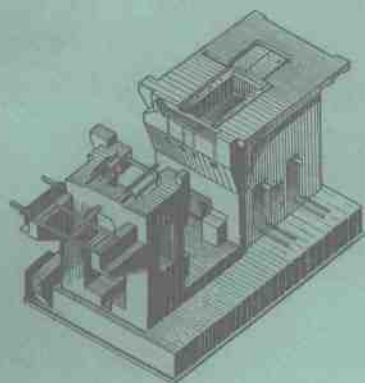




〔苏联〕A·E·阿巴施泽 著

金 楠 敏 译

潘 世 达 校

汽轮机基座动力学

中国工业出版社

汽 輪 机 基 座 动 力 学

[苏联] A·И·阿巴施泽 著

金 辅 敏 譯
潘 世 达 校

本书阐述作者根据理论和试验而拟定的，汽轮发电机构架式混凝土基座的振动和强度计算新方法，以及这些基座的实物试验问题。

本书供从事火力发电厂设计、施工和运行的工程师和技术人员阅读。

А. И. Абашидзе

**ДИНАМИКА ФУНДАМЕНТОВ
ПАРОВЫХ ТУРБИН**

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1960

* * *

汽轮机基座动力学

金 輔 敏 譯

潘 世 达 校

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑（北京外月松南贤房）

中国工业出版社出版（北京东便门大街10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{2}$ ·印张 $4 \frac{3}{16}$ ·字数90,000

1964年3月北京第一版·1964年3月北京第一次印刷

印数0001—3,361·定价（科七）0.85元

*

统一书号：15165·2902（水电-393）

近代汽輪发电机的基座是一項复杂的构筑物，对它有影响的不仅是汽輪发电机重量的靜力荷載，而且还有运行时产生的动力荷載。这种基座的計算是火力发电厂构筑物全部設計中极重要的阶段。

現在，所有的基座計算法是以少量試驗資料为基础的，而且这些資料是在小型机組上試驗取得的，此外，所采用的測量仪表也不完善；所以它不能真实地反映出基座的实际工作情况。

本书闡明了我們拟定的基座計算法，这种方法估計到基座工作的实际条件。这种計算法是以梯比利斯建筑及水力科学研究院* (ТНЦСТЭИ) 所进行的理論和試驗研究作为根据的。無論是在現有发电厂的汽輪发电机上，或在實驗室条件下都进行了試驗。

作者对梯比利斯建筑及水力科学院的工作人員 П. А. 古凡捷技术科学副博士和 В. Ф. 罗西捷工程师，在編著本书时給予的直接帮助，以及对 С. А. 別倫斯坦提出宝貴意見和參加校訂工作深表感謝。

作 者

* 該院以 A.B. 維吉尔命名，下同。——譯者

目 录

前言

緒論	1
第一章 試驗研究	8
1. 試驗方法和設備	8
2. 实物試驗	17
第二章 計算方法的基本原理	34
3. 确定固有振動頻率的計算簡圖	34
4. 振動系数	43
5. 干扰力和动力荷載	51
第三章 基座計算	63
6. 确定位移的新方法	63
7. 用分解法确定固有振動頻率	77
8. 基座結構的动力計算	91
9. 构造要求	97
第四章 計算实例	100
10. 基座的几何特性和靜荷載	100
11. 固有垂直振動頻率的确定	103
12. 固有水平振動頻率的确定	106
13. 纵向固有振動頻率的确定	111
14. 纵梁共振的驗算	117
15. 发电机下面纵梁共振的驗算	120
16. 干扰力和其撓度	120
17. 强迫振動的計算	123
18. 强度計算时采取的荷載	126
参考文献	129

