

制冷并联机组压缩机台数的方案设计

刘群生¹, 张冰¹, 马越峰², 马彦军³

(1. 河南牧业经济学院能源与动力工程学院, 郑州 450011;

2. 北京市京科伦冷冻设备有限公司, 北京 101302; 3. 河南易之禧贸易有限公司, 郑州 450000)

摘要: 在分析制冷并联机组节能原理的基础上, 从产品设计的角度出发, 比较了同型号与不同型号压缩机并联方案的特点, 前者是并联机组产品设计的优先考虑方案, 且压缩机的台数以 3 ~ 6 台为宜。此研究为并联机组的设计制造和推广应用提供了依据。

关键词: 制冷; 压缩机台数; 并联机组; 方案设计; 节能; 能量调节; 能级

DOI: 10.16711/j.1001-7100.2016.07.016

Scheme design of compressor number for a parallel refrigeration unit

Liu Qunsheng¹, Zhang Bing¹, Ma Yuefeng², Ma Yanjun³

(1. School of Energy and Power Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450011, China;

2. Beijing Jingkelun Refrigeration Equipment Co., Ltd, Beijing 210004, China;

3. Henan Yizhixi Trade Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Based on the analysis of energy saving principle of a parallel compressor unit from the view of product design, the characteristics of parallel compressor units with same capacity and different capacity compressors were compared. The former should be the prior scheme for product design of a parallel compressor unit, the range of the compressors number recommended is from 3 to 6. The study will provide the basis of design, manufacture and application of a parallel compressor unit.

Keywords: Refrigeration, Compressor number, Parallel compressor unit, Scheme design, Energy saving, Capacity regulation, Capacity grade

1 引言

制冷领域的并联机组, 通常是指使用氢氯氟烃(HCFCs)、氢氟烃(HFCs)类制冷剂, 两台或两台以上的制冷压缩机集成于一个机架而服务于多台蒸发器的制冷机组, 它一般由机架、压缩机、排气集管、供液集管、回气集管、油分离器、储液器、干燥过滤器、各种截止阀、多种控制阀和电气控制系统组成, 多台压缩机具有共同的蒸发压力和冷凝压力, 能根据制冷系统负荷自动进行能量调节, 能实现压缩机的均匀磨损, 并有占地面积小、压缩机逐台启动对电网冲击小、易于实现集中控制及远程控制、运行可靠等优点。制冷并联机组(以下简称“并联机组”)有很多种分类方法, 根据压

缩机的类型, 可分为涡旋并联机组、活塞并联机组和螺杆并联机组等; 根据与其配套的冷凝器类型, 又可分为风冷并联机组、水冷并联机组和蒸发冷并联机组等; 根据压缩机是否为同型号, 可分为同型号压缩机并联机组和不同型号压缩机并联机组, 通常所说的并联机组均指前者。并联机组的原理图如图1所示。

目前对压缩机并联技术方面的研究, 主要集中在空调领域, 且多以涡旋压缩机的两台并联为研究对象^[1-5]。空调领域与制冷领域的并联机组方案设计有明显的不同。空调并联机组一般为标准产品, 即制造商根据使用的空调压缩机的情况, 通过仿真、实验等确定并联机组设计方案, 并测试产品的各项性能, 之后经销商、终端用户根据制造

