第 9 章 蒸发冷却隔爆电动机内置式冷凝的密封结构	150
9.1 引言	150
9.2 现有结构存在的问题	151

9.2.1 现有结构介绍	151
9.2.2 现有结构的弊端	152
9.3 新型的定子内置式冷凝密封结构	152
9.3.1 密封结构之一	152
9.3.2 密封结构之二	153
9.3.3 密封结构之三	156
9.4 新型的定子内置式密封结构的优势	158
本章小结	158
参考文献	158
第 10 章 蒸发冷却隔爆电动机定子端部的密封	159
10.1 引言	159
10.2 现有结构存在的问题	160
10.3 新型的定子端部密封结构	161
10.3.1 密封技术的分析	161
10.3.2 新型密封结构的技术原理	162
10.3.3 具体实施方式	165
10.4 新型的定子端部密封结构的优势	169
本章小结	170
参考文献	170
第 11 章 蒸发冷却隔爆电动机的转子冷却结构	171
11.1 引言	171
11.2 现有蒸发冷却电机转子冷却结构的弊端	172
11.3 基于定子蒸发冷却的转子冷却结构	173
11.3.1 原理与结构	173
11.3.2 具体实施方式	175
11.4 新型转子风冷却结构的优势	179
本章小结	179
参考文献	179
第 12 章 蒸发冷却隔爆电动机的优化设计	180
12.1 引言	180
12.2 常规结构优化设计的弊端	182

12.3 基于蒸发冷却介质的优化原理	184
12.4 基于蒸发冷却介质优化设计的完整技术方案	185
12.4.1 基于蒸发冷却介质优化设计的过程	185
12.4.2 基于蒸发冷却介质优化设计的适用范围	189
12.5 基于蒸发冷却介质优化设计的优势	189
本章小结	189
参考文献	189

第13章 蒸发冷却隔爆电动机密封腔体内灌液面的控制

190

13.1 引言	190
13.2 密封腔体内灌液面控制的技术背景	190
13.3 现有的密封腔体内灌液面控制方法的弊端	191
13.4 蒸发冷却隔爆电动机密封腔体内灌液面控制的完整 技术方案	192
13.4.1 控制原理	192
13.4.2 控制的实施过程	193
13.5 密封腔体内灌液面控制方法的优势	196
本章小结	196
参考文献	197

第14章 新型隔爆电动机在工业驱动领域中的应用

198

14.1 新型隔爆电动机样机	198
14.2 新型隔爆电动机在驱动冶炼鼓风机中的应用	200
14.3 新型隔爆电动机在矿山机械中的应用	202

第1章

绪论

1.1 防爆电动机与蒸发冷却技术历史简介

人类在使用电动机从繁重的劳动中解放出来的过程中，面临各种复杂、险峻的工作环境，其中不乏充满粉尘、瓦斯、飞絮、燃油、燃气等易燃易爆物质的恶劣而危险工作环境，所以，在 20 世纪初，人类研制出了能够抵御这些易燃易爆物质的密封性电动机，即防爆电动机。从电动机整个发展历程来看，防爆电动机代表着一个国家先进的电动机设计与制造水平，最先制定出电动机防爆标准的，是德国工业界，从而奠定了以德国为代表的各种防爆型电动机欧洲系列，始终处于世界领先的地位。

我国从新中国成立初期比较薄弱的工业基础上起步，起点就定位在电动机的自主设计与生产能力上，经过 30 多年的发展壮大，于 20 世纪 80 年代可以完全独立制造出与当时国际水平相当的大型防爆电动机，并形成了 YA 与 YB 两大防爆系列产品。在接下来的 30 多年里，欧美等发达国家对电气设备的防爆问题都投入了很大的研究力量，每年都取得了可观的研究成果，具体到防爆电动机上，表现在动力学、燃烧学、电力电子技术、控制技术等方面的研究成果，他们的防爆电动机效率越来越高。而这期间，我国在防爆电动机设计方面却没有取得突破性进展，导致一直落后于德国等防爆电动机工业最发达的国家，主要的问题出现在两个方面。