汽輪发电机基座不但承受靜力荷載，而且承受动力荷載，后者当汽輪发电机基座在共振区运行时須特別考虑。最初，考虑基座动力作用的方法是在計算时将汽輪发电机的重量增加四倍(文献1)。这种計算方法虽然迫使建成的基座很龐大，但是在采用低速汽輪发电机組(1500轉/分以下)的一段时间內还是采用了。因为用这种方法計算的基座，其固有振动頻率与机組工作轉速相差很大，因而未出現过共振現象。随着汽輪机組轉速的增加，基座开始出現共振。在这种情况下就必须对基座进行动力計算。就这一点发表著作的有海格尔、爱賴尔斯、貝也尔等人。其中某些用俄文翻譯刊登在E.И.尼古拉校訂出版的汇编中(文献2)。

在1930~1931年，A.斯比尔盖尔曾提出基座固有振动計算方法(文献3)。在1933年发表了E.И.尼古拉的著作(文献4)，他对构架式基座固有水平振动的頻率提出了比較簡便的計算方法，这个方法与A.斯比尔盖尔所提方法不一样，它不需要进行繁重的計算。在A.И.罗萊的著作中所介紹的确定构架式基座固有振动頻率的計算方法，它考虑了地基的彈性(文献5)。1934年，E.A.所罗維夫根据以往的試驗研究发表了汽輪发电机基座的系統化計算方法(文献6)，它包括强度計算和共振校驗两部分。此后，接着进行了一系列的試驗研究，其中包括H.И.巴夫留克、И.И.柯欽斯基、O.A.薩維諾夫(文献7和8)，其目的在于更明确說明鋼筋混凝土結構因动荷載作用而产生的一些問題，以及查明其物理特性，

吸收系数 ψ 和彈性模数 E 等的数值。

由于缺少足够的計算干扰力的試驗資料，故无法进行强迫振动計算，而仅对共振进行校核。繼續进行試驗的目的是使計算方法更趋准确，对計算作一些校正和記錄干扰力值（虽是一次近似值）。这种試驗是Л.Л.巴尔坎（文献9），O.Γ.阿尼基和B.B.馬卡利切夫（文献10和11）在运行的汽輪机組上进行的。1948年根据这些試驗研究曾采取基座强迫振动的計算方法，依照这种方法容許基座在共振条件下工作，只是其强迫振动的振幅不超过容許值。

簡言之，汽輪发电机基座計算方法的发展道路就是这样。

虽然不校核共振，而对强迫振动进行計算，使基座的計算前进一大步；可是决不能說这就是現代的基座計算方法。

現有的計算方法是以数目不多的、基本上属于小型机組或中容量机組的基座的試驗研究为根据的。进行这些試驗研究时所采用的测量仪表是不完善的，振幅仅在单独几个点上測量，也沒有对振动相位进行記錄。基座固有振动頻譜的特性資料也沒有。由于这些原因，就不可能正确提供基座在动力荷載下的工作情况。

根据这种方法算出的基座結構很笨重，而且需要过多耗費材料。尽管如此，在用这种計算方法設計出的基座上仍然出現过基座結構构件的共振現象。計算結果非但与实际情形不符，而且有时还会获得相反的結論。我們知道，汽輪发电机基座是現代火力发电厂极重要的构筑物。随着50000~100000瓩容量的汽輪发电机投入运行，作为构筑物的基座，其重要性愈益显著。因为基座結構的质量和施工的正确性無論对汽輪发电机的正常运行，或其使用期限都有决定性的意

义。此外，如果基座的結構設計得好，不仅能减小体积，而且能縮短施工日期，同时由于基座內有較大的空間尺寸，因而能保證管道及輔助設備在安裝和运行时順利进行工作。

为了拟定正确的、考虑到动力荷載的基座計算方法，首先須重新考虑計算原理，为了實現这一点，就必須在运行的汽輪机組上进行試驗研究。梯比利斯建筑及水力科学研究院的研究小組在本书作者的领导下曾进行了这些試驗。無論在具备容量为4000~100000瓩机組的現有火力发电厂內，或在專門建立的汽輪机組的模型和基座的振动台上，都进行了依照我們拟定的方法試驗。这些試驗所采用的具有高度精确性和灵敏度的現代化电子測量仪表，可以发现和說明过去研究人員所疏忽的一系列現象。