收稿日期: 2016-03-30

基金项目: 2015年度河南省重点科技攻关项目(152102310332)、2015年度河南省高等学校重点科研项目(15A470016)资助。

作者简介: 刘群生(1974-)男, 硕士/讲师, 研究方向为制冷与食品冷链技术。

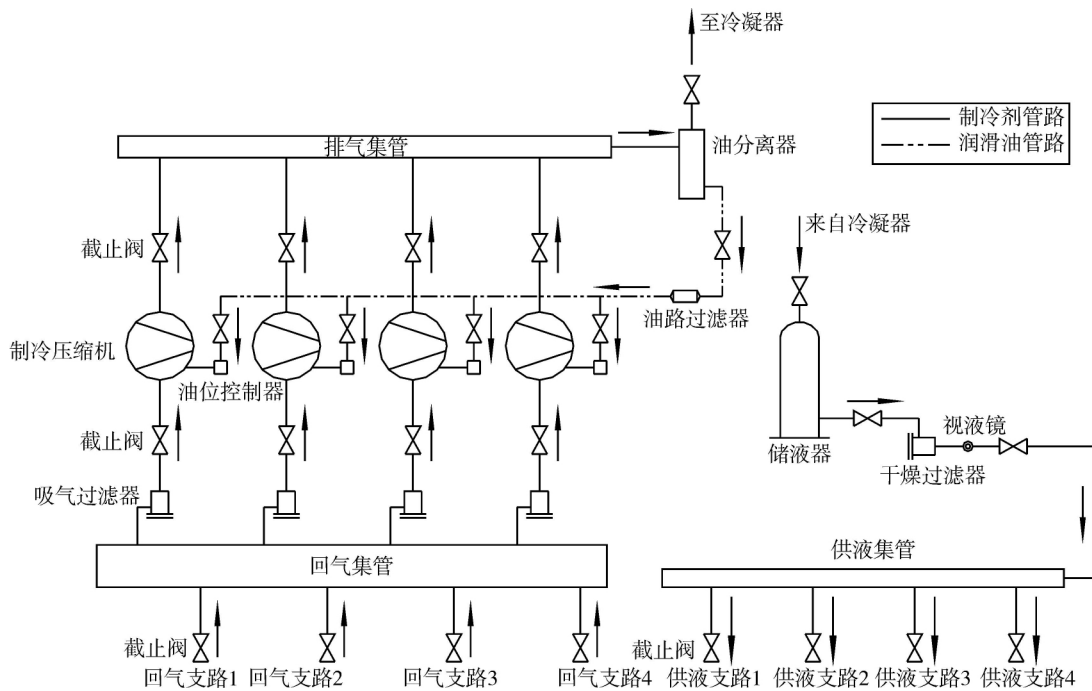


图 1 并联机组原理图

Fig. 1 Schematic illustration of a parallel compressor unit

商的样本资料“选用”空调并联机组应用于实际工程,这种标准化的产品设计的原因,是空调机组的实际应用情况相对单一。而采用并联机组的制冷工程项目(业内也称之为“冷冻工程项目”),实际情况复杂多变,常常需要根据每个工程项目的具体情况,用户化地“订做”并联机组作为制冷系统的冷源。尽管许多并联机组制造商也提供产品样本,但能直接“选用”而应用于制冷工程项目的情况非常少见。

在并联机组的工程应用方面,熊克非^[6]等对半封螺杆并联机组、半封活塞并联机组和半封双级活塞并联机组的能效进行了对比,认为半封螺杆并联机组在大型制冷项目中有更广阔的前景;黄劲松^[7]介绍了双级活塞压缩机并联机组在冻结系统中应用及设计中应注意的问题。在并联机组的产品设计方面,刘鹏^[8]等介绍常见的几种油位调节器(即“油位控制器”)在并联机组中的应用,对每种形式的油位调节器进行分析比较和实验研究,阐述了它们的工作原理和结构特点;杨萍^[9]等用有限元数值模拟对四台活塞压缩机组成的并联机组的振动情况进行了定性分析;于世涛^[10]用有限元数值分析对并联机组振动的研究情况表明,双层框架结构可有效减少振动的产生

和传递。

除了油位控制器的选择、振动情况分析,制冷领域的并联机组的产品设计还要考虑很多因素,如压缩机的类型和台数、蒸发器的分组情况、冷凝器的类型、是否设置过冷器等。本文就并联机组的节能原理、压缩机台数的方案设计进行讨论,为并联机组的产品设计和推广应用提供理论依据。

2 并联机组的节能原理

在设计一个制冷系统时,往往是根据最恶劣工况选择主机的制冷量,而实际运行时系统负荷常常随外界条件的变化而变化,也就是说制冷系统经常处于部分负荷状态,因此需要不断调节主机的制冷量。在制冷负荷不是特别大的情况下,用单台带能量调节的大功率压缩机通常能满足制冷系统的冷量需求,但节能效果欠佳。其原因是带能量调节的单台压缩机在部分负荷条件下工作时,虽然制冷剂气体压缩功几乎是随制冷量减小而成比例地减少,但整台压缩机的机械功耗却几乎维持不变。因此,采用多台压缩机代替单台压缩机,在部分负荷运行时可实现节能^[11, 12]。对同一制冷系统中分别采用单台压缩机与四台压缩机