① 我国的电动机，包括防爆电动机，效率低。据统计，“九五”期间，我

国在用电动机消耗的电能约占全国发电量的 70%，其中防爆型电动机占比超过一半，是最大的耗能大户。所以，从国家“十五”规划开始，将电动机节能降耗列为重要的发展任务，展开了对全国各行各业在用电动机进行的更新换代，落实到防爆电动机上，监管部门主要对电动机绝缘、防护等级、定转子绕组的启动温升与应力、电动机整体的稳定温升等大幅度提高了要求，需要改进防爆电动机的绝缘与冷却。但是，从近十多年的改进效果来看，防爆电动机的绝缘结构、冷却结构设计似乎已经走到了极限，绝缘材料一律采用最高的 F 级（甚至 H 级）而温升采用较低的 B 级来计算，导致防爆电动机的体积较大、材料利用率低、性价比不高。究其原因，笔者认为，是常规绝缘结构与冷却结构，成为了防爆电动机进一步提高设计水平的瓶颈。

② 我国的防爆电动机振动噪声等级居高不下，与最发达国家差距较大。防爆电动机目前基本上采用通风冷却，在电动机运行过程中，自身引起的振动会产生噪声及额外的损耗，风扇及气流运动摩擦会产生一定的机械损耗及较大的噪声，这些振动与噪声对周围环境造成严重的生态污染，同时对机械设备的运行造成明显的影响。举例来说，在防爆电动机使用最普遍的纺织行业里，大家都深有体会，一进入纺织车间，一阵阵巨大的嘈杂声音鼓噪耳膜，令人难以忍受，这种高分贝的噪声除了一部分来自于纺织机本体，更多是来自于驱动纺织机运行的防爆电动机；在大型露天矿山采掘工地，只要发动由防爆电动机驱动的铲车，整个工地噪声隆隆；在冶炼车间，只要启动鼓风机，因振动与强力风扇引起的刺耳噪声扑面而来，还会引起其周围设备的共振。所以，控制防爆电动机的振动与噪声也是我国整个电机行业发展不能回避的现实课题，刻不容缓。

既然常规或者传统的绝缘结构与冷却结构限制了防爆电动机制造水平的提高，广大工程技术人员与科研人员正想方设法利用新结构、新材料、新工艺进行改进性突破。在人们不断探索采用新的冷却介质、新材料、新工艺以提高效率、减振降噪的整个电机发展过程中，一种起初不被看好、却具备相当发展优势的新型冷却方式与绝缘结构悄然而稳步地成长壮大起来，这就是本书专门要研究的蒸发冷却结构，这种结构自提出以来，一直使用在大型水轮和汽轮发电机上，本书首次将其应用到防爆电动机上。

中国科学院电工研究所独立自主、坚持不懈地开创了蒸发冷却大型电力设备的新型冷却技术。从理论基础性公式推导与修正，到大量相关性试验的反复论证，都进行了充分必要而扎实的技术储备。自 20 世纪 70 年代以来，与我国产业部门合作，先后研制成功 1.2MW、50MW 蒸发冷却汽轮发电机和

10MW、50MW、400MW 蒸发冷却水轮发电机,以及实验室自用的蒸发冷却变压器,最令人瞩目的是在世界上最大的水电站,三峡电站,也有两台由我国自主研制成功的 840MV·A 蒸发冷却水轮发电机分别于 2011 年、2012 年投入使用,这些电机经多年运行证明,各台机组均呈现出安全可靠、技术、效益优异、性能稳定、运行管理简便的特点,特别突出的是各台电机的定子绕组温升低且分布均匀,以出色业绩赢得了国内外电机界和电站业主的高度评价,从而奠定了蒸发冷却是继空冷、氢冷、水冷之后的又一种更为先进的大型电力设备的冷却方式的基础地位。在蒸发冷却电机,特别是蒸发冷却卧式电机产业化发展的过程中,研究人员发现蒸发冷却技术不仅可以降低电机的整个体积与损耗、提高功率密度、材料利用率与效率,而且还可以显著降低电机的振动噪声,最有说服力的例证是一台已经使用很长时间的船上驱动用蒸发冷却异步发电机,该电机的电流密度与磁通密度均为同类电机的最高值,使得该电机整体体积与占用空间是同类电机中的最小,进而可以很方便地安装在空间狭窄的船舱内,不仅如此,由于该电机的整个定子都浸泡在蒸发冷却密封腔体里,该电机运行时,蒸发冷却介质阻止了定子的各种振动,进而显著降低了噪声,使得该电机的振动噪声是同类电机中的最低与最优。这一现象说明,蒸发冷却技术不仅适用于解决大型或超大型发电设备的冷却问题,还可以利用其效率高、低振动噪声的优势解决驱动用电机的能耗与振动噪声问题,而我国的防爆电动机目前正需要解决这两个问题,所以,完全有必要来研究如何将蒸发冷却技术应用到防爆电动机上,力争实现我国的防爆电动机制造水平赶超世界一流。