为了整理所得的試驗資料，曾采取了数学統計法，通过这种方法所得的資料既很可靠，也具有較好的理論根据。

根据所整理的資料，提出了一种新的基座計算方法。这种方法沒有前述方法的缺点，且十分符合試驗資料，并能保證基座的工作可靠性。此外在施工时不需要过多耗費材料。

这种計算方法曾被研究和采納作为設計汽輪发电机基座时的基本方法。

現代化的大型汽輪发电机的基座通常用鋼筋混凝土筑成，采用鋼筋混凝土，可使构件成一个整体結構，便于基座构件制成任何形状，并能控制基座质量的分布。所有这一切就使基座結構具有一定的动力可靠性。同时建筑鋼筋混凝土基座时金属的耗量比建筑金属基座时要少。建筑这些基座的缺点是：鋼筋工程和混凝土工程需要很多劳动力，施工期限长而且結構构件尺寸大。

建筑基座的另一种材料是金属。金属基座质輕，施工日

期比鋼筋混凝土基座短得多。其主要缺点是金属耗量多。

由于現代在装配式鋼筋混凝土方面所取得的科学成就，因而有可能提出建造装配式鋼筋混凝土基座課題。这种基座具有金属基座和鋼筋混凝土基座的全部优点。目前有一組工程师在我們的领导下結束容量为15万瓩汽輪发电机的装配式鋼筋混凝土基座的設計。这种基座的結構构件是空心的，这样就能通过用混凝土澆灌空洞的方法来改变其质量，从而能部分地調整基座的动力工作情况。

在汽輪机开始运用的一段时间內，当时汽輪机組容量不大，基座是用磚砌筑的。磚基座結構簡單，由两道平行的重力牆組成，在牆上放置支承汽輪发电机的金属梁，凝汽器放在两牆之間的地方。磚基座不象鋼筋混凝土基座和金属基座一样能有效地承受动力荷載，特別是水平动力荷載。由于磚基座不具备鋼筋混凝土基座所具备的性质，所以它們未能得到进一步的发展，只运用在容量不超过6000瓩的汽輪发电机上。

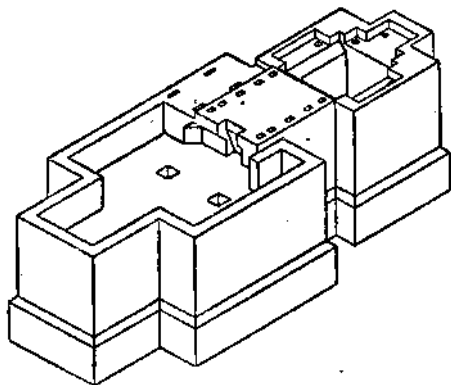


图 1 汽輪发电机大块式机座全图

根据汽輪发电机的布置，基座在結構方面可划分为下列两类：无地下室的和有地下室的。通常为小容量汽輪发电机建造的大块式基座(图 1)首先属于无地下室的基座。牆式結構和构架式結構的基座为有地下室的基座。这类基座的特征是地上部分高度达8~9米。

汽輪机組安装在上部基座板上。凝汽器和管道通常布置在上部和下部基座板之間的間隔內。牆式基座由若干橫向及纵向安置的承重牆构成。汽輪机組通过牆壁傳給下部基座底板，下部基座底板再将荷載沿土壤分布。在构架式基座內荷載由上部基座板通过构架立柱傳至下部基座板。

图 2 內示出容量为25000瓩汽輪发电机的牆式結構基座。基座为鋼筋混凝土的，由两道用橫牆或框架連接的纵牆构成。在支承汽輪机和发电机的框架之間安置凝汽器。基座地上部分高度为 8.7 米。全部基座結構由 2 米厚的巨大的鋼筋混凝土板来承托。