时卸载特性的研究表明^[13] ,对外输出冷量分别为 75%、50%、25% 时 ,后者比前者分别节能 11%、27%、42%。尽管文献 [13] 的研究是针对螺杆压缩机进行的 ,但其节能原理同样适用于使用涡旋压缩机或活塞压缩机的场合。朱兴旺^[14] 等应用于超市冷藏陈列柜的并联机组进行了实验研究 ,与单机机组的试验比较与分析表明 ,以并联机组为主机的制冷系统蒸发压力稳定 ,有显著的节能效果。王起霄^[15] 等的研究结果表明 ,与单台连续能调的螺杆压缩机、单台二级能调的活塞压缩机相比 ,并联机组节能效果最好。

3 压缩机台数的方案设计

总的来说 ,对于给定的制冷负荷 ,并联机组压缩机的台数与制冷系统冷负荷的变化特性、选用单级还是双级压缩机、压缩机的类型(指涡旋、活塞还是螺杆压缩机) 等因素有关。

制冷系统冷负荷的变化特性是指冷负荷随时间的变化特点、部分负荷的特点等 ,如速冻隧道、速冻库这样的制冷系统 ,冷负荷集中 ,几乎不用考虑其随季节(环境温度) 等的变化 ,主要考虑货品

通过冻结点时的最大冷负荷和释放显热过程的冷负荷即可。而不分间的一座大低温冷库(冻结物冷藏间)、多间低温库的冷负荷特点与速冻应用时有明显的不同 ,而且它们两者的情况也有所区别 ,前者的部分负荷特点主要受季节的影响 ,后者的部分负荷除了受季节的影响 ,蒸发器的分组情况也是重要的影响因素。

关于选用单级压缩机还是双级压缩机 ,这主要由实际工程所需的蒸发温度决定 ,还要考虑制冷剂的类型、冷凝温度、压缩机的类型。从控制排气温度的角度出发 ,一般来说压力比不大时选用单级压缩机 ,否则选用双级压缩机。不过 ,即便蒸发温度为 -45℃ 左右 ,若配合油冷却器和制冷剂冷却型经济器 ,采用单级螺杆压缩机也是可行的方案。选用单级还是双级压缩机 ,其确定原则大体与单机制冷机组相同 ,在此不再详述。

制冷领域的并联机组常用的压缩机类型有涡旋压缩机、活塞压缩机和螺杆压缩机 ,一般来说 ,前者的单台冷量较小 ,后者的单台冷量较大 ,而活塞压缩机的单台冷量介于二者之间 ,这三种压缩机的名义输入功率的大致范围如表 1 所示。

表 1 三种压缩机的名义输入功率范围

Tab.1 Range of nominal input power for three types of compressors

| 压缩机类型 | 涡旋压缩机 | 活塞压缩机 | 螺杆压缩机 |
|--------------------|--------|--------|----------|
| 单台压缩机的名义输入功率/匹(HP) | 3 ~ 15 | 5 ~ 50 | 30 ~ 300 |

表 2 不同方案的压缩机台数及单台压缩机冷量

Tab.2 The numbers of compressors and capacity of each compressor for different options

| 压缩机台数 n | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------|----|----|----|----|----|
| 单台压缩机冷量 Q_i /kW | 30 | 20 | 15 | 12 | 10 |

3.1 同型号压缩机并联

对一个确定的冷负荷 ,理论上讲一套并联机组能采用的压缩机数量有多种方案。以冷负荷 Q_0 为 60kW 为例 ,若按压缩机为同型号来选配 ,则压缩机的台数 n 可以是 2 ~ 6 台 ,如表 2 所示 ,甚至台数可以更多。