接下来面临的挑战是,蒸发冷却技术尽管已经成熟地应用到大型或超大型发电设备若干年了,但是,以防爆电动机为代表的驱动用电机,从其内部的定、转子结构、工作原理、电磁场分布规律,到其外围机壳、机肋的冷却结构都与大型或超大型发电设备有很大差别,不能照搬已经取得实效的大型或超大型发电设备的蒸发冷却技术,必须重新研究设计蒸发冷却防爆电动机。这项研究工作涉及电磁学、传热学、流体力学、振动学等等多个学科,是多学科交叉的、学术价值高、研究难度大的学术问题,目前已经取得了阶段性成果。本书围绕这项研究工作详细阐述了研究内容及取得的研究成果,并介绍这些研究成果在实际的冶炼、采矿等工业生产中的应用。

1.2 隔爆电动机的定义

根据皮-萨电磁定律,将电能转变为机械能,从而带动负载按照一定轨迹自动运行的装置,称为电动机。参见图 1-1 所示的结构剖面图,异步电动机由旋转的转子、静止的定子、风扇、机壳等组成。机壳主要包括机座、出线盒、端盖等,对电动机内部的各个结构部件起到防护作用。一般普通的空冷异步电动机,由于风扇需要与机壳外通风换热,轴承与端盖之间要留出很大的空隙作为通风道,这种机壳防护形式为开启式,若空隙很小,机壳防护形式为防护式。前已述及,对于处在充满粉尘、瓦斯、飞絮、燃油、燃气等易燃易爆或者有爆炸性危险的环境下的异步电动机,由于是带电运行的设备,一旦其内部的带电部位有星星点点的电火花,就会引起爆炸,后果严重。可见,对于这样的危险环境,必须采取防护等级高的机壳,即密封性与抗破坏性很强的机壳结构,这种结构的防护形式为防爆式,这种带有防爆式防护形式的异步电动机,称为防爆电动机。

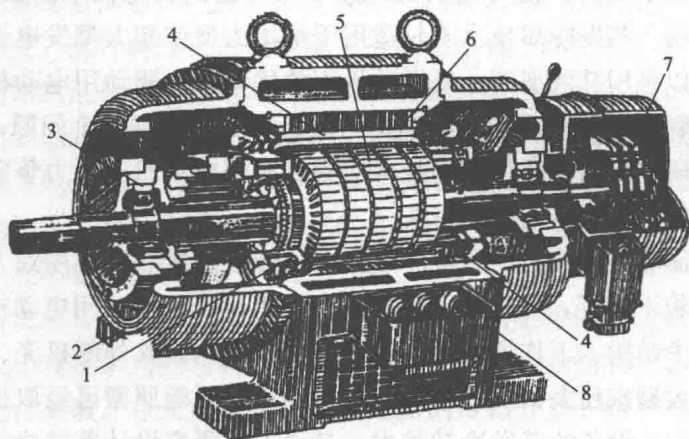


图 1-1 异步电动机剖面图

1, 5—转子; 2—端盖; 3—轴承; 4, 6—定子; 7—风扇; 8—出线盒与机座

在行业内,根据不同的防爆要求,防爆式电动机的种类有隔爆型、增安型、正压型与无火花型四种防爆电动机,其中隔爆型电动机防护等级最高。按照我国的行业标准,隔爆电动机是指机壳外部无明显的接缝与连接结构,机壳能够承受住通过机壳内表面任何接合面或结构间隙进入机壳内部的爆炸性混合物在内部爆炸而不损坏,同时其内部火花不会引起机壳外部由一种、