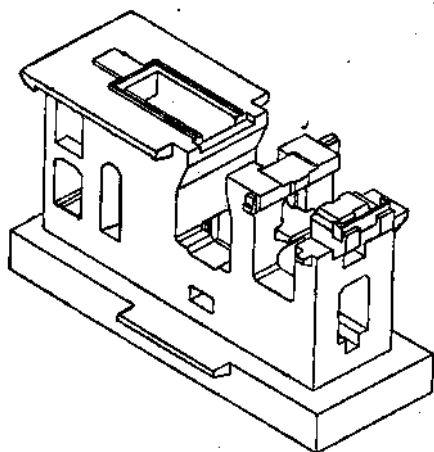


图 2 牆式結構基座全图

容量为35000瓩汽輪发电机的构架式基座(图3)由四个用纵梁联結的鋼筋混凝土橫框架构成。基座具有1.8米厚的鋼筋混凝土底板。构架式基座比牆式基座完善。由于构架式基座比牆式占地少,因而有很多空間可用來布置輔助設備。构架式結構的材料耗量較之牆式少。但是,牆式基座在其平面方向,其剛度比框架强,因而具有較高的远离汽輪发电机工作轉速的固有振動頻率。

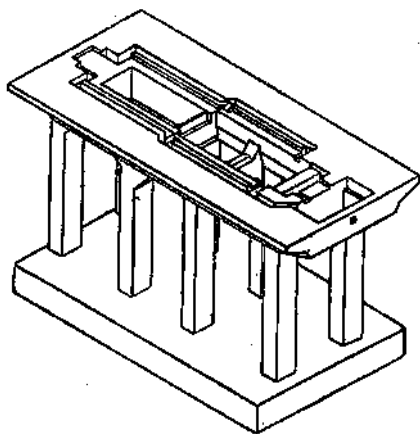


图3 构架式基座全图

由于考虑了振動情况,也考虑了結構情况,就使各种不同結構的基座得到发展,在这种情况下因而出现了构架-牆式混合結構的基座。

图4内示出容量为50000瓩的汽輪发电机的混合結構基座。在这种基座的結構中,发电机下面部分为纵牆和橫牆体系。

容量为100000瓩的汽輪发电机的基座示于图8内。这种

基座，虽然具有巨大的支柱，仍应属于构架式。这种基座的发电机下面部分横框架之间的纵梁得到很大发展。由于该种基座具有高次超静定，因而有利于构件之间荷载的重行分布。

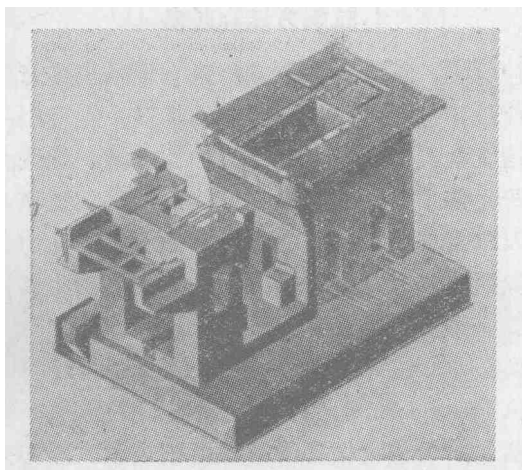


图4 容量为5万瓩的汽轮发电机的混合结构基座

以上叙述的构架式基座的全部情况，说明它比其他各种型式的基座优越。因此能说，在汽轮机制造发展的现代条件下，这类基座是最有效最适合的结构。

第一章 試驗研究

1. 試驗方法和設備

如緒論所述，正確的計算方法只有根據很多充分說明基座在動力荷載作用下工作性質的試驗資料才能得出，所以在運行的汽輪發電機的基座上進行了一些試驗。這些試驗的目的首先是研究整個基座或其各不同構件，在隨頻率與振幅而變化的及因汽輪發電機轉子的不平衡而引起的動力荷載作用下的振動性質；其次是查明基座本身的主要動力特性，為此錄下基座固有振動頻譜。