不过 ,在实际工程应用中 ,制造商提供的压缩机系列产品的冷量不可能是连续的 , n 台压缩机的冷量之和 $\sum_{i=1}^n Q_i$ 恰好等于冷负荷 Q_0 的可能性很小。此时 ,根据工程的实际情况 ,可使 $\sum_{i=1}^n Q_i$ 略

小于 Q_0 ,例如在蒸发器分组较多的情况下 ,所有蒸发器均处于制冷状态的概率不大 ,一部分会处于正常温度停机状态或融霜状态。除此之外 ,还应综合考虑以下因素:

(1) 能级要求

同型号压缩机组成的并联机组 ,压缩机台数越多 ,能级越多 ,节能效果越好。

(2) 占地面积

并联机组的占地面积主要取决于压缩机的台数 ,压缩机的台数越少 ,则并联机组的占地面积越小。因为对单台压缩机来说 ,其体积并不是随冷量的增大而成比例增大。

(3) 成本

单台压缩机的冷量越大, 往往其单位冷量的价格越低。压缩机的台数较多, 压缩机的总价以及与之配套的电气控制部件(如交流接触器等)的总价等也较高。机架、集管等的成本也往往会有所提高, 因此并联机组的成本也较高。

(4) 蒸发器分组

最简单的情況是蒸发器不需分组, 即多台蒸发器同开同停, 此时可把多台蒸发器当作“一个大的蒸发器”来对待。例如, 一个不分间冷库, 用多台冷风机作蒸发器。

其次, 蒸发器恰好能等分为 n 组, 此时应优先考虑选压缩机的台数为 n 。例如, 一个冷库等分为 4 间, 每间冷库中的多台蒸发器(或只有一台)为一组, 每组蒸发器同开同停。

当蒸发器的组数过多时, 应适当将一些组合并, 并尽可能使每组的负荷大体相等。

同型号压缩机组成的并联机组, 压缩机的台数 n 即为输出的能级数(压缩机全停时输出冷量为零不予考虑, 下同), 冷量输出范围为 $1/n \sim 1$ (实际上应该为 $Q_0/n \sim Q_0$, 下同), n 越大, 能级越多, 冷量输出范围越大。当 $n=6$ 时, 冷量输出

范围为 $1/6 \sim 1$ (16.7% ~ 100%), 此范围几乎能满足所有制冷工程的需求。因此, 制冷领域的并联机组的压缩机台数以 3 ~ 6 台为宜。

方案 1 为四台同型号压缩机并联。以总制冷量为 60kW 为例, 每台压缩机的冷量为 15kW, 可获得四个能级: 1/4、2/4、3/4、4/4, 冷量输出范围为 $1/4 \sim 1$ (25% ~ 100%)。

3.2 不同型号压缩机并联

选用多台不同型号的压缩机来设计并联机组, 可获得更多的能级。为了方便与方案 1 比较, 以下多台不同型号压缩机的并联方案均按总制冷量为 60kW。

(1) 方案 2

采用四台不同型号压缩机, 以 5kW + 10kW + 20kW + 25kW 的组合为例, 可获得十二个能级, 分别为 $j/12$, 其中 $j=1, 2, \dots, 12$ 。假设制冷系统的部分负荷按运行时间等概率地出现, 则不同冷量输出(即“能级”)时压缩机的组合情况及压缩机的运行概率分别如表 3、表 4 所示。表中分别用 A、B、C、D 表示制冷量为 5kW、10kW、20kW、25kW 的压缩机。

表 3 不同能级时压缩机的组合情况(方案 2)

Tab. 3 Combination of compressors at different capacity grade for scheme 2

| 冷量输出/kW | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
|---------|-----------------------|-----------|-------|-----------|-------------|-------------------|
| 压缩机组合 | A | B | A + B | C | (A + C) / D | (A + D) / (B + C) |
| A | √ | | √ | | (√) | (√) |
| B | | √ | √ | | | √ |
| C | | | | √ | (√) | √ |
| D | | | | | √ | (√) |
| 冷量输出/kW | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 压缩机组合 | (A + B + C) / (B + D) | A + B + D | C + D | A + C + D | B + C + D | A + B + C + D |
| A | (√) | √ | | √ | | √ |
| B | [√] | √ | | | √ | √ |
| C | (√) | | √ | √ | √ | √ |
| D | √ | √ | √ | √ | √ | √ |