多种气体或蒸气形成的爆炸性气体环境的点燃，即隔爆电动机的机壳是全封闭式、坚固性极强结构。所以，隔爆电动机的机壳是该类电机区别于其他各类异步电动机的最主要标志。

1.3 隔爆电动机的冷却方式

隔爆电动机是普通卧式电机中的一种，所以，介绍一下卧式电机的冷却方式。在电机运行期间，内部各部件上的温度应始终保持在绝缘材料和金属材料所允许的限度以内，为此必须将运行时电机内部各部件上由于能量转换、电磁作用和机械转动摩擦所产生的损耗热，传递给周围运动的冷却介质（常规如空气、氢气、油、水或其他介质等）。为了保证大型卧式电机的冷却效果，通常进行整体密封处理，冷却介质还要将吸收的热量传递给专门的冷凝器，通过冷凝器内的热交换后，上述损耗才能转移到电机外。与立式电机相比，卧式电机的热负荷要高出许多，所以慎重选择、设计冷却方式对于卧式电机尤为重要。

一般冷却方式与电机的功率、尺寸、电磁负荷损耗密度有关，与冷却介质的物理性能参数及其与发热部件接触的方式有关，与电机所用的绝缘材料等级及金属材料的热物理性能有关，还与电机的效率、经济性和寿命有关。为了提高电磁负荷和材料的利用率，最好的途径是增大单机容量，这主要是依靠电机冷却技术的改进来实现的。比如中小型卧式电机绝大部分是采用强迫空气流动冷却电机，而在大型电机中，冷却方式随容量、转速、电压等级的不同而不同，经过生产实践长期累积基本上逐步形成了一定规律，由于不同国家、不同制造企业具体条件和生产水平的差异，大型电机冷却方式的划分又存在很大的差别。现以汽轮发电机为例，隔爆电动机与此类似，可以参考，世界各国针对不同电机容量已有冷却方式的划分情况，见表 1-1。

表 1-1 常用汽轮发电机冷却方式一览表

冷却方式	定子绕组	空气	氢	水	氢	氢内	水	水	水	油内
	转子绕组	空气	氢内	水	氢	氢内	氢内	水	水	水
	定子铁芯	空气	氢	空气	氢	氢	氢	氢	水	浸油
容量范围 /MW	≤50	50~240	50~200	50~110	100~800	240~1100及以上	500~1100及以上	240~1100及以上	240~500	

续表

使用地区	世界各国	世界各国	中国	世界各国	美国、 德国	美国	德国	英国、 德国	俄罗斯
------	------	------	----	------	-----------	----	----	-----------	-----

根据冷却介质的不同，卧式电机的冷却方式可以分成空气冷却、氢气冷却及水冷却等几种，这些均是发展比较成熟了的常规冷却方式。

(1) 空气冷却系统

一般小型异步电机多采用闭路循环系统，小型同步电机和直流电机及中型电机则采用开路循环系统。在风路设计上以轴向系统居多，也有采用的是径向和轴向混合的系统。不论采用何种风路系统，利用空气冷却的电机共同特点是，结构比较简单，成本较低，冷却效果较差，特别是在高速卧式电机中，引起的摩擦损耗很大，所以在我国 50MW 以上的电机很少使用空冷方式。但是，10MW 以下电动机的大部分仍然主要采用空气冷却，而直流电机中，空冷几乎是其唯一的冷却方式。

(2) 氢气冷却系统

用氢气代替空气作为冷却介质，主要是因为氢气具备热导率大、密度小、不助燃、抑制电晕等优点。最初氢气冷却仅限于绕组表面，但绝缘层内的温度下降很小，这导致氢外冷冷却效果不十分理想。随后开始出现在实心铜线中加进若干根空心不锈钢管，让氢气从钢管中流过以导出铜线的热量，即定子氢内冷方式，还可以将绕组由实心铜线改为空心铜线制成。到目前为止，氢内冷电机形式繁多，现在世界各国生产的 500MW 以下汽轮发电机，氢冷占重要地位。但氢冷也有其不利一面，如需要增加专门的供氢设备和控制设备，进而增加了额外的投资与维修费用，其通风系统结构也较空冷系统复杂，而且在一定条件下，还可能发生爆炸。

(3) 水冷却系统

如果将水的电导率控制在一定的极限之内，水是非常好的冷却介质，它具有较大的质量热容和热导率。在大型电机中，用水冷却绕组时，是让水从制成空心的绕组铜线内流过，用水冷却铁芯时，在铁芯的轭部加装冷却水管来带走热量。但是，在上述的水系统中，一旦水发生泄漏，将极大威胁到电机的绝缘系统，导致恶性的故障。

上述三种冷却方式的冷却效果呈递级式增强，与之相应的是电机主要参数线负荷的增大、定转子电流密度也明显增加，表 1-2 给出的是卧式电机不同冷却方式下的热负荷。