振幅和振動相位利用蘇聯動力檢修公司設計的БИП-3型平衡測量儀（圖5）來測量。測量儀器的主要部分是測量元件，它包括專門的帶調相器的陰極射綫式示波器和振動發送器。發送器（圖6）具有環形磁鐵1，其內裝置圓柱形鐵芯2。在衬筒上套上極靴3。在鐵芯和極靴之間間隙中放置吊在兩個彈簧5上的綫圈4。

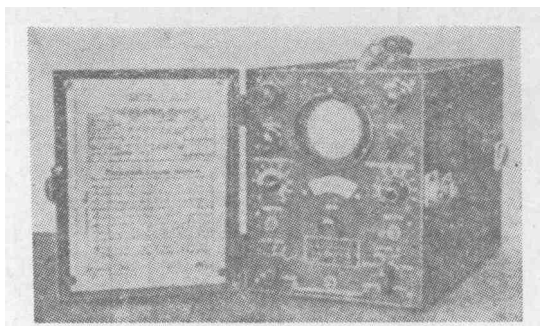


圖5 БИП-3型平衡測量儀的全圖

測量順序敘述于下。將發送器放置在振動面上。在振動時發送器產生與振動速度成比例的電動勢，電動勢在改變，同時通過積分電路送至電子射線管的放大板。

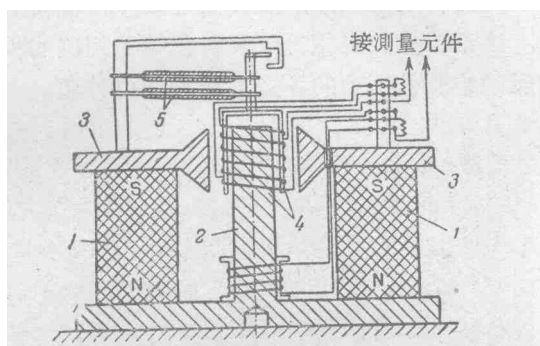


圖 6 БМТ-3 測量儀的發送器

在示波器屏上出現與所研究振動形式相符的電動勢振動波形。電動勢振幅是由示波器屏的刻度標測得的，並且利用其比例刻度標來確定此點的振幅。為了取得比例刻度標，將儀表放在振動台上校準。校準結果在其說明書中加以說明。

這種儀表可測定振動時的振動頻率、速度和加速度。

上述儀表的主要優點是能測定振動面各點的相對振動相位移。相位移可用兩種方法測定：

第一種方法是利用相位發送器(圖 7)和相位表所組成的同步結綫系統；在這種情況下同步機的轉子與汽輪發電機轉子機械相連；

第二種方法的結綫系統與上同，但利用所研究的汽輪機組的發電機靜子來代替相位發送器。振動發送器產生的電動勢傳至示波器管。來自同步發送器或發電機的電動勢也送至此管。這些電動勢具有相同的頻率，但隨相位移動，因此在

示波器屏上形成李沙育波形。旋轉調相器，使李沙育波形变为通过示波器刻度标第一和第三象限的直綫。在調相器刻度标上取得讀数，它表示发电机轉子与測量点之間相位的位移值。将发送器移至另一点，重复上述工序，能得另一相位移的数值。这不仅能測定相对于发电机轉子相位的相位移值，而且还能确定測量振动的各点之間的相位移值。