表 3 中“压缩机组合”行中的“(A + C) / D”, 分子表示按控制逻辑 1(压缩机运行台数最少)时压缩机的组合情况, 分母表示按控制逻辑 2(小功率压缩机优先)时的压缩机组合情况, 下同。“√”表示按控制逻辑 1 时要用到这台压缩机,“(√)”表示按控制逻辑 2 时要用到这台压缩机, “[√]”表示两种情况都要用到这台压缩机, 下同。

表 4 压缩机的运行概率(方案 2)

Tab. 4 Operating probability of different compressors for scheme 2

| 压缩机编号 | A | B | C | D |
|---------|------|------|------|------|
| 运行概率 I | 5/12 | 7/12 | 6/12 | 7/12 |
| 运行概率 II | 8/12 | 6/12 | 8/12 | 6/12 |

注 “I”表示控制逻辑 1,“II”表示控制逻辑 2,下同。

(2) 方案 3、方案 4

不同型号压缩机并联时,较少的压缩机台数也能得到较多的能级。方案 3:三台压缩机,冷量分别为 10kW、20kW、30kW。方案 4:仍为三台压缩机,但是改变压缩机之间的冷量差,冷量分别为 15kW、20kW、25kW。则此两种方案的不同冷量输出时压缩机的组合情况及压缩机的运行概率分别如表 5~表 8 所示。

表 5 不同能级时压缩机的组合情况(方案 3)

Tab. 5 Combination of compressors at different capacity grade for scheme 3

| 冷量输出/kW | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|---------|----|----|---------|-----|-----|-------|
| 压缩机组合 | A | B | (A+B)/C | A+C | B+C | A+B+C |
| A(10kW) | √ | | (√) | √ | | √ |
| B(20kW) | | √ | (√) | | √ | √ |
| C(30kW) | | | √ | √ | √ | √ |

表 6 压缩机的运行概率(方案 3)

Tab. 6 Operating probability of different compressors for scheme 3

| 压缩机编号 | A | B | C |
|---------|-----|-----|-----|
| 运行概率 I | 3/6 | 3/6 | 4/6 |
| 运行概率 II | 4/6 | 4/6 | 3/6 |

表 7 不同能级时压缩机的组合情况(方案 4)

Tab. 7 Combination of compressors at different capacity grade for scheme 4

| 冷量输出/kW | 15 | 20 | 25 | 35 | 40 | 45 | 60 |
|---------|----|----|---------|-----|-----|-----|-------|
| 压缩机组合 | A | B | (A+B)/C | A+B | A+C | B+C | A+B+C |
| A(15kW) | √ | | (√) | √ | √ | | √ |
| B(20kW) | | √ | (√) | √ | | √ | √ |
| C(25kW) | | | √ | | √ | √ | √ |

表 8 压缩机的运行概率(方案 4)

Tab. 8 Operating probability of different compressors for scheme 4

| 压缩机编号 | A | B | C |
|---------|-----|-----|-----|
| 运行概率 I | 4/7 | 4/7 | 4/7 |
| 运行概率 II | 5/7 | 5/7 | 3/7 |

将以上四种方案的主要情况汇总于表 9 中。

表 9 四种方案的对比

Tab. 9 Comparison of the four schemes

| | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 4 |
|--------|------------|-------------|--------------|------------|
| 压缩机情况 | 4 台同型号 | 4 台不同型号 | 3 台不同型号 | 3 台不同型号 |
| 能级数量 | 4 | 12 | 6 | 7 |
| 冷量输出范围 | 25% ~ 100% | 8.3% ~ 100% | 16.7% ~ 100% | 25% ~ 100% |

由上面的分析,将方案1~方案4进行比较可知:

(1) 从表4、表6和表8中可知,在用不同型号压缩机组成并联机组的每种方案中,不论采取何种控制方案,压缩机的运行概率总体来说还算均衡,这意味着基本能实现压缩机的均匀磨损。不过得出此结论的前提是“假设制冷系统的负荷比例按运行时间等概率地出现”。

(2) 用不同型号压缩机组成的并联机组能获得更多的能级,即便适当减少压缩机的台数,其能级数也较为丰富,用此方案易获得更好的节能效果。

(3) 恰当的选择每台不同型号压缩机的冷量(方案2),能获得平稳的、等差数列般的能级,此时并联机组的冷量输出很均匀,覆盖范围很宽(8.3%~100%)。

(4) 减少压缩机台数,并恰当选择每台压缩机的冷量,对比方案3与方案4,每台压缩机的冷量更靠近平均冷量(Q_0/n ,总冷量与压缩机台数之比)的方案4,可得到较多的能级和较均匀的冷量输出,除了25kW与35kW之间冷量变化为1/6倍 Q_0 外,其他能级间均以1/12倍 Q_0 变化,而方案3各能级间的冷量间隔为1/6倍 Q_0 。不过,方案3的冷量输出范围更宽(16.7%~100%)。此规律也适用于三台以上不同型号压缩机组成的并联机组。

虽然不同型号压缩机并联在压缩机台数、能级数量和冷量输出范围等方面优势明显,但对其的综合评价还要考虑以下因素:

(1) 控制设计

在实际应用中为实现更多的能量调节级数,势必会出现并联机组中较小冷量的压缩机频繁开停,尤其是在负荷变化较快的时候,能否实现比同型号压缩机并联机组更加节能的目的,还要看实际制冷系统负荷变化的特点。若按压缩机运行台数最少的控制逻辑设计程序,则需要有精确而又复杂的冷负荷测控系统,这将使并联机组的成本大大增加。

(2) 均匀磨损

不同型号压缩机并联很难实现压缩机的均匀磨损,并联机组的整机寿命将大打折扣。而同型号压缩机组成的并联机组,由于每台压缩机的

“地位”是一样的,实现压缩机的均匀磨损非常方便,可记录每台压缩机的运行时间,需要增加冷量输出时优先启动运行时间最短的压缩机即可,容易保证整机的寿命。

(3) 运行干扰

不同冷量的压缩机运行时很有可能会相互干扰,例如,恰好是最小冷量和最大冷量的压缩机在运行,前者可能达不到正常的吸气量;同时,压缩机的油平衡也可能会出现问题。这无疑增加了并联机组的设计难度。

(4) 设备制造

采用不同型号压缩机并联的设计方案,压缩机规格多,这给并联机组的制造带来了诸多不便,如多型号压缩机的备货;最小冷量和最大冷量之间差距较大时,压缩机的安装尺寸、接管尺寸、整体尺寸等可能会有较大不同。

4 结论

综上所述,对不同方案的对比和分析可得到如下结论:

(1) 同型号压缩机并联机组的工程实用性强,压缩机能实现均匀磨损,整机寿命长。压缩机规格少,易备货,机组的装配比较简单。增加压缩机的台数,可获得较多的能级和较大的冷量输出范围,压缩机的台数 n 即为并联机组的能级数,冷量输出范围为 $1/n \sim 1$ 。

(2) 不同型号压缩机并联机组,即便压缩机台数较少,也能获得较多的能级,且冷量输出范围较大,但控制程序复杂,实现压缩机的均匀磨损很困难,设计和制造难度大,只适合要求的能级较多、冷量输出平稳等特定场合。

(3) 设计并联机组时,多台同型号压缩机并联应优先考虑,压缩机的台数以3~6台为宜。

参考文献

- [1] 严庆云,李栋梁. 涡旋压缩机的并联使用[J]. 制冷与空调, 2007, 7(4): 78-81.
- [2] 宋良勇. 并联式涡旋压缩机应用实例分析[J]. 制冷与空调, 2007, 7(5): 81-82, 77.
- [3] 徐虹玲. 并联涡旋式压缩机油平衡特性的试验研究[J]. 制冷与空调, 2013, 13(5): 55-57.