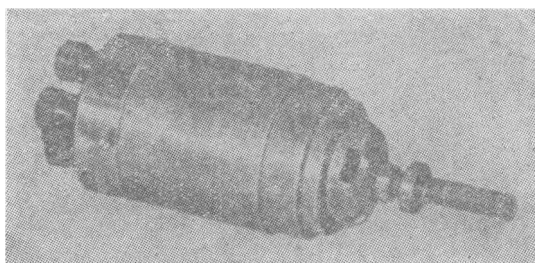


图 7 相位发送器

第一种測量系統可录下任何轉数的相位移值，而第二种仅录下与50赫芝振动頻率相当的发电机轉数下的相位移值。振动发送器綫圈的固有振动頻率在8~10赫芝範圍內。

該仪表可測量的振动参数在15~200赫芝的範圍內，而測量位移的双倍振幅則在5~1200微米的範圍內。在上述範圍內位移幅度的測量誤差应不大于 $\pm 5\%$ ，而在最大放大系数时幅度讀数的精确度为 ± 1 微米。相位移的測量誤差不超过 $\pm 3^\circ$ 。

在轉子轉速由900至3000轉/分分級变化时，每隔300轉/分測量一次基座和其結構、构件的振幅和振动相位。在个别情况下是在轉子轉速超过工作速度（达3200轉/分）时进行測量的。

振动是沿着柱高，悬臂上纵梁和横梁的长度以及柱子底

部的底板来进行测量的。若柱子之间具有附加联杆时，还须测量这些联杆的振动。图8内示有容量为10万瓩的汽轮发电机的基座，其上标出各振动测量点。

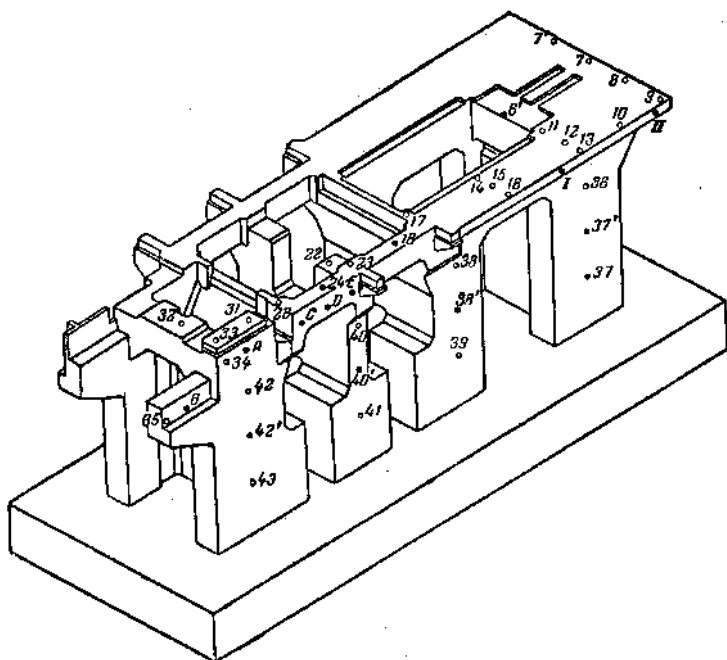


图8 基座振动测点的布置示例

在一系列试验中，测量是在汽轮发电机中心线两侧对称进行的。在基座的结构构件上布置测量点时，应使基座的振动过程能获得完全的反映。振幅和振动相位是在垂直方向、横向和纵向进行测量的。这样便于找出基座振动的空间图。同时按照上述方向测量汽轮机和发电机的轴承振动（在图8内这些测量点用数字1和6标出）。在个别情况下测量是在汽轮机组安装平板上进行的。振动依照表1的格式记录。

表 1 汽輪发电機軸承和基座的振動測量記錄表

汽輪发电機編号		容 量,	轉 数	測 量 面		振 幅 和 振 动 相 位 的 振 动 測 量 地 点																				基座底板																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
						軸 承		軸承下面縱梁的				柱					悬 臂																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
				汽輪机	发电 机	的 橫 梁		中 心	頂 部	中 部	底 部	部	部	部	部	部		部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部	部