- [4] 吴伟军, 钟建法, 彭仟能. 并联涡旋式压缩机在空气源热泵机组中的应用分析[J]. 制冷与空调, 2013, 13(1): 55-58.
- [5] 彭雨, 林创辉, 欧阳惕, 等. 双涡旋压缩机并联系统设计和应用研究[J]. 洁净与空调技术, 2015(1): 94-96, 100.
- [6] 熊克非, 马越峰, 李天社. 氟半封螺杆并联机组[J]. 冷藏技术, 2005(3): 42-44.
- [7] 黄劲松. 氟双级多机头并联机组在冻结中的应用及设计注意事项[J]. 冷藏技术, 2006(1): 45-47.
- [8] 刘鹏, 董颖, 张乐平. 油位调节器在并联机组中的应用[A] // 第二届中国制冷空调专业产学研论坛论文集[C]. 北京: 中国制冷空调工业协会, 2013: 239-241.
- [9] 杨萍, 代小军, 黄鑫, 等. 活塞并联压缩机振动有限元分析的探讨[J]. 流体机械, 2014, 42(1): 51-53.
- [10] 于世涛. 活塞式并联机组振动特性分析[J]. 制冷与空调, 2014, 12(12): 33-35.
- [11] 张建一, 李莉. 制冷空调节能技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [12] 张建一, 魏鹏威. 双级制冷压缩机配置的节能优化[J]. 低温与超导, 2013, 41(2): 66-70.
- [13] 卜啸华. 螺杆式制冷机的节能途径[A] // 上海制冷学会年会论文集[C]. 上海: 上海制冷学会, 1989: 123-129.
- [14] 朱兴旺, 时阳, 白宝安, 等. 冷藏陈列柜多机并联压缩机节能的实验研究[J]. 流体机械, 2005, 33(7): 1-4.
- [15] 王起霄, 王洪波, 相龙良, 等. 冷库改造工程设计与压缩机的最佳选择[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2008, 24(6): 755-758.

(上接 32 页)

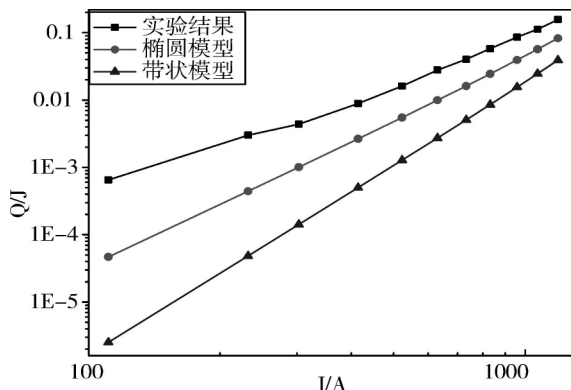


图7 积分法的结果与 Norris 模型计算结果比较

Fig. 7 Comparison between integrate results and calculation value by Norris model

实验中的误差来源主要有三个方面: (一) 测量仪器的误差; (二) 观测误差(包括计算方法产生的误差); (三) 计算时误差放大率。

4 结论

本文设计了一种较为新颖的基于积分法测量高温超导电流引线交流损耗的系统。该测量装置是基于 NI PXI 采集控制设备和 LabVIEW 软件开发, 可以实现快速自动测量大型超导体的交流损耗。通过 NI 公司的数据采集控制系统测量了矩形骨架高温超导电流引线在 47Hz 时的交流损

耗。实验结果表明, 该测量系统能够很好地测量高温超导电流引线的交流损耗。

参考文献

- [1] Eduard Maievskiy, Marian Ciszek. Hysteretic magnetization losses of HTS tapes in coaxial AC and DC magnetic fields [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 8200504.
- [2] Fang Jin, Shen Zheng, Zhang Hongjie, et al. Measurement and Numerical Calculation of AC losses in second-generation high temperature superconductor current leads [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(1): 0048-0053.
- [3] Demko J A, Lue J W, Gouge M J, et al. Practical AC loss and thermal considerations for HTS power transmission cable systems [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 1789-1792.
- [4] Vellege G, Metra P. An analysis of the transport losses measured on HTS single-phase conductor prototype [J]. Superconductor Science and Technology, 1995(8): 476-483.
- [5] 张国民. 高温超导线材及线圈的交流损耗[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003: 2-10.
- [6] 王银顺. Bi 系高温超导体交流损耗的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 1